http://www.kim.or.kr/

2026 대한금속·재료학회 추계학술대회 초록집

[공식채널QR]

2026.10.28 WED - 30 FRI

대전컨벤션센터

주최 : (사)대한금속 · 재료학회

후원 : POSCO, 현대제철, 세아제강, 동국제강,
신양금속공업, 두산에너빌리티, 테스코(주),
대전관광공사



KIM 대한금속·재료학회
THE KOREAN INSTITUTE OF METALS AND MATERIALS

대한금속·재료학회

창립 80주년 기념행사 초대

ANNIVERSARY 80 YEARS
THE KOREAN INSTITUTE OF METALS AND MATERIALS

2026. 10. 29. (목) 17:30

장소 | 호텔 ICC 컨벤션홀(3층)
대전광역시 유성구 엑스포로123번길 55 | **042-866-5100**

초대의 글
INVITATION

존경하는 대한금속 · 재료학회 회원 여러분과 내외 귀빈 여러분,
대한금속 · 재료학회는 2026년도 정기총회 및 추계학술대회에 즈음하여 창립 80주년을 기념하는 뜻깊은 행사와 만찬 자리를 마련하였습니다.
우리 학회는 1946년 창립 이래 금속공학을 넘어 재료과학 전반으로 학문적 지평을 넓히며, 대한민국 소재 산업과 과학기술 발전의 든든한 기반으로 자리매김해 왔습니다. 이러한 성과는 학회를 이끌어 오신 선배 회원님들과 연구 · 산업 현장에서 함께해 주신 모든 회원 여러분의 헌신과 노력 덕분입니다.
창립 80주년은 지난 성취를 되돌아보고 새로운 도약과 미래를 준비하는 출발점입니다. 우리 학회는 산 ·학 · 연 · 관이 함께 지혜를 모으는 교류의 장으로서 미래 세대와 산업 현장이 함께 성장하는 학술 생태계를 만들어가겠습니다.
지난 80년의 역사를 함께 기념하고 새로운 비전을 나누는 자리에 부디 참석하시어 자리를 빛내 주시기 바랍니다.

사단법인 대한금속·재료학회
제56대 회장 **김형섭** 올림

행사 안내
PROGRAM

1부 정기총회
17:30 ~ 18:20

사회 황병철 총무이사

- 개회 및 인사말 – 대한금속 · 재료학회 회장 김형섭
- 2026년도 회무 보고
- 세입 · 세출 가결산 및 예산안 심의
- 2027년도 임원 선출 및 인준
- 학회상 시상

2부 창립 80주년 기념식
18:20 ~ 20:00

사회 김택수 부회장, 정은진 학술이사

- 개회 및 내빈 소개
- 귀빈 축사
- 학회 80년 발자취 및 발전전략
- 학회 미래 비전 선포
- 축하 케이크 커팅 및 기념 촬영
- 만찬

오시는 길

기차	대전역	707번 → DCC종점 하차 / 정부청사역 하차 후 618번 환승 / 20분
	서대전역	618번 → 스마트시티5단지 하차 / 20분
고속버스	대전복합터미널	102번 → 정부청사역 하차 후 618번 환승 / 20분
	유성복합터미널	121번 → 대전컨벤션센터 하차 / 20분

※ 교통 상황에 따라 이동 경로와 소요시간이 달라질 수 있습니다.

행사 문의 | 대한금속 · 재료학회 사무국 02-557-1071 | kim@kim.or.kr *사전등록자에 한해 입장 가능

KIM 대한금속·재료학회
THE KOREAN INSTITUTE OF METALS AND MATERIALS
2026추계학술대회
2026년 10월28~30일

2026 Fall Conference of the Korean Institute of Metals and Materials

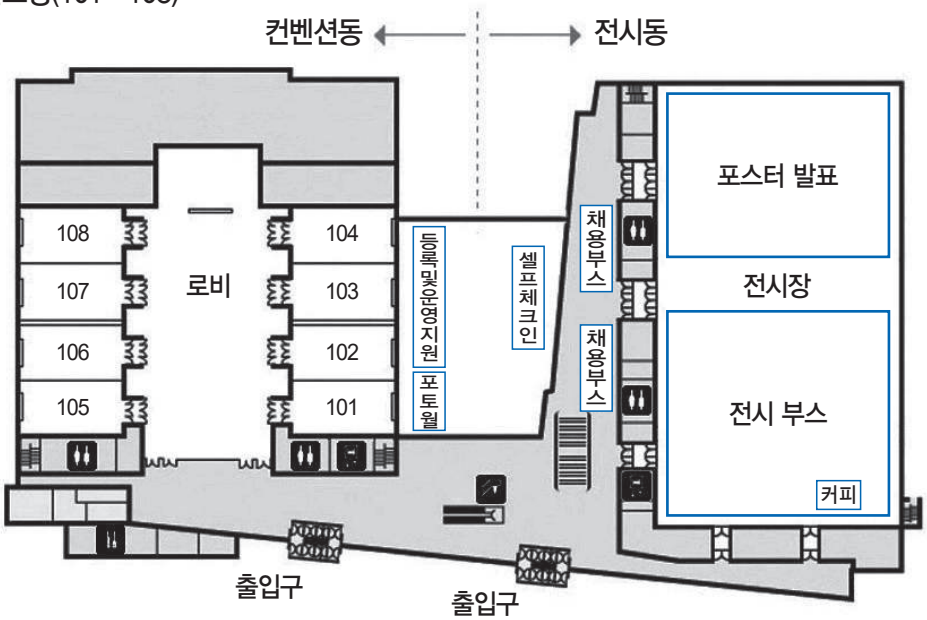
초록집 목차

+ 발표장 안내도 2
+ 행사 및 발표 진행 안내 3
+ 추계학술행사 행사 일정 5
+ 구두 발표일정 12
+ 포스터 발표일정 60
+ 구두 발표 91
+ 포스터 발표 385
+ 발표자 색인 587
+ 2025년도 추계 학회상 수상자 592
+ 포스터배치 594
+ 부스배치 597
+ 경품 추첨 안내 599

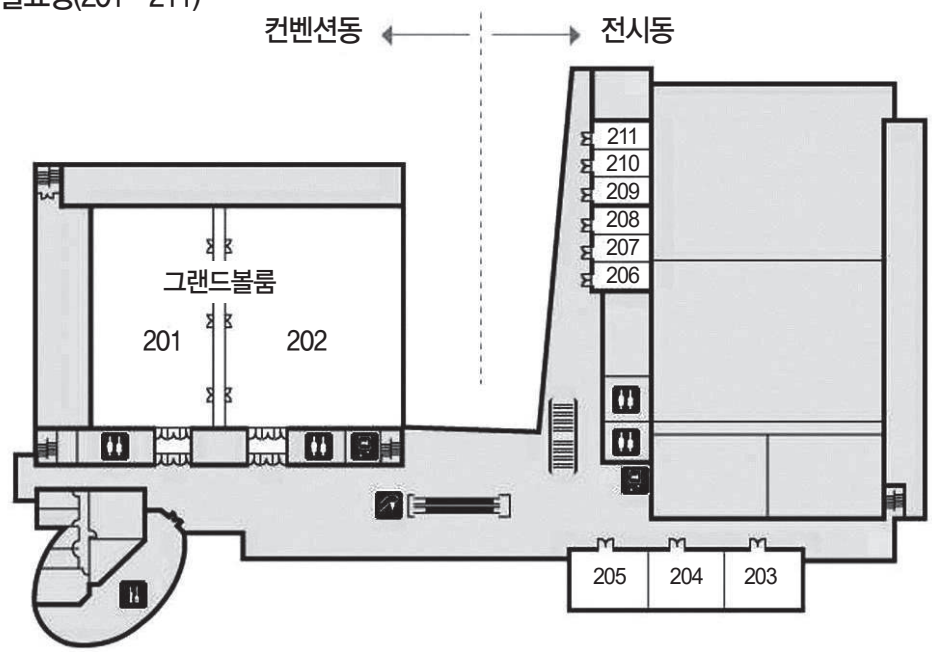
발표장 안내도

대전컨벤션센터

1F 등록지원 및 운영 본부, 셀프체크인(명찰), 경품추첨, 채용부스, 포스터 발표, 전시부스, 커피 (전시장), 구두발표장(101~108)



2F 구두발표장(201~211)



3F 구두발표장(컨퍼런스홀)

※ 중식 및 총회/학회상 시상식/ 80주년 기념행사는 ICC호텔 3층 컨벤션홀에서 진행 됩니다.(도보 5분 이내)

행사 및 발표 진행 안내



❖ 대회 기간 : 2026년 10월 28일 수요일 ~ 10월 30일 금요일, 3일간
❖ 대회 장소 : 대전컨벤션센터(DCC)
❖ 등록 기간 : 2026년 8월 10일(월) ~ 10월 23일(금) 17:00
– 위의 등록 기간 안에 신청 및 납부까지 완료 되셔야 합니다. 미납부 시 신청 내역은 삭제 됩니다.
– 온라인 등록만 진행하며, 당일 대면등록은 진행하지 않습니다.
❖ 학술대회 등록비

구분	1차등록 (8월 10일~10월 2일)		2차등록 (10월 6일~10월 23일)	
	회원	비회원	회원	비회원
일반	24만 원	30만 원	26만 원	32만 원
학생	15만 원	16만 원	18만 원	19만 원

※ 등록 취소 및 환불은 10월 23일(금)까지 가능합니다.
※ 10월 28일(수)~30일(금) 중식 및 10월 29일(목) 총회 석식 만찬이 포함되어 있습니다.(석식 만찬은 사전 신청자에 한해 참석 가능)
※ 주차권은 제공되지 않으므로, 개별 정산 부탁드립니다.
※ 2차등록 마감일 이후에는 학술대회 기간인 28(수)~30(금)에 온라인으로만 등록이 오픈되며, 참가 등록비는 32만원 단일가로 적용됩니다.
※ 만 65세 이상 정회원의 경우 등록비가 면제되오니, 참가를 희망하시는 분께서는 10월 23일까지 kimhak@kim.or.kr로 신청해 주시기 바랍니다.

구두세션 안내

❖ 구두 발표자료 준비
– 발표자료는 개인별로 이동용 저장 장치에 담아 오시기 바랍니다.(MS오피스)
– 발표자료는 휴게시간을 이용하여 발표장 노트북에 미리 옮겨 두시기 바랍니다.
– 강연장에는 연사용 노트북이 준비되어 있으며, 개인 노트북 연결 사용은 불가합니다.
– 발표자께서는 발표시간 20분 전까지 입장을 하셔야 합니다.

❖ 구두 발표 시간
– 일반발표: 15분 발표, 10분발표 후 5분간 질의응답으로 진행
– 초청강연: 20분~40분 (질의 및 응답 5분 포함)
※심포지엄의 발표시간은 심포지엄 별로 발표시간이 다르게 배정 됨.

포스터세션 안내

– 포스터 발표 자료는 A0(841 x 1189) 크기로 준비해 주시기 바랍니다.
– 포스터 보드판 상단에 발표 번호가 마킹되어 있으며, 본인 번호에 부착해주시기 바랍니다.
– 포스터 발표 부착물은 첫 장에(또는 서두에) 발표제목, 발표자 성명, 발표자 재직처가 명시될 수 있도록 준비 바랍니다.
부착은 투명테이프로만 할 수 있으며, 행사장 내에 비치된 부착 물품(투명테이프)을 이용해 주시기 바랍니다.
– 포스터 발표 자료는 오전 10시 이전에 부착해 주시고, 발표자 출석체크는 오전 10시에 부착된 발표자료로 출석을 체크합니다.
– 포스터 발표 자료는 서두에 발표제목, 발표자 성명, 발표자 재직처가 명시될 수 있도록 준비 바랍니다.
– 포스터 질의 및 응답시간에는 본인 발표 포스터 앞에 정위치 하여야 합니다.
– 포스터 발표 자료는 세션종료 후 15분 이내에 탈착해야 하며, 다음 발표준비를 위해 15분 이후 발표 자료는 임의 탈착 후 패기 처리됩니다.
(보관 불가)

학생구두발표 및 학생포스터발표 우수상 시상안내

– 학생구두발표에 대해서 심사를 거친 후 우수 구두발표를 선정하여 시상을 하게 됩니다.
– 학생포스터발표에 대해서 심사를 거친 후 우수 포스터발표를 선정하여 시상을 하게 됩니다.

좌장위원, 포스터 심사위원 출석 확인

– 좌장위원 : 좌장위원은 해당 발표장에 20분전에 입실 해 주시고 발표장 운영 요원에게 출석을 확인 해 주시기 바랍니다.
– 포스터 심사위원: 포스터 심사위원은 1층 포스터 운영 부스로 오셔서 출석을 확인 해 주시기 바랍니다.

행사 및 발표 진행 안내

셀프 체크인 운영 안내
(참가자 명찰 셀프 출력)

총 3대의 셀프 등록대가 운영되며, 명찰 인쇄 후 재출력은 불가하오니 분실에 유의해 주시기 바랍니다.
(현장 지원 스태프가 상주 예정)

☑ 행사 전날(10월 27일, 화) 저녁에 참가 등록을 완료하신 분들께 QR코드 문자를 발송드립니다.
☑ 현장에서는 해당 QR코드 또는 등록자 휴대폰 번호를 이용하여 명찰을 출력하실 수 있습니다.

❖QR검색–메인 화면



❖QR검색–참가확인및프린트



❖휴대폰검색–메인화면



❖휴대폰검색–참가확인 및 프린트



추계학술행사 행사 일정



10월 28일 수요일

시간	행사 일정	비고
08:00–18:00	참가자 명찰수령(셀프 출력)	1층 등록대
08:30–18:00	아이돌봄 서비스 접수	호텔ICC 컨벤션 A홀(2층)
08:30–12:00	구두세션 발표	각 발표장
10:00–17:00	포스터세션 발표	1층 전시홀
09:00–18:00	전시부스 홍보 진행	1층 전시홀
11:30–13:00	점심시간	호텔ICC 그랜드볼룸, 컨벤션홀(3층)
13:00–13:30	포스터 세션 질의 및 응답시간	1층 전시홀
13:30–18:00	구두세션 발표	각 발표장
18:30–20:00	학회상 수상자 및 역대회장 초청만찬	호텔ICC 컨벤션 C홀(2층)

10월 29일 목요일

시간	행사 일정	비고
08:00–18:00	참가자 명찰수령(셀프 출력)	1층 등록대
08:30–18:00	아이돌봄 서비스 접수	호텔 ICC 컨벤션 A홀(2층)
08:30–12:00	구두세션 발표	각 발표장
09:00–18:00	전시부스 홍보 진행	1층 전시홀
10:00–17:00	포스터 세션 발표	1층 전시홀
11:30–13:00	점심시간	호텔ICC 그랜드볼룸, 컨벤션홀(3층)
12:40–13:00	경품 추첨	1층 로비
13:00–13:30	포스터 세션 질의 및 응답시간	1층 전시홀
13:30–17:10	구두세션 발표	각 발표장
17:30–19:00	총회 / 학회상 시상식 / 80주년 기념행사	호텔ICC 컨벤션홀(3층)
19:00–20:00	총회 만찬	호텔ICC 컨벤션홀(3층)

10월 30일 금요일

시간	행사 일정	비고
07:40–12:00	참가자 명찰수령(셀프 출력)	1층 등록대
08:00–12:00	오전 구두세션 발표	각 발표장
09:00–15:00	포스터 세션 발표	1층 전시홀
09:00–13:00	전시부스 홍보 진행	1층 전시홀
11:30–13:00	점심 식사	호텔ICC 그랜드볼룸, 컨벤션홀(3층)
12:40–13:00	경품 추첨	1층 로비
13:00–13:30	포스터 세션 질의 및 응답시간	1층 전시홀
13:30–16:30	오후 구두세션 발표	각 발표장

발표일정

10월 28일(수) 발표 일정

- 총 진행: 이기안, 이선영 학술부회장
- 구두 및 포스터세션 진행위원: 김세훈, 김주영, 박원일 학술이사
- 학생구두발표 우수상 및 학생포스터발표 우수상 선정위원: 김세훈, 김주영, 박원일 학술이사, 류욱하, 유상우, 손석수 학술위원
- 튜토리얼 진행위원: 정은진, 박원일 학술이사

발표장 / 시간	101호	105/6호	103호	104호	102호	107호	108호	201호	202호	204호	205호	206/8호	209/11호	컨퍼런스홀
08:00~18:00	행사 등록													
08:30~12:00	가공-표면처리	적층제조 및 분말	학생세션	표면계면	철강A-제선, 제강 환경 에너지	철강B-압연, 강종개발 후처리	상변태	알루미늄	반도체	용접 및 접합	마그넷	에너지재료	미래 원자력재료 심포지엄	튜토리얼 세션 (09:00~)
11:30~13:00	점심 식사(ICC 호텔 3층 그랜드볼룸, 컨벤션홀)													
13:00~13:30	포스터 발표 질의 및 응답시간(1층 전시홀)													
13:30~18:00	차세대 핵융합 디버터용 재료 개발 심포지엄	적층제조 및 분말	학생세션	한국형 수소환원제철 실증기술개발 심포지엄	철강A-제선, 제강 환경 에너지	철강B-압연, 강종개발 후처리	상변태	저탄소 알루미늄 심포지엄	제35회 피로 및 파괴 심포지엄	타이타늄	제 22 회 중성자 및 방사광 X-선 이용 금속 및 나노 구조 재료 분석 국제 심포지엄	여성분과	원자력재료	N,H 재료강도 및 소성가공 기술의 과거, 현재 및 미래 심포지엄

발표일정



10월 29일(목) 발표일정

◈ 총 진행: 이기안, 이선영 학술부회장
◈ 구두 및 포스터세션 진행위원: 정연식, 박은수, 허윤욱 학술이사
◈ 학생구두발표 우수상 및 학생포스터발표 우수상 선정위원: 정연식, 박은수, 허윤욱 학술이사, 전태성, 성효경, 김태훈 학술 위원

발표장 / 시간	101호	105/6호	103호	104호	102호	107호	108호	201호	202호	204호	205호	206/8호	209/11호	컨퍼런스홀
08:00~18:00	행사 등록													
08:30~12:00	가공-열처리	적층제조 및 분말 II	재료분석	복합재료	가공-소성가공	WISET 여대학원생 공학연구팀제 결과발표대회	제26회 소재부품 안전 및 신뢰성 심포지엄	104회 철강기술 심포지엄 -미래산업이 요구하는 철강 기술: 신수요 산업 대응 강종개발 전략 및 과제	EML 우수논문 특별 심포지엄	고온재료	이차전지 원료소재	타이타늄 기술 및 산업 동향 심포지엄	항공엔진 구조물용 고강도 경량/내열 소재 · 부품 심포지엄	제7회 수소경제 구현을 위한 수소 운송 및 저장 소재 심포지엄 ——— 수소재료 (10:30~)
11:30~13:00	점심 식사(ICC 호텔 3층 그랜드볼룸, 컨벤션홀) / 경품 추첨(1층 로비, 추첨시간: 12:40)													
13:00~13:30	포스터 발표 질의 및 응답시간													
13:30~17:10	수소 및 청정에너지 환경 대응 표면 · 계면 제어 소재기술	1st Global Symposium on Additive Manufacturing & Powder Meterallurgy	제25회 KIM-JIMM 심포지엄	학생분과 심포지엄	차세대 디스플레이 소재 · 소자 융합 기술 심포지엄	N,H-Int. East Asia Symposium on Semiconductor Reliability: Celebrating the 80th Anniversary of KIM	재료강도	104회 철강기술 심포지엄 -미래산업이 요구하는 철강 기술: 신수요 산업 대응 강종개발 전략 및 과제	학회상 수상 기념강연	고온재료	비철금속	타이타늄 기술 및 산업 동향 심포지엄	항공엔진 구조물용 고강도 경량/내열 소재 · 부품 심포지엄	수소재료
17:30~19:00	총회/ 학회상 시상식/ 80주년기념행사(호텔 ICC 3층 컨벤션홀) *사전등록자에 한해 입장 가능													
19:00~20:00	총회 만찬(호텔 ICC 3층, 컨벤션홀)													

발표일정

10월 30일(금) 발표 일정

◈ 총 진행: 이기안, 이선영 학술부회장
◈구두 및 포스터세션 진행위원: 박현순, 심재혁, 안병민 학술이사
◈학생구두발표 우수상 및 학생포스터발표 우수상 선정위원: 박현순, 심재혁, 안병민 학술이사, 설재복, 김문조, 조지웅 학술위원

발표장 / 시간	101호	105/6호	103호	104호	102호	107호	108호	201호	204호	206/8호	209/11호	컨퍼런스홀
08:00~11:00	행사 등록											
08:00~12:00	생체재료	수소재료	고엔트로피 합금	역학측정	인공지능 재료과학	마그네슘	나노 융합소재	전산재료 과학	집합조직 및 미세조직 제어를 통한 차세대 구조재료 설계기술	소프트 소재	제15회 터빈 소재 및 내열합금 심포지엄	항공재료
11:30~13:00	점심 식사(ICC 호텔 3층 그랜드볼룸, 컨벤션홀) / 경품 추첨(1층 로비, 추첨시간:12:40)											
13:00~13:30	포스터 발표 질의 및 응답(1층 전시홀)											
13:30~16:30	생체재료		고엔트로피 합금	역학측정	인공지능 재료과학	마그네슘		전산재료 과학	집합조직 및 미세조직 제어를 통한 차세대 구조재료 설계기술 ——— 집합조직 (15:00~)	소프트 소재	제15회 터빈 소재 및 내열합금 심포지엄	항공재료

발표일정



포스터 발표 일정

*포스터 배치는 일정집 98페이지 참고(발표장: 1층 전시장)

날짜 / 시간	10월 28일(수)	10월 29일(목)	날짜 / 시간	10월 30일(금)
부착시간 09:00~9:50 발표시간 10:00~17:00 질의응답 13:00~13:30	P1 학생세션(학부생 발표) P2 표면처리 P3 에너지 재료 P4 반도체 P5 상변태 P6 표면계면 P7 원자력재료 P8 용접 및 접합 P9 알루미늄 P10 마그넷	P11 적층제조 및 분말 P12 비철금속 P13 철강(제선, 제강, 환경 에너지) P14 철강(압연, 강종개발, 후처리) P15 열처리 P16 이차전지 원료소재 P17 재료강도 P18 재료분석 P19 소성가공 P20 복합재료 P21 주조 및 응고 P22 열전 P23 디스플레이재료 P24 타이타늄 P25 고온재료	부착시간 08:00~8:50 발표시간 09:00~15:00 질의응답 13:00~13:30	P26 생체 재료 P27 수소재료 P28 고엔트로피 합금 P29 역학측정 P30 인공지능재료과학 P31 마그네슘 P32 나노융합소재 P33 전산재료과학 P34 소프트소재 P35 항공재료 P36 집합조직

2026 추계학술대회
TUTORIAL SESSION

물질에서 문명까지, 재료로 읽는 과학과 미래

10월 28일 (수) 9:00-12:00
DCC 3층, 컨퍼런스홀

세상의 과학과 문명은 물질과 재료에 대한 이해에서 시작되었습니다.

본 튜토리얼에서는 물질의 존재 원리에서 출발하여 “왜 이런 현상이 일어나는가?”를 이해하기 위한 과학적 사고방식을 살펴봅니다. 이어 청동기와 철기를 거쳐 미래의 수소 환원 제철에 이르기까지, 재료가 기술과 문명의 변화를 어떻게 이끌어 왔는지 조망합니다.

물질의 본질에서 문명의 미래까지, 재료과학을 하나의 흐름으로 만나보는 시간입니다.

강연 1



한승전 책임연구원
(한국재료연구원)

세상의 과학은 모두 물질과 재료로 통한다
- 물질의 관점에서 이해하는 과학적 사고와 논리 -

학력사항
1990 : 부산대학교 무기재료공학과 학사
1997 : KAIST 재료공학과 박사

경력사항
1997 - 현재 : 한국재료연구원 책임연구원
2002 : 일본 오이타대학교 비상근 강사
2018, 2022, 2025 : 일본 도호쿠대학교 금속재료연구소 초빙교수

강연 2



이준호 교수
(고려대학교)

신화에서 수소환원제철까지:
- 영화 〈오디세이〉로 읽는 철강의 과거, 현재, 그리고 미래 -

학력사항
1997 : 연세대학교 금속공학 학사
1999 : 연세대학교 금속공학 석사
2002 : 도쿄대학 금속공학 박사

경력사항
2005 - 현재 : 고려대학교 신소재공학부 교수
2007 - 2023 : 포스코 철강 전문교수
2025 - 현재 : 포스코그룹 초격차기술 특임교수

KIM 대한금속·재료학회
THE KOREAN INSTITUTE OF METALS AND MATERIALS

2026 추계학술대회
TUTORIAL SESSION

강연 1

09:00 ~ 10:30

세상의 과학은 모두 물질과 재료로 통한다

- 물질의 관점에서 이해하는 과학적 사고와 논리 -

한승전 책임연구원 (한국재료연구원)

세상의 다양한 자연현상과 과학기술은 물질의 존재와 변화에서 출발한다. 본 강연에서는 원소의 생성에서 시작하여 원자와 분자의 결합, 물질의 상태와 구조, 빛과 물질의 상호작용, 화학반응과 촉매 등 다양한 사례를 통해 물질과 재료를 바라보는 기본적인 사고방식을 소개한다.
특히 “왜 이러한 현상이 나타나는가?”라는 질문에서 출발하여 물질의 구조와 성질, 그리고 재료의 기능이 어떻게 연결되는지를 살펴본다. 이를 통해 서로 다른 과학 분야가 물질과 재료라는 공통된 관점에서 연결되어 있음을 이해하고, 과학과 재료공학을 보다 쉽고 흥미롭게 바라보는 계기를 제공하고자 한다.

강연 2

10:30~ 12:00

신화에서 수소환원제철까지:

- 영화 〈오디세이〉로 읽는 철강의 과거, 현재, 그리고 미래 -

이준호 교수 (고려대학교)

크리스토퍼 놀런 감독의 영화 〈오디세이〉는 "우리의 청동기 시대가 무너지고 있다"라는 대사와 함께 신화의 황혼과 철기 시대의 새벽을 조명한다. 청동기 문명의 붕괴 위에서 탄생한 '철'은 인류를 마법과 신화의 시대에서 과학과 번영의 역사 시대로 이끈 결정적 열쇠였다. 조선의 주술적 영검함을 담았던 사인검(四寅劍)부터 현대 모빌리티의 경량화와 안전을 책임지는 초고강도 기가스틸(Giga Steel)에 이르기까지, 인류는 끊임없이 철의 한계를 확장해 왔다. 그리고 21세기 기후 위기 시대, 철강 기술은 탄소를 배출하던 전통적 제철 방식에서 물만 배출하는 궁극의 친환경 기술인 '수소 환원 제철(HyREX)'로의 문명사적 대전환을 시작하고 있다. 대한금속·재료학회 창립 80주년을 맞아 열리는 이번 튜토리얼 세션에서는 영화적 상상력과 금속공학의 역사를 교차하며, 신화의 시대를 지나 미래 지구를 구할 차세대 철강 기술의 비전과 연구 방향을 함께 탐색한다.

일　　시 : 2026년 10월 28일(수) 09:00-12:00
장　　소 : 대전컨벤션센터 3층 컨퍼런스홀
주　　최 : 대한금속·재료학회
사전등록 : 9월 7일(월)-10월 16일(금)
등록비: 회원 (일반: 5만 원, 학생: 5만 원) / 비회원 (일반: 12만 원, 학생: 10만 원)

KIM 대한금속·재료학회
THE KOREAN INSTITUTE OF METALS AND MATERIALS

ORAL SESSION I

10월 28일



가공-표면처리

위원장 : 이광석(한국재료연구원)
총무간사 : 강용준(한국재료연구원),
김준호(한국생산기술연구원), 성효경(국민대학교),
오세권(한국생산기술연구원), 이제인(부산대학교)
Room 1층 101호, 10월 28일(수)

좌장 : 이창수(충남대학교)

표면1-1 | 09:00

Influence of Carbon Bonding Configuration on the Mechanical and Tribological Properties of ta-C Coatings for High-Cycle Lithium-Ion Battery Electrode Cutting

Syed Manzar Abbas Kirmani, Ki-bum Kim*(Chungbuk National University, Cheongju, Republic of Korea)

표면1-2 | 09:15

Heterogeneous TiN-based core shell nanoprecipitates suppress defects and optimize the properties in laser-clad FeMnCoCr MHEA composite coating.

Dadong Jie(포항공과대학교,Jiangnan University),Meiping Wu(Jiangnan University),Hyoung Seop Kim*(포항공과대학교)

표면1-3 | 09:30

DICTRA 시뮬레이션을 이용한 Zn 도금 Si 함유강의 계면 Si 농화 및 Fe-Zn 상호확산 거동 해석

김성훈*, 박형권, 이진종, 김경원, 이창훈(한국재료연구원),박영도(동의대학교), 이태호*(한국재료연구원)

표면1-4 | 09:45

나노초 레이저 식각 피라미터에 따른 구리 표면 구조체의 풀비등 열전달 성능에 미치는 영향

김준하, 김규낙(한국재료연구원,경상국립대학교),안지혁(한국재료연구원),강성규(경상국립대학교),유연우*(한국재료연구원)

표면1-5 | 10:00

The development of alloys including ta-C nanocomposite coatings by using amorphous-based multi-component alloys

Kyoung Il Moon*, Hae Won Yoon, Byoungho Choi, Kyong Jun An, Gi-Hoon Kwon(Korea Institute of Industrial Technology),Sung Chul Cha(Hyundai Motor Group-Hyundai Kefico)

Break Time | 10:15

좌장 : 정낙훈(삼성중공업)

표면2-1 | 10:25

해상풍력용 고강도 볼트 상용소재의 환경 내구성 평가

권홍기(포항소재산업진흥원),이승민(세아베스틸),정정진(KPF),박상원*(포항소재산업진흥원)

표면2-2 | 10:40

니켈기 초내열합금의 내산화코팅에서 반응성 원소 첨가가 고온 산화거동에 미치는 영향

조재우(한국재료연구원,부산대학교),김도현, 강용진, 박영진, 권한솔, 박훈관, 이성훈, 유연우*(한국재료연구원)

표면2-3 | 10:55

레이저 클래딩 공정으로 제조된 Ni-based MMC 코팅의 고온 마모 거동

홍성준(한국생산기술연구원,국립순천대학교),송수민, 김태범(한국생산기술연구원),이동근(국립순천대학교),조균택*(한국생산기술연구원)

표면2-4 | 11:10

표면 마찰에 따른 AISI 304 스테인리스강의 표면 특성 변화와 NaClO 환경에서의 부식 거동

이현수, 최윤석*(부산대학교),이정훈*, 조현빈(부경대학교)

차세대 핵융합 디버터용 재료 개발 심포지엄

위원장 : 홍순직(공주대학교), 류호진(한국과학기술원)
실무위원 : 강석훈(한국원자력연구원), 한흥남(서울대학교)
Room 1층 101호, 10월 28일(수)

좌장 : 강석훈(한국원자력연구원)

핵융합1-1 | 13:30 초청강연

텅스텐 기반 플라즈마 대면재 적용 차세대 핵융합로 디버터 개발 전략

권성진*, 박수현(한국핵융합에너지연구원),송상우(한국재료연구원),이동원(한국원자력연구원),조항진(포항공과대학교)

핵융합1-2 | 13:55 초청강연

차세대 핵융합 디버터용 혁신 소재 및 제조기술 개발

송상우*, 박준영, 구혜영, 양상선, 문영국, 김승현(한국재료연구원),권성진(한국핵융합에너지연구원)

핵융합1-3 | 14:20 초청강연

순수 텅스텐을 넘어: 내플라즈마 특성이 우수한 고인성 차세대 핵융합 대면소재 개발

한흥남*, 김정석, 이성민, 오철헌, 김미영, 김곤호(서울대학교),김형찬(한국핵융합에너지연구원)

핵융합1-4 | 14:45 초청강연

High Heat Flux testing and Investigation of the Thermal Stability of Plasma Facing Component incorporating Potassium-doped Tungsten

Hyoung Chan Kim*, Eunnam Bang, Taewoo Kim, Sungjin Kwon(Korea Institute of Fusion Energy),Jeongseok Kim, Heung Nam Han(Seoul National University)

Break Time | 15:10

좌장 : 문종언(국립공주대학교)

핵융합2-1 | 15:20 초청강연

금속적층제조 (L-PBF)를 통한 W/Cu 사이의 interlayer 제작

조중욱*, 이승훈(포항공과대학교)

핵융합2-2 | 15:45 초청강연

분무공정 기반 차세대 디버터 대면제용 텅스텐 합금 분말 합성 공정기술 개발 현황

구혜영*, 송상우(한국재료연구원)

핵융합2-3 | 16:10 초청강연

텅스텐 합금의 미세조직-기계적 물성 상관관계

김찬진, 박범교, 이재훈, 이용민 (경희대학교),신영각, 강건욱(연세대학교),고원석(고려대학교),이병찬*(경희대학교)

핵융합2-4 | 16:35 초청강연

Accumulation and Evolution of Irradiation Defects in BCC Tungsten: Atomistic Study

Keonwook Kang*, Hyunggyu Lee, Jungjin Cho, Younggak Shin(Yonsei University),Byeongchan Lee(Kyung Hee University)

핵융합2-5 | 17:00 초청강연

핵융합 디버터용 텅스텐 소재의 이온조사 손상 거동 및 물성 평가

강석훈*, 서주원, 서현우, 박선영, 임상엽, 진형하, 이승현, 이동원(한국원자력연구원)

적층제조 및 분말

위원장 : 홍순직(공주대학교)

총무간사 : 강민철(3D프린팅연구조합), 김정기(경상국립대학교), 문종언(공주대학교)

Room 1층 105/6호, 10월 28일(수)

좌장 : 문종언(국립공주대학교)

적층1-1 | 09:00

Defect-Informed Fatigue Behavior of Al-Mg-Zr Alloy with Increasing LPBF Productivity

Dae-Seo Kwon, Haoyue Wu, Jong-Hyeok Kwon, Dong-Kyu Kim*(Konkuk Univ.)

적층1-2 | 09:15

WAAM 공정으로 제조된 As-fabricated Al-5356의 표면 형상 및 미세조직 불균일성이 인장 거동에 미치는 영향

서예진, 박령주, 전민수, 황원구(인하대학교 신소재공학과),오민선, 감동혁(한국생산기술연구원),이기안*(인하대학교 신소재공학과)

적층1-3 | 09:30

L-PBF 공정으로 제조된 AlSi7Mg 합금 단일벽/이중벽 TPMS Lattice들의 압축 변형 거동 및 방열 특성

조호근, 박소연, 오주환(인하대학교 / Inha Univ.),안솔보름, 정현국((주)스타코 / Staco),이기안*(인하대학교 / Inha Univ.)

적층1-4 | 09:45

미세석출물 제어를 통한 적층제조 AlSi10Mg 합금의 후열처리 설계

한재연, 김준혁(국립창원대학교),이지원, 조현철(두산에너빌리티),홍현욱*(국립창원대학교)

적층1-5 | 10:00

Laser Powder Bed Fusion 공정변수가 Zr 첨가 7075 Al 합금의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향

이유진*, 김세훈, 이빈*(경희대학교)

Break Time | 10:15

좌장 : 정원종(영남대학교)

적층2-1 | 10:25

Enhanced Dynamic Deformation Response and Energy Absorption Capability of LPBF Ti-6Al-4V under High Strain Rate Loading

Amir Aghababaei(Isfahan University of Technology,POSTECH),Ali Maleki*(Isfahan University of Technology),Eun Seong Kim(POSTECH),Abbas Ghaei, Mohsen Badrossamay(Isfahan University of Technology),Hyoung Seop Kim(POSTECH)

적층2-2 | 10:40

Ti-6Al-4V 옥텟트러스 격자구조체의 미세조직에 따른 항복 이후 응력 강하 거동

차다은(경상국립대학교),박민우(서울대학교),박준영, 전찬혁, Muhammad Ishtiaq(경상국립대학교),안지혁(한국재료연구원),김종형(국립부경대학교),한흥남(서울대학교),정경재(성균관대학교),강성규*(경상국립대학교)

적층2-3 | 10:55

Cold-Sprayed Cu 적층재와 순동 판재의 냉간압연 후 기계적, 전기적 특성 비교

김두원(한국재료연구원,경상국립대학교),민경문, 박한결, 이시환(한국재료연구원),강성규*(경상국립대학교),안지혁*, 이승건*(한국재료연구원)

적층2-4 | 11:10

Initial Powder size controlled Dynamic Recrystallization pathways in Hot Deformed $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ with Stable Thermoelectric performance

GANGALA ANIL KUMAR, Babu Madavali, Ji-Won Ha, Soon-Jik Hong*(Kongju National University, Center for Advanced Materials and Parts of Powders (CAMP2))

적층2-5 | 11:25

수평연속주조 및 열간등방압성형 공정 연계를 통한 고성능 소구경 Co합금계 와이어 개발 수평연속주조 및 열간등방압성형 공정 연계를 통한 고성능 소구경 Co합금계 와이어 개발

강재영, 김대하*(포항소재산업진흥원),옥진욱(비케이엠솔),이승윤(에코에스엠)

좌장 : 어두림(한국생산기술연구원)

적층3-1 | 13:30

첨가재를 활용한 니켈계 초합금 적층제조에서의 응고균열 억제 및 기계적 물성 회복

이태규*, 이민제(국립한밭대학교)

적층3-2 | 13:45

Wire arc additive manufacturing 공정을 이용한 Hastelloy C276의 미세조직과 인장 및 고주기 피로 특성

이의종, 박소연(인하대학교),박형우((주) 비에이티 파트너스),이기안*(인하대학교)

적층3-3 | 14:00

직접용융증착법 기반 in-situ 합금화된 IN625/IN718 합금의 미세조직 및 기계적 특성 평가

권시은(경상국립대학교),서성문(한국재료연구원),김형섭(포항공과대학교),이형수(한국재료연구원),김정기*(경상국립대학교)

적층3-4 | 14:15

Binder Jetting 공정으로 적층 제조된 IN718 초내열 합금의 미세조직 및 인장 기계적 특성

임지호, 고승범, 박소연(인하대학교),정태준, 전호성(㈜자이브솔루션즈),이기안*(인하대학교)

적층3-5 | 14:30

LPBF 기반 Inconel 718 Kelvin Plate 및 Truss 격자구조의 고온 압축 및 크리프 특성

박소연, 오주환(인하대학교),송영원, 고찬영(인천항공우주산학융합원),이기안*(인하대학교)

적층3-6 | 14:45

DED로 적층한 CoCrMo/SUS316L 소재의 미세조직 과 기계적물성간의 상관관계 해석

최민호(한국생산기술연구원,서울대학교),안정환(한국생산기술연구원,연세대학교),윤준원(한국생산기술연구원,고려대학교),민경민(연세대학교),한흥남(서울대학교),이병수*(한국생산기술연구원)

적층3-7 | 15:00

LPBF 공정으로 제조된 탄소 첨가 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금의 4.2K 인장 변형 거동

천재용(한국재료연구원,충남대학교),윤성준(한국재료연구원,고려대학교),정덕현(충남대학교),장태진, 나영상*, 김영균*(한국재료연구원)

Break Time | 15:15

좌장 : 변종민(서울과학기술대학교)

적층4-1 | 15:25

L-DED로 제조된 Co-Cr-Fe-Mn-C 형상기억합금의 직접 시효에 따른 형상 기억 특성 거동

박민수, 이욱진*(부산대학교)

적층4-2 | 15:40

이중 노즐 DED로 제조된 Cr-Mo 조성 구배 Co-Cr-Fe-Ni-Mo 고엔트로피 합금 코팅의 부식 거동

이정민, 전혜원, 조성재(국립공주대학교),홍순직, 문종언*(국립공주대학교,첨단분말소재부품센터)

적층4-3 | 15:55

Enhanced Tensile Performance of Additively Manufactured CoCrFeMnNi HEA through Lamination with SAF 3207 Stainless Steel across Temperature Regimes and under Hydrogen Charging

Jalal Kangazian Kangazi, Soung Yeoul Ahn, Jae Heung Lee, Jumi Choi, Gyumi Han, Bon Woo Koo, Ho Hyeong Lee, Dong-Woo Suh, Hyoung Seop Kim*(Pohang University of Science and Technology (POSTECH))

적층4-4 | 16:10

CoCrFeMnNi 고 엔트로피 합금 분말 산소함량이 DED 공정으로 제조된 적층재의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향

백건우, 김대현, 김현중, 한채원, 김영태(국립공주대학교,첨단분말소재부품센터),김형섭(포항공과대학교),홍순직*(국립공주대학교,첨단분말소재부품센터)

적층4-5 | 16:25

Effect of Stacking Fault Segregation on Creep Strength in Additively Manufactured Superalloys

Tae Gyeong Kim, A Reum Lee, Hyun Uk Hong*(Changwon National Univ.),Won Suk Ko(Korea Univ.),Myeong Se Kim, Yo Seop Kim(KOHIPS)

적층4-6 | 16:40

LPBF를 통해 제작한 우수한 고정밀 마이크로 추력기

김래언, 김형섭*(POSTECH)

학생세션

위원장 : 신세은(한양대학교)
총무간사 : 박진웅(국립한밭대학교)
Room 1층 103호, 10월 28일(수)

좌장 : 임진수랑(부산대학교), 김지호(경희대학교)

학생1-1 | 09:00

Predicting Space Groups of Double Perovskites by LLM with Dynamic Few-Shot Learning Predicting Space Groups of Double Perovskites by LLM with Dynamic Few-Shot Learning

Jongwon Park, Inhyo Lee, Jinun Byun, Junhee Shin, Seunghwa Ryu*(Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))

학생1-2 | 09:15

CNN/GNN Surrogate Models for Phase-Field Modeling of Ferroelectric HZO Thin Films

방진현, 슈가탄 산디프, 판카즈, 차필령*(국민대학교)

학생1-3 | 09:30

건식 정전기 분체도장의 도막성장 예측을 위한 입자부착모델 개발 및 실험적 검증

서승원, 김현진, 양현진*(인하대학교)

학생1-4 | 09:45

Mg-Ca-Zn 합금계의 CALPHAD 열역학 DB 기반 미세조직 내 전기화학전위 분포 계산

김도현, 차필령*(국민대학교),김근우(홋카이도 대학교),이지영(한국과학기술연구원)

학생1-5 | 10:00

딥러닝 기반 니켈 도금 Al-Cu 레이저 용접부의 계면 물성 역추정

송기욱(성균관대학교),성현민(현대자동차),정경재*(성균관대학교)

학생1-6 | 10:15

자가 지도 학습(SSL)과 설명 가능한 인공지능(XAI)을 활용한 무방향성 전기강판의 자기적 성질 기반 결정립 크기 예측

하준서(국립부경대학교),장호성, 신선미(한국생산기술연구원),김성진(국립순천대학교),박세민*(국립부경대학교)

Break Time | 10:30

좌장 : 김효건(한양대학교), 서기완(서울대학교)

학생2-1 | 10:40

레이저 분말베드용융 Ti-6Al-4V 하이브리드 격자 단위셀의 노드 형상에 따른 국부 변형 재분배 거동

김영훈, 성효경*(국민대학교)

학생2-2 | 10:55

고온 내마모성 향상을 위한 Ti-6Al-4V/AlTiCrV$_{0.5}$Fe$_{0.5}$ 고엔트로피 합금 이종 다층재의 복합 마모 거동 연구

강민욱(아주대학교),이한성(아주대학교,Yale Univ.),정상연, 안병민*(아주대학교)

학생2-3 | 11:10

실리사이드 코팅된 Nb-16Si-22Ti-5Cr-3Al 합금의 1500℃ 산화 거동 및 면적 분율 기반 코팅 수명 예측

양하영, 김선진, 정현준, 강전준, 박준식*(국립한밭대학교)

좌장 : 김효건(한양대학교), 서기완(서울대학교)

학생3-1 | 13:30

초고강도강에서의 트램프 원소 입계편석이 수소취성 거동에 미치는 영향

이정민(한국재료연구원,동아대학교),이진종, 박형권, 박성준, 이태호(한국재료연구원),정승필(현대제철),전종배*(동아대학교),유지성*(한국재료연구원)

학생3-2 | 13:45

자동차용 초고강도강의 다양한 미세조직 구성에 따른 수소 확산 및 트랩 특성 규명

김유리, 김혜진*(한국공학대학교)

학생3-3 | 14:00

고강도 후물 장갑강의 용접재료, 개선 형상 및 입열량에 따른 미세조직-기계적 특성 상관관계 분석

전소희, 유현종, 김보민(국립한밭대학교),김상훈(국방과학연구소),이종민, 김동인, 문중식(한국화학융합시험연구원),김정한*(국립한밭대학교)

학생3-4 | 14:15

다중 패스 용접부의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 Ni의 영향

홍영오(한국재료연구원,부산대학교),박성준*, 유지성, 김경원, 조효행, 이진종, 박형권(한국재료연구원),서지석, 유동현(현대종합금속),최윤석*(부산대학교)

Break Time | 14:30

좌장 : 박진웅(국립한밭대학교), 김하은(고려대학교)

학생4-1 | 14:40

Cu 함량 변화와 초음파 처리에 따른 Fe 기반 연자성 합금 리본의 구조 및 자성 특성

강태연, 이연주, 한선구, 최현주*(국민대학교)

학생4-2 | 14:55

중간재 구조 설계를 통한 Ti/SUS304 브레이징 접합부의 계면 반응 제어 및 기계적 특성

노주림, 김동우, 김태엽, 이진규*(국립공주대학교)

학생4-3 | 15:10

CoCrNi(AlTi) 기반 중엔트로피 합금의 γ'-σ 상의 열경로 의존적 석출 거동 분석

한상윤, 박은수*(서울대학교),류채우*(홍익대학교)

학생4-4 | 15:25

결정방위와 응력모드에 따른 준안정 오스테나이트의 변형 거동 및 변형 기구별 기여도 분석

이태현, 박진흥*(서울과학기술대학교)

학생4-5 | 15:40

Influence of Na_2SO_4 Addition in Nickel Electric Furnace Slag on MgO Refractory Corrosion

Dahye Han, Yuri Kim, Il Sohn*(Yonsei University)

학생4-6 | 15:55

EBSD 기반 결정소성 RVE 하이브리드 해석을 통한 Cu-3Ti 박판의 V-굽힘 국부 변형 거동 평가

조규민(서울과학기술대학교),성낙훈, 최재일(협진커넥터),이창환, 박진흥*(서울과학기술대학교)

학생4-7 | 16:10

P-Termination-Biased Defect Tuning of Molybdenum Phosphide for Selective Hydrogen Peroxide Electrosynthesis

Jieun Seo(Sungshin Women's University),Jeong-Gyu Lee(Sungkyunkwan University),Bogeun Park(Hanyang University ERICA),Gwangsik Mun, Hanhwi Jang, Yeon Sik Jung(Korea Advanced Institute of Science and Technology),Byung-Hyun Kim*(Hanyang University ERICA),Min-Jae Choi*(Sungkyunkwan University),Hyeuk Jin Han*(Sungshin Women's University)

시상식 및 네트워킹 | 16:30

표면계면

위원장 : 박창규(서울과학기술대학교)
총무간사 : 함명관(인하대학교), 조지웅(홍익대학교)
Room 1층 104호, 10월 28일(수)

좌장 : 박창규(서울과학기술대학교)

표면계면1-1 | 08:30

Wavelength-Dependent Carrier Injection in Ag Nanomesh-Integrated Si Photodetector

JeongYeol Park, Jihoon Huh, Yohan Lee, Seung Ji Lo, Jae Hyun Kim, Narae Lee, Moonsang Lee*(Inha University)

표면계면1-2 | 08:45

Integrated Artificial Synaptic and Sigmoid Neuronal Functions in a Low-Subthreshold-Swing Cold-Source Field-Effect Transistor

Narae Lee(Inha University),Seyoung Oh, Ojun Kwon(Chungbuk National University),Jihoon Huh, Jeongyeol Park, Seung-Ji Lo, Yohan Lee, Jae Hyun Kim, Moonsang Lee*(Inha University),Byungjin Cho*(Chungbuk National University)

표면계면1-3 | 09:00

Optoelectronic Synaptic Device Based on a Graphene Quantum Dot/Monolayer WSe_2 Hybrid Heterostructure for Neuromorphic Computing

KIM JAEHYUN, Yohan Lee, Jihoon Huh, Jeongyeol Park, Seung Ji Lo, Narae Lee, Moonsang Lee*(Inha University)

표면계면1-4 | 09:15

Optically Reconfigurable Quaternary Logic in MoS2/WSe2 Heterojunction Inverters

Lee Yohan, Huh Jihoon, Park Jeongyeol, Lo SeungJi, Lee Narae, Kim Jaehyun, Lee Moonsang*(Inha University)

Break Time | 09:30

좌장 : 박형원(중앙대학교)

표면계면2-1 | 09:40

Drain-Field-Modulated Carrier Dynamics for Dual-Timescale Synaptic Plasticity in an Ambipolar WSe_2 Transistor

SEUNGJI LO, Moonsang Lee*, Jihoon Huh, Jeongyeol Park, Yohan Lee, Narae Lee, Jae Hyun Kim(Inha Univ.)

표면계면2-2 | 09:55

LC 공진 기반 미세플라스틱 검출 및 정량 분석 센서

박루빈, 이금비 *(경북대학교)

표면계면2-3 | 10:10

Opto-Electrical Dual-Input Logic based on Light-Induced Anti-Ambipolar WSe2 Transistor

Jihoon Huh, Moonsang Lee*, Jeongyeol Park, Seung-Ji Lo, Yohan Lee, Narae Lee, Jae Hyun Kim(Inha University),Su Jin Jo(Inha University)

표면계면2-4 | 10:25

Atomic-scale analysis of Low Earth Orbit satellite materials exposed to atomic oxygen

Yeon Ha Jo, Aleksander Albrecht, Se-Ho Kim*(Korea Univ.)

Break Time | 10:40

좌장 : 박창규(서울과학기술대학교)

표면계면3-1 | 10:50

온도 제어형 레이저 표면 열처리에 따른 회주철 브레이크 디스크의 미세조직 및 마모 특성

구본준, 박창규*(서울과학기술대학교)

표면계면3-2 | 11:05

PVD 나노 코팅 브레이크 디스크의 미세구조 · 화학조성 분석 및 제동/소음 특성 연구

박종성(현대자동차)

표면계면3-3 | 11:20

고온 열처리 후 절연 특성이 향상되는 규소강판용 무기 절연코팅

정창우*(현대제철)

표면계면3-4 | 11:35

재활용 알루미늄을 활용한 Al-Si 도금강판의 도금특성 및 조업성 영향

소성민*, 이재민(현대제철연구소)

표면계면3-5 | 11:50

NCM 양극의 경사형 엣지 영역의 펨토초 레이저 클리닝 및 탭 용접 특성 평가

김민혜, 박창규*(서울과학기술대학교),조지웅, 김민지(홍익대학교)

한국형 수소환원제철 실증기술개발 심포지엄

위원장 : 민동준(연세대학교)
실무위원 : 김태윤, 이예린(한국금속재료연구조합)
Room 1층 104호, 10월 28일(수)

좌장 : 양현진(인하대학교)

개회사/축사 | 13:30

민동준(연세대학교)

수소환원1-1 | 13:35 초청강연

한국형 수소환원제철 유동환원로 기술개발 현황 및 계획

이영석*, 김선영, 윤시경, 김도형, 정승우, 이원희, 김태현, 김진영, 박재훈, 신명균(포스코)

수소환원1-2 | 14:00 초청강연

무탄소 철강공정 실현을 위한 고농도 수소가스의 고온 가열 기술 개발

이수환, 오현민, 김인호, 오혁진(포항산업과학연구원)

수소환원1-3 | 14:25 초청강연

Surrogate-assisted integrated process simulation and economic assessment of multistage fluidized-bed hydrogen-based ironmaking

Min Cheol Bae, Sang Hwan Son*(Pusan National University)

수소환원1-4 | 14:50 초청강연

한국형 수소환원제철 전기용융로 기술개발 현황 및 계획

박상채*, 이상범, 이상동, 강동수, 최진석, 김민경, 남준현, 김종명, 박재훈, 신명균(포스코)

수소환원1-5 | 15:15 초청강연

전기용융로 전력제어 기술개발 현황 및 계획

한무호, 김아롱, 서용(포항산업과학연구원), 김종명, 석진한(포스코)

Break Time | 15:40

좌장 : 김선중(조선대학교)

수소환원2-1 | 15:55 초청강연

Development for Nondestructive Estimation of Residual Refractory Thickness

Sung-Yong Kim*, Jun-Jae Lim, Sang-Joon Lee(Changwon National University)

수소환원2-2 | 16:20 초청강연

EAF Waste Heat Utilization Technology for the Application of Hydrogen-Reduced New Raw Materials

Jong Oh Jo(Hyundai Steel)

수소환원2-3 | 16:45 초청강연

수소환원철용 전기로의 특성과 내화재연구

정용석*, 명재우, 장태훈, 김기원, 이지혁, 하주영(한국공학대학교)

수소환원2-4 | 17:10 초청강연

Thermodynamic and Experimental Investigations of HBI Melting Behaviors in EAF Steelmaking Conditions for Mitigation of CO_2 Emissions

Minjoo Lee, Joo Hyun Park*(Hanyang University)

철강A-제선,제강,환경,에너지

위원장 : 엄경근(POSCO)

총무간사 : 박경수(POSCO), 박주현(한양대학교), 황병철(서울과학기술대학교)

Room 1층 102호, 10월 28일(수)

좌장 : 김선중(조선대학교)

철강A1-1 | 08:30

유동층 반응기 내 분철광석의 암모니아 직접환원 특성 및 수소환원과의 비교 평가

민성구(한국에너지기술연구원,서울시립대학교),박성진, 김경민, 임호태(한국에너지기술연구원),서명원*(서울시립대학교),문태영*(한국에너지기술연구원,과학기술연합대학원대학교)

철강A1-2 | 08:45

유동환원로 실시간 조업 모니터링을 위한 딥러닝 기반 압력장 활용 유동장 복원 연구

진봉민, 양현진*(인하대학교)

철강A1-3 | 09:00

Effects of Highly Reactive Green Pellets on Liquid-Phase Formation and Sinter Quality during Low-Grade Iron Ore Sintering

Jungyu Kim, Sungmo Jung*(POSTECH),Sungwan Kim(POSCO),Ahmad Raza Javed(POSTECH)

철강A1-4 | 09:15

수소 가스의 주입이 고로 슬래그와 코크스 간의 젖음 거동에 미치는 영향

신현우,강영조*(동아대학교)

철강A1-5 | 09:30

용융 철 촉매 기반 메탄 열분해를 통한 청록수소와 결정성 탄소 생성 연구

위태규, 강우석, 이찬준(포항공과대학교),박영준(델프트 공과대학교),이은도(한국생산기술연구원),조창신, 강윤배*(포항공과대학교)

철강A1-6 | 09:45

용융금속 촉매 기반 청록수소 공정 중 메탄열분해 역반응의 속도론적 분석 및 잔류탄소 결정성 분포에 미칠 수 있는 영향

이찬준, 위태규, 강윤배*(포항공과대학교)

Break Time | 10:00

좌장 : 조성묵(국립부경대학교)

철강A2-1 | 10:10

분철광석의 수소환원 하 부원료의 도입 가능성 연구

김성진, SEMEN IURCHENKOV, 정성모*(포항공과대학교)

철강A2-2 | 10:25

Prospective Life Cycle Assessment of Hydrogen-Based Steelmaking

Jieun Ryu, Yeongrae Cho, Minho Kim, Seungyeon Lee, Il Sohn*(Yonsei Univ.)

철강A2-3 | 10:40

BOF용 고강도 MgO-C 내화물

김기원, 이지혁, 황지원, 정용석*(한국공학대학교)

철강A2-4 | 10:55

Investigation for the MgO saturation in the CaO-FeO-SiO_2 EAF slag system

Dahee Gwak, Marie-Aline Van Ende, In-Ho Jung*(Seoul National University)

철강A2-5 | 11:10

CaO-Al_2O_3-MgO 슬래그 중 몰리브덴의 산소분압 의존 용해거동과 이를 통한 실수율 지배 인자 고찰

김영근, 위태규, 강윤배*(포항공과대학교)

철강A2-6 | 11:25

Si 탈산강의 비금속 개재물 생성과 진화거동에 미치는 슬래그 중 Al_2O_3의 영향

장민관(한양대학교),김태성(현대제철),박주현*(한양대학교)

좌장 : 강영조(동아대학교)

철강A3-1 | 13:30

수소 기반 철광석 유동층 환원에서 반응속도와 입자 유동의 분리 계산 및 RTD 기반 연계 해석

이소명, 정진호*(포항공과대학교)

철강A3-2 | 13:45

바이오매스 가스화 기반 직접환원철 침탄 공정 물질수지 및 경제성 평가

임지수*, 선민주, 이유빈, 김수연(현대제철)

철강A3-3 | 14:00

H_2-CO-CH_4 혼합가스 분위기에서 산화성 가스(H_2O, CO_2) 첨가가 직접환원철의 침탄 거동에 미치는 영향

최지원, 조다한(인하대학교),이유빈(현대제철),김영재*(인하대학교)

철강A3-4 | 14:15

소형 전기아크로에서 냉각조건에 따른 Freezing lining 형성 거동의 Computational Fluid Dynamics(CFD) 해석

하주영(한국공학대학교),김예림, 신승환(현대제철),장태훈, 정용석*(한국공학대학교)

철강A3-5 | 14:30

전기용융로 내 아크 거동 및 전극 부하 특성 분석: 난류 효과 및 3차원 불안정성의 영향

심승현, 김현진, 양현진*(인하대학교)

철강A3-6 | 14:45

철강 연속주조 노즐 토출구 형상에 따른 몰드 유동 거동 변화

박정섭, 정준민, 조성묵*(국립부경대학교)

철강A3-7 | 15:00

자선분광 분사연마 공정 내 분광과 연마재 충돌 거동 모델링

신재원(국립부경대학교),조성구(포항산업과학연구원),조성묵*(국립부경대학교)

Break Time | 15:15

좌장 : 최준성(포스코홀딩스)

철강A4-1 | 15:25

폐타이어의 바이오 유래 탄소 분율과 원료탄 대체에 따른 코크스 품질 변화

신윤재, 이윤모, 이종협*(현대제철)

철강A4-2 | 15:40

석탄 반사율 분포 지수를 이용한 코크스 냉간강도 예측 기술

주정희, 권동일, 이윤모, 이종협*(현대제철)

철강A4-3 | 15:55

고로 내 스크랩 최적 장입을 통한 저탄소 조업 기술 개발

김주훈*(포스코)

철강A4-4 | 16:10

E-DEM 기반 고로 장입 분포 디지털 트윈 모델 개발 및 탈탄소 공정 최적화 적용

이성희*(포스코)

철강A4-5 | 16:25

직접환원 샤프트로 내 펠렛 입도 분포에 따른 공극 구조 및 통기성 변화

이선영*, 선민주, 김수연(현대제철)

철강A4-6 | 16:40

Autothermal Hydrogen Generation by O_2-H_2O Co-injection during Steelmaking Converter Decarburization

GYOKHANG PARK, WANHO KIM(Yonsei Univ.),IL SOHN*(Yonsei Univ.,Recycling Development Solution Co. Ltd.)

철강A4-7 | 16:55

슬래그 내 free-CaO와 free-MgO 분석과 공정별 슬래그의 특성

유윤재*, 김현희, 이윤정, 강훈철(현대제철)

철강B-압연,강종개발,후처리

위원장 : 엄경근(POSCO)

총무간사 : 박경수(POSCO), 박주현(한양대학교), 황병철(서울과학기술대학교)

Room 1층 107호, 10월 28일(수)

좌장 : 김지훈(부산대학교)

철강B1-1 | 08:30

Texture Influence on Austenite Nucleation During Intercritical Annealing of a Cold-rolled Microalloyed Steel

Mohammadmilad Jafarzadshayan, Dong-Woo Suh*(Pohang University of Science and Technology)

철강B1-2 | 08:45

Cr 함량에 따른 2 GPa급 핫스탬핑강의 시멘타이트 용해 거동 및 구오스테나이트 결정립 제어

한정훈, 남정훈, 송상윤(고려대학교),백주현(한국과학기술연구원),이창욱, 오욱진(현대자동차), 유병길(현대제철), 손석수*(고려대학교)

철강B1-3 | 09:00

Bimodal 결정립 조직를 갖는 3Mn TRIP강의 미세조직 및 Delamination 크랙 형성 거동

임용수, 김진경*(한양대학교)

철강B1-4 | 09:15

Al, Ti 및 Nb 복합 첨가에 따른 보론 첨가강의 석출 거동과 충격인성

정민섭(서울과학기술대학교),유승호, 고성웅(포스코),황병철*(서울과학기술대학교)

철강B1-5 | 09:30

템퍼링 온도가 초고강도 고니켈강의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향

손성하, 전상명(포항공과대학교),김유섭, 박시욱, 김용진(국방과학연구소),서동우*(포항공과대학교)

철강B1-6 | 09:45

Concurrent Tempering and Bainitic Transformation during Short-Time Austempering between M_s and M_f: Implications for Strength-Ductility Balance in Low-Alloy Steel

Jangjung Kim, Seunghyun Hong, Kisub Cho*(Kookmin Univ.)

철강B1-7 | 10:00 **Canceled**

Break Time | 10:15

좌장 : 성효경(국민대학교)

철강B2-1 | 10:25 초청강연

마르텐사이트강의 구오스테나이트 입계 취약성 원인 분석: 계면 특성과 용질 편석의 상관관계

김지훈*(부산대학교)

철강B2-2 | 10:50

TMCP형 고강도 저합금강의 냉각 조건에 따른 미세조직과 내수소취성 변화

오동규, 배영훈, 황병철*(서울과학기술대학교)

철강B2-3 | 11:05

마르텐사이트 강의 수소 분위기 하 건식 마모 및 표면 손상 거동

김현, 김혜진, 이승준*(한국공학대학교)

철강B2-4 | 11:20

희토류 원소를 활용한 구리 함유 저탄소강의 해수 내식성 향상

조현석, 나질라 줄피카, 김경덕*(포항공과대학교)

철강B2-5 | 11:35

Y 첨가량에 따른 Zn-Al-Mg계 합금의 미세조직 및 상별 나노기계적 특성 평가

고경민, 서위걸, 유태현, Khushahal Thool, 최시훈*(국립립순천대학교)

철강B2-6 | 11:50

빅데이터 기반 고성능 내화강 설계 및 고온 기계적 물성 메커니즘 규명

이영주, Salsabila Syifa Salmi, Alireza Zargaran(포항공과대학교),양홍석(포스코),정찬원(부산대학교),김지훈(부경대학교),김경덕*(포항공과대학교)

좌장 : 이승준(한국공학대학교)

철강B3-1 | 13:30

고노점 탈탄 기술 적용 2.0GPa급 고굽힘형 핫스탬핑 강종 개발

강재욱*, 김제우수, 유병길, 박민서, 황석민(현대제철)

철강B3-2 | 13:45

트램프 원소 함량에 따른 기계적 성질 영향 연구

이석규*(현대자동차)

철강B3-3 | 14:00

Mechanism of enhanced J-Integral fracture toughness in TRIP-maraging steel developed via segregation engineering

예정원, 김민석, 박은수*(서울대학교)

철강B3-4 | 14:15

Quantitative Analysis of Precipitation and Recrystallization Behavior in Ti-Nb Alloyed Cold-Rolled UHSLA Steels with Different Contents

Sang Hun Shin*, Changgeun Lee(Hyundai Steel), Asmaa Albeltagy, Alexander Gramlich(RWTH AACHEN, STEEL INSTITUTE)

철강B3-5 | 14:30

잔류 오스테나이트 역할에 대한 신경망의 해석

강전연*(한국재료연구원), 강민우, 김동휘(현대자동차)

철강B3-6 | 14:45

잔류 오스테나이트 특성에 따른 고성형 초고장력 강판 성형성 향상 메커니즘

엄호용*, 김로사, 이선규, 문주연, 이상욱, 박진성(현대제철)

철강B3-7 | 15:00

열간 압하율에 따른 마르텐사이트강 구멍확장비(HER) 연구: 머신러닝 기법을 활용한 기계적 시험 기반 HER 예측

이승호, 정든봄, 김이재(서울대학교), 이제웅, 김성일(POSCO), 채준영*, 한흥남*(서울대학교)

철강B3-8 | 15:15

Deep Learning-Based Automated Identification and Quantification of Complex Low-Temperature Transformation Microstructures in Advanced High-Strength Steels

PARK, TAECHANG*(현대제철), LIM, YONGSOO, KIM, JINKYUNG*(한양대학교), KANG, HUNCHUL(현대제철)

Break Time | 15:30

좌장 : 강전연(한국재료연구원)

철강B4-1 | 15:40

고내구화 대응을 위한 디프 피니언 샤프트 소재 및 열처리 연구

이준영*, 강창원, 박재홍(현대자동차)

철강B4-2 | 15:55

Effect of Annealing Temperature on Nano-Precipitation Behavior and Strengthening Mechanisms of EAF-Based 1000 MPa Grade Cu-Bearing HSLA Steel

Chang Geun Lee*, Sang Hun Shin, Jong Hyun Jeong, Su Heon Kim(Hyundai Steel),Asmaa Elbeltagy, Alexander Gramlich(RWTH Aachen University)

철강B4-3 | 16:10

API X60강의 수소 주입 전후의 마모 거동 및 메커니즘 분석

한지혜, 이승준*(한국공학대학교)

철강B4-4 | 16:25

해양 구조용 강재의 인성에 미치는 응력 환경 및 트램프 원소의 영향

오성탁*, 윤덕빈, 이형근, 이상협, 김영우, 한성경(현대제철)

철강B4-5 | 16:40

자동차용 GI, GA 및 Al-Si 도금강판의 침식-부식 복합 환경에서의 EIS 기반 전기화학 특성 및 표면 손상 거동 비교 평가

최호준*, 김혜진(한국공학대학교)

철강B4-6 | 16:55

Al-Zn-Si계 도금 핫스탬핑 열처리 조건이 열간 성형 거동에 미치는 영향

이재민, 소성민*, 정창우*(현대제철)

철강B4-7 | 17:10

핫스탬핑용 Zn-Ni 및 Al-Zn-Si-Mg-Ca 용융도금층의 오스테나이징 후 미세구조 변화 및 내식 특성

왕은찬(한국생산기술연구원,전남대학교),최윤일*(한국생산기술연구원),박찬진(전남대학교)

철강B4-8 | 17:25

Optimization of cryogenic thermal conductivity via microstructure tailoring in 316L stainless steel

Seungmin Jeon, Young Kyun Kim, Tae Jin Jang, Hyun Jun Kwon, Young Sang Na*(한국재료연구원)

상변태

위원장 : 박은수(서울대학교)
총무간사 : 류욱하(국립금오공과대학교),
임가람(한국재료연구원), 최현주(국민대학교)
Room 1층 108호, 10월 28일(수)

좌장 : 김완(서울대학교)

상변태1-1 | 10:00 초청강연

결정학적 제어를 통한 Ti-Zr-Hf HCP 다성분계 합금의 변형기구 조절
윤국노*(University of California, Berkeley,국립한밭대학교),Haomin Lyu, Xiaoyu Chen, Andrew M. Minor, Mark Asta(University of California, Berkeley),Daryl Chrzan, Peter Hosemann*(University of California, Berkeley)

상변태1-2 | 10:25

EV구동 모터 냉각 성능 개선을 위한 비자성 SUS소재 기초 연구
박훈영*, 김종천, 박성환(현대자동차)

상변태1-3 | 10:40

압연율에 따른 Fe-Ni Invar 합금의 미세조직 및 물성 변화
장준호, 류채우*(홍익대학교)

상변태1-4 | 10:55

상용 Invar 합금의 미량 잔류 원소가 재결정 거동 및 열 · 기계적 특성 분석에 미치는 영향
이희상, 류채우*(홍익대학교)

상변태1-5 | 11:10

CoCrNi계 중엔트로피 합금의 Al 및 Ti 첨가에 따른 부식 거동 분석
강승연, 류채우*(홍익대학교)

상변태1-6 | 11:25

Hf 포함된 고엔트로피 합금의 싸이클릭 산화 거동
김선진, 양하영, 오용준, 박준식*(국립한밭대학교)

상변태1-7 | 11:40

Phase separation-guided amorphous-crystalline hybridity overcomes the strength-ductility trade-off
Minkyung Kwak(Seoul National University,ETH Zurich),Robin E. Schaeublin, Indranil Basu, Joerg F. Loeffler*(ETH Zurich),Eun Soo Park*(Seoul National University)

좌장 : 류욱하(국립금오공과대학교)

상변태2-1 | 13:30 초청강연

금속 액체의 구조와 원자 운동: 액체 속 원자들은 어떻게 함께 움직이는가?
류채우*(홍익대학교)

상변태2-2 | 13:55

열처리가 Ni-Ti 형상기억합금의 상변태 온도 및 미세조직에 미치는 영향
신우승(한국생산기술연구원,인하대학교),이미영(한국생산기술연구원,과학기술연합대학원대학교,한국과학기술연구원),박지욱(한국생산기술연구원,과학기술연합대학원대학교),조상현, 박예린(한국생산기술연구원),김재황*(한국생산기술연구원,과학기술연합대학원대학교,한국과학기술연구원,전북대학교)

상변태2-3 | 14:10

Effect of heat treatment on the shape memory effect of Ti-Pd shape memory alloy
Kwangil Seo(The University of Tokyo),Haruki Ikeda, Mitsuhiro Matsuda(Kumamoto University),Yoko Yamabe-Mitarai*(The University of Tokyo)

상변태2-4 | 14:25

Multi-Scale Defect Engineering toward Superior Recovery Properties in Fe-Mn-Si-Based Shape Memory Alloys
윤제인, 김지영, 박은수*(서울대학교)

상변태2-5 | 14:40

CrMnFeCo계 고엔트로피 합금의 형상기억 특성 향상을 위한 탄소 함량 최적화
정휘윤, 이제인*(부산대학교)

상변태2-6 | 14:55

Cr-rich CrFeCoNi 고엔트로피합금의 결정립 조대화 및 형상기억특성 향상 전략
임진수랑, 정휘윤, 이제인*(부산대학교)

상변태2-7 | 15:10

인자 분리를 통한 SUS304 강의 변형유기 마르텐사이트와 전위밀도의 열전도도 기여도 규명
이정훈, 천세호(부산대학교),구현곤, 안재웅(한화에어로스페이스),이태경*(부산대학교)

Break Time | 15:25

좌장 : 윤국노(국립한밭대학교)

상변태3-1 | 15:35 초청강연

핵생성 동역학 제어를 통한 In-situ 나노결정상 석출 및 알루미늄계 비정질 합금의 강도-연성 한계 극복
김완(서울대학교,University of Wisconsin-Madison),박은수*(서울대학교),John H. Perepezko*(University of Wisconsin-Madison)

상변태3-2 | 16:00

Orientation-Dependent Deformation Behavior of Al-Cu-Fe Icosahedral Quasicrystals under Micropillar Compression
Go Eun Kim, Wan Kim, Eun Soo Park*(Seoul National University)

상변태3-3 | 16:15

Integrated Thermodynamic and Processing Framework for Composition Design of Fe-Based Nanocrystalline Soft Magnetic Alloys
Subin Ahn, Hyun Gi Min, Wan Kim, Eun Soo Park*(Seoul National Univ.)

상변태3-4 | 16:30

Al 기반 조성설계를 통한 Fe계 연자성 합금의 미세구조 연구
한선구, 박세진, 이연주(국민대학교),최영신(한국생산기술연구원),강태연(국민대학교),김휘준(한국생산기술연구원),조기섭, 최현주*(국민대학교)

상변태3-5 | 16:45

ECP 모델 기반 Ni-TM 이원계 금속유리의 기계물성의 경향성 변화
송원택, 안혜상, 박은수*(서울대학교)

상변태3-6 | 17:00

Al-Si 이원계에서의 금속 유도 결정화 거동

문준혁, 박은수*(서울대학교),류채우*(홍익대학교)

상변태3-7 | 17:15

Effect of Cu Microalloying on Quasicrystal Grain Growth and Mechanical Properties in Ti-Zr-Ni Alloys

Thiri Shwe Sin, Go Eun Kim, Geunhee Yoo, Wan Kim, Eun Soo Park*(Seoul National University)

알루미늄

위원장 : 현승균(인하대학교)

총무간사 : 김세훈(한국자동차연구원), 김명균(RIST), 박현순(인하대학교), 조영희(한국재료연구원)

Room 2층 201호, 10월 28일(수)

좌장 : 정영길(한국자동차연구원)

알루미늄1-1 | 08:30

Mn, Cr 합금성분에 의한 압출재 조직 및 물성 영향 연구

이재형*, 강문구(현대자동차)

알루미늄1-2 | 08:45

Al-Mg-Si 합금에서 TEM 및 APT를 활용한 β″ 분석

이미영(한국생산기술연구원,과학기술연합대학원대학교,한국과학기술연구원),박지욱(한국생산기술연구원,과학기술연합대학원대학교),조상현(한국생산기술연구원),Mimi Narita(Nagoya Institute of Technology),김재황*(한국생산기술연구원,과학기술연합대학원대학교,한국과학기술연구원,전북대학교)

알루미늄1-3 | 09:00

Atom Probe Tomography 및 근사적 에너지 계산 방법을 이용한 Al-Mg-Si 합금의 나노클러스터 분석

박지욱(한국생산기술연구원,과학기술연합대학원대학교),이미영(한국생산기술연구원,과학기술연합대학원대학교,한국과학기술연구원),조상현, 박예린(한국생산기술연구원),신우승(한국생산기술연구원,인하대학교),김재황*(한국생산기술연구원,과학기술연합대학원대학교,한국과학기술연구원,전북대학교)

알루미늄1-4 | 09:15

거대언어모델 기반 문헌 데이터 후처리를 통한 7xxx계 알루미늄 합금 CPSP 데이터베이스 구축 방법론

최준혁, 천재은(국민대학교),어광준(한국재료연구원),조기섭*(국민대학교)

알루미늄1-5 | 09:30

전류 밀도와 온도 구배를 통한 알루미늄 합금 내 Fe 원소 제거에 대한 연구

김하늘, 김희국, 장병록*(인하대학교)

좌장 : 조용희(전남대학교)

알루미늄2-1 | 09:45

Al-Mg-Si-Cu합금에서 미량원소 첨가에 의한 Cu확산지연현상

손현우*, 어광준(한국재료연구원)

알루미늄2-2 | 10:00

머신러닝 기반 고압 다이캐스팅용 알루미늄 합금의 조성 및 T5 열처리 공정 조건에 따른 기계적 물성 예측

박예린(한국생산기술연구원),신우승(한국생산기술연구원,인하대학교),이미영(한국생산기술연구원,과학기술연합대학원대학교,한국과학기술연구원),박지욱(한국생산기술연구원,과학기술연합대학원대학교),조상현(한국생산기술연구원),김재황*(한국생산기술연구원,과학기술연합대학원대학교,한국과학기술연구원,전북대학교)

알루미늄2-3 | 10:15

Al-Si-Mg계 주조재의 미세조직에 따른 국부적 부식 거동 평가

김영서(한국재료연구원,한양대학교),신한균, 김정한(동아대학교),장재일(한양대학교),조영희*(한국재료연구원)

알루미늄2-4 | 10:30

Mn 함량 및 냉각속도에 따른 Al-7Si-Mg 주조합금의 미세조직과 전기 · 열전도 특성

강주원(한국재료연구원,한양대학교),이윤호, 이상익(한국재료연구원),장재일*(한양대학교),조영희*(한국재료연구원)

알루미늄2-5 | 10:45

Ni 첨가에 따른 고강성 Al-18Si-xNi 주조 합금의 미세조직 변화와 물리적 특성의 상관관계

이윤호, 이상익(한국재료연구원,한양대학교),이정무(한국재료연구원),장재일(한양대학교),조영희*(한국재료연구원)

좌장 : 손현우(한국재료연구원)

알루미늄3-1 | 11:00

Al-Si-Mg 합금의 냉각속도에 따른 부식거동 규명

이상익, 이윤호, 김영서(한국재료연구원,한양대학교),김정한(동아대학교),장재일(한양대학교),조영희*(한국재료연구원)

알루미늄3-2 | 11:15

열간압출 및 시효 열처리한 $Al_{(68-x)}Mg_{10}Si_{10}Cu_5Zn_5Ni_{(x=0,2)}$합금의 미세조직-기계적특성 상관관계

전정민, 이상화, 박성현(전북대학교),신은주(한국원자력연구원),안지혁, 이윤수(한국재료연구원),정재길*(전북대학교)

알루미늄3-3 | 11:30

Mn 첨가량 저감 및 고온 열처리를 통한 고Fe 함유 6XXX계 알루미늄 합금의 물성 향상

손은지(한국재료연구원,부산대학교),손현우*(한국재료연구원)

알루미늄3-4 | 11:45

Fe 함량이 Al-Mg-Si 합금 압출재의 Peripheral Coarse Grain (PCG) 형성 및 표면 형상에 미치는 영향

김형준(한국재료연구원,부산대학교),민경문, 김규낙, 윤연희, 안지영, 손현우, 이윤수*(한국재료연구원),이제인*(부산대학교),안지혁*(한국재료연구원)

알루미늄3-5 | 12:00

Effect of processing by hot extrusion and rolling on microstructure and plastic anisotropy in AA6082 alloy

Kyo-Min Kwon(Korea Automotive Technology Institute,Korea University),Seok Su Shon*(Korea University),Sehoon Kim*(Korea Automotive Technology Institute)

저탄소 알루미늄 심포지엄

위원장 : 현승균(인하대학교)
실무위원 : 김명균(포항산업과학연구원),
김세훈(한국자동차연구원), 조영희(한국재료연구원)
Room 2층 201호, 10월 28일(수)

좌장 : 조영희(한국재료연구원)

저탄소1-1 | 13:30 초청강연

PIR/PCR 기반 저탄소 자동차용 알루미늄 판재 및 부품화 제조 기술

최성규*, 심현석, 신종옥((주)동산테크)

저탄소1-2 | 13:55 초청강연

알루미늄 스크랩 용탕 청정도 평가의 신뢰성 확보

김덕*, 하원, 김명균(포항산업과학연구원)

저탄소1-3 | 14:20 초청강연

국내 알루미늄 자원 순환 시나리오별 온실가스 배출량 분석 및 CBAM 대응 연구 – 알루미늄 빌렛 공정을 중심으로

최윤실, 김현찬, 김다진*, 홍석진((주)트레스웍스)

Break Time | 14:45

좌장 : 신재혁(한국자동차연구원)

저탄소2-1 | 14:55 초청강연

자동차 열교환기 클래드용 알루미늄 스크랩 내 Mg 정련기술

황종일*, 김선기, 신성진((주)나이스엘엠에스),김병철, 김경수((주)디에스리퀴드)

저탄소2-2 | 15:20 초청강연

알루미늄 합금 가공칩의 고상 재활용을 위한 공정기술 개발

이병덕*, 최진주, 정재윤(고등기술연구원),조영래, 이지용(현대자동차)

저탄소2-3 | 15:45

소재부품 생산공정과 탄소중립에 대한 비파괴기술의 역할

김정석*(조선대학교)

Break Time | 16:00

좌장 : 김덕(포항산업과학연구원)

저탄소3-1 | 16:10 초청강연

저탄소 재생 Al-Si 다이캐스팅재에서 산화 이중막 기공(bifilm porosity)이 초고주기 피로에 미치는 영향

윤상일, 최지석, 송호섭((주)삼기),박재순((주)한국주조산업),조영래, 이지용, 강희삼(현대자동차),조인식*(선문대학교)

저탄소3-2 | 16:35 초청강연

알루미늄 스크랩 재활용을 위한 직류 전류 인가 기반 Fe상 제거 공정 기술

배장현, 조하은(한국생산기술연구원),한흥남(서울대학교),김문조*(한국생산기술연구원)

저탄소3-3 | 17:00 초청강연

6000계 알루미늄 합금의 열처리 조건에 따른 미세조직 제어 및 압출재 특성 평가

이원진, 오승환*((주)에이알알루미늄)

반도체

위원장 : 최창환(한양대학교)
총무간사 : 이기영(홍익대학교)
Room 2층 202호, 10월 28일(수)

좌장 : 박지훈(국립부경대학교)

반도체1-1 | 10:00

Interface Engineering of 2D Semiconductors via Damage-Free Charge Transfer Doping

Ji Hoon Park*(Pukyong National University)

반도체1-2 | 10:15

Post-Growth Residue Control for Stable and 3R-Enriched NaCl-Assisted WS_2

Lia Saptini Handriani, Won Il Park*(Hanyang University)

반도체1-3 | 10:30

Thermal Analysis of System-on-Chip using Finite Element Modeling: Experimental Validation and Physics-informed Graph Neural Operator for Acceleration

minjun cheon(Hanbat National University),Seong Jin Kim(Pohang University of Science and Technology),Jung-Won Lee, Lewis Kang(Nepes Co.),Jae Yong Song(Pohang University of Science and Technology),Hoon-Hwe Cho*(Hanbat National University)

반도체1-4 | 10:45

RDE 도금 기반 (111) 결정면 제어와 표면처리 기반 산화막 억제를 통한 Cu-Cu 직접 접합 공정 제어

안성민, 김미림, 한병준, 노진성, 김정철(국립한밭대학교),윤창민(인하대학교), 노정철(홍익대학교),김정한*(국립한밭대학교)

반도체1-5 | 11:00

CMP 의존도 저감을 위한 마이크로콘 구조 기반 HBM용 저온 Cu-Cu 하이브리드 본딩

김미림, 안성민, 김정한*, 김정철, 노진성(국립한밭대학교),윤창민(인하대학교), 노정철(홍익대학교)

반도체1-6 | 11:15

Ag-Al-Si 합금 기반 나노다공성 은 분말의 탈합금 공정에 따른 미세조직 제어

김영규, 성재욱*, 현승균*(인하대학교)

제35회 피로 및 파괴 심포지엄

위원장 : 이홍철(한화에어로스페이스)
실무위원 : 석무영(한국재료연구원), 오석근(KAI), 이병현(공군항공기술연구소)
Room 2층 202호, 10월 28일(수)

좌장 : 석무영(한국재료연구원)

피로1-1 | 13:30
KF-21 벌크헤드 웹 응력 예측을 위한 AI 모델 소개
박상선*, 서창보(한국항공우주산업(주))

피로1-2 | 13:45
타이타늄 합금 품질 판정 객관성 향상을 위한 인공지능 기반 이미지 분석 제언
박주영, 정유인*(한국항공우주산업(주))

피로1-3 | 14:00
제작공정 및 미세조직 기반 AI 활용 항공기 구조물 건전성 평가
김영순*(경상국립대학교)

피로1-4 | 14:15
미세조직 제어를 통한 적층제조 Ti-6Al-4V 옥텟트러스 격자구조체의 취성 파괴 억제 및 압축 변형 안정성 향상
강성규*(경상국립대학교)

Break Time | 14:30

좌장 : 정대호(한국항공우주산업)

피로2-1 | 14:40
Multiscale modeling and AI-based mechanical properties and structural Integrity prediction of metallic materials
Myoung-Gyu Lee*, Gyu-Jang Sim, Jehyun You, Hyeongseo Kim, Taehyeok Choi(Seoul National Univ.)

피로2-2 | 14:55
초음파 초고주기 피로시험의 신뢰성 검증과 원심주조 내열강의 고온 피로거동 평가
조인식*((주)엠브로지아)

피로2-3 | 15:10
항공기 주요 구조 부위 피로 수명 평가 및 예측방법
박세진*(공군항공기술연구소)

피로2-4 | 15:25
항공기 왕복엔진 구성품 손상원인 분석
이병현*, 손경숙, 조형진(공군항공기술연구소)

Break Time | 15:40

좌장 : 강성규(경상대학교)

피로3-1 | 15:50
계장화 압입시험을 이용한 항공 구조재의 피로손상 및 잔여수명 평가: 국부 기계적 물성 및 잔류응력 기반 접근
오은지, 홍정화((주)프론틱스),권동일*(서울대학교)

피로3-2 | 16:05
Micro-Splatting: 재료 · 표면 특성을 반영한 Physical AI의 Sim2Real 문제 해결을 위한 제조 AI 뉴럴 렌더링 기법
최종성*(한국뉴욕주립대학교)

피로3-3 | 16:20
Microstructure-Informed Local Property Mapping in Additively Manufactured 17-4PH Stainless Steel: Toward AI-Assisted Structural Integrity Assessment
Jungho Shin*(Kangwon National University),Moon-Jo Kim(Korea Institute of Industrial Technology),Daehyun Kim, Sunghee Han, Bokyu Kim, Junhee Han(Kangwon National University),Jaewoo Kim, In-Suk Choi(Seoul National University)

피로3-4 | 16:35
작은 칩 하나로 예측하는 Ti-6Al-4V 전체 물성: 딥러닝 기반 워크프레임
강석형*(경상국립대학교)

Break Time | 16:50

좌장 : 이병현(공군 항공기술연구소)

피로4-1 | 17:00
항공기용 엔진 부품의 내구성 및 손상허용 관리 계획
이홍철*(한화에어로스페이스)

피로4-2 | 17:15
초기 균열 형상 및 하중조건에 따른 Ni기 내열 합금 터빈 디스크의 균열 특성 연구
엄희진*, 박태규, 김경희(한화에어로스페이스)

피로4-3 | 17:30
Critical Plane Approach를 이용한 단결정 블레이드의 LCF 수명평가
김양균, 박태규, 김경희*(한화에어로스페이스)

피로4-4 | 17:45
항공기 착륙장치 구성품의 결함 원인 분석
김영찬, 이상희, 김용세*(공군항공기술연구소)

가공-용접 및 접합

위원장 : 이광석(한국재료연구원)
총무간사 : 강용준(한국재료연구원), 김준호(한국생산기술연구원), 성효경(국민대학교), 오세권(한국생산기술연구원), 이제인(부산대학교)
Room 2층 204호, 10월 28일(수)

좌장 : 강용준(한국재료연구원)

용접1-1 | 08:30
전류 인가가 304 스테인리스 용접부의 미세조직 기계적 물성에 미치는 영향
방종원*, 오연준, 정현도, 문중식(한국화학융합시험연구원),배장현(한국생산기술연구원)

용접1-2 | 08:45

API X70 대구경 후육강관 원주용접부의 그루브 형상 및 용접 시퀀스에 따른 잔류응력 저감 연구

김성환*, 손정현, 서상원, 문형순(한국생산기술연구원)

용접1-3 | 09:00

적층 제조된 SS316L/인코넬 718 이종접합에서 고엔트로피 합금 버퍼층을 통한 균열 회피 전략

김래언, 김형섭*(POSTECH)

용접1-4 | 09:15

Ti 첨가 및 낮은 템퍼링 온도 적용에 따른 저방사화강의 미세조직 안정성 향상과 GTAW · EBW 용접부의 크리프-피로 손상 거동 및 미세조직 변화

박정현, 한재연, 이상현(국립창원대학교),김치원, 박형권(한국재료연구원),정승진(조선선재),홍현욱*(국립창원대학교)

용접1-5 | 09:30

고강도 오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 응고 특성에 따른 응고균열 및 석출 거동

오정민(국립부경대학교),정수경(고려용접봉),이윤상(두산에너빌리티),천은준*(국립부경대학교)

Break Time | 09:45

좌장 : 김성환(한국생산기술연구원)

용접2-1 | 09:55

냉간 기가스틸용 저입열 고속 용접솔루션 개발

한도경*, 홍석현, 배규열*(포스코)

용접2-2 | 10:10

Cell-To-Pack용 중대형 배터리팩 레이저 용접부의 응고균열 치유 거동에 대한 Phase-Field 해석적 접근

김희은, 천은준*(국립부경대학교),강희신(한국기계연구원)

용접2-3 | 10:25

다이오드 레이저 클래딩 예열 온도 변화가 압력용기용 SA508 Gr.3 저합금강 클래딩부의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향

김재성, 김정훈, 문준오*(국립창원대학교),조성우, 구남기, 윤강준(두산에너빌리티)

용접2-4 | 10:40

고강도강 다층 용접 시 용접금속 재가열부에서의 미세조직 변화가 저온충격인성에 미치는 영향

배민혁(한국재료연구원,부산대학교),강용준*, 송상우(한국재료연구원),강남현(부산대학교)

Break Time | 10:55

좌장 : 한도경(포스코)

용접3-1 | 11:00

화력 발전소 재열증기배관(P92) 용접 열영향부 크리프 손상 분석

한수지*, 이한상, 정진성(한국전력공사)

용접3-2 | 11:15

로터스형 다공성 구리를 이용한 무가압 은 소결 접합부의 접합계면 분석 및 기계적 특성 평가

백정연, 현승균*(인하대학교),김근수(호서대학교),황승환(인하대학교)

용접3-3 | 11:30

FCAW 적용 해양용 H 형강의 용접부 특성 및 염수 노출 후 저주기 피로 거동

이상현, 한재연, 박정현(국립창원대학교),이창훈(한국재료연구원),정준호(현대제철),김재성(조선선재),홍현욱*(국립창원대학교)

용접3-4 | 11:45

LT-FH32에서의 Nb 첨가로 인한 모재의 강도 향상과 대입열용접시 CGHAZ의 저온 충격인성 확보

박현준, 유성훈(부산대학교),서인식(H2C),강남현*(부산대학교)

타이타늄

위원장 : 송영석(세아창원특수강)

총무간사 : 김경민(세아창원특수강), 노윤경(동아특수금속), 박찬희(한국재료연구원), 최미선(RIST)

Room 2층 204호, 10월 28일(수)

좌장 : 이학성(동아대학교)

타이타늄1-1 | 13:30

WLAM 공정으로 제조된 Ti-6Al-4V의 미세조직, 극저온 인장 특성 및 변형 거동

박령주, 송노건(인하대학교),김영균(한국재료연구원),이종익, 이빈(경희대학교),이기안*(인하대학교)

타이타늄1-2 | 13:45

L-PBF로 제조된 Ti-6Al-4V 합금의 초기 미세조직에 따른 고온 크리프 변형 거동

김준혁, 한재연(국립창원대학교),권영삼(CetaTech),박정효, 김대웅, 김규식(국방과학연구소),홍현욱*(국립창원대학교)

타이타늄1-3 | 14:00

통전 이방성에 의한 LPBF Ti-6Al-4V 합금의 α variant selection 매커니즘 규명

이성호, 천세호, 이정훈, 윤재원(부산대학교),김정기(경상국립대학교),이태경*(부산대학교)

타이타늄1-4 | 14:15

Image Data Learning 기반 항공용 Ti-6Al-4V 합금 미세조직 적합성 평가 AI 모델 개발

임종섭, 송영석*, 장대건, 김경민, 이장호(세아창원특수강)

타이타늄1-5 | 14:30

셀룰러 오토마타 기반 Ti-6Al-4V 합금의 고온 압축 중 미세조직 진화 및 유동응력 예측

조서연(서울대학교),박진흥*(서울과학기술대학교),이명규*(서울대학교)

Break Time | 14:45

좌장 : 전태성(인천대학교)

타이타늄2-1 | 14:50

열처리에 따른 βsup 안정성 제어를 통한 준안정 β 타이타늄 합금의 변형 기구 및 기계적 특성 향상

주재성(한국재료연구원,고려대학교),홍재근(한국재료연구원),손석수(고려대학교),김재혁*(한국재료연구원)

타이타늄2-2 | 15:05

βsup 안정도 제어를 통한 TRIP α+β 타이타늄 합금 설계 가이드라인 개발

서기완, 김도향, 박은수*(서울대학교)

타이타늄2-3 | 15:20

Ti-xMo-4Fe (x=3.4, 5) 준안정 베타 합금의 고온 변형 시 활성화에너지 변화에 따른 변형 메커니즘의 분석

이재관, 김홍민, 이동근*(국립순천대학교)

타이타늄2-4 | 15:35

Effect of β-stabilizing element addition on the microstructure and mechanical properties of porous Ti fabricated by liquid metal dealloying

Bo Hyun Park, Sung Hyuk Park*(Kyungpook National University)

Break Time | 15:50

좌장 : 박노근(영남대학교)

타이타늄3-1 | 15:55

FeCoNiCr HEA 강화 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 매트릭스 복합재료의 계면 Interdiffusion 거동 및 기계적 특성 평가

김홍민, 이재관, 이동근*(국립순천대학교)

타이타늄3-2 | 16:10

조성 설계 및 미세조직 제어를 통한 고강도 · 고연성 Ti 기반 중엔트로피 합금 개발

이시우, 손수정, Renhao Wu, 이재홍, 하수빈, 김형섭*(포항공과대학교)

타이타늄3-3 | 16:25

In situ TiC 강화 타이타늄 기지 복합재료의 WC 함량이 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향

김태윤(부산대학교),김재혁(한국재료연구원),이제인*(부산대학교)

타이타늄3-4 | 16:40

Effect of Al Content on Passive Film Stability and Corrosion Resistance of Ti－xAl Alloys

Hyo joo Lee(Hanbat National University),Yongha Joo(Pohang University of Science and Technology),Jae Hyuk Kim, Jae-Keun Hong(Korea Institute of Materials Science),Kyoungdoc Kim(Pohang University of Science and Technology),Hoon-Hwe Cho*(Hanbat National University)

Break Time | 16:55

좌장 : 이제인(부산대학교)

타이타늄4-1 | 17:00

가공열처리를 통한 괘삭 Ti-Ce 합금의 기계적 특성 향상

최진솔, 김재혁, 이상원, 홍재근, 염종택(한국재료연구원),이제인*(부산대학교),박찬희*(한국재료연구원)

타이타늄4-2 | 17:15

항공용 대형 타이타늄 합금 단조품 제조를 위한 선행 연구

송민철*, 조재영, 원종철(현대아이에프씨)

타이타늄4-3 | 17:30

인장 변형률에 따른 강한 집합조직을 갖는 α+β 티타늄 합금의 소성변형 기구

오선근(Massachusetts Institute of Technology,한국표준과학연구원),Cemel Cem Tasan*(Massachusetts Institute of Technology)

타이타늄4-4 | 17:45 **Canceled**

순수 타이타늄 판재의 초기 집합조직에 따른 스프링백 현상 및 미세조직 변화 분석

이종언, 원종우*(한국재료연구원)

마그넷

위원장 : 이우영(연세대학교)
부위원장 : 이정구(한국재료연구원), 임혜인(숙명여자대학교)
총무간사 : 김태훈(한국재료연구원), 이현숙(연세대학교)
Room 2층 205호, 10월 28일(수)

좌장 : 김정민(대구경북과학기술원)

마그넷1-1 | 08:30

Enhanced Diffusion Efficiency of Pr-Based HRE-Free GBDP via Low-Temperature Hydrogenation-Induced Diffusion Pathways

Seong Min Choi, Wooyoung Lee*, Ho-Jeong Kim, Kyungmi lee, Jaehyuk Kim, Hye Su Kim(Yonsei Univ.)

마그넷1-2 | 08:40

Micro-Scale Iron Nitride by De-nitridation: Phase Control through Quenching and Nitrogen Ordering

Ho-Jeong Kim, Kyungmi Lee, Jaehyuk Kim, Seong Min Choi, Hye Su Kim, Seung Yong Lee(Yonsei University),Jung-Suk Lee, Jisung Lee, Taegwan Heo, Dohoon Kim(Hyundai Motor Company),Kyu Hyoung Lee, Wooyoung Lee*(Yonsei University)

마그넷1-3 | 08:50

Activating Diffusion through Grain-Boundary Continuity in La-Engineered Ce-Fe-B Hot-Deformed Magnets

Kyungmi Lee, Wooyoung Lee*, Ho-Jeong Kim, Jaehyuk Kim, Seong Min Choi, Hye Su Kim(Yonsei Univ.)

마그넷1-4 | 09:00

적층제조된 AlFeCoCrMn 연자성 고엔트로피 합금에서 상 구성 및 미세구조와 자기 특성 사이의 상관관계 분석

채동현(한국과학기술원),박예준(한국재료연구원),장규선(막스플랑크 지속가능재료 연구소),정찬원(부경대학교),최벽파*(한국과학기술원)

마그넷1-5 | 09:10

NdFeB 소결 영구자석 개발을 위한 문헌 기반 검색증강생성(RAG)과 도메인 특화 언어모델을 향한 다중 LLM 비교

남충희*(한남대학교)

좌장 : 이우영(연세대학교)

마그넷2-2 | 09:25 **Invited Talk**

Functional Iron-BasedMagnetic Materials for Sensing, Actuation and Electromagnetic Wave Absorption

Youn-Kyoung Baek*, Jihyeong Jeong(한국재료연구원),Jiyun Kim (울산과학기술원)

마그넷2-3 | 09:55 **Invited Talk**

입계확산공정 기반 중희토류 극저감 고성능 Nd-Fe-B 자석 개발 전략

김정민*(대구경북과학기술원),이동현(경북대학교),김성찬, 정현종(대구경북과학기술원),Vitalii Galkin(경북대학교),백주영, 윤태영, 김종태, 정석환(대구경북과학기술원),김동환, 이상협, 배경훈(성림첨단산업),노종욱(경북대학교),김동환(대구경북과학기술원)

마그넷2-4 | 10:25 **Invited Talk**

Can we realize high coercivity in Nd-Fe-B sintered magnets without heavy rare-earths? Part II: Grain refinement

Sumin Kim*, So-Yeon Kim, Seong-Jun Yoon, Tae-Hoon Kim, Jung-Goo Lee(Korea Institute of Materials Science)

마그넷2-5 | 10:55 **Invited Talk**

Nd-Fe-B 자석의 보자력에 대하여

장태석*(엠리써치,선문대학교)

마그넷2-6 | 11:25 **Invited Talk**

K-문샷 희토류 소재 로드맵

이상관*(국가과학기술연구회 K-문샷 추진 지원단)

제22 회 중성자 및 방사광 X-선 이용 금속 및 나노 구조 재료 분석 국제 심포지엄

위원장 : 신은주(한국원자력연구원)

실무위원 : 우완측, 김태주, 채호병(한국원자력연구원)

Room 2층 205호, 10월 28일(수)

좌장 : 김태주(한국원자력연구원)

NeXS1-1 | 13:30 **Invited Talk**

The steel technology of European arms and armour as non-invasively analyzed using neutron methods: an overview

Francesco Grazzi*(CNR-IFAC, Sesto Fiorentino,INFN Sez. Firenze, Sesto Fiorentino)

NeXS1-2 | 14:05 **Invited Talk**

Complementary Applications of Neutrons and X-rays to Cultural Heritage and Paleontological Studies

Ito Daisuke*(Kyoto university)

NeXS1-3 | 14:40 **Invited Talk**

In-situ X-ray imaging system to investigate the solidification behaviors of metallic materials

Hyeong Uk Mo, Seon Ho Choi(POSTECH),Jihoon Han(Korea Basic Science Institute),Jina Kim(POSTECH),Wonjun Cho, In Sung Han(Kyungpook National University),Chang Wook Seol, Jong Hyun Kim*, Ho Jae Kwak*(POSTECH)

NeXS1-4 | 15:05 **Invited Talk**

Characterization of Hydrogen-Induced Fatigue Damage in Pressure Vessel Steel Using Neutron Dark-Field Imaging

Youngju Kim*(Korea Atomic Energy Research Institute)

NeXS1-5 | 15:20 **Invited Talk**

Energy-Selective Neutron Imaging for Spatially Resolved Crystallographic Analysis of Metallic Materials

Junyoung Son(Korea Atomic Energy Research Institute,Pusan Nat'l Univ),Tae Joo Kim, Youngju Kim, Jongyul Kim(Korea Atomic Energy Research Institute),Seung Wook Lee*(Pusan Nat'l Univ)

Break Time | 15:35

좌장 : 채호병(한국원자력연구원)

NeXS2-1 | 15:50 **Invited Talk**

Two decades (almost) of strain scanning on KOWARI

Vladimir Luzin (ANSTO)

NeXS2-2 | 16:25 **Invited Talk**

Assessment of Stress-Driven Regional Hydrogen Embrittlement in TIG-Welded 304L Stainless Steel

WORAKAN TONGPRAPAI(충남대학교),채호병(한국원자력연구원),이동현(충남대학교),우완측(한국원자력연구원),이수열*(충남대학교)

NeXS2-3 | 16:45 **Invited Talk**

Hydrogen-Induced Anisotropy in Single-Crystal Elastic Constants of 304L Stainless Steel via In-Situ Neutron Diffractionn and Kröner Modeling

Byungrok Moon, Baek-Seok Seong, Donghyeon Choi, Jimin Nam, Jungbin Park(Pusan National University),Seung-Gun Lee(Korea Institute of Materials Science),Wanchuck Woo, Hobyung Chae(Korea Atomic Energy Research Institute),Namhyun Kang*(Pusan National University,Institute of Materials Technology)

NeXS2-4 | 17:05 **Invited Talk**

Neutron and synchrotron X-ray diffraction studies on medium-entropy alloys: neutron-absorbing capability and deformation mechanisms

JAEHEUNG LEE(POSTECH),Hyeonseok Kwon*(Kookmin University),Bon Woo Koo(POSTECH),Sang Guk Jeong(Hanwha Aerospace),Hobyung Chae, Wanchuck Woo(Korea Atomic Energy Research Institute),Wu Gong, Stefanus Harjo(J-PARC Center),Emad Maawad(Helmholtz-Zentrum Hereon),Changwan Ha(Pohang Accelerator Laboratory),Sangbong Yi(Kumoh National Institute of Technology),Hyoung Seop Kim*(POSTECH)

NeXS2-5 | 17:25 **Invited Talk**

공정 중 실시간 열화상 및 형상 계측을 활용한 금속 3D 프린팅 잔류응력 추정과 중성자 회절 기반 검증

신수빈(한국과학기술원),이수열(충남대학교),우완측, 채호병(한국원자력연구원),손훈*(한국과학기술원)

에너지재료

위원장 : 신병하(KAIST)
부위원장 : 박찬진(전남대학교)
총무간사 : 남대현(고려대학교), 오지훈(KAIST), 유상우(경기대학교)
Room 2층 206/8호, 10월 28일(수)

좌장 : 남대현(고려대학교)

에너지1-1 | 08:30

Mechanochemical Interface Engineering of ZnP_2/Carbon Anodes for Sodium-Ion Batteries

PYOCHAN KIM, CHANJIN PARK*(Chonnam Univ.)

에너지1-2 | 08:45

Materials-Descriptor-Based Machine Learning for Pre-Cycling Lifetime Estimation of Aluminum Foil Anodes for Li ion batteries

Junoh Jung, Hee-Tae Jeong, Woo Jin Kim*(Hongik Univ.)

에너지1-3 | 09:00

Microstructural and Compositional Control of NASICON $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ Electrolytes for High-Performance Solid-State Sodium-Metal Batteries

Hyun Su Kim, Chan Jin Park*(전남대학교)

에너지1-4 | 09:15

Ultrathin lithium-metal reservoirs enabled by microstructure-engineered Mg-Li precursor foils

Hee-Tae Jeong, Jun Oh Jung, Woo Jin Kim*(Hongik Univ.)

Break Time | 09:30

좌장 : 남대현(고려대학교)

에너지2-1 | 09:35

Effect of Surface-Grafted LLZTO Fillers on the Electrochemical Performance of Composite Solid Polymer Electrolytes for Solid-State Lithium-Oxygen Batteries

Jun-Hyeong Seo, Chan-Jin Park*(Chonnam National Univ.)

에너지2-2 | 09:50

Microstructure-engineered Li/$Li_{22}Sn_5$ composite foil anodes for stable high-rate lithium-metal batteries

JunYoung Kim, Hee-Tae Jeong, Woo Jin Kim*(Hongik Univ.)

에너지2-3 | 10:05

Defect-Engineered Ceria Interlayers for High-Performance Solid Oxide Electrochemical Cells

Hyeongmin Yu(KAIST),Incheol Jeong(KIGAM),Sang Won Lee(KICET),Hansu Chang, Seeun Oh(KAIST),Tae Ho Shin(KICET),Kang Taek Lee*(KAIST)

에너지2-4 | 10:20

Understanding the Effects of Sc/Nb Composition on Defect Chemistry and Hydration Behavior in $BaCoO_{3-\delta}$ Oxygen Electrodes

Seeun Oh(KAIST),Incheol Jeong(KIGAM),Jiwon Kim, Dongyeon Kim, Hyeonggeun Kim, Kang Taek Lee*(KAIST)

Break Time | 10:35

좌장 : 유상우(경기대학교)

에너지3-1 | 10:40

Lithiation-Dependent Structural and Electronic Responses of Cation-Substituted Spinel LiMn2O4

Woo Yeong Jeong,Yong-Seok Choi*(Dankook University)

에너지3-2 | 10:55

Effect of Electrode Materials on Corrosion Behavior and Long-Term Performance of Cellulose-Based Hydrovoltaic Generators

Yu-Na Lee(Korea Institute of Industrial Technology,Hanyang Univ.),So Hyun Baek, Seung-Hwan Lee, Yewon Do, Yongbum Kwon, Kanghyuk Lee, Taeseok Oh, Bum Sung Kim(Korea Institute of Industrial Technology),Yong-Ho Choa*(Hanyang Univ.),Da-Woon Jeong*(Korea Institute of Industrial Technology,Chung-Ang Univ.)

에너지3-3 | 11:10

초고농도 KOH의 고속 계면 결정화를 활용한 수동형 직접공기포집

김동하*(울산과학기술원)

좌장 : 유상우(경기대학교)

에너지4-1 | 11:25

CO_2RR 향상을 위한 Cu-Si계 고엔트로피 합금 촉매의 $Cu^0/Cu^{\delta+}$ CO_2 반응 전후 변화

이유진(아주대학교),이한성(Yale University),아주대학교),안병민*(아주대학교)

에너지4-2 | 11:40

Vacancy-Driven 2H-to-1T' Phase Engineering in MoTex/Ni(OH)2 Heterostructures for Bifunctional Hybrid Water-Hydrazine Electrolysis

Seungjin Baek, Won-Kyu Lee*(홍익대학교)

에너지4-3 | 11:55

Plasma-Induced Amorphous-Crystalline Heterophase Formation for Enhanced Electrochemical Ethanol Oxidation on $PtTe_2$

Jihun Yim, Won-Kyu Lee*(Hongik Univ.)

여성수상자 초청강연

위원장 : 정은진(한국산업기술기획평가원), 최현주(국민대학교)
실무위원 : 신세은(한양대학교), 김세호(고려대학교)
Room 2층 206호/8호, 10월 28일(수)

좌장 : 정은진(한국산업기술기획평가원)

여성1-1 | 13:30 초청강연

Interfacial Engineering and thermally assisted transfer printing for High-Performance, High-Definition Intrinsically Stretchable QLEDs
Moon Kee Choi*(울산과학기술원)

여성1-2 | 13:55 초청강연

경계를 넘는 연구, 계획하지 않은 커리어
김미소*(한국과학기술원)

여성1-3 | 14:20

Laser powder bed fusion 공정으로 제조한 A20X 합금의 직접 시효에 따른 미세조직 및 물성변화
한규미(포항공과대학교),정영훈(국립경상대학교),백민재, 조용희, 박정민, 이동준(한국재료연구원),김정기*(국립경상대학교),김형섭*(포항공과대학교)

여성1-4 | 14:35

원전 내부구조물 오스테나이트 스테인리스강 용접부의 열시효 거동 분석 및 활성화에너지 도출
김유진(충남대학교),김지수(한국원자력연구원),서주원(서울대학교),김종민(한국원자력연구원),이수열(충남대학교),홍석민*(한국원자력연구원)

Break Time | 14:50

좌장 : 김세호(고려대학교)

여성2-1 | 15:00

Inorganic Halide Perovskite Quantum Dots for Memristors
조효민*(서울대학교)

여성2-2 | 15:15

확신이 없던 학부생이 어떻게 대학원생이 되었나
강태연, 최현주*(국민대학교)

여성2-3 | 15:30

잘못된 실험은 없다 – 수행원에서 연구자로
이경환, 최현주*(국민대학교)

여성2-4 | 15:45

Bunsenite (NiO)의 환원 및 환원제에 따른 Ni 입자 성장 거동
조모현, 김세호*(고려대학교)

여성2-5 | 16:00

결과 전달에서 결과 해석으로: 학부연구생 경험을 통한 연구 인식의 변화
한선구, 최현주*(국민대학교)

여성2-6 | 16:15

DED 공정조건 고정 조합실험을 통한 학습 데이터 구축 및 AI 합금 조성 최적화
김도원, 전서연, 안성빈, 송용욱, 박수원, 최현주*(국민대학교)

미래 원자력 재료 심포지엄

위원장 : 류호진(한국과학기술원)
실무위원 : 조중옥(포항공과대학교), 염화성(포항공과대학교)
Room 2층 209/11호, 10월 28일(수)

좌장 : 류호진(한국과학기술원)

미래원자력1-1 | 09:00 초청강연

대한민국 사고저항성핵연료 피복관 상용화 기술 개발 현황
임광영*(한전원자력연료)

미래원자력1-2 | 09:25 초청강연

미래 원자력용 철강 소재 개발 동향
송병준*, 김대우, 송석원, 정성훈(포스코)

미래원자력1-3 | 09:50 초청강연

Core Component Manufacturing Technology for Heat Pipe Cooled Microreactor
JONGDAE HONG*, HONGRYOUL OH, HO-A KIM, JOONHO MOON(Korea Atomic Energy Research Institute),DAEJUNG KIM(AM Solutions),CHANGHEUI JANG(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

Break Time | 10:15

좌장 : 류호진(한국과학기술원)

미래원자력2-1 | 10:25 초청강연

사용후핵연료 저장시설의 제작 효율성 향상을 위한 중성자흡수 구조재 개발
천영범*, 강지훈, 박선영, 정승문, 강석훈(한국원자력연구원)

미래원자력2-2 | 10:50 초청강연

혁신제조공정으로 제조된 첨단 원자력 구조재료의 조사저항성
류호진*(한국과학기술원)

원자력 재료

위원장 : 류호진(한국과학기술원)
총무간사 : 염화성(POSTECH), 강석훈(한국원자력연구원)
Room 2층 209/11호, 10월 28일(수)

좌장 : 김현길(인스텍)

원자력1-1 | 13:30

Ion Irradiation Research for Nuclear Energy Applications
Hwasung Yeom*(Pohang University of Science and Technology)

원자력1-2 | 13:45

양성자 조사된 XM-19 전자빔 용접부의 용접 조직별 조사 경화 민감도 및 경도 불균질 정량 비교
김대현, 한성희, 김보규, 한준희, 윤수빈, 류연아, 장민교, 길태연, 신중호*(강원대학교)

원자력1-3 | 14:00

중성자 조사된 LPDED 적층제조 SA508 Gr.3 저합금강의 조사경화 거동: 적층 방향 및 단조재와의 비교

류진호(한국원자력통제기술원),정원종(영남대학교),류호진*(한국과학기술원)

원자력1-4 | 14:15

헬륨 이온 조사 기반 첨단 원자력재료의 스웰링 평가와 소재 개발

신찬선*(명지대학교),진형하, 이동원(한국원자력연구원),노상훈(국립부경대학교),이창훈(한국재료연구원)

원자력1-5 | 14:30

포타슘 버블과 전위가 텅스텐의 변형과 파괴에 미치는 영향

김정석, 류일(서울대학교),고원석(고려대학교),최석현, 이성민, 오철헌, 한흥남*(서울대학교)

원자력1-6 | 14:45

인성 및 산화저항성이 향상된 핵융합로용 W-Cr 복합재 제작 및 물성 평가

이성민, 김정석, 오철헌, 곽노준, 한흥남*(서울대학교)

원자력1-7 | 15:00

산화물 분산 공정에 따른 Ni-base ODS 합금의 미세조직, 기계적 특성 및 용융염 내식성

이원찬, 김정한*, 김대한, 정성훈, 이태규(국립한밭대학교),김태하, 박기대(충북대학교)

Break Time | 15:15

좌장 : 염화성(포항공과대학교)

원자력2-1 | 15:25

금속 적층제조 기술을 활용한 원자력용 소재 부품 적용 연구

김현길*, 김영범, 고은하, 심철용(InssTek)

원자력2-2 | 15:40

적층제조공정으로 제조된 중성자 차폐용 Al6061-Gd_2O_3-TiB_2 복합 코팅재의 미세조직 및 물성 평가

이원희, 이태규*, 이민제, 신주원(국립한밭대학교),김윤희(한국과학기술원)

원자력2-3 | 15:55

VC-Reinforced RAFM Steel Composites Fabricated by Laser Powder Directed Energy Deposition

Wonjong Jeong*(Yeungnam Univeristy),Suh Joowon, Suk Hoon Kang, Seungmun Jung(Korea Atomic Energy Research Institute),Soon Jik Hong(Kongju National Univeristy),Ho Jin Ryu*(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

원자력2-4 | 16:10

열처리 압력 조건에 따른 초오스테나이트계 스테인리스강(XM-19)의 미세조직 및 기계적 물성변화 분석

윤준원, 박성민(한국생산기술연구원,고려대학교),이민수(한국생산기술연구원),손석수*(고려대학교),박창수*(한국생산기술연구원)

원자력2-5 | 16:25

HIP 온도에 따른 페라이트/마르텐사이트강내 산화물 형성 거동

서보성, 차은빈, 박광석*(한국생산기술연구원)

원자력2-6 | 16:40

Microstructure evolution of zirconium by oxidation under LOCA-relevant temperature using phase-field modeling

jiho kim, Kunok Chang*(Kyung Hee University)

원자력2-7 | 16:55

Data-Driven Modeling of Elemental Solution Enthalpies in Liquid Lead: Feature Exploration and Predictive Insights

Seoyeon Bak(Seoul National University),Junhyoung Gil(Japan Atomic Energy Agency),Jimin Lee, Chaeyeong Kim, Takuji Oda*(Seoul National University)

New Horizon : 재료강도 및 소성가공 기술의 과거, 현재 및 미래 심포지엄

- 故장영원교수님 memorial symposium

위원장 : 이광석(한국재료연구원), 김정한(국립한밭대학교)

Room 3층 컨퍼런스, 10월 28일(수)

좌장 : 방원규(포스코)

개회사 및 축사| 13:30

재료가공1-1 | 13:40 초청강연

철강 기술혁신의 역사, 그리고 새로운 도전

김기수*(포스코)

재료가공1-2 | 14:05 초청강연

내부변형변수를 이용한 초소성 변형거동 해석

하태권*(강원대학교),신홍철(포항산업과학연구원)

재료가공1-3 | 14:30 초청강연

소성변형이론의 헤리티지: 신합금 개발과 적층제조 공정으로의 확장

이기안*(인하대학교)

재료가공1-4 | 14:55 초청강연

항공소재 공급망 현황과 국내 공급망 경쟁력 강화 방향

권용남*(한국재료연구원)

Break Time | 15:20

좌장 : 성효경 (국민대학교)

재료가공2-1 | 15:30 초청강연

다성분계 합금 및 이종금속소재의 미세조직 연계 강도 및 성형성 연구 사례

이광석*(한국재료연구원),김정수(기술보증기금),전현준(한국원자력연구원)

재료가공2-2 | 15:50 초청강연

초고내식 클래드용 Zr702 소재의 제조기술과 열간가공 공정 설계

이현석, 최미선*(포항산업과학연구원)

재료가공2-3 | 16:10 초청강연

응력이완 실험을 이용한 고망간 TWIP 강의 소성변형 기구 분석

김정한*(국립한밭대학교)

Break Time | 16:30

좌장 : 신홍철(포항산업과학연구원)

재료가공3-1 | 16:40 장영원학술상 수상기념강연

무방향성 전기강판의 미세조직 및 잔류응력이 철손에 미치는 영향

김주영*(UNIST)

재료가공3-2 | 17:00 장영원학술상 수상기념강연

페라이트계 스테인리스강의 집합조직과 소성변형 특성

박지언*(POSCO)

재료가공3-3 | 17:20 초청강연

BCC 철의 고용강화와 연화에 대한 연구 동향: 고전적 탄성론에서 원자론 · 전자구조 해석으로의 확장

전종배*(동아대학교)

재료가공3-4 | 17:40 초청강연

가스터빈 고온부품의 미세조직 열화거동 및 재생정비를 통한 미세조직 회복거동

정중은*, 김인수, 도정현, 이상원, 최백규, 정인용(한국재료연구원)

ORAL SESSION II 10월 29일



가공-열처리

위원장 : 이광석(한국재료연구원)
총무간사 : 강용준(한국재료연구원),
김준호(한국생산기술연구원), 성효경(국민대학교),
오세권(한국생산기술연구원), 이제인(부산대학교)
Room 1층 101호, 10월 29일(목)

좌장 : 김규식(국방과학연구소 (ADD))

열처리1-1 | 09:00

용체화 온도가 Ni-38Cr-3.8Al 합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향
윤성민, 이제인*(부산대학교)

열처리1-2 | 09:15

Pd-Cu-Ag 합금 와이어의 비혼화 간극(Miscibility Gap)에 따른 상분리가 시효 경화 및 기계적 · 전기적 특성에 미치는 영향
이승준(한국재료연구원,동아대학교),양우석(한국재료연구원),문정탁, 이석연(MKE전자),신다슬*, 민경문*(한국재료연구원),전종배*(동아대학교)

열처리1-3 | 09:30 **Canceled**

V 첨가가 고속도강의 뜨임연화저항에 미치는 영향 분석
최재영(영남대학교 신소재공학과),이준오, 박노근*(영남대학교 신소재공학부)

열처리1-4 | 09:45

고질소 오스테나이트계 스테인리스강의 합금원소 함량에 따른 시효 중 석출 거동 및 기계적 특성
김승현(한국재료연구원,동아대학교),김성훈*, 이태호, 이진종, 조효행(한국재료연구원),정재석(두산에너빌리티),전종배*(동아대학교)

열처리1-5 | 10:00

바나듐 및 크롬 첨가 고망간강의 열처리 온도에 따른 탄화물 석출 거동, 미세조직 및 기계적 물성 분석
양승우, 송호정(동아대학교 금속공학과),박시욱, 김용진(국방과학연구소),박건우(울산과학기술원 신소재공학과),소태일(포스코 기술연구원),장재훈(동아대학교 컴퓨터공학과),전종배*(동아대학교 금속공학과)

Break Time | 10:15

좌장 : 이정한(한국생산기술연구원 (KITECH))

열처리2-1 | 10:25

ϕ1.74 mm 저탄소 용접 와이어의 열처리에 따른 연화 거동
이종혁, 이수연, 장병록*(인하대학교 제조혁신전문대학원)

열처리2-2 | 10:40

표면 산화층이 냉간압조용 0.3C 중탄소강의 탈탄 및 소입 경도에 미치는 영향
이수연, 이종혁, 장병록, 김광육*(인하대학교 제조혁신전문대학원)

열처리2-3 | 10:55

순환성 원소 함유 강의 산화 및 고온 변형 조건에 따른 고온취성 거동 및 발생 기구
김우진(한국재료연구원,부산대학교),김성훈, 장여진, 유지성(한국재료연구원),권순환, 신명철, 조종오(현대제철),박형권*(한국재료연구원),강남현*(부산대학교)

열처리2-4 | 11:10

저항복비 확보를 위한 고강도 후판의 열처리 조건별 특성 평가
유재홍, 김영준, 송준무, 한성경*(현대제철)

열처리2-5 | 11:25

금속간화합물 형상이 냉간압연된 6xxx계 알루미늄 합금 판재의 정적 재결정 거동에 끼치는 영향
조상현(한국생산기술연구원),박지욱(한국생산기술연구원,과학기술연합대학원대학교),이미영(한국생산기술연구원,과학기술연합대학원대학교,한국과학기술연구원),박예린, 신우승(한국생산기술연구원),김재황*(한국생산기술연구원,과학기술연합대학원대학교,한국과학기술연구원,전북대학교)

수소 및 청정에너지 환경 대응 표면 · 계면 제어 소재기술

위원장 : 이광석(한국재료연구원)
실무위원 : 오세권(한국생산기술연구원), 이제인(부산대학교),
강용준(한국재료연구원), 성효경(국민대학교)
Room 1층 101호, 10월 29일(목)

좌장 : 김준호(한국생산기술연구원 (KITECH))

청정1-1 | 13:30 **초청강연**

수소 생산저장 인프라 적용을위한 Zn-Ni/Ni 다층도금의 내식성 및 수소취성 억제 거동 연구
이정훈(국립부경대학교)

청정1-2 | 13:55 **초청강연**

알칼라인 수전해를 위한 니켈 기반 대면적 전극 표면처리 기술개발 및 분리판 가혹평가 시험 연구
배상현*, 김형찬*(한국생산기술연구원)

청정1-3 | 14:20 **초청강연**

친환경 연료 환경 수소 부식 대응 고내식 코팅기술 및 자동차 코팅 최신 기술
차성철*(현대케피코),문경일, 권기훈(한국생산기술연구원)

청정1-4 | 14:45 **초청강연**

Atomic-scale engineering of advanced fuel cell catalyst via atomic layer deposition
Se-Hun Kwon*(Pusan National University)

Break Time | 15:10

좌장 : 오세권(한국생산기술연구원 (KITECH))

청정2-1 | 15:20 초청강연

Design Strategies of Metal Electrocatalysts for Green Hydrogen Production and Carrier

Jeonghoon Lim*(Chungnam National Univ.)

청정2-2 | 15:45 초청강연

AEM 수전해 촉매층/PTL 계면 특성 향상을 위한 니켈 분말 소결 MPL 연구

김민중*(경희대학교)

청정2-3 | 16:10 초청강연

PEM 수전해 시스템의 경제성 확보를 위한 금속표면처리 기술 개발 현황

최권훈(현대자동차)

청정2-4 | 16:35 초청강연

그린수소생산을 위한 복합 산화물 지지체의 표면 용출 현상 기반 촉매층 코팅 기술 연구

이창수(충남대학교)

적층제조 및 분말 II

위원장 : 홍순직(공주대학교)

총무간사 : 강민철(3D프린팅연구조합), 김정기(경상국립대학교), 문종언(공주대학교)

Room 1층 105/6호, 10월 29일(목)

좌장 : 주수현(단국대학교)

적층5-1 | 09:00

직접용융증착으로 제조된 15-5PH 스테인리스강의 직접 시효에 다른 기계적 특성 및 미세구조 변화

주수빈(경상국립대학교),한규미(포항공과대학교),조묘현(고려대학교),김형섭(포항공과대학교),김세호(고려대학교),김정기*(경상국립대학교)

적층5-2 | 09:15

LW-DED로 제조된 316L 스테인리스 강의 기계적 특성 및 부식 거동의 이방성 분석

한지민, 이종익, 이유진*, 이빈*(경희대학교)

적층5-3 | 09:30

MEX 적층 제조 공정과 정밀 형상 출력(fine feature) 기술을 적용한 17-4PH 스테인리스강의 미세조직 및 기계적 특성

서민서, 조용훈(인하대학교),김대용(HRT Robotics),이기안*(인하대학교)

적층5-4 | 09:45

Direct Energy Deposition 공정으로 제조한 M4/G6 multi-layer 공구강의 미세조직 및 기계적 물성

전민수, 박정현(인하대학교),김대중((주)에이엠솔루션즈),구용모((주)창성),이기안*(인하대학교)

적층5-5 | 10:00

적층제조 중 층간 대기시간 없이 석출강화되는 고강도 마레이징 합금

김진우, 이재흥, 안성열, 구본우, 이시우, 이정아(포항공과대학교),권현석(케임브리지대학교),백건우(국립공주대학교),허윤욱(포항공과대학교),홍순익(충남대학교),홍순직(국립공주대학교),김형섭*(포항공과대학교)

Break Time | 10:15

좌장 : 채홍준(고등기술연구원)

적층6-1 | 10:25

레이저 출력 및 계면 형상이 L-DED로 제조된 Ni/Al 이종 접합의 초기 파단 저항성에 미치는 영향

조해주, 정종욱, 이욱진*(부산대학교)

적층6-2 | 10:40

FLOW-3D 및 TC-PRISMA 해석 기반 DED 단일 적층 트랙에서의 W_2C 강화입자 용해 거동 및 위치별 미세조직 변화

이은세, Rohit Raj(국립순천대학교),최시훈*(국립순천대학교)

적층6-3 | 10:55

다중 입도 Fe-Co계 분말을 이용한 고충진 연자성 복합재의 재료압출식 적층제조 및 특성 평가에 대한 연구

이강현, 김민종(한양대학교),임태협(한양대학교,Nanyang Technological University),이선영*(한양대학교)

적층6-4 | 11:10

DED 기반 P21-STS316L 경사기능재료의 조성 구배에 따른 미세조직 진화 및 기계적 특성 규명

강수성(한국생산기술연구원,국립부경대학교),김중훈(한국생산기술연구원,울산과학기술원),김형찬, 김병준(한국생산기술연구원),노상훈*(국립부경대학교),김병구*(한국생산기술연구원)

적층6-5 | 11:25

Interpretable Data-Driven Multiscale Modeling of Pore Morphology - Property Relationships in Additive Manufacturing

Jaemin Wang(Kyungpook National University,Max Planck Institute for Sustainable Materials),Seungyeon Lee, Yeon Woo Kim, Kyung Tae Kim, Jeong Min Park*(Korea Institute of Materials Science),Dierk Raabe*(Max Planck Institute for Sustainable Materials)

1st Global Symposium on Additive Manufacturing & Powder Meterallurgy

Chair : Soon Jik Hong (Kongju National University)

Organizing Committee: Min-Chul Kang (3D Printing Research Association), Jung Gi Kim (Gyeongsang National University), Jongun Moon(Kongju National University)

Room 105/6 (1F), Thu., Oct. 29

Chair : Soon Jik Hong (Kongju National University)

AMPM1-1 | 13:30 Invited Talk

Strong, Ductile and Resource-Efficient Titanium - Oxygen - Iron Alloys by Additive Manufacturing

Ma Qian*(RMIT University)

AMPM1-2 | 14:00 **Invited Talk**

Combining strain-assisted nanoprecipitation with nanotwins to enhance strength of laser additively manufactured high-entropy alloys

Yuan Tian, Yunzhuo Lu(Dalian Jiaotong University),R. Lakshmi Narayan(Indian Institute of Technology Delhi)

AMPM1-3 | 14:30 **Invited Talk**

Interfacial engineering for mitigating brittle intermetallics at steel/Al heterointerfaces through powder bed fusion

Kenta Yamanaka(Tohoku University),Yujie Cui(University of Science and Technology Beijing),Akihiko Chiba(Tohoku University)

Break Time | 15:00

좌장 : Jongun Moon(Kongju National University)

AMPM2-1 | 15:15 **Invited Talk**

Design of Lattice Structures (DoLS): From Tessellation and Nesting Strategies to Additive Manufacturing of Ceramics for Thermal Management Applications

Chinmai Bhat*(National Taipei University of Technology)

AMPM2-2 | 15:45 **Invited Talk**

Multiphysics Simulation for Understanding and Controlling Microstructure Evolution in High-Silicon Fe Alloy

Seungkyun Yim(Tohoku University,Jeonbuk National University)

AMPM2-3 | 16:15 **Invited Talk**

Dual-scale Cr-rich skeleton tailored by extreme high speed broadband laser cladding for synergistically improved wear and corrosion resistance of Fe-based coatings

Renlong Xiong(Sichuan University)

재료분석

위원장 : 허윤욱(POSTECH)
총무간사 : 김성대(국립부경대학교)
Room 1층 103호, 10월 29일(목)

좌장 : 허윤욱(포항공과대학교)

재료분석1-1 | 08:30

Hybrid evaluation of steel polymer multi material clad using mechanical testing and finite element analysis

Zaigham Saeed Toor, Jihye Kwon, Rae Eon Kim, Yeon Taek Choi, Gang Hee Gu(POSTECH),Min-Hong Seo, Kyung-Hwan Chung(POSCO),Renhao Wu*, Hyoung Seop Kim*(POSTECH)

재료분석1-2 | 08:45

마레이징강의 석출 거동과 기계적 특성 분석

박성현, 신우철(전북대학교),신은주(한국원자력연구원),이석재, 정재길*(전북대학교)

재료분석1-3 | 09:00

후속 심냉처리에 따른 고망간강 기계적 물성 평가

이태호(충남대학교),강전연(한국재료연구원),이수열*(충남대학교)

좌장 : 허윤욱(포항공과대학교)

재료분석2-1 | 09:15 **초청강연**

In situ Analysis of Radiation-Accelerated Metal Oxidation in Gas-Cell TEM

Kunmo Koo*(Pusan National University)

재료분석2-2 | 09:40

전류를 이용한 Inconel 718 결정립계 δ상의 용해도 이하에서의 선택적 용해 거동과 γ/δ 계면 구조의 역할

정찬우, 김이재, 한흥남*(서울대학교)

재료분석2-3 | 09:55

Real-Time Observation Platform for Localized Corrosion Initiation in High-Chromium Cast Iron

이준섭*, 주티앤유앤(국립창원대학교)

Break Time | 10:10

좌장 : 김성대(국립부경대학교)

재료분석3-1 | 10:20 **초청강연**

Q&P강의 절단부 파괴 거동에 미치는 미세조직의 영향: 실시간 분석을 통한 변형 및 손상 기구 규명

김경식*(국립금오공과대학교)

재료분석3-2 | 10:45 **초청강연**

Atomic-Scale Structure - Property Relationships in Structural and Functional Materials

Hwangsun Kim*(Kumoh National Institute of Technology)

재료분석3-3 | 11:10

Variant-Pair Controlled Bending Anisotropy in Hot-Stamped Steel Revealed by EBSD

Nu Ri Shin(Hyundai Steel R&D Center,Sungkyunkwan University),Hun Chul Kang(Hyundai Steel R&D Center),Cheol-Woong Yang*(Sungkyunkwan University)

Break Time | 11:25

좌장 : 김성대(국립부경대학교)

재료분석4-1 | 11:30

극저온+수소 복합환경에서의 316L 스테인리스강 열영향부 피로 거동 분석

정재원, 이근형, 이태호, 이수열*(충남대학교)

재료분석4-2 | 11:45

초분광 이미징을 활용한 이차전지 외장케이스 제조 결함 분류

김민균, HwaSung Yeom*(Pohang University of Science and Technology)

재료분석4-3 | 12:00

Atomic-scale characterization and sustainable recycling strategies of spent battery cathodes

Doo-Hyo Jeong(Korea Univ.),I-Jun Ro(Stanford Univ.),Aleksander Albrecht, Se-Ho Kim*(Korea Univ.)

25th KIM-JIMM Symposium

Char : Ho Jin Ryu (KAIST)
Room 103 (1F), Thu., Oct. 29

Chair : Jae Bok Seol (POSTECH)

KJ1-1 | 13:30 **Invited Talk**

Digital Twin Science for Creation of Materials by Super-Thermal Fields in Additive Manufacturing and Its Potential for High-Entropy Alloys

Yuichiro KOIZUMI(Division of Materials and Manufacturing Science,null),Masayuki Okugawa(Division of Materials and Manufacturing Science,null),Akihiro Mitsuhara(Division of Materials and Manufacturing Science,null),Takeshi Nagase(Graduate School of Engineering, University of Hyogo),Takayoshi Nakano(Division of Materials and Manufacturing Science,null)

KJ1-2 | 13:50 **Invited Talk**

Is the Cantor Alloy Really a Single Phase? A Retrospective from 2013 to the Era of Ferrous High-Entropy Alloys

Nokeun Park *, Minku Choi(Yeungnam University),Byeong-Joo Lee(POSTECH),Nobuhiro Tsuji(Kyoto University)

KJ1-3 | 14:10 **Invited Talk**

High Entropy Nanoporous Alloys prepared by Liquid Metal Dealloying

Hidemi KATO(Tohoku University)

KJ1-4 | 14:30 **Invited Talk**

Development of High-Strength, Low-Thermal-Expansion Complex Concentrated Alloys

Soohyun Joo(Dankook University)

KJ1-5 | 14:50 **Invited Talk**

High entropy alloy thin films for spintronic applications

Kazuya Z. SUZUKI(Japan Atomic Energy Agency(JAEA))

Break Time | 15:10

Chair : Hidemi Kato(Tohoku University)

KJ2-1 | 15:30 **Invited Talk**

Short-range order and its impact on dislocations in FCC multi-principal element alloy

Jae Bok Seol(POSTECH)

KJ2-2 | 15:50 **Invited Talk**

Ultra-grain-refinement of face-centered cubic high/medium-entropy alloys: Approaching the limit of grain refinement through severe plastic deformation and recrystallization

Shuhei YOSHIDA(Kyoto University),Nokeun Park(Yeungnam University),Kohei Shiotani (Kanazawa University,Japan Atomic Energy Agency),Yu Bai (Dalian University of Technology),Tomoaki Niiyama (Kanazawa University),Akinobu Shibata (National Institute for Materials Science),Tomotsugu Shimokawa (Kanazawa University),Nobuhiro Tsuji (Kyoto University)

KJ2-3 | 16:10 **Invited Talk**

Linking Stacking Fault Energy to Dislocation Substructures and Serrated Plastic Flow at Ultra-Low Temperatures

Jae Woong Bae (Pukyung National University)

KJ2-4 | 16:30 **Invited Talk**

Synergistic of Stacking Fault Energy and Grain Size on Mechanical Performance in H/MEAs with FCC-HCP Transformation

Koichi TSUCHIYA, Fumiyoshi YOSHINAKA(National Institute for Materials Science (NIMS))

KJ2-5 | 16:50 **Invited Talk**

Discovering shape memory alloys in CrMnFeCoNi system

Je In Lee, Jinsurang Lim, Hwi Yun Jeong, Ana Paula Nolasco Aguilera(Pusan National University)

복합재료

위원장 : 조승찬(한국재료연구원)
총무간사 : 김정환(한국재료연구원)
Room 1층 104호, 10월 29일(목)

좌장 : 조승찬(한국재료연구원)

복합1-1 | 08:30

차세대 반도체 heatsink-baseplate용 고방열 · 고내구성 cBN 강화 Al 복합소재 개발: 강화재 입도 설계와 나노스케일 계면의 영향

김민수(한국재료연구원,부경대학교),조은서(한국재료연구원,부산대학교),이지윤(한국재료연구원,부경대학교),이상복, 이상관(한국재료연구원),권한상(부경대학교),김정환*, 조승찬*(한국재료연구원)

복합1-2 | 08:45

고충진 Thermal Interface Material의 미세구조 및 계면 조건에 따른 열전달 특성

유한준, 장병록, 고병철*(인하대학교 제조혁신전문대학원)

복합1-3 | 09:00

MOF 기반 Gd_2O_3 코팅 cBN 강화 Al 복합재료의 열확산 및 열중성자 차폐 특성

조은서(한국재료연구원,부산대학교),이지윤(한국재료연구원,부경대학교),강민우, 김민수, 김정환, 이상복(한국재료연구원),김양도(부산대학교),조승찬*(한국재료연구원)

Break Time | 09:15

좌장 : 조승찬(한국재료연구원)

복합2-1 | 09:20

Al 함침된 Ti6Al4V 격자 구조체의 미세조직, 기계적 특성 및 열적 특성

최은비, 박소연(인하대학교),김세훈(한국자동차연구원),이기안*(인하대학교)

복합2-2 | 09:35

입방정 질화붕소 강화 마그네슘 기지 금속복합소재 제조 및 특성 평가

이태호, 김종민, 정다운, 박현재(한국재료연구원,부산대학교),조승찬, 이상복, 이상관(한국재료연구원),김양도(부산대학교),김정환*(한국재료연구원)

복합2-3 | 09:50

Effect of TiCu precursor composition ratio on bending behavior of bicontinuous Mg-Ti composites fabricated by liquid metal dealloying

Su Rin Cho(Kyungpook National Univ.),Soo-Hyun Joo(Dankook Univ.),Sung Hyuk Park*(Kyungpook National Univ.)

복합2-4 | 10:05

Effect of Al content in Mg alloy melts on mechanical and corrosion properties of Mg-Ti composites fabricated by liquid metal dealloying

YoHan Lee, Park Bo Hyun, Cho Su Rin, Sung Hyuk Park*(Kyungpook Univ.)

Break Time | 10:20

좌장 : 김정환(한국재료연구원)

복합3-1 | 10:25 **Canceled**

In-situ 저압 산화에 의한 Cu-Ti/Cu-TiO_2 복합재의 Scale 저감 효과

윤호균, 황지인(한국재료연구원),문하영(한국재료연구원,과학기술연합대학원대학교),최은애, 한승전*(한국재료연구원)

복합3-2 | 10:40

Ni-C 합금의 미세조직 변화에 따른 인장 변형 거동

한희주(영남대학교 신소재공학과),신현빈, 박노근*(영남대학교 신소재공학부)

복합3-3 | 10:55

TiC/Fe 복합재료의 코어-림 특성 및 압축 · 인장 거동에 미치는 Mo 함량의 영향

박현재, 이태호, 정다운(한국재료연구원,부산대학교),차승주(한국재료연구원,동의대학교),임유진, 조승찬, 이상복, 이상관(한국재료연구원),김양도(부산대학교),김정환*(한국재료연구원)

Break Time | 11:10

좌장 : 김정환(한국재료연구원)

복합4-1 | 11:15

Fast and Selective Isoprene Detection with Indium Oxide Hollow Hemispheres: Impact of Polystyrene Template Size and Gold Nanoparticle Decoration on Gas Sensing Properties

Junho Hwang(연세대학교),Young-Seok Shim*(한국기술교육대학교),Wooyoung Lee*(연세대학교)

복합4-2 | 11:30

Coupled magneto-mechanical response of laminate composites comprising a layer of Ni-Mn-Ga microparticles

Dong Keun Han(Pohang Accelerator Laboratory),Wan-Ting Chiu, Masaki Tahara(Institute of Tokyo Science),Volodymyr Chernenko*(Institute of Tokyo Science,University of Basque Country),Senentxu Lanceros-Mendez(University of Basque Country),Hosoda Hideki*(Institute of Tokyo Science)

복합4-3 | 11:45

조성적 · 구조적 이종 특성을 갖는 비선형 복합소재 설계를 위한 단층촬영 이미지 기반 디지털 트윈

유시원, 이강택*, 류호진*(한국과학기술원)

학생분과 심포지엄

위원장 : 신세은(한양대학교)
총무간사 : 박진웅(국립한밭대학교)
Room 1층 104호, 10월 29일(목)

좌장 : 신세은(한양대학교)

학생심포1-1 | 13:30 초청강연

신소재공학자와 벤처

장세윤((주)마이다스에이치앤)

학생심포1-2 | 14:00 초청강연

연구실을 나선 뒤 비로소 보이는 것들

정은진*(한국산업기술기획평가원)

Break Time | 14:30

좌장 : 신세은(한양대학교)

학생심포2-1 | 15:00 초청강연

AI기반 소재 디자인

이동화(포항공과대학교)

학생심포2-2 | 15:30 초청강연

재료연구는 무엇을 남기는가?

한승전*(한국재료연구원)

가공-소성가공

위원장 : 이광석(한국재료연구원)
총무간사 : 강용준(한국재료연구원),
김준호(한국생산기술연구원), 성효경(국민대학교),
오세권(한국생산기술연구원), 이제인(부산대학교)
Room 1층 102호, 10월 29일(목)

좌장 : 강용준(한국재료연구원)

소성1-1 | 08:30

Superplasticity in Aluminum and Magnesium Alloys: A Literature Census of Processing Windows and Thermodynamics-Informed Machine Learning

Woo Jin Kim*, Hee-Tae Jeong, Junoh Jung(Hongik Univ.)

소성1-2 | 08:45

Delta process가 적용된 Alloy 718의 열간 변형 거동 분석 및 Processing Map 개발

정설빈, 박형권, 박기태, 송상우, 강용준*(한국재료연구원)

소성1-3 | 09:00

Inconel 718 건식 밀링에서 공구마모가 표면건전성에 미치는 영향

이택*, 허재영, 윤일채(대구기계부품연구원)

Break Time | 09:15

좌장 : 강성규(경상국립대학교)

소성2-1 | 09:25

알루미늄 합금 인발 공정에서 단면 감소율이 잔류응력과 미세조직에 미치는 영향

김현웅, 신다슬, 양우석*, 이광석*(한국재료연구원)

소성2-2 | 09:40

가공지도를 활용한 CP-Ti/탄소강 클래드 판재의 열간 압연 접합

양수미, 김민직(한국재료연구원),김기혁, 성준호(동국제강),양우석*, 신다슬*(한국재료연구원)

소성2-3 | 09:55

초음파 나노표면개질 공정으로 유도된 잔류응력의 크기 및 영향 깊이가 겉보기 항복강도 감소에 미치는 영향

최언준(한국재료연구원),신재우, 조재현(케이에스피),윤은유*, 홍종화*(한국재료연구원)

소성2-4 | 10:10

열처리에 따른 미세조직 제어를 통한 1GPa급 0.25C-1.5Mn-1.5Si 강의 냉간 다단 단조성 평가

안민호(한국재료연구원,경북대학교),이영선(한국재료연구원),박성혁(경북대학교),우영윤*(한국재료연구원)

차세대 디스플레이 소재 · 소자 융합 기술 심포지엄

위원장 : 이태우(서울대학교)
실무위원 : 문제현(ETRI), 김수영(고려대학교), 조성용(한양대학교))
Room 1층 102호, 10월 29일(목)

좌장 : 최민재(성균관대학교)

차세대디플1-1 | 13:30 초청강연

메타렌즈의 기술적 이슈

문제현*(한국전자통신연구원)

차세대디플1-2 | 13:55 초청강연

Silver Telluride Quantum Dots for Next-Generation SWIR Photodetectors: From Surface Chemistry to Device Operation

Min-Jae Choi*(성균관대학교)

차세대디플1-3 | 14:20 초청강연

차세대 OLED 디스플레이용 다기능성 봉지막: 수동적 배리어를 넘어 능동적 기능층으로

정소영*, 김, 김현준(한국공학대학교)

차세대디플1-4 | 14:45 초청강연

Doping Strategies for Intelligent Optoelectronics

Keehoon Kang*(Seoul National University)

Break Time | 15:10

좌장 : 최문기(울산과학기술원)

차세대디플2-1 | 15:20 초청강연

Direct Integration of Low-Ligand-Density $CsPbBr_3$ Perovskite Nanocrystals into Light-Emitting Diodes via S_N2-Mediated Heat-Up Synthesis

Younghoon Kim*(국민대학교)

차세대디플2-2 | 15:45 초청강연

Inverse Design of a Chiral Nanopatterned Electrode for Circular-Polarization-Sensitive Organic Photodetectors by Genetic Algorithm

Jewoong Lee, Kyung Ryoul Park, In-Suk Choi*, Changsoon Kim*(서울대학교)

차세대디플2-3 | 16:10 초청강연

Direct Optical Lithography of Perovskite Nanocrystals for Next-Generation Display Applications

Himchan Cho*(Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))

차세대디플2-4 | 16:35 초청강연

Interfacial Modification of Perovskites for High-Performance and Multifunctional Light-Emitting Devices

Myoung Hoon Song*(Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

WISET 여대학원생 공학연구팀제 결과발표대회

위원장 : 정은진(한국산업기술기획평가원), 최현주(국민대학교)
총무간사 : 신세은(한양대학교), 김세호(고려대학교)
Room 1층 107호, 10월 29일(목)

좌장 : 정은진(한국산업기술기획평가원)

개회사 | 10:00

WISET1-1 | 10:05

Correlation of Structure and Performance of Anthracite-Derived Carbon Anodes for Sodium-Ion Batteries

GYOO RIN KIM, Hyun Kyung Kim*, Jeong Ho Lee, Si On Jeong, Tae Hun Kim(Kangwon National University)

WISET1-2 | 10:20

탄소중립을 위한 폐질산염 활용 전기화학적 암모니아 생산 고엔트로피 촉매 개발

임효정(성균관대학교),최진욱(한국에너지공과대학교),심욱*(성균관대학교,(주)닐사이언스)

WISET1-3 | 10:35

Single-Step Picosecond Laser Patterning of Titanium for Controlled Surface Topography and TiO_2 Phase to Enhance Fibronectin Adsorption

Sueun Choi, Seon-Hwa Kim, Seongyeop Kim, Hanbyeol Son, Juwon Cha, Hyejeong Yang, Hyo-Ryoung Lim*(Pukyong National University)

WISET1-4 | 10:50

Surface Modification of Porous Ceramic Filters with Fluoroalkylsilane for Fouling-Resistant Marine Exhaust Gas Monitoring

Minyeong Cheon, Su-Chul Yang*, Hyeonju Ko, Jiseung Shin, Yunhee Noh(동아대학교)

Photo Time | 11:05

New Horizon Int. : East Asia Symposium on Semiconductor Reliability-Celebrating the 80th Anniversary of KIM

Chair : Ill Ryu(Seoul National University)

Room 107 (1F), Thu., Oct. 29

Chair : Ill Ryu(Seoul National University)

EASSR1-1 | 13:40 **Invited Talk**

Thermal Characterization of In-depth Hotspots for Advanced Semiconductor Packaging

Sunmi Shin(National University of Singapore)

EASSR1-2 | 14:00 **Invited Talk**

3D Architected Metal-Ceramic Nanocomposite via Proximity-Field Nanopatterning

Seung Min Jane Han(KAIST)

EASSR1-3 | 14:20 **Invited Talk**

Electrically-driven Microstructural Degradation and Restoration in Interconnects: An Electromigration Reliability and Metallurgy Perspective

Chien-Lung Liang, Hsin-Yu Peng, Shih-Yu Huang, Hao-Yu Chen, Hsuan-Cheng Huang, Pao-Hsuan Yang, Su-Chen Liao, Yi-Chen Keng, Jia-Zhen Wei, Meng-Chun Chiu(National Taiwan University of Science and Technology)

EASSR1-4 | 14:40 **Invited Talk**

Micro-DIC-Based High-Resolution Local Deformation Measurement for Reliability Assessment of Advanced Semiconductor Packages

Jong-hyoung Kim*(Pukyong National University)

Break Time | 15:00

Chair : Jong-hyoung Kim(Pukyong National University)

EASSR2-1 | 15:20 **Invited Talk**

Defect-Driven Plasticity/Fracture in Microelectronics under Thermal Cycles

Ill Ryu(Seoul National University)

EASSR2-2 | 15:40 **Invited Talk**

Reliability Analysis of GaN HEMT Packages Using Power Cycling and Transient Thermal Impedance Measurement

Chun-Hao Chen*, Tzu-Ting Huang(National Yang Ming Chiao Tung University),Hong-Ruei Wu(National Taiwan Ocean University),You-Chen Weng, Chih-Yi Yang, Chun-En Lin, Thi Min Anh Dao(National Yang Ming Chiao Tung University)

EASSR2-3 | 16:00 **Invited Talk**

Mechanical Optimization of Intermetallic Compounds for Improving Solder Joint Reliability

Jenn-Ming Song(National Chung Hsing University)

EASSR2-4 | 16:20 **Invited Talk**

Synergistic Metallization for Reliable Advanced Packages

Hanwool Yeon(Gwangju Institute of Science and Technology)

제26회 소재부품 안전 및 신뢰성 심포지엄

위원장 : 신상용(울산대학교), 함종오(한국화학융합시험연구원)

실무위원 : 박이호(한국재료연구원), 변재원(서울과학기술대학교)

Room 1층 108호, 10월 29일(목)

좌장 : 신상용(울산대학교)

신뢰성1-1 | 09:00

9-12 Cr 페라이트계 내열강에서 Co, Cu 합금원소가 초기 미세조직 및 고온 크립수명에 미치는 영향

박봉천(한국재료연구원),김성대(부경대학교),장재훈(동아대학교),박이호*(한국재료연구원)

신뢰성1-2 | 09:15

HRSG Economizer Header-to-Tube 용접부 HAZ의 Oxygen Tubercle 하부 산화 및 균열 전파 거동

박이호*, 박봉천(한국재료연구원),장재훈(동아대학교)

신뢰성1-3 | 09:30

발전소용 Gear Shaft 손상 원인 분석

양원존*, 박이호, 하영수(한국재료연구원)

Break Time | 09:45

좌장 : 박이호(한국재료연구원 (KIMS))

신뢰성2-1 | 09:55

다중 센서 기반의 Hole-saw 수명 및 내구성 평가 기술 개발

오동현*, 박기웅*, 박근혁*, 함종오*(한국화학융합시험연구원)

신뢰성2-2 | 10:10

이차전지 코팅 공정 폐열 회수를 위한 Wave Type 열교환기의 신뢰성 평가

박용진((재)한국화학융합시험연구원),김종남((주)런텍),전민우, 김민호*((재)한국화학융합시험연구원)

신뢰성2-3 | 10:25

압력용기용 알루미늄 노즐부의 손상 원인 분석

박기덕, 오동현, 함종오*(한국화학융합시험연구원)

신뢰성2-4 | 10:40

Comparison of Hydrogen Embrittlement Behavior in API 5L X65 Seamless Steel Pipe Charged by High-Pressure Gaseous Hydrogen and Electrochemical Hydrogen Charging

Jong-Oh HAM*, ,Jong-Hoon Moon, Ki-Duck Park, Dong-hyun Oh (한국화학융합시험연구원)

Break Time | 10:55

좌장 : 양원존(한국재료연구원)

신뢰성3-1 | 11:05

STS재질의 fitting 균열 원인분석

박용하*, 김규석(미르이엔지(주))

신뢰성3-2 | 11:20

회전반경 및 상대재 재질 변화가 ta-C 박막의 마찰 · 마모 거동 및 계면 파괴 기전에 미치는 영향

조병일(인하대학교,한국화학융합시험연구원),함종오*, 오동현, 심진용(한국화학융합시험연구원)

재료강도

위원장 : 김정한(국립한밭대학교)
총무간사 : 배규열(포스코)
Room 1층 108호, 10월 29일(목)

좌장 : 손석수(고려대학교)

재료강도1-1 | 13:30

Micromechanical Behaviour of Fine-structured Bainitic Steel

Kwangsik Kwak*(Kyushu Sangyo Univ.),Tsuyoshi Mayama, Yoji Mine(Kumamoto Univ.),Kazuki Takashima(Kumamoto Prefectural College of Technology)

재료강도1-2 | 13:45

Influence of Paint Baking on Mechanical Properties of 2000 MPa Grade Hot Stamping Steel

Byung-Gil Yoo*, Jeewoosoo Kim, Jae Wook Kang, Seok Min Hwang(Hyundai Steel R&D Center)

재료강도1-3 | 14:00

고질소 오스테나이트계 스테인리스강의 고온 변형 중 동적 재결정 거동 분석

문승현, 문준오*(국립창원대학교),정재석(두산에너빌리티)

재료강도1-4 | 14:15

Enhancing Cryogenic Fracture Toughness Through Alloy and Microstructure Control in Ni Steels

Won hyo Yoo*, Sang Bae Jung, Jeong Kwan Kim, Seong Jun Byun, Hun Chul Kang(Hyundai Steel R&D Center)

Break Time | 14:30

좌장 : 성효경(국민대학교)

재료강도2-1 | 14:40

Data-Driven Acoustic Emission Monitoring of Deformation and Damage in Metallic Materials

Jong-Hyeok Kwon, Dae-Seo Kwon, Dong-Kyu Kim*(Konkuk Univ.)

재료강도2-2 | 14:55

BCC 단일상 Cr-Mn 희박 합금의 고용 강화 및 연화에 따른 연신율 변화 거동 연구

박준서, 강태혁, 이찬희(한국과학기술원),이준호(한국재료연구원),백하성(인천대학교),최벽파*(한국과학기술원)

재료강도2-3 | 15:10

LT-FH32 강재의 냉간가공 및 시효에 따른 저온 특성 변화

남현지, 조동필, 김주수, 이동우, 신학수, 정동희*(삼성중공업)

재료강도2-4 | 15:25

열처리 조건이 STS304 주름관의 피로거동에 미치는 영향

박재현, 김한종, 이유나, 박성훈, 강남현, 최윤석*(부산대학교)

Break Time | 15:40

좌장 : 문준오(국립창원대학교)

재료강도3-1 | 15:50

원자로압력용기용 SA508 저합금강 전자빔용접부의 기계적특성에 미치는 입열량 영향 평가

현세미, 안동현, 권준엽, 김민철*(한국원자력연구원)

재료강도3-2 | 16:05

고강도 원자로압력용기강 후판 전자빔용접부의 Pre-PWHT 조건에 따른 미세조직 및 충격인성 변화

배소영(고려대학교,한국원자력연구원),현세미, 김민철*, 홍석민(한국원자력연구원),김홍덕(한국과학기술원),손석수(고려대학교)

재료강도3-3 | 16:20

Positive γ/γ′ Lattice Misfit 제어에 따른 L-PBF 적층 Modified IN738LC 합금의 잔류응력 거동과 균열 저항 특성 분석

이아름, 김태경(국립창원대학교),김명세(주식회사 아우라테크),김형섭(한국원자력연구원),홍현욱*(국립창원대학교)

Break Time | 16:35

좌장 : 조훈휘(국립한밭대학교)

재료강도4-1 | 16:45

주조 Mn-Cu 합금의 부식 피로 거동에 미치는 미세편석과 염화물 노출의 영향

박준영, 목승민, 이준민(경상국립대학교),김대경(한화오션),김상식, 강성규*(경상국립대학교)

재료강도4-2 | 17:00

3.5wt.% NaCl 용액에서 Mn-Cu 합금의 응력 부식 균열 거동에 미치는 미세조직의 영향 연구

목승민, 박준영, 이준민(경상국립대학교),김대경(한화오션),김상식, 강성규*(경상국립대학교)

재료강도4-3 | 17:15

마이크로필라 압축시험을 통한 APS Y_2O_3 코팅의 변형 및 파괴거동

백인섭(경상국립대학교),김준하, 유연우(한국재료연구원),강성규*(경상국립대학교)

제104회 철강기술 심포지엄 -미래산업이 요구하는 철강기술: 신수요 산업 대응 강종개발 전략 및 과제

위원장 : 엄경근(POSCO)
실무위원 : 태순재(현대제철)
Room 2층 201호, 10월 29일(목)

개회사 및 환영사 | 10:30

좌장 : 권태우(현대제철)

철강기술1-1 | 10:40 초청강연

첨단 전략산업 정책과 철강산업의 대응 방향

이준호 (고려대학교)

철강기술1-2 | 11:10 초청강연

미래 유망산업의 부상과 철강산업의 새로운 성장 기회

손영욱(철강산업연구원)

좌장 : 김상석(POSCO)

철강기술2-1 | 13:30 초청강연

차세대 원자력 소재 및 혁신제조기술 개발 동향

송상우(한국재료연구원)

철강기술2-2 | 14:00 초청강연

수소/에너지 산업 수요기업 트렌드와 소재 동향

황병철(서울과학기술대학교)

철강기술2-3 | 14:30 초청강연

차세대 Grid 인프라를 위한 송전철탑 및 소재 동향

이동석(현대제철)

Break Time | 15:00

좌장 : 김상석(POSCO)

철강기술2-4 | 15:20 초청강연

에너지 전환시대, ESS의 변화와 철강 소재 · 솔루션의 미래

조재동(포스코)

철강기술2-5 | 15:40 초청강연

미래 해양 모빌리티를 위한 철강 솔루션

한성경(현대제철)

좌장 : 태순재(현대제철)

철강기술3-1 | 16:00 초청강연

우주 · 항공 산업 트렌드와 대응 방안

채민석 (세아창원특수강)

철강기술3-2 | 16:30 초청강연

국방 분야 고강도 철강 소재의 개발 현황 및 전망

김용진(국방과학연구소)

EML 우수논문 특별 심포지엄

위원장 : 신병하(KAIST)
실무위원 : 장호원(서울대학교)
Room 2층 202호, 10월 29일(목)

좌장 : 김재호(부산대학교)

개회사 | 08:45

EML특별세션소개

신병하 (KAIST)/장호원 (서울대학교)

EML1-1 | 08:55 초청강연

Covalently bonded metal–organic chalcogenides as a novel active material for high color–purity blue light–emitting diodes and photodetectors

Young-Hoon Kim*(Hanyang University)

EML1-2 | 09:20 초청강연

Recent Advances and Basics in Reversible Metal Electrodeposition–based Smart Windows

Cheon Woo Moon(Soonchunhyang University)

EML1-3 | 09:45 초청강연

Metastability in Halide Perovskites for Energy–Efficient Devices

Jinhyun Kim(Kyung Hee University)

Break Time | 10:10

좌장 : 김영훈(한양대학교)

EML2-1 | 10:20 초청강연

Advanced Catalytic Materials For Efficient Hydrogen Carrier Production and System Integration

Uk Sim*(Sungkyunkwan University)

EML2-2 | 10:45 초청강연

Vapor Phase Inversion of CNT Film–Based Thick Electrodes for High–Energy–Density Lithium–Ion Batteries

Jae Ho Kim*(Pusan National University)

EML2-3 | 11:10 초청강연

Porous Structures of Metals and Metal Oxides by Controlled Nucleation and Growth in High–Pressure Evaporation: Mechanism and Applications

Sangwoo Ryu*(Kyonggi University)

EML2-4 | 11:35 초청강연

Surface Engineering of Perovskite Oxides for Alkaline Oxygen Electrocatalysis

WooChul Jung*(Seoul National University)

학회상 수상기념 강연

Room 2층 202호, 10월 29일(목)

시상 | 13:30

- Springer 논문상(MMI/EML)
- KOFWST · KIM 젊은연구자상
- International Scholar Award
- 테스코 장학금

좌장 : 이기안 (인하대학교)

AW1-1 | 13:50 현대제철 학술상 수상기념강연

Three Interfaces in Metals: From Precipitates to Oxides
Seung Zeon Han*(Korea Institute of Materials Science)

AW1-2 | 14:15 세아해암학술상 수상기념강연

열역학: Textbook으로부터 산업 DX적용까지
정인호(서울대학교)

Break Time | 14:40

좌장 : 이선영 (한양대학교)

AW2-1 | 14:50 동국송원학술상 수상기념강연

금속 내 수소의 확산과 수소분리막: 수소투과에서 수소취성까지
서진유(한국과학기술연구원)

AW1-4 | 15:15 송천학술상 수상기념강연

미래 산업의 핵심 플랫폼, 마그네슘 합금: 만년 유망주에서 미래 산업의 주연으로
김영민*(한국재료연구원, 과학기술연합대학원대학교)

AW1-5 | 15:40 International Scholar Award Lecture

Fungi-based Biomaterials and Bioinspiration
Steven E. Naleway*(University of Utah)

고온재료

위원장 : 서성문(한국재료연구원)
총무간사 : 김진우(KIST), 전종배(동아대학교), 윤대원(한국재료연구원)
Room 2층 204호, 10월 29일(목)

좌장 : 윤대원(한국재료연구원)

고온1-1 | 09:00

결정립 구조와 γ′ 분포 제어를 통한 L-DED IN738LC 합금의 고온 크리프 저항성 향상
안동혁, 윤대원, 정희원, 유영수, 서성문, 이형수*(한국재료연구원)

고온1-2 | 09:15

Haynes 282 초합금 Laser 용접부의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 용접후열처리 효과
백재영(동아대학교 금속공학과),양희평(동아대학교,포항공과대학교),조덕현, 이학성, 전종배*(동아대학교)

고온1-3 | 09:30

Effect of HfC Addition on Room- and Elevated-Temperature Tensile Properties of Additively Manufactured Inconel 625
Yunhui Kim, Hojin Ryu*(KAIST)

고온1-4 | 09:45

레이저 용융 니켈기 초합금의 ZrB_2 접종에 따른 결정립 미세화 및 등축화 거동
조덕현, 양희평, 박민서(동아대학교),정중은*(한국재료연구원),전종배*(동아대학교)

고온1-5 | 10:00

APT Characterization of Zr Partitioning Behavior and Its Implications in a Hf-free 247 Grade Superalloy Fabricated by EBM
Tae Gyeong Kim, A Reum Lee, Hyun Uk Hong*(Changwon National University),Won Suk Ko, Hye Ji Jo(Korea University),Bong Ho Lee(DGIST),Byoung Soo Lee, Hae Jin Lee(Korea Institute of Industrial Technology)

Break Time | 10:15

좌장 : 전종배(동아대학교)

고온2-1 | 10:25

CM247LC 초내열합금에서 수지상간 편석에 의한 Incipient melting 발생 및 재응고 다상조직 형성
여준기, 이형수, 윤대원, 정희원, 유영수, 서성문*(한국재료연구원)

고온2-2 | 10:40

고내식 · 고청정 Ni-Cr-Mo-W계 하스텔로이 C22 합금의 입계부식 저항성 향상을 위한 열역학 기반 스크리닝 활용 성분계 최적화
김종훈, 이상현(국립창원대학교),김덕령(세아창원특수강),홍현욱*(국립창원대학교)

고온2-3 | 10:55

고 Cr합금의 미세조직과 고온 압축 특성 및 고온 산화 거동
강민재, 황원구(인하대학교),이현범(포스코),이기안*(인하대학교)

고온2-4 | 11:10

열차폐코팅의 손상 기반 복합 부하 피로수명 모델링
이상림, 최윤석*(부산대학교),명상원, 김훈희(두산에너빌리티(주))

고온2-5 | 11:25

Mo 저감 및 Nb/Ta 첨가 Haynes 282 기반 Ni-based superalloy의 고온압축 거동과 구성방정식 해석
허성준, 박재형(영남대학교),정원석, 박노근*(영남대학교)

고온2-6 | 11:40

Thermodynamic Assessment of the Ni-Se System
Gyeongrok Oh, Chan Jeong, In-Ho Jung*(서울대학교)

좌장 : 김정기(경상국립대학교)

고온3-1 | 13:30

Orientation-Dependent Interstitial Diffusion and Stress-Mitigating Suboxide Formation in Nb Alloy
Muhammad Akmal, Sheng Yu, Yunhui Kim, Ho Jin Ryu*(KAIST)

고온3-2 | 13:45

열처리를 통한 미세조직 제어가 Mo-Nb-Ti-Cr 내열 다원소 합금의 고온 산화 거동에 미치는 영향

신승환, 이강진(공주대학교),이찬호(The University of Auburn),송기안*(공주대학교)

고온3-3 | 14:00

ZrH_2-Assisted Microstructural Modification and Ductility Enhancement of Nb521 Alloy by Spark Plasma Sintering

Sheng Yu, Cheol Hyeon Lee, Ho Jin Ryu*(KAIST)

고온3-4 | 14:15

Effect of Si addition on high-temperature mechanical properties and oxidation behavior of Nb-based superalloy (Nb521)

Chan Hee Lee, 최벽파*(KAIST),진민수(Max Planck Institute)

고온3-5 | 14:30

$L2_1$-FCC 헤테로 미세구조 설계를 통한 $L1_2$ 강화 고엔트로피 합금의 중간온도취성 극복

김은찬, 박효진*, 하수빈, 이시우, 김형섭*(포항공과대학교)

고온3-6 | 14:45

Ni기 초내열합금에서의 Mo 첨가가 γ′ 형상 및 γ/γ′ 격자 불일치 에 미치는 영향

김종훈, 이재훈(국립창원대학교),윤대원(한국재료연구원),최윤석(부산대학교),홍현욱*(국립창원대학교)

이차전지 원료소재

위원장 : 박진균(RIST)

총무간사 : 신동주(한국지질자원연구원), 강영조(동아대학교), 김영재(인하대학교)

Room 2층 205호, 10월 29일(목)

좌장 : 박진균(포스코홀딩스)

이차전지1-1 | 08:30 초청강연

핵심광물의 글로벌 산업 동향, 밸류체인 핵심 이슈 및 주요국 공급망 정책

박재범*(포스코경영연구원)

이차전지1-2 | 08:55

슬래그 이온구조 기반 니켈 건식제련 물성 연구: FeNi 용융환원에서 Ni matte까지

최준성, 박진균, 김종호, 서민석(포스코홀딩스),민동준*(연세대학교)

이차전지1-3 | 09:10

Effects of Process Parameters on the Selective Reduction Behavior of Saprolite Nickel Ore in the Oheyama Process

Heeju Kim, Jeonghwan Kim, Seungyeon Lee, Il Sohn*(Yonsei University)

Break Time | 09:25

좌장 : 신동주(한국지질자원연구원)

이차전지2-1 | 09:30

Preferential Recovery Method for Lithium From NCM and LFP Black Powder via Pressure Oxidative Leaching

Joon Sung CHOI(포스코홀딩스),Eun Jin Jung*(포항산업과학연구원)

이차전지2-2 | 09:45

스포듀민 하소 공정 중 정광 내 맥석이 스포듀민 상변태 거동과 클링커 및 융착물 형성 거동에 미치는 영향

박성환(한양대학교),김현수(포스코 미래기술연구원),박주현*(한양대학교)

이차전지2-3 | 10:00

H2S 첨가 및 임펠러 교반을 통한 니켈 카보닐화 반응 촉진

전상현, 김영재*(인하대학교)

Break Time | 10:15

좌장 : 최준성(포스코홀딩스)

이차전지3-1 | 10:25

POSCO Holdings Black Alloy 기반 Li 선침출을 통한 Ni 용매추출 생략형 리사이클링 습식 공정 개발

박준용*, 허세권, 송시정, 박상혁, 이상혜, 조용민, 한상우, 김완이*(포스코홀딩스)

이차전지3-2 | 10:40

용매추출 믹서-세틀러 공정 내 이온 교환 및 추출 반응 수치해석 모델링

김나영(국립부경대학교 융합소재공학부 금속공학전공),김병준, 송시정, 한상우, 김완이(포스코홀딩스 미래기술연구원),조성묵*(국립부경대학교 융합소재공학부 금속공학전공)

이차전지3-3 | 10:55

EoL LIB 황산 침출액 중 유가금속 일괄 전해 회수를 위한 공정 연구

하륜, 신한균, 강영조*(동아대학교),류지훈(에바싸이클)

Break Time | 11:10

좌장 : 김영재(인하대학교)

이차전지4-1 | 11:15

폐배터리 유래 폐흑연의 고순도화를 위한 재생에 대한 연구

김기현, 류철희, 안낙균, 박경수*(고등기술연구원 융합소재연구센터)

이차전지4-2 | 11:30

Designing SiO_x/Graphite Composite Anodes for High Performance and Stability through Electrochemo-Mechanical Modeling

YEJIN KANG, Seungsoo Jang, Hyunjin Kim, Sunghyun Park, Kang Taek Lee*(KAIST)

이차전지4-3 | 11:45

단일 Li_2CO_3 용융염 전해를 이용한 폐 이차전지로부터의 친환경 리튬 분리 회수

고의준(한국생산기술연구원 국가희소금속센터,고려대학교),권남훈(한국생산기술연구원 국가희소금속센터),오승주(고려대학교),박경태, 신재홍*(한국생산기술연구원 국가희소금속센터)

비철금속

위원장 : 김수경(한국지질자원연구원)
총무간사 : 강정신(서울대학교)
Room 2층 205호, 10월 29일(목)

좌장 : 최상훈(고등기술연구원)

비철1-1 | 13:30

황화리튬 제조를 위한 황산리튬의 수소환원 반응 거동 및 반응속도론적 연구
이소영, 유장욱, 최범모(서울대학교),이상민(포스코홀딩스),강정신*(서울대학교)

비철1-2 | 13:45

Saponification-Controlled Sequential Solvent Extraction for Nickel Purification and Recovery from NCM Leaching Solutions
Burhan Febrinawarta(Korea National Institute of Rare Metals, Korea Institute of Industrial Technology,Convergence Manufacturing System Engineering, KITECH School, University of Science and Technology),Myungsuk Kim(Korea National Institute of Rare Metals, Korea Institute of Industrial Technology,Department of Materials Science and Engineering, Korea University),Kyoung-Tae Park, Jae Hong Shin*(Korea National Institute of Rare Metals, Korea Institute of Industrial Technology,Convergence Manufacturing System Engineering, KITECH School, University of Science and Technology)

비철1-3 | 14:00

Selective Separation of Zirconium from Hafnium Using a Synergistic Cyanex 272 - TBP Solvent Extraction System
Haroon Kamal, Jae Hong Shin(Korea Institute of Industrial Technology,University of Science and Technology),Dong-Hyun Kim(Korea Institute of Industrial Technology),Kyoung-Tae Park*(Korea Institute of Industrial Technology,University of Science and Technology)

비철1-4 | 14:15

사이클론 전해 시스템 연계 LFP 순환 침출을 통한 리튬 고농축 및 분리 공정 최적화
이현준(과학기술연합대학원대학교,한국지질자원연구원),최영중, 이현주(한국지질자원연구원),한승훈, 김수경*(과학기술연합대학원대학교,한국지질자원연구원)

Break Time | 14:30

좌장 : 김영재(인하대학교)

비철2-1 | 14:35

Cu - Ni - Si-Co 합금의 시효 거동에 미치는 Pre-aging 효과
황지인, 정일석, 최은애*, 한승전*(한국재료연구원)

비철2-2 | 14:50

Mn첨가가 Cu-Ni-Si 합금의 불연속 석출물 형성에 미치는 영향
정현우, 신지용(한국재료연구원,부산대학교),정일석, 최은애(한국재료연구원),권세훈(부산대학교),한승전*(한국재료연구원)

비철2-3 | 15:05

통전 처리에 따른 Cu-Ni-Si 합금의 연속 석출 거동 가속화 분석
정이화(경상국립대학교),김규낙(경상국립대학교,한국재료연구원),김가은(경상국립대학교),최동인(서울대학교),안지혁(한국재료연구원),한흥남(서울대학교),강성규*(경상국립대학교)

비철2-4 | 15:20

조성 및 시효 조건에 따른 Cu-Ni-Si 합금의 불연속 석출 거동
장정아(경상국립대학교),김규낙(경상국립대학교,한국재료연구원),안지혁(한국재료연구원),강성규*(경상국립대학교)

Break Time | 15:35

좌장 : 최종원(한국지질자원연구원)

비철3-1 | 15:40

저압 산화 및 오일 코팅을 이용한 구리의 내식성 향상
최문수, 신지용, 최은애, 한승전*(한국재료연구원)

비철3-2 | 15:55

In-situ 대기 산화를 통한 Cu-Ti/Cu-TiO2 복합재의 제조 및 특성
문하영(한국재료연구원,과학기술연합대학원대학교),황지인, 정현우, 한승전*(한국재료연구원),최은애*(한국재료연구원,과학기술연합대학원대학교)

비철3-3 | 16:10

사용후핵연료 처분용기용 무산소동 용접부의 부식 거동 및 표면막 특성
고신범(한국재료연구원,국립부경대학교),이윤주, 김정민, 송상우(한국재료연구원),노상훈(국립부경대학교),김승현*(한국재료연구원)

좌장 : 김동현(한국생산기술연구원)

비철4-1 | 16:25

STS304 첨가 6:4 황동의 극저온 냉각 조건에 따른 절삭가공 특성
노흥렬*, 이시연, 박노진(원진금속(주)),박은수, 이지은(서울대학교)

비철4-2 | 16:40

Overcoming the strength and ductility trade-off in Ni-based alloy through tailoring of bimodal grain structures, hierarchical twins and coherent nanoprecipitates
Yijie Ban, Shi Woo Lee, HyoungSeop Kim*(POSETECH)

비철4-3 | 16:55

Mo 함유 산업 폐기물의 용융환원 및 페로몰리브덴 제조를 위한 CaO-Al_2O_3-MgO계 슬래그 조성 최적화 연구
배성욱(한국생산기술연구원,한양대학교),박주현(한양대학교),신재홍*(한국생산기술연구원)

비철4-4 | 17:10

Effect of Aluminum content on the Interfacial Reaction between Ni-xAl Alloy Melt and MgO Refractory: Oxygen Transfer and $MgAl_2O_4$ layer Formation
Seung-Ho Lee, Hyun-Jae Kim(Pohang University of Science and Technology),Yoon Seok Ko(Agency for Defense Development),Youn-Bae Kang*(Pohang University of Science and Technology)

타이타늄 기술 및 산업 동향 심포지엄

위원장 : 송영석(세아창원특수강)
실무위원 : 김경민(세아창원특수강), 노윤경(동아특수금속), 박찬희(한국재료연구원), 최미선(RIST)
Room 2층 206호/8호, 10월 29일(목)

좌장 : 최미선(포항산업과학연구원)

타이타늄동향1-1 | 09:00 초청강연
우주항공용 타이타늄 국산화 실적과 국내 소재시장 활성화를 위한 제언
정유인*(한국항공우주산업)

타이타늄동향1-3 | 09:25 초청강연
Mg-H 융합탈산공정 기반 Off-grade 타이타늄의 리싸이클링 분말 제조 기술 및 이를 활용한 타이타늄 부품 개발
박지환(㈜엠티아이지)

타이타늄동향1-4 | 09:50 초청강연
미세조직 이미지와 층상 간격 정보 학습을 통한 CNN 기반 Ti-6Al-4V 합금의 기계적 물성 예측
박노근*, 허성준, 안효주, 박재형, 조진우, 하준영(영남대학교)

Break Time | 10:15

좌장 : 김경민(세아창원특수강)

타이타늄동향2-1 | 10:25 초청강연
항공 가스터빈 엔진 단조품의 타이타늄 합금 적용 및 개발 현황
오승철*, 구지호,, 권혁준, 최성규, 손인수(한화에어로스페이스)

타이타늄동향2-2 | 10:50 초청강연
스크랩 기반 Ti-6Al-4V 합금 봉재 제조를 위한 열간압연 공정 개발
이초롱, 유연정, 이승욱, 장원영((주)동아특수금속)

타이타늄동향2-3 | 11:15 초청강연
국내 대용량 상업용 전자빔용해로(EBCHM) 인프라 구축과 첨단 타이타늄 합금의 정련기술 개발 방향
최국선(㈜킴텍)

좌장 : 이태혁(한국지질자원연구원)

타이타늄동향3-1 | 13:30 초청강연
국내 타이타늄 산업에서의 선순환 생태계 구축
장대건, 임종섭, 유종영, 김지은, 김경민, 이장호, 최재영, 최윤영, 송영석*(세아창원특수강)

타이타늄동향3-2 | 13:55 초청강연
전자빔 수냉 도가니 용해(EBCHM)용 타이타늄 스크랩 전처리 기술 및 사업 현황
박용준(㈜프락시스)

타이타늄동향3-3 | 14:20 초청강연
타이타늄계 중성자흡수 구조재 개발
천영범, 강지훈, 박선영, 정승문, 강석훈(한국원자력연구원)

Break Time | 14:45

좌장 : 박찬희(한국재료연구원)

타이타늄동향4-1 | 14:55
클래드 후판 국산화 및 기술개발 현황
성준호*, 김기혁, 임환석(동국제강),박철호(조선대학교),신다슬(한국재료연구원),김형준(연세대학교),윤용백((주)티엔아이)

타이타늄동향4-2 | 15:10 초청강연
항공용 온간단조 성형공법을 이용한 항공용 Ti64합금 체결부품의 제조 공정에 관한 연구
최정묵, 곽희만(진합)

타이타늄동향4-3 | 15:35 초청강연
산화방지제 적용 타이타늄 합금의 예비형상 최적화를 통한 항공기 엔진 부품 형단조 공정 개발
정상우(삼미금속㈜ 기술연구소),조재현(㈜케이에스피 기술연구소),윤은유(한국재료연구원)

항공엔진 구조물용 고강도 경량/내열 소재 · 부품 심포지엄

위원장 : 이홍철(한화에어로스페이스)
실무위원 : 석무영(한국재료연구원),
오석근(한국항공우주산업(주)), 이병현(공군 항공기술연구소)
Room 2층 209/11호, 10월 29일(목)

좌장 : 구지호(한화에어로스페이스)

항공엔진1-1 | 09:30 초청강연
항공 단조산업 경쟁력 강화 전략(안) –수요 · 인증 · 공급망을 연계한 생태계 중심 지원 방향–
김은영(우주항공청)

항공엔진1-2 | 09:50 초청강연
민간 항공 엔진인증 제도 및 정책 동향
최용훈(항공안전기술원)

항공엔진1-3 | 10:10
항공엔진 구조물용 고강도 소재부품 기술개발 추진 현황 및 전략
송덕용*, 우한별, 김규리(한화에어로스페이스(주))

Break Time | 10:30

좌장 : 정상국(한화에어로스페이스)

항공엔진2-1 | 10:40
항공기 가스터빈엔진용 C355 Master Alloy 공정 개발
백용현, 장창범*(세아항공방산소재)

항공엔진2-2 | 10:55
항공엔진 부품 제작을 위한 형상링 제조 기술 및 적용 사례
김진용, 주병돈*, 이인환, 김주희, 강호성((주)태상)

항공엔진2-3 | 11:10
Al7050 단조재의 항공 산업분야 적용 사례와 물성 메커니즘
김은성(포항공과대학교 신소재공학과,포항공과대학교 친환경소재대학원),김은찬, 김형섭*(포항공과대학교 친환경소재대학원)

항공엔진2-4 | 11:25

항공용 C355 주조합금의 기초 특성 및 미세조직 제어 기술

조용희*(전남대학교)

항공엔진2-5 | 11:40

항공소재개발을 위한 통계분석 사례 및 활용을 위한 품질예측 제언

전민우*, 박용진, 김민호(한국화학융합시험연구원)

좌장 : 정은진(한국산업기술기획평가원)

항공엔진3-1 | 13:30

항공용 17-4PH 스테인리스강 봉재의 주 · 단조 공정

이승익*, 권혁곤, 구영애, 이상민, 이동현((주)케이.피.씨)

항공엔진3-2 | 13:45

유한요소해석 기반 17-4PH 강 다단 열간단조의 공정-미세조직-물성 연계 예측 기술 동향

조서연, 구진모, 유제현, 이인복, 이명규*(서울대학교)

항공엔진3-3 | 14:00

17-4PH 강의 물성평가 및 성형공정 해석 연구동향

이상곤*(한국생산기술연구원),전지환(한국생산기술연구원,부산대학교),황선광(한국생산기술연구원),윤재현(한국생산기술연구원,영남대학교),이성윤, 이인규(한국생산기술연구원),권혁준, 송덕용(한화에어로스페이스)

항공엔진3-4 | 14:15

항공엔진 하우징 구조용 17-4PH 석출경화형 스테인리스강의 소재 물성 데이터 베이스 구축 전략

이정훈*, 강태훈, 이창희, 배동화, 정수진, 이영광, 오재호, 이일육, 양현욱, 김재우((재)포항산업과학연구원),손석수(고려대학교)

항공엔진3-5 | 14:30

MMPDS 기반 항공엔진 구조부품용 17-4PH 재료허용치 산출을 위한 통계적 방법론

김영순*(경상국립대학교)

Break Time | 14:45

좌장 : 김선중(조선대학교)

항공엔진4-1 | 14:55

항공엔진용 고청정 Master Ingot 제조기술 개발 현황

박규민*((주)한스코)

항공엔진4-2 | 15:10 초청강연

High-Temperature Damage Mechanisms and Evaluation Techniques for Nickel-Based Superalloys

Ha-Seong Baek, Tea-Sung Jun*(Incheon National University)

항공엔진4-3 | 15:35 초청강연

항공엔진용 IN625 및 Mar-M-247 주조재의 표면층 미세조직과 주조두께 영향 분석: 선행연구 고찰 및 시험 방법론

전종배(동아대학교),양희평(동아대학교,포항공과대학교),조중욱(포항공과대학교)

항공엔진4-4 | 16:00

항공엔진 구조물용 정밀주조 Mar-M-247, IN625 소재 특성평가 및 DB 구축

정중은*(한국재료연구원),심영래(한국재료연구원,동아대학교),김인수, 도정현, 윤대원, 이상원, 최백규, 정인용(한국재료연구원)

항공엔진4-5 | 16:15

항공 가스터빈 엔진용 구조물 고강도 소재부품 사업의 기술사업화를 위한 특허 전략

김성곤*, 손지영*(한국항공우주기술연구조합(KATRA))

제7회 수소경제 구현을 위한 수소 운송 및 저장 소재 심포지엄

위원장 : 강남현(부산대학교)

실무위원: 김영민(한국재료연구원), 박형기(한국생산기술연구원), 손석수(고려대학교), 천동원(POSTECH)

Room 3층 컨퍼런스, 10월 29일(목)

좌장 : 나태욱(한국생산기술연구원)

수소경제1-1 | 08:30 초청강연

미래 조선해양 산업을 위한 액체수소 저장기술 및 연구개발 동향

이제명(부산대학교 수소선박기술센터 ,부산대학교 조선해양공학과)

수소경제1-2 | 08:50 초청강연

수소 가스 환경에서 API 강재 파이프라인의 반복 가압 내구성에 관한 실험적 연구

박재영*, 백운봉, 오선근, 배경오(한국표준과학연구원)

수소경제1-3 | 09:10 초청강연

수소화물의 능동적 제어: 공간적 형성 유도와 전기화학적 제거

김경식*(국립금오공과대학교),C.C. Tasan(MIT)

수소경제1-4 | 09:30 초청강연

수소저장합금에서 수소에너지 시스템으로: 고체수소 저장기술의 실증과 사업화

방일호*((주)성원기업)

수소경제1-5 | 09:50 초청강연

PEM 수소에너지 시스템용 금속 분리판의 환경 인자에 따른 전기화학적 부식 거동 및 전도성 내식 코팅의 영향

김혜진*(한국공학대학교)

Break Time | 10:10

수소재료

위원장 : 강남현(부산대학교)
총무간사 : 김영민(한국재료연구원),
박형기(한국생산기술연구원), 손석수(고려대학교),
천동원(POSTECH)
Room 3층 컨퍼런스, 10월 29일(목)

좌장 : 박진흥(서울과학기술대학교)

수소1-1 | 10:30

Predicting plateau slope in metal hydrides from first-principles: hydrogen energy and charge distributions in $TiMn_2$-based alloys
Jae Hur(Korea univ.),Ryun-Ho Kwak(Korea Institute of Industrial Technology),Seo-Hui Park(Korea univ.),Tae-Wook Na(Korea Institute of Industrial Technology),Guanglong Xu(Nanjing Tech University),Hyung-Ki Park*(Korea Institute of Industrial Technology),Won-Seok Ko*(Korea univ.)

수소1-2 | 10:45

AB2계 수소저장합금의 수소화에 따른 부피 팽창 비교 분석
강규병, 백민아(한국생산기술연구원,고려대학교),최병철, 하태준(한국생산기술연구원),김동회*(고려대학교),나태욱*(한국생산기술연구원)

수소1-3 | 11:00

ISM(Induction Skull Melting) 공정으로 제조된 $TiFe_{0.78}Mn_{0.2}Cr_{0.02}$ 수소저장합금 잉곳의 냉각속도에 따른 비평형 미세조직 및 상분율 거동
선현덕(한국생산기술연구원,고려대학교),진시원(한국과학기술연구원,서울대학교),심재혁*(한국과학기술연구원),이준호*(고려대학교),하태준*(한국생산기술연구원)

수소1-4 | 11:15

Co 및 Cu 치환에 따른 $TiFe_{0.7}Mn_{0.2}M_{0.1}$ (M = Co, Cu) 합금의 수소저장 특성 연구
곽륜호(한국생산기술연구원,고려대학교),고원석(고려대학교),남윤수(한국생산기술연구원),손석수*(고려대학교),박형기*(한국생산기술연구원)

수소1-5 | 11:30

AB_2계 수소저장합금의 톨루엔 수소화 촉매 거동: 톨루엔 침지 산화 방지 효과
이재용(한국과학기술연구원,성균관대학교),진시원(한국과학기술연구원,서울대학교),심재혁*(한국과학기술연구원),김윤석(성균관대학교),박은수(서울대학교)

좌장 : 김지훈(부산대학교)

수소2-1 | 13:30

열처리 방법 및 온도에 따른 SA350강의 수소 취성 회복 특성 비교
이진규(부산대학교),이진모, 이채훈((주)태웅),이태경*(부산대학교)

수소2-2 | 13:45

국내 수소취성 평가 시험조건에 따른 API 탄소강의 수소취화 민감도 평가
윤희수*, 장광후, 정재환(한국가스안전공사)

수소2-3 | 14:00

고압수소 수송용 API X70급 강재의 수소취성 저항성에 대한 첨가원소의 영향
유상현*, 김태응, 유용재(현대제철),김태욱, 강지현(영남대학교),나광수(현대제철)

수소2-4 | 14:15

전기저항용접된 API X70 파이프라인강의 후열처리 조건에 따른 In-situ 내수소취성 분석
서재완(한국공학대학교),곽진섭, 고의석(생산기술연구소, 현대스틸파이프),이승준*(한국공학대학교)

수소2-5 | 14:30

가스 파이프라인 강재의 수소취화 방지용 인히비터 파우더 적용 및 메커니즘 분석
신좌영, 최동현, 권세영, 박성균, 강남현*(부산대학교)

수소2-6 | 14:45

Sn 첨가에 따른 2 GPa급 마르텐사이트강의 수소취성 거동 변화
남정훈, 한정훈, 성민영, 노이준(고려대학교),백주현(고려대학교,한국과학기술연구원),이창욱, 오욱진(현대자동차),유병길(현대제철),김세호, 손석수*(고려대학교)

수소2-7 | 15:00

High-Temperature Hydrogen Degradation of 304H, Incoloy 800H, and Hastelloy X at 650 °C
Junyeong Jo, Hwasung Yeom*(POSTECH)

Break Time | 15:15

좌장 : 이동현(충남대학교)

수소3-1 | 15:25

SUS304 오스테나이트계 강의 ECCI를 통한 수소에 의한 취성 거동 확인 및 EPT를 통한 물성 회복
윤재원, 이성호, 이태경*(부산대학교)

수소3-2 | 15:40

FCEV 부품용 Mo-free 오스테나이트계 스테인리스강 개발
황재윤, 김종천*(현대자동차),남기정(세아창원특수강)

수소3-3 | 15:55

고온, 고압 수소 환경에서 오스테나이트계 스테인리스 강의 크리프 거동 연구
임광혁, 유정민, 김두현(한국과학기술연구원),송전영(두산에너빌리티),서진유*(한국과학기술연구원)

수소3-4 | 16:10

적층제조된 스테인리스 304L 강의 수소취성에 미치는 미세조직 및 집합조직 거동
손광태, 윤성준, 김영균, 나영상*(한국재료연구원)

수소3-5 | 16:25

316계 스테인리스 강의 인발 변형에 따른 미세조직 및 격자특성 변화와 수소 트랩거동 간 상관관계 규명
남지민(부산대학교),성백석(디에스휴먼자원기술서비스),강남현*(부산대학교)

수소3-6 | 16:40

고온 암모니아 장기간 노출에 의한 스테인리스강 304의 미세조직 및 기계적 물성 변화

조준영, 염화성*(포항공과대학교)

수소3-7 | 16:55

철계 중엔트로피 합금 필러 적용을 통한 액화수소 저장용 STS316L GTAW 용접부의 수소취성 억제

최정현, 남지민(부산대학교),지창욱(한국생산기술연구원),이승건, 나영상(한국재료연구원)

ORAL SESSION III 10월 30일



생체재료

위원장 : 김유찬(KIST)
총무간사 : 이주헌(한양대학교), 이준민(POSTECH)
Room 1층 101호, 10월 30일(금)

좌장 : 강승균(서울대학교)

생체1-1 | 09:00
바이오전자소자를 위한 오일 나노캡슐 기반 생분해성 수분 차단막
배가현, 이금비*(경북대학교)

생체1-2 | 09:15
Microfluidic Fabrication of Mechanically Tunable ECM Microgels for High-Throughput Cancer-on-a-Chip Models
Jihyeon Song, Donggyu Kim , Junmin Lee*(POSTECH)

생체1-3 | 09:30
생체 이식형 단방향 팽윤 기반 하이드로젤 pH 센서
오동현, 이금비*(경북대학교)

생체1-4 | 09:45
3D Bioprinting of Bioceramic/ECM Scaffolds with Tunable Porosity and Interfacial Integration for Biomimetic Osteochondral Regeneration
Siwi Setya Utami, Hui-suk Yun*(University of Science and Technology (UST),Korea Institute of Materials Science (KIMS))

생체1-5 | 10:00 **Canceled**
Adaptive Metastructures Controlled by Machine Learning-Based Motion Prediction via Photodetector Arrays
Gyuri Shin, Yoonseok Park*(Kyung Hee Univ.)

Break Time | 10:15

좌장 : 류한준(중앙대학교)

생체2-1 | 10:25
지속적인 광 신호 확보를 위한 미세구조 생분해성 반사체
이수형, 박세계, 이동윤, 이금비*(경북대학교)

생체2-2 | 10:40
Laser-Engraved Pseudo-3D Topological Biomaterial Interfaces Regulate Mechanotransductive Maturation of Smooth Muscle Cells
Yeji Lee, Junmin Lee*(POSTECH)

생체2-3 | 10:55
생체 인터페이스 전자소자를 위한 균열 기반 변형 센서의 푸아송비 · 강성 제어
강승민(서울대학교),이재환(서울대학교, MIT),이우진, 강승균*(서울대학교)

생체2-4 | 11:10
생분해성 시트르산계 고분자/Fe_3O_4 복합재 기반 자성 진동 액추에이터의 제작 및 구동 특성
김승윤, 이금비*(경북대학교)

생체2-5 | 11:25
Improving Ceramic-Hydrogel Integration for Osteochondral Constructs
Jueun Kim, Aram Sung(KIMS),Yeong-Jin Choi, Hui-suk Yun*(KIMS,UST)

좌장 : 이정우(부산대학교)

생체3-1 | 13:30 초청강연
Diagnostics as Molecular Information Control: Overlooked Material Degrees of Freedom for Reliable Molecular Readouts
Youngeun Kim*(서울대학교)

생체3-2 | 13:55 초청강연
Effect of extrusion ratio on biodegradation behavior of Mg-Zn-Mn-Sr alloy microtubes for biodegradable vascular stents
Jae-Yeon Kim*, Joung Sik Suh, Minseo Lee, Geonho Hwang, Ha Sik Kim, Sang Eun Lee(KIMS)

생체3-3 | 14:20
Magnetically Navigable Neuro-Stethoscope for Minimally Invasive Epilepsy Mitigation
Yoo Jeongmin(Kyung Hee University),Sang Hoon Park(Yonsei University),Hyounggeun Yoon, Eunee Lee(Yonsei University College of Medicine),Ki Jun Yu(Yonsei University),Yoonseok Park*(Kyung Hee University)

생체3-4 | 14:35
시한성 바이오전자소자를 위한 유연 접착 생분해성 전도성 잉크
박소연, 강이현, 이금비*(경북대학교)

Break Time | 14:50

좌장 : 박지민(한국과학기술원 (KAIST))

생체4-1 | 15:00 초청강연
Engineering Magnetic Mesocrystal-MXene Heterointerfaces for Image-Guided Redox Cancer Therapy
Min Jun Ko(Kumoh National Institute of Technology,Northwestern Univ.),Seongchan Kim, Jun-Hyeok Han, Sanghee Lee, Minji Ahn(Northwestern Univ.),Hong En Fu, Young Jun Jang, Yoo Sang Jeon(Korea Univ.),Weiguo Li(University of Illinois at Chicago),Young Keun Kim(Korea Univ.),Dong-Hyun Kim*(Northwestern Univ.)

생체4-2 | 15:25 초청강연

Magnetically Actuated Functional Materials for Intelligent Systems
Yoonseok Park*(Kyung Hee University)

생체4-3 | 15:50

3D-printed Biodegradable Stent with Tantalum/Sirolimus to Inhibit In-Stent Restenosis in a porcine popliteal artery
Dong-Sung Won(Asan Medical Center,University of Ulsan College of Medicine),Jong Hwa Seo(Hanyang University),Hyun Lee(Korea Institute of Industrial Technology),Hyun-Do Jung(Hanyang University),Jung-Hoon Park*(Asan Medical Center,University of Ulsan College of Medicine)

생체4-4 | 16:05

탄닌산 기반 수소결합 네트워크를 이용한 팽윤 억제형 피부 밀착 전극의 발한 환경 생체신호 모니터링
오성민, 박진우*(연세대학교)

생체4-5 | 16:20

Rare-earth-free magnesium-zinc alloy with controlled biodegradation and biocompatibility for novel biodegradable metallic stent
Yubeen Park (Asan Institute for Life Sciences, Asan Medical center),Yerin Ha, Seung Jin Eo(Asan Institute for Life Sciences, Asan Medical center, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine),Yu-Chan Kim(Korea Institute of Science and Technology (KIST)),Joung Sik Suh(Korea Institute of Materials Science),Hwa-Chul Jung(CG MedTech Co., Ltd.),Jung-Hoon Park*(Asan Institute for Life Sciences, Asan Medical center, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine)

수소재료

위원장 : 강남현(부산대학교)
총무간사 : 김영민(한국재료연구원),
박형기(한국생산기술연구원), 손석수(고려대학교),
천동원(POSTECH)
Room 1층 105/6호, 10월 30일(금)

좌장 : 김경식(국립금오공과대학교)

수소4-1 | 09:00

변형 중 수소 재분포에 미치는 미세조직의 영향 분석: 결정소성 기반 해석
강찬*, 강병진*, 박진흥*(서울과학기술대학교)

수소4-2 | 09:15

수소 친화도 조절을 통한 마르텐사이트계 중엔트로피 합금에서의 수소 확산 억제 연구
송상윤, 허재, 박규민(고려대학교),이건직(한국과학기술연구원),양대철, 한정훈, 남정훈(고려대학교),도현석, 이병주, Alireza Zargaran(포항공과대학교),Aparna Saksena(Max Planck Institute for Sustainable Materials),Baptiste Gault(Max Planck Institute for Sustainable Materials,Univ Rouen Normandie),김세호*, 고원석*, 손석수*(고려대학교)

수소4-3 | 09:30

확산접합된 오스테나이트계 합금의 결정립계 석출물이 수소취성에 미치는 영향
최동현(부산대학교),김현준, 손영훈(동화엔텍),Levi Tegg(The University of Sydney),강남현*(부산대학교)

수소4-4 | 09:45

API X70 원주 용접부의 잔류응력 조건에 따른 수소 확산 거동 및 임계 잔류응력 규명
김성환*, 손정현, 서상원, 김병준, 문형순(한국생산기술연구원 동남기술실용화본부)

수소4-5 | 10:00

TiB 강화가 타이타늄 기지 복합재의 수소 트래핑 및 수소취성거동에 미치는 영향
정현(충남대학교),Qiang Li(Nanyang Technological University),Zhao Yakai(A*STAR),Upadrasta Ramamurty(Nanyang Technological University),이근형, 이수열, 이동현*(충남대학교)

수소4-6 | 10:15

상용 순수 티타늄(CP-Ti) 박판의 수소취성 및 내식성 평가
심이준, 김혜진*(한국공학대학교)

고엔트로피합금

위원장 : 설재복(POSTECH)
총무간사 : 송기안(국립공주대학교), 배재웅(국립부경대학교),
김영균(한국재료연구원)
Room 1층 103호, 10월 30일(금)

좌장 : 설재복(포항공과대학교)

고엔1-1 | 08:30

탄소 첨가에 따른 $L1_2$ 석출강화 철계 다성분계 합금의 석출 거동, 기계적 물성 및 변형 기구
윤주희, 김진섭, 김진경*(한양대학교)

고엔1-2 | 08:45

Direct Aging을 통한 $L1_2$ ordering 제어에 따른 FeCoNiV 고엔트로피 합금의 우수한 극저온 기계적 특성
하수빈, 이시우, 김재훈, 고태영, 김래언(포항공과대학교),이재혁(단국대학교),Ban Yijie*, 김형섭*(포항공과대학교)

고엔1-3 | 09:00

화학적 기지 조성 제어 및 $L1_2$ 석출강화를 통한 중엔트로피 합금의 초저온 강도-연성 향상
이하훈(고려대학교),Wei Zhang(Central South University),성민영, 남승진, 정두효(고려대학교),백주현(고려대학교,한국과학기술연구원),서진유(한국과학기술연구원),장태진, 이준호, 김영균(한국재료연구원),Yong Zhang(Central South University),나영상(한국재료연구원),김세호(고려대학교),Zhiming Li*(Central South University),손석수*(고려대학교)

고엔1-4 | 09:15

Effect of Aging-Treatments on the Microstructure and Mechanical Properties of a Multi-Component NiCoFeCrAlTiNbMoWRe High-Entropy Alloy

Rehman Izaz Ur(Inha University),Won-Sang Shin(Sungkyunkwan University),Seung-Joo Lee, Jin-Won Kim, Jwa-Hyeon Kim, Min Kang, Kim Yoobeen(Inha University),Dieter Isheim(Northwestern University),Taeho Lee, Soo Yeol Lee(Chungnam National University),David N. Seidman*(Northwestern University),Yoon-Jun Kim*(Inha University)

고엔1-5 | 09:30

방향성 응고를 통한 과공정 NiCoCrAl 중엔트로피 합금의 연신율 향상

여인혁(한국과학기술원),곽호재(포항 가속기연구소),한승민*(한국과학기술원)

고엔1-6 | 09:45

초음파 나노결정 표면 개질 기법을 통한 Co-Cr-Fe-Ni-Mo 고엔트로피 합금의 표면 미세구조 및 극저온 기계적 거동 변화

임현빈(국립공주대학교),이재흥(포항공과대학교),김영균, 나영상(한국재료연구원),김형섭(포항공과대학교),문종언*(국립공주대학교,첨단분말소재부품센터)

Break Time | 10:00

좌장 : 주수현(단국대학교)

고엔2-1 | 10:10

CrMnFeCoNi 소결 합금의 미세조직과 기계적 특성간 상관관계 규명

장성혁, 박성현, 정재길*(전북대학교)

고엔2-2 | 10:25

탄소 보조 정적 변형시효를 이용한 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금의 극저온 강도-연성 향상

최주미, 김래언, 구본우, 박효진, 고태영, 한규미, 김은찬, 오상호, 이병주(포항공과대학교),이성보(서울대학교),김형섭*(포항공과대학교)

고엔2-3 | 10:40

Al-Zr계 내화 고엔트로피 합금의 상분리 기반 입계 산화 거동 연구

윤교식(아주대학교),이한성(아주대학교,Yale University),안병민*(아주대학교)

고엔2-4 | 10:55

Effect of Composition on Phase Stability and Shape Recovery of CoCrNi Medium-Entropy Alloys

Ana Paula Nolasco Aguilera, Hwi Yun Jeong, Jinsurang Lim, Je In Lee*(Pusan National University)

고엔2-5 | 11:10

조합 방식을 이용한 Ni-Co-Cr 조성 구배 박막의 기계적 특성 평가

이금미, 박세민, 김대호, 한승민*(한국과학기술원)

고엔2-6 | 11:25

조합적 적층제조와 해석 가능한 머신러닝을 활용한 준안정 FeCoCrNiMo 합금의 가속 설계

이재흥(포항공과대학교),김희연(KT R&D 센터),김형섭*(포항공과대학교)

좌장 : 권현석(국민대학교)

고엔3-1 | 13:30

Cr 함량 제어를 통한 3.5 wt % NaCl 용액 내 $Al_{0.5}CoCr_{(1-x)}Fe_{(1+x)}NiTi_{0.1}$ 고엔트로피 합금의 부식 특성 변화 연구

최순원(공주대학교 신소재공학과, 첨단 분말 소재 부품 센터),박강현(한국재료연구원 극한재료연구소),이정민, 문종언, 송기안*(공주대학교, 첨단 분말 소재 부품 센터)

고엔3-2 | 13:45

준정적 변형 시 변형률 분산 능력이 우수한 내화 고엔트로피 합금의 동적 변형 거동 분석

노시언, 김재권, 김지호, 김현수, 김윤호, 박은수*(서울대학교)

고엔3-3 | 14:00

Ti-Zr-Hf-Ta-Mo 준안정 내열 고엔트로피 합금의 상안정성 변화에 따른 기계적 거동 분석

허민아, 정윤종, 이강진(공주대학교, 첨단 분말 소재 부품 센터),이찬호(The University of Auburn),송기안*(공주대학교, 첨단 분말 소재 부품 센터)

고엔3-4 | 14:15

열간 압연된 $Fe_{66}(CoNi)_{29}Cr_5$ 철계 중엔트로피 합금의 Lüders 밴드에 의한 TRIP/TWIP의 공간적 분할

한규미, 이정완, 하수빈(포항공과대학교),나영상(한국재료연구원),김정기(경상국립대학교),김형섭*(포항공과대학교)

고엔3-5 | 14:30

고융점 원소 함유 CoCrFeNi계 혼합 산화물의 수소 환원 및 고엔트로피 합금 분말 제조에 대한 연구

김민종, 이강현(한양대학교),임태협(난양공과대학교),이선영*(한양대학교)

고엔3-6 | 14:45

준안정 내열 고엔트로피 합금의 BCC 안정화 원소에 따른 변형메커니즘 전이

정윤종, 이강진, 허민아(국립공주대학교),이찬호*(Auburn University),송기안*(국립공주대학교)

Break Time | 15:00

좌장 : 김영균(한국재료연구원)

고엔4-1 | 15:10 **Canceled**

우수한 고온-극저온 물성을 지닌 계층적 헤테로 구조의 Fe-rich 중엔트로피 합금

김래언*, 김형섭*(POSTECH)

고엔4-2 | 15:25

격자 왜곡 제어를 통한 BCC 내열 고엔트로피합금의 Edge-Screw 전위 거동 규명

이강진, 정윤종(공주대학교),이찬호(Auburn University),송기안*(공주대학교)

고엔4-3 | 15:40

Thermodynamic assessment of the Ni-Co-Zr and Ti-Co-Zr ternary systems

Chan Jeong, In-Ho Jung*(Seoul Univ.)

고엔4-4 | 15:55

FeCoCrNiMoC계 중엔트로피합금의 온도 의존적 다단계 상변태와 변형 거동

정희재, 이재흥, 하수빈, 안성열(포항공과대학교),Stefanus Harjo, Takuro Kawasaki, Wu Gong(J-PARC 연구소),김형섭*(포항공과대학교)

역학측정

위원장 : 장재일(한양대학교)
총무간사 : 김영천(국립경국대학교)
Room 1층 104호, 10월 30일(금)

좌장 : 전한솔(계명대학교)

역학1-1 | 08:00

초고감도 양방향 변형 측정을 위한 균열 기반 센서의 잔류변형 제어

강승민(서울대학교),이재환(서울대학교, MIT),강승균*(서울대학교)

역학1-2 | 08:15

사용후핵연료 처분용기용 NiCuAl 합금의 석출물 크기에 따른 국부부식 저항성 및 기계적 특성 평가

정회연, 양선영(UNIST),우정현(한국원자력연구원),전한솔(계명대학교),김주영*(UNIST)

역학1-3 | 08:30

인공신경망(ANN) 기반 압입 기판효과 보정을 통한 박막 고유 기계적 물성 평가

조현욱, 김광희, 장서현(국립부경대학교 재료공학과),김임덕, 강승균(서울대학교 재료공학부),권오민, 채승현(SK 하이닉스),김종형*(국립부경대학교 재료공학과)

역학1-4 | 08:45 초청강연

Tailoring Dislocation Nucleation in Defect-Scarce Au Nanowires via Surface and Interface Engineering: Insights from In Situ Tensile Testing and Coherent X-ray Diffraction

Jungho Shin*(Kangwon National University)

Break Time | 09:10

좌장 : 이동현(충남대학교)

역학2-1 | 09:20

표면 상태가 중엔트로피 합금의 나노압입시험 결과에 미치는 영향

최재혁, Zhe Gao, 장재일*(한양대학교)

역학2-2 | 09:35

Sub-nm 변위 측정을 위한 BCP 기반 고정밀 DIC 나노 패턴 개발 및 성능 평가

장서현(국립부경대학교),강은빈(울산과학기술원),박운익, 김종형*(국립부경대학교)

역학2-3 | 09:50

계장화 압입시험 기반 차세대 소재개발: 미세조직 · 국부물성 · 소재성능을 연결하는 멀티스케일 접근

홍정화, 오은지((주)프론틱스),권동일*(서울대학교)

역학2-4 | 10:05 초청강연

나노 및 마이크로 크기의 다공성 금속의 기계적 물성 평가 및 분석

전한솔*(계명대학교)

Break Time | 10:30

좌장 : 김종형(국립부경대학교)

역학3-1 | 10:40 초청강연

압입 데이터를 활용한 딥러닝 기반 금속재료 기계적 거동 예측

정경재*(성균관대학교),박민우, 한흥남*(서울대학교)

역학3-2 | 11:05

냉간 압연된 TiHfNb계 내화 중엔트로피 합금의 V 및 Zr 첨가에 따른 고용 강화 및 소성 변형 기구 규명

박태연, 최인철*(국립금오공과대학교)

역학3-3 | 11:20

도메인 지식을 반영한 소량 데이터 기계학습을 활용한 계장화 압입시험 기반 인장 응력 - 변형률 곡선 예측

이현준*((주)프론틱스),강성우(한국과학기술연구원),권동일(서울대학교)

역학3-4 | 11:35

나노다공성 금의 변형률 속도에 따른 시간의존적 기계적 특성 및 전위 거동 변화

김영훈, 홍석원(UNIST),전한솔(계명대학교),김주영*(UNIST)

좌장 : 김영천(국립경국대학교)

역학4-1 | 13:30 초청강연

Fe-Mn-Co-Cr계 준안정 고엔트로피합금의 수소취성 거동에 미치는 마르텐사이트 변태의 영향 분석

이동현*, 정지윤, 정현, 최정훈, 이수열(충남대학교),박태연, 최인철(금오공과대학교)

역학4-2 | 13:55

측정 불확도를 고려한 데이터 증강과 전이학습 기반 압입 - 인장 물성 역해석

박시현(국립부경대학교),김임덕(서울대학교),최재영(국립부경대학교),강승균(서울대학교),이류경, 김종형*(국립부경대학교)

역학4-3 | 14:10

Mo, W 및 Mo-W 박막의 조성과 미세구조에 따른 생분해 환경 내 전기적 안정성과 용해 거동

이찬영, 조지현, 김주영*(UNIST)

인공지능재료과학

위원장 : 윤종필(한국생산기술연구원)
부위원장 : 김동훈(한국과학기술연구원),
김문조(한국생산기술연구원)
총무간사 : 김용주(고려대학교), 조기섭(국민대학교),
강준희(부산대학교), 정재면(한국재료연구원)
Room 1층 102호, 10월 30일(금)

좌장 : 강준희(부산대학교)

인공1-1 | 08:00

Charge-aware knowledge distillation of machine learning interatomic potentials
Jinuk Moon, Jeong Woo Han*(Seoul National Univ.)

인공1-2 | 08:15

Active Learning Study of d^0-Cation Heterogeneity in $BaCoO_{3-\delta}$ Air Electrodes in Protonic Ceramic Electrochemical Cells
Hyeonggeun Kim, Joonyong Heo, Dongyeon Kim, Seeun Oh(KAIST),Min Young Ha(Kyung Hee University),Kang Taek Lee*(KAIST)

인공1-3 | 08:30

나노압입시험 기반 인장특성 및 응력-변형률 거동 예측
천세호, 주성환, 김지훈, 이태경*(부산대학교)

인공1-4 | 08:45

Toward Novel Synthesis Routes: A Cross-Domain Knowledge Graph with Hierarchical Category Nodes
MUGEUN SON, Joonhee Kang*(Pusan National Univ.)

인공1-5 | 09:00 초청강연

금속 소재 인공지능: 딥러닝에서 에이전틱 AI까지
이호원*, 정재면, 오세혁(한국재료연구원,과학기술연합대학원대학교),김호혁, 배성준(한국재료연구원),이치헌(한국재료연구원,과학기술연합대학원대학교),쩐민띠엔(한국재료연구원),판황쿵, 주무영, 우엔홍하이남(한국재료연구원,과학기술연합대학원대학교)

Break Time | 09:25

좌장 : 김문조(한국생산기술연구원)

인공2-1 | 09:35 초청강연

From Literature to AI-Ready Materials Knowledge for Inverse Design
Joonhee Kang*(부산대학교)

인공2-2 | 10:00

Cascade-Censored Active Learning for Periodic Shell Metamaterial Discovery
HOANG CUONG PHAN, HO WON LEE*(University of Science and Technology,Korea Institute of Materials Science),CHIHUN LEE(Korea Institute of Materials Science)

인공2-3 | 10:15

다이캐스팅 결함 검사를 위한 결함 파라미터 분포 추정 기반 3차원 결함 생성 및 이상 탐지 성능 평가
변영훈(한국생산기술연구원,UST),윤준석, 이정훈, 김동응, 김문조(한국생산기술연구원),윤종필*(한국생산기술연구원,UST)

인공2-4 | 10:30

Inverse Design of Ionic Melts for Continuous Casting through Knowledge-Augmented Large Language Model
Seungyeon Lee, Il Sohn*(Yonsei University)

인공2-5 | 10:45

Large Language Model assisted Design of Superalloys via Olson-Flow Block Diagrams
Hyungi Min(Seoul National University),Heechan Jung, Dongsoo Kang(Hanwha Aerospace),Eun Soo Park*(Seoul National University)

좌장 : 장우선(연세대학교)

인공3-1 | 13:30

Knowledge Graph-Enhanced LLM Reasoning for p-Type Semiconductor Research
Bokyeong Kim, Joonhee Kang*(부산대학교)

인공3-2 | 13:45

물리제약 의존 사후확률추론을 통한 압입시험 재료의 응력-변형률 곡선 역산
고태영, 하수빈, 이정아, 김형섭*(포항공과대학교)

인공3-3 | 14:00

XGBoost와 통계적 분석을 활용한 공정 데이터 기반 과립 입도 영향 인자 도출 및 해석
박재형(영남대학교 신소재공학과),신민찬(영남대학교 신소재공학부),박노근*(영남대학교 신소재공학과,영남대학교 신소재공학부)

인공3-4 | 14:15

Soft-target segmentation 기반 확률맵을 활용한 철강 OM 미세조직의 상분율 및 결정립도 정량화
이종혁*, 이강원, 이학현, 노기정, 곽민호, 이희웅(현대제철)

인공3-5 | 14:30

2D Nanofluidic Bimodal Synapses for Trajectory-Memory Encoding and Physical Reservoir Computing
Suhee Jang, Dar Yeop Jeong, Won Il Park*(한양대학교)

인공3-6 | 14:45

An LLM-based Multi-agent Framework for Interpretable Alloy Design and Discovery
Hoang Hai Nam Nguyen, Ho Won Lee*(Korea Institute of Materials Science,University of Science and Technology)

Break Time | 15:00

좌장 : 하민영(경희대학교)

인공4-1 | 15:05

Position-Selective MoS_2 Photoresponse Dynamics for In-Sensor Encoding of Motion History

Hyeonsu Park, Hyuncheol Yun, Yelim Kim, Won Il Park*(한양대학교)

인공4-2 | 15:20

Mesh-based Graph Neural Networks for Predicting Mechanical Response and Evolution of Deformation Heterogeneity

Minh Tien Tran(Korea Institute of Materials Science),Moo Yeong Joo(Korea Institute of Materials Science,University of Science and Technology),Seong-Hoon Kang(Korea Institute of Materials Science),Dong-Kyu Kim(Konkuk University),Ho Won Lee*(Korea Institute of Materials Science,University of Science and Technology)

인공4-3 | 15:35

DFT and Machine Learning-Driven Computational Design of Multicomponent $TiMn_2$-Based C14 Laves Phase Hydrogen Storage Alloys

Seo-Hui Park, Won-Seok Ko*(Korea Univ.)

인공4-4 | 15:50

Explore-to-Refine (E2R) Reinforcement Learning for Multi-Property Inverse Design of Crystal Structures: Application to Photocatalysts

kiwon yang, Joo-Hyoung Lee*(Gwangju Institute of Science and Technology (GIST))

인공4-5 | 16:05

High-Throughput Evaluation and Generative Exploration Beyond Existing Databases for Ternary Octahedral Inorganic Photovoltaics

Wonzee Jung(Dongguk University,Korea Institute of Energy Research),Seyeon Lee(Chungbuk National University),Chiwon Choi(Chungnam National University),Kihwan Kim(Korea Institute of Energy Research),Jaemin Shin(Chungbuk National University),Kanghoon Yim*(Korea Institute of Energy Research)

인공4-6 | 16:20

Multivariate time-series anomaly detection for early battery thermal runaway warning: a transformer-based autoencoder integrating temperature, voltage, and hydrogen sensing

Yeonhong Kim, Jaesun Lee, Wooyoung Lee*(연세대학교)

마그네슘

위원장 : 박성수(UNIST)
총무간사 : 서병찬(한국재료연구원)
Room 1층 107호, 10월 30일(금)

좌장 : 원윤정(한국재료연구원)

마그네슘1-1 | 09:00

이상구조 Mg-Li 합금의 압출 및 열처리에 따른 기계적 특성 연구(Ⅰ)

이성*(하나에이엠티),류한식(에이에스이티),이기혁, 이화인, 정인식(하나에이엠티),이광희(한화시스템),김홍물(하나에이엠티)

마그네슘1-2 | 09:15

전위밀도 기반 VPSC 모델을 이용한 냉간 압연 Mg-Li 이상 합금의 집합조직 및 상별 변형 거동 예측

서위걸, 쿠샬툴(국립순천대학교),김동익, 한지수(한국과학기술연구원),최시훈*(국립순천대학교)

마그네슘1-3 | 09:30

Al 및 Zn 첨가와 Annealing 온도 제어에 따른 Dual-phase Mg-Li계 합금의 집합조직 변화와 강도-연성 균형 향상

이준호(한국재료연구원,고려대학교),서병찬(한국재료연구원),손석수*(고려대학교),김영민*(한국재료연구원,고려대학교)

마그네슘1-4 | 09:45

ZX 합금의 박판 압연 거동 및 중간 열처리 조건의 영향

김성제, 이상봉*(국립금오공과대학교)

마그네슘1-5 | 10:00

Effect of Cooling Rate on Microstructural Evolution and Hydrogen Storage Properties of Mg-Ni Alloys

Do-Hyeon Kim(Korea Institute of Materials Science,Kyungpook National Univ.),Ye-Rin Jang(Korea Institute of Materials Science,Changwon National Univ.),Tae-Yeol Choi(Korea Institute of Materials Science,Pusan National Univ.),Young Min Kim(Korea Institute of Materials Science),Sung Hyuk Park*(Kyungpook National Univ.),Byeong-Chan Suh*(Korea Institute of Materials Science)

Break Time | 10:15

좌장 : 박성수(울산과학기술원)

마그네슘2-1 | 10:25

Mg 합금 압출재의 CNN 기반 결정립 크기 정량화 및 예측 신뢰성 평가

원윤정, 김가은, 임창동*(한국재료연구원)

마그네슘2-2 | 10:40

Loading-mode-dependent deformation and strain localization behavior of rolled AZ31 Mg alloy

Won Pyo Hong(Kyungpook Univ.),Jongbin Go(Tsukuba Univ.),Sung Hyuk Park*(Kyungpook Univ.)

마그네슘2-3 | 10:55

Mg-Gd 합금 판재의 미세조직 제어에 따른 기계적 특성 및 전자기파-중성자 차폐능 향상

김경택, 김성제, 강민혁, 이상봉*(국립금오공과대학교)

마그네슘2-4 | 11:10

Microstructural modification and enhanced fatigue properties of extruded AZ91 alloy through combined UNSM and subsequent aging treatment

Du Hyeon Woo, Je Hyeong An, Sung Hyuk Park*(Kyungpook National Univ.)

마그네슘2-5 | 11:25

Interfacial Modification of Co-Extruded Pure Mg/AA6063 Clad Rods Using a Dip-Coated Mg-55Bi Interlayer

Seoung-yooun Yu, Gun Woong An, Sung Hyuk Park*(Kyungpook National University)

좌장 : 문병기(한국재료연구원 (KIMS))

마그네슘3-1 | 13:30

Effect of T5 heat treatment on microstructure and high-cycle fatigue properties of extruded Mg-8Al-3Zn-0.2Mn-0.3Ca-0.2Y alloy

Je Hyeong An(Kyungpook National University),Joung Sik Suh(Korea Institute of Materials Science),Sung Hyuk Park*(Kyungpook National University)

마그네슘3-2 | 13:45

Al 및 Zn 함량이 Mg-Al-Zn-Mn-Ca-Y 합금 압출재의 물성에 미치는 영향

황건호, 이민서(한국재료연구원,고려대학교),김재연, 서병찬, 이상은, 문병기(한국재료연구원),김세호(고려대학교),서종식*(한국재료연구원)

마그네슘3-3 | 14:00

Effect of Ca and Y co-addition and extrusion speed on microstructure and tensile properties of extruded AZ31 alloy plates

To Hai Ha Nguyen, Seoung Yooun , Gun Woong An, Sung Hyuk Park*(Kyungpook National Univ.)

마그네슘3-4 | 14:15

Improved age-hardening response and mechanical properties of high-speed-extruded Mg-5Bi-3Al alloy through long-range water-cooling system

Gun Woong An, Seoung-yooun Yu(Kyungpook Univ.),Jeong Hong Ha(Korea Inst. Ind. Technol.),Sung Hyuk Park*(Kyungpook Univ.)

나노융합소재

위원장 : 김수영(고려대학교)
부위원장 : 이주헌(한양대학교)
총무간사 : 김현호(GIST), 이미경(인천대학교)
Room 1층 108호, 10월 30일(금)

좌장 : 김진(국립한밭대학교)

나노1-1 | 08:30 초청강연

Advanced Materials for Soft Energy Conversion Systems

Han Kim(Tech University of Korea)

나노1-2 | 08:55

Metal-based Electrochromism Application with Solvation Structure Control

문천우*(순천향대학교)

나노1-3 | 09:10

Hidden Chemical Order in a High-Entropy Chalcogenide

Hyeuk Jin Han*(Sungshin Women's University)

나노1-4 | 09:25

Size- and Morphology-Dependent Melting-Point Depression in Chemically Recovered Spiky Au Mesoparticles

Jieun Lee, Minkyung Kwak, Jiyoung Kim, Hyungi Min, Eunsoo Park*(Seoul National University)

나노1-5 | 09:40 Canceled

이종 금속 치환을 이용한 비Ti계 MAX/MXene의 구조 안정화 및 에칭 거동

이도연, 송재민, 김은채, 장민서, 권한중*(전북대학교)

Break Time | 09:55

좌장 : 한혁진(성신여자대학교)

나노2-1 | 10:05 초청강연

Recent Advances and Emerging Trends in Halide Perovskite-Based Resistive Switching Memory Devices

Hyojung Kim(Sejong University)

나노2-2 | 10:30

Solution-Processable Two-Dimensional VO_2 Nanosheets for Large-Area Flexible Thermochromic Smart Windows

Jin Kim*(국립한밭대학교)

나노2-3 | 10:45

Rationally designed graphene channels for real-time sodium ion detection for electronic tongue

LEE CHUNGWON*(한양대학교)

나노2-4 | 11:00

차세대 EUV 펠리클용 그래핀-탄소나노튜브 복합 멤브레인의 기계적 특성 및 수소 플라즈마 보호층에 따른 화학적 안정성

전세훈, 우윤성*(단국대학교)

나노2-5 | 11:15

Large-area, Single-crystal Twisted Bilayer Graphene Grown on Ni(111)

Yongqiang Meng, Alisher sultangaziyev(Ulsan university of science and technology (UNIST),Institute for Basic Science (IBS)),Won Kyung Seong*, Rodney S. Ruoff*(Institute for Basic Science (IBS))

나노2-6 | 11:30

Asymmetric Dielectric Response in Twisted Trilayer WSe_2

Byunghyun Kim(Seoul National University),Daesung Park(Seoul National University,Sogang University),Siwon Jeong(Sogang University),Chiranjit Mondal(Seoul National University),Hyun-Mi Kim(Korea Electronics Technology Institute),Hajung Jang, June Hee Shin(Sogang University),Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi(National Institute for Materials Science),Sang Mo Yang, Hyeonsik Cheong(Sogang University),Bohm Jung Yang, Hyobin Yoo*(Seoul National University)

전산재료과학

위원장 : 이동화(POSTECH)
부위원장 : 김현유(충남대학교)
총무간사 : 서동화(KAIST), 김병현(한양대학교 ERICA)
Room 2층 201호, 10월 30일(금)

좌장 : 전호제(국민대학교)

전산1-1 | 08:30 초청강연

Symmetry-Resolved d-p Coupling Regulates Sulfur Redox Reactions in Room-Temperature Na-S Battery
Hyuk Choi(Jeonbuk National University,Nanyang Technological University),Shuzhou*(Nanyang Technological University)

전산1-2 | 08:55

Bifurcation of COOH Pathway Determines HCOOH Formation in CO2 Electroreduction on Bismuth
Hyun Dong Jung(Sogang Univ.),Seoin Back*(Korea Univ.)

전산1-3 | 09:10

Many-Body Effects on the Coverage-Dependent CO Adsorption on Cu(111)
Seungchang Han, Stefan Ringe*(Korea University)

전산1-4 | 09:25

다중 에이전트 시스템을 활용한 자연어 추론 기반 단일 원자 촉매 설계
목동현(서강대학교),백서인*(고려대학교)

전산1-5 | 09:40

Motif-Based Discovery of Amorphous Solid Electrolytes with Design Principles from Void Topology and Anion Chemistry
Chihun Kim(Korea Institute of Science and Technology,Korea University),Taihoon Kim(Korea Institute of Science and Technology,Hanyang University),Hyun-Jae Lee(Korea Institute of Science and Technology),Yong-Mook Kang(Korea University),Byungju Lee*(Korea Institute of Science and Technology)

전산1-6 | 09:55

Machine-Learned Molecular Dynamics of High-Entropy Electrolytes via Local Motif Preserving Reconstruction
UN HWAN LEE, Joonhee Kang*(부산대학교)

Break Time | 10:10

좌장 : 박양정(UNIST)

전산2-1 | 10:20 초청강연

다중물리 해석과 데이터 기반 소재 설계를 통한 차세대 이차전지 개발
김형준*(강원대학교)

전산2-2 | 10:45

제일원리계산 및 Graph-Based Explainable AI를 활용한 지속가능한 리튬이온전지용 유기 양극재의 구조 설계 전략
구준형, 김현, 김창훈, 신효경, 이동화*(포항공과대학교)

전산2-3 | 11:00

생성형 인공지능과 이중 루프 능동 학습을 활용한 전해질 첨가제 발견
장호연(서강대학교),백서인*(고려대학교)

전산2-4 | 11:15

Active Learning-Based Fine-Tuning of Foundation MLIPs for Polymer and Polymer-Metal Interface Systems
HUIYEOL LEE, JOONHEE KNAG*(Pusan National Univ.)

전산2-5 | 11:30

희소상을 포함하는 다상 알루미늄 합금의 농도장 기반 대표체적요소 생성
박용욱, 차필령*, 김동욱, 장형욱(국민대학교)

전산2-6 | 11:45

Charge-aware machine-learning molecular dynamics with dynamic Born effective charges for field-driven ferroelectric switching
Junsoo Lee(Korea Advanced Institute of Science and Technology),Sang Woo Park(Pohang University of Science and Technology),Ki-Ha Hong(Hanbat National University),Hyungjun Kim*(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

좌장 : 이은렬(충북대학교)

전산3-1 | 13:30 초청강연

Layer-Stacking-Induced Symmetry Breaking and High Thermoelectric Performance in Layered A-Zn-Bi (A = Rb, Cs) Zintl Compounds: A First-Principles Study
Aadil Fayaz Wani, Nirma Kumari, SuDong Park(Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)),Byungki Ryu*(Korea Electrotechnology Research Institute (KERI),UST)

전산3-2 | 13:55

First-principles study on the effects of ternary alloying elements in Ti-Nb-based shape memory alloys
Hun-Min Jo, Won-Seok Ko*(Korea Univ.)

전산3-3 | 14:10

LACOS: Simplified Cluster Expansion Modeling for Complex Multicomponent Alloy Thermodynamics
Krishnamohan Thekkepat, Seung-Cheol Lee*(국립순천대학교)

전산3-4 | 14:25

Fe-Cu-X 삼원계에서 tramp 원소가 액체금속 침투에 미치는 영향에 관한 분자동역학 연구
박종훈, 조혜지(고려대학교),안혜현(인하대학교),김동휘, 강민우, 김영재(현대자동차),고원석*(고려대학교)

Break Time | 14:40

좌장 : 전규정(고려대학교)

전산4-1 | 14:50 초청강연

차세대 고강도강 설계를 위한 인공지능 연계 결정소성 모델링

정경재*(성균관대학교)

전산4-2 | 14:15

Phase-Field Model을 이용한 Q&P강의 탄소 재분배 거동 및 잔류 오스테나이트 안정성 해석

조휘재, 장형욱, 김동욱, 김성균, 차필령*(국민대학교)

전산4-3 | 15:30

Process-to-Microstructure Scale-Bridging Finite Element Analysis for Fracture Initiation Prediction in Cold Rolling

이학현*, Jong Hyuk Lee(Hyundai Steel)

전산4-4 | 15:45

KKS-type Multi-component Phase-field Modeling of Mixed-stoichiometric phases

Dong-Uk Kim, Seong Gyoon Kim, Hyung-Uk Jang, Hwijae Cho, Pil-Ryung Cha*(Kookmin Univ.)

전산4-5 | 16:00

Phase-Field Modeling of Grain Restructuring in High-Burnup UO_2 Fuel

Bohyun Yoon, Kunok Chang*(경희대학교)

전산4-6 | 16:15

Nd-Fe-B 합금의 응고 미세조직 예측을 위한 2차원 및 3차원 상장 시뮬레이션 비교 연구

장형욱, 조휘재, 김동욱, 차필령*(국민대학교)

집합조직 및 미세조직 제어를 통한 차세대 구조재료 설계기술

위원장 : 김동익(한국과학기술연구원)
실무위원 : 전태성(인천대학교)
Room 2층 204호, 10월 30일(금)

좌장 : 김상태 (한양대학교)

미세1-1 | 09:00 초청강연

H형강의 내화내진 특성 개선를 위한 미세조직 및 집합조직 설계 방안

김동익*(한국과학기술연구원),박준성(한국과학기술연구원,고려대학교),정준호(현대제철),이준호(고려대학교)

미세1-2 | 09:25 초청강연

금형용 공구강의 조성 및 공정 제어를 통한 미세조직과 물성

강전연*, 김경원(한국재료연구원),손동민(세아창원특수강),이형국(현대자동차)

미세1-3 | 09:50 초청강연

Microstructure and Mechanical Response of Pure Ta in Extreme Environments

HOON-HWE CHO*, Hyojoo Lee(국립한밭대)

미세1-4 | 10:15 초청강연

니켈기 초내열합금의 산화 거동에 영향을 미치는 미세조직의 영향

Yoon Seok Ko(국방과학연구소),Heung Nam Han*(서울대학교),Dong-Ik Kim*(한국과학기술연구원)

Break Time | 10:40

좌장 : 강전연(한국재료연구원)

미세2-1 | 10:50 초청강연

Temperature-Dependent Dislocation Density Evolution during Rolling of FCC Metals Simulated by Dislocation Density-Based Crystal Plasticity Finite Element Analysis

Preetham Alluri, Wi-Geol Seo, Shi-Hoon Choi*(Sunchon National University)

미세2-2 | 11:15 초청강연

Influence of the Schmid factor and geometric compatibility on twin variant selections and twin transmissions of ZK60 alloys

Jaehyung Cho*, Murugesan Mohanraj, Geon Young Lee(Korea Institute of Materials Science (KIMS)),Shi-Hoon Choi(Sunchon National University)

미세2-3 | 11:40 초청강연

A cluster-based mean field polycrystal model to simulate dynamic recrystallization

Youngung Jeong*(Changwon National University)

좌장 : 조훈휘(국립한밭대학교)

미세3-1 | 13:30 초청강연

전류에 의한 금속의 비열적 재결정 및 상변태 거동

정경재(성균관대학교),한흥남*(서울대학교)

미세3-2 | 13:55 초청강연

반도체 패키징용 마이크로 비아 충진을 위한 구리 전해도금 시 유기첨가제 조합에 따른 미세조직과 집합조직의 특성

박현*, 오은기, 최재훈, 김정한*(동아대학교)

미세3-3 | 14:20 초청강연

Microstructural and Texture Design Strategies for Improving the Dwell Fatigue Performance of Structural Materials for Aeroengines

Tea-Sung Jun*(Incheon National Univ.)

집합조직

위원장 : 김동익(한국과학기술연구원)
총무간사 : 전태성(인천대학교)
Room 2층 204호, 10월 30일(금)

좌장 : 전태성(인천대학교)

집합1-1 | 15:00

PEG-SPS를 이용한 마이크로 비아 전해도금 구리의 상온 어닐링 시 미세조직과 집합조직의 발달

오은기, 최재훈, 신한균, 박 현*, 김정한*(동아대학교)

집합1-2 | 15:15

다상조직을 갖는 적층제조 17-4PH 스테인리스강의 단계별 인장 변형에 따른 준안정 오스테나이트의 변형유기 마르텐사이트 변태 및 국부 변형 거동 분석

한성희, 김대현, 김보규, 한준희, 윤수빈, 정레아, 전인정, 박유민(강원대학교), 김재우, 최인석(서울대학교), 신중호*(강원대학교)

집합1-3 | 15:30

이온 조사에 따른 SA508 Grade 3 Class 1 및 Class 2 원자로압력용 기강의 기계적 특성 및 미세조직 변화

김상태*, 김민철(한양대학교 원자력재료연구실)

집합1-4 | 15:45

AZXW 마그네슘 합금의 급속 시효경화능과 매커니즘에 대한 연구

이상봉*, 강민혁(국립금오공과대학교)

소프트소재

위원장 : 박철민(연세대학교)
총무간사 : 선정윤(서울대학교), 강석주(UNIST), 김수영(고려대학교), 심우영(연세대학교), 정성준(POSTECH), 김연수(POSTECH)
Room 2층 206호/8호, 10월 30일(금)

좌장 : 선정윤(서울대학교)

소프트1-1 | 09:00

Dynamically assembled magnetic nanoparticles in a phase transitional matrix for reconfigurable electronics

Seong-yu Choi, Jeong-Yun Sun*(서울대학교)

소프트1-2 | 09:15

Anisotropy-Programmed Magnetic Soft Composites Based on Cobalt Nanorods for Direction-Selective Self-Powered Force Sensor

Hyeokju Kwon, Minjeong Ha*(Gwangju Institute of Science and Technology)

소프트1-3 | 09:30

Magnetic Stimuli Responsive Soft Robotic Display System Enabled by Quantum Dot Light Emitting Diode

Jioh Yoo, Woojoong Kim, Minji Kwon, Seungjun Lee, Changhoe Lee, Chanyeong Jeon, Jonggun Jung, Cheolmin Park*(Yonsei University)

소프트1-4 | 09:45

Tailored anisotropy in piezoelectric composites for signal-decoupled mechanosensing

Yubin Kim, Minjeong Ha*(광주과학기술원)

소프트1-5 | 10:00

고효율 피부 부착형 순적색 페로브스카이트 발광소자를 위한 $CsPbI_3$ 나노결정의 표면 브롬화 전략

김윤호, 최문기*(UNIST)

Break Time | 10:15

좌장 : 강기훈 (서울대학교)

소프트2-1 | 10:25

Wavelength-tunable tactile neuromorphic in-sensor memory display for vision-guided robotic manipulation

Woojoong Kim, Cheolmin Park*(연세대학교)

소프트2-2 | 10:40

이온 매개 구조 조절을 통한 전기화학 바이오센서용 하이드로겔 인터페이스의 분석물 확산 및 기계적 물성 독립 제어

이동욱, 김수아, 서정목*, 김자영*(연세대학교)

소프트2-3 | 10:55

Iontronic Tactile Neuron for Encoding of Multimodal Tactile Semantics

Hayeon Jeong(Yonsei University,Korea Institute of Science and Technology),Unhyeon Kang(Korea Institute of Science and Technology),Minseok Oh(Korea Institute of Science and Technology,Seoul National University),Suyoun Lee*(Korea Institute of Science and Technology),Cheolmin Park*(Yonsei University),Hyunjung Yi*(Korea Institute of Science and Technology)

소프트2-4 | 11:10

전도성 코팅과 사전 압축을 적용한 폴리우레탄 스펀지 기반 저히스테리시스 유연 압저항 압력 센서

강채영, 박진우*(연세대학교)

소프트2-5 | 11:25

Reconfigurable SERS Nanogaps for Conformal Molecular Sensing

Goum Min, Jinsoo Na, Yugyeong Kang, Siheon Lee(Seoul National Univ.),Byounghyun Jeon, Hanjae Kim(Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM)),Hyunjun Lee(Hanyang Univ.),Beomsoo Chun, Soojeong Yim, Jeonghun Kwak(Seoul National Univ.),Youngho Eom(Hanyang Univ.),Chang Yeol Lee*(Korea Research Institute of Bioscience & Biotechnology (KRIBB)),Soon Hyoung Hwang*(Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM)),Juhyuk Park*(Seoul National Univ.)

좌장 : 이원규(홍익대학교)

소프트3-1 | 13:30

Adhesive, Conductive Zwitterionic Hydrogel via Hofmeister Ion-Assisted Filler Integration

Dahyun Lee, Jaewon Choi(Pohang University of Science and Technology),Taehun Chung(University of Wisconsin-Madison),Youn Soo Kim*(Pohang University of Science and Technology)

소프트3-2 | 13:45

Solvent Engineering of Thermo-Responsive Hydrogels Facilitates Strong and Large Contractile Actuations

Yong Eun Cho, Jeong-Yun Sun*(Seoul National University)

소프트3-3 | 14:00

Development of Glassy Glycol Gels through Solvent Engineering

Soomin Jung, Jaewon Choi, Jihyeok Kwak, Youn Soo Kim*(Pohang University of Science and Technology)

소프트3-4 | 14:15

Alkali-resilient hydrogel interphases enable in situ catalysis and bubble shedding for durable water electrolysis

Siheon Lee(Seoul National Univ.),Yunseo Lee(Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS)),Changhyun Seong(Sungkyunkwan Univ.),Wonjin Lee, Goum Min(Seoul National Univ.),Jong Hwan Lim, Sun Hwa Park(Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS)),Younghoon Oh(Boston Univ.),Sunghak Park*(Sungkyunkwan Univ.),Ki Chang Kwon*(Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS)),Juhyuk Park*(Seoul National Univ.)

소프트3-5 | 14:30

One-Step Gradient-Structured Janus Hydrogel Electrolyte for High-Performance Aqueous Zinc Metal Batteries

Saehyun Kim, Yubeen Lee, Sungbin Shin(Pohang University of Science and Technology),Seongwon Lee, Dong Gyu Lee(Hanyang University),Taehun Chung(University of Wisconsin-Madison),Dong-Yeob Han(University of Texas at Austin),Sangyeop Lee(Pohang University of Science and Technology),Tae Kyung Lee*(Hanyang University),Soojin Park*, Youn Soo Kim*(Pohang University of Science and Technology)

소프트3-6 | 14:45

Boosting Ionic Conductivity of Single-ion Conductive Polyelectrolyte Elastomers via High-dielectric Plasticizers

SangJun Ma, Jeong-Yun Sun*(Seoul National Univerisity)

Break Time | 15:00

좌장 : 김인호(성균관대학교)

소프트4-1 | 15:10

Ion-Coupled Neuromorphic Light-Emitting Devices toward Scalable Sensory Computing Arrays

Seung Jun Lee, Woojoong Kim, Jioh Yoo, Minji Kwon, Jonggun Jung , Changhoe Lee, Chanyeong Jeon, Cheolmin Park*(연세대학교)

소프트4-2 | 15:25

User-Interactive Stretchable Displays for Visual-Acoustic Encryption

LEE GWANGHEON, CHOI MOON KEE*(울산과학기술원)

소프트4-3 | 15:40

Electrochemical Doping in Halide Perovskites for Optoelectronic In-sensor Computing

Yongjin Kim, Dohyun Kim, Jae-Hyun Lee(Seoul National University),Michael Staines, Vikram(University of Oxford),Jimmy Xu(Brown University),Saiful Islam(University of Oxford),Joon-Kyu Han, Keehoon Kang*(Seoul National University)

소프트4-4 | 15:55

Retention Control through Dispersant-Engineered Ion Kinetics in Unsorted Carbon Nanotube Transistors

Donghee Shin, Beomjin Jeong*(Pusan Nat. Univ.)

소프트4-5 | 16:10

Heterostructured Electrocatalysts Based on Layered Transition Metal Chalcogenides for Alkaline Water Splitting

Seunghun Shin, Sun Kyung Han, Junhwi Han, Hotae Jeon, Won-Kyu Lee*(Hongik Univ.)

소프트4-6 | 16:25

Multiscale Engineering of Thermally Conductive Adhesives for Electronic Thermal Interfaces

Jinsoo Na(Seoul National University),Jaeho Seo(University of Illinois Urbana-Champaign),James Sangmin Choo, Sangjae Kim, Siheon Lee, Juhyuk Park*(Seoul National University)

제15회 터빈 소재 및 내열합금 심포지엄

위원장 : 서성문(한국재료연구원), 심재혁(한국과학기술연구원)
실무위원 : 윤대원(한국재료연구원), 김진우(한국재료연구원), 전종배(동아대학교)
Room 2층 209/11호, 10월 30일(금)

좌장 : 서성문(한국재료연구원)

터빈1-1 | 09:00 초청강연

단결정 초내열합금에서 응고조직 및 결함형성 제어 및 분석

이재현*, 조대현(창원대학교),도정현, 서성문(한국재료연구원),권석환(한국로스트왁스),안성철, 우한별, 구지호*(한화에어로스페이스)

터빈1-2 | 09:20 초청강연

항공엔진 수명관리, 그리고 부품 · 소재 모델링

최윤석*(부산대학교 재료공학부),이두열(부산대학교 기계공학부)

터빈1-3 | 09:40 초청강연

우수한 부식 저항성을 갖는 700℃급 페라이트계 내열합금 개발

임가람, 박강현, 권현준, 서성문, 윤대원(한국재료연구원),송기안(공주대학교), 장혜정(한국과학기술연구원),정재길(전북대학교),이호원(한국재료연구원)

터빈1-4 | 10:00 Canceled

Enhanced Purification of Molybdenum Using a Low-Power Electron Beam Melting Strategy

Addisu Boshe Botto(Korea Institute of Industrial Technology,University of Science and Technology),Ui Jun Ko(Korea Institute of Industrial Technology,Korea University),Chan Gyu Kim(Korea Institute of Industrial Technology,Inha University),Chung Tae Kim(Addis Ababa Science and Technology University),Kyoung Tae Park, Jae Jin Sim*(Korea Institute of Industrial Technology)

Break Time | 10:20

좌장 : 최백규(한국재료연구원)

터빈2-1 | 10:30 초청강연

격자불일치 제어 기반 적층 변형시효균열 저감형 Inconel 738LC variant 개발 및 상변태 강화 발현 기구

홍현욱*, 김태경, 이아름, 김준혁(국립창원대학교),고원석(고려대학교)

터빈2-2 | 10:50 초청강연

합금원소 및 열처리 조건에 따른 IN718 조형체의 크리프 특성

정중은*(한국재료연구원),심영래(한국재료연구원,동아대학교),이형수, 서성문, 김인수, 도정현, 이상원, 최백규, 정인용(한국재료연구원)

터빈2-3 | 11:10 초청강연

적층제조를 활용한 우주발사체용 초내열합금 기반 경사기능재 제조

정민재, 성예찬, 김범준(경상국립대학교),서성문(한국재료연구원),김형섭(포항공과대학교,도호쿠대학교),이형수, 김정기*(경상국립대학교)

터빈2-4 | 11:30 초청강연

난용접성 터빈용 초내열합금의 적층제조를 위한 강화입자 이식 기반 분말 표면 설계 전략

이태규*, 이민제(국립한밭대학교)

좌장 : 윤대원(한국재료연구원 (KIMS))

터빈3-1 | 13:30 초청강연

Alloying effects in Nb-Si-based alloys: Microstructural evolution and mechanical properties

Sangwon Lee*, Jueun Kim, Bongchul Kim, Jeonghyeon Do, Joong Eun Jung, In Soo Kim, Baig Gyu Choi(Korea Institute of Materials Science)

터빈3-2 | 13:50 초청강연

Compositional effects of Nb and Mo on γ′/γ phase stability and creep resistance of Nimonic 80A superalloys

Shaik Mahammad Ali, Hyungsoo Lee, Dae Won Yun, Sangwon Lee, Young Soo Yoo, Seong-Moon Seo, Hi Won Jeong(Korea Institute of Materials Science)

터빈3-3 | 14:10 초청강연

LPBF로 제조한 IN939 동공 LCF 시편의 as-built 표면 조도가 저주기 피로 특성에 미치는 영향

이형수*, 샤익알리, 윤대원, 정희원, 정인용, 유영수, 서성문(한국재료연구원)

항공재료

위원장 : 이홍철(한화에어로스페이스)
총무간사 : 석무영(한국재료연구원),
오석근(한국항공우주산업(주)), 이병현(공군 항공기술연구소)
Room 3층 컨퍼런스, 10월 30일(금)

좌장 : 석무영(한국재료연구원)

항공1-1 | 09:00

직접용융증착법으로 제조된 IN939 합금의 후열처리 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 평가

김영우, 강호성, 성예찬, 김정기*(경상국립대학교)

항공1-2 | 09:15

A Mitigation Strategy for Hot Cracking in LPBF-Processed IN738LC Superalloy via Atmospheric Gas Control

Hanul Jeon*, Seunghoon Lee, Jungwook Cho*(Pohang University of Science and Technology)

항공1-3 | 09:30

High-Temperature Damage Mechanisms and Evaluation Techniques for Nickel-Based Superalloys

HaSeong Baek, Tea-Sung Jun*(Incheon National University)

항공1-4 | 09:45

열처리를 고려한 IN718 DED의 최적 적층조건 탐색

김성원, 유진영(부산대학교),권시은, 김정기(경상국립대학교),이태경*(부산대학교)

항공1-5 | 10:00

직접용융증착법으로 제조된 Ni20Cr/IN738LC 경사기능재료의 조성 구배에 따른 미세조직 변화 및 기계적 특성

정민재, 성예찬, 김범준(경상국립대학교),서성문(한국재료연구원),김형섭(포항공과대학교,도호쿠대학),이형수*(한국재료연구원),김정기*(경상국립대학교,경남항공방산과학기술원)

항공1-6 | 10:15

선택적 레이저 용융 공정으로 제조된 γ-TiAl 합금의 응고 경로에 따른 라멜라 방향성 제어

박성현*, 김채원(한국재료연구원),타카요시 나카노(오사카대학교),김성웅(한국재료연구원)

Break Time | 10:30

좌장 : 윤은유(한국재료연구원)

항공2-1 | 10:40

Thermal Shock and Fatigue Test System for Aerospace Metallic Materials

Seok-Woo Hong, Se-Ho Kim*(Korea Univ.)

항공2-2 | 10:55 Canceled

W 함량에 따른 주조용 γ-TiAl 합금의 고온 변형거동 연구

김채원(한국재료연구원,국립금오공과대학교),박성현, 김성웅*(한국재료연구원)

항공2-3 | 11:10

Influence of γ′ dissolution condition on the creep behavior of serrated grain boundaries in a wrought Ni-based superalloy

Jaejun Jeong*, Yeonho Choi, Seongju Kim(Pohang University of Science and Technology),Seong-Moon Seo(Korea Institute of Materials Science),In-Ho Jung (Seoul National University),Jehyun Lee (Changwon National University),Jung-Wook Cho*(Pohang University of Science and Technology)

항공2-4 | 11:25

Al7xxx계열 빌렛의 Direct-Chill 주조 결함 제어를 위한 데이터 기반 공정 최적화

신윤우, 최현성*, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남(한국재료연구원)

항공2-5 | 11:40

수소 환경에서 SSRT를 이용한 항공용 적층제조 IN718 합금의 수소취성 거동 분석

조은준, 정유인(한국항공우주산업),김상식*(경상국립대학교)

좌장 : 강성규(경상국립대학교)

항공3-1 | 13:30

항공기 캐노피 사례를 통한 LRU 국산화 추진방향

정대호, 김덕성, 최명호, 길성근, 정유인*(한국항공우주산업(주))

항공3-2 | 13:45

항공기 캐노피 구조 부품의 체결부 피로수명 평가

백민재, 최현성*, 이동준, 박현일, 석무영, 권용남(한국재료연구원),정대호(한국항공우주산업)

항공3-3 | 14:00

항공용 패스너 국산화, 표준서 너머의 기술요건

고덕황*(한국항공우주산업)

항공3-4 | 14:15

레이저 피닝 및 Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification이 René 95 니켈계 초합금의 미세구조 및 잔류응력의 열적 완화에 미치는 영향

조윤지, 최현성, 박현일, 석무영, 이동준*, 권용남(한국재료연구원)

항공3-5 | 14:30

기계발광 및 디지털 이미지 상관관계 기법을 결합한 응력 및 변형률 동시 측정 방법

최영원, 이동준, 석무영, 박현일, 신윤우, 이승환, 김도현, 성창윤, 최현성*(한국재료연구원)

POSTER SESSIONS I 10월 28일



P1 : 학부생세션

Room 1층 전시홀, 10월 28일(수)

P1-1

결정소성 기반 가상 수소 투과 시험을 통한 변형 모드별 수소 확산 거동 분석

강병진, 강찬, 박진흥*(서울과학기술대학교)

P1-2

EBSD, 나노인덴테이션 및 TEM 분석을 이용한 QP980강의 수소취성 저항성 향상 기구 규명

김혜진*, 박규완(한국공학대학교)

P1-3

Si 및 Cu 첨가에 따른 페라이트–펄라이트강의 미세조직과 수소취성 거동 변화

황예나, 오재석, 최수환, 정민섭(서울과학기술대학교), 고석우(세아베스틸 기술연구소), 황병철*(서울과학기술대학교)

P1-4

전기화학적 in situ 및 ex situ 수소 주입에 따른 템퍼드 마르텐사이트강의 수소취성 거동 비교

홍민우, 배영훈, 최수환, 황병철*(서울과학기술대학교)

P1-5

L–PBF로 제조된 마레이징강의 수소취성 저항성에 reverted austenite의 영향

박진모, 이민호, 배재웅*(국립부경대학교), 이승연, 박정민*(한국재료연구원), 이정훈(포항산업과학연구원)

P1-6

미세조직 및 용접 열이력 정보를 활용한 고강도강 열영향부의 머신러닝 기반 경도 예측

김보민, 전소희(국립한밭대학교), 김상훈(국방과학연구소), 김정한*(국립한밭대학교)

P1-7

볼트강의 합금조성과 오스테나이트 결정립 크기에 따른 조미니 경화능 해석

오재석, 최수환, 오동규, 황병철*(서울과학기술대학교)

P1-8

기가급 초고강도강 전단용 SKD11 금형의 마찰교반 표면개질

오지윤, 이상현, 김태윤, 이제인*(부산대학교)

P1-9

고압 비틀림 공정 중 변형량에 따른 18Ni 300 마레이징강의 석출물 생성 속도 및 기계적 특성 변화

박종찬, 정영훈, 주수빈(경상국립대학교), 안민호(한국재료연구원), 한규미(포항공과대학교), 우영윤(한국재료연구원), 김형섭(포항공과대학교), 김정기*(경상국립대학교)

P1-10

분말야금공정으로 제조한 페라이트계 스테인리스 강의 미세조직과 인장특성에 미치는 PMMA 첨가의 영향

최지원, 김주현, 조예진, 김대식, 노상훈*(국립부경대학교)

P1-11

ECCI 기법을 이용한 304 스테인리스강 변형 미세조직의 결정학적 특성 분석

윤소연, 임현빈(국립공주대학교), 문종언*(국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터)

P1-12

차체 구조용 고비강도 저합금형 망간강 개발

곽소민, 김채영, 한정호*(한양대학교)

P1-13

극점도 이미지 기반 합성곱 신경망을 이용한 면심입방 다결정재 항복곡면 예측

신기로, 박진흥*, 이창환(서울과학기술대학교)

P1-14

나노인덴테이션 및 유한요소역설계를 활용한 미세 영역의 국부 인장특성 평가

권완건, 임현빈(국립공주대학교), 문종언*(국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터(CAMP2))

P1-15

파단면 및 미세조직 분석 기반 XFEM 파괴인성 손상 모델의 물리적 검증

하재민, 신선호(국민대학교), 김형욱(한국재료연구원), 성효경*(국민대학교)

P1-16

친환경 FCC계 고엔트로피 금속기지복합재 제조 및 특성 평가

김중휘, 박성현, 정재길*(전북대학교)

P1-17

격자 왜곡 제어를 통한 내열 고엔트로피합금의 기계적 물성 및 전위 거동 상관관계 분석

임정현, 이강진, 허민아(국립공주대학교, 첨단 분말 소재 부품 센터), 이찬호(The University of Auburn), 송기안*(국립공주대학교, 첨단 분말 소재 부품 센터)

P1-18

Ni 첨가에 따른 Cr–Mo–W 기반 다성분계 합금의 미세구조 및 기계적 특성 변화

이재원, 김범선, 서요한, 윤찬규, 나현준, 이동건(국립한밭대학교), 민현기(서울대학교), 윤국노*(국립한밭대학교)

P1-19

사전 변형 및 단시간 열처리 공정이 FeCrNi 중엔트로피 합금의 BCC 석출과 기계적 물성에 미치는 영향

김종훈, 문광현, 김진경*(한양대학교)

P1-20

Feature Engineering을 활용한 Fe–Mn–Cr–Ni 중엔트로피 합금의 인장물성 예측 모델 최적화 및 실험적 검증

황예민, 이준석, 신필욱, 배재웅*(국립부경대학교)

P1-21

냉간 압하율 증가에 따른 Fe–Ni–Co–Cr–Mo계 중엔트로피 합금의 열처리 후 미세조직 발달 및 극저온 기계적 특성

오사랑, 김태형, 이재혁(단국대학교), 김영균, 나영상(한국재료연구원), 배재웅(국립부경대학교), 김성욱(포항산업과학연구원), 김형섭(포항공과대학교), 주수현*(단국대학교)

P1-22

미세 Mo-rich 석출을 이용한 Fe–Ni–Co–Cr–Mo 중엔트로피 합금의 극저온 기계적 특성 향상

양세웅, 이재혁, 김태형(단국대학교), 배재웅(부경대학교), 김형섭(포항공과대학교), 주수현*(단국대학교)

P1-23 **Canceled**

Re 첨가 Ni계 고엔트로피 합금의 응고 거동 및 γ/γ′상 형성에 관한 연구

김윤준*, 김진원, 이승주, 강민(인하대학교)

P1-24

Co 첨가에 따른 Ni–38Cr–3.8Al 합금의 미세조직 및 기계적 특성 제어

이상현, 오지윤, 윤성민, 이제인*(부산대학교)

P1-25

내열 고엔트로피 합금의 격자 왜곡 및 전단 탄성률 변화에 따른 Edge와 Screw 전위 거동 제어

김동현, 이강진, 허민아(국립공주대학교, 첨단 분말 소재 부품 센터), 이찬호(The University of Auburn), 송기안*(국립공주대학교, 첨단 분말 소재 부품 센터)

P1-26

사용후핵연료 처분용 Ni–Cu–Al 합금의 시효 처리 조건에 따른 석출경화 거동

배준우*(영남대학교)

P1-27

Directed Energy Deposition 공정으로 제조된 Ni 계 초내열 합금의 온도 조건에 따른 마모 거동 분석

김영태*, 김대현, 김현중, 백건우, 신민호, 홍순직(국립공주대학교)

P1-28

Twin Boundary Tilting in FCC Cu under Tribological Loading: A Molecular Dynamics Study

DongHyun KIM, Won-Seok Ko*(Korea Univ.)

P1-29

유기첨가제에 따른 구리 박막의 미세조직 변화 및 기계적 특성 변화에 관한 연구

최지연, 최재훈, 신한균, 김정한*(동아대학교)

P1-30

Si 첨가 및 상 제어에 따른 Cu–Ga–Si 합금의 광학적 • 기계적 특성

임태민, 조가은, 장성문, 김현영, 홍성환, 박혜진, 김기범*(세종대학교)

P1-31

Quantitative analysis and modeling of static grain–growth in Mg–Al–Zn alloys

Yeseul Mun, Jihun Park, Kyungmoon Kim, Hee-Tae Jeong, Woo Jin Kim*(Hongik Univ.)

P1-32

나노–CT를 활용한 고온용 Al–Ce–(Mn) 합금의 공정조직 3차원 구조 진화 및 강화 거동 분석

임민혁, 조우빈, 조원준, 최우솔, 한인성*(경북대학교)

P1-33

방사광 나노–CT 기반 3차원 시간분해 관찰을 통한 Al–7Si–xCe 합금의 공정 Si 미세화 · 구상화 거동 분석

최우솔, 조우빈, 조원준, 임민혁, 한인성*(경북대학교)

P1-34

Role of Interstitial Oxygen in ω Suppression and TRIP/TWIP deformation mechanisms for Ti–Cr Alloys

MERDAN FARHADOV, Yeonju Noh, Pyuck-Pa Choi*(Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))

P1-35

열처리 공정 제어에 따른 Zr–702의 미세조직 변화 및 기계적 특성 평가

곽선영, 신승환, 이강진, 송기안*(국립공주대학교, 첨단 분말 소재 부품 센터)

P1-36

Synthesis of Spherical W–Mo Alloy Powder by Ultrasonic Spray Pyrolysis and Subsequent Hydrogen Reduction

Wonyong Kwon, Eui Seon Lee, Ji Young Kim, Sung-Tag Oh*(SEOULTECH)

P1-37

습식환원 기반 니켈 나노분말의 $CaCl_2$ 첨가에 따른 형상 및 분산성 제어

최시우(인하대학교, 한국생산기술연구원), 심재진*(한국생산기술연구원)

P1-38

금속 적층제조에서 Ti:B 비율 및 TiB_2 형성 방식에 따른 Al6061 합금의 미세조직 변화

이태규*, 신주원, 이원희(국립한밭대학교), 김윤희(한국과학기술원)

P1-39

HIP 처리를 통한 단결정 니켈기 초합금의 미세조직 변화와 고온 기계적 특성 분석

김동진, 조대현(국립창원대학교), 구지호(한화에어로스페이스), 이재현*(국립창원대학교)

P1-40

LPBF Ti-6Al-4V 미니어처 인장시편의 격자 구조에 따른 인장 거동 및 미세조직 분석

송영준, 김영훈, 신선호, 성효경*(국민대학교)

P1-41

코발트기 초합금의 DED 공정 중 균열 억제 연구

이태규*, 김승규(국립한밭대학교)

P1-42

직접용융증착법으로 제조된 INCOLOY 903 합금의 극저온 · 상온 · 고온 기계적 특성과 미세조직 분석

여승민, 김정기*(경상국립대학교)

P1-43

금속-유기 골격체의 직접 성장을 통한 무접착제 금속-고분자 이종 접합 및 계면 특성 연구

명건우, 한병준, 김정한*(국립한밭대학교)

P1-44 **Canceled**

밀스케일 업사이클링을 위한 활성탄 복합 펠렛 제조 및 니켈 흡착 특성 분석

허홍, 조연하, 김세호*(고려대학교)

P1-45

LLM 기반 격자구조 압축 물성 데이터 수집 프레임워크

최성훈, 남주형, 성효경*(국민대학교)

P1-46

삼중주기 최소곡면 기반 다공성 금속 구조의 방향별 탄성계수 역설계

김주안, 김영훈, 성효경*(국민대학교)

P1-47

가압경수로 2차계통 배관용 저탄소강 분기배관 용접부의 열이력에 따른 국부 부식 거동

김대한, 이원찬(국립한밭대학교), 문성인(한국원자력연구원), 김정한*(국립한밭대학교)

P1-48

열처리 조건에 따른 딥드로잉된 Ni 도금강의 미세조직 및 전기화학적 부식 특성

윤정민, 이정민(국립공주대학교), 문종언*(국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터)

P1-49

Na_2SO_4 및 $NaNO_3$ 전해질을 이용한 모의 CRUD 코팅 STS304의 전해제염 특성 비교 연구

심영민, 조민식, 박성현(충남대학교), 신재명(한국재료연구원), 네르시시안 하이크(충남대학교 급속응고신소재연구소), 이종현*(충남대학교, 충남대학교 급속응고신소재연구소)

P1-50

적층 제조된 Co-Cr-Fe-Ni-Mo 고엔트로피 합금의 내식성에 대한 Cr과 Mo 간의 조성적 트레이드오프의 영향

전혜원, 이정민(국립공주대학교), 이재혁(단국대학교), 조성재, 신민호, 임현빈(국립공주대학교), 홍순직(국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터), 주수현(단국대학교), 문종언*(국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터)

P1-51

산화막 균일성과 표면 경도 향상을 위한 ECO-Almag 합금 양극 산화 공정 최적화

홍다준(인하대학교, 생산기술연구원), 임하나*(생산기술연구원)

P1-52

DC 마그네트론 스퍼터링 공정변수 제어에 따른 AlTiVCr 고엔트로피 공융합금 코팅층의 미세조직 및 기계적 물성 분석

허윤제, 현명우, 이유진, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범*(세종대학교)

P1-53

고온 · 황산 환경에서 금속 분리판의 부식 거동 및 코팅 효과

유민, 김혜진*(한국공학대학교)

P1-54

High-Temperature Oxidation Behavior of MCrAlY Bond Coatings under Dry, Low Water-Vapor, and Steam-Rich Conditions

Seeun Jang, Daweon Hwang, In-Ho Jung*(Seoul National Univ.)

P1-55

Reduction of Iron Ore Pellets by H2 – Effect of Hydrogen Reduction Degree on Pellet Microstructure & Porosity

KIM HYUN MIN, Kang Beom Jun, Nishant Kumar, Marie-Aline Van Ende*, In-Ho Jung*(서울대학교)

P1-56

Investigation of BF Grade DRI Pellet Melting for Electric Smelting Furnances: A novel path to Carbon-Neutral Steel Making

Tae Jeong Kim, Niladri Naskar, Marie-Aline Van Ende*, In-Ho Jung*(경희대학교)

P1-57

Melting of H2-DRI Powder to Simulate Electric Smelting Furnace (ESF) Process: Part II – Variation of Coke/DRI Ratio and Slag Composition

Juwon Hwang(Sungkyunkwan Univ.), Minhun Kim, Niladri Naskar, Marie-Aline Van Ende, In-Ho Jung*(Seoul National Univ.)

P1-58

Melting of H_2-DRI Powder with Slag: Carburization and Slag-Metal Reaction Behavior

Minhun Kim, Juwon Hwang, Niladri Naskar, Marie-Aline Van Ende, Inho Jung*(서울대학교)

P1-59

니켈선철 제조를 위한 CaO 첨가에 따른 규산질 니켈 산화광의 슬래그 액상화 및 용융환원 거동

김동은(한국생산기술연구원 국가희소금속센터, 인천대학교), 배성욱(한국생산기술연구원 국가희소금속센터, 한양대학교), 서석준, 신재홍*(한국생산기술연구원 국가희소금속센터)

P1-60

폐 NdFeB 자석 스크랩의 전기화학적 분체화를 통한 침출 반응성 향상 및 희토류 선택적 분리

서유빈(한국생산기술연구원, 인천대학교), 김명석(한국생산기술연구원, 고려대학교), 페브리나와르타 부르한, 신재홍*(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교)

P1-61

자전연소합성 공정을 이용한 고순도 티타늄카바이드 분말 제조 및 프리카본 제어 연구

윤태경(인하대학교, 한국생산기술연구원), 심재진*(한국생산기술연구원)

P1-62

Knowledge Graph–Guided Multi–Step Reasoning for Inverse Design of Sulfide–Based Solid Electrolytes

Sohyun Suk, Joonhee Kang*(부산대학교)

P1-63

Atomistic Origins of Crosslink–Controlled Lithium–Ion Transport in Aqueous Gel Polymer Electrolytes

Chaeyun Jin, Joonhee Kang*(Pusan National Univ.)

P1-64

Synergistic Integration of a Cu–ZIF–8–Functionalized Membrane and an In–Situ Polymerized Hybrid Solvating Electrolyte for High–Rate, Dendrite–Free Sodium Metal Batteries

Seogyeong Park, Hae Su Jung, Geon Woo Kim, Gyeong Jun Lee, Yun Sung Lee*(Chonnam Univ.)

P1-65

고전압 수계 아연-아이오딘 전지를 위한 유기 염화물계 전해질 첨가제의 구조-기능 상관관계 범밀도함수이론 연구

구권빈(경희대학교, 한국에너지기술연구원), 이진홍, 정규남, 임강훈*(한국에너지기술연구원)

P1-66

Microstructural Refinement and High–Rate Performance of a Li–Sn Powder–Based Composite Anode through Repeated Rolling

Hye Jin Hwang, Se Jong Yeon, Hyeon Bi Kim, Min Su Kim, Jun Young Kim, Hee–Tae Jeong, Woo Jin Kim*(Hongik Univ.)

P1-67

음이온교환막 수전해(AEMWE)를 위한 다공성 NiFe 합금박막 OER 전극 개발 Porous NiFe Alloy Film Electrodes via Electrodeposition for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis

성동건(인하대학교, 한국생산기술연구원), 임하나*(한국생산기술연구원)

P1-68

Data–Driven Design of Three–Dimensional Metal Nanostructures for Reversible Metal Electrodeposition–Based Electrochromic Systems

Taehoon Ha, Jaeha Cho, Seung Woo Kim, Cheon Woo Moon*(Soonchunhyang Univ.)

P1-69

Regulating Zn Electrodeposition through Solvation Structure in Acetate–Based Water–in–Salt Electrolytes for Reversible Smart Windows

SEO YUN CHOI, Cheon Woo Moon*(Soonchunhyang Univ.)

P1-70

Solvation Structure Modulation in Ionic Liquid–Organic Cosolvent Electrolyte for Enhanced Electrochromism

Seung Woo Kim, Jaeha Cho, Taehoon Ha, Cheon Woo Moon*(Soonchunhyang Univ.)

P1-71

Hollow Mesoporous Silica Nanoparticles/Polyimide 기반 저유전 반도체 패키징 소재 연구

김시현(인하대학교, 한국생산기술연구원), 임하나*(한국생산기술연구원)

P1-72

유한 공급원 확산 모델을 이용한 Cu 배선/TiN 배리어 두께 조합 최적화 전산모사

김하진, 최현우, 김서정, 양예성, 이은재, 한태경, 차필령*(국민대학교)

P1-73

Pd 합금 포고핀-Sn계 솔더의 계면 반응과 포고핀 Failure의 연관성 분석

최종범, 송호정(동아대학교), 서현준, 이석연, 문정탁(MK전자), 권현아*, 전종배*(동아대학교)

P1-74

착화제 종류에 따른 Ag 코팅 Cu 입자의 제조 및 전기적 특성

김민석, 이종현*(서울과학기술대학교)

P1-75

250 ˚C 열처리에 따른 Cu 접촉 WSe_2 백게이트전계효과 트랜지스터의 전달 특성 변화

금대호*(충남대학교)

P1-76

Neuromorphic Synaptic Transistor Enabled by Conductance Modulation in MoS_2

Sujin Jo, Jihoon Huh, Jeongyeol Park, Yohan Lee, Seung Ji Lo, Narae Lee, Jae Hyun Kim, Moonsang Lee*(Inha University, Program of Semiconductor Convergence, Inha University)

P1-77

Chemical Vapor Deposition을 이용한 WO3/WSe2 core/shell nanowire 합성 연구

김여진, 위신혜(동아대학교), 송유진(한국기초지원연구원), 신한균, 김정한*(동아대학교)

P1-78

Finding the limit coverage of color gamut with plasmonic Cu

YOORIM KIM, Cheon Woo Moon*(Soonchunhyang University)

P1-79

플라즈모닉 멤브레인 기판을 이용한 광유도 나노입자 농축 및 라만 검출

정동혁, 윤민기, 이수인, 민강희, 임승묵, 김관형, 윤국노, 위정섭*(국립한밭대학교)

P1-80

소수성 패턴 적용을 통한 나노입자의 국소 농축 및 라만 검출 한계 개선

김민서, 김민채, 황지연, 정다인, 박소윤, 김관형, 윤국노, 위정섭*(국립한밭대학교)

P2 : 가공-표면처리

Room 1층 전시홀, 10월 28일(수)

P2-1

Electrochemical Corrosion Behavior and Intergranular Corrosion Mechanism of Almag6 in Chloride Environments

YeWon Han(KITECH, Hanyang.univ), ChaeHyun Jeong(KITECH, Sunkyunkwan.univ), Sekwon Oh*(KITECH)

P2-2

Comparative wear behavior of cast iron, carbon－ceramic, and laser-cladded ceramic coatings for brake applications

Woocheol Shin(Korea Institute of Industrial Technology), Taejune Nam(Korea Institute of Industrial Technology, Sunchon Univ.), Sumin Song(Korea Institute of Industrial Technology, Hanyang Univ.), Kyuntaek Cho*(Korea Institute of Industrial Technology)

P2-3

Microstructural and Cu－Sn Interfacial Characterization of Hot-Dip Tin-Plated 0.16 mm Copper Fine Wire

Gi-Hyun Lim, Hyeon-jun Heo, JuChan Kwon, Handong Cho*(Mokpo National Univ.)

P2-4

반도체 패키징 몰딩 금형용 아크 이온 플레이팅 기반 다층 질산화물 코팅막의 기계적 물성 및 표면 특성 평가

김영석*, 정용, 신연철, 서민수(에이피스(주))

P2-5

해상풍력용 고강도 볼트 상용소재의 부식거동 분석

권홍기(포항소재산업진흥원), 이승민(세아베스틸), 정정진(KPF), 박상원*(포항소재산업진흥원)

P2-6

Ni-Cr-Mo 합금 튜브 내면 전해연마 시 상대전극 직경이 전류-전압 특성에 미치는 영향

양현석, 정우철, 한덕현, 최광수, 공만식*(고등기술연구원)

P2-7

Powder Evolution and Hot-Press Densification Kinetics of Mechanically Alloyed ZrMoTiCuSi Multi-Element Alloy

gihoon kwon, Byoungho Choi, Jihun Shin, Kyong Jun An, Kyoung Il Moon*(Korea Institute of Industrial Technology)

P3 : 에너지재료

Room 1층 전시홀, 10월 28일(수)

P3-1

Fluorinated Metal－Organic Framework with 3D Ion-Conducting Channels for High-Voltage Lithium Metal Batteries

Hyungdoo Lee, ChanJin Park *(Chonnam Univ.)

P3-2

Improved Sodium-Ion Transport via COF-Based Quasi-Solid Polymer Electrolyte for Sodium-Metal Batteries

Hyeon-Seo Lee, Chan-Jin Park*(Chonnam National Univ.)

P3-3

Effect of Pore Structure on Ion Transport and Capacitive Performance of Anthracite-Derived Activated Carbons in Neutral Alkali Sulfate Electrolytes

Eom Hee Seung, Kwang Hyun Park, Jae Eun Jin, So Yeon An, Bo Young Yoon, Ryun Kyeong Lee, Tae Young Park, Cheng Ai Li, Sung Ho Song*(Kongju National University), Wang-Geun Shim*(Sunchon National University)

P3-4

Graphene-Regulated K-Ion Transport in Hierarchically Porous Biomass-Derived Carbon for High-Power Aqueous Supercapacitors

boyoung yoon, Soyeon An, Jaeeun Jin, Hee Seung Eom, Ryun Kyeong Lee, Tae Young Park, Kwang Hyun Park, Cheng Ai Li, sungho Song*(Kongju National Univ.)

P3-5

EIS-Based State-of-Health of LIBs Using Hybrid CNN－GPR Model

dongsoo lee, seungyeon lee, Il sohn*(Yonsei Univ.)

P3-6

Hydrovoltaic Performance and Heavy-Metal Ion Adsorption Applicability of Biomass-Based CH-TMA Frameworks

Yewon Do(Korea Institute of Industrial Technology, Inha Univ.), Seung-Hwan Lee, So Hyun Baek, Yu-Na Lee, Kanghyuk Lee, Taeseok Oh, Yongbum Kwon, Yoseb Song(Korea Institute of Industrial Technology), Haejin Hwang(Inha Univ.), Da-Woon Jeong*(Korea Institute of Industrial Technology, Chung-Ang Univ.)

P3-7

DFT 및 ML-MD 기반 Vanadium-free NASICON $Na_3V_2(PO_4)_2F_3$ 양극재의 전기화학적 성능 평가

유승원, 최용석*(단국대학교)

P3-8

수소 및 불순물 함유 PWR 증기발생기 틈새 환경에서 소성변형이 Alloy 690의 전면부식 거동에 미치는 영향과 열역학적 고찰

전순혁*, 한지영, 김성우(한국원자력연구원)

P3-9

Micro-Compositional Characterization of Radioactive Materials: Hot-Cell Metallographic Protocols and Shielded EPMA

Gahyun Choi*(Korea atomic energy research institute)

P3-10

Flexible and Tough MXene/Graphene Hybrid Films Enabled by Metal-Ion Crosslinking for Efficient EMI Shielding

Soyeon An, Jae Eun Jin, Hee Seung Eom, Bo Young Yoon, Ryun Kyeong Lee, Tae Young Park, Kwang Hyun Park, Cheng Ai Li, Sung Ho Song*(Kongju Univ.)

P4 : 반도체

Room 1층 전시홀, 10월 28일(수)

P4-1

Ag-Al-Mn 합금 기반 나노다공성 Ag의 2차 탈합금에 따른 순도 · 비표면적 변화 및 소결접합 특성

이현채, 성재욱*, 현승균*(인하대학교)

P4-2

반도체 후공정용 자동화 Caulking 장비의 압입자 최적화 및 결함 분석

김민지, 윤덕재, 김경택*(한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소)

P4-3

Modulation of Threshold Voltage in IDT–BT Organic Transistors by Interfacial Polymer Brushes

Seong Ju Han, Gi Min Kim, Ye Ho Bae, Jae Hyeong Kim, Si Heon Ryu, Ji Hoon Park*(Pukyong National University)

P4-4

Ag–Si–Fe 나노 복합 구조 합금 설계를 적용한 저온 소결 접합용 나노다공성 은 개발

손성빈, 현승균*, 성재욱*(인하대학교)

P4-5

Super–Tough 0D-1D All–Carbon Hybrid Fibers Enabled by Graphene Quantum Dot Anchoring

Jae Eun Jin, So Yeon An, Hee Seung Eom, Boyoung Yoon, Ryun Kyeong Lee, Tae Young Park, Cheng Ai Li, Kwang Hyun Park, Sung Ho Song*(Kongju National Univ.)

P4-6

나노다공성 Ag 분말을 이용한 반도체 접합용 sheet 제조 및 접합특성 평가

조은서, 현승균*, 성재욱*(인하대학교)

P4-7

나노다공성 Ag 제조를 위한 40Ag–60Cu 리본의 전기화학적 탈합금 거동

김여빈, 현승균*, 성재욱*(인하대학교)

P4-8

다중 리플로우 사이클에 따른 SAC305/Cu 솔더 접합부 계면의 금속간화합물 성장 거동 및 기계적 신뢰성 평가

김송이, 유동열, 고용호*(한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소)

P4-9

반도체용 포토레지스트 분야의 특허 동향 분석

김미애, 김효석*(지식재산처)

P5 : 상변태

Room 1층 전시홀, 10월 28일(수)

P5-1

알루미나이드 코팅된 금형의 결함분석 및 코팅거동

양하영, 김선진, 정현준, 강전준(국립한밭대학교), 이효룡(신우금형), 오용준, 박준식*(국립한밭대학교)

P5-2

달 레골리스 모사체로 제조한 벌크 유리의 기계적 물성과 열물성 경향 분석

송원택, 이명준, 박은수*(서울대학교)

P5-3

B 다층 코팅한 Si + B 확산코팅 TZM 합금의 고온 산화거동

정현준, 양하영, 김선진, 강전준, 남선미, 박준식*(국립한밭대학교)

P5-4

냉각 속도 구배에 따른 심리스 수소 강관의 미세조직 구성상과 수소취성 저항성 상관관계 분석

임성진, 정윤종, 권민철, 신윤지, 송기안*(국립공주대학교)

P5-5

Austenite Phase Stability–Guided Composition and Process Design of Fe-Mn-Si Shape Memory Alloys

윤제인, 김지영, 박은수*(서울대학교)

P5-6

High–Performance Fe–Based Nanocrystalline Soft Magnetic Alloys through Diversification of Immiscible Elements

Subin Ahn, Hyun Gi Min, Wan Kim, Eun Soo Park*(Seoul National Univ.)

P5-7

Analysis of the Fault Assisted hP_{24} Phase Transformation And Stacking Fault Energy guided Design Strategy of a Co based superalloys system

Hyungi Min(Seoul National University), Streit Cunningham(University of California Santa Barbara), Minseok Kim(Seoul National University), Kooknoh Yoon(Hanbat university), Daniel Gianola(University of California Santa Barbara), Eun Soo Park*(Seoul National University)

P5-8

Complex Second–Phase Design for Lead–Free Cu–Zn Brasses with Controlled Microstructure and Magnetic Response

Jieun Lee(Seoul National University), Siyeon Lee(WONJIN Metal), Eunsoo Park*(Seoul National University)

P5-9

Design of High–Phosphorus Fe–Based Amorphous Alloys for Efficient Hydrogen Evolution Reaction

JuneYoung Lee, Seonghoon Yi*(Kyungpook National University)

P5-10

잔류 원소가 Invar 합금의 전기화학적 부식 거동에 미치는 영향

강승연, 고유정, 류채우*(홍익대학교)

P5-11

Cu-X 합금의 첨가 원소 제어를 통한 미세조직 변화 및 기계적광 · 학적 특성 연구

장성문, 김현영, 조가은, 황의정, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범*(세종대학교)

P5-12

Cu-Ge-Cr 합금의 상변화 및 제2상 분산 특성 연구

황의정, 김현영, 장성문, 조가은, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범*(세종대학교)

P5-13

Microstructural Design Strategies and Corrosion Behavior of Cu-Al-Zn-Sn Alloys

Hae Jin Park*, Gyeol Chan Kang, Sung Hwan Hong, Ki Buem Kim*(Sejong University)

P5-14

확산코팅된 나사의 조도 및 내마모 거동

김선진, 양하영, 정현준, 강전준(국립한밭대학교), 최정묵((주)진합), 오용준, 박준식*(국립한밭대학교)

P5-15

압연 공정 및 열처리 공정에 따른 CoCuFeNi 기반 고엔트로피 합금의 기계적 물성 최적화에 대한 연구

이규필, Yusupov Dilshodbbek, Abbas Muhammad Aoun, 강결찬, 홍동성, 강원묵, 홍성환 , 박혜진, 김기범*(세종대학교)

P5-16

Quasicrystal Growth and Nanomechanical Behavior in Cu-Microalloyed Ti-Zr-Ni Alloys

Thiri Shwe Sin, Go Eun Kim, Geunhee Yoo, Wan Kim, Eun Soo Park*(Seoul National University)

P5-17

DC 마그네트론 스퍼터링 기반 AlCrFeNi 고엔트로피 합금 결정질/비정질 Self-composite 코팅의 공정 최적

현명우, 허윤제, 이유진, 서진오 , 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범*(세종대학교)

P6 : 표면계면

Room 1층 전시홀, 10월 28일(수)

P6-1

기계적 결합력 향상을 위한 탄소강의 양극산화

이진원, 윤태환, 임효균, 박일송*, 우태규*(전북대학교)

P6-2

Effect of Mg Content on Microstructure and Corrosion Resistance of Zn-Mg-Al Hot-Dip Coatings

TaeYeon Lee(Korea Institute of Industrial Technology, Chonnam National University), TaeSeong Kim(Korea Institute of Industrial Technology, Sunchon National University), GaYeon Lee(Korea Institute of Industrial Technology, Jeonbuk National University), JaeYeol Jeon*(Korea Institute of Industrial Technology)

P6-3

WC-Co 초경합금 스크랩을 이용한 WO_3-$CoWO_4$ 복합산화물 나노구조 박막의 에어로졸 증착 평가

한철웅*(한국생산기술연구원)

P6-4

Prediction of Silicon Isotope Enrichment and Incidence-Angle Effects during 45 keV ^{28}Si Self-Implantation Using Dynamic BCA Simulation (SDTrimSP)

CHAN YOUNG LEE*, Jae Kwon Suk, Jun Mok Ha, In Mok Yang, Jun KuePark, Yong Seok Hwang, SunmogYeo, Myung-Hwan Jung(KAERI)

P6-5

Preliminary Study on the Isotopic Enrichment of Silicon-28 via Mass-Separated Ion Implantation and Structural Characterization

Jun Mok Ha*, Jae Kwon Suk, Chan Young Lee, In Mok Yang, Yong Seok Hwang, Sunmog Yeo, Jun Kue Park, Myung-Hwan Jung(Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI))

P6-6

Defect-Mediated Electrochemical Epitaxial Growth of Cu(111) on Graphene-Deposited Metallic Substrates

Moo Young Jung, Minhyeok Kim, Yongqiang Meng, Sunghwan Kim, Mi-Jeong Kim, Dongwoo Kim(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff*, Sun Hwa Lee*(Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

P7 : 원자력 재료

Room 1층 전시홀, 10월 28일(수)

P7-1

이종 분말 혼합을 통한 고성능 산화물 분산강화 합금 제조 및 특성 평가

김주현, 김태균, 김대식, 노상훈*(국립부경대학교)

P7-2

기계적 합금화 공정과 중간열처리를 활용한 페라이트계 ODS 강의 고온 인장특성 향상

김태균, 김성대, 김대식, 노상훈*(국립부경대학교)

P7-3

수소 환원 전처리와 Y_2O_3 첨가가 방전 플라즈마 소결 W-3Ta계 합금의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향

김대식, 김태균, 김주현(국립부경대학교), 이동원(한국원자력연구원), Ryuta Kasada(동북대학교(일본)), 노상훈*(국립부경대학교)

P7-4

SA508강의 제조공정 별 미세조직 및 기계적 특성 변화 거동

박성민, 윤준원(한국생산기술연구원, 고려대학교), 박형기(한국생산기술연구원), 김정길, 안세환(두산에너빌리티), 김동회(고려대학교), 박창수*(한국생산기술연구원)

P7-5

Molecular Dynamics Investigation of the Interaction Between Screw Dislocation and Hydrogen in BCC Tungsten

SANGHUN KIM(Yonsei Univ.), HYOUNGRYUL PARK(University of Illinois Urbana-Champaign), KEONWOOK KANG*(Yonsei Univ.)

P7-6

보론 함유 스테인리스강 전자빔용접부의 미세조직 및 부식 특성에 용접 후열처리가 미치는 영향

김중훈(한국생산기술연구원, 울산과학기술원), 남희일(한국생산기술연구원, 부산대학교), 최재훈(동아대학교), 강인지, 김형찬, 김병준(한국생산기술연구원), 박성수*(울산과학기술원), 김병구*(한국생산기술연구원)

P7-7

Monte-Carlo-Informed Molecular Dynamics Simulations of Neutron Irradiation Damage and Defect Evolution in Tungsten

Jungjin Cho, Younggak Shin, Hyunggyu Lee, Keonwook Kang*(Yonsei Univ.)

P7-8

Ti 첨가가 냉간압연 및 어닐링한 CrMnFeCoNi 고엔트로피 합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향

나찬수, 장성혁, 박성현, 정재길*(전북대학교)

P7-9

Development of Ni-Based Cladding Materials for Corrosion Resistance in MSRs: Microstructure and Tensile Properties

GyunTae Kim(Korea Atomic Energy Research Institute, Hanyang Univ), SangTae Kim(Hanyang Univ), Jaeseong An(Korea Atomic Energy Research Institute, Chungnam Univ), Jungmin Kim(Korea Atomic Energy Research Institute, University of Science & Technology), Daejong Kim, Chaewon Kim*(Korea Atomic Energy Research Institute)

P7-10

상용 텅스텐의 온도에 따른 기계적 특성과 파괴거동의 상관관계 평가

조예진, 김대식, 김태균, 김주현, 김성희, 노상훈*(국립부경대학교)

P7-11

결정소성 유한요소법(CPFEM) 기반 텅스텐(W) 대면재 나노압입 해석 매개변수 민감도 분석

안동현*, 진형하(한국원자력연구원)

P7-12

An investigation of tensile deformation and Portevin-Le-Chatelier (PLC) band of Nitronic 50 at high temperature

Min-Su Lee, Sung-Min Park, Jun Won Yoon(한국생산기술연구원), Seok Su Sohn, Dong Hoe Kim(고려대학교), Chang-Soo Park*(한국생산기술연구원)

P7-13

환형 금속연료심 제조를 위한 주조장치 및 몰드 설계 평가

박상규*, 안정수, 여승환(한국원자력연구원)

P7-14

지르코늄 합금 산화막 결정상의 현상학적 고찰을 통한 산화막 성장기구 해석

안효진, 정양일*, 김희원, 안양덕, 장명진(한국원자력연구원(KAERI))

P7-15

단일구조 사용후핵연료 처분용기 소재의 부식특성 평가

김가영*, 우정현, 장준혁, 박선영(한국원자력연구원)

P7-16

옥살레이트 함유 방사성 슬러지 폐기물의 열분해 안정화-시멘트 고형화 연계 특성 평가

장준혁*(한국원자력연구원), 진종명(한국원자력연구원, 서울대학교), 이근영, 손성준(한국원자력연구원)

P7-17

용융염 원자로 구조재용 Ni 합금의 고온 연성에 미치는 화학조성의 영향

윤지현*, 임상엽(한국원자력연구원), 안재성(충남대학교), 김정민(과학기술대학원대학교), 김채원, 김대종(한국원자력연구원)

P7-18

Development of Laser-Cladded 316 Stainless Steel for Molten Chloride Salt Nuclear Reactor Applications

Jungmin Lee, Hwasung Yeom*(POSTECH)

P7-19

원자로용기 노심대 적용을 위한 고강도 SA508 Gr.3 Cl.2 저합금강 적용요건 및 특성 평가

김민철*, 현세미, 권준엽, 최권재, 홍석민, 이봉상(한국원자력연구원)

P7-20

i-SMR 무붕산 LiOH/KOH 환경에서 핵연료 피복관 재료의 부식 거동

백시은, 조수용(한국원자력연구원, 충남대 에너지과학기술대학원), 고대균, 이충용(한전원자력연료), 심희상*(한국원자력연구원)

P7-21

I-SMR 무붕산 수화학 조건에 따른 피복관 재질별 CRUD 부착 특성 연구

조수용, 백시은(한국원자력연구원, 충남대학교), 고대균, 이충용(한전원자력연료), 안동현, 심희상*(한국원자력연구원)

P7-22

TRISO 연료입자 SiC 피복층 결함 분석 시스템

안정수*, 김재준, 김응선(한국원자력연구원)

P7-23

장기 Dry Layup 환경에서 원전 복수기 부식생성물의 특성 및 철 산화물 변화 분석

임상엽*, 전순혁, 하성준(한국원자력연구원)

P7-24

Spectrum-Dependent Neutron Attenuation Characteristics of Boron-Containing Neutron Absorber Materials

Youngju Kim*, Wankchuk Woo, Jongyul Kim, Tae Uk Kang, Hobyung Chae, Myung-Kook Moon(Korea Atomic Energy Research Institute)

P7-25

핵융합로 디버터용 W/Cu/CuCrZr 소재 및 접합부의 초기 미세조직 특성 분석

임상엽*, 진형하, 강석훈, 권준현, 안동현, 박선영, 이동원(한국원자력연구원)

P8 : 가공-용접 및 접합

Room 1층 전시홀, 10월 28일(수)

P8-1

FSP를 통한 듀플렉스 스테인리스강 전자빔 용접부의 CISCC 저항성 향상

이재훈, 백종민, 이아름(국립창원대학교), 하종문(두산에너빌리티), 홍현욱*(국립창원대학교)

P8-2

Cu 기판의 표면 조도 정량화에 따른 Ag 소결 접합층의 기계적 특성 평가

황승환, 현승균*(인하대학교), 김근수(호서대학교), 백정연, 이수현(인하대학교)

P8-3

AA6061-T6 판재의 마찰교반용접 시 열입량이 접합부의 기계적 특성에 미치는 영향

윤영식, 이광진*(한국생산기술연구원)

P8-4

Zr-Ti계 저융점 비정질 삽입재를 이용한 Ti의 천이액상 확산접합 및 계면반응

김태엽, 김동우, 노주림, 이진규*(국립공주대학교)

P8-5

고강도 알루미늄 합금 마찰교반접합(FSW) 접합부의 미세조직 및 기계적 특성 평가

김한중, 김경일*, 김문조, 김동응, 배장현, 김석진(한국생산기술연구원)

P8-6

Interfacial and Mechanical Characteristics of Cold-Sprayed Stainless Steel/Aluminum Dissimilar Joints

Minjune Park, Hwasung Yeom*, Jinwook Choi, Ganghyeon Bae, Doowon Jung(POSTECH)

P8-7

방열부품 적용을 위한 무산소동의 확산접합 및 접합특성 평가

이동혁, 권희정, 김태균, 김대식, 노상훈*(국립부경대학교)

P8-8

Lotus Cu를 적용한 Cu-Sn TLP 접합부의 미세조직 및 접합 특성

이수현(인하대학교), 김근수(호서대학교), 현승균*(인하대학교)

P8-9

단조재-적층제조재 17-4PH 스테인리스강 이종 용접부의 열영향부 석출 거동 및 후열처리 최적화

황동현, 주하연, 김종훈(국립창원대학교), 이지원(두산에너빌리티 AM개발팀), 홍현욱*(국립창원대학교)

P8-10

빔 와블링 진폭 제어가 Al/Cu 이종 레이저 용접부의 미세조직 및 피로수명에 미치는 영향

윤성민, 유채은(부산대학교), 김용(고등기술연구원), 이제인*(부산대학교)

P8-11

Ti 브레이징 접합부의 계면 반응 및 기계적 특성에 미치는 표면 거칠기의 영향

김동우, 노주림, 이윤서, 이진규*(국립공주대학교)

P8-12

GMAW로 용접된 HY-60강의 응력별 피로시험편의 파면 및 미세조직 분석

김현일, 최재성(동의대학교 신소재공학과, BB21plus), 이상필, 이진경(동의대학교 기계공학과), 배동수(동의대학교 신소재공학과), 조일국*(동의대학교 신소재공학과, BB21plus)

P8-13

Grain Refinement and Oxidation Reduction in the Cladding-Layer Weld of Ti Clad Carbon Steel Material Using Dynamic Wire Feed TIG (DWF-TIG)

Jisu Kim, 이희근(Research Institute of Medium&small Shipbuilding (RIMS)), 유경훈(Wooyang HC), 김성웅(SeAH Steel), 안현준*(Research Institute of Medium&small Shipbuilding (RIMS))

P8-14

오스테나이트계 고용강화형 내열합금의 아크용접 공정에 따른 다층용접부의 미세조직 변화

오정민(국립부경대학교), 이윤상(두산에너빌리티), 천은준*(국립부경대학교)

P8-15

고온용 니켈기 합금 다층 용접부의 고온균열 거동 정량적 평가

김희은, 천은준*(국립부경대학교), 정수경(고려용접봉), 이윤상(두산에너빌리티)

P9 : 알루미늄

Room 1층 전시홀, 10월 28일(수)

P9-1

기계학습을 통해 제안된 Al-Zn-Mg-Cu합금의 시효처리에 따른 기계적특성 변화

이의재, 어광준*(한국재료연구원, 과학기술연합대학원대학)

P9-2

Mechanical and Electrical Properties of Al Alloy Wire According to Multi-Pass Drawing Process

Hyeon-jun Heo, Gi-Hyun Lim, Hyunkyoo Cho, Seong-Hee Lee*(Mokpo National Univ.)

P9-3

Al-0.3Fe-(Ce, Y, Zr) 합금의 온도에 따른 전기적 · 기계적 특성 변화 및 미세조직학적 해석

윤연희(한국재료연구원, 한양대학교), 이동윤(한국재료연구원), 김형준(한국재료연구원, 부산대학교), 안지혁, 오영석, 이윤수*(한국재료연구원), 장재일*(한양대학교)

P9-4

균질화 열처리 조건에 따른 AA6008 합금의 고온 비틀림 변형 거동 및 미세조직 변화

강신욱(국립공주대학교), 김효섭, 김동응, 한철웅, 김양후(한국생산기술연구원), 이지운*(국립공주대학교)

P9-5

지연 퀜칭시킨 A356 합금에서 예비 시효가 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향

윤영준(한국재료연구원, 부산대학교), 이정무, 이윤호, 어광준, 조영희(한국재료연구원), 강남현(부산대학교), 손현우*(한국재료연구원)

P9-6

Effect of Mn and Borax Complex Addition on Fe Removal and Refining Characteristics of ADC12 Casting Aluminum Alloy

ByeongKwon LEE, EunChan Ko(KITECH, Chonnam national university), YongHo Kim, HyoSang Yoo, HyeonTaek Son*(KITECH), TaeHoon Kim(Chonnam national university)

P9-7

$Al_{50}Mg_{30}Si_{10}Cu_5Zn_5$ 합금의 조대한 이차상과 나노 석출물 제어

전정민, 박성현(전북대학교), 신은주(한국원자력연구원), 정재길*(전북대학교)

P9-8

Microstructure and Mechanical Properties of AA6061 Sheets Processed by Four-Layer Stack Cold Roll-Bonding and Conventional Rolling

Gi-Hyun Lim, Hyeon-jun Heo, Handong Cho, Seong-Hee Lee*(Mokpo National Univ.)

P9-9

Microstructure and Mechanical Properties of Cold Roll-Bonded Layered Aluminum Sheets after Heat Treatment

Hyeon-jun Heo, Gi-Hyun Lim, Seong-Hee Lee*(Mokpo National Univ.)

P9-10

잔류 Mg의 S′상 석출을 통한 고온용 6xxx 압출재의 열안정성-강도-전도도 상충 특성 개선

김태연(한국재료연구원, 부산대학교), 이윤호, 이상익(한국재료연구원), 강남현(부산대학교), 어광준, 손현우*(한국재료연구원)

P9-11

브레이징 온도와 희토류 첨가에 따른 알루미늄 클래드재의 접합 특성, 미세조직 및 기계적 특성 변화

고은찬*, 이병권(한국생산기술연구원, 전남대학교), 유효상, 김용호, 손현택*(한국생산기술연구원), 김태훈(전남대학교)

P9-12

Thermal Degradation and Interfacial Debonding Behavior of Resin-Bonded Permanent Magnets in an End-of-Life Traction Rotor

Ui Hyun Baek, HoNam Lim, Cheo Jin Jung, HongJun Chae*(Institute for Advanced Engineering (IAE))

P9-13

6000계 알루미늄 칩 스크랩 고상 재활용 압출재의 부식 메커니즘 분석

변지우, 정재윤, 최진주, 이병덕*(고등기술연구원)

P9-14

냉각속도 및 인공시효 온도에 따른 Al 6110A 합금의 시효거동 및 물성 변화

정지석, 손현우*(한국재료연구원)

P9-15

해저케이블 적용을 위한 재생 알루미늄 합금의 기계적 및 전기적 특성 평가

양원석*, 김창근(대한전선(주)), 김선기((주)나이스엘엠에스), 오민철(고등기술연구원), 신동훈(대한전선(주))

P9-16

고강도 알루미늄의 미세조직과 마찰교반용접 특성

김현(한국공학대학교), 최효남, 신재혁(한국자동차연구원), 최정원(류코쿠대학교), 이승준*(한국공학대학교)

P9-17

반응고 및 액상 A356 용탕 환경에서 표면처리에 따른 금형강의 용손 거동 평가

하원*, 곽종민, 김덕, 김명균(포항산업과학연구원)

P9-18

Real-time Observation of Grain Refinement in HMR-treated Silafont-36 by Synchrotron X-ray Radiography

Go Eun Kim, Jae Kwon Kim, Eun Soo Park*(Seoul National University)

P9-19

압출용 Al-Zn-Mg 합금의 열처리 조건에 따른 기계적 특성 및 전기전도도 변화

양현석, 정우철, 최광수(고등기술연구원), 서창환(알루스(주)), 공만식*(고등기술연구원)

P9-20

연속주조로 제조된 A6008 합금의 균질화 거동에 미치는 용탕 초음파 처리 및 승온 조건의 영향

배병진*(한국생산기술연구원, 인하대학교), 이영기, 송람, 조훈(한국생산기술연구원), 현승균(인하대학교)

P9-21

재활용 A356 알루미늄 합금의 실시간 응고 데이터 기반 미세조직 및 결함 형성 메커니즘 분석

조우빈, 조원준, 최우솔, 임민혁(경북대학교), 이명호(현대자동차), 곽호재, 최선호(포항가속기연구소), 한지훈(다목적방사광가속기구축사업단), 한인성*(경북대학교)

P9-22

Al-Mg 이원계 합금의 Mg 함량이 기계적 특성 및 부식 거동에 미치는 영향

김대영, 권교민, 김동규, 한효주, 김세훈*(한국자동차연구원)

P9-23

스크랩 함량에 따른 자동차용 6N01 알루미늄 합금 연속주조 빌렛의 미세조직 및 기계적 특성

신병수*, 최진주, 이병덕(고등기술연구원)

P9-24

금속복합소재 적용 Al-Si 합금 다이캐스팅 공정 조건 도출 평가

최승규(한국자동차연구원, 전북대학교), 빙현식, 김진평*(한국자동차연구원)

P9-25

Enhancement of Electrical Conductivity in A1070 Alloy via Reduction of Fe, Ti, and Other Impurities for Compliance with Global Regulations

Yongho Kim*, Hyosang Yoo, Byeongkwon Lee, Eunchan Ko, Hyeontaek Son(KITECH)

P9-26

수계 세정 전처리에 따른 6000계 알루미늄 가공칩 스크랩 고상 재활용 압출재의 불순물 혼입 및 기계적 특성 거동

최진주, 정재윤, 변지우, 신병수, 이병덕*(고등기술연구원)

P9-27

Al-Si계 알루미늄 합금의 저압주조 조건 도출 평가

방현식, 최승규, 김진평*(한국자동차연구원)

P9-28

6000계 알루미늄 칩 스크랩 고상 재활용 압출재의 시효 온도별 인공시효 거동 및 peak aging 조건 도출

정재윤, 최진주, 변지우, 이병덕*(고등기술연구원)

P9-29

Drawing-Induced Microstructural and Mechanical Property Changes in Monolithic and Clad Aluminum Tubes for Heat Exchanger Application

HyoSang Yoo*, YongHo Kim, ByeongKwon Lee, EunChan Ko, CheolWoo Kim, HyeonTaek Son(Korea Institute of Industrial Technology)

P9-30

Effect of Retrogression and Re-aging (RRA) on the Mechanical Properties and Corrosion Resistance of a Newly Designed High-Solute Al-Mg-Zn-(Cu) Alloy

Kim Dong-Kyu, Kwon Kyo-Min, Kim Dae-Young, Shin Jae-Hyuck, Kim Jin-Pyeong, Kim Sehoon, Jung Young-Kil*(Korea Automotive Technology Institute (KATECH))

P9-31

혼합 EOL 알루미늄 스크랩 기반 재활용재의 조성 및 물성 평가

한효주, 권교민, 김대영, 김동규, 김세훈*(한국자동차연구원)

P10 : 마그넷

Room 1층 전시홀, 10월 28일(수)

P10-1

Improvement of magnetic properties of Nd-Fe-B sintered magnets through grain boundary diffusion using Tb-La-Cu-Al

Dong Hyun Lee(DGIST, Kyungpook National Univ.), Seong Chan Kim, Hyeonjong Jeong, Ju-young Baek, Tae-Young Yun, Jong Tae Kim(DGIST), Donghwan Kim, Sang Hyub Lee(Star Group), Jong Wook Roh*(Kyungpook National Univ.), Dong Hwan Kim*, Jeongmin Kim*(DGIST)

P10-2

Effect of Cu Addition on Nanocrystallization and Core Loss of Fe-Based Amorphous Alloys Consolidated by Spark Plazma Sintering

seongjun kim, Seonghoon Yi*(Kyungpook National University)

P10-3

전류 유도 가열을 통한 소결 Nd-Fe-B 자석의 중희토류 확산

이상현, 박승일, 설채민, 이유진, 조성준, 김태훈*(전남대학교)

P10-4

Effect of Al Addition on Magnetic Properties and Oxidation Resistance of Fe-based Amorphous Alloy

Seungeui Hong, Pyuck-Pa Choi*(KAIST)

P10-5

Influence of Annealing Temperature and Heating Rate on Magnetic Properties of $Fe_{bal.}$-(Si, B, P, C)$_{7.67}$-$Cu_{1.00}$ (wt%) Amorphous Soft Magnetic Alloy

Jongil Lee, Seonghoon Yi*(Kyungpook National Univ.)

P10-6

Enhanced Magnetic Properties and Thermal Stability of Nd-Fe-B Magnets through Grain Boundary Diffusion of Dy-LRE-Zn-Cu Alloys

정현종(Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology), 이동현(Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology, Kyungpook National University), 하정우, 김성찬(Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology), 임범식(Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology, Kyungpook National University), 백주영, 윤태영, 김종태, 정석환(Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology), 김동환, 이상협(R&D Center, Star Group), Vitalii Galkin(Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology, Kyungpook National University), 김동환, 김정민*(Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology)

P10-7

Development and Soft Magnetic Properties of High-C Amorphous Alloys : Effect of Cu Content

Mingyo Jeong, Seonghoon Yi*(Kyungpook National Univ.)

P10-8

Sm-Co 자성분말의 제조 조건에 따른 분말 특성 평가

김현중, Madavali babu, Gangala Anil Kumar, 홍순직*(국립공주대학교)

P10-9

Suppression of Oxidation and Phase Decomposition in $Sm_2Fe_{17}N_3$ Powders via Low-Temperature High-Energy Ball Milling.

HyeSu Kim, Jaehyuk Kim, Ho-Jeong Kim, Kyungmi lee, Seong Min Choi, Wooyoung Lee*(Yonsei Univ.)



P11 : 적층제조 및 분말

Room 1층 전시홀, 10월 29일(목)

P11-1

직접용융증착법으로 제조된 Inconel 625 / Al2O3경사기능재의 단열 및 기계적 특성

유현용(경상국립대학교), 유진영(부산대학교), 김태현, 이진수(경남대학교), 안성열(포항공과대학교), 이태경(부산대학교), 김세윤(경남대학교), 김형섭(포항공과대학교), 김정기*(경상국립대학교)

P11-2

복합파우더 제조 방법에 따른 L-DED AlSi10Mg/TiC의 미세조직 및 기계적 물성 변화

김재형, 최윤석*, 이혜인(부산대학교)

P11-3

레이저 분말 베드 용융 공법으로 적층제조된 철계 준안정 고엔트로피 합금의 극저온 인장 거동

박하음(한국재료연구원, 고려대학교), 김연우(한국재료연구원), 이유나(부산대학교), 권현석(포항공과대학교), 장효선(한국재료연구원), 김형섭, 유지훈(포항공과대학교), 강남현(부산대학교), 손석수(고려대학교), 박정민(한국재료연구원, 고려대학교)

P11-4

AISI 4140 저합금강의 소결 조건에 따른 기공 특성 및 Cu 함침을 통한 물성 제어

김나영, 김경일*(한국생산기술연구원)

P11-5

LPBF로 제작한 Inconel 939의 표면조도 및 강화기구에 미치는 Micro-blasting media 형상의 영향

이서진, 고도열(한국생산기술연구원, 성균관대학교), 최민호(한국생산기술연구원, 서울대학교), 윤준원(한국생산기술연구원, 고려대학교), 이해진(한국생산기술연구원), 송승욱(성균관대학교), 이병수*(한국생산기술연구원)

P11-6

Sn 공급량 및 성장 온도에 따른 SnO_2나노와이어의 성장 거동

배주은, 이지운*, 유현우(국립공주대학교)

P11-7

압연 및 재적층이 Inconel625 직접에너지적층재의 미세조직변화와 피로수명에 미치는 영향

황건희, 이동규, 김현중(국립공주대학교), 전재열(한국생산기술연구원), 임민혁(고등기술연구원), 김종태, 한준희(한국생산기술연구원), 이지운*(국립공주대학교)

P11-8

LPBF로 제작한 Inconel 625의 고온산화거동에 미치는 표면처리의 영향

고도열, 이서진(한국생산기술연구원, 성균관대학교), 최민호(한국생산기술연구원, 서울대학교), 이해진(한국생산기술연구원), 송승욱(성균관대학교), 이병수*(한국생산기술연구원)

P11-9

Ti, Si 복합 첨가 L-PBF Al7075 합금의 석출 거동 제어를 위한 열처리 전략

장동민, 김수빈(인하대학교), 이마태(포항공과대학교), 김재황(한국생산기술연구원), 이병주(포항공과대학교), 이기안*(인하대학교)

P11-10

Nb-Si-Ti계 합금의 L-DED 미세조직 모사를 위한 표면 레이저 스캔 및 미세조직 분석

김예본, 김찬, 박민수, 조해주, 이욱진*(부산대학교)

P11-11

L-PBF 및 3D 프린팅 된 희생 패턴 기반 정밀주조 이중공정으로 제작된 Ni/Al 이종금속 격자구조

김찬, 이주영, 김태윤, 이욱진*(부산대학교)

P11-12

직접에너지적층-소성가공 복합공정에 따른 Inconel 625 합금의 재결정 거동 및 미세조직 변화

이동규*, 황건희, 김현중(국립공주대학교), 전재열(생산기술연구원), 임민혁(고등기술연구원), 김종태, 한준희(생산기술연구원), 이지운(국립공주대학교)

P11-13

Lithography-based Metal Manufacturing 기법으로 적층제조한 순수 Cu의 저온 충격 특성 및 미세조직

최정석, 홍민기(국립공주대학교), Gyorgy Harakaly(Incus GmbH), 이기준(국립금오공과대학교), 이지운*(국립공주대학교)

P11-14

DED로 제조된 316L 스테인리스강의 적층 방향에 따른 극저온 변형거동 분석

박정현, Muhammd Ishtiaq(경상국립대학교), 김영균(한국재료연구원), 강성규*(경상국립대학교)

P11-15

MicroCT 기반 Ti-6Al-4V 옥텟트러스 격자구조체의 열처리에 따른 변형 거동 분석

전찬혁, 차다은, 강성규*(경상국립대학교)

P11-16

DED 공정으로 제조된 SS316L/CoCrNi 이종 접합체의 계면 미세조직 및 국소 변형 메커니즘 분석

강태욱, 채호병, 우완측*(한국원자력연구원)

P11-17

Fabrication and characterization of refractory NbTaV complex concentrated alloy powder via ultrasonic atomization for additive manufacturing

Jinwoo Seok(Korea Institute of Industrial Technology, Kyung Hee University), Juree Jung, Jongtae Kim, JeSun On, Seul-Ki Han(Korea Institute of Industrial Technology), Bin Lee(Kyung Hee University), Junhee Han, Leeseung Kang*(Korea Institute of Industrial Technology)

P11-18

LPBF Co-Cr-Mo-N 합금의 초기 미세조직에 따른 열처리 후 미세조직 진화 및 기계적 특성 변화

김려현, 정다은, 곽종현(국민대학교), Zhou Zhenxing, Naoyuki Nomura(Tohoku univeristy), 성효경*(국민대학교)

P11-19

고출력 DED Ti-6242 합금의 제조 가능성 및 변형기구 고찰

한재연, 김준혁(국립창원대학교), 권영삼((주)쎄타텍), 박정효, 김규식, 김대웅(국방과학연구소), 홍현욱*(국립창원대학교)

P11-20

레이저 분말 베드 용융법으로 적층제조된 Ti-6Al-4V 합금의 상대밀도 및 결함 형성에 미치는 공정변수 영향에 대한 SHAP 기반 분석

윤지상(한국재료연구원, 국립부경대학교), 이승연(한국재료연구원), 박하음(한국재료연구원, 고려대학교), 김연우, 정재면, 유지훈(한국재료연구원), 박정민*(한국재료연구원, 고려대학교)

P11-21

DED 공정을 통해 제조된 MSR용 Ni계 초합금의 고온 기계적 특성 및 파단 거동 연구

이정림, 김기동, 송상우*(한국재료연구원)

P11-22

L-PBF로 제조된 Hastelloy X-Y_2O_3 합금의 미세구조 및 기계적 특성 연구

이주영, 정상희, 이빈*(경희대학교)

P11-23

Fe-Nb 첨가 및 ODS 강화가 DED 적층 Ti-6Al-4V 합금의 미세조직 및 기계적 이방성에 미치는 영향

이윤선*, 김다혜, 김건우, 곽륜호(한국생산기술연구원), 서기완(서울대학교)

P11-24

소수성 SiO_2 나노입자를 통한 저가형 HDH Ti의 L-PBF 적용 및 기계적 · 기능적 특성 평가

박상욱, 강태후, 이유진*, 이빈*(경희대학교)

P11-25

L-PBF CuCrZr 합금의 후열처리에 따른 미세조직과 기계적 · 전기적 특성

김수빈, 박준영, 이정림, 이윤주, 김승현, 송상우*(한국재료연구원)

P11-26

Effects of L-PBF Processing on the Proton-Irradiation Hardening of 304L Stainless Steel for SMR Applications

오지윤, 함준혁, 김지현*(Ulsan National Institute of Science and Technology)

P11-27

DED 실험 데이터와 기계학습을 이용한 적층제조용 알루미늄 합금 역설계

김도원, 전서연, 안성빈, 박수원, 송용욱, 최현주*(국민대학교)

P12 : 비철금속

Room 1층 전시홀, 10월 29일(목)

P12-1

마그네슘 전해제련의 전류 효율 향상을 위한 음극 소재별 젖음성 평가 및 AIMD 전산모사를 이용한 미세포그 억제 메커니즘 규명

이동희(충남대학교), 이종현*(충남대학교, 급속응고신소재연구소)

P12-2

Al-$CaMg_2$ 복합 환원제를 이용한 TiO_2 환원 시 입자 성장 및 산소 제어 메커니즘

임규석(충남대학교), Hayk Hacob Nersisyan(충남대학교 급속응고신소재연구소), 이종현*(충남대학교, 충남대학교 급속응고신소재연구소)

P12-3

반도체성 보론 나노와이어의 표면 · 계면 전도 메커니즘과 실리콘 음극 사이클 안정성 향상 연구

이효연(충남대학교), 네르시시안 하이크(급속응고신소재연구소), 이종현*(충남대학교, 급속응고신소재연구소)

P12-4

고상 연소 합성법으로 제조한 CaB□ 나노큐브의 전기화학적 수소 발생 특성 및 DFT 기반 반응 메커니즘 연구

정준모(충남대학교), 네르시시얀 하이크(충남대학교 급속응고신소재연구소), 이종현*(충남대학교, 충남대학교 급속응고신소재연구소)

P12-5

SUS304 도가니 기반 저비용 $Li_{13}Si_4$ 합성 공정 개발 및 반응 발열 특성 분석

주신형, 후엔쑤안비엣(충남대학교), 이종현*(충남대학교, 충남대학교 급속응고신소재연구소)

P12-6

Theoretical Operating Window for Direct Electrorefining of Metallic Lithium from NCM811 Black Powder: A First-Principles Study .

Nguyen Viet, Joo Sin-Hyong(충남대학교), Hayk Nersisyan(급속응고신소재연구소), Lee Jong-Hyeon*(충남대학교, 급속응고신소재연구소)

P12-7

Cu-6Ni-1.26Si 합금의 불연속 석출 거동 분석

김가은, 정이화(경상국립대학교), 김규낙(한국재료연구원), 최동인, 한흥남(서울대학교), 안지혁(한국재료연구원), 강성규*(경상국립대학교)

P12-8

생성형 AI 모델을 활용한 고엔트로피 탄화물 촉매 개발 및 CO_2 환원 반응 평가

이현주(충남대학교), 네르시시얀 하이크(급속응고신소재연구소), 이종현*(충남대학교)

P12-9

생성형 AI 기반 고엔트로피 가넷 역설계 및 LLZO/PEO 복합 전해질의 리튬 계면 안정성 연구

윤혜진(충남대학교), 네르시시얀 하이크(급속응고신소재연구소), 이종현*(충남대학교, 급속응고신소재연구소)

P12-10

중성염 전해질 전해제염 공정에서 발생하는 6가 크롬의 저감 방안

조민식, 박성현, 심영민 (충남대학교), Hayk Hacob Nersisyan(급속응고신소재연구소), 이종현*(충남대학교, 급속응고신소재연구소)

P12-11

전산모사를 통한 U자형 배관 전해제염 공정에서의 anode effect 발생 기구 규명

박성현, 정준모, 조민식(충남대학교), 네르시시얀 하이크(급속응고신소재연구소), 이종현*(충남대학교, 급속응고신소재연구소)

P12-12

Experimental Investigation of Deoxidation Equilibrium and Kinetics of Al, Ti and Cr in Liquid Nickel

Seung-Ho Lee, Hyun-Jae Kim(Pohang University of Science and Technology), Yoon Seok Ko(Agency for Defense Development), Youn-Bae Kang*(Pohang University of Science and Technology)

P12-13

Cold spray 가스 압축 온도 및 후열처리 조건이 구리-알루미늄 접합부의 금속간화합물 성장과 접합강도에 미치는 영향

안지영(경북대학교, 한국재료연구원), 김규낙(한국재료연구원), 조현욱(SHKOREA), 민경문(한국재료연구원), 박성혁*(경북대학교), 안지혁*(한국재료연구원)

P12-14

Cu-Zn-Si 합금 압출재의 열처리에 따른 절삭성 및 직진도 변화

김규낙(경상국립대학교, 한국재료연구원), 민경문, 안지영, 김형준(한국재료연구원), 이진수((주) 대창), 강성규*(경상국립대학교), 안지혁*(한국재료연구원)

P12-15

냉간 압연에 의한 사전 변형이 Cu-Ni-Si 합금의 불연속 석출 거동에 미치는 영향

장정아, 김가은(경상국립대학교), 김규낙(경상국립대학교, 한국재료연구원), 안지혁(한국재료연구원), 강성규*(경상국립대학교)

P12-16

팔라듐 합금 스크랩의 고순도 재활용을 위한 습 · 건식 연계 전처리 공정 연구

허성규, 소윤지, 김호병, 최상훈*(고등기술연구원)

P12-17

수소환원에 따른 아연소광 내 Pb의 선택적 환원 거동

정우철, 장대환, 문정식, 정항철*(고등기술연구원)

P12-18

스크랩 부산물 내 니켈 화합물 활용 건식 환원 공정 변수에 따른 금속 니켈 회수 공정 연구

김호병, 소윤지, 허성규, 최상훈*(고등기술연구원)

P12-19

Temperature-Dependent Deformation Behavior and Mechanical Properties of $Cu_{83}Ga_{17}$ Alloy with Low Stacking Fault Energy

Sung Hwan Hong*, Gaeun Jo, Hae Jin Park(Sejong University), Jürgen Eckert(Montanuniversität Leoben), Ki Buem Kim(Sejong University)

P12-20

TiN첨가에 따른 Ti-0.3Mo-0.8Ni 합금의 미세조직 및 기계적 특성 평가

김송이*, 김휘준(한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소)

P12-21

Invar 합금 내 MgO계 개재물 제어를 위한 Mg 투입 조건 및 변화 양상에 관한 연구

김두연, 강영조*(동아대학교)

P12-22

Stress Corrosion Cracking Susceptibility and Passive-Film Evolution of Candidate Copper Canister Alloys in Sulfate-Rich Simulated Groundwater at 70°C

Yunju Lee, Seunghyun Kim, Sinbeom Go, Sangwoo Song*(Korea Institute of Materials Science)

P12-23

Microstructure and Corrosion Behavior of Cu-Based Joining Materials Recycled from Nuclear Decommissioning Metal Waste

dongjun Shin*, Hwan Seo Park(Korea Atomic Energy Research Institute)

P12-24

Pd-Ag-Cu 합금의 미세조직과 기계적 전기적 물성에 미치는 용체화 냉각속도의 영향

최민호(한국생산기술연구원, 서울대학교), 안정환(한국생산기술연구원, 연세대학교), 김상권, 송람, 조훈(지능화뿌리기술연구소), 박형진, 설재복(포항공과대학교), 이석연, 문정탁(MKE 전자), 이병수*(한국생산기술연구원)

P12-25

알루미늄 다이캐스팅 합금 및 열간공구강에 따른 용손 거동

최봉재*(인하공업전문대학)

P13 : 철강A-제선, 제강, 환경, 에너지

Room 1층 전시홀, 10월 29일(목)

P13-1

폐플라스틱 기반 가탄재의 조성 변화에 따른 슬래그 포밍 반응 거동 분석

안효주, 이아영, 박노근*(영남대학교)

P13-2

9% Ni강의 4.2 K 초극저온 기계적 특성

천재용(한국재료연구원, 충남대학교), 윤성준(한국재료연구원, 고려대학교), 정덕현(충남대학교), 장태진, 나영상*, 김영균*(한국재료연구원)

P13-3

Thermodynamic Assessment of Liquid Ti-Al-V Ternary System Using Modified Quasichemical Model

Hosea Simanjuntak, Min-Kyu Paek*(Clausthal University of Technology)

P13-4

Ladle Slag의 CAM Flux 첨가에 따른 API강의 탈황거동

차은환, 정용석*(한국공학대학교)

P13-5

복합산화방지제 첨가에 따른 MgO-C 내화물의 압축강도 특성 평가

이지혁, 정용석*(한국공학대학교)

P13-6

그래프 신경망(GNN)을 활용한 호퍼 내 입자 거동의 예측 가속화

권지선, 양현진*(인하대학교)

P13-7

AOD 더스트 첨가에 따른 스테인리스강 더스트의 염기도 변화 및 Cr 환원 거동

박종형, 김선중*(조선대학교)

P13-8

전기용융로(ESF) 플라즈마 아크의 계산 가속화를 위한 차수축소모델(ROM) 개발

김준엽, 양현진*(인하대학교)

P13-9

MgO_{Sat}-SiO_2-FeO계 슬래그 내 Ni용해도에 미치는 슬래그 조성의 영향

김동우, 허정호*(한국지질자원연구원(KIGAM), 과학기술연합대학원대학교(UST))

P13-10

산업부산물 기반의 제강용 Flux 조성 설계 및 개재물 정련 거동 평가

오혜민, 김인아, 김용찬*(포항산업과학연구원), 정은진*(한국산업기술기획평가원)

P13-11

철강제품 EPD 기반 탄소발자국 데이터의 비교 가능성에 관한 연구

이승희, 심아령, 강신곤*(동아대학교)

P13-12

제강분진의 선택적 휘발을 통한 Zn 회수 및 중금속의 입도별 분포 특성

임기찬(인하대학교), 신동주(한국지질자원연구원), 김영재*(인하대학교)

P13-13

철광석 브리켓의 특성 및 고로 철원 활용성 검토

문지성, 강영조*(동아대학교 신소재공학과)

P13-14

배가스 온도 영역에서 CO 가스 분압에 따른 Biomass-DRI 복합 펠렛의 반응 및 잔류 탄소 거동 연구

김윤하, 김선중*(조선대학교)

P13-15

Effects of Al Addition on Deoxidation and Ti Composition Control During Atmospheric Melting of Maraging Steel

Jiyeon Kim(Korea Institute of Industrial Technology, Chonnam National University), Jiwon Seung(Korea Institute of Industrial Technology, Jeonbuk National University), Jaehong Shin(Korea National Institute for Rare Metals, Korea Institute of Industrial Technology), Jaeyeol Jeon*(Korea Institute of Industrial Technology)

P13-16

고질소 스테인리스강과 CaF_2-CaO-Al_2O_3-MgO계 ESR 슬래그 반응에서 Si과 Al 함량 변화에 관한 열역학적 고찰

김윤진, Yao Su(한양대학교), 정재석(두산에너빌리티), 박주현*(한양대학교)

P13-17

고알칼리 소결 더스트의 자원화 기술 개발

박종인*, 임형묵, 조문경(포스코)

P13-18

Effect of Carbon and Flux on Melting Behavior of H_2-DRI Coupled with Technique for Determination of Collapse Temperature

Jooho Park, Won-Bum Park, Youn-Bae Kang(POSTECH), Sang-Dong Lee, Joonhyun Nam(Technical Research Laboratories, POSCO), SangHo Yi*(POSTECH)

P14 : 철강B-압연, 강종개발, 후처리

Room 1층 전시홀, 10월 29일(목)

P14-1

Batch annealing공정이 3Mn Q&P강의 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향

김규헌, 임용수(한양대학교), 김지훈(부산대학교), 김진경*(한양대학교)

P14-2

Cu 첨가가 3Mn Q&P강의 미세조직에 미치는 영향 분석

문태영, 김규헌, 김진경*(한양대학교)

P14-3

Fe-21Cr-5.8Al 합금의 Mo 함량이 상 형성 거동 및 고온 압축 특성에 미치는 영향

권제영(한국생산기술연구원, 고려대학교), 신승우(한국생산기술연구원), 고원석*(고려대학교), 박형기*(한국생산기술연구원)

P14-4

Microstructure and Mechanical Properties of UNS S45000 Precipitation-Hardening Stainless Steel Compared with UNS S17400 and S13800

Tae Hyeon Hwang, Gang Ho Lee(KITECH, Pukyong Univ.), Gwang Joo Jang, Byung Koo Kim(KITECH), Sang Hoon Noh(Pukyong Univ.), Byung Jun Kim*(KITECH)

P14-5

Al 첨가에 따른 As-Quenched AISI 4340 강의 밀도 저감 및 인장 변형 거동 분석

박주현, 이승희, 심아령(동아대학교), 김은아(현대제철), 강신곤*(동아대학교)

P14-6

해상풍력용 환경 특화 볼트강의 미세조직과 수소취성의 상관관계

최수환, 오동규(서울과학기술대학교), 이승민, 정재훈(세아베스틸 기술연구소), 황병철*(서울과학기술대학교)

P14-7

SA372 강의 열처리 조건에 따른 기계적 특성 및 미세조직 변화

박종건, 이정찬(한국생산기술연구원, 고려대학교), 김동회*(고려대학교), 이민수, 박창수*(한국생산기술연구원)

P14-8

Cr 함량에 따른 API 5CT OCTG강의 HIC 및 수소취성 특성

성효진, 정민섭(서울과학기술대학교), 안규백(일진제강), 서환수(세아베스틸 기술연구소), 황병철*(서울과학기술대학교)

P14-9

Effect of Annealing on Microstructure and Mechanical Properties of Nb– and V–Microalloyed High–Mn Austenitic Steels

Gang Ho Lee, Tae Hyeon Hwang(Korea Institute of Industrial Technology, Pukyong National University), Byoungkoo Kim(Korea Institute of Industrial Technology), GwangJoo Jang(Korea Institute of Industrial Technology, Pukyong National University), Sanghoon Noh(Pukyong National University), Byung Jun Kim*(Korea Institute of Industrial Technology)

P14-10

초고경도 마르텐사이트강의 미세조직 및 저온 충격특성에 대한 Nb의 영향

박건우(울산과학기술원), 김용우, 장우길, 고성웅(포스코 기술연구원), 박성수(울산과학기술원), 전종배*(동아대학교)

P14-11

강종 및 템퍼링 온도에 따른 상용 Cr–Mo계 저합금강의 수소취성 비교

김철민(서울과학기술대학교, 세아베스틸 기술연구소), 김상규, 황병철*(서울과학기술대학교)

P14-12

Hydrogen–Assisted Deformation and Fracture Behavior of Hot–Forged High–Mn Austenitic Steel at Room and Cryogenic Temperatures

GwangJoo Jang, Tae Hyeon Hwang, Gang Ho Lee(Korea Institute of Industrial Technology, Pukyong National University), Byoungkoo Kim(Korea Institute of Industrial Technology), Sanghoon Noh(Pukyong National University), Byung Jun Kim*(Korea Institute of Industrial Technology)

P15 : 가공-열처리

Room 1층 전시홀, 10월 29일(목)

P15-1

상 및 미세조직 제어에 따른 Cu–Al 합금의 광학적 · 기계적 특성 변화

김현영, 조가은, 장성문, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범*(세종대학교)

P15-2 **Canceled**

V 함량에 따른 MC 탄화물 특성 변화가 고속도강의 뜨임연화거동에 미치는 영향

최재영, 이준오, 박노근*(영남대학교)

P15-3

DED로 제조된 Inconel 625 합금의 열처리에 따른 미세조직 진화 및 강화 거동

김준혁, 한재연(국립창원대학교), 권영삼(CetaTech), 박정효, 김대웅, 김규식(국방과학연구소 극한금속재료팀), 홍현욱*(국립창원대학교)

P15-4

열유동 해석 및 TTT 곡선을 활용한 볼트 소재의 열처리 조건 최적화

강규병(한국생산기술연구원, 고려대학교), 최병철, 권은성, 강동훈(한국생산기술연구원), 김동회*(고려대학교), 나태욱*(한국생산기술연구원)

P15-5

자기냉각 소재 La–Fe–Mn–Si 합금의 수소 취성 경도 국부 물성 평가

김지민, 배재한(한국재료연구원), 김민직(한국재료연구원, 포항공과대학교), 양우석, 정국채, 이광석*, 신다슬*(한국재료연구원)

P15-6

AISI 316L 저온진공침탄에서 질소 캐리어 가스 적용을 통한 수소 역할 연구

김현진(한국생산기술연구원, 부산대학교), 김준호*(한국생산기술연구원)

P15-7

Construction of thermal–stability maps for nanocrystalline metals with U–shaped dependence of stability on grain size

Hee–Tae Jeong*, Woo Jin Kim*(Hongik Univ.)

P15-8

열처리에 따른 SUS316L 마이크로 금속섬유의 미세조직 변화에 대한 EBSD 분석

최상구, 백지웅, 김권후*(국립부경대학교)

P15-9

열처리에 따른 Hastelloy C22 마이크로 금속 섬유의 결정립 및 결정립계 특성 분석

박정빈, 장성모, 김권후*(국립부경대학교)

P15-10

발전소용 오스테나이트 내식강의 고온 가열시 미세조직 변화

조용빈(국립한밭대학교), 김진하, 이학민((주)피레타), 김정민*(국립한밭대학교)

P15-11

불순물 Fe가 포함된 Al–Mg–Si계 합금의 어닐링 조직특성

조용빈(국립한밭대학교), 신경식((주)세림티앤디), 김정민*(국립한밭대학교)

P15-12

Effects of thermal processing parameters on the hardness–toughness trade–off in cemented carbide with high–entropy alloy binders

Jeong–Han Lee *(Korea Institute of Industrial Technology)

P15-13

가시광–적외선 광학용 Multispectral 황화아연(MS–ZnS) 소재의 제작 공정 및 특성 평가

김성윤, 이영모, 서석훈, 서지연, 박정철, 우시관*(그린광학)

P16 : 이차전지 원료소재

Room 1층 전시홀, 10월 29일(목)

P16-1

Si 첨가에 따른 Nickel Pig Iron(NPI)의 산화 거동 및 미세조직 변화

차은빈(한국생산기술연구원, 고려대학교), 서보성(한국생산기술연구원), 김동회(고려대학교), 박광석*(한국생산기술연구원)

P16-2

Microstructure–Resolved Multiphysics Analysis of Porosity–Dependent SiO□ Optimization in Composite Anodes

YEJIN KANG, Seungsoo Jang, Hyunjin Kim, Sunghyun Park, Kang Taek Lee*(KAIST)

P16-3

Sb–Induced Lewis Acid Sites for Promoting Na^+ Transport in Composite Solid–State Electrolytes

JINGYA WANG, DONGYUN LEE*(Pusan National University)

P16-4

Comparison of Oxalate and Conventional MHP Routes for Nickel and Cobalt Recovery from Saprolitic Laterite Leachate

Heewon Kang, Jeongwoo Kim, Jaehoon Lee, Dagyeong Lee, Hyunjung Kim*(Hanyang Univ.)

P16-5

Feasibility of Direct Atmospheric Acid Leaching of Coarse Nickel Laterite Ores without Additional Comminution

Jeongwoo Kim, Heewon Kang, Jaehoon Lee(Hanyang Univ.), Sowon Choi(POSCO N.EX.T Hub), Hyunjung Kim*(Hanyang Univ.)

P16-6

Investigation of Particle–Size–Dependent Fe–Ni Alloying Behavior During Beneficiation of Nickel Laterite Ore

Kwanwoo Jeon, Dohyeon Roh, Heewon Kang, Hyunjung Kim*(Hanyang Univ.)

P16-7

알칼리 처리 기반 사프로라이트 수소환원에서 니켈의 선택적 환원 연구

김민희, 이병필, 서민석*, 우강주(포스코홀딩스)

P16-8

양극활물질 제조공정 중에서 발생한 스크랩에서 회수된 NiO의 RF 플라즈마 환원을 통한 Ni 나노입자 합성 거동

한철웅, 김효섭*(한국생산기술연구원)

P16-9

Quantitative Analysis of Metallization and Sulfidation Behavior of Saprolite Ore Using Rietveld Refinement

Jeonghwan Kim, Heeju kim, Sengyeon Lee, Il Sohn*(Yonsei University)

P17 : 재료강도

Room 1층 전시홀, 10월 29일(목)

P17-1

비정상 결정립 성장을 이용한 (111) 단결정 구리 박막의 형성

김수정, 곽지윤, 심영주, 김동현, 김주영*(UNIST)

P17-2

AA6061 합금 마이크로필라의 크기 및 변형속도에 따른 미세 변형거동

백인섭(경상국립대학교), 안지혁(한국재료연구원), 이근호(국방과학연구소), 강성규*(경상국립대학교)

P17-3

Co–free $L1_2$ 석출강화형 중엔트로피 합금의 초극저온 기계적 특성

윤성준(한국재료연구원, 고려대학교), 손석수(고려대학교), 장태진, 나영상*, 김영균*(한국재료연구원)

P17-4

미케노 발광형 디지털 이미지 상관 기법을 이용한 전고체 배터리 고체 전해질의 열화 및 계면균열 가시화 연구

윤지용, 김지식*, 이광호(경북대학교)

P17-5

원자로 압력용기용 SA508 Gr.3 Cl.2 저합금강의 합금원소 첨가에 따른 미세조직 및 기계적 특성 평가

김송현(경북대학교, 한국원자력연구원), 현세미, 홍석민*, 김민철(한국원자력연구원), 박성혁(경북대학교)

P17-6

고망간강의 초극저온 인장 및 충격 특성

이정우(한국재료연구원, 동아대학교), 윤성준(한국재료연구원, 고려대학교), 전종배(동아대학교), 장태진, 나영상*, 김영균*(한국재료연구원)

P17-7

열처리 조건에 따른 Mar–M247 초내열합금의 γ′ 미세조직 및 기계적 특성 변화

이재훈, 한재연(국립창원대학교), 권혁주(한스코), 홍현욱*(국립창원대학교)

P17-8

Cu 및 Zr 첨가 A356 합금의 용체화 시간에 따른 피로 특성

이언진, 윤영준, 정창열*(동국대학교 WISE캠퍼스)

P17-9

열적 활성화 제어를 통한 경량 구조용 SLM Ti–6Al–4V의 물성 신뢰성 확보 전략

이아름, 한재연(국립창원대학교), 김치원(한국재료연구원), 이지원, 최용혁(두산에너빌리티), 홍현욱*(국립창원대학교)

P17-10

오스테나이트계 스테인리스강의 정적 변형 시효에 미치는 상 안정성과 전류 인가의 영향

권주민(성균관대학교), 김정웅(포항공과대학교), 조형준(Max Planck Institute for Sustainable Materials), 정경재*(성균관대학교)

P17-11

고강도 API 라인파이프강의 인장 및 충격, 수소취성 특성 비교

배영훈, 오동규, 황병철*(서울과학기술대학교)

P17-12

Mechanical Properties of NiCoFe Medium–Entropy Alloy–Coated 3D Glassy Carbon Architectures

Elif Nur ADALI, Isoo Jeon(Korea Advanced Insitute of Science and Technology (KAIST)), Kneev Sharma, Vishnu Nair, Jan Torgersen(Technical University of Munich (TUM)), Seung Min J. Han*(Korea Advanced Insitute of Science and Technology (KAIST))

P17-13

저합금강 다층용접부의 입열조건에 따른 HAZ 미세조직 및 기계적 특성

최동기*(서정대학교)

P17-14

해양구조용 H형강 용접부의 저주기 피로 거동과 국부 변형의 결정학적 분석

한재연, 박정현(국립창원대학교), 김재성(조선선재), 박형권, 이창훈(한국재료연구원), 정준호(현대제철), 홍현욱*(국립창원대학교)

P17-15

D2 공구강의 합금원소에 따른 미세조직 및 경도 변화 연구

김동규, 신상용*, 김정우, 박나현, 정세인, 박시형, 김동민, 김수현, 송호민(울산대학교)

P17-16

잠수함용 고강도강 모재 및 용접부의 폭파변형 특성 평가 및 미세조직 분석

김유섭*, 박시욱, 김용진, 송정규, 함진희, 양성호(국방과학연구소)

P17-17

핫셀 내 충격시험기를 이용한 S45C재료의 연성-취성 천이온도 분석

김태영*(한국원자력연구원)

P17-18

고탄소 공구강의 열처리 공정에 따른 미세조직 및 경도 변화 연구

박나현, 신상용*, 김정우, 김동규, 정세인, 박시형, 명재현(울산대학교)

P17-19

STR660 Fe-Ni계 초합금의 합금 조성 및 열처리에 따른 γ' 석출 거동과 변형기구

한재연, 황동현(국립창원대학교), 박대영, 신정호((주)세아창원특수강), 홍현욱*(국립창원대학교)

P17-20

이종소재 접합용 초음파 혼의 Dovetail 체결 방식 최적화를 위한 하중별 응력 및 안전율 경향성 분석

이영인((재)한국화학융합시험연구원), 신재오*(나이프플러스(주)), 전재혁((재)한국화학융합시험연구원)

P18 : 재료분석

Room 1층 전시홀, 10월 29일(목)

P18-1

금속 응고 · 열처리의 실시간 3차원 이미징을 위한 방사광 가속기용 고온 용해로 개발 및 검증

조원준(경북대학교), 한지훈(한국기초과학지원연구원), 최선호, 곽호재(포항가속기연구소), 한인성*(경북대학교)

P18-2

HRSG용 AFA 오스테나이트계 내열강에서 다양한 시효조건에 따른 미세 조직변화와 석출물의 성장 거동에 대한 연구

신선웅(국립부경대학교, 한국재료연구원), 박봉천(한국재료연구원), 장재훈(동아대학교), 김성대*(국립부경대학교), 박이호*(한국재료연구원)

P18-3

전자기 비파괴 평가를 활용한 1.5 GPa급 자동차용 초고장력 강판의 기계적 특성 상관관계 분석

어윤경, 박채연(서울과학기술대학교), 유성호, 유정현(아산), 변재원*(서울과학기술대학교)

P18-4

In-situ TEM Analysis of Ferro-rotational Order Switching in 1T-TaS_2

Huseung Lee, Hyobin Yoo*(Seoul National University)

P18-5

Nb 및 V 첨가에 따른 고망간강의 오스테나이트 결정립 성장 거동 모델링

김수환(한국재료연구원, 동아대학교), 박봉천(한국재료연구원), 장재훈, 이학성*(동아대학교), 박이호*(한국재료연구원)

P18-6

Real-Time Observation of Skyrmion Dynamics in Fe3GaTe2 under External Stimuli

Sejin An, Younghwan Shin(Seoul National Univ.), Beom Tak Kang, Jun Sung Kim(Pohang Univ. of Science and Technology), Hyobin Yoo*(Seoul National Univ.)

P18-7

Atomic-scale Characterization of Nanoscale Chemical Heterogeneity in Silicate Glasses Using Atom Probe Tomography

Chang-Gi Lee, Yeon Ha Jo, Se-Ho Kim*(Korea University)

P18-8

Tailoring Structural, Magnetic, and Table-Like Magnetocaloric Properties of $Gd_{2-x}Ho_xNi_{17}$ Intermetallic Compounds through Ho Substitution

Kiran Shinde*, Sung Hwan Hong(Sejong University), Younghun Jo(Korea Basic Science Institute, Daejeon), Dilshodbek Yusupov, Muhammad Aoun Abbas, Ki Buem Kim(Sejong University)

P18-9

열처리 조건에 따른 열폭주 방지용 실리카 에어로젤의 열적 안정성 및 구조 변화

이종범*, 박진호(한국생산기술연구원)

P18-10

다이캐스팅 용탕 유동성 향상을 위한 금형 표면의 미세패턴 형성에 관한 연구

이락규*, 김용유, 윤국태, 김주업, 김봉고, 홍창완((재)대구기계부품연구원)

P18-11

Understanding oxidation behavior of silicon carbide via Atom Probe and structural analysis

Won-Hyeong Lee, Yeon Ha Jo(Korea university), Tae-Hyeok Kang*(Korea Advanced Institute of Science and Technology), Se-Ho Kim*(Korea university)

P18-12

Step Spiral Generation on the (−101) Surface of Calcium Oxalate Monohydrate Crystal Investigated by In Situ Liquid-Phase Atomic Force Microscopy

Kang Rae Cho*(Cheongju University)

P18-13

미량합금원소 첨가에 따른 비열처리용 ADC12 다이캐스팅 합금의 미세조직 개량 방안

김용유*, 이락규, 윤국태, 김주업(대구기계부품연구원), 이수안(유림테크)

P18-14

Dose Rate Dependent Electron Beam Damage of Li_6PS_5Cl Solid Electrolyte Investigated by Cryo-TEM

Seungmin Lee, Yunseong Jeon, Choongbog Kim, Sung Kang, Yoon Huh, Jungjae Park*(Research Institute of Industrial Science & Technology (RIST))

P18-15

TEM 기반 MgO 표면 미세구조 및 화학적 특성 분석

권다미, 최민영(나노종합기술원 분석평가센터), 박하은, 최진혁(영남대학교 산학협력단 중앙기기센터), 장성진, 박경진, 서윤경, 유정호(나노종합기술원 분석평가센터), 김지혜, 한주환(영남대학교), 박윤창*(나노종합기술원 분석평가센터), 민봉기(영남대학교 산학협력단 중앙기기센터)

P18-16

하나로(HANARO) 중성자 잔류응력측정장치(RSI) 소개 및 광학 비전 기반 센터링 보조 시스템 구축을 통한 장비 운영 효율화

서보운, 강태욱, 채호병, 우완측*(한국원자력연구원)

P19 : 가공-소성가공

Room 1층 전시홀, 10월 29일(목)

P19-1

유한요소 모델링을 통한 알루미늄 압출재의 이방성 변형 및 파단 거동 예측

김강산(성균관대학교), 김찬양(국립군산대학교), 정경재*(성균관대학교)

P19-2

Characterization of Magnetocaloric Properties and Microstructures in $La(Fe, Si)_{13}$-based alloys for Room-Temperature Applications

Min Jik Kim(Korea Institute of Materials and Science, Pohang University of Science and Technology), Jae Han Bae, Woo Seok Yang, Kook-Chae Chung, Jong-Woo Kim, Kwang Seok Lee*, Da Seul Shin*(Korea Institute of Materials and Science)

P19-3

유한요소해석 및 유전 알고리즘을 이용한 열간 회전 단조 공정 설계

좌리노, 우영윤*, 이영선, 윤은유(한국재료연구원)

P19-4

Hastelloy C-22 합금의 고온 변형물성 및 미세조직 분석을 통한 3축 롤 압연 공정 고도화

김승용, 최언준, 윤은유*(한국재료연구원)

P19-5

복합 발전용 가스터빈 샤프트 제조 공정 최적화 연구

허상현, 이진모*, 김남용, 이채훈, 윤선룡, 권하늘, 문지훈((주)태웅)

P19-6

냉간 인발 및 열처리에 따른 Gd 와이어의 미세조직 변화와 자기열량 이방성 변화

배재한, 양우석, 김민직, 김현웅, 신다슬*, 이광석*(한국재료연구원)

P20 : 복합재료

Room 1층 전시홀, 10월 29일(목)

P20-1

Deep-Trap Engineered $SrAl_2O_4$:Eu Mechanoluminescent Phosphors for OWL (One-Way Luminescence) Tracer Rounds

Seoyeon Park, Youngseung Choi, Chaeyoun Kim, Seongju Park(KAIST), Hee Sik Chin, Mu Jun Song, Ji seong Go(POONGSAN), Byungha Shin*(KAIST)

P20-2

생체모방형 진주층 구조 BMG-ZrO_2 복합소재의 침투온도가 미세구조 및 기계적 특성에 미치는 영향

김태윤(부산대학교), 오현석(위스콘신대학교), 이제인*(부산대학교)

P20-3

cBN 입자 크기에 따른 주조기반 알루미늄 복합소재의 기계적 및 열적 특성 연구

정다운, 박현재, 이태호(한국재료연구원, 부산대학교), 김정환, 이상복, 이상관(한국재료연구원), 김양도(부산대학교), 조승찬*(한국재료연구원)

P20-4

열처리에 따른 Ni-C 이원계 합금의 미세조직 및 상온 · 극저온 인장 거동

한희주, 신현빈, 박노근*(영남대학교)

P20-5

변태유기소성이 발현되는 FeNi/FeNiCr-TiC 복합재의 적층 제조

김유빈, 이태규*, 이민제, 신주원(국립한밭대학교)

P20-6

Ni-P 무전해도금을 통한 cBN/Al 복합재의 표면특성 향상 연구

이지윤, 김민수(한국재료연구원, 부경대학교), 조은서, 정병문, 이상복, 이상관(한국재료연구원), 권한상(부경대학교), 조승찬, 김정환*(한국재료연구원)

P20-7

Investigation of Mechanoluminescent Behavior in Eu+Dy co-doped $SrAl_2O_4$ for Application of Light Tracer

Chaeyoun Kim, Youngseung Choi, Seoyeon Park, Seongju Park(Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)), Hee Sik Chin, Mu Jun Song, Ji seong Go(POONSAN R&D INSTITUTE), Byungha Shin*(Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))

P20-8

Microstructure and Thermal Properties of Mo-Cu Composite Fabricated by Melt Infiltration of Freeze-Cast Mo Preforms

Youngmin Kim, Ji Young Kim, Eui Seon Lee, Sung-Tag Oh*(SEOULTECH)

P20-9

소재 간 전처리 차이에 따른 실란트 접착강도 분석

이인영*, 이창화, 김지완(한화시스템)

P20-10

Fabrication of W-Cu composites by infiltration of W skeletons prepared by freeze casting

Ji Young Kim, Youngmin Kim, Eui Seon Lee, Sung-Tag Oh*(SEOULTECH)

P20-11

레이저 표면처리를 통한 Al－C_{60} 복합재료 내 생성된 나노 탄화물이 기계적 특성에 미치는 영향

김수민, 이효정, 한주연, 최현주*(국민대학교)

P20-12

WC－NbC－Co 초경합금의 마스터 소결 곡선에서 초기 밀도 정규화의 영향 평가

이종범*(한국생산기술연구원), 김소현, 김용희(로얄신소재), 정하국(한국생산기술연구원)

P20-13

질화기반공정으로 제조된 복합재의 공정 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 비교

이지원, Kanhu C. Nayak, 이건배(국민대학교), 김정환(한국재료연구원), 최현주*(국민대학교)

P21 : 가공-주조 및 응고

Room 1층 전시홀, 10월 29일(목)

P21-1

Fe－6 · 8 · 10Cr 이원계 합금의 고/액 및 고/고 계면 미세조직 천이

이윤진(국립창원대학교), 신종호(두산에너빌리티), 이재현*(국립창원대학교)

P21-2

사형 주조된 Mn–Cu 고감쇠 합금의 위치별 미세조직 및 기계적 특성 평가

한예진, 전종배*(동아대학교 금속공학과), 이영훈((주) 신라금속), 김대경((주) 한화오션)

P21-3

고용강화 페라이트계 구상흑연주철의 조성 · 미세조직과 기계적 특성 간 상관관계 분석

홍지우, 김지욱, 최창영, 정유현, 조용재*(한국생산기술연구원)

P21-4

전산모사를 활용한 소형전술차량용 허브케이스의 합금 원소 최적화 및 경량화 연구

강재영, 김대하(포항소재산업진흥원), 연성일, 곽근호(경도공업), 박병호*(포항소재산업진흥원)

P21-5

첨가 원소 종류 및 함량에 따른 TiAl 합금의 주조 유동성 비교

최광수, 양현석, 정우철(고등기술연구원), 김성웅, 김채원(한국재료연구원), 공만식*(고등기술연구원)

P22 : 열전

Room 1층 전시홀, 10월 29일(목)

P22-1

Effects of Sn and Se Co–doping on the Thermoelectric Properties of $AgSbTe_2$

Hyoju Son, Suhyeon Woo, Jihwan Im, Joseph Ngugi Kahiu, Samuel Kimani Kihoi, Ho Seong Lee*(Kyungpook National Univ.)

P22-2

Phase Separation And Microstructural Ordering In (Ti, Cr)FeSb Double Half–Heulesr System

Suhyeon Woo, Hyoju Son, Jihwan Im, Joseph Ngugi Kahiu, Samuel Kimani Kihoi, Ho Seong Lee*(Kyungpook National Univ.)

P22-3

Se이 치환된 보르나이트 $Cu_5FeS_{4-y}Se_y$의 열전 성능

김성윤, 김일호*(국립한국교통대학교)

P22-4

Ni 이 도핑된 보르나이트 $Cu_5Fe_{1-x}Ni_xS_4$의 열전 특성

김형일, 김일호*(국립한국교통대학교)

P22-5

비화학양론 위티체나이트 $Cu_{3-x}BiS_3$의 형성 및 열전 수송 특성

이푸른, 김일호*(국립한국교통대학교)

P22-6

Visualization and Overview of Thermoelectric Generator Performance Based on Literature Data through 2025

Jihui Son, Jeongin Jang, Jongho Park, Jaywan Chung, SuDong Park, Byungki Ryu*(Korea Electrotechnology Research Institute)

P22-7

Enhancing Seebeck Coefficient of n–Type NbCoSn Half–Heuslers via Sc–Induced Resonant Levels Formation

Hail Park*(Research Institute of Industrial Science and Technology (RIST), Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))

P23 : 디스플레이재료

Room 1층 전시홀, 10월 29일(목)

P23-1

Low ligand density $CsPbBr_3$ Perovskite Nanocrystals for Efficient Ligand–Exchange–Free Light–Emitting Diodes

Yubin Lee, Younghoon Kim*(Kookmin Univ.)

P23-2

Scalable Synthesis of Monodisperse Iodide Perovskite Quantum Colloidal Dot Inks via Precursor Diffusion Control for Optoelectronic Devices

Jaehyuk Kim, Younghoon Kim*(Kookmin University)

P23-3

Ag$_2$Te Colloidal Quantum Dots via Reactivity Control and Surface Passivation for Next-Generation SWIR Display Applications

Dayoung Kang, Younghoon Kim*(Kookmin Univ)

P23-4

Nanograin Engineering Enables Low-Dose, High-Resolution Direct Optical Lithography of Polycrystalline Perovskite Films

Lee Hyungdoh, Sun Jae Park, Seonjkyu Maeng, Himchan Cho*(KAIST)

P23-5

OLED 붕소계 청색 발광 재료의 특허 동향 및 기술 경쟁력 분석

윤대위, 박함용*(지식재산처)

P23-6

OLED용 인광 금속착물에 관한 특허통계분석

김지은*, 조다혜, 김경환(지식재산처)

P23-7

Revealing the Role of Metal Halide-Ligand Complexes in the Surface Chemistry of InP Quantum Dots

BOKYEONG SOHN, Seongbeom Yeon, Hwa Seob Choi, Jaehwan Lee, Jae Jun Lee, Jaedong Jang, Hyungdoh Lee, Himchan Cho*(KAIST)

P24 : 타이타늄

Room 1층 전시홀, 10월 29일(목)

P24-1

고엔트로피 합금 첨가를 통한 Ti-6Al-4V의 β상 안정성 및 TRIP 거동 제어

최은선, 서기완, 박은수*(서울대학교)

P24-2

수전해용 귀금속-free 고내식 타이타늄 신합금 설계

김도경(한국재료연구원, 부산대학교), 주재성, 박예준(한국재료연구원), 이제인(부산대학교), 홍재근*, 김재혁*(한국재료연구원)

P24-3

Ti-12.1Mo-1Fe 합금의 시효처리에 따른 석출상 형성이 진동감쇠능과 기계적 특성에 미치는 영향

김진모, 이재관, 이동근*(국립순천대학교)

P24-4

TiO$_2$가 첨가된 Ti-6242 합금의 In-situ 산화물 형성에 의한 기계적 특성 향상

김태웅, 김수연, 김홍민, 이동근*(국립순천대학교)

P24-5

Atomic-scale investigation of the oxidation behavior of boron-containing TiAl alloys

Won-Hyoung Lee, Se-Ho Kim*(Korea Univ.)

P24-6

주조 Titanium Grade 7의 이차상 (β-Ti) 형성에 따른 미세조직 및 국부 부식특성 평가

이진우, 최재훈, 최원진, 김정한*, 강신곤*(동아대학교)

P24-7

Effect of Nb addition on the mechanical properties of Ti811 alloy

Yeonju Noh (Korea Advanced Institute of Science and Technology), Yejun Park(Korea Institute of Material Science), Pyuck-Pa Choi*(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

P24-8

Orientation-dependent room-temperature nanoindentation creep of commercially pure titanium

HaSeong Baek(Incheon National University), Yong-Taek Hyun(Korea Institute of Materials Science), Tea-Sung Jun*(Incheon National University)

P24-9

SMR 열교환기용 고열전도 lean Ti 신합금 설계

천해영, 주재성, 박예준(한국재료연구원), 박노근(영남대학교), 홍재근*, 김재혁*(한국재료연구원)

P24-10

Material Extrusion Additive Manufacturing (MEAM) 공정으로 제조된 Ti-15Nb-5Sn 합금(at. %)의 회복 거동에 미치는 infill density의 영향

임진환, 김민수*(한국생산기술연구원(KITECH))

P24-11

Ti-VAR Melt Data를 기반한 용해 조건 최적화 모델 개발

장대건, 최재영, 김경민, 이장호, 임종섭, 유종영, 송영석*(세아창원특수강)

P24-12

Ti-Nb-Zr-X-O 합금에서 X원소에 따른 전자구조가 Gum metal 특성에 미치는 영향

김근채, 김재일*(동아대학교, (주)에쓰엠팹)

P25 : 고온재료

Room 1층 전시홀, 10월 29일(목)

P25-1

CALPHAD와 기계학습을 활용한 다원계 Nb 기반 합금의 확산 동역학 특성 예측

유태현, Khushahal Thool, Krishnamohan Thekkepat, 이승철, 최시훈*(국립순천대학교), 서진유(한국과학기술연구원)

P25-2

Effects of alloying elements on the intermediate-temperature oxidation behavior of the Nb-Si-based alloy

Jueun Kim(Korea Institute of Materials Science, DongA Univ), Bongchul Kim, Jeonghyeon Do, JoongEun Jung, In Soo Kim, Baig Gyu Choi(Korea Institute of Materials Science), Jong Bae Jeon*(DongA Univ), Daewon Yoon*, Sangwon Lee*(Korea Institute of Materials Science)

P25-3

V 치환 Fe-Cr-Ni-Al-Ti 철계 내열합금의 미세조직 및 고온물성 변화 연구

권민철, 최순원(국립공주대학교, 첨단 분말 소재 부품 센터), 박강현, 임가람(한국재료연구원 극한재료연구소), 송기안*(국립공주대학교, 첨단 분말 소재 부품 센터)

P25-4

오스테나이트계 경량철강의 온도에 따른 Cyclic Softening/Hardening 거동과 전위 미세조직 상관성

황동현, 주하연, 김시연(국립창원대학교), 고의석(현대스틸파이프 생산기술연구소), 김치원, 박성준(한국재료연구원 극한재료연구소), 홍현욱*(국립창원대학교)

P25-5

The Effect of Directly Introducing $Y_2Ti_2O_7$ on Oxide Dispersed Strengthened Alloys for High-Temperature Applications

YUHAN LU, Sanghoon Noh*(국립부경대학교)

P25-6

Influence of Ni and Cr Additions on Phase Evolution and High-Temperature Mechanical Properties of γ-TiAl Alloys

Donghee Ryu(Korea Institute of Industrial Technology, Korea Univ.), Juree Jung, Seungtaek Hong(Korea Institute of Industrial Technology), Sahn Nahm(Korea Univ.), Junhee Han, Leeseung Kang*(Korea Institute of Industrial Technology)

P25-7

Mo 저감 및 Nb/Ta 첨가 Haynes 282 기반 Ni-based superalloy의 온도 의존 고온유동거동 및 구성방정식 분석

허성준, 박재형 , 정원석, 박노근*(영남대학교)

P25-8

APS YSZ 및 YbSZ 열차폐코팅의 등온 열화 특성 평가

김유진, 김시원, 이소미, 윤종서(서울과학기술대학교), 김상훈, 장기수, 김규식(한전KPS), 문흥수(세원하드페이싱), 변재원*(서울과학기술대학교)

P25-9

극한 고온환경용 Nb계 합금의 내산화성 향상을 위한 합금 조성 최적화

이상민, 임광혁, Muhammad Salman Johry, 서진유*(한국과학기술연구원)

P25-10

열간압연 조건이 Al-Cr-Fe-Ni-Ti 철계 고엔트로피 합금의 초소성에 미치는 영향

박상민(국립공주대학교), 박강현(한국재료연구원), 최순원, 송기안*(국립공주대학교)

P25-11

Ni-Cr-Mo-W 계 C-276 합금의 TCP상 저감을 위한 조성 설계 및 열처리 조건 최적화

이상현, 주하연, 김종훈(국립창원대학교 소재융합시스템공학과), 김덕령(세아창원특수강), 홍현욱*(국립창원대학교 소재융합시스템공학과)

P25-12

Alloying-Element Effects on Oxidation Mechanisms and Thermal-Runaway Susceptibility of Solid and Molten Ni-Based Model Alloys

Jia Hanbing, HO JIN RYU*(KAIST)



P26 : 생체재료

Room 1층 전시홀, 10월 30일(금)

P26-1

Characterizing Iceball Dynamics and Tissue Injury in CO_2–Based Esophageal Cryoablation

yerin Ha(University of Ulsan College , Asan Medical Center), Yubeen Park(Asan Medical Center), Song Hee Kim, Ji Won Kim(University of Ulsan College , Asan Medical Center), Dong–Sung Won(Asan Medical Center), Seung Jin Eo(University of Ulsan College , Asan Medical Center), Sanghee Lee(Korea National University of Transportation), Jung–Hoon Park*(University of Ulsan College , Asan Medical Center)

P26-2

Irreversible Electroporation Combined with Human Wharton's Jelly Mesenchymal Stem Cell–Derived Extracellular Vesicles and PD–1 Blockade for Prostate Cancer Immunotherapy

Song Hee Kim(Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine, Asan Institute for Life Sciences, Asan Medical center), Yunlim Kim(Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine), Gyeong Joon Moon(University of Ulsan College of Medicine), Bumjin Lim(Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine), Jung–Hoon Park*(Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine, Asan Institute for Life Sciences, Asan Medical center)

P26-3

Metallic Nanowire Electrodes for Biodegradable Bioelectronic Interfaces

Kihyun Kim(Seoul National University), Ji–Woo Gu(Seoul National University, Ulsan National Institute of Science and Technology), Ju–Young Kim*(Ulsan National Institute of Science and Technology), Seung–Kyun Kang*(Seoul National University)

P26-4

Mesenchymal Stem Cell Nanovesicle–Eluting Bioresorbable Scaffold for Vasculomodulatory Control of Restenosis

Ji Won Kim (Asan Institute for Life Sciences, Asan Medical Center, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine), Min–Kyu Kang(Chung–Ang University), Dong–Sung Won, Seung Jin Eo(Asan Institute for Life Sciences, Asan Medical Center, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine), Jeong–Kee Yoon(Chung–Ang University), Jung–Hoon Park*(Asan Institute for Life Sciences, Asan Medical Center, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine)

P26-5

Programmable Magnetic Patterning in Multifunctional Hydrogel Platforms

kyeongmi lee, yoonseok park*(Kyunghee Univ.)

P26-6

Intelligent Pressure–Responsive Sensors based on the Fast Reconfiguration of Magneto–Conductive Pathways

Chanyoung Choi, Yoonseok Park*(KyungHee Univ.)

P26-7

Pressure–driven Drug Delivery Using High–pressure Balloon Catheter Improves Vascular Drug Penetration and Anti–restenotic Effects

Seung Jin Eo, Hyemin Lee(University of Ulsan College of Medicine (Department of Convergence Medicine), Asan Medical Center (Biomedical Engineering Research Center)), Do–Yoon Kang(Asan Medical Center (Department of Internal Medicine)), Jung–Hoon Park*(University of Ulsan College of Medicine (Department of Convergence Medicine), Asan Medical Center (Biomedical Engineering Research Center))

P27 : 수소재료

Room 1층 전시홀, 10월 30일(금)

P27-1

DED(Directed Energy Deposition, DED) 316L 스테인리스강의 저속 인장 시험을 통한 수소취성 민감도 분석

이준민, 강성규*(경상국립대학교)

P27-2

고온 질화 처리에 따른 316L 스테인리스강의 수소취화 저항성 변화

김광균*(영남대학교)

P27-3

전기화학적 수소 장입 방식에 따른 마르텐사이트 스테인리스강의 수소취성 및 피로 거동 평가

이정재, 이진영, 백진수, 박채연(서울과학기술대학교), 이창희, 강성(포항산업과학연구원), 변재원*(서울과학기술대학교)

P27-4 **Canceled**

극저온에서 316L 스테인리스강 용접부의 수소취성 거동 분석

성용훈, 이수열*(충남대학교)

P27-5

전류밀도 변화에 따른 수소 배관용 API 5L X70 파이프라인 강의 In–situ 수소취성 거동

신윤지, 임성진, 권민철, 송기안*(국립공주대학교)

P27-6

고온 수소 환경이 SUS304 오스테나이트계 스테인리스강의 크리프 거동에 미치는 영향

유정민(한국과학기술연구원, 고려대학교), 임광혁(한국과학기술연구원), 김두현(한국과학기술연구원, 고려대학교), 송전영(두산에너빌리티), 에산 노루지(한국과학기술연구원), 손석수*(고려대학교), 서진유*(한국과학기술연구원)

P27-7

수소환경 피로시험에서 주파수에 따른 피로 거동 평가

노준혁, 백진수, 이진영, 이정재(서울과학기술대학교), 이창희, 강성(포항산업과학연구원), 변재원*(서울과학기술대학교)

P27-8

냉간 압연이 Pure V의 미세조직 및 수소 흡 · 방출 특성에 미치는 영향

최병철(한국생산기술연구원 , 강원대학교), 신중호*(강원대학교), 나태욱*, 강규병, 백민아, 석경찬, 홍성찬(한국생산기술연구원)

P27-9

AB_2계 수소저장합금의 톨루엔 수소화 촉매 거동

진시원(한국과학기술연구원, 서울대학교), 이재용(한국과학기술연구원, 성균관대학교), 박은수(서울대학교), 김윤석(성균관대학교), 심재혁*(한국과학기술연구원)

P27-10

$ZrFe_2$계 C15 Laves 합금의 B-site 치환 원소(Ni, V, Al)에 따른 수소 흡장 특성 및 열역학적 거동 분석

선현덕(한국생산기술연구원, 고려대학교), 배상환(한국생산기술연구원, 서울과학기술대학교), 이준호*(고려대학교), 하태준*(서울과학기술대학교)

P27-11

Effects of Microporous layer (MPL) Treatment on the Passive Behavior and Surface Oxide Characteristics of Ti PTL under PEMWE Conditions

OnYu Ha(Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Sungkyunkwan University), Myeongjin Kim(Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Hanyang University), SeKwon Oh*(Korea Institute of Industrial Technology (KITECH))

P27-12

수소 배관용 X70급 고강도강의 내수소취성 향상을 위한 수소취화 거동 분석

장광후, 정재환, 윤희수*(한국가스안전공사 가스안전연구원)

P27-13

SA372 수소압력용기의 미세조직 최적화를 위한 퀜칭 냉각거동 및 상변태 해석

백민아(한국생산기술연구원, 고려대학교), 최병철(한국생산기술연구원, 강원대학교), 강규병(한국생산기술연구원, 고려대학교), 김동회*(고려대학교), 나태욱*(한국생산기술연구원)

P28 : 고엔트로피합금

Room 1층 전시홀, 10월 30일(금)

P28-1

친환경 BCC계 고엔트로피 금속기지복합재의 미세조직과 기계적 특성 평가

김영환, 박성현, 장성혁, 정재길*(전북대학교)

P28-2

레이저 기반 이중 구배 이종구조 설계를 통한 강도–연성 동시 향상

김서사랑, 김래언, 구강희, 안성열, 허윤욱(포항공과대학교), 문종언*(국립공주대학교), Qingfeng Wu(Hong Kong Polytechnic University), 채호병, 백열, 우완측(한국원자력연구원), 권현석(국민대학교), Hidemi Kato(Tohoku University), 김형섭*(포항공과대학교)

P28-3

패스 변형률 및 유지시간이 $Al_{0.3}CoCrFeNi$ 고엔트로피 합금의 고온 단속 변형 중 재결정 거동에 미치는 영향

오상준(국립공주대학교), 김효섭, 김동응, 한철웅, 김양후(한국생산기술연구원), 이지운*(국립공주대학교)

P28-4

Ti 첨가 및 냉간 압하율 증가가 Fe–Co–Ni–Cr–Mo계 중엔트로피 합금의 석출 거동과 극저온 기계적 특성에 미치는 영향

박수정, 김태형(단국대학교), 김성욱(포항산업과학연구원), 김형섭(포항공과대학교), 주수현*(단국대학교)

P28-5

$Cr_{48}Ni_{37}Fe_{10}Co_5$ eutectic 합금의 극저온 인장 특성

이동희(한국재료연구원, 울산과학기술원), 윤성준(한국재료연구원, 고려대학교), 조욱(울산과학기술원), 정덕현(충남대학교), 권현준, 장태진, 나영상*, 김영균*(한국재료연구원)

P28-6

중엔트로피 합금에서 전위밀도에 따른 γ′ 석출물 조대화 거동 분석

한상윤, 박은수*(서울대학교), 류채우*(홍익대학교)

P28-7

철계 $L1_2$ 석출강화 합금의 저온 변형 중 전위–석출물 상호작용 거동 규명

문광현, 김진섭(한양대학교), Bijun Xie(University of California), 정찬원(국립부경대학교), 김지훈(부산대학교), Penghui Cao(University of California), 김진경*(한양대학교)

P28-8

NiCrAl 중엔트로피 합금의 초기 미세조직이 수소취성 거동에 미치는 영향

정휘윤, 윤성민, 이제인*(부산대학교)

P28-9

결정립 크기에 따른 TRIP 거동 제어를 통한 FeNiMnCoTiSi 중엔트로피 합금의 극저온 강도–연성 동시 향상

김서연, 이도원, Peyman Asghari-Rad, 정상국, 손수정, 안성열, 김형섭*, 김은성(포항공과대학교)

P28-10

극저온 압연 후 열처리를 통한 CoCrFeMn계 엔트로피 합금의 기계적 특성 향상 연구

최정훈(충남대학교), 송동현(충남대학교, 국방기술진흥연구소), 정 현, 이동현*(충남대학교)

P28-11

Effect of Rolling Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Dual-phase High-Entropy Alloys

jongtae kim, Juree Jung, Jinwoo Seok, Mi Hye Lee, Jawoon Kim, Junhee Han, Leeseung Kang*(Korea Institute of Industrial Technology)

P28-12

Ti-V-Nb-Mo 고엔트로피 합금 분말의 원소 균질화 및 소결체 특성에 미치는 밀링 시간의 영향

이윤서, 송유진, 유형규, 이진규*(국립공주대학교)

P28-13

고변형률 속도에서 CrCoNi계 고엔트로피 합금의 동적 변형 메커니즘

노시언, 이소영, 김현수, 김윤호, 박은수*(서울대학교)

P28-14

FeCoNiAlTi계 고엔트로피 합금의 석출 및 변태 유기 강화의 계층적 연계를 통한 상온 강도-연성 향상

이상우(고려대학교), Wei Zhang(Central South University), 백주현(고려대학교, 한국과학기술연구원), 정두효, 김세호(고려대학교), Zhiming Li*(Central South University), 손석수*(고려대학교)

P28-15

Core-shell 구조를 갖는 $L1_2$ 석출강화형 Fe-rich 중엔트로피 합금의 미세조직 및 초극저온 기계적 특성

권민지(한국재료연구원), 윤성준(한국재료연구원, 고려대학교), 장태진, 나영상*, 김영균*(한국재료연구원)

P28-16

Effects of Cu and Mo Additions on the Corrosion and Surface Oxidation Behavior of CrCoNi-Based Multi-Principal-Element Alloys in Phosphoric Acid Environments

Gunjick Lee, Han Jun Yu, Jae-Hyeok Shim*(Korea Institute of Science and Engineering)

P28-17

열처리 기반 AlTiVCr 공정 고엔트로피 합금의 미세조직 분석 및 고온 항복 강도 특성 평가

강원묵, 홍동성, 이규필, Yusupov Dilshodbek, Abbas Mouhammad Aoun, 강결찬, 홍성환, 박혜진, 김기범*(세종대학교)

P28-18

수소 용해 엔탈피와 상안정성을 고려한 Ti-V-Nb-Cr계 BCC 다성분 수소저장합금 설계

예정원, 박은수*(서울대학교)

P28-19

Effect of V on the microstructure and mechanical characteristics of dual phase $(CrFeNiCu)_{100-x}V_x$

Dilshodbek Yusupov*, Muhammad Aoun Abbas, Kiran P. Shinde, Hae Jin Park, Sung Hwan Hong, Ki Buem Kim(Sejong University)

P29 : 역학측정

Room 1층 전시홀, 10월 30일(금)

P29-1

원자력시스템용 구조재료의 이온조사에 따른 표면 경도 변화 분석

정회연(UNIST), 전은채(울산대학교), 김주영*(UNIST)

P29-2

인공신경망 기반 나노인덴테이션을 통한 다중 적층 박막 구조 물성 평가

김광희, 조현욱, 김종형*(국립부경대학교)

P29-3

L-PBF 적층제조 316L 스테인리스강의 계층적 미세조직 제어 및 멀티스케일 기계적 특성 상관관계 분석

허재혁, 이준희, 최인철*(국립금오공과대학교)

P29-4

나노압입시험과 머신러닝을 활용한 듀플렉스 스테인리스강 미세조직 분류

임준휘, 김영천*, 노우람(국립경국대학교)

P29-5

유연소자의 굽힘 반복 시간에 따른 굽힘 손상 데이터 신뢰도 분석

김수현, 김동규, 박태원, 박민지, 조아름, 이정구, 전은채*(울산대학교)

P29-6

전기화학적 수소장입 시 전해질에 따른 STS304의 국부 변형특성

박상민, 이상엽, 김영천*(국립경국대학교)

P29-7

전기화학적 수소 장입 조건에서 첨가제 농도 변화에 따른 STS304 용접부 영역의 기계적 • 전기화학적 특성 평가

서세덕, 김영천*(국립경국대학교)

P29-8

전기화학적 수소 장입에 따른 STS304 용접부의 염화물 부식 거동 및 나노압입 특성

이상엽, 조현학, 김영천*(국립경국대학교)

P29-9

실시간 나노인장시험을 통한 VNAND용 SiO2 및 SiN 박막의 미세 기계적 물성 평가

김수정, 곽지윤, 심영주, 김동현, 김주영*(UNIST)

P29-10

적층결함에너지 변화가 CoCrNi 계열 중엔트로피 합금의 수소취화 및 변형 거동에 미치는 영향

김지현(국립경국대학교), 박태연, 최인철(국립금오공과대학교), 김영천*(국립경국대학교)

P29-11

9 wt% 니켈강의 층상화 열처리를 통한 미세조직 제어 및 극저온 충격인성 향상

김영훈, 이소현, 김주영*(UNIST)

P29-12

고탄성 · 고전도성 결정질-비정질 금속 나노적층막의 기계적 신뢰성과 신축성 전자소자

이찬영(UNIST), 황경석(Harvard University), 김주영*(UNIST)

P29-13

석출경화가 기계적 물성 및 부식거동에 미치는 영향

우정현*, 박선영, 김가영, 장준혁, 최민재(한국원자력연구원)

P30 : 인공지능재료과학

Room 1층 전시홀, 10월 30일(금)

P30-1

Trajectory-Resolved Reliability Analysis in Cross-Dataset Battery State-of-Health Forecasting

Seongho Lee, Joonhee Kang*(Pusan National Univ.)

P30-2

Autonomous Schema Induction via Large Language Models for Scientific Knowledge Graph Construction

Hyeonji Shin, Joonhee Kang*(Pusan National University)

P30-3

Evidence-Grounded Design of Proton-Conducting Ceramic Electrolytes Using Knowledge Graphs

Gaheun Shin, Joonhee Kang*(Pusan National Univ.)

P30-4

LLM 기반 데이터셋 구축을 통한 다상강 미세조직 상 분할

안희주, 정경재*(성균관대학교)

P30-5

머신러닝과 통계 기법을 이용한 Mold Powder 과립 입도와 제조 공정 인자 간 관계 분석

박재형, 신민찬, 박노근*(영남대학교)

P30-6

기계학습을 위한 Al-Zn-Mg-Cu 합금 고경도 조성 탐색용 조합데이터셋 구축

이경환, 전서연, 천재은, 조기섭, 최현주*(국민대학교)

P30-7

공정 전주기 데이터 기반 물성 예측 및 소재 · 공정 최적화 플랫폼

최준혁, 조기섭*(국민대학교)

P30-8

차원 축소를 이용한 Ni계 초내열합금 DSC 곡선의 열적 상태공간 구축 및 조성 연관성 탐색

강서연, 최윤석*, 이태주(부산대학교)

P30-9

Closed-Loop Design of Cubic Phase, Low-Resistance Perovskite Air Electrodes

Hyeonggeun Kim, Joonyong Heo, Dongyeon Kim, Seeun Oh(KAIST), Min Young Ha(Kyung Hee University), Kang Taek Lee*(KAIST)

P30-10

고특성 α+β Ti 합금 설계 전략 구축을 위한 LangChain 기반 대형언어모델 알고리즘 개발

서기완(서울대학교), 이진우, 이동우(성균관대학교), 박은수*(서울대학교)

P30-11

7xxx계 알루미늄 합금의 강도 예측을 위한 문헌 기반 Descriptor 탐색

석왕록, 최윤석*(부산대학교), 김수현, 천현석(한국재료연구원)

P30-12

데이터 및 인공지능 모델을 활용한 CrMnFeCoNi 고엔트로피 형상기억합금 설계

임진수랑, 이제인*(부산대학교), 신동원*(Oak Ridge National Laboratory)

P30-13

Multimodal Feature Fusion for Robust Molecular Property Prediction

Jimin Han, Jeong Woo Han*(Seoul National University)

P30-14

협동로봇 기반 능동형 AI 자동화 재료시험 공정개발

오동현*, 박근혁*, 문종훈*, 안치영*(한국화학융합시험연구원), 이종훈*(테스코(주))

P30-15

Property-Guided Generative Design of Liquid Organic Hydrogen Carriers

Seoyeon Kim, Jeong Woo Han*(Seoul National Univ.)

P30-16

합금 조성 및 열간변형 조건에 따른 Al-Mg 합금 응력-변형률 곡선 예측을 위한 2단계 인공지능 모델 설계

전준협*(한국생산기술연구원)

P30-17

Beyond Model-Centric Discovery: An Evidence-Mapped Landscape of Machine-Learning-Driven Materials Design from Screening to Validated Closed Loops

Youngho Sihn*, Min Ku Jeon, Sung Wook Kim, Chan Woo Park, Sungjune Sohn, Bum Kyoung Seo(Korea Atomic Energy Research Institute)

P30-18

Automated DFT Data Generation for Machine-Learning Prediction of Uranyl-Ligand Formation Constants at pH 8.2

Youngho Sihn*, Sung Wook Kim, Min Ku Jeon, Chan Woo Park, Sungjune Sohn, Bum Kyoung Seo(Korea Atomic Energy Research Institute)

P30-19

CatEdit: A Generative Editing Framework for Efficient Dopant Screening in Heterogeneous Catalysts

Igon Kim, Jeong woo Han*(Seoul National Univ.)

P31 : 마그네슘

Room 1층 전시홀, 10월 30일(금)

P31-1

급속냉각에 따른 생분해성 마그네슘 합금 미세튜브의 기계적 물성과 부식 거동의 변화

이민서, 황건호(한국재료연구원, 고려대학교), 임창동, 이상은, 김하식(한국재료연구원), 김세호(고려대학교), 서종식*(한국재료연구원)

P31-2

Interfacial microstructure and mechanical properties of pure Mg/AZ91 composites fabricated by segmented-billet co-extrusion

EunHye Kim, SeoungYooun Yu, Sung Hyuk Park*(Kyungpook Univ.)

P31-3

Mg-Al 합금의 부식 거동에 미치는 Zn 첨가의 영향

김명주, 박주희, 유봉선, 배준호, 김재연*(한국재료연구원)

P31-4

열처리 방식에 따른 Mg-Al-Ca 합금의 미세조직 및 열전도 특성 변화

권용준, 이태경*(부산대학교)

P31-5

Fabrication and Hydrogen Storage Properties of Porous Mg-Ni Alloys by Space-Holder-Assisted Infiltration casting

Ye-Rin Jang(Korea Institute of Materials Science, Changwon National Univ.), Do-Hyeon Kim(Korea Institute of Materials Science, Kyungpook National Univ.), Hyun Cho, Eun Seon Cho(Korea Advanced Institute of Science and Technology), Young Min Kim, Byeong-Chan Suh*(Korea Institute of Materials Science)

P31-6

생체 삽입형 의료 소재 적용을 위한 마그네슘합금의 전기적 특성 및 부식 거동 평가

김재인, 아루즈, 원윤정, 임창동*(한국재료연구원)

P32 : 나노융합소재

Room 1층 전시홀, 10월 30일(금)

P32-1

MXene Converted High-Aspect-Ratio 2D $BiVO_4$ Nanosheets for Photoelectrochemical Water Splitting

Yun Sejin, Kim Beomseon, Kim Jin*(Hanbat National Univ.)

P32-2

Decoding Oxide-Dependent Hydrogen Sensing in Pd-Functionalized Nanorod Arrays

Junseok Park, Junho Hwang, HyunSook Lee*, Wooyoung Lee*(Yonsei Univ.)

P32-3

Interface Control of ITO Electrodes for Enhanced Electrochromic Performance

Jaeha Cho, Taehoon Ha, Seung Woo Kim, Hyeonbin Choi, Cheon Woo Moon*(Soonchunhyang Univ.)

P32-4

Passive Cooling-Based Wearable Platform for Real-Time Monitoring of Biofluid Flow

minwoo park, youngjun kim, minsu park*(Dankook Univ.)

P32-5

Phase-Separation-Engineered Conductive Photoresist for High-Resolution Micro-LED Interconnection

Se Hoon Jung, Tae Won Nam*(Pusan National Univ.)

P32-6

Wearable Muscle Platfrom for Interactive Soft Robotic Systems

ByungHee Kim, ByeongJun Kim, InHo Kim*(Sungkyunkwan University)

P32-7

In-situ Observation of Gate-Driven Structural Dynamics in Twisted Double Bilayer Graphene

Jaewoo Shim, Byunghyun Kim(Seoul National Univ.), Saea Kim(Sogang Univ.), Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi(National Institute for Materials Science), Sang Mo Yang(Sogang Univ.), Hyobin Yoo*(Seoul National Univ.)

P32-8

Liquid Crystal Elastomer based Composite for Self-Sensing Artificial Muslce Fibers

BYEONGJUN KIM, BYUNGHEE KIM, INHO KIM*(Sungkyunkwan University)

P32-9

SAC405 솔더 빌렛에서의 조성 불균일이 기계적 특성에 미치는 영향

이나경, 이동윤*(부산대학교), 천명호(덕산하이메)

P32-10

Aggregation-Dependent Photoluminescence in Size-Fractionated Graphene Quantum Dots

Donghyun Oh, Taesik Eom, Jina Suh, Yeseul Lim, Minsu Park*(단국대학교)

P32-11

Multilayer Quantum Dot Architectures via Sequential Interfacial Transfer Printing

JeongHun Shin, TaeWon Nam*(Pusan National University)

P32-12

Early Safety Monitoring for Energy Storage Systems via Ultra-Low Methane Detection Using Bi-Layer Catalyst-Functionalized SnO_2 Nanorod Arrays Gas Sensor

Jongbeom Park, Kyung-Ho Park, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee*(Yonsei Univ.)

P32-13

Solution-based Transfer Printing of Au Nanoparticles on Quantum Dot Photoconductors for Plasmonic Resonance Enhancement

Minjeong Kim, Taewon Nam*(Pusan National Univ.)

P32-14

Battery Breathomics: Hydrogen-Evolution Fingerprinting for Crack Diagnosis in Cylindrical Lithium-Ion Batteries

Kyung-Ho Park, Yeonhong Kim, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee*(Yonsei Univ.)

P32-15

Dual-Responsive Smart Windows: Integrating Thermochromic VO_2 and Mechanochromic Optical Tunability in SiO_2/VO_2/PDMS Flexible Composites

Suyeon Kim, Dohyeon Ryu, Jin Kim*(국립한밭대)

P32-16

Thermal and Electrical Reliability of Sn-58Bi Solder Joints with $Ti_3C_2T_x$ MXene Addition

CHANSIK YOON, JAEJEONG LEE(Department of Materials Science and Engineering, Dankook Univ.), YOONSEOB SHIM, YOONCHUL SOHN(Department of Welding and Joining Science Engineering, Chosun Univ.), YUNSUNG WOO*(Department of Materials Science and Engineering, Dankook Univ.)

P32-17

Unseeded Diamond Growth on Liquid Copper by Hot-Filament Chemical Vapor Deposition

Alisher Sultangaziyev, Yongqiang Meng, Sun Hwa Lee(Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Won Kyung Seong*(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff*(Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

P32-18 **Canceled**

CN-MAX의 C/N 비율 조정에 따른 결정구조 제어 및 마일드 에칭 거동 평가

김은채, 이도연, 장민서, 송재민, 권한중*(전북대학교)

P32-19

Layer-by-Layer Fabrication of Graphene-Fullerene Nanostructures

Korlan Duisenova, Madi Arsakay, Sunghwan Kim(Institute for Basic Science (IBS; located at the UNIST campus)), Rodney S. Ruoff, Sun Hwa Lee*(Institute for Basic Science (IBS; located at the UNIST campus), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

P32-20 **Canceled**

방전 플라즈마 소결(SPS)을 이용한 Ti계 $(Ti_{n+1}Al(CN)_n$ (n=2, 3) 및 V계 $(V_{n+1}Al(CN)_n$ (n=1, 3) MAX 상의 C/N 비율 제어 합성 및 미세조직 · 기계적 특성 평가

장민서, 송재민, 이정연, 김은채, 권한중*(전북대학교)

P32-21

Freestanding, Ultrasmooth Diamond Membranes by Simple Delamination via HF(aq) Etching

VIJAY GUPTA (Institute for Basic Science (IBS)), Ken Haenen*(Hasselt University, IMOMEC, IMEC vzw), Rodney S. Ruoff*(Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

P32-22

열플라즈마를 이용한 Ni/BN나노튜브 하이브리드 구조 합성 및 NH_3 전환 특성

유희일, 문세연*(전북대학교 고온플라즈마연구센터)

P32-23

Co-deposition of Carbon and Nitrogen for Well-Ordered N-Doped Carbon Nanowalls (CNWs) on Cu(111) via Molten Salt Electrolysis

Dongwoo Kim(Institute for Basic Science (IBS)), Minhyeok Kim(Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Sunghwan Kim, Moo Young Jung, Won Kyung Seong(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff*, Sun Hwa Lee*(Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

P32-24

Electrochemical Co-Intercalation of Lithium and Organic Precursors for Interlayer-Confined Synthesis of Layer-Controlled 2D Covalent Organic Frameworks

Mi-Jeong Kim, Yongqiang Meng, Madi Arsakay, Korlan Duisenova, Sunghwan Kim, Jin Hong Kim, Moo Young Jung, Dongwoo Kim(Institute for Basic Science), Rodney S. Ruoff*(Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology), Sun Hwa Lee*(Institute for Basic Science)

P32-25

Mechanically Robust and Absorption-Dominated MXene/CNF Composite Films for Advanced Electromagnetic Interference Shielding

XUE HAN, Yun Sung Woo*(Dankook Univ.)

P32-26

Hydrogen as an Early Precursor to Battery Thermal Runaway: Full-Scale Validation in an Electric Vehicle

MinJae Kim, Min-Gi Kim, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee*(Yonsei Univ.)

P32-27

MOF-derived Binary Nanophases of Metal Oxides and Oxidized Carbon for Highly Selective and Long-Lived Gas Sensing

Jihyun Lee, Wooyoung Lee*(Yonsei University)

P32-28

Bifunctional, Reversibly Thermochromic Phase Change Microcapsules for Visual Temperature Indication

Youngjun Kim, Minsu Park*(Dankook Univ.)

P32-29

The effect of heat treatment on FAU zeolite templated carbon

Madi Arsakay (Institute for Basic Science (IBS; located at the UNIST campus)), Korlan Duisenova, Alisher Sultangaziyev, Sun Hwa Lee(Institute for Basic Science (IBS; located at the UNIST campus), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Won Kyung Seong(Institute for Basic Science (IBS; located at the UNIST campus)), Rodney S. Ruoff*(Institute for Basic Science (IBS; located at the UNIST campus), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

P32-30

Fabrication and Gas Sensing of Chemoselective Structurally Colored Polymer Nanopatterns for Gas Sensing via Gas Induced Morphological Collapse

Su Min Lee, Nam Tae Won*(Pusan National University)

P32-31

Surface Modification–Driven Growth of Dense Single–Crystal CoSi Nanowires

Eugene Cho(Sungshin Women's Univ.), Gwangsik Mun, Yeon Sik Jung*(Korea Advanced Institute of Science and Technology), Hyeuk Jin Han*(Sungshin Women's Univ.)

P32-32

Heating–Rate–Aware Early Warning of Lithium–Ion Battery Thermal Runaway via Quantitative Hydrogen Diagnostics

Mingi Kim, Min–jae Kim, Hyun–Sook Lee, Wooyoung Lee*(Yonsei Univ.)

P32-33

Geometric Engineering of Serpentine Pd Nanocracks for Enhanced Hydrogen Sensing

Joonho Lee, Jongwoon Shin, Chanwoo Lee, Dongjun Cho, Wooyoung Lee*(Yonsei Univ.)

P32-34

Efficient Room–Temperature Phosphorescence of Graphene Quantum Dots by Urea–Assisted Surface Modulation and Siloxane – Borate Confinement

Taesik Eom, Minsu park*(Dankook Univ.)

P33 : 전산재료과학

Room 1층 전시홀, 10월 30일(금)

P33-1

Ti–V–Al–C계 MAX 상 설계를 위한 열역학 데이터베이스 구축

정훈, 정경재*(성균관대학교)

P33-2

Atomistic Simulation Study of Tramp Element Effects on Liquid Metal Penetration in Fe – Cu – X Systems

Jong–Hoon Park, Hye Ji Jo(Korea University), Hye–Hyun Ahn(Inha University), Dong–Hwi Kim, Minwoo Kang(Hyundai Motor Company), Youngjae Kim(Hyundai Motor Company, Seoul National University), Won–Seok Ko*(Korea University)

P33-3

Composition–Dependent Li–Ion Transport in Sulfide Solid–State Electrolytes Studied by Machine–Learning Molecular Dynamics

Hwan Seung Heo, Dong Yeon Kim*(Jeonbuk National University)

P33-4

Phase–Field Modeling of Asymmetric Grain Growth under Intrinsic Stress in Thin Films

doyoon kim, Yongwoo Gwon*(Hongik Univ.)

P33-5

물리정보 신경연산자를 이용한 Allen – Cahn 계면 이동 및 상분리 예측

이은재, 차필령*, 방진현 , Sandeep Sugathan (국민대학교)

P33-6

데이터 마이닝의 비지도 학습을 응용한 재료의 지각 성질에 관한 연관 규칙 분석

최재호*, 이원재(강원대학교)

P33-7

Magnetism–Driven Surface Energetics in TiFe: Implications for Hydrogen Storage

Park Jeongeun(Korea Institute of Science & Tech), Krishnamohan Thekkepat(Sunchon National University), Jinwoo Kim, Jin–Yoo Suh*(Korea Institute of Science & Tech), Seung–Cheol Lee*(Sunchon National University)

P33-8

Controlling Reaction Pathways for Selective CO–to–C2+ Conversion: Mechanistic Insights and Catalyst Design Principles

Hyun Dong Jung(Sogang Univ.), Seoin Back*(KoreaUniv.)

P33-9 **Canceled**

기계학습 원자간 포텐셜을 이용한 $CsPbI_3$ 준안정상 제어 연구

최성호, 장윤석 , 홍기하*(국립한밭대학교)

P33-10

Rylene Imide Dopants for Interfacial Passivation of ZnO Electron Transport Layers in Non–Fullerene Inverted Organic Solar Cells

Hyeonsu Son, Sang Wook Park, Tae Kyung Lee*(한양대학교)

P33-11

제일원리 계산 및 기계학습 기반 니켈기 치환형 고용체의 용질 확산 예측과 메커니즘 규명

권진영, 나질라 줄피카, 김경덕*(포항공과대학교)

P33-12

결정소성–딥러닝 연계 모델을 이용한 미세조직 기반 기계적 거동 예측

최우섭, 정경재*(성균관대학교)

P33-13

Efficient Phase–Field Modeling of Thin–Film Texture Evolution via Interface–Selective Anisotropy

Yunsu Choi, Yongwoo Kwon*(홍익대학교)

P33-14

Microscopic Origin of Intrinsic Hole Conduction in Oxygen–Deficient Amorphous Tellurium Oxides: First–Principles Analysis Over Machine–Learned Amorphous Ensembles

Wonzee Jung(Dongguk University), Youngho Kang*(Incheon National University)

P33-15

Theoretical Insights into Vanadium Nitride–Catalyzed Bidirectional Polysulfide Redox in Sodium – Sulfur Batteries

SEONGWON LEE(Hanyang University), HUN–SEONG KIM(Gyeongsang National University), JUNSU SON(Hanyang University), HYUN YOUNG JUNG(Gyeongsang National University), TAE KYUNG LEE*(Hanyang University)

P33-16

DFT Investigation of Oxygen–Containing Adsorption Characteristics on Metal–Incorporated C_{60}

HWIWON KIM, Kihyun Shin*, Soyun Park(Hanbat National University)

P33-17

Rethinking OER Activity on Doped IrO_2(110) through SCAN Insight

eujin Kim, kihyun Shin*, girim Park, younghyun Choi(Hanbat National University)

P33-18

Analysis of the Adsorption Properties of $Pt_6@C_{60}$ through N Doping

soyun park, kihyun Shin*, Hwiwon Kim(Hanbat National University)

P33-19

Catalytic Enhancement of Core－Shell Pt Nanoparticles through Elemental Substitution

Seohee Jang, Janghyeon Oh, Yeonwoo Do, Seokho Lee, Kihyun Shin*(Hanbat National University)

P33-20

Optimization of Strain–Induced OER Activity in IrO2 Catalysts via Gaussian Process Regression

younghyun choi, Kihyun Shin*, Eujin Kim, Girim Park(Hanbat National Univ)

P33-21

Effects of Core–driven Strain on ORR Activity in Pd(100) Nanocube Catalysts

Yeonwoo Do, Janghyeon Oh, Seokho Lee, Seohee Jang, Kihyun Shin*(Hanbat National University)

P33-22

Active learning for Efficient Exploration of M–N–C Single Atom Catalyst Design Space

JANG HYEON OH, Yeonwoo Do, Seokho Lee, Seohee Jang, Kihyun Shin*(Hanbat National University)

P33-23

Effect of Coordination Number and Hydrogen Variation on the Adsorption Energies of Pb–Labeled DOTA Complexes

seokho lee, Seohee Jang, Yeonwoo Do, Janghyeon Oh, Kihyun Shin*(Hanbat National University)

P33-24

상장 모델 기반 소자 시뮬레이션을 이용한 양극성 저항 메모리의 전도성 필라멘트 거동 해석

오진우, 권용우*(홍익대학교), 정동명(한국표준과학연구원)

P33-25

Oxygen Evolution Reaction on Clean, Stepped, and Kinked IrO2 (110) Surface

girim park, Younghyun Choi, Eujin Kim, Kihyun Shin*(Hanbat national univ.)

P33-26

적층제조 응고 텍스처를 고려한 단결정 금속 격자구조의 Phase–field 위상최적화

한창현, 김동욱, 차필령*(국민대학교)

P33-27

Computational Study of Conductive Binder Architecture for High–Loading $LiFePO_4$ Cathodes

Seongeun Oh(Sookmyung Women's University), 노은환(Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), 강혜리, 이은지(Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)), 강석주(Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), 주세훈*(Sookmyung Women's University)

P33-28

Co–doping을 이용한 Sb_2Se_3의 보상성 결함억제에 대한 제일원리 계산 연구

김민준, 홍기하*(국립한밭대학교)

P34 : 소프트소재

Room 1층 전시홀, 10월 30일(금)

P34-1

정전용량 결합 제어를 통한 압타머 개질 확장 게이트 FET 바이오센서의 신호 전달

박성현, 김자영*(연세대학교)

P34-2

Waste–derived cross–economy hydrovoltaic energy generator with environmental sustainability

Minji Kwon, Jonggun Jung, Chanyeong Jeon, Woojoong Kim, Jioh Yoo, Seungjun Lee, changhoe Lee(연세대학교), Dongho Kang*, Eunae Shin*(한국생산기술연구원), Cheolmin Park*(연세대학교)

P34-3

Janus Photonic－Phosphorescent Polymer Encodes Environmental States and Optical Histories

Jonggun Jung, Woojoong Kim, Jioh Yoo, Chanyeong Jeon, Minji Kwon, Seung Jun Lee, Changhoe Lee, Cheolmin Park*(Yonsei Univ.)

P34-4

BSP 필름의 열–기계적 물성과 Si 웨이퍼 Warpage 거동의 상관관계 분석

문준혁(서울대학교), 장준호, 류채우*(홍익대학교)

P34-5

결함 유도 2H–to–1T′ 상전이 기반 $MoTe_X/Ni(OH)_2$ 이종구조의 하이드라진 보조 수전해 촉매 설계

백승진, 이원규*(홍익대학교)

P34-6

Temperature–Responsive Multispectral and Temporal Luminescence in Dual–Guest Metal–Organic Frameworks

Chanyeong Jeon(Yonsei Univ.), Jong Woong Park(Massachusetts Institute of Technology), Woojoong Kim, Jonggun Jung, Changhoe Lee, Jioh Yoo, Minji Kwon, Seung Jun Lee, Cheolmin Park*(Yonsei Univ.)

P34-7

Plasticity-tunable artificial synapse enabling history-dependent temporal neuromorphic spiking system

Changhoe Lee, Woojoong Kim, Jioh Yoo, Minji Kwon, Jonggun Jung, Chanyeong Jeon, Seung Jun Lee, Cheolmin Park*(Yonsei Univ.)

P34-8

혈장 TIMP-1의 현장진단 검출을 위한 전기화학 면역 바이오센서

이경은, 이동욱, 김자영*(연세대학교)

P34-9

Locally-Amorphized Layered $PtTe_2$ for Efficient Ethanol Oxidation

jihun Yim, Won-Kyu Lee*(hongik Univ.)

P34-10

MXene-Enabled Low Voltage Operating Neuromorphic Memristor Based on PVDF-MXene Nanosheet Blends

Seungjae Choi*, Beomjin Jeong*(Pusan National Univ.)

P34-11

Enzyme-Recyclable Moisture-Enabled Energy Generator Based on a CNF/CNT/Citric Acid Aerogel

Hojoon Park, Ka Eun Lee, Dongho Kang, EunAe Shin*(Korea Institute of Industrial Technology)

P34-12

Stretching-Induced Structural Engineering of PETG Composite Films Incorporating Hybrid h-BN/Al_2O_3 Fillers for Improved Thermal and Mechanical Properties

Yoonhye Han, Minyoung Kwak, EunAe Shin*(Korea Institute of Industrial Technology)

P34-13

Amine-Functionalized Graphene Oxide Reinforced Crosslinked P(VDF-TrFE) Hybrid Dielectrics for Solution-Processed MoS_2 Ferroelectric Synaptic Transistors

SEONGBO JANG, BEOMJIN JEONG*(Pusan National Univ.)

P35 : 항공재료

Room 1층 전시홀, 10월 30일(금)

P35-1

일방향응고 IN792 초내열합금에서 Zr 편석이 고-액 계면에너지와 고온균열 민감도에 미치는영향

김민석(국립창원대학교), 구지호(한화에어로스페이스), 진혜승(경동나비엔), 이재현*(국립창원대학교)

P35-2

Ni 초합금 열역학 데이터베이스 개발: Ni-Co-Ta 시스템의 열역학 모델링

박준서(한국과학기술원), 곽다희, 조원옥, 정인호*(서울대학교)

P35-3

HIP 처리가 Inconel 718 주조재의 미세조직 및 수소 취성 저항성에 미치는 영향

한수빈, 김동혁, 조용재, 장진석, 최창영, 김지욱, 정유현, 송혜진*(한국생산기술연구원)

P35-4

레늄이 포함된 니켈계 초합금 열역학 데이터베이스 개발: 레늄-나이오븀, 레늄-몰리브덴 이원계 시스템의 열역학 모델링

서정민, 방지호, 정인호*(서울대학교)

P35-5

Inconel 718 주조품의 열처리 조건에 따른 미세조직 변화 및 마모 특성 분석

김동혁*, 한수빈, 송혜진(한국생산기술연구원)

P35-6

국산 항공기 유압 피팅의 품질 인증을 위한 개발 시험 평가 체계 연구

이동건*, 김순재, 김병재, 이행선(디케이락(주))

P35-7

항공기 유압시스템용 빔씰 피팅의 형상 설계 및 성능 검증 연구

이행선*, 김순재, 김병재, 이동건(디케이락(주))

P36 : 집합조직

Room 1층 전시홀, 10월 30일(금)

P36-1

Tailoring Intermetallic Connectivity of Al-Si-Coated 22MnB5 Steel through Solid-State Interfacial Diffusion Control

Hee Geon Lee, Hyun-Hak Kang, Seong Jeon(Incheon National Univ.), Si-Mo Yeon(Korea Institute of Industrial Technology), Hyun-sung Son(POSCO Steel Solution Research Lab), Tea-Sung Jun*(Incheon National Univ.)

P36-2

극저온 처리가 6061-T6 알루미늄 합금의 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향

전태민, 강현학, 전태성*(인천대학교)

P36-3

나노인덴테이션 기반 순수 Al 및 6061 Al 합금의 결정방위 연계 표면 응답 평가

김보규, 한성희, 김대현, 한준희, 윤수빈, 이준한, 유은서, 김건호, 신중호*(강원대학교)

P36-4

Pt seed 층 패터닝과 CVD를 이용한 $PtSe_2$ 기반 MSM 구조 형성 및 특성 평가

위신혜(동아대학교), 송유진(한국기초과학지원연구원), 김여진, 신한균(동아대학교), 한상섭*(한국기초과학지원연구원), 김정한*(동아대학교)

P36-5

2.1D 반도체 패키지 기판 미세 비아의 상용 유기첨가제 기반 전해도금 구리 미세조직 분석

김도현, 오은기, 신한균, 박 현, 김정한*(동아대학교)

가공-표면처리
Room 1층 101호, 10월 28일

[표면1-1 | 09:00]
Influence of Carbon Bonding Configuration on the Mechanical and Tribological Properties of ta-C Coatings for High-Cycle Lithium-Ion Battery Electrode Cutting: Syed Manzar Abbas Kirmani, Ki-bum Kim*(Chungbuk National University, Cheongju, Republic of Korea)
Keywords: Tetrahedral amorphous carbon (ta-C), Filtered cathodic vacuum arc (FCVA), Carbon bonding configuration, Raman I_D/I_G ratio, Cemented carbide (WC–Co)

Cemented carbide (WC–Co) cutter blades used in lithium-ion battery electrode manufacturing suffer rapid tribological degradation under high-cycle, multi-material cutting of metallic foils and composite electrode coatings, causing burr formation and loss of cut-edge quality. Tetrahedral amorphous carbon (ta-C) coatings offer high hardness and wear resistance, yet the role of the carbon bonding configuration in governing their tribological performance remains unclear. In this study, Cr/CrC_x/ta-C coatings were deposited on WC–6 wt.% Co substrates by filtered cathodic vacuum arc (FCVA) under different negative substrate bias voltages (−100, −250, and −170 V) while maintaining a nearly identical interlayer architecture. Raman spectroscopy revealed distinct I_D/I_G ratios of 0.259, 0.201, and 0.150 for Samples A, B, and C, respectively, indicating systematic variation in the bonding configuration of the ta-C functional layer. Notably, the hardest coating was not the most durable. Nanoindentation showed the highest hardness (63.91 GPa) and elastic modulus (627.33 GPa) for the coating with the lowest I_D/I_G ratio, whereas the intermediate-bonding coating exhibited the lowest values (54.36 GPa and 504.60 GPa). However, ball-on-disk testing against an alumina counterbody under dry sliding revealed that the hardest coating exhibited a wear rate approximately 75% higher than that of the intermediate-bonding coating (4.2 versus 2.4 × 10^{-8} $mm^3/N·m$), mainly due to brittle fracture and debris-induced abrasion, together with the largest wear-track cross-sectional area (~3.090 μm^2). In contrast, the coating with the intermediate I_D/I_G ratio yielded the lowest friction coefficient (μ = 0.082), the lowest disc and counterbody wear rates, and the smallest wear area (~1.687 μm^2). These results demonstrate that optimal tribological performance is achieved not by maximizing hardness alone but by optimizing the carbon bonding configuration to promote stable sliding and suppress severe wear, providing practical design guidelines for DLC coatings in high-cycle battery electrode cutting applications.

[표면1-2 | 09:15]
Heterogeneous TiN-based core shell nanoprecipitates suppress defects and optimize the properties in laser-clad FeMnCoCr MHEA composite coating: Dadong Jie(포항공과대학교, Jiangnan University), Meiping Wu(Jiangnan University), Hyoung Seop Kim*(포항공과대학교)
Keywords: Metastable high-entropy alloy, laser cladding, composite coating, Titanium nitride

Premature surface failure has become a critical concern for heavily loaded engineering components, creating a strong need for coating systems with both high strength and adequate ductility. In this work, a TiN/Fe50Mn30Co10Cr10 metastable high-entropy alloy (MEHA) composite coating was fabricated on 17-4PH stainless steel by laser cladding (LC), and the role of TiN in molten pool dynamics, forming quality, microstructural evolution, and wear and corrosion resistance was systematically investigated. The results show that a moderate addition of nano-TiN alters the Marangoni flow pattern and promotes a more favorable bubbles escape pathway, leading to a marked reduction in porosity. In the 2TiN sample, there existed TiN, MnTi2O4, and TiN@(MnTi2O4+9R) heterostructured nanoprecipitates with coherent or near-coherent interfacial characteristics. These precipitates are considered to contribute to defect suppression, grain refinement and performance improvement. Compared to the substrate, the optimal content of 2TiN coating reduces the corrosion current density and wear rate by 54.9% and 81.8%, respectively. The present work demonstrates a particle mediated strategy for simultaneously improving manufacturability and performance in laser-clad MHEA coatings for surface engineering applications.

[표면1-3 | 09:30]
DICTRA 시뮬레이션을 이용한 Zn 도금 Si 함유강의 계면 Si 농화 및 Fe-Zn 상호확산 거동 해석: 김성훈*, 박형권, 이진종, 김경원, 이창훈(한국재료연구원), 박영도(동의대학교), 이태호*(한국재료연구원)
Keywords: 아연도금강, 열역학, DICTRA, Si 농화, 계면 이동

Si는 고강도강의 미세조직 및 기계적 특성 제어를 위한 주요 합금원소이나, Zn 도금강의 열처리 과정에서 Fe-Zn 합금화 반응을 현저하게 지연시키는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 Zn 도금 Si 함유강에서 발생하는 계면 Si 농화의 형성 원리와 Fe-Zn 상호확산에 미치는 영향을 규명하기 위해 미세조직 분석과 DICTRA 확산 시뮬레이션을 수행하였다. 600 ºC에서 열처리한 Zn 도금강의 계면을 분석한 결과, Si가 첨가되지 않은 강에서는 Zn이 Fe 기지 내부로 지속적으로 확산한 반면, 2 wt.% Si 함유강에서는 Zn 확산이 크게 억제되고 Zn/steel 계면에 Si 농화 영역이 형성되었다. 이러한 거동을 해석하기 위해 Fe-Zn 이원계와 Fe-Zn-Si 삼원계를 대상으로 TCFE12 및 MOBFE7 데이터베이스를 이용한 DICTRA 시뮬레이션을 수행하였다. 계산 결과, Fe-Zn-Si 삼원계에

서는 BCC Fe 내 Si의 매우 낮은 확산계수에도 불구하고 Fe-Zn 반응 계면 부근에서 급격한 Si 농화가 나타났다. 이는 Si 자체의 장거리 확산에 의한 것이 아니라, 액상 Zn에서 Si의 매우 낮은 고용도로 인해 Fe-Zn 반응 계면이 이동하는 과정에서 Si가 Fe 기지 방향으로 배제되어 계면에 축적되기 때문인 것으로 해석되었다. 형성된 Si 농화 영역은 Zn의 Fe 기지 내 확산과 계면 이동을 현저하게 억제하였다. 또한 Fe-Zn 금속간화합물인 Γ상을 고려한 계산에서, Fe-Zn 이원계에서는 Γ상 형성에 따라 Zn의 Fe 기지 내 확산이 크게 증가한 반면, Fe-Zn-Si 삼원계에서는 Γ상 형성이 Zn 확산에 미치는 영향이 제한적이었다. 이는 Γ상 내 Si의 낮은 고용도로 인해 Γ상 성장 과정에서도 Si가 Fe 기지 방향으로 지속적으로 배제되어 계면 Si 농화가 유지되기 때문이다. 결과적으로 Fe-Zn 반응 계면의 이동에 의해 형성된 Si 농화 영역이 Fe-Zn 상호확산을 억제하는 확산 장벽으로 작용하여 Fe-Zn 금속간화합물의 형성 및 성장을 지연시키는 것으로 확인되었다.

[표면1-4 | 09:45]

나노초 레이저 식각 피라미터에 따른 구리 표면 구조체의 풀비등 열전달 성능에 미치는 영향: 김준하, 김규낙(한국재료연구원, 경상국립대학교), 안지혁(한국재료연구원), 강성규(경상국립대학교), 유연우*(한국재료연구원)

Keywords: 나노초 레이저, 구리 마이크로필라, 풀비등, 액침냉각

전자장치의 고성능화와 고집적화에 따라 발열밀도가 증가하면서, 고열유속 장치의 안정적인 열관리를 위한 액침냉각 및 풀비등 열전달 기술의 중요성이 커지고 있다. 풀비등 열전달 성능은 가열 표면의 미세구조, 젖음성 및 기포 핵생성 특성에 크게 좌우되므로, 금속 표면의 형상과 표면 상태를 정밀하게 제어하는 기술이 요구된다. 나노초 펄스 레이저 가공은 별도의 코팅 공정 없이 금속 표면에 마이크로미터 규모의 구조를 형성할 수 있으며, 레이저 공정 조건에 따라 표면 형상과 산화 상태를 동시에 변화시킬 수 있다. 본 연구에서는 나노초 파이버 레이저를 이용하여 20 mm × 20 mm × 1 mm 크기의 구리 시편 표면에 원기둥형 마이크로필라 배열을 제작하고, 레이저 공정 파라미터에 따른 형상 및 표면 산화상 변화를 분석하였다. 필라의 직경은 100 μm로 설정하였으며, 서로 다른 레이저 출력 조건을 적용하여 높이 50, 100, 200 μm의 미세구조를 제작하였고, 제작된 필라의 높이 및 직경은 3차원 프로파일로미터를 이용하여 정량적으로 평가하였다. 또한 레이저 가공에 따른 표면 젖음 특성의 변화를 확인하기 위해 시편별 접촉각 측정을 수행하였고 풀비등 열전달 성능을 평가하였다.

[표면1-5 | 10:00]

The development of alloys including ta-C nanocomposite coatings by using amorphous-based multi-component alloys: Kyoung Il Moon*, Hae Won Yoon, Byoungho Choi, Kyong Jun An, Gi-Hoon Kwon(Korea Institute of Industrial Technology), Sung Chul Cha(Hyundai Motor Group-Hyundai Kefico)

Keywords: Multi-component alloy, Amorphous alloy, ta-C coating, Nanocomposite coating

While modern industries are becoming more sophisticated, diversified, and globalized, they requires the development of smart materials have multi-functionality, high mechanical properties, and extreme durability. Also they could be prepared environmentally friendly and energy efficiently. At the same point of view, the smart coating materials capable of simultaneously expressing various mechanical properties or opposite properties such as high hardness with high toughness, high electricity with high corrosion resistance are attracting attentions as an versatile and useful materials in the future. In particular, there is an urgent needs to develop a novel coating materials capable of stably maintaining microstructures and mechanical properties in various external environments, unlike conventional coating materials whose properties and structures are easily changed by the some harsh environments. To get this kinds of objects, the coating material with multi-components are essential. But if the materials should be prepared with one phase with multi components, they could have only one properties. So, nano-composites with various phases to realize the various properties should be formed. So, it is necessary to develop a coating layer composed of various components those could be formed various phases and more complex structures. Previously, various single alloy materials with various compositions based on the amorphous composition of Zr-Cu have been tried to be prepared by powder metallurgy methods such as atomization, mechanical alloying, and Spark Plasma Sintering (SPS). Nanocomposite coatings could be obtained successively and the properties of as-prepared nanocomposite coatings had been reported. In this study, alloys included ta-C coatings were prepared by using amorphous-based multi-component alloys. Their properties will be summarized.

[표면2-1 | 10:25]

해상풍력용 고강도 볼트 상용소재의 환경 내구성 평가: 권홍기(포항소재산업진흥원), 이승민(세아베스틸), 정정진(KPF), 박상원*(포항소재산업진흥원)

Keywords: 합금강, 해양환경, 복합부식, 내식성

해상풍력 발전설비의 체결용 볼트는 염수와 고습이 지속되는 해양환경에 장기간 노출되며, 높은 체결하중과 부식환경이 동시에 작용할 수 있어 우수한 기계적 특성과 환경 내구성이 요구된다. 특히 고강도 볼트에 대한 해양환경 적용을 위해서는 소재의 기계적 특성과 함께 장시간 부식환경에서의 내식성 및 응력부식균열 저항성에 대한 평가가 필요하다. 본 연구에서는 해상풍력용 고강도 볼트 개발소재의 환경 특성 확보를 위한 선행연구로서 상용 고강도 볼트 소재를 대상으로 환경 내구성 평가를 수행하였다. 먼저 인장시험을 통해 각 소재의 항복강도를 확인하고, 이를 기준으로 항복강도의 70%에 해당하는 응력을 인가하여 응력부식균열(SCC) 시험을 수행하였다. 또한 염수분무시험(SST)과 복합환경시험(CCT)을 각각 1, 000시간 동안 수행하면서 주기적으로 시편 표면의 부식 상태를 관찰하여 시간에 따른 부식 거동을 평가하였다. SCC 시험에서는 시험 후 시편의 표면 상태 및 균열 발생 여부를 확인하였으며, SST 및 CCT 시험 후 시편의 표면 및 단면을 분석하여 부식생성물의 형상과 조성 및 부식 진행에 따른 특성을 고찰하였다.

본 연구를 통해 상용 고강도 볼트 소재의 기계적 특성과 장기 부식환경 및 응력 인가 조건에서의 환경 내구성에 대한 기초자료를 확보하였으며, 도출된 결과는 향후 해상풍력용 개발소재의 환경 내구성 확보 및 소재 설계에 활용할 수 있는 선행자료로 활용될 것으로 기대된다.

[표면2-2 | 10:40]

니켈기 초내열합금의 내산화코팅에서 반응성 원소 첨가가 고온 산화거동에 미치는 영향: 조재우(한국재료연구원, 부산대학교), 김도현, 강용진, 박영진, 권한솔, 박훈관, 이성훈, 유연우*(한국재료연구원)

Keywords: 가스터빈, 내산화코팅, 산화거동, 미세구조, 열성장산화물

가스터빈의 고효율화를 위해 터빈 입구온도가 지속적으로 증가함에 따라, 고온부품에 사용되는 초내열합금의 고온 산화 및 열화를 억제하기 위한 보호 기술의 중요성이 증가하고 있다. 이에 따라 가스터빈 고온부품에는 고온 환경에서 모재를 보호하기 위한 내산화 코팅이 적용되고 있으며, 특히 장기 고온 수명 확보를 위해 내산화 코팅의 고온 산화 및 열화 거동에 관한 연구가 필수적이다. 본 연구에서는 니켈기 초내열합금(CM247LC) 기판에 4종의 내산화코팅을 적용하여 코팅의 고온 산화거동, 미세조직 변화 및 내산화특성을 비교하였다. 고온산화 시 첨가 원소의 영향을 파악하기 위해 스퍼터링 공정을 활용하여 Hf 단독, Sc 단독 및 Hf-Sc 복합 첨가층을 각각 증착한 후 VPA(Vapor Phase Aluminizing) 공정을 통해 NiAl 기반 코팅을 형성하였으며, 비교를 위해 별도의 첨가층 없이 VPA 공정만을 적용한 기준 코팅도 함께 제조하였다. 제조된 코팅에 대해 1, 100 ºC에서 반복 열사이클 평가를 수행하였으며, 일정 사이클마다 시편의 무게변화를 측정하여 단위면적당 무게변화량을 비교하였다. 또한 표면 및 단면 미세구조 분석을 통해 열성장산화물의 형성 및 성장과 산화막의 박리 거동을 관찰하여 각 코팅의 고온 내산화특성을 평가하였다.

[표면2-3 | 10:55]

레이저 클래딩 공정으로 제조된 Ni-based MMC 코팅의 고온 마모 거동: 홍성준(한국생산기술연구원, 국립순천대학교), 송수민, 김태범(한국생산기술연구원), 이동근(국립순천대학교), 조균택*(한국생산기술연구원)

Keywords: Laser cladding, Metal Matrix Composite(MMC), High-temperature wear, Load-bearing

다이캐스팅 피스톤 및 고온 터빈 블레이드는 고온의 환경에서 내마모성이 요구된다. 이에 대응하기 위해 표면 코팅 기술이 주목받고 있으며, 레이저 클래딩은 고온 마모에 강점을 가지는 MMC 코팅을 제조할 수 있는 기술로 각광받고 있다. MMC 코팅의 매트릭스로는 Fe, Co, Ni 등이 있으며, 그 중 Ni-based metal matrix composite(MMC) 코팅은 Ni 기반 합금의 우수한 고온 안정성과 세라믹 강화재의 높은 경도 및 열적 안정성을 동시에 확보하여 고온에서 안정적인 코팅층을 제공할 수 있는 장점을 가진다. 이에 본 연구에서는 350 ºC에서 기판을 예열한 후, 레이저 클래딩 공정을 이용하여 WC과 TiC를 각각 첨가한 Ni-based MMC 코팅을 제조하고 고온 조건에서 H13 강과의 600 ºC에서 Ball-on-disk 실험을 통해 고온 마모 특성을 비교·분석하였다. 코팅의 미세구조 및 특성은 SEM, X-선 회절(XRD), 그리고 비커스 경도 시험을 통해 평가하였다. 그 결과, WC 및 TiC의 Ni-based MMC 코팅은 H13 대비 현저히 높은 경도를 나타내었으며, 이는 SEM 분석에서 관찰된 재석출된 세라믹 입자와 치밀한 미세구조에 기인한 것으로 해석된다. 고온 마모 실험 결과, Ni-based MMC 코팅은 H13 강에 비해 우수한 내마모성을 나타내었으며, 이는 분산된 세라믹 강화재에 의한 하중 지지(Load-bearing) 효과와 마찰층(Tribo-layer)에 의해 상대재와의 직접적인 접촉이 제한되어 마모가 효과적으로 억제된 것으로 판단된다. 후 기 (Acknowledgments) 이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(치형 베어링용 0.7 tCO2eq/ton 이하 및 900 MPa 이상 고청정·고강도 소재 개발, 2410009670, 00430280, 산업통상자원부)

[표면2-4 | 11:10]

표면 마찰에 따른 AISI 304 스테인리스강의 표면 특성 변화와 NaClO 환경에서의 부식 거동: 이현수, 최윤석*(부산대학교), 이정훈*, 조현빈(부경대학교)

Keywords: 스테인리스강, 표면 분석, 상변태, 전기화학적 부식, 공식

AISI 304 오스테나이트계 스테인리스강은 우수한 내식성과 가공성을 바탕으로 생활 및 산업 환경에서 널리 사용되지만, 사용 및 세척 과정에서 발생하는 반복적인 마찰은 표면에 스크래치와 홈을 형성하고 표면 거칠기, 변형유기 마르텐사이트, 잔류응력 및 산화피막 특성을 동시에 변화시킬 수 있다. 특히 강한 산화력을 갖는 차아염소산나트륨(NaClO) 환경에서는 이러한 표면 변화가 부동태화 및 공식 거동에 영향을 줄 가능성이 있다. 본 연구에서는 AISI 304 스테인리스강에 완전 전해연마를 바탕으로 #200, #800, #2400 사포연마, 사포연마 후 단시간 전해연마를 적용하여 총 6종의 표면 조건을 제작하고, 표면 마찰에 의해 변화하는 인자와 5% NaClO 환경에서의 부식 거동 간 상관관계를 분석하였다. 표면 형상은 원자힘현미경(AFM), 상분율 및 깊이 방향 분포는 X-선 회절 분석법(XRD)와 미소입사각 X-선 회절 분석(GIXRD), 잔류응력은 X선 회절법, 표면 산화피막은 X-선 광전자 분광법(XPS)로 평가하였으며, 동전위분극시험과 시험 후 공식 깊이 분석을 수행하였다. 분석 결과, 사포가 거칠수록 표면 거칠기와 함께 표면 기울기(Sdq) 및 실제 표면적 증가(Sdr)를 나타내는 거칠기값이 증가하였고, 단시간 전해연마는 전체적인 굴곡보다 스크래치 가장자리의 급격한 기울기를 우선적으로 완화하였다. 또한 사포연마 표면에서는 α′-마르텐사이트가, 전해연마 표면에서는 γ-오스테나이트가 우세하였으나, 잔류응력 차이만으로 부식 거동을 설명하기는 어려웠다. 동전위분극시험에서는 시편 간 공식전위 차이는 제한적이었지만, Sdq와 Sdr이 큰 시편에서 활성용해에서 부동태로 전환되는 곡선과 음극반응 구간의 기울기가 다르게 나타났으며, 시험 후 공식 깊이 역시 #200 사포연마 시편에서 가장 깊고 EP 시편에서 가장 얕게 나타났다. 이상의 결과는 AISI 304 스테인리스강의 NaClO 환경 내 부식 거동이 단일 인자보다 표면 형상, 변형유기 마르텐사이트, 잔류응력 및 산화피막 특성의 복합적인 영향을 받으며, 특히 표면 기울기와 실제 표면적 증가를 반영하는 Sdq와 Sdr이 부동태화 및 공식 성장 거동을 해석하는 주요 지표가 될 수 있음을 보여준다.

차세대 핵융합 디버터용 재료 개발 심포지엄
Room 1층 101호, 10월 28일

[핵융합1-1 | 13:30] 조청강연

텅스텐 기반 플라즈마 대면재 적용 차세대 핵융합로 디버터 개발 전략: 권성진*, 박수현(한국핵융합에너지연구원), 송상우(한국재료연구원), 이동원(한국원자력연구원), 조항진(포항공과대학교)

Keywords: 핵융합, 디버터, 대면재, 텅스텐

디버터는 핵융합로에서 플라즈마로부터 유입되는 열과 입자를 직접 배출하는 핵심 부품으로, 정상운전 중 수십 MW/m^2 수준의 열부하와 고에너지 중성자 조사에 동시에 노출되는 가장 가혹한 사용 환경에 놓인다. 국내에서 자기밀폐 핵융합을 이용한 순 전력 생산을 실증하기 위해 개발 중인 Compact Pilot Device(CPD)는 주반경(R) 4.0 m의 컴팩트한 구조에서 300~600 MW 수준의 핵융합 출력을 목표로 하고 있어, ITER 기준을 크게 상회하는 디버터 열부하가 예상된다. 따라서 기존 ITER급 텅스텐-구리(W/CuCrZr) 디버터 개념만으로는 대응이 어려우며, 소재 자체의 고온 건전성과 이종 접합부 신뢰성을 근본적으로 향상시키는 재료 기술이 요구된다. 이러한 배경에서 2025년부터 극한환경 혁신형 핵융합 디버터 개발 전략연구단이 출범하였으며, 정상운전 조건에서 15 MW/m^2 이상의 열부하를 안정적으로 처리할 수 있는 차세대 디버터 기술 확보를 목표로 하고 있다. 소재 관점에서 가장 중요한 과제는 플라즈마 대향재로 사용되는 텅스텐의 재결정에 따른 취화와 반복 열하중에 의한 열피로 균열이다. 본 연구단에서는 포타슘(K) 도핑에 의해 형성되는 미세 기포가 전위 및 결정립계 이동을 억제하는 기구를 활용하여, 재결정 온도를 1, 500 ºC 이상으로 상승시키고 고온 구조 건전성을 확보할 수 있는 K-도핑 텅스텐 소재를 개발하고 있다. 아울러 소재 개발은 열배출 성능을 극대화하기 위한 혁신 냉각채널 구조 설계 및 전산유체해석(CFD) 기반 열수력 최적화, 이종 소재 접합부의 열응력 완화 설계와 연계하여 추진된다. 개발된 소재 및 부품의 성능은 총 2.4 MW급 전자빔 열원과 가압경수로(PWR) 수준의 냉각 조건을 모사하는 이중 냉각루프를 갖춘 고열부하 시험시설(High Heat Flux Test Facility)에서 검증될 예정이다. 본 발표에서는 차세대 컴팩트 핵융합로 디버터에 요구되는 소재 성능 요건과 K-도핑 텅스텐을 중심으로 한 iFD 연구단의 소재 개발 전략, 그리고 고열부하 실증 기반 성능 검증 계획을 소개한다.

[핵융합1-2 | 13:55] 조청강연

차세대 핵융합 디버터용 혁신 소재 및 제조기술 개발 : 송상우*, 박준영, 구혜영, 양상선, 문영국, 김승현(한국재료연구원), 권성진(한국핵융합에너지연구원)

Keywords: 핵융합 디버터(Fusion Divertor), K-도핑 텅스텐(K-doped Tungsten), 적층제조(Additive Manufacturing), 저방사화강(RAFM/ARAA)

핵융합 실증로 및 혁신형 핵융합로의 상용화를 위해서는 초고온 플라즈마 대면 환경과 극한의 열하중을 견딜 수 있는 핵심 부품인 디버터(Divertor)의 성능 및 수명 향상이 필수적이다. 기존 순수 텅스텐(Pure W) 대면재는 약 1,250 ºC 이상에서 재결정화가 일어나 결정립계 파괴 및 연성-취성 천이온도(DBTT) 저하에 따른 균열 전파 위험이 크며, 냉각채널의 경우, 기존의 주조·단조 및 인발 기반 공정은 복잡한 형상 구현과 생산성 향상에 한계가 있다. 본 연구에서는 기존 대비 냉각 성능과 수명을 50% 이상 개선하는 것을 목표로 하고, 혁신소재•제조기술(AMMT)을 결합한 통합 디버터 부품 제조 공정을 개발하고 있다. 먼저 텅스텐의 고온 재결정 및 취성 문제를 극복하기 위해 신공정을 통한 K-도핑 W 분말을 합성하고 열간 압연 공정을 최적화하고 있다. 또한 디버터 타겟의 냉각 성능을 극대화하고자 Hypervapotron 냉각채널 구조를 금속 3D 프린팅인 L-PBF(Laser Powder Bed Fusion) 기술로 구현하였으며, Direct Aging 열처리를 적용하여 기술기준 및 ITER 규격을 상회하는 우수한 기계적 물성을 확보하였다. 아울러 기존의 주조 및 2단계 HIP 공정을 대체하여 W/OFHC/CuCrZr 소재를 단일 장치 내에서 일괄 접합하고 과시효를 방지하는 단일 HIP(Single-step HIP) 통합 공정을 구축 중이다. 타겟 지지 구조재인 카세트바디(Cassette Body)는 기존 판재 벤딩/용접 방식을 와이어 기반 적층제조(AM) 공정으로 전환하여 제작 기간을 대폭 단축시켰다. 또한 혁신형 핵융합로 적용을 위한 한국형 저방사화강(ARAA) 냉각튜브 제작 시 고온 압축 시험 및 Processing Map 분석을 통해 최적의 인발 공정 조건을 수립하였다. 본 연구는 소재 합성부터 3D 프린팅, 단일 HIP 이종접합, 적층제조 기술을 융합하여 차세대 핵융합 디버터 핵심 부품 제작의 기술적 토대를 확보하는 것을 목표로 추진되고 있다.

[핵융합1-3 | 14:20] 조청강연

순수 텅스텐을 넘어: 내플라즈마 특성이 우수한 고인성 차세대 핵융합 대면소재 개발: 한홍남*, 김정석, 이성민, 오철헌, 김미영, 김곤호(서울대학교), 김형찬(한국핵융합에너지연구원)

Keywords: 텅스텐, 핵융합 대면소재, 연성–취성 천이 거동, 내플라즈마 특성, 모노블럭

핵융합로의 플라즈마 대면재료는 고열속과 고입자속, 반복적인 열하중 및 조사 손상이 동시에 작용하는 극한환경에서 구조적 건전성을 유지해야 한다. 순수 텅스텐은 우수한 고온 특성과 낮은 침식률을 바탕으로 대표적인 대면재료로 활용되고 있으나, 높은 연성–취성 천이온도, 제한적인 파괴인성, 재결정에 따른 기계적 성능 저하와 조사 입자의 잔류 및 표면 손상은 장기 운전을 위해 해결해야 할 과제로 남아 있다. 본 발표에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 개발 중인 텅스텐 기반 소재들을 비교하고, 각 소재의 설계 목적과 성능 향상 원리를 소개한다. 포타슘 도핑 텅스텐은 재료 내부에 형성된 포타슘 버블이 고온에서 결정립 성장을 억제하는 동시에 국부적인 전위 생성과 소성 변형에 영향을 미치며, 이를 통해 연성-취성 천이 온도를 낮추고 재결정 저항성을 향상하는 것을

목표로 한다. 더불어 압연과 같은 열기계적 공정은 전위밀도를 증가시키고 결정립 형상을 제어하여 연성-취성 천이 거동을 개선하는 전략으로 활용된다. 텅스텐-크로뮴 복합재는 두 상의 조성, 입도 등을 제어하여 텅스텐의 취성을 완화하고 인성과 내산화성을 동시에 확보하기 위해 개발되었다. 이러한 소재 설계의 실효성은 기계적 특성 평가, 플라즈마 조사와 고열속 시험을 통해 검증된다. 특히 포타슘 도핑 텅스텐을 적용한 W–Cu–CuCrZr 모노블럭을 제작하고 단계적인 고열속 반복 시험과 장주기 열피로 시험을 수행함으로써 소재 수준의 성능을 순수 텅스텐 상용재와 비교하여 우수성을 확인하였다. 본 발표는 궁극적으로 서로 다른 장점을 갖는 재료들을 기반으로 한 복수의 미세구조 설계 전략이 차세대 핵융합 대면재료 개발에 필요함을 제시하고, 소재 제조에서 극한환경 특성 평가까지 이어지는 통합적 개발 방향을 논의한다.

[핵융합1-4 | 14:45] 조청강연

High Heat Flux testing and Investigation of the Thermal Stability of Plasma Facing Component incorporating Potassium-doped Tungsten: Hyoung Chan Kim*, Eunnam Bang, Taewoo Kim, Sungjin Kwon(Korea Institute of Fusion Energy), Jeongseok Kim, Heung Nam Han(Seoul National University)

Keywords: Tungsten, Divertor amor material, High heat flux test, Thermal stability

While tungsten (W) is the primary plasma-facing material for the divertor of Fusion devices such as ITER, advanced tungsten-based materials with enhanced performance as armor materials are required for the divertors of next-generation Fusion reactors. Among the key material properties of tungsten, stability against high heat flux and resistance to recrystallization at high temperatures are crucial for the reliable operation of divertors under higher fusion power conditions. A major limitation of the currently available industrial W plates produced through severe thermo-mechanical processes is the pronounced degradation of their mechanical properties upon recrystallization at high temperatures (> 1250 ^{o}C). In this talk, the results of the high heat flux testing of W PFC(Plasma Facing Component) mockups are presented, and the potential of K-doped tungsten for enhanced HHF components will be discussed. We investigated the thermal stability of potassium (K)-doped tungsten fabricated using the spark plasma sintering (SPS) method and compared the characteristics with those of commercial W plate produced by hot rolling. Fine-grained (~3.2 mm) microstructure and high strength (Vickers hardness ~460) were achieved along with the improved recrystallization resistance by small amount of K content (0.0033 wt%) and scaled-up K-doped W materials (45 mm in diameter) were successfully fabricated while maintaining homogeneous material properties. Analysis of the heat-treated specimens (up to 1450 ^{o}C) using electron backscatter diffraction (EBSD) and hardness measurements showed almost no change in K-doped W, whereas significant hardness reduction accompanied by grain growth was observed in the commercial W plate. ITER-type monoblock PFC mockups were manufactured employing the fabricated K-doped tungsten, and the mockups underwent high heat flux (HHF) testing using electron beam facility. The heat flux was increased stepwise, imposing 500 cycles at each heat flux level, and the tungsten surface temperature reached up to 1900 ^{o}C. Post-mortem analysis of the tested mockups showed distinctive differences in the microstructure, hardness and surface state between the K-doped W and the commercial W plate.

[핵융합2-1 | 15:20] 조청강연

금속적층제조 (L-PBF)를 통한 W/Cu 사이의 interlayer 제작 조중욱*, 이승훈(포항공과대학교)

Keywords: interlayer, 금속적층제조, 열팽창계수

디버터는 융합로 내 플라즈마의 높은 에너지 밀도에 의해 주어지는 열부하를 경감하기 위하여 설계되는 고기능 재료이다. 장기간의 핵융합로 가동을 위하여 최대 20 MW/m^{2}의 열유속에 안정적으로 대응하여야 하므로 고온의 플라즈마와 접촉하는 내열재료와 높은 열전도도를 갖는 전열재료를 접합하는 것이 필요불가결하다. 현재까지 제안된 가장 효과적인 조합은 대면재료로서 W을 전열재료로서 CuCrZr합금을 서로 접합하는 방식이다. 서로 이질적인 물성을 갖는 두 재료간의 계면은 고 열속 (heat flux) 조업환경에서 전열능 저하 및 피로파괴 등의 어려움을 겪게 될 가능성이 높다. 이에 따라 계면의 열적/기계적 특성을 향상시켜서 고 열유속 환경에서도 전열 및 내피로특성을 확보할 필요가 있다. 현재까지 제안된 방법은, 분말야금법에 기초하여 W과 Cu 합금간 계면특성을 향상시키는 방안이다. 예로서, 등은 다단계의 sputtering과 전해도금, 열간등압성형 (HIP)을 조합하여 금속기지 복합재료층을 W와 Cu합금 사이에 형성하는 방안을 제안하여 20 MW/m^2 전열조건에서의 성능을 확인한 사례가 있다. 하지만 실제 ITER나 한국형 핵융합실증로에 사용될 상용 디버터의 형상에 대응하기에는 상기 분말야금법에 의한 생산은 비용과 생산성 측면에서 상용화에 어려움이 있다. 본 연구에서는 계면의 열적 기계적 특성을 확보하면서도, 생산성과 비용 그리고 복잡한 형상제조에 모두 대응할 수 있는 방안으로서 L-PBF와 같은 금속 3D 프린팅을 통한 이종접합 재료 제조 및 이에 기반한 디버터 제작 기술을 제시하고자 한다.

[핵융합2-2 | 15:45] 조청강연

분무공정 기반 차세대 디버터 대면제용 텅스텐 합금 분말 합성 공정기술 개발 현황: 구혜영*, 송상우(한국재료연구원)

Keywords: 텅스텐, 분말, 디버터, 대면제, K-W

핵융합 디버터는 극한의 고열유속 및 고에너지 입자 조사 환경에 노출되므로, 우수한 내열성과 낮은 스퍼터링 수율을 갖는 텅스텐이 대표적인 플라즈마 대면재(Plasma-Facing Materials, PFM)로 적용되고 있다. 그러나 순수 텅스텐은 높은 연성-취성 천이온도(DBTT)를 지니며, 고온 재결정으로 인한 결정립 조대화 및 기계적 특성 저하라는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 고온 취화 거동을 억제하기 위해 미량의 칼륨(K)이 균일하게 도핑된 텅스텐 합금 분말의 화학적 합성 공정을 개발하였다. K의 균일 분산을 유도하고자 텅스텐 염과 K 염을 액상에서 균일 혼합한 후, 분무 공정을 통해 복합 전구체 분말을 제조하였다. 분무 기반 합성은 용

액 상태에서 균일하게 혼합된 전구체를 미세 액적으로 변환한 후 열처리를 통해 분말화하는 공정으로, 고상 혼합법에 비해 미량 첨가원소의 균일한 분포를 유도하기에 유리하다. 이렇게 합성된 전구체 분말을 이를 고순도 수소가스 분위기에서 환원열 처리하여 K가 미세 분산된 W 분말을 합성하고자 하였다. 출발 용액에서 텅스텐 대비 K의 농도를 변화시키며 열처리 후 분말의 형상 및 K 잔존 농도를 분석하였고 높은 휘발성을 갖는 K의 환원 공정 중 손실을 최소화하고 최종 W 분말 내 목표 수준의 K를 잔류시킴으로써, 후속 소결 및 열처리 과정에서 미세 K bubble 형성을 유도할 수 있는 분말 합성 공정을 확립하고자 하였다. 본 연구를 통해 합성된 분말 합성 기술은 향후 소결체 내 미세 K bubble 및 분산상 형성을 유도하여 결정립 성장과 재결정을 효과적으로 억제함으로써, 고온 미세조직 안정성이 우수한 차세대 핵융합 디버터용 텅스텐 대면재 개발에 기여할 것으로 기대된다.

[핵융합2-3 | 16:10] 조청강연

텅스텐 합금의 미세조직-기계적 물성 상관관계: 김찬진, 박범교, 이재훈, 이용민 (경희대학교), 신영각, 강건욱(연세대학교), 고원석(고려대학교), 이병찬*(경희대학교)

Keywords: 텅스텐, 분자동역학, 전위생성

텅스텐은 높은 녹는점과 열전도율, 낮은 스퍼터링 수율 등의 특징을 가지고 있어, 가혹한 플라즈마 환경을 견뎌야 하는 차세대핵융합로 대면소재로 거론되고 있다. 하지만 BCC 구조에서 오는 특성인 상대적으로 높은 연성-취성 천이온도(DBTT)가 큰 문제로 남아 있다. 이러한 문제를 극복하고 텅스텐 본연의 장점을 유지하기 위한 다양한 소재 개질 연구가 이루어 지고 있고 있다. 본 연구에서는 DBTT 개선책 중, 전위의 핵 생성이 촉진되어 연성이 향상되고 DBTT를 낮출 수 있다고 알려진 포타슘 도핑을이용한 미세구조 설계에 집중하였으며, 분자동역학을 이용하여 소성 변형의 발생시점에서부터 포타슘 도핑이 소성변형에 미치는 영향을 분석하였다. 구체적으로는, 인장시험과 나노압입시험을 수행하여 전위가 발생하는 과정과 포타슘의 영향을 특정하였으며, 향후 포타슘 첨가가 텅스텐의 기계적 신뢰성 개선에 기여하는 원자론적 근거를 제시할 수 있을 것으로 예상된다.

[핵융합2-4 | 16:35] 조청강연

Accumulation and Evolution of Irradiation Defects in BCC Tungsten: Atomistic Study: Keonwook Kang*, Hyunggyu Lee, Jungjin Cho, Younggak Shin(Yonsei University), Byeongchan Lee(Kyung Hee University)

Keywords: Tungsten, Irradiation Defects, Strong overlapping, Prismatic Loop, Molecular Dynamics

Molecular dynamics (MD) simulations are used to examine irradiation damage accumulation in bulk body-centered cubic (BCC) tungsten under repeated, spatially overlapping collision cascades. A periodic 100a × 100a × 100a cell is equilibrated at 400 K and then exposed to 200 sequential 30 keV primary knock-on atoms (PKAs) initiated within a confined central volume to encourage overlapping. Defects are quantified by Wigner-Seitz analysis and the prismatic loop character is determined with the dislocation extraction algorithm (DXA). The total surviving defect population grows strongly sublinearly with cascade count. Relative to a linear estimate obtained by summing single-cascade production using an arc-dpa-based prediction [1], cascade overlap markedly reduces retained defects via cascade–defect recombination [2]. The surviving defect count falls to roughly 50% of the linear expectation after the first five PKAs and to about 30% after 30 PKAs, indicating that damage retention is progressively suppressed as pre-existing defects interact with subsequent cascades. Beyond the reduction in defect numbers, cumulative irradiation alters defect morphology and loop character. Early cascades primarily leave isolated Frenkel pairs, whereas continued irradiation drives clustering and loop formation. Interstitial clustering predominantly results in stable ½<111> interstitial loops. Vacancies, in contrast, accumulate in cascade cores and follow a distinct pathway: <100> vacancy platelets form as stable precursors and, upon exceeding a critical size, collapse into <100> vacancy loops, explaining the prevalence of <100> vacancy loops. Additional accelerated MD in vacancy-rich environments further suggests that sustained vacancy absorption can transform a <100> vacancy loop into a ½<111> loop, providing an atomistic route for loop-character evolution observed in experiments [3]. Acknowledgement This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIT) (NRF-2022R1A2C2011266) and the NRF Nano and Materials Technology Development Program (RS-2024-00445448). Reference [1] K. Nordlund et al, Nature Comm. 9, 1084 (2018). [2] F. Granberg, J. Byggmästar, and K. Nordlund, J. Nucl. Mater. 556, 153158 (2021). [3] X. Yi et al, Phil. Mag. 93, 1715 (2013)

[핵융합2-5 | 17:00] 조청강연

핵융합 디버터용 텅스텐 소재의 이온조사 손상 거동 및 물성 평가: 강석훈*, 서주원, 서현우, 박선영, 임상엽, 진형하, 이승현, 이동원(한국원자력연구원)

Keywords: 핵융합 디버터, 텅스텐 적층 구조, 이온 조사, 물성 평가, 조사 손상

핵융합로의 대면재 디버터 소재는 가혹한 열속과 고입자속, 그리고 고에너지 중성자 조사 등 극한의 환경에 노출된다. 핵심 후보 소재로 꼽히는 텅스텐은 고온 강도가 우수하고 스퍼터링 수율이 낮다는 장점이 있지만, 연성-취성 천이온도(DBTT)가 높아 충격 인성이 떨어지고 조사 취화에 취약하다는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 텅스텐 소재의 내조사성을 평가하기 위한 이온 조사(Ion irradiation) 시험에 대해 소개한다. 제어된 DPA 선량 조건에서 미세조직의 변화와 격자 결함의 생성을 분석하고, 특히 적층 계면(Interface)에서 일어나는 결함의 소멸 및 거동을 관찰하였다. 이온 조사 전후의 계면 특성, 나노압입 경도, 열·기계적 물성 및 충격 특성 변화를 분석하여 조사 환경에서 나타나는 재료의 열화와 취화를 효과적 평가하는 방안을 모색하였다.

적층제조 및 분말
Room 1층 105/6호, 10월 28일

[적층1-1 | 09:00]
Defect-Informed Fatigue Behavior of Al–Mg–Zr Alloy with Increasing LPBF Productivity: Dae-Seo Kwon, Haoyue Wu, Jong-Hyeok Kwon, Dong-Kyu Kim*(Konkuk Univ.)
Keywords: Al-Mg-Zr alloy, High-cycle fatigue, High-productivity, Defect

This study investigates the fatigue behavior of an Al–Mg–Zr alloy fabricated by high-productivity laser powder bed fusion (LPBF), focusing on the relationship between increasing build rate and process-induced defects. A broad processing window was evaluated by varying laser power, scan speed, and layer thickness, and representative conditions corresponding to the optimal condition and approximately 140%, 180%, and 250% of the reference build rate were selected. Internal defects were characterized using X-ray micro-computed tomography in terms of their fraction, size, morphology, and spatial distribution. High-cycle fatigue tests and post-fracture fractography were further conducted to identify and quantify fatigue-critical defects associated with crack initiation. Micro-CT analysis revealed that increasing build rate resulted in larger and more irregular internal defects, together with an increase in defect fraction. Correspondingly, fatigue performance progressively decreased with increasing build rate. Fractographic observations showed that the size, morphology, and location of crack-initiating defects varied among the processing conditions and were closely associated with fatigue-life degradation and scatter. These results indicate that overall relative density alone is insufficient to fully describe the fatigue response of high-productivity LPBF materials. By integrating three-dimensional defect characterization with fatigue testing and fractography, this study provides a defect-informed interpretation of the fatigue behavior of LPBF Al–Mg–Zr alloy and highlights the importance of fatigue-critical defect characteristics in evaluating the trade-off between manufacturing productivity and fatigue reliability.

[적층1-2 | 09:15]
WAAM 공정으로 제조된 As-fabricated Al-5356의 표면 형상 및 미세조직 불균일성이 인장 거동에 미치는 영향: 서예진, 박령주, 전민수, 황원구(인하대학교 신소재공학과), 오민선, 감동혁(한국생산기술연구원), 이기안*(인하대학교 신소재공학과)
Keywords: Wire arc additive manufacturing, Al-Mg alloy, Surface morphology, Tensile properties, Anisotropy

Wire Arc Additive Manufacturing(WAAM)은 복잡한 형상의 대형 구조물 제작이 가능하며, 높은 적층 속도와 우수한 재료 이용 효율을 바탕으로 기존 기계가공을 대체할 수 있는 유망한 적층 제조 기술로 주목받고 있다. 그러나 아크 열원과 와이어 소재의 특성상 표면이 거칠게 형성되어 대형·복잡 부품 제작 시 표면 후가공이 어렵고, 이러한 표면 형상은 WAAM 소재에서 빈번하게 보고되는 기계적 이방성을 유발하는 핵심 요인으로 작용한다. 본 연구에서 사용된 Al-5356 합금은 WAAM 공정에서 타 알루미늄 합금에 비해 균일한 미세조직을 형성하므로, 표면 형상이 기계적 물성에 미치는 기여도를 독립적으로 평가하기에 적합하다. 이에 WAAM Al-5356 합금의 polished 시편(수평:PH, 수직:PV)과 as-fabricated 시편(수평:FH, 수직:FV)의 인장 파괴 거동을 비교하여 표면 형상이 기계적 물성에 미치는 영향을 규명하였다. 분석 결과, polished 시편은 PH·PV에서 각각 항복강도(YS) 110.47/105.45 MPa, 인장강도(UTS) 274.98/273.83 MPa, 연신율(EI) 37.22/33.07%로 방향에 관계없이 등방적인 물성을 나타내었다. 반면 as-fabricated 시편은 FH에서 YS 105.09 MPa, UTS 267.52 MPa, EI 35.26%로 polished 시편과 유사하였으나, FV에서는 YS가 105.00 MPa로 FH와 거의 동일한 수준이었음에도 UTS 251.65 MPa, EI 20.49%로 뚜렷하게 저하되었다. 이는 비드 중첩부 valley 영역이 국부적 미세조직 불균일성과 응력 집중원으로 작용해 수직 방향의 인장 강도와 연신율을 저하시킨 것으로 보인다. 이러한 결과를 바탕으로 WAAM Al 부품의 후가공 전 표면 형상과 기계적 특성 사이의 상관관계를 규명하였다.

[적층1-3 | 09:30]
L-PBF 공정으로 제조된 AlSi7Mg 합금 단일벽/이중벽 TPMS Lattice 들의 압축 변형 거동 및 방열 특성 : 조호근, 박소연, 오주환(인하대학교 / Inha Univ.), 안솔보름, 정현국((주)스타코 / Staco), 이기안*(인하대학교 / Inha Univ.)
Keywords: AlSi7Mg, Triply Periodic Minimal Surface, Double-wall, Laser Powder Bed Fusion, Compressive deformation, Heat transfer

Lattice structure는 단위체 구조가 주기적으로 반복되는 micro-architecture로, 단위체 형상에 따라 물리·화학적 물성 제어가 가능해 다목적 소재로 주목받고 있다. 이 중 Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) lattice는 연속적인 곡면과 높은 비표면적을 갖는 경량 구조체로, 우수한 기계적 특성과 열전달 특성을 동시에 구현할 수 있어 충격 흡수 구조 및 열관리 시스템 등 다양한 분야에서 주목받고 있다. 최근에는 기존 단일벽 TPMS의 곡면을 이중화하여 공간을 3개로 분리하는 이중벽 구조가 제안되었으나, 벽 구조 변화에 따른 압축 변형 및 붕괴 거동과 방열 성능을 종합적으로 평가한 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) 공정을 이용하여 AlSi7Mg 합금 기반의 단일벽 및 이중벽의 Diamond와 Gyroid TPMS lattice 들을 제조하고, 벽 구조에 따른 압축 변형 거동과 방열 특성을 비교 조사하였다. 압축 시험 결과, 단일벽 구조는 이중벽 구조보다 높은 항복강도와 first peak strength를 나타냈으나, first peak 이후 국부적인 변형 집중과 응력 감소가 발생하였다. 반면 이중벽 구조에서는 두 wall 사이의 기공 채널을 통한 굽힘 수용과 추가적인 하중 전달 경로에 의해 변형이 구조 전반으로 분산되어 안정적인 plateau 거동과 progressive collapse가 나타났다. 이러한 변형 거동의 차이는 DIC 및 압축 후 BSE/ECCI를 이용한 다중 스케일 분석에서도 확인

되었다. 단일벽 구조에서는 특정 영역에 변형이 집중되어 deformation band 역시 제한된 영역에 집중되어 형성된 반면, 이중벽 구조에서는 deformation band가 상대적으로 다방향으로 미세하게 분산되어 안정적인 압축 변형 거동을 나타냈다. 또한 Gyroid 구조의 방열 실험 결과, 이중벽 구조는 단일벽 구조보다 열저항은 높게 나타난 반면, 모든 유속 조건에서 높은 열교환 효율을 나타냈다. 이중벽 Gyroid의 높은 열교환효율은 이중벽 설계에 따른 열교환 표면적 증가와 좁은 유로 형성으로 인한 공기와의 열교환 증가에 기인한 것으로 판단된다. 이를 통해 이중벽 구조가 TPMS lattice의 압축 변형 안정성을 향상시키는 동시에 방열 성능에도 효과적으로 기여할 수 있음을 확인하였다. 상기 결과들을 바탕으로 기계적 안정성과 방열 성능을 동시에 고려한 다기능 TPMS lattice의 설계 방안에 대하여 함께 토의하고자 하였다.

[적층1-4 | 09:45]

미세석출물 제어를 통한 적층제조 AlSi10Mg 합금의 후열처리 설계: 한재연, 김준혁(국립창원대학교), 이지원, 조현철(두산에너빌리티), 홍현욱*(국립창원대학교)

Keywords: AlSi10Mg, Laser powder bed fusion (LPBF), Heat treatment design, Nanoscale precipitates, Strengthening contributions

AlSi10Mg 합금은 항공 및 방산 부품을 비롯한 다양한 산업 분야에서 활용되고 있으며, 최근 선택적 레이저 용융(Selective Laser Melting, SLM)과 같은 적층 제조 공정의 적용이 확대되고 있다. 그러나 적층 제조 공정의 빠른 냉각 속도로 인해 세립화된 cellular 조직과 비평형 공정상이 형성되며, 이로 인해 as-built 상태의 기계적 특성은 제한적이다. 따라서 후열처리를 통한 미세조직 제어가 일반적으로 적용되고 있다. 적층 제조된 AlSi10Mg 합금에는 주조 합금에 일반적으로 적용되는 T6 열처리와, 생산성 향상을 목적으로 열처리 시간을 단축한 Annealing 조건이 주로 적용되나, 이들 조건은 연신율 향상에는 효과적인 반면 as-built 대비 강도가 크게 감소하는 한계를 가진다. 이에 따라 적층 제조재의 특성을 고려한 새로운 열처리 조건 설계가 요구된다. 본 연구에서는 SLM으로 제조된 AlSi10Mg 합금을 대상으로 T6 및 Annealing 조건에서의 미세조직 변화와 상온 인장 특성을 고찰하였으며, 이를 바탕으로 강도 저하를 완화하면서 연신율 개선 효과를 확보하기 위한 신규 열처리 조건을 설계하였다. As-built 합금은 α-Al 결정립(약 20 μm)과 수백 nm 규모의 Si-eutectic network 구조가 관찰되었으며, Al 기지 내부에서는 뚜렷한 미세 석출물의 형성은 관찰되지 않았다. T6 열처리의 경우 용체화 과정에서 Si-network 붕괴와 Si 입자의 조대화가 발생하였고, 시효 처리 후 Al 기지 내부에 수 nm 크기의 GP zone 및 β” 석출물이 형성되었다. Annealing 조건에서는 Si-network가 부분적으로 붕괴되었으며, Al 기지 내부에는 수십 nm 크기의 Si 나노석출물이 관찰되었다. 인장 시험 결과, 두 조건 모두 as-built 대비 강도는 감소하고 연신율은 향상되었으며, Annealing 조건이 상대적으로 유리한 소성 변형 거동을 보였다. 이러한 결과는 Si-network 붕괴 정도와 석출물의 크기 및 분포 차이에 따른 변형 메커니즘 변화에서 기인한 것으로 판단된다. 한편, Si-network의 과도한 붕괴를 억제하면서 석출 강화를 유도한 신규 열처리 조건에서는 기존 T6 및 Annealing 대비 인장 강도와 비커스 경도의 향상이 확인되었으며, 미세 석출물의 나노스케일 분석과 강화 기구별 강도 기여분의 정량적 평가를 통해 그 원인을 분석하였다. 본 연구로부터 적층제조 AlSi10Mg 합금의 특성을 고려한 열처리 설계 전략 수립의 가능성을 제시하고자 한다.

[적층1-5 | 10:00]

Laser Powder Bed Fusion 공정변수가 Zr 첨가 7075 Al 합금의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향: 이유진*, 김세훈, 이빈*(경희대학교)

Keywords: Additive Manufacturing, 7075Al, Zr, Microstructure, Mechanical Properties

Additive manufacturing(AM) 공정 중 하나인 laser powder bed fusion(LPBF)은 고에너지 레이저를 이용하여 금속 분말층을 선택적으로 용융하고 이를 연속적으로 적층함으로써 복잡한 형상의 부품을 제조하는 공정이다. 7075 Al 합금은 대표적인 열처리형 Al–Zn–Mg–Cu계 합금으로, 시효 과정에서의 석출 경화를 통해 높은 강도를 나타내며 항공우주 및 자동차 산업에서 널리 사용된다. 그러나 7075 Al 합금은 용접성이 낮고 응고 균열에 취약하며, 높은 레이저 반사율등의 문제들로 LPBF 공정에 적용하는 데 어려움이 있다. Zr 첨가는 Al_3Zr 입자에 의한 이질 핵생성 촉진과 결정립 미세화를 통해 응고 균열을 억제할 수 있는 방안으로 연구되고 있다. 본 연구에서는 7075 Al 분말과 1 wt.% Zr이 첨가된 7075 Al 혼합 분말을 사용하여 100–450 W의 레이저 출력 범위에서 LPBF 시편을 제조하였다. 적절한 공정 조건을 선정하기 위해 레이저 출력, 스캔 속도, 해치 간격 및 단일·이중 스캔 전략을 체계적으로 변화시켰다. 제조된 시편의 상대 밀도와 비커스 경도를 측정하였으며, 광학현미경(OM)과 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 미세조직 및 결함을 분석하였다. 공정 변수 제어를 통해 상대 밀도는 91.9%에서 최대 약 95.0%로 향상되었으며, OM 이미지 분석을 통해 측정한 균열 및 결함 면적분율은 14.69%에서 최소 0.20%로 감소하였다. 선정된 공정 조건에서 Zr 첨가가 상대 밀도 증가에 미치는 영향은 제한적이었으나, 균열의 형성 및 전파를 효과적으로 억제하여 균열을 감소시켰다. 한편, 비구형 Zr 분말 첨가에 따른 분말 유동성 저하를 개선하기 위해 Zr 첨가 7075 Al 혼합 분말에 0.1 wt.% SiO_2를 추가로 혼합하였다. 그 결과 SiO_2가 첨가된 분말은 보다 균일한 분말층을 형성하였다. 또한 열처리 후 비커스 경도와 석출물 및 미세조직의 변화를 분석하여 석출 거동을 비교하였다. 이러한 결과는 LPBF 공정변수, Zr 첨가 및 분말 유동성을 종합적으로 제어함으로써 7075 Al 합금의 균열을 억제하고 적층 품질을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

[적층2-1 | 10:25]

Enhanced Dynamic Deformation Response and Energy Absorption Capability of LPBF Ti-6Al-4V under High Strain Rate Loading: Amir Aghababaei(Isfahan University of Technology, POSTECH), Ali Maleki*(Isfahan University of Technology), Eun Seong Kim(POSTECH), Abbas Ghaei, Mohsen Badrossamay(Isfahan University of Technology), Hyoung Seop Kim(POSTECH)

Keywords: Laser Powder Bed Fusion, Ti-6Al-4V, High Strain Rate, Split Hopkinson Pressure Bar, Fractography

Additive manufacturing of Ti-6Al-4V by laser powder bed fusion (LPBF) provides opportunities for developing lightweight structural

components; however, achieving reliable impact performance remains challenging due to its complex deformation behavior under dynamic loading. In this study, the high strain rate deformation response and energy absorption capability of LPBF Ti-6Al-4V were investigated using Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) testing. The dynamic stress–strain response, deformation stability, and energy absorption characteristics were systematically analyzed. The results reveal that fabrication conditions have a significant influence on the dynamic deformation response, resulting in enhanced energy absorption capability under high strain rate loading. The enhanced energy absorption is attributed to the more stable deformation response during dynamic compression. Fracture surface examination was further conducted to evaluate the failure characteristics after dynamic loading. These findings provide insights into improving the impact performance of LPBF Ti-6Al-4V components through process-controlled modification of their dynamic mechanical response.

[적층2-2 | 10:40]

Ti-6Al-4V 옥텟트러스 격자구조체의 미세조직에 따른 항복 이후 응력 강하 거동: 차다은(경상국립대학교), 박민우(서울대학교), 박준영, 전찬혁, Muhammad Ishtiaq(경상국립대학교), 안지혁(한국재료연구원), 김종형(국립부경대학교), 한흥남(서울대학교), 정경재(성균관대학교), 강성규*(경상국립대학교)

Keywords: 타이타늄 합금, 격자구조체, 적층제조, 미세조직, 기계적특성

격자구조체는 내부 기공 채널과 규칙적인 재료의 배열 덕분에 높은 비강도와 우수한 충격흡수능을 가지고 있다. 적층제조를 활용한 Ti-6Al-4V 합금 기반 격자구조체의 제조 및 연구는 활발히 진행되어 왔다. 그러나 적층제조의 열이력으로 인한 취성 a' 마르텐사이트 미세조직의 발달과 그로 인한 압축시 구조체의 조기파단이 보고되었다. 이에 본 연구에서는 열처리를 통해 취성 변형 특성을 가지는 미세조직을 제어함으로써 구조체의 기계적 안정성을 향상시켰다. 미세조직 제어를 위하여 적층제조 후 900도에서 10, 30, 60, 120분 열처리하여 미세조직을 제어한 후 압축 변형 거동을 분석하였다. 그 결과, 세가지 다른 스트럿 두께(3.3 mm × 3.3 mm × 3.3 mm 단위 구조체, 스트럿 두께 0.4, 0.5, 0.6 mm)를 가진 옥텟트러스 격자구조체에서 열처리를 하지 않은 격자구조체는 스트럿의 조기파단으로 인한 응력-변형율 곡선 상의 급격한 응력감소가 일어난 반면 열처리한 격자구조체는 응력감소 기울기가 증가하여 압축 변형시 기계적 안정성이 향상되었음을 확인하였다. 특히 그 효과는 0.5, 0.6 mm 시편에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 시뮬레이션 결과에서도 열처리한 시편에서 안정적인 변형 모드가 구현되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 적층제조 기반 Ti-6Al-4V 옥텟트러스 격자구조체의 기계적 특성 향상을 위한 전략을 제시할 수 있을 것이라 기대한다.

[적층2-3 | 10:55]

Cold-Sprayed Cu 적층재와 순동 판재의 냉간압연 후 기계적, 전기적 특성 비교: 김두원(한국재료연구원, 경상국립대학교), 민경문, 박한결, 이시환(한국재료연구원), 강성규*(경상국립대학교), 안지혁*, 이승건*(한국재료연구원)

Keywords: Copper, Cold spray, EBSD, Mechanical property, Electrical conductivity

Cold spray는 금속 분말을 고속으로 충돌시켜 고상 상태에서 적층하는 공정으로, 열영향을 최소화하면서 치밀한 금속 적층재를 제조할 수 있다. 본 연구에서는 cold-sprayed Cu 적층재의 냉간압연에 따른 미세조직, 기계적 특성 및 전기전도도 변화를 평가하고, 동일 조건으로 압연한 무산소동과 비교하였다. 순도 99.9% Cu 분말을 N_2 gas와 50 bar 조건에서 적층하였으며, 적층재와 무산소동을 단면적 감소율 97.5%까지 냉간압연하였다. 미세조직과 전위밀도는 각각 EBSD와 XRD를 이용하여 분석하였으며, 기계적 특성과 전기전도도는 각각 인장시험과 eddy current test를 통해 평가하였다. 압하율이 증가함에 따라 무산소동의 평균 결정립 크기는 압연 전 17.9 μm에서 압연 후 9.0 μm까지 감소한 반면, cold-sprayed Cu는 as-sprayed 상태에서 3.0 μm의 미세한 결정립을 나타냈으며 압연 후에도 유사한 결정립 크기를 유지하였다. 이는 초기 결정립이 조대한 무산소동에서는 냉간압연에 따른 결정립 세분화가 뚜렷하게 나타난 반면, cold-sprayed Cu에서는 적층 과정에서 형성된 미세 결정립이 후속 압연 후에도 유지되었음을 보여준다. 두 재료 모두 압하율 증가에 따라 전위밀도가 증가하였으며, 97.5%의 최대 압하율에서 가장 높은 전위밀도를 나타냈다. Cold-sprayed Cu는 모든 압하율에서 무산소동보다 높은 인장강도를 나타냈다. 특히 97.5% 압하율에서 무산소동과 cold-sprayed Cu의 인장강도는 각각 약 454 MPa와 482 MPa를 나타냈다. Cold-sprayed Cu의 높은 강도는 무산소동보다 미세한 결정립에 따른 Hall–Petch 강화에 주로 기인한 것으로 판단된다. 한편, cold-sprayed Cu는 97.5% 압연 후에도 약 99% IACS의 높은 전기전도도를 유지하였으며, 이는 무산소동과 유사한 수준이었다. 이러한 결과는 cold spray와 후속 냉간압연을 통해 순동 수준의 높은 전기전도도를 유지하면서 무산소동보다 향상된 강도를 갖는 Cu 소재를 구현할 수 있음을 보여준다.

[적층2-4 | 11:10]

Initial Powder size controlled Dynamic Recrystallization pathways in Hot Deformed $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ with Stable Thermoelectric performance: GANGALA ANIL KUMAR, Babu Madavali, Ji-Won Ha, Soon-Jik Hong*(Kongju National University , Center for Advanced Materials and Parts of Powders (CAMP2))

Keywords: Thermoelectric, Figure of merit, conductivity, Hot deformation, Texture

The thermoelectric performance of Bi_2Te_3-based materials is strongly influenced by interface-mediated carriers and phonon transport. In this study, the effect of initial powder size on interface evolution and thermoelectric behavior was investigated in water-atomized n-type $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ processed by spark plasma sintering (SPS) followed by hot deformation (HD). Three powder-size fractions (<53 μm, 53–100 μm, and 100–200 μm) were examined to establish correlations between recrystallization behavior, interface characteristics, and transport properties. X-ray diffraction confirmed the development of strong (00l) texture in all HD samples, while EBSD analysis revealed distinct distributions of continuous dynamic recrystallization (CDRX), partial dynamic recrystallization (PDRX), and deformed

regions depending on the initial powder size. The finest fraction promoted twin-rich and high-angle grain-boundary (HAGB) networks, whereas the coarsest fraction retained higher low-angle grain-boundaries (LAGB) and greater mobility preservation. TEM analysis revealed dense dislocation clusters, stacking faults, and deformation twins generated during hot deformation. These interface-defect features governed the balance between carrier transport and phonon scattering, leading to compensated thermoelectric behavior among the HD samples. The intermediate 53–100 μm powder fraction developed the most favorable interface architecture, combining a balanced grain boundary populations and a dense defect network. Consequently, achieved the optimum transport balance and the highest thermoelectric performance with a ZT of 0.83 at 450 K. Nanoindentation measurements additionally demonstrated stable local mechanical behavior despite the heterogeneous microstructure. The present results show that powder-size-controlled interface evolution provides an effective pathway for simultaneously tailoring thermoelectric transport and mechanical response in hot-deformed $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$ materials.

[적층2-5 | 11:25]

수평연속주조 및 열간등방압성형 공정 연계를 통한 고성능 소구경 Co합금계 와이어 개발 수평연속주조 및 열간등방압성형 공정 연계를 통한 고성능 소구경 Co합금계 와이어 개발: 강재영, 김대하*(포항소재산업진흥원), 옥진욱(비케이엠솔), 이승윤(에코에스엠)

Keywords: 수평연속주조, 열간등방압성형, Co 합금계 와이어

최근 발전, 항공우주, 방산 분야에서는 복잡한 형상을 맞춤형으로 제작하고 리드타임을 단축하기 위해 와이어 아크 적층제조(WAAM) 및 L-PBF 등의 적층성형 기술 도입이 가속화되고 있다. 특히 WAAM 공정은 정밀하게 가공되고 내부 결함이 없는 고품질의 금속 와이어를 필수적으로 요구한다. 로켓 엔진 연소실, 터빈 블레이드, 고온 가스 터빈 등 우주항공 부품은 초고온, 고압, 급격한 열충격이 공존하는 가혹한 환경에 노출되며, Co합금은 이러한 환경에서 산화와 마모를 견디는 핵심 소재이며, 기술 안보와 직결되어 해외 의존도를 낮추는 것이 시급한 상황이다. 그러나 Co합금계 와이어는 상온에서의 높은 가공 경화성으로 인해 연성과 인성이 낮고, 드로잉이나 압연 공정 중 단선이 쉽게 발생하여 제조가 매우 까다롭다. 또한, 주조 과정에서 고융점의 크롬, 텅스텐, 탄소 등이 결합하여 형성되는 경질 탄화물이 불균일하게 응고되거나 조대화되는 한계를 지니고 있어 이를 개선할 전문 공정이 필요하다. 본 연구에서는 수평연속주조장치 및 열간등방압성형(HIP) 연계 공정을 활용하여 직경 Φ6 mm의 소구경 Co계 와이어를 제조하였다. 수평연속주조는 용융된 합금을 수평 방향의 수냉식 주형에 연속 통과시켜 급냉 응고시킴으로써 일정한 단면의 봉재를 성형하는 설비이나, 공정 특성상 내부 미세 수축공, 미세 기포, 중심부 결함 등을 완전히 제거하기 어렵다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 적용된 열간등방압성형(HIP) 공정은 주조재 내부의 결함 및 미세 기공을 압착·제거하여 소재 및 용접부의 건전성을 극대화할 수 있다. 본 연구에서는 Stellite-6에 해당하는 고청정·균질 Co계 모합금 잉곳을 아르곤 분위기 하에서 제조하였으며, 산소 및 질소 농도를 최소화할 수 있는 공정 조건을 확립하였다. 제조된 잉곳을 1,550 ºC 이상의 고온 용탕 온도로 유지하고 아르곤 분위기를 형성한 상태에서 Φ6 mm 세라믹 오리피스를 통과시켜 길이 1~4M급의 안정적인 와이어를 제조하였다. 이후 열간등방압성형기를 활용하여 아르곤 분위기, 1,200 ºC, 1,000 bar, 4시간 유지 조건으로 치밀화 공정을 거쳐 내부 기공 및 결함을 완전히 제거하였다. Φ6 mm로 제조된 Co계 와이어의 미세조직 및 물성을 평가한 결과, 균일한 미세조직과 우수한 물성을 지닌 고품질 와이어를 성공적으로 제조할 수 있음을 확인하였으며, 하드페이싱 공정 적용을 통한 소재 건전성과 신뢰성을 확보하였다.

[적층3-1 | 13:30]

첨가재를 활용한 니켈계 초합금 적층제조에서의 응고균열 억제 및 기계적 물성 회복: 이태규*, 이민제(국립한밭대학교)

Keywords: 적층 제조, 복합분말, 니켈계초합금, 응고균열

난용접성 니켈계 초내열합금의 응고균열 억제는 CM247LC와 같은 고 γ' 부품의 적층제조에서 여전히 핵심 난제로 남아있다. 이를 해결하기 위해 공정변수 최적화, Hot Isostatic Pressing (HIP) 후열처리, 세라믹 입자 첨가, 조성 수정의 대표적으로 네 가지 접근이 시도되어 왔으나, 공정 최적화와 후처리는 균열의 근원을 제거하지 못하고, 입자 첨가는 작동 기구의 규명이 난해하며, 조성 재설계는 이 합금을 선택하는 이유인 금속 고유의 특성을 저해한다. 이에 본 연구는 레이저 분말 직접 에너지 적층 (Laser Powder Directed Energy Deposition, LP-DED)으로 제조된 CM247LC에서 ZrC, TiC, HfC 첨가가 응고균열 거동과 기계적 물성에 미치는 영향을 조사하였다. 신개념 복합분말 제조공정인 Surface modification and reinforcement transplantation (SMART) 공정을 사용하여 탄화물 첨가 분말을 제조하였으며, 이를 통해 동일한 적층 조건에서 탄화물 종류와 함량을 체계적으로 비교하였다. ZrC 첨가는 첨가량에 비례하는 응고균열 억제 효과를 보여 as-built 상태에서 균열 면적률을 최대 92%까지 감소시켜 가장 우수한 억제 효과를 보였고, HfC와 TiC는 동일 조건에서 부분적인 저감에 그쳤다. 이러한 ZrC의 균열 억제는 용해된 Zr이 응고 말기 잔류 액상에 농축된 뒤 2차 (Zr, Hf)C 탄화물로 재석출되어 균열 전파 경로인 최종 액막을 분절하는 용해-재석출 기구를 통해 발현되었다. 그 결과 ZrC 개질 합금은 HIP이나 후열처리 없이도 상온과 760 ºC 모두에서 강도와 연성의 균형 잡힌 동시 향상을 달성하였다. 탄화물 첨가제와 응고 말기 잔류 액상의 상호작용에 대한 이해를 심화함으로써, 본 연구 결과는 항공우주 및 발전 분야를 위한 적층제조 초내열합금의 응고균열 억제와 구조적 신뢰성 향상 전략의 길을 제시한다.

[적층3-2 | 13:45]

Wire arc additive manufacturing 공정을 이용한 Hastelloy C276의 미세조직과 인장 및 고주기 피로 특성: 이의종, 박소연(인하대학교), 박형우((주) 비에이티 파트너스), 이기안*(인하대학교)

Keywords: Wire arc additive manufacturing, Hastelloy C276, Microstructure, Tensile properties, Deformation mechanism, High Cycle Fatigue

Hastelloy C276은 준수한 고온 강도와 우수한 내부식성을 동시에 갖는 Ni기 내열 합금으로, 극한 부식 환경용 구조 부품에 사용되고 있다. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)은 arc를 열원으로 wire feedstock을 용융·적층하는 기술로, 높은 적층 속도를 바탕으로 대형 금속 부품 제조에 유망하다. 최근 WAAM Hastelloy C276의 미세조직 및 정적 기계적 특성에 대한 연구가 이루어졌으나, 반복 하중 조건에서의 내구성과 관련된 고주기 피로 특성에 대한 연구는 상대적으로 부족하다. 따라서 본 연구는 두께 20 mm 이상의 WAAM Hastelloy C276을 제작하고, 그 미세조직과 인장 및 고주기 피로 특성을 조사하였다. 제조된 시편은 적층 방향 (BD, Building direction)으로 성장한 수지상 구조가 발달하였으며, 일부 석출상이 수지상간 영역에 존재하였다. 방향에 따른 인장 시험 결과, 항복 강도는 BD 방향 평균 356.6 MPa, TD (Travel direction) 방향 평균 374.6 MPa로 나타났으며, 인장강도는 각각 평균 649.2 MPa와 699.4 MPa를 보였다. 연신율은 BD 방향에서 63%, TD 방향에서 65%로 측정되었다. 이는 기존 공정으로 제조된 Hastelloy C276 소재의 물성 범위에 근접한 강도–연성 조합을 나타내는 것으로 확인되었다. 추가로 각 방향에 대해 고주기 피로 시험을 수행한 결과, TD 방향으로 항복강도의 0.98배, BD 방향으로 항복강도의 1.1배의 응력 조건에서 fatigue limit이 확인되었다. 인장 특성과 상반되게 BD 방향에서 더 우수한 피로 특성을 나타냈는데, 이는 미세조직 차이에 의한 균열 전파 거동의 차이에 기인한 것으로 해석되었다. 상기의 결과들과 함께 파단면 분석 및 단면 EBSD 관찰을 바탕으로, WAAM Hastelloy C276 합금의 인장 및 피로 기구를 규명하고 그 응용 가능성에 대해서도 토의하고자 한다.

[적층3-3 | 14:00]

직접용융증착법 기반 in-situ 합금화된 IN625/IN718 합금의 미세조직 및 기계적 특성 평가: 권시은(경상국립대학교), 서성문(한국재료연구원), 김형섭(포항공과대학교), 이형수(한국재료연구원), 김정기*(경상국립대학교)

Keywords: Additive manufacturing, Inconel 625, Inconel 718, Directed energy deposition, heat treatment

우주발사체의 재사용 기술과 고추력 추진엔진 개발이 확대됨에 따라 터보펌프와 같은 핵심부품에는 고온 강도와 연성, 내열충격 특성을 동시에 만족하는 소재가 요구된다. 기존 터보펌프는 복잡한 형상으로 인해 다수의 부품을 용접 및 패스너로 조립하여 제작되며, 접합부에서의 응력 집중과 균열 발생으로 구조적 신뢰성이 저하될 수 있다. 이에 따라 일체형 제조가 가능한 적층제조 기술이 주목받고 있으며, 그중 직접용융증착법(Directed energy deposition, DED)은 서로 다른 금속 분말의 공급 비율을 실시간으로 제어하는 in-situ 합금화를 통해 다양한 조성의 합금을 제조할 수 있는 이점을 지닌다. 기존에는 STS 또는 Cu와 같은 이종 금속과 Ni 기반 초내열합금을 접합하기 위한 경사기능재료 연구가 활발히 수행되어 왔다. 다만, 물성 차이가 큰 이종 소재를 접합할 경우 계면에서 원소 편석과 잔류응력이 발생하여 균열 및 박리의 원인이 될 수 있다. 이에 본 연구에서는 고용강화와 석출강화라는 서로 다른 강화 메커니즘을 갖는 Inconel 625(IN625)와 Inconel 718(IN718)을 대상으로 DED 기반 in-situ 합금화를 이용하여 다양한 혼합비로 균일 적층한 후 직접 시효처리를 적용하여 미세조직 및 기계적 특성 변화를 분석하였다. 그 결과, IN718 함량이 증가할수록 interdendritic 영역에서의 Nb 편석과 Laves 상의 분율이 증가하는 경향을 확인하였다. 이러한 결과는 나노 석출물의 석출 거동 및 기계적 특성에 영향을 미칠 것으로 판단되므로 이에 대한 상관관계를 규명하고자 한다.

[적층3-4 | 14:15]

Binder Jetting 공정으로 적층 제조된 IN718 초내열 합금의 미세조직 및 인장 기계적 특성: 임지호, 고승범, 박소연(인하대학교), 정태준, 전호성(㈜자이브솔루션즈), 이기안*(인하대학교)

Keywords: 인코넬 718, 바인더제팅, 미세조직분석, 기계적 특성

Inconel 718 (이하 IN718)은 석출 강화를 기반으로 우수한 고온 강도와 내식성을 나타내어 항공 우주·발전 분야에 널리 사용되는 대표적인 Ni기 초내열 합금이다. 그러나 높은 가공 경화와 난삭성으로 인해 복잡형상 부품 제조에 어려움이 있어 적층 제조 적용이 활발히 요구되고 있다. Binder Jetting (BJ)은 금속 분말을 바인더로 선택적으로 결합한 후 탈지 및 소결을 통해 치밀화하는 non-fusion 기반 적층 제조 공정이다. BJ 적층 제조 공정은 용융–응고를 수반하지 않고 복잡한 형상의 제조와 다수 부품의 동시 생산이 가능하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 BJ 공정으로 제조된 IN718 소결체의 미세조직–기계적 특성 간 상관관계를 분석하였다. 소결체는 약 97.5%의 상대밀도를 보였으며, 바인더 유래 잔류 탄소 유입이 확인되었다. 미세조직 분석 결과, 평균 결정립 크기는 약 42 μm로 측정되었으며, 적층 방향에 따른 결정립 형상 및 크기의 뚜렷한 차이가 나타나지 않아 비교적 등방적인 미세조직이 형성되었음을 확인하였다. 또한 Nb-rich MC 탄화물은 액상 소결 기공 주위에서 클러스터 형태로 존재한 반면, 그 외 영역에서는 입계 및 입내에 분산되어 나타났으며, 결정립 내부에는 다수의 annealing twin이 형성되었다. 특히 탄화물이 연속적인 입계 네트워크를 형성하지 않고 분산된 미세조직을 나타냄에 따라, 소결체는 잔류 기공에도 불구하고 약 960 MPa의 인장강도와 42%의 높은 연신율을 나타냈다. 이러한 결과는 BJ 공정을 통해 균질한 IN718 미세조직과 우수한 강도–연성 조합을 확보할 수 있음을 보여주며, as-sintered 미세조직에 대한 이해가 향후 BJ IN718의 공정 최적화 및 후속 열처리 설계를 위한 기초 자료가 될 수 있음을 시사한다.

[적층3-5 | 14:30]

LPBF 기반 Inconel 718 Kelvin Plate 및 Truss 격자구조의 고온 압축 및 크리프 특성: 박소연, 오주환(인하대학교), 송영원, 고찬영(인천항공우주산학융합원), 이기안*(인하대학교)

Keywords: Laser powder bed fusion, Inconel 718 superalloy, Lattice structure, High temperature compression, High temperature creep

격자 구조체는 특정 unit cell이 주기적으로 반복되는 구조로, 경량성과 높은 비강도를 동시에 구현할 수 있으며 구조 형상에 따라 하중 전달 및 변형 거동이 크게 달라진다. Inconel 718(이하 718 합금)은 우수한 고온 강도와 내산화성을 지닌 대표적인 Ni 기반 초내열 합금으로 항공 우주 및 에너지 산업에 널리 활용되고 있다. 본 연구에서는 LPBF 공정으로 제조된 718 합금 기반 Kelvin plate (KP) 및 Kelvin truss (KT) 구조를 대상으로 650 ºC에서의 고온 압축 및 크리프 거동을 비교 분석하였다. 두 구조

들에 대하여 동일한 용체화 및 double aging 후열처리를 적용하여 미세조직 조건을 유사하게 제어하였다. 압축 시험 결과, KP의 항복강도는 상온 123.18 MPa에서 650 ℃ 101.40 MPa로 감소하였으며, KT는 65.51 MPa에서 59.80 MPa로 감소하여 고온에서도 KP가 더 높은 하중 지지 능력을 나타냈다. 또한 KP에서는 변형과 균열이 비교적 넓게 분산된 반면, KT에서는 strut 및 node를 중심으로 국부 변형과 균열이 집중되었다. 크리프 시험에서는 항복 강도의 약 50% 수준에서 KP가 50 MPa 조건에서 5일 이상 안정적인 2차 크리프 거동을 유지한 반면, KT는 30 MPa 조건에서도 약 2일 이후 3차 크리프로 전이되며 급격한 구조 붕괴가 발생하였다. 또한 응력 증가에 따라 겉보기 응력지수가 증가하였으며, 저응력 영역에서는 구조 형상에 따른 변형이, 고응력 영역에서는 국부 손상과 구조 붕괴가 보다 지배적으로 작용하였다. 파괴 분석 결과, KP는 손상이 구조 전반으로 분산되며 점진적인 파괴가 진행된 반면, KT는 제한된 하중 전달 경로를 따라 균열이 빠르게 전파되어 조기 붕괴가 발생하였다. 이상의 결과를 통해 plate 기반 Kelvin 구조가 고온에서 국부 변형 집중을 완화하고 하중 지지 능력과 크리프 안정성을 향상시키는 데 효과적임을 확인하였다.

[적층3-6 | 14:45]

DED로 적층한 CoCrMo/SUS316L 소재의 미세조직 과 기계적물성간의 상관관계 해석: 최민호(한국생산기술연구원 강원지역본부, 서울대학교 재료금속공학과), 안정환(한국생산기술연구원 강원지역본부, 연세대학교 기계공학과), 윤준원(한국생산기술연구원 강원지역본부, 고려대학교 재료금속공학과), 민경민(연세대학교 기계공학과), 한흥남(서울대학교 재료금속공학과), 이병수*(한국생산기술연구원 강원지역본부)

Keywords: CoCrMo, SUS316L, DED 적층, 3D 프린팅

이종간 금속 적층에 대한 연구는 여러 연구자들에 의해 활발하게 진행되고 있다. Adomako et al.은 이종간 금속 적층을 진행한 후 인장시험을 진행하여 형성된 Fusion zone이 인장강도에 미치는 영향을 연구하였으며 Manohar et al.은 철과 알루미늄의 이종간 금속을 적층하여 확산이 발생하여 기계적 물성이 하락하는 것을 확인하였다. 본 연구는 Directed Energy Deposition(DED) 공정을 이용해 CoCrMo과 SUS316L을 반복 교차 적층한 구조에서 체적 에너지 밀도 (Volume Energy Density, VED)가 미세조직과 기계적 물성에 미치는 영향을 연구하고자 한다. 기존 연구들이 서로 다른 금속을 일정 두께로 적층한 후 이종간 적층을 수행하는 방식에 주로 집중한 반면, 본 연구는 연속적 교차 적층 조건에서 체적 에너지 밀도의 변화가 계면 거동과 소재 간 확산, 그리고 기계적 거동에 미치는 복합적 영향을 분석하였다. 시편은 각 층 두께 0.8 mm, 총 적층 높이 50 mm로 제작하였다. Scanning speed는 1000 mm/min으로, 레이저 출력은 1200 W, 1500 W, 1800 W로 변화시켜 체적 에너지 밀도 범위를 48, 60, 71 J/mm^{3}로 설정하였다. 적층한 소재는 방전가공 및 화학적 부식을 거쳐 OM, SEM-EDS, EBSD을 이용하여 미세조직과 성분 분포를 관찰하였고, 인장시험과 Vickers 경도 측정을 통해 기계적 물성을 평가하였다. 체적 에너지 밀도가 증가함에 따라 melt pool line의 발달되어 이종금속간의 계면이 불균일해졌으며 SUS316L 층의 적층 두께가 감소하며 각 레이어의 수평형상의 계면이 유지되지 않는 점이 확인되었다. Columnar 결정립 조직들이 주로 관측되었으며 VED가 증가할수록 그 크기와 형상이 변화하였다. EDS 분석 결과에서 VED 증가에 따라 이전에 적층된 SUS316L로부터 Fe가 확산되어 CoCrMo 쪽의 Co 비율이 감소하였고, 반대로 Co가 SUS316L로 확산되는 경향이 관찰되었다. 이러한 성분 이동은 층별 경도 변화와 연관되어 체적 에너지 밀도가 증가할수록 CoCrMo 층에서는 경도가 감소하고 SUS316L 층에서는 경도가 증가하였다. 적층 방향과 평행한 시험편의 인장강도와 연신율은 체적 에너지 밀도가 증가할수록 모두 향상되었다. 이는 적층된 이종금속 계면에서 합금원소들(Fe, Co등)의 확산이 체적 에너지 밀도가 증가할수록 활발하게 발생하였기 때문이다. 모든 파단면에서 dimple 형태의 연성파괴 흔적이 관측되었다. 본 연구는 DED 기반 이종 금속 교차 적층 공정에서 체적 에너지 밀도가 미세조직 형성, 성분 확산, 층별 경도 및 인장거동에 복합적으로 영향을 미친다는 점을 확인하였다. 특히 체적 에너지 밀도의 증가는 층간 계면에서 Fe와 Co의 확산을 촉진하여 화학적 및 기계적 특성에 유의한 변화를 초래하였다.

[적층3-7 | 15:00]

LPBF 공정으로 제조된 탄소 첨가 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금의 4.2K 인장 변형 거동: 천재용(한국재료연구원, 극한재료연구소, 충남대학교 기계공학과), 윤성준(한국재료연구원, 극한재료연구소, 고려대학교, 미래융합소재학과), 정덕현(충남대학교 기계공학과), 장태진, 나영상*, 김영균*(한국재료연구원, 극한재료연구소)

Keywords: Laser Powder Bed Fusion, CoCrFeMnNi High-Entropy Alloy, Ultra-Cryogenic Temperature, Tensile Properties, Deformation Twinning, Microstructure

최근 액화수소 저장·운송 시스템과 우주·항공 구조부품의 적용이 확대됨에 따라, 초극저온 환경에서도 높은 강도와 우수한 변형능력을 유지할 수 있는 구조재에 대한 요구가 증가하고 있다. CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금 (High-Entropy Alloy, HEA)은 면심입방 (Face-Centered Cubic, FCC) 구조를 기반으로 우수한 극저온 기계적 특성을 나타내지만, 상대적으로 낮은 항복강도는 구조용 소재로의 적용에 한계로 작용한다. 이에 본 연구에서는 탄소가 첨가된 CoCrFeMnNi (CHEA)를 laser powder bed fusion (LPBF) 공정을 이용하여 제조하고, 298, 77 및 4.2 K에서 미세조직과 인장 변형 거동을 분석하였다. 미세조직 분석 결과, LPBF CHEA은 단일 FCC상을 유지하였으며, 적층 방향을 따라 성장한 epitaxial grain growth와 수십 nm 크기의 Cr-rich 탄화물이 관찰되었다. 인장시험 결과, LPBF CHEA는 시험온도가 감소함에 따라 항복강도와 인장강도가 지속적으로 증가하였으며, 모든 시험온도에서 wrought HEA보다 높은 강도를 나타냈다. 특히 4.2 K에서 항복강도와 인장강도는 각각 1324.9 MPa와 1766.9 MPa에 도달하였으며, 동시에 27.8%의 파단연신율을 유지하였다. 추가적으로 인장시험 후 시편의 미세조직 관찰을 통해 LPBF CHEA의 초극저온 변형 거동을 분석하였다.

[적층4-1 | 15:25]

L-DED로 제조된 Co-Cr-Fe-Mn-C 형상기억합금의 직접 시효에 따른 형상 기억 특성 거동: 박민수, 이욱진*(부산대학교)

Keywords: 적층 제조, Laser direct energy deposition, 형상 기억합금, 마르텐사이트변태

Co-Cr-Fe-Mn 형상기억합금은 Ni을 Co 치환한 Co-Cr-Fe-Mn-Ni 계 고엔트로피 합금으로 Face centered cubic (FCC)상과 Hexagonal close-packed (HCP)상 간의 마르텐사이트 동소변태에 의한 형상기억특성이 발현된다고 보고되고 있다. 한편, 탄화물 석출은 FCC/HCP 계 형상기억합금의 특성을 향상시키기 위한 효과적인 방법으로 알려져 있다. 탄화물과 기지 사이의 격자 불일치에 의해 탄화물 주변에 적층결함이 형성될 수 있다. 이러한 적층결함은 HCP상의 embryo로 작용하여 FCC상에서 HCP상으로 마르텐사이트 변태를 촉진함으로써 형상기억특성을 향상시킨다. 이와 같은 석출물 효과를 극대화하기 위해서는 기지 내에 미세한 석출물이 균일하게 분포하는 것이 중요하다. 적층 제조 과정에서 형성되는 응고 셀 구조는 석출물의 우선 핵생성 사이트로 작용하여 미세한 석출물의 균일한 분포를 촉진 할 수 있다. 또한 본 합금계에서는 FCC 안정화 원소인 Mn이 셀 벽에 편석됨에 따라 셀 내부의 Mn 함량이 상대적으로 감소한다. 이에 따라 셀 내부의 FCC 안정도가 낮아져 FCC에서 HCP로의 마르텐사이트 변태가 촉진될 수 있다. 따라서 용체화 처리 없이 셀 구조를 유지한 상태에서 직접 시효처리를 수행할 경우, 셀 구조를 석출물의 핵생성 사이트로 활용하는 동시에 셀 내부에서의 마르텐사이트 변태를 촉진하여 형상기억특성 향상에 유리할 것으로 기대된다. 본 연구에서는 L-DED로 제조된 Co-19Cr-20Fe-18Mn-0.3C (wt.%) 합금에 직접 시효처리를 적용하고, 이에 따른 탄화물 석출 거동과 형상기억특성의 변화를 분석하였다.

[적층4-2 | 15:40]

이중 노즐 DED로 제조된 Cr-Mo 조성 구배 Co-Cr-Fe-Ni-Mo 고엔트로피 합금 코팅의 부식 거동: 이정민, 전혜원, 조성재(국립공주대학교 신소재공학부), 홍순직, 문종언*(국립공주대학교 신소재공학부, 첨단분말소재부품센터(CAMP2))

Keywords: 에너지 직접 증착(DED), 고엔트로피 합금(HEA), Composition Gradient, 부식 거동

에너지 직접 적층(Directed Energy Deposition, DED)은 다중 노즐을 이용한 공정 중 합금화를 통해 적층 위치와 높이에 따라 소재의 조성을 선택적으로 제어할 수 있는 적층제조 기술이다. 선행 연구에서는 조성이 균일한 단일층 Co–Cr–Fe–Ni–Mo 고엔트로피 합금(High-Entropy Alloy, HEA) 코팅을 대상으로 Cr과 Mo 함량 변화가 부식 특성에 미치는 개별적인 영향을 규명하였다. 그러나 실제 다중 소재 적층구조에서 나타나는 층별 조성 변화와 공간적 조성 분포가 부식 거동에 미치는 영향에 대해서는 충분한 연구가 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 이중 노즐 DED 공정을 이용하여 Cr과 Mo 함량이 적층 층별로 변화하는 Co–Cr–Fe–Ni–Mo HEA 코팅을 제조하고, 조성 변화에 따른 부식 거동을 체계적으로 분석하였다. 적층 중 각 분말의 공급 속도를 동적으로 조절하여 Cr-lean, Mo-rich 조성에서 Cr-rich, Mo-lean 조성까지 단계적으로 변화하는 층상 조성 구배 구조를 단일 적층재 내에 구현하였다. 각 조성 영역의 부식 특성을 평가하기 위해 3.5 wt.% NaCl 수용액에서 전기화학적 부식 시험을 수행하였다. 또한 부식 거동과 부동태 피막의 상관관계를 분석하기 위해 X선 광전자 분광법(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)을 이용하여 표면 피막의 화학적 조성을 분석하고, 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM)을 이용하여 부식 전후의 미세조직 및 국부 부식 양상을 분석하였다.

[적층4-3 | 15:55]

Enhanced Tensile Performance of Additively Manufactured CoCrFeMnNi HEA through Lamination with SAF 3207 Stainless Steel across Temperature Regimes and under Hydrogen Charging: Jalal Kangazian Kangazi, Soung Yeoul Ahn, Jae Heung Lee, Jumi Choi, Gyumi Han, Bon Woo Koo, Ho Hyeong Lee, Dong-Woo Suh, Hyoung Seop Kim*(Pohang University of Science and Technology (POSTECH))

Keywords: Additive Manufacturing, High-entropy Alloy, Heterostructure Materials, Hydrogen-assisted cracking, Cryogenic Deformation

This work presents improved tensile properties of a directed energy deposition (DED)-fabricated CoCrFeMnNi high-entropy alloy (HEA) through the development of a laminated heterostructure with SAF 3207 hyper duplex stainless steel. The laminated architecture, comprising a fully austenitic microstructure with a periodic compositional gradient, introduced mechanical heterogeneity that promoted strain partitioning and hetero-deformation-induced (HDI) back-stress hardening during deformation. Compared with the monolithic CoCrFeMnNi HEA, the laminated heterostructure exhibited higher strength while maintaining comparable ductility, with the strengthening effect becoming more pronounced at cryogenic temperatures and accompanied by enhanced work hardening. After hydrogen charging, the laminated heterostructure retained superior strength and work-hardening capability while exhibiting hydrogen-embrittlement sensitivity comparable to that of the monolithic CoCrFeMnNi HEA under slow-strain-rate tensile testing. The improved mechanical performance was primarily attributed to the synergistic effects of composition-dependent strengthening, dislocation accumulation, and HDI back-stress hardening. Furthermore, the fully austenitic microstructure effectively suppressed hydrogen-assisted damage, in contrast to the severe austenite/ferrite interfacial cracking observed in monolithic SAF 3207. Hydrogen-induced damage in both the laminated heterostructure and the monolithic CoCrFeMnNi HEA was governed by the combined effects of hydrogen-enhanced localized plasticity and hydrogen-enhanced decohesion.

[적층4-4 | 16:10]

CoCrFeMnNi 고 엔트로피 합금 분말 산소함량이 DED 공정으로 제조된 적층재의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향: 백건우, 김대현, 김현중, 한채원, 김영태(국립공주대학교 및 첨단분말소재부품센터), 김형섭(포항공과대학교), 홍순직*(국립공주대학교 및 첨단분말소재부품센터)

Keywords: Powder oxygen content, High entropy alloys, CoCrFeMnNi, Directed Energy Deposition, Microstructure

본 연구에서는 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금 분말의 산소 함량이 Directed Energy Deposition으로 제조된 적층재 미세조직 및

기계적 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 분말의 산소 함량이 650-3400 ppm으로 증가함에 따라 표면에 Mn-rich 산화물과 Mn–Cr spinel 산화물의 형성이 촉진되었으며, 이와 함께 레이저 흡수율은 68.6%에서 73.4%로 증가하였다. 분말의 산소 함량이 1650 ppm 이하인 경우, 균열 없이 상대밀도 99% 이상의 치밀한 적층재를 얻을 수 있었으며, 산소함량이 증가함에 따라 melt pool의 폭 대 깊이 비가 증가하였다. 3400ppm에서는 레이저 흡수율 증가로 인한 열충격에 의해 melt pool을 관통하는 매크로 균열이 관찰되었다. 인장 특성 분석 시 분말 산소함량 1650ppm까지 인장강도, 항복강도, 연신율은 5% 내외의 미미한 차이를 나타내었다. 이러한 결과들은 분말의 산소 함량이 DED 공정 중 결함 형성, ???–분말 상호작용, 그리고 기계적 거동에 영향을 주는 인자임을 보여준다. 결론적으로 본 연구는 고품질 분말의 불필요성과 합금에 따른 무균열 및 안정적인 인장 특성을 갖는 분말의 임계 산소 함량 연구의 필요성을 시사한다.

[적층4-5 | 16:25]

Effect of Stacking Fault Segregation on Creep Strength in Additively Manufactured Superalloys: Tae Gyeong Kim, A Reum Lee, Hyun Uk Hong*(Changwon National Univ.), Won Suk Ko(Korea Univ.), Myeong Se Kim, Yo Seop Kim(KOHIPS)

Keywords: Local Phase Transformation, Superalloy, Creep, Segregation, Deformation

Additive manufacturing of Ni-base superalloys with high γ′ fractions remains challenging due to severe hot cracking and strain age cracking (SAC). In this study, a novel alloy design strategy is proposed in which the γ/γ′ lattice misfit is intentionally reversed from negative to positive, thereby inducing compressive coherency stress upon γ′ precipitation to suppress cracking during laser powder bed fusion (L-PBF). The newly designed alloy, designated 738P-2, exhibited a nearly crack-free microstructure in the as-built condition, and its SAC susceptibility was reduced by up to 95.1% compared with the reference alloy IN738LC. HR-XRD measurements confirmed that the positive misfit (δ = +0.31% at room temperature) was maintained throughout the SAC-critical temperature range of 700–1000 °C. Notably, creep tests conducted at 760 °C/552 MPa revealed that 738P-2 achieved a creep life comparable or even superior to that of conventional cast alloys, despite its lower γ′ fraction of approximately 45%. Cs-corrected STEM analysis of the crept specimens identified superlattice intrinsic stacking faults (SISFs) within the γ′ precipitates, along which Co and Cr segregation and a local γ′-to-χ phase transformation were observed. This segregation-induced phase transformation along the SISFs acts as an effective barrier against subsequent dislocation motion, providing a new strengthening mechanism that compensates for the reduced γ′ fraction. Consequently, the proposed design strategy enables the simultaneous achievement of excellent printability and superior high-temperature mechanical performance.

[적층4-6 | 16:40]

LPBF를 통해 제작한 우수한 고정밀 마이크로 추력기: 김래언, 김형섭*(POSTECH)

Keywords: 마이크로 추력기, LPBF, Ti64

소형 위성 플랫폼의 발전으로 엄격한 질량 제한 조건 하에서 구조적 견고성을 제공하는 마이크로 추진기에 대한 수요가 증가하고 있다. LPBF 기술은 복잡한 형상 구현을 가능하게 하지만, 이러한 장치를 제작하는 데 있어 치수 부정확성, 제한된 형상 해상도, 그리고 기계적 신뢰성과 추진 성능을 저하시킬 수 있는 공정 유발 결함과 같은 중요한 문제점이 존재해 왔습니다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 최소 해상 가능 형상 크기인 180 μm까지 작은 얇은 벽(0.5T)의 분해 챔버와 인젝터 오리피스를 제작할 수 있도록 공정을 최적화하여 무게를 크게 줄이고 정밀도를 향상시켰다. 치수 정확도 측정 결과, 설계 사양 대비 최대 편차가 4.1%에 불과했으며, 상대 밀도는 약 99.9%로 매우 높았다. 700 ºC에서 60초간 진행된 고온 연소 시험에서, 마이크로 추진기는 구조적 열화 없이 안정적이고 반복 가능한 성능을 보여주었다. 추진 효율 또한 높았으며, 특성 속도 효율과 비추력 효율은 각각 84.3%와 91.7%를 달성하였다. 치수 정확도와 형상 해상도의 조합으로 안정적인 추진 성능을 구현할 수 있었으며, 이는 해당 추력 수준의 마이크로 추진기 제작에 적용 가능성을 시사하고 기존 MEMS 기반 제조 방식의 실현 가능한 대안으로 제시한다.

학생세션
Room 1층 103호, 10월 28일

[학생1-1 | 09:00]

Predicting Space Groups of Double Perovskites by LLM with Dynamic Few-Shot Learning: Jongwon Park[1*], Inhyo Lee[1], Jinun Byun[1], Junhee Shin[1], Seunghwa Ryu[1]; 1Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Republic of Korea

Keywords: Double perovskites, Space-group, Few-shot learning, Large Language Models,

Double perovskites(DPs), generally represented by $A_2BB'X_6$, have been widely studied as functional materials because their compositional flexibility enables diverse electronic, optical, thermoelectric, and magnetic properties[1-3]. These properties are strongly affected not only by composition but also by the stable crystal structure, especially the space group(SG)[4,5]. Recent generative AI models such as MatterGen and DiffCSP++ can generate crystal structures conditioned on target space groups or symmetry information, suggesting that prior SG prediction can narrow the search space for symmetry-guided crystal generation[6,7]. Therefore, predicting plausible SG candidates from a given DP composition is an important step for accelerating DP materials discovery. However, SG prediction remains difficult because available DP datasets are strongly imbalanced toward a few dominant SG classes[8,9]. Conventional data driven models can therefore show acceptable overall accuracy while failing to predict underrepresented, or minor, SG classes.

In this study, we propose Dynamic and Diversity-enhanced few-shot retrieval and Rule-Guided Inference for Space Group Prediction(DyRIS), a framework for predicting ranked Top-3 SG candidates of DPs by combining large language model reasoning, dynamic few-shot retrieval, and crystallographic prior knowledge. As summarized in Figure 1, DyRIS does not use the Large Language Model(LLM) as a direct black box classifier; instead, it uses the LLM as an inference agent that integrates retrieved examples, quantitative indicators, B/B′ cation ordering information, and major SG bias-control rules.

The dataset was constructed from thermodynamically filtered DP entries[10]. After applying stability filtering and removing SG classes with three or fewer samples, the final dataset contained 3,528 DPs across 19 SG classes. Among them, SG 14 and SG 225 were dominant, containing 1,081 and 1,460 samples, respectively. These two classes accounted for approximately 72% of the dataset and were defined as major SGs, while the remaining 17 classes were treated as minor SGs.

For each DP composition, DyRIS constructs composition based descriptors from four feature groups: DP specific features, site specific features, B-site-derived features, and Magpie features. DP specific features include tolerance factor, octahedral factor, Shannon ionic radii, and oxidation states, which are related to perovskite stability, octahedral tilting, and symmetry lowering[11-13]. Site specific features encode elemental information at the A, B, B′, and X sites. B-site-derived features describe the oxidation state, ionic radius, and electronegativity differences between B and B′ cations, which are important for cation ordering and structural distortion[14,15]. Magpie features provide additional composition-level chemical statistics[16].

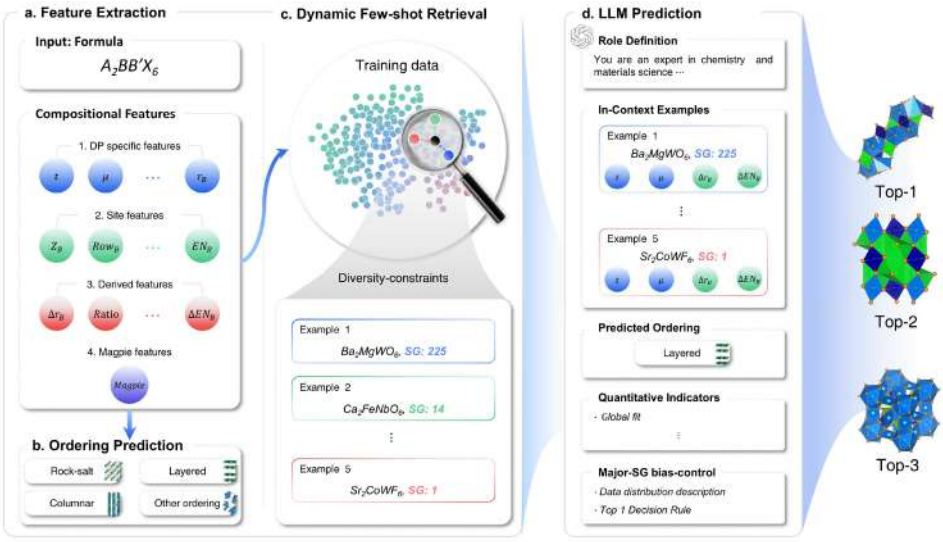


Fig. 1. Overview of DyRIS for double perovskite space group prediction, combining feature extraction, B/B′ ordering prediction, diversity-enhanced few-shot retrieval, and rule-guided LLM inference for Top-3 candidate ranking.

DyRIS then performs diversity-enhanced dynamic few-shot retrieval. For each query composition, relevant in-context examples are selected from the training data in a weighted embedding space[17]. Unlike conventional nearest neighbor retrieval, DyRIS allows at most one example from each SG class in the retrieved in-context example set. This constraint prevents the prompt from being dominated by major SGs and increases the probability that minor SG candidates are included among the retrieved examples[18,19].

After diversity-enhanced retrieval, DyRIS performs rule-guided SG inference using the LLM. In this step, B/B′ cation ordering information is provided as a structural prior using a separate PyCaret based ordering surrogate model trained on the training data[20]. For each query composition, this model predicts the probabilities of rock-salt, layered, columnar, and other rare ordering types, which are provided to the LLM together with retrieved examples, ordering compatible SG candidates, and quantitative indicators. The ordering prediction is treated as soft structural prior information rather than as a deterministic label. The quantitative indicators include the Combined score, which evaluates the local density of each candidate SG near the query composition[21], the Global fit, which evaluates distributional agreement between the query composition and each candidate SG[22], and feature wise consistency metrics that compare average feature agreement, worst feature mismatch, and feature level dominance. The final Top-3 SG candidates are ranked by jointly considering retrieval evidence, quantitative indicators, ordering compatibility, and major SG bias-control rules.

DyRIS was evaluated against representative baseline models, including a PyCaret based model, CrabNet, and CRYSPNet[9,23], using both overall and minor SG specific metrics to account for severe class imbalance. At a training data ratio of 0.5, DyRIS showed the most balanced performance across the evaluated metrics, achieving competitive Overall Top-1 accuracy compared with CrabNet while obtaining the best Overall Top-1 macro-F1 score and the best performance across all minor SG metrics. Specifically, DyRIS achieved 0.4266 Overall Top-1 accuracy, 0.3846 Overall Top-1 macro-F1, 0.6994 Overall Top-3 accuracy, 0.3762 Minor SG Top-1 accuracy, 0.3388 Minor SG Top-1 macro-F1, and 0.6658 Minor SG Top-3 accuracy. These results indicate that DyRIS improves class balanced SG prediction under severe imbalance rather than simply favoring dominant SG classes.

The effect of training data ratio was further examined at training ratios of 0.3, 0.5, and 0.8. DyRIS achieved the highest Overall Top-1 macro-F1 score across all training data ratios, showing robust class balanced performance. For minor SGs, DyRIS consistently achieved the best Minor SG Top-1 accuracy and Minor SG Top-1 macro-F1 score. Although the PyCaret based model showed strong Top-3 performance in the high data regime, DyRIS remained competitive and showed clearer advantages in minor SG Top-1 prediction.

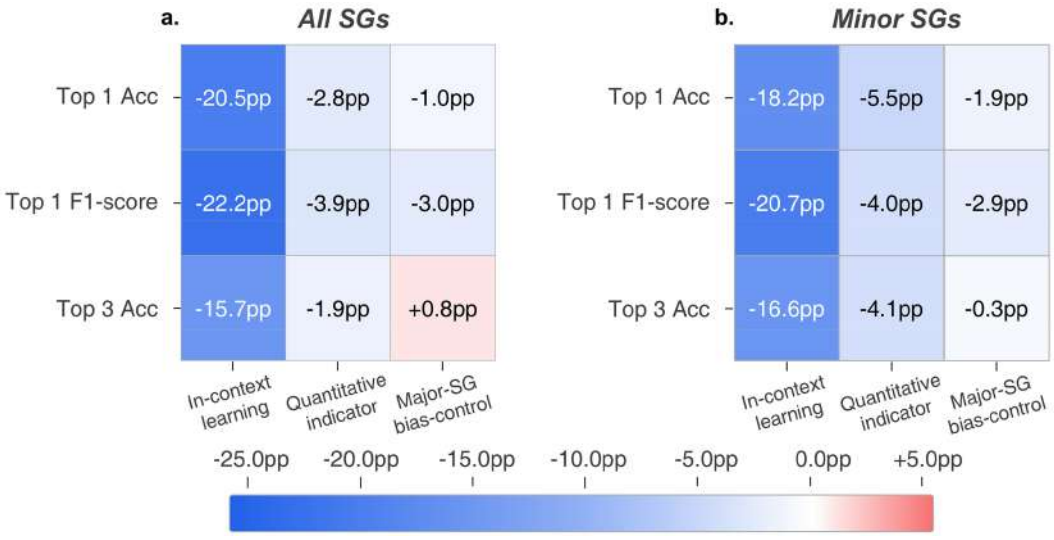


Fig. 2. Ablation analysis of DyRIS. Performance changes after removing in-context examples, quantitative indicators, and major SG bias-control are shown for (a) all SGs and (b) minor SGs. Values indicate percentage point changes relative to the full DyRIS framework.

As shown in Figure 2, the ablation study confirmed that each component of DyRIS contributes to the final prediction performance. Removing retrieval-based in-context examples caused the largest performance degradation, confirming that dynamic few-shot retrieval is essential for constructing plausible SG candidates. Removing quantitative indicators also reduced performance, especially for minor SGs, indicating that local density and distributional fit evidence helps stabilize candidate ranking. Major SG bias-control helped mitigate the over ranking of SG 14 and SG 225.

Finally, classifier and ranker based replacement experiments showed that the final rule-guided LLM inference step is not easily replaced by conventional machine learning re-ranking models. Even when the same retrieved candidates and quantitative evidence were provided, DyRIS outperformed the best learned re-ranking models across all evaluated metrics and training data ratios. This suggests

that the advantage of DyRIS comes from evidence-integrated reasoning rather than from a simple fixed scoring rule.

In conclusion, DyRIS demonstrates that dynamic few-shot retrieval and rule-guided LLM inference can improve SG prediction for imbalanced DP datasets. By combining retrieval evidence, quantitative descriptors, B/B′ ordering information, and major SG bias control, DyRIS achieves competitive overall performance while improving prediction for underrepresented SG classes. These results suggest that LLM based inference leveraging crystallographic prior knowledge and structured quantitative evidence can serve as a useful complement to conventional data driven models for materials structure prediction, especially in class imbalanced materials datasets.

References

1) Kangsabanik, J., Sugathan, V., Yadav, A., Yella, A. & Alam, A. Double perovskites overtaking the single perovskites: A set of new solar harvesting materials with much higher stability and efficiency. Phys. Rev. Mater. 2, 055401 (2018).
2) Kumar, V., Kathiravan, A. & Jhonsi, M. A. Beyond lead halide perovskites: Crystal structure, bandgaps, photovoltaic properties and future stance of lead-free halide double perovskites. Nano Energy 125, 109523 (2024).
3) Ghosh, S., Shankar, H. & Kar, P. Recent developments of lead-free halide double perovskites: a new superstar in the optoelectronic field. Mater. Adv. 3, 3742–3765 (2022).
4) Kozlovskiy, A., Kenzhina, I. & Zdorovets, M. Synthesis, phase composition and magnetic properties of double perovskites of A(FeM)O4-x type (A = Ce; M = Ti). Ceram. Int. 45, 8669–8676 (2019).
5) Qu, H. et al. B-site co-doping-induced symmetry breaking for enhanced optoelectronic properties in vacancy-ordered double perovskites. J. Mater. Chem. A 14, 17197–17206 (2026).
6) Zeni, C. et al. A generative model for inorganic materials design. Nature 639, 624–632 (2025).
7) Jiao, R., Huang, W., Liu, Y., Zhao, D. & Liu, Y. Space Group Constrained Crystal Generation. arXiv:2402.03992 (2024).
8) Venkatraman, V. & Carvalho, P. A. On the value of popular crystallographic databases for machine learning prediction of space groups. Acta Mater. 240, 118353 (2022).
9) Liang, H., Stanev, V., Kusne, A. G. & Takeuchi, I. CRYSPNet: Crystal structure predictions via neural networks. Phys. Rev. Mater. 4, 123802 (2020).
10) Tawfik, S. A. et al. Machine learning-based discovery of vibrationally stable materials. NPJ Comput. Mater. 9, 5 (2023).
11) Shannon, R. D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. Acta Crystallogr. A 32, 751–767 (1976).
12) Travis, W., Glover, E. N. K., Bronstein, H., Scanlon, D. O. & Palgrave, R. G. On the application of the tolerance factor to inorganic and hybrid halide perovskites: a revised system. Chem. Sci. 7, 4548–4556 (2016).
13) Fu, W. T. & IJdo, D. J. W. On the space group of the double perovskite Ba2PrIrO6. J. Solid State Chem. 178, 1312–1316 (2005).
14) Vasala, S. & Karppinen, M. A2B′B″O6 perovskites: A review. Prog. Solid State Chem. 43, 1–36 (2015).
15) Bokov, A. A., Protsenko, N. P. & Ye, Z.-G. Relationship between ionicity, ionic radii and order/disorder in complex perovskites. J. Phys. Chem. Solids 61, 1519–1527 (2000).
16) Ward, L., Agrawal, A., Choudhary, A. & Wolverton, C. A general-purpose machine learning framework for predicting properties of inorganic materials. NPJ Comput. Mater. 2, 16028 (2016).
17) Liu, J. et al. What Makes Good In-Context Examples for GPT-3? In Proceedings of Deep Learning Inside Out (DeeLIO 2022): The 3rd Workshop on Knowledge Extraction and Integration for Deep Learning Architectures, 100–114 (Association for Computational Linguistics, Stroudsburg, PA, USA, 2022).
18) Zhu, Y., Wang, Z. & Gao, D. Gravitational fixed radius nearest neighbor for imbalanced problem. Knowl. Based Syst. 90, 224–238 (2015).
19) Zhao, T. Z., Wallace, E., Feng, S., Klein, D. & Singh, S. Calibrate Before Use: Improving Few-Shot Performance of Language Models. arXiv:2102.09690 (2021).
20) Anderson, M., Greenwood, K., Taylor, G. & Poeppelmeier, K. B-cation arrangements in double perovskites. Prog. Solid State Chem. 22, 197–233 (1993).
21) Cunningham, P. & Delany, S. J. k-Nearest Neighbour Classifiers: A Tutorial. ACM Comput. Surv. 54, 1–25 (2022).
22) De Maesschalck, R., Jouan-Rimbaud, D. & Massart, D. L. The Mahalanobis distance. Chemom. Intell. Lab. Syst. 50, 1–18 (2000).
23) Wang, A. Y.-T., Kauwe, S. K., Murdock, R. J. & Sparks, T. D. Compositionally restricted attention-based network for materials property predictions. NPJ Comput. Mater. 7, 77 (2021).

[학생1-2 | 09:15]

CNN/GNN Surrogate Models for Phase-Field Modeling of Ferroelectric HZO Thin Films : Single-Phase Inverse Design and the Multi-Phase Advantage: 방진현(발표자)[1*], 슈가탄 산디프[1], 판카즈[1], 차필령[1]; 1. 국민대학교

Keywords: Convolutional Neural Network, Graph Neural Network, Surrogate Model, Multi-phase Ferroelectric, Inverse Design

1. 연구의 목적과 의의

HZO(Hf1-xZrxO2) 박막의 강유전 특성은 다결정 미세구조에 크게 좌우된다. 이 관계를 다루는 표준 도구가 Phase-Field Modeling(PFM)이지만 RTX 3090에서 한 조건에 약 50분이 걸려, 미세구조를 바꿔가며 수백 번 이상 돌려야 하는 탐색이나 역설계에서는 사실상 벽이 된다. 최근 GNN으로 단일상 HZO의 PFM을 대체하는 시도가 보고되었으나[1], 미세구조를 결정립 그래프로 넣는 것이 최선인지 결정 방위를 공간 좌표째 담는 voxel 이미지가 나은지는 정리되지 않았다. 또 실제 HZO에는 ferroelectric(FE), antiferroelectric(AFE), dielectric(DE)이 함께 존재하는데 단일상의 결론이 여기서도 유지되는지 확인된 바 없다. 본 연구에서는 두 표현을 같은 조건에서 비교하고, 학습된 대리모델을 미분해 목표 물성을 내는 Landau 계수를 거꾸로 찾은 뒤, 이를 3상 계로 확장하였다.

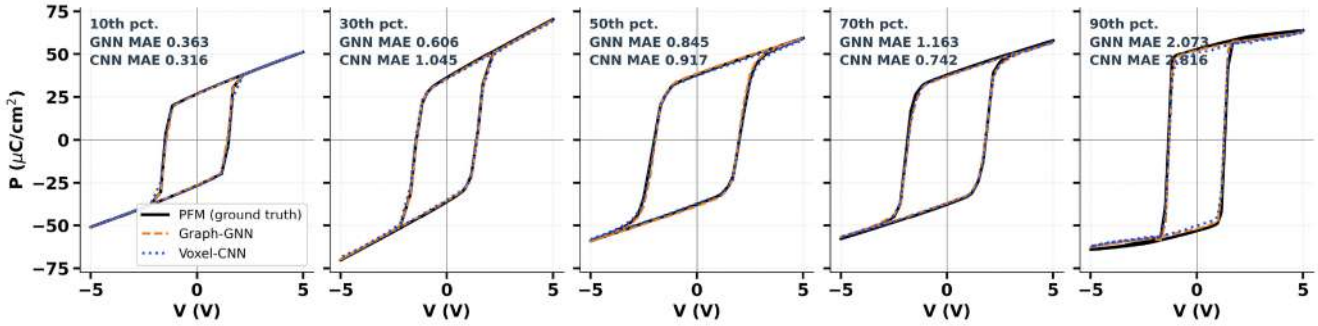


Fig. 1. 단일상 P-E 이력곡선 예측. 오차 분포의 10~90 백분위 샘플에 대해 PFM 정답(검정), Graph-GNN(주황 파선), Voxel-CNN(청색 점선)을 겹쳐 그림

2. 연구 방법론 개요

Voronoi 다결정에 PFM을 적용해 P-E 이력을 계산하였다. 단일상은 Landau-Devonshire 모델[2]로 전계점 69개, 결정립 100~550개다. 다상은 FE·AFE·DE를 하나의 자유에너지 체계로 다루고 파라미터를 실험 이력에 보정한 통합 KITTEL 모델[3]을 썼으며, 전계점 81개, 결정립 619~8,442개, 미세구조 1,000종이다. GNN은 결정립을 노드, 결정립계를 에지로 두고 부피·배향과 결정립계 면적·방위를 특성으로 준 GAT 구조다. CNN은 같은 미세구조를 결정 방위(IPF) voxel로 바꿔 합성곱으로 공간 특징을 뽑고 Landau 계수로 조건화한 1D 디코더에서 곡선을 낸다. 학습 데이터와 정규화, 손실, 옵티마이저, 스케줄은 동일하게 맞추었고, 복셀이 미세구조 단위로 만들어지므로 두 모델 모두 결정립별 상 배정 정보는 받지 않는다. 검증에는 미세구조와 Landau 계수를 함께 홀드아웃하는 double-holdout 4사분면을 썼다(다상 train 27,427 / valid 3,047 / test 3,366). 정확도는 MSE, MAE, 전계점별 결정계수를 평균한 uniform R2로 본다. 미세구조 입력만 끊은 대조모델을 같은 레시피로 학습해 조건화-only 바닥을 재고, 모델 성능에서 이를 뺀 값을 미세구조 기여분으로 정의하였다. 속도는 배치간 동기 없이 연속 처리한 wall-clock을 곡선 수로 나눈 GPU throughput이다(배치 64, 입력 GPU 상주). 역설계는 대리모델 가중치를 고정한 채 Landau 계수만 변수로 두고 오차를 줄이며, 경사하강 기반 GID와 능동학습 기반 AL[4]을 적용한 뒤 나온 계수를 PFM에 다시 넣어 확인하였다.

3. 주요 연구 결과

3.1 단일상

두 모델의 차이는 거의 없었다. R2, MAE, MSE 가운데 앞서는 쪽이 지표마다 바뀔 정도이며(표 1), 오차 분포 10~90 백분위 샘플에서도 항전계와 포화 구간을 양쪽 모두 잘 따라간다(Fig. 1). 곡선 한 개를 만드는 시간 역시 CNN 64 us, GNN 290 us로 같은 자릿수이고 PFM 대비 10^7배 수준이다. 미세구조를 끊은 대조모델은 0.660에 머물렀다. 미세구조가 P-E 분산의 34%를 설명하는 셈인데, 두 모델 모두 이 여지의 93%를 회수하였다.

3.2 다상 확장

FE-rich에서 각진 이력이, AFE-rich에서 잘록한 pinched 이력이, DE-rich에서 거의 선형인 응답이 나타난다. 곡선 형태 자체가 조성에 따라 달라지는데, 하나의 CNN이 네 조성 모두를 R2 0.999 이상으로 재현하였다(Fig. 2). 시험 사분면 전체에서는 uniform R2 0.9919, MAE 0.303, MSE 0.533이었다. 흥미로운 것은 조건화-only 바닥이 0.974까지 올라간다는 점이다. Landau 계수와 상 분율만으로 P-E 분산의 97.4%가 설명되므로 미세구조가 채울 여지는 2.6%뿐이다. CNN은 이 좁은 여지에서 +0.018을 회수했는데 비율로는 69%로, 단일상의 93%보다 낮다. 상의 공간 배치가 곡선을 좌우하리라 예상했으나 그렇지 않았다. 구조와 상분율을 고정한 채 결정립의 67%에서 상 배정만 바꿔 PFM을 다시 돌렸을 때 P-E 차이는 |P|max의 1.02%에 그쳤다. 분극 거동을 지배하는 것은 배치가 아니라 상 조성과 Landau 계수이며, 이 정보는 두 모델이 똑같이 받는다. 차이는 오히려 속도에서 벌어졌다. 단일상에서 4.5배였던 곡선 생성 시간 격차가 다상에서는 93.6배가 된다. 결정립이 20배 늘어나는 동안 CNN은 63 us로 그대로인데 GNN은 5,869 us까지 느려지기 때문이다. 복셀은 결정립 수와 무관하게 같은 크기의 텐서로 처리되지만, 그래프는 메시지 패싱 비용이 결정립 수를 따라 늘어난다.

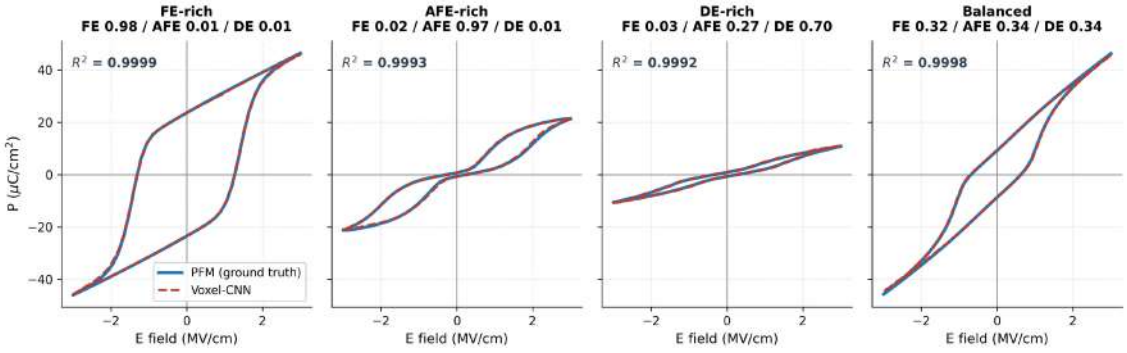


Fig. 2. 다상 P-E 이력곡선 예측. FE-rich, AFE-rich, DE-rich, 균등 혼합 조성에서 PFM 정답(청색)과 Voxel-CNN 예측(적색 파선)을 비교함

3.3 역설계

CNN과 GNN 각각에 GID와 AL을 적용해 목표 P-E를 내는 Landau 계수를 찾았다(Fig. 3). 네 경우 모두 대리모델 예측이 목표에 근접했고, 추천된 계수로 PFM을 다시 돌린 적합도 G는 0.739(CNN-GID), 0.731(CNN-AL), 0.750(GNN-GID), 0.715(GNN-AL)였다. 기울기를 주지 않는 PFM으로는 어려운 작업을 대리모델은 수십 초에 끝내며, 결과를 PFM으로 되돌려 확인해 국소 오차가 만드는 false peak를 걸러냈다.

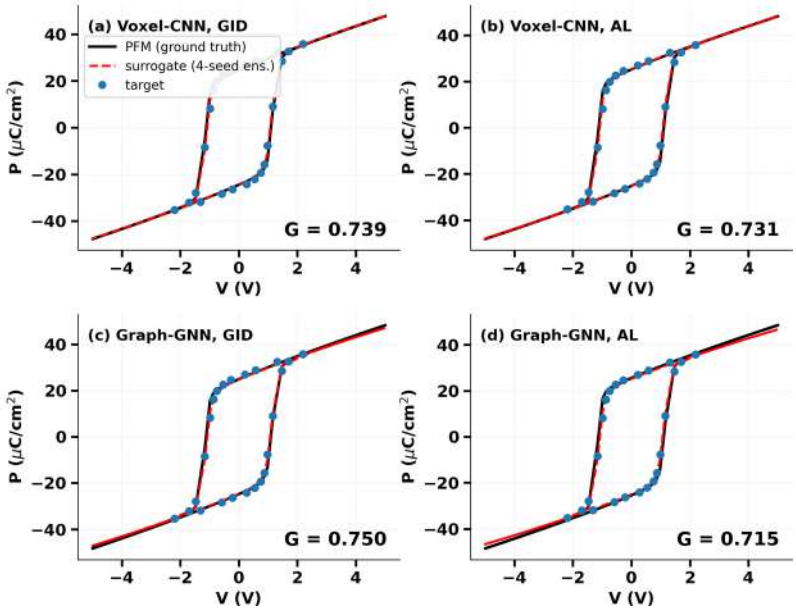


Fig. 3. 단일상 역설계 결과. (a) CNN-GID, (b) CNN-AL, (c) GNN-GID, (d) GNN-AL. 각 패널에 목표 P-E(파란 원), 대리모델 예측(적색 파선), 추천 계수로 재계산한 PFM 곡선(검정)과 적합도 G를 표시함

Table 1. CNN 과 GNN 의 정확도 및 P-E 곡선 생성 속도

항목	단일상 (CNN)	단일상 (GNN)	다상 3상 (CNN)	다상 3상 (GNN)
uniform R2	0.9774	0.9765	0.9919	0.9648(잠정)
MAE (uC/cm2)	1.146	1.086	0.303	0.725(잠정)
MSE (uC/cm2)^2	3.581	3.906	0.533	2.152(잠정)
P-E 곡선 1개 생성 (us)	64	290	63	5,869
조건화-only 바닥 (R2)	0.660	0.660	0.974	0.974
미세구조에 남은 여지	34.0%	34.0%	2.6%	2.6%

* 속도는 배치 64, 입력 GPU 상주, 배치간 동기 없는 지속 처리율(RTX 3090).

4. 잠정 결과와 발표 시점 최종 결과

다상 GNN은 재학습 중이라 확정값은 발표 시점에 제시한다. 초기 구현은 그래프 readout 뒤에 BatchNorm을 두어 정규화 통계가 배치 크기 16개만으로 추정되었다. 배치만 16에서 256으로 키워도 uniform R2가 0.927에서 0.952로 올랐고 이 계층을 빼면 0.964가 되어, 계층 위치가 원인임을 확인하였다. 단일상 GNN처럼 readout 앞(결정립 단위, 약 5,000개 표본)으로 옮기되 다상은 readout 이후 분산이 작아 정규화 없는 head에서 학습이 멈추므로 배치와 무관한 LayerNorm을 넣었다. 50 epoch씩 두 시드로 돌린 잠정 결과는 uniform R2 0.9648(시드 편차 0.0005), MAE 0.725, MSE 2.152다. CNN이 200 epoch이므로 같은 예산에서 비교하기 위한 재학습을 진행 중이며, 확정 후 표 1의 다상 GNN 열을 채운다.

5. 결론

과제의 정보 구조가 어떤 표현이 유리한지를 결정한다. 미세구조가 크게 기여하는 단일상에서는 두 표현이 정확도와 속도 모두 비슷했고 역설계도 양쪽에서 PFM으로 확인되었다. 반면 미세구조의 여지가 2.6%로 줄고 결정립이 8,442개까지 늘어나는 다상에서는 곡선 생성 시간이 93.6배 차이나 voxel-CNN이 실용적이다.

참고문헌(References)

1) K. Alhada-Lahbabi, D. Deleruyelle, and B. Gautier, "Ultrafast and accurate prediction of polycrystalline hafnium oxide phase-field ferroelectric hysteresis using graph neural networks," Nanoscale Adv. 6, 2259 (2024).
2) S. Sugathan, K. Thekkepat, S. Bandyopadhyay, J. Kim, and P. R. Cha, "A phase field model combined with a genetic algorithm for polycrystalline hafnium zirconium oxide ferroelectrics," Nanoscale 14, 14997 (2022).
3) P. Pankaj, S. Sugathan, S. J. Kim, and P.-R. Cha, "Unified phase-field framework for antiferroelectric, ferroelectric and dielectric phases: application to HZO thin films," arXiv:2602.13959 (2026).
4) M. Kim, M. Y. Ha, W.-B. Jung, J. Yoon, E. Shin, I.-d. Kim, W. B. Lee, Y. Kim, and H.-t. Jung, "Searching for an optimal multi-metallic alloy catalyst by active learning combined with experiments," Adv. Mater. 34, 2108900 (2022).

[학생1-3 | 09:30]

건식 정전기 분체도장의 도막성장 예측을 위한 입자부착모델 개발 및 실험적 검증: 서승원(발표자)[1], 김현진[1], 양현진[1*]
[1]인하대학교 기계공학과

Keywords: Electrostatics, Transfer efficiency, Coating uniformity, Capture Criterion, Digital Twin

1. 연구 배경 및 목적

분체도장 공정은 높은 도장 효율과 친환경성을 바탕으로 자동차, 가전 및 건축 산업 등에서 널리 활용되고 있다 1). 코로나 방전에 의해 대전된 분체 입자는 공기 유동과 전기장의 영향을 받아 금속 표면에 부착되며, 이후 경화공정을 통해 최종 도막을 형성한다 1,2). 도막 품질은 입자의 비행 거동뿐 아니라 표면 부착과 도막 성장 과정에 의해 결정되므로, 이를 정확히 예측하는 것은 공정 최적화에 중요하다 2). 기존 연구는 공기 유동, 전기장 및 입자 궤적 해석을 통한 분체 비행 거동과 도막 두께 예측에 주로 집중하였다 3). 최근에는 이동 노즐과 복잡 형상을 포함한 산업 규모 공정의 효율적 해석을 위해 다중 스케일 기법도 제안되고 있다 4,5). 그러나 대부분의 모델은 입자가 표면에 도달하면 부착되는 것으로 가정하거나 벽면 부착을 단순 경계조건으로 처리하여, 도막 성장에 따른 부착 특성 변화를 충분히 반영하지 못한다 5). 실제 공정에서는 동일 영역에 분체가 반복 분사되어 과도포가 발생할 수 있다. 또한 도막 성장과 함께 입자 전하가 내부에 축적되면 표면 전위와 전기장 분포가 변하고, 후속 입자의 부착이 억제될 수 있다 6). 분체의 전기저항 역시 정전기적으로 형성된 분체층의 부착성과 두께에 영향을 미치는 것으로 보고되었다 7). 그러나 기존 물리기반 모델에서는 이러한 도막 전하 축적과 후속 입자 부착의 상호작용이 충분히 고려되지 않았다. 본 연구에서는 도막 내 전하 축적 효과를 고려한 물리기반 입자 부착 모델을 개발하였다. 개발 모델은 입자의 대전과 비행을 계산하고, 도막 성장에 따른 표면 전위 및 정전기적 상호작용을 바탕으로 입자 부착 여부를 판단하도록 구성하였다. 또한 동일한 공정 조건에서 시간에 따른 도막 두께와 표면 전위를 측정하여 해석 결과와 비교하였다. 이를 통해 단순화된 벽면 부착 조건을 도막 전하 축적 기반의 물리적 조건으로 확장하고, 과도포를 포함한 실제 도막 형성 거동을 예측할 수 있는 해석 기반을 제시하였다.

2. 연구 방법

금속 표면 분체도장 공정의 입자 부착과 도막 성장을 예측하기 위해 DPM(Discrete Phase Model) 기반 다중물리 모델을 구성하였다. 공기 유동은 Eulerian framework에서 질량 및 운동량 보존 방정식으로 해석하고, 분체 입자는 Lagrangian framework에서 개별 궤적을 추적하였다. 입자 운동은 항력, 중력, 정전기력 및 이미지력을 고려한 뉴턴의 운동방정식으로 계산하였다. 전기장 해석에서는 코로나 방전에 의한 공간전하 효과를 고려하였다. 전위는 Poisson 방정식으로 계산하고, 전기장은 전위의 공간 구배로부터 산출하였다. 코로나 전류밀도 분포를 입자 대전 모델에 반영하였으며, 입자 전하는 국부 전기장, 전류밀도, 입자 크기 및 체류시간에 따라 이동 중 지속적으로 갱신하였다. 이를 통해 입자 궤적, 대전량 및 정전기력을 연계하여 계산하였다. 도막 형성 모델에서는 벽면에 도달한 입자의 체적과 전하를 해당 벽면 요소에 누적하여 국부 도막 두께와 전하량을 산출하였다. 누적 입자 체적은 벽면 면적으로 나누어 도막 두께로 환산하고, 누적 전하는 도막 내부의 체적 전하밀도로 변환하였다. 도막은 전하를 보유하는 유전체층으로 가정하였으며, 두께 방향의 공간전하밀도는 균일한 것으로 설정하였다. 이후 Gauss 법칙을 이용해 도막 내부 전기장과 표면 전위를 계산하고, 산출된 표면 전위를 전기장 해석의 경계조건으로 반영하였다. 입자 부착 여부는 이미지력에 의한 인력과 도막 전하에 의한 정전기적 반발력의 비교를 통해 판단하였다. 이미지력이 반발력보다 큰 경우에는 입자가 부착되고, 반발력이 이미지력 이상인 경

우에는 부착되지 않는 것으로 처리하였다. 이를 통해 도막 성장에 따른 부착 특성 변화와 과도포 발생 가능성을 모델에 반영하였다. 모델 검증을 위해 실제 분체도장 노즐과 접지 평판을 포함한 3차원 계산 영역을 구성하고, 이동 분사 조건을 구현하기 위해 동적 격자 기법을 적용하였다. 격자 독립성 검토를 통해 최종 격자 조건을 선정하였으며, 노즐 하류의 실험 및 해석 속도를 비교하여 유동장 정합성을 확인하였다. 최종적으로 동일한 공정 조건에서 시간에 따른 도막 두께와 표면 전위를 측정하고 해석 결과와 비교하여 개발 모델의 예측 성능을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

계산 형상은 상용 파우더 건 노즐의 실제 치수를 측정하여 재구성하였으며, 노즐과 피도물 사이의 거리는 150 mm, 피도물 크기는 150 mm × 150 mm로 설정하였다. 개발된 입자 부착 모델의 예측 성능을 검증하기 위해 동일한 공정 조건에서 평판 시편에 분체도장 실험을 수행하고, 해석 결과를 실험값과 비교하였다. 도막 두께는 경화 후 피도물 표면의 지정 위치에서 측정하여 두께 분포로 구성하였으며, 도막 표면전위는 도장 후 노즐 중심축이 닿는 중앙부와 중앙부에서 50 mm 떨어진 측면부에서 10mm이격하여 측정하였다. 이후 도막 전하에 의한 입자 부착 모델을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 도막 두께 분포를 각각 계산하고, 실험에서 얻은 기준 분포와 비교하였다.

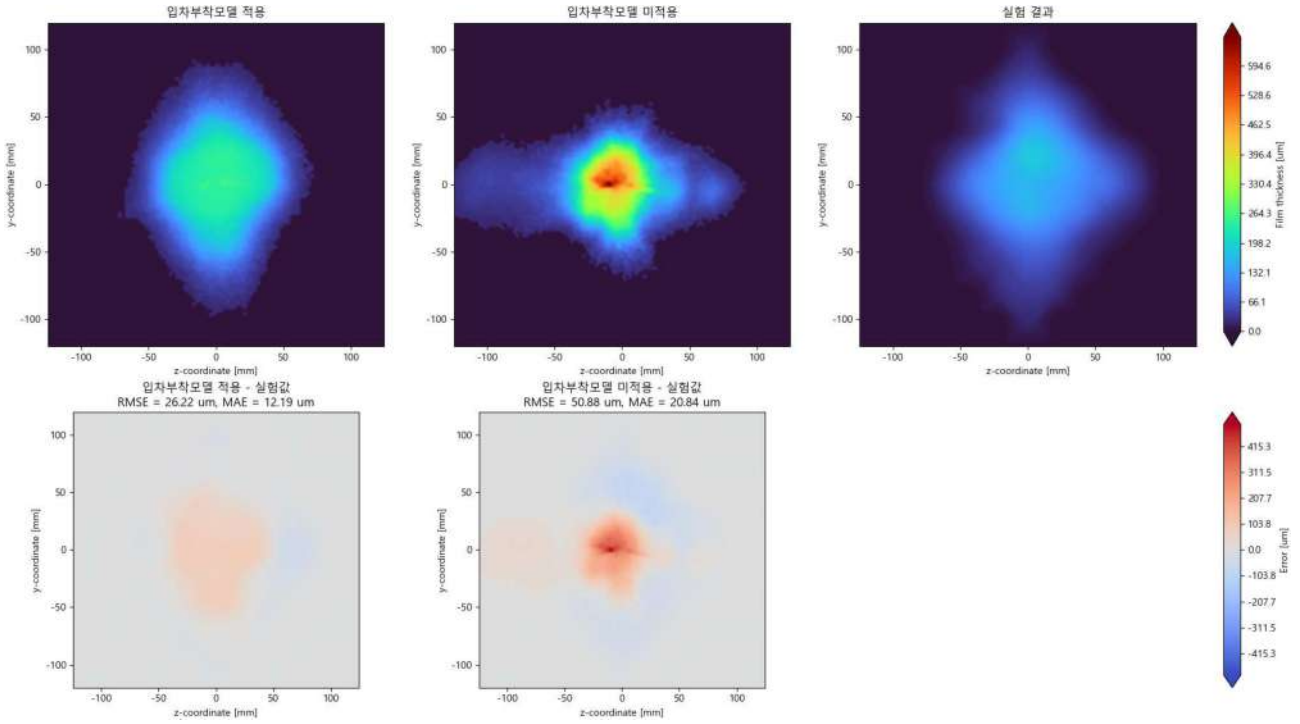


Fig. 1. 입자 부착 모델 적용 여부에 따른 경화 후 도막 두께 분포와 실험 분포의 비교.

입자 부착 모델을 적용하지 않은 경우에는 노즐 중심축 부근에 입자가 과도하게 축적되고 도막이 좌우 방향의 좁은 영역에 집중되는 경향이 나타났다. 반면 입자 부착 모델을 적용한 경우에는 중앙부의 과도한 도막 성장이 억제되고 입자가 더 넓은 영역에 분산되어 실험 분포와 유사한 형상이 형성되었다. 정량적으로도 입자 부착 모델을 적용함에 따라 기준 분포 대비 RMSE와 MAE가 각각 약 49%와 42% 감소하였다. 이는 도막에 축적된 전하가 후속 입자의 중앙 집중 부착을 제한하여 과도포를 완화한 결과로 판단된다. 다만 해석 결과는 일부 영역에서 실험값보다 큰 도막 두께를 예측하였다. 이는 벽면에 부착된 모든 입자가 이탈하지 않고 도막으로 유지된다고 가정하였기 때문이다. 실제 공정에서는 약하게 부착된 입자가 기체 유동에 의해 재비산될 수 있으며, 도막 내 전하가 증가하면 역이온화에 의해 후속 입자의 부착이 억제되거나 기존 입자가 이탈할 수 있다. 따라서 향후에는 재비산과 역이온화에 의한 입자 손실을 추가로 고려할 필요가 있다.

Table 1. 중앙부 및 측면부의 도막 표면전위 비교(측면부: 중앙부에서 50 mm).

측정 위치	모델 예측 [kV]	실험 [kV]	절대 오차 [kV]
중앙부(노즐 중심축)	-2.007	-2.300	0.293
측면부(중앙부에서50 mm)	-0.559	-0.700	0.141

도막 표면전위 비교 결과, 해석 모델은 중앙부에서 전위 절대값이 가장 크고 측면으로 갈수록 감소하는 실험적 경향을 재현하였다. 다만 중앙부와 측면부 모두에서 전위 절대값을 다소 작게 예측하였다. 이러한 차이는 개별 분체 입자의 유전율을 도막층 전체의 유전율로 적용한 데서 기인한 것으로 판단된다. 실제 도막층에는 입자 사이의 공극이 존재하므로 유효 유전율이 입자 고유 유전율보다 낮을 수 있으며 이에 따라 동일한 체적전하 조건에서도 실험에서는 더 큰 표면전위 절대값이 형성될 수 있다.

참고문헌(References)

1) L. K. Prasad, J. W. McGinity, and R. O. Williams III, Int. J. Pharm. 505, 289 (2016).
2) A. G. Bailey, J. Electrostat. 45, 85 (1998).
3) Q. Ye, T. Steigleder, A. Scheibe, and J. Domnick, J. Electrostat. 54, 189 (2002).
4) T. Johnson, A. Ruggiu, M. Quast, K. Pulli, A. Mark, M. Bader, N. Sandgren, M. Cudazzo, and F. Edelvik, J. Electrostat. 125, 103843 (2023).
5) J. M. Gimenez, Comput. Part. Mech. 11, 1441 (2024).
6) J. Cazaux, J. Electrostat. 65, 764 (2007).

[학생1-4 | 09:45]

Mg-Ca-Zn 합금계의 CALPHAD 열역학 DB 기반 미세조직 내 전기화학전위 분포 계산: 김도현(발표자)[1*], 차필령[1], 김근우[2], 이지영[3]
[1]국민대학교 신소재공학부, [2]홋카이도 대학교, [3]한국과학기술연구원

Keywords: Magnesium alloys, Galvanic corrosion, Electrochemical potential, CALPHAD, Phase-field modeling

1. 연구의 목적과 의의

생분해성 마그네슘 합금은 우수한 생체적합성과 골조직에 근접한 기계적 물성으로 정형외과·심혈관용 임플란트 재료로 주목받고 있으나, 생리 환경에서의 빠르고 불균일한 부식이 실용화의 제약으로 남아 있다. 다상(multiphase) Mg 합금의 부식은 α-Mg 기지와 2차 금속간화합물 사이의 미세갈바닉(micro-galvanic) 부식이 주도하며, 상 간의 전기화학전위 차이가 부식의 열역학적 구동력이 된다. 따라서 미세조직 내부의 상간 전위차를 정량적으로 예측하고 이를 합금 설계 변수로 다루는 접근이 부식 저항성 설계의 핵심이 된다.

선행 연구에서는 Modified Born-Haber cycle을 이용하여 합금 상의 전기화학전위를 제일원리 계산으로부터 산출하는 방법론이 제안되었다[1]. 그러나 이 접근은 각 상을 단일 평형 조성으로 대표하므로, 실제 주조 미세조직에 존재하는 상 내부 용질 분포와 비평형 응고에 따른 미세편석, 그리고 그로 인한 전위의 공간적 비균일성을 직접 다루지 못한다.

본 연구는 이 방법론을 미세조직 스케일로 확장하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로, Mg-5Ca-xZn(x=0, 0.5, 1, 1.5) 합금의 상장(phase-field) 응고 시뮬레이션으로 미세조직 데이터를 계산한다. 이후 생성된 합금별 미세조직의 조성장 및 상 정보를 기반으로 CALPHAD 열역학 데이터베이스를 활용해 전기화학전위 계산에 적용함으로써, 비평형 용질 분배와 응고 형태를 반영한 전기화학전위 분포 계산을 미세조직 단위에서 진행한다. 이를 통해 Mg-5Ca-xZn 합금계에서 Zn 첨가에 따른 상별 전위 변화에 따른 상간 전위차와 미세조직 형태 변화를 하나의 계산 틀에서 정량화하고, 합금별 행크스 용액 침지 부식에서 나타나는 수소 발생량과 비교하여 미세조직 단위에서 나타나는 갈바닉 부식을 분석하고자 한다.

2. 연구 방법론 개요

1) 주조 시뮬레이션: 다상·다성분 응고 Phase-Field 모델을 이용해 Mg-5Ca-xZn (x = 0, 0.5, 1, 1.5) 합금의 응고 미세조직을 계산하였다. α-Mg(HCP)와 $Mg_2(Ca,Zn)$ Laves 상을 고려하여, 각 격자점에서 상 종류와 Ca·Zn 조성장을 산출하였다.

2) 미세조직 내 전기화학전위 계산: 상장 시뮬레이션을 통해 얻은 1000x1000 크기의 미세조직의 격자점에 대해 아래 식을 기반으로 전기화학전위가 계산되었다.

$$E = -\frac{G_{Formation} + G_{Mix} + \sum_i M_i \Delta G^{\mathrm{Tot}}}{nF}$$

$G_{Formation}$ 은 상 형성 깁스자유에너지, 전해질 내 용해이온 깁스 에너지, $\sum_i M_i \Delta G^{\mathrm{Tot}}$ 는 순원소별 Born-Haber 자유에너지의 조성 가중합, n은 반응에 참여하는 전자의 수, F는 패러데이 상수이다.

$G_{Formation}$ 의 경우 MatCalc 마그네슘 데이터베이스를 pycalphad 형식으로 변환하여 활용하였으며, $Mg_2(Ca,Zn)$ Laves 상은 $(Mg)_2(Ca,Zn)_1$ 부격자 모델로 단순화하여 격자점 조성으로부터 자유에너지가 유일하게 결정되도록 하였다. 전위는 고상에 대해 정의되므로, 응고 종료 시 잔류하는 소량의 액상 영역은 분석에서 제외하였다.

3) 부식 실험: Mg-5wt%Ca 및 Mg-5wt%Ca-1wt%Zn 합금을 대상으로 행크스 용액 침지 전/후 미세조직을 SEM으로 관찰하고, EPMA로 Zn의 상별 분포를 분석하였다. 아울러 수소 발생(H_2 evolution)을 측정하여 예측된 부식 경향을 검증하였다.

3. 주요 연구 결과

(1) 상별 전기화학전위와 Zn에 의한 정렬

전기화학전위 계산 결과(Fig. 1), 이원계 Mg-5wt%Ca에서 α-Mg 기지는 −2.38 V의 거의 균일한 전위를 가지며, 화학량론상인 Mg_2Ca는 고정된 Mg:Ca 비율로 인해 −2.47 V의 단일 전위를 가져 기지 대비 93 mV 더 음의 값을 나타낸다. 즉 Mg_2Ca가 갈

바닉 커플의 양극(anode)으로 작용하여 우선 용해될 것으로 예측된다.

Zn을 첨가하면 Zn이 $Mg_{22}(Ca,Zn)$ Laves 상에 고용되며, 이는 Mg-5wt%Ca-1wt%Zn 합금의 EPMA 분석에서 PF 조성장과 일치함이 확인된다.(Fig 2) 고용된 Zn은 Laves 상의 전위를 기지 쪽으로 상승시켜, 두 상의 평균 전위차가 Zn 함량에 따라 93 → 50 → 30 → 20 mV로 단조 감소한다(Fig. 1). 이때 α-Mg 기지의 전위는 거의 변하지 않아, 전위차 감소는 주로 Laves 상의 전위 상승에서 기인한다.

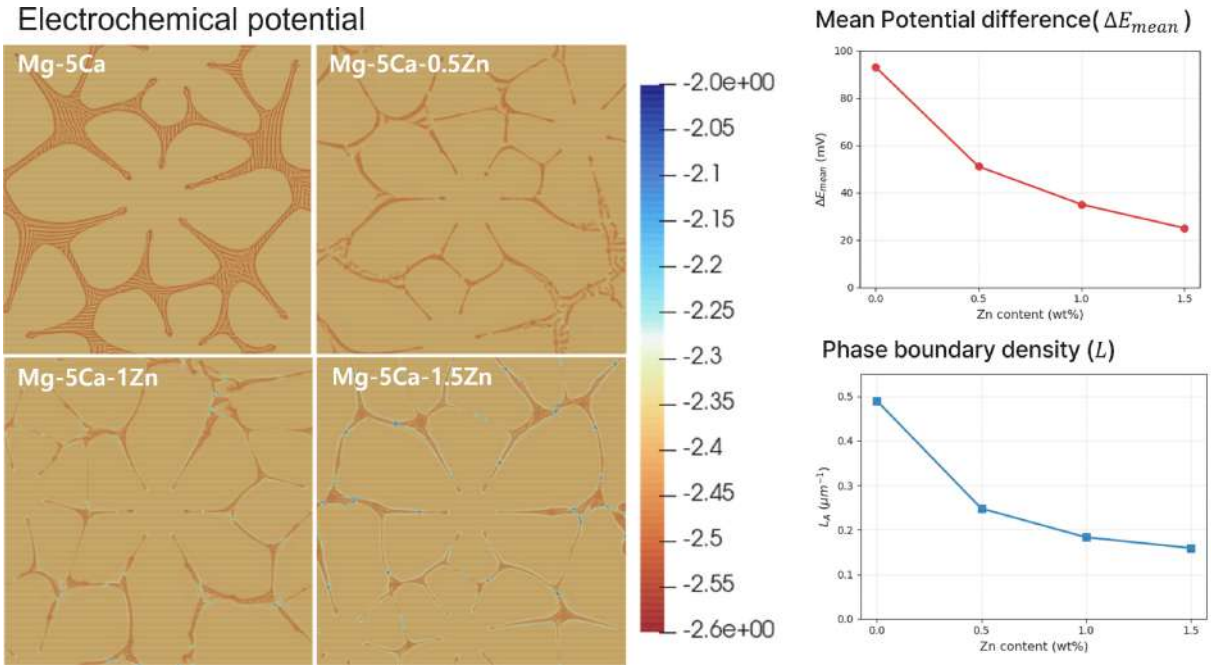


Fig. 1. Mg-5Ca-xZn(x=0, 0.5, 1, 1.5) 전기화학포텐셜 매핑, zn 농도에 따른 α-Mg 기지와 $Mg_2(Ca,Zn)$ 상의 평균 전위차와 계면밀도

(2) 전위 정렬과 미세조직 형태 변화의 동시 진행

Zn 첨가에 따른 미세조직 형태도 함께 변화한다. 이원계의 Mg_2Ca는 수지간 영역에 미세한 lamellar 공정 network를 이루나, Zn 첨가 시 divorced 형태로 전환되어 α-Mg/2차상 계면밀도가 감소한다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 계면밀도 감소와 전위차 감소가 함께 진행되고 0-0.5wt구간에서 크게 나타나는 것으로 확인되고 이 미세조직은 실험과 동일한 추세이다.

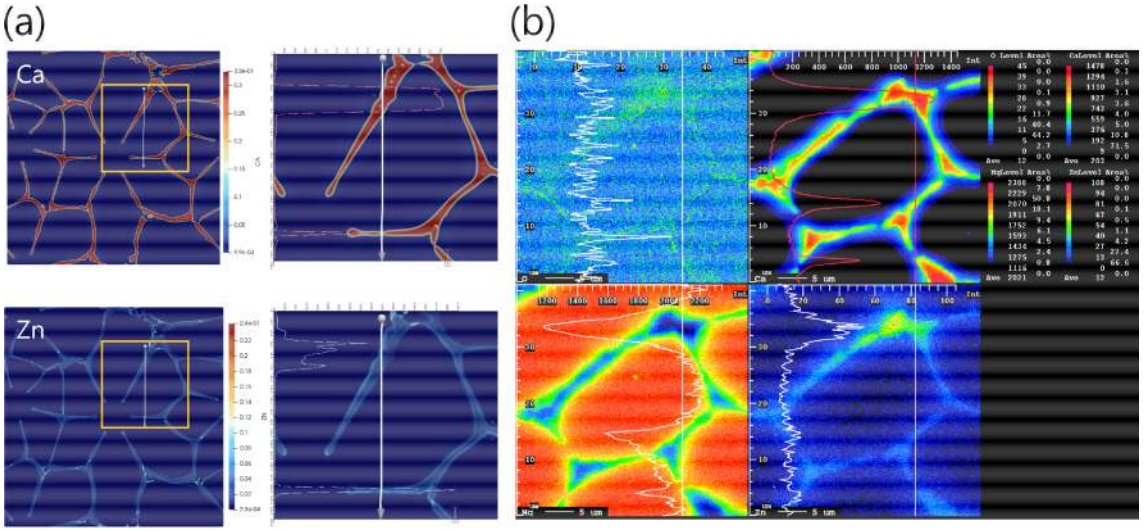


Fig. 2. (a) Mg-5Ca-1Zn 합금의 PFM 조성 분포 (b) Mg-5Ca-1Zn 합금의 EPMA 결과

(3) 부식 거동과의 연결

Mg-5wt%Ca에서는 Mg_2Ca 공정 network를 따른 선택적 부식이, Mg-5wt%Ca-1wt%Zn에서는 완화된 부식이 침지 전/후 SEM에

서 관찰된다(Fig. 3). 이는 Zn 첨가로 감소된 전위 분포와 정합한다. 수소 발생 정량 결과는 발표 시점에 제시하며, 전위차 감소 경향과 일관된 부식 속도 감소를 나타낼 것으로 예상된다.

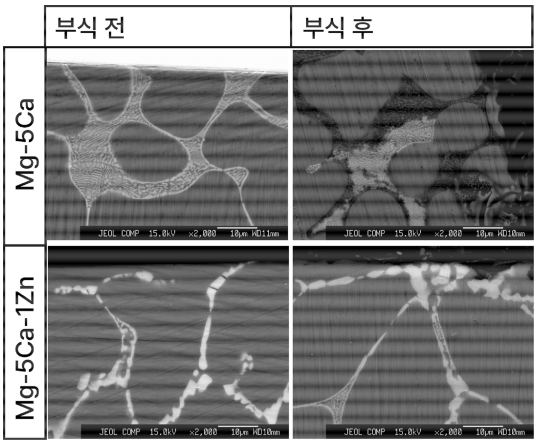


Fig. 3. Mg-5Ca, Mg-5Ca-1Zn 합금 행크스 용액 침지 전/후 SEM 이미지

참고문헌(References)

1) K. Thekkepat, H. S. Han, J. W. Choi, S. C. Lee, E. S. Yoon, G. Li, H. K. Seok, Y. C. Kim, J. H. Kim, and P. R. Cha, J. Magnes. Alloys 10, 1972 (2022).
2) P. R. Cha, H. S. Han, G. F. Yang, Y. C. Kim, K. H. Hong, S. C. Lee, J. Y. Jung, J. P. Ahn, Y. Y. Kim, S. Y. Cho, J. Y. Byun, K. S. Lee, S. J. Yang, and H. K. Seok, Sci. Rep. 3, 2367 (2013).

[학생1-5 | 10:00]

딥러닝 기반 니켈 도금 Al-Cu 레이저 용접부의 계면 물성 역추정: 송기욱(발표자)[1], 성현민[2], 정경재[1*]; [1]성균관대학교 신소재공학과 [2]현대자동차

Keywords: 레이저 용접, 접합강도, 유한요소해석, 응집영역모델, 딥러닝

알루미늄과 구리는 각각 우수한 경량성과 전기전도성을 바탕으로 전기·전자 부품 및 이차전지 접합 구조에 널리 사용되고 있다. 특히 구리 부품에는 사용 환경에서의 산화와 부식을 억제하고 접합 신뢰성을 확보하기 위해 니켈 도금이 적용되기도 한다[1]. 니켈 도금 구리와 알루미늄의 이종재 접합에는 높은 생산성과 정밀한 공정 제어가 가능한 레이저 용접이 활용되고 있으나, 두 소재 간 열물리적 특성 차이와 용접 중 형성되는 금속간화합물층으로 인해 접합부의 기계적 신뢰성을 확보하기 어렵다. 또한 레이저 출력과 니켈 도금 조건에 따라 용접부 형상과 계면 상태가 변화하므로, 다양한 공정 조건에서의 접합강도와 파손 거동을 일관되게 평가할 수 있는 모델링 방법이 필요하다. 본 연구에서는 응집영역모델(cohesive zone model, CZM)을 이용하여 용접 계면의 손상 개시와 진전을 모사하고[2,3], 딥러닝과 유한요소해석을 연계하여 직접 측정하기 어려운 계면 파라미터를 식별하는 방법을 제안함으로써 레이저 용접부의 거시적 접합거동을 특성화하고자 하였다[4].

니켈 도금 구리와 알루미늄으로 구성된 실제 레이저 용접부의 단면 형상을 기반으로 공정 조건별 3차원 유한요소모델을 구축하였으며, 레이저 출력과 니켈 도금 두께를 주요 공정 변수로 설정하였다. Fig. 1은 공정 조건에 따른 용접부 형상 변화와 이를 반영한 유한요소모델을 보여준다. CZM 파라미터를 체계적으로 변화시킨 반복 해석을 수행하여 파라미터 조합별 하중–변위 응답과 계면 손상 거동으로 구성된 시뮬레이션 데이터베이스를 구축하였다. 이를 통해 계면 물성 변화가 용접부의 강성, 하중 지지능력 및 파손 과정에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

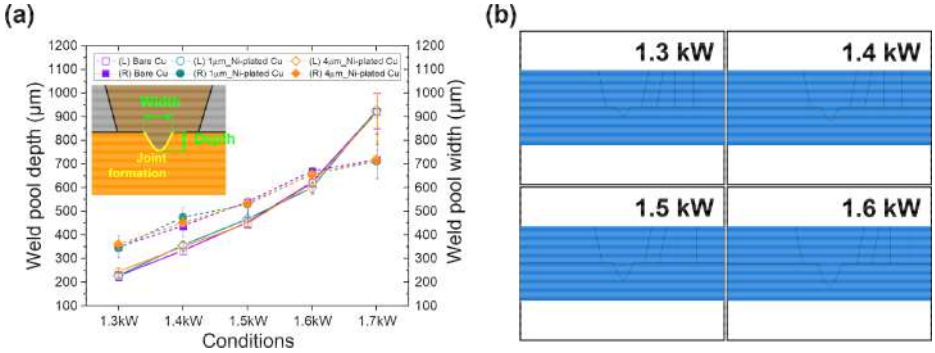


Fig. 1. 레이저 출력 및 니켈 도금 조건에 따른 용접부 형상과 공정 조건별 유한요소모델

구축된 데이터베이스를 이용하여 하중–변위 응답과 CZM 파라미터 사이의 비선형 관계를 학습하는 딥러닝 모델을 개발하였다. 전체 하중–변위 곡선을 직접 입력하는 대신, 접합 거동을 대표할 수 있는 주요 곡선 특징을 추출하여 입력 변수로 사용하였다. 또한 각 특징에 대한 CZM 파라미터의 민감도와 식별 가능성을 평가하고, 관측된 기계 응답에 유의미한 영향을 미치는 계면 파라미터를 딥러닝 모델의 출력 변수로 선정하였다. Fig. 2는 정규화된 하중–변위 특징에 대한 CZM 파라미터의 민감도 분석 결과를 보여준다. 학습된 모델에 실제 겹침전단(lap-shear) 시험에서 추출한 특징 변수를 입력하여 니켈 도금 두께와 레이저 출력 조건별 계면 파라미터를 도출하였다.

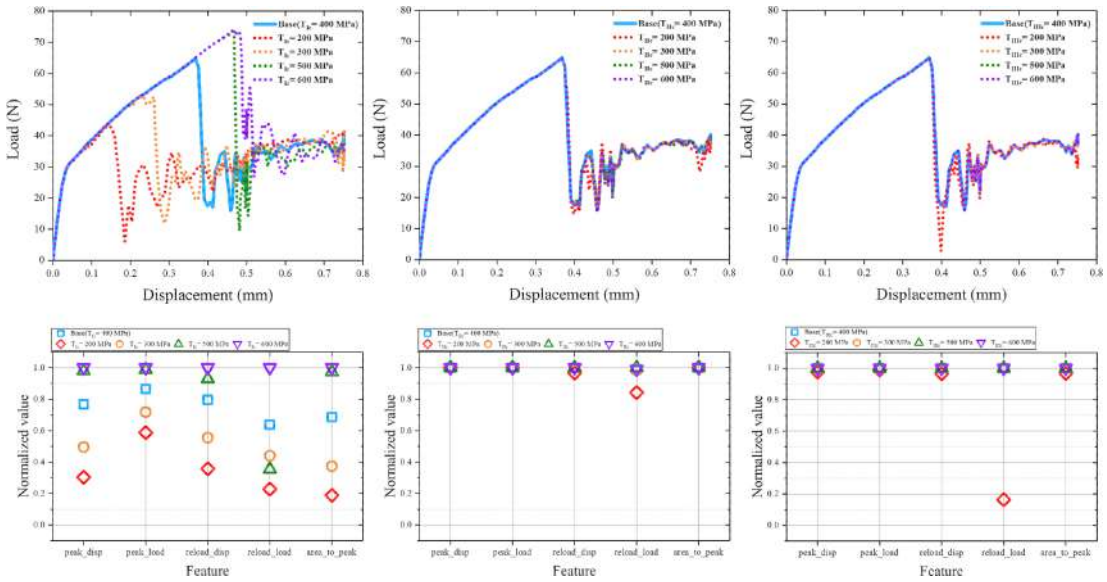


Fig. 2. 하중-변위 응답 특징에 대한 CZM 파라미터의 민감도 및 식별 가능성 평가

도출된 계면 파라미터를 유한요소모델에 적용한 결과, 다양한 공정 조건에서 실험적으로 관찰된 하중–변위 응답과 계면 손상 거동을 효과적으로 재현할 수 있었다. 특히 대부분의 실험 조건에서 계면 균열 개시 하중을 높은 정확도로 재현하였으며, 니켈 도금 두께와 레이저 출력 변화에 따른 접합강도 및 파손 거동의 차이도 적절히 나타냈다. Fig. 3은 겹침전단 시험에서 관찰된 변형 및 파손 과정과 딥러닝으로 식별된 CZM 파라미터를 적용한 유한요소해석 결과를 비교하여 보여준다.

본 연구에서 제안한 방법은 거시적 기계 응답으로부터 국부 계면 물성을 식별하고, 공정 조건별 용접부 형상과 계면 파손 거동을 접합강도와 연계할 수 있다. 이를 통해 이종금속 레이저 용접 공정의 정량적 평가와 최적 설계를 위한 모델링 프레임워크를 제공한다.

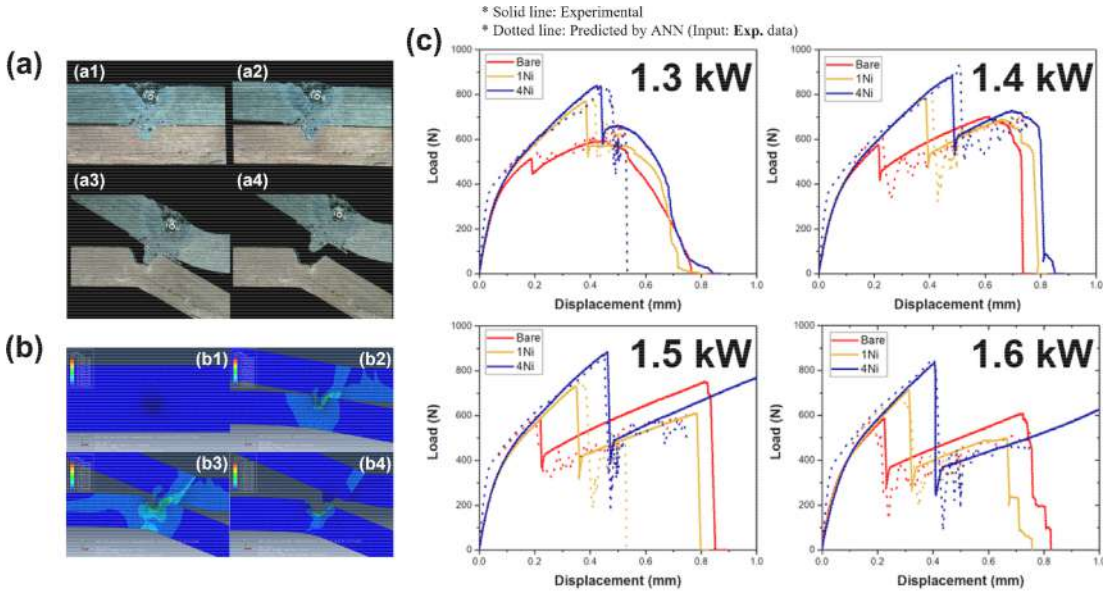


Fig. 3. 딥러닝으로 식별된 CZM 파라미터를 적용한 유한요소해석과 실험 결과의 비교:
(a) 실험 변형 및 파손 과정, (b) 유한요소해석 결과, (c) 공정 조건별 하중-변위 응답

참고문헌(References)
1) Yan, S., & Shi, Y. Journal of Manufacturing Processes 59 (2020): 343-354.
2) Sung, H. M., Lee, S., Lee, D., Kim, H., Kang, S. G., Lee, G. D., Jeong, K., and Han, H. N. Journal of Materials Research and Technology 31 (2024): 2473-2483.
3) Cho, D., Ghassemi-Armaki, H., Stoughton, T. B., Carlson, B. E., Sung, H. M., Hwang, J., Brian N. Legarth, and Yoon, J. W., Engineering Fracture Mechanics 311 (2024): 110520.
4) Jeong, K., Lee, K., Lee, S., Kang, S. G., Jung, J., Lee, H., Kwak, N., Kwon, D., and Han, H. N., International Journal of Plasticity 157 (2022): 103403.

[학생 1-6 | 10:15]

자가 지도 학습(SSL)과 설명 가능한 인공지능(XAI)을 활용한 무방향성 전기강판의 자기적 성질 기반 결정립 크기 예측: 하준서(발표자)[1], 장호성[2], 신선미[2], 김성진[3], 박세민[1]*; [1]국립부경대학교 융합소재공학부 신소재시스템공학과, [2]한국생산기술연구원 울산뿌리기술지원센터 스마트정형공정그룹, [3]국립순천대학교 첨단신소재공학과

Keywords: 무방향성 전기강판, 결정립 크기, 자기적 성질, 자가지도학습, 설명가능 인공지능

무방향성 전기강판(Non-oriented Electrical Steel, NOES)의 결정립 크기는 철손 및 자기적 성질과 큰 상관관계를 가지는 인자이나, 현행 측정법(에칭·광학현미경)은 파괴적이고 많은 시간이 소요되어 인라인 검사가 불가능하다. 선행 연구를 통해[1] 머신러닝(XGBoost, TPOT 등)과 설명 가능한 인공지능(Explainable AI, XAI)을 도입하여 소수의 자성 특성만으로 결정립 크기를 비파괴적으로 예측하고 주요 측정 조건(B1, B4 등)을 규명하는 성과를 거두었다. 그러나 데이터 희소성과 고차원성이라는 한계가 여전히 존재한다. 본 연구의 데이터셋(N = 52)은 데이터 수가 작고 변수간 상관관계가 높아 과적합 위험이 크다. 이에 자가 지도 학습(Self-supervised Learning, SSL)의 사전학습 메커니즘을 활용하여 데이터 부족 및 다중공선성 문제를 해결하고자 한다. 사전학습이란 입력변수(x)로 출력변수(y)를 학습하기 전에 입력변수들 간의 상관관계를 학습하여 인코더 가중치를 확보하는 과정이다 [2, 3]. 또한 XAI로 예측 메커니즘의 자성학적 타당성을 검증하여 중요도가 높은 측정 조건만으로 학습된 경량화 모델로 측정 비용을 절감하는 것을 목적으로 한다.

Si 0.61 wt%, Al 0.34 wt% 조성의 NOES를 냉간압연으로 0.1 mm까지 제작한 뒤 진공 분위기(5×10^{-4} Torr), 800~1100 ℃, 1~44분 열처리하여 42.1~116.8 μm의 결정립 크기 데이터를 확보하였다. 결정립 크기는 ASTM E112 선형 교차법으로, 자기적 특성은 single sheet tester(IWATSU SY-8219)로 측정하였으며, 자장세기 기준 6조건(B0.5~B5)과 자속밀도-주파수 기준 4조건(W1.5/6500~W4/2500)의 총 10개 고정 조건에서 시편당 100개 입력 변수를 구성하였다.

그림 1은 전체 워크플로우이다. 결정립 크기 데이터를 마스킹한 D_unlabeled로 사전학습을, 마스킹하지 않은 D_labeled로 지도학습을 수행하였다. SSL 모델은 정형 데이터 전용 모델인 VIME, SCARF, TabNet 3가지 모델을 선정하였고, 회귀 헤드는 FC→ReLU→FC로 통일하였다. 사전학습의 효과를 확인하기 위해 사전학습 가중치가 없는 Scratch Model을 생성하였다. 자성 변수 간 상관성이 높으므로 조건부 분포 기반 ALE(전역)와 최소 변경 조합을 탐색하는 CE(국소)를 XAI 도구로 채택하였다.

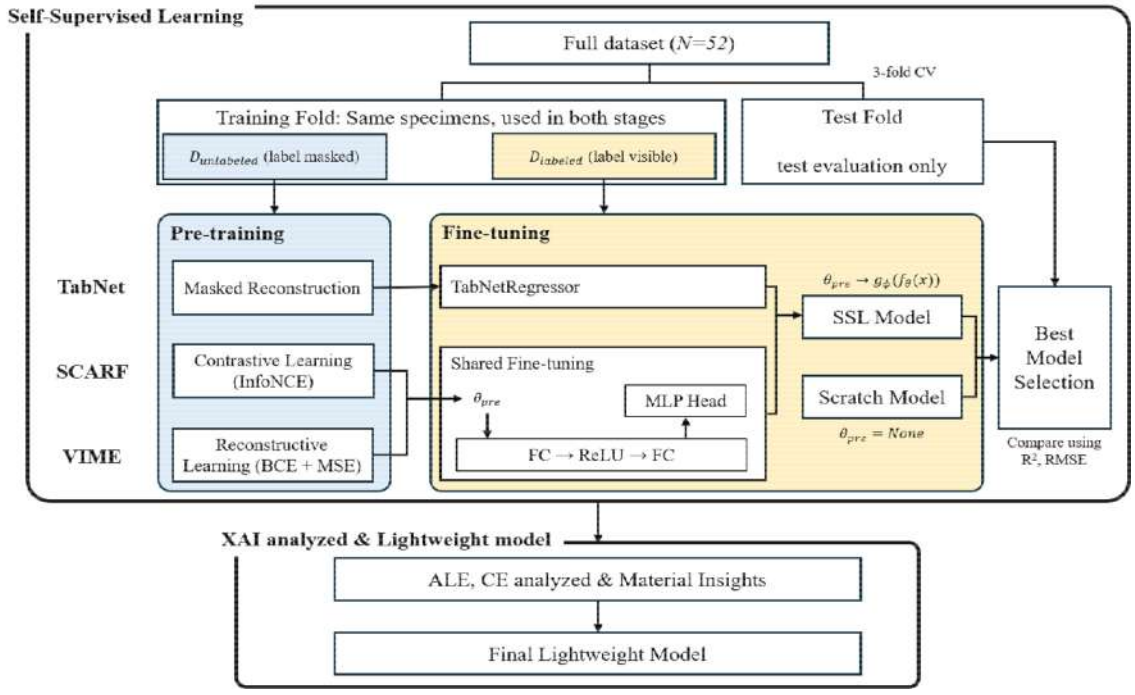


Fig. 1. SSL 기반 결정립 크기 예측을 위한 두 단계 워크플로우: D_unlabeled로 사전학습을 수행, D_labeled로 지도학습 수행

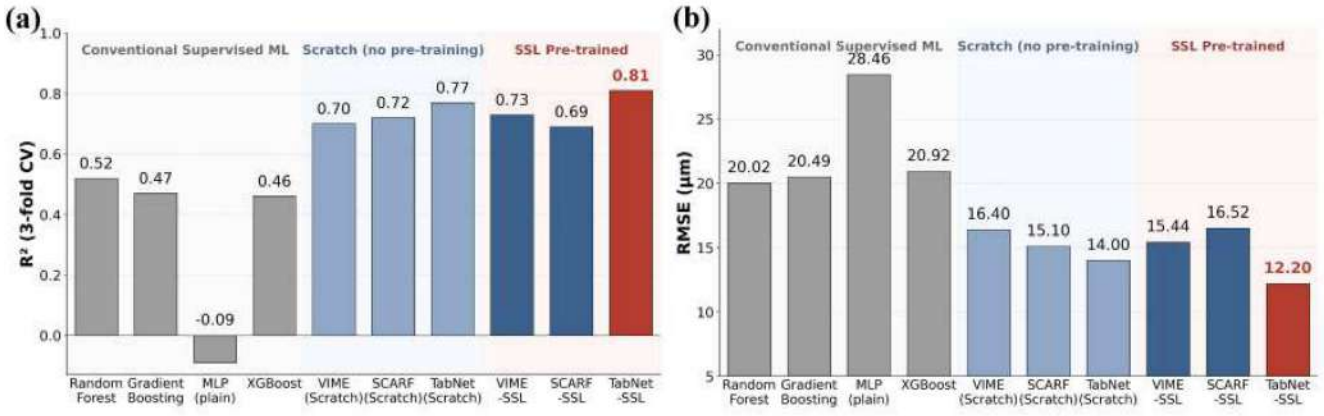


Fig. 2. 기존 지도학습·Scratch·SSL 사전학습 모델의 성능 비교: (a) R^2, (b) RMSE (μm)

그림 2는 3-fold 교차검증에서 평가한 10개 모델의 성능이다. TabNet-SSL은 R^2 = 0.81, RMSE = 12.20 μm로 최고 성능을 달성하여 Random Forest(R^2 = 0.52), MLP(R^2 = −0.09) 보다 예측 성능이 높은 것을 확인하였다. 기존의 머신러닝/딥러닝 모델, Scratch Model 보다 성능이 우수한 것으로 보아 사전학습 가중치가 성능 향상에 기여함을 확인하였다. 반면 SCARF-SSL(R^2 = 0.69)은 Scratch(R^2 = 0.72)보다 낮았다. 이는 SCARF 모델에서는 소규모 데이터의 한계를 극복하지 못했음을 보여준다.

그림 3은 가장 성능이 높은 TabNet 모델이 도출한 상위 3개 변수가 결정립 크기 예측에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 각 변수의 변화에 따른 예측값의 편차를 나타낸 ALE plot이다. 그림 3(a)에서 B3.5_Br/Bm은 0.62를 기점으로 약 −6 μm까지 급감하는 음의 상관을 보였다. 이는 350 A/m 비가역 자벽 이동 조건에서 미세 결정립일수록 결정립계 pinning이 강화되어 자장 제거 후 자벽의 복귀가 억제되어 잔류 자속(Br/Bm)이 높게 유지되는 것으로 해석된다[4]. 그림 3(b) B0.5_Pcv의 양의 상관은 레일리 영역(50 A/m)에서 히스테리시스 손실, 레일리 계수, 결정립 크기가 비례하기 때문이며[5, 6], 그림 3(c) W2.5/4000_Br/Bm의 양의 상관은 고주파에서 큰 결정립일수록 동적 지연(dynamic lag)이 심화되어 잔류 자속이 상승하게 되는 기구로 해석된다 [5]. 이러한 분석 결과는 모델이 자성학 이론과 부합하는 상관 구조를 학습하였음을 뒷받침한다.

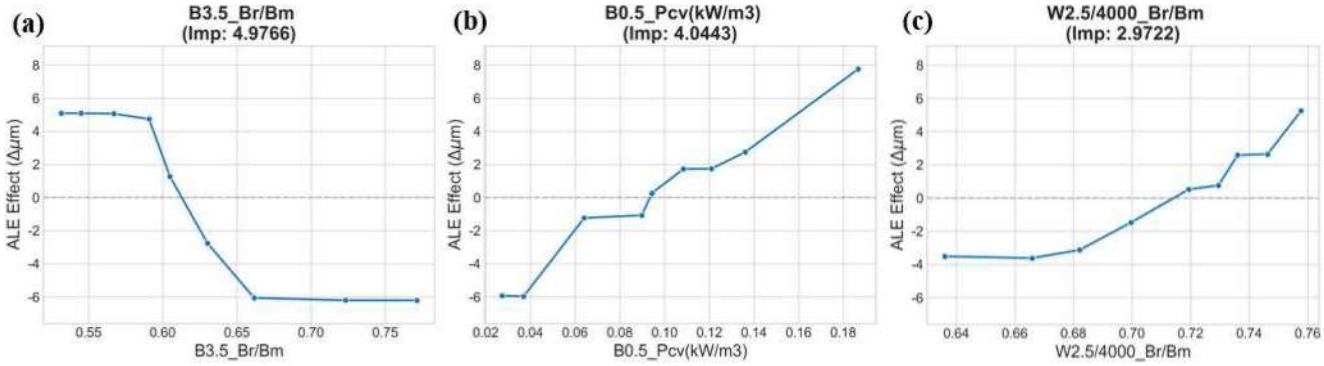


Fig. 3. TabNet-SSL 상위 4개 변수의 ALE plot: (a) B3.5_Br/Bm, (b) B0.5_Pcv, (c) B2.5_2phim, (d) W2.5/4000_Br/Bm

그림 4와 같이 B0.5, B2.5, B3.5 세 측정 조건이 누적 중요도의 약 57%(그림 4(a): ALE 58%, 그림 4(b): CE 56%)를 차지하였다. 이에 근거해 세 조건의 30개 변수만 사용하는 경량화 TabNet을 구축한 결과(표 1), 입력 변수가 100개에서 30개로 축소되어도 R^2 = 0.73, RMSE = 14.48 μm를 유지하였다. 학습 및 테스트 데이터셋에 사용되지 않은 새로운 시편 11개에서 경량화 TabNet으로 결정립 크기를 예측해보았을 때 42.1~116.8 μm 전 구간에 걸쳐 평균 오차 약 9.9 μm의 성능으로 예측을 할 수 있었다.

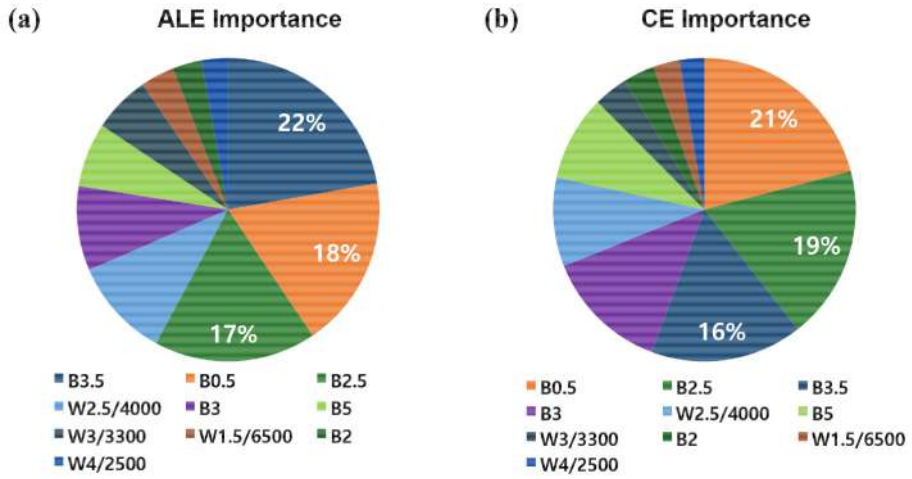


Fig. 4. TabNet-SSL의 측정 조건별 누적 변수 중요도 비율: (a) ALE, (b) CE

Table 1. Full TabNet과 경량화 TabNet의 성능 비교

	Input dim.	R^2	RMSE (μm)
Full TabNet	100	0.81	12.20
Lightweight TabNet	30	0.73	14.48
Reduction	70%	-10%	+19%

경량화 모델의 입력 축소는 시편당 측정 조건 수의 70% 절감으로 이어져 자성 측정 소요시간 단축을 통한 인라인 샘플링의 현장 적용 가능성을 높인다. 또한 XAI 분석 결과가 측정 프로토콜 설계의 정량적 근거로 활용될 수 있음을 시사한다.

참고문헌(References)
1) J. S. Ha, H. S. Jang, S. Shin, C.-S. Park and S. Park, J. Magnetics 30, 360 (2025).
2) K. Majmundar, S. Goyal, P. Netrapalli and P. Jain, MET: Masked Encoding for Tabular Data, https://arxiv.org/pdf/2206.08564 (2022).
3) W. Ji, Z. Deng, R. Nakada, J. Zou and L. Zhang, J. Mach. Learn. Res. 24, 1 (2023).
4) N. Leuning, S. Steentjes and K. Hameyer, J. Magn. Magn. Mater. 469, 373 (2019).
5) G. Bertotti, Hysteresis in Magnetism, p.576, Academic Press, San Diego (1998).
6) J. Sun, Y. Lu, L. Zhang, Y. Le and X. Zhao, Materials 15, 7353 (2022).

[학생2-1 | 10:40]

레이저 분말베드융융 Ti-6Al-4V 하이브리드 격자 단위셀의 노드 형상에 따른 국부 변형 재분배 거동: 김영훈[1*], 성효경[1]; 1.국민대학교 신소재공학부

Keywords: 레이저 분말베드 융합(LPBF), Ti-6Al-4V, 격자구조, 하중경로 재분배, 전자후방산란회절(EBSD)

1. 연구 배경 및 목적

적층제조 기술은 기존 가공공정으로 구현하기 어려운 복잡한 스트럿–노드 네트워크를 직접 제조할 수 있어, 경량화와 에너지흡수를 목적으로 하는 금속 격자구조의 설계 자유도를 크게 확장하였다. 특히 Octet-truss와 같은 stretch-dominated 격자구조는 하중 방향으로 연결된 스트럿을 통해 하중을 전달하므로 높은 초기 강성과 압축강도를 구현할 수 있다. 그러나 다수의 스트럿이 제한된 영역에서 교차하는 기하학적 특성으로 인해 노드–스트럿 접합부에서 높은 응력 및 변형 집중이 발생하며, 이는 노드부의 조기 균열 개시와 급격한 하중 저하를 유발할 수 있다. 노드 필렛, 국부 직경 증가 및 TPMS 기반 접합부와 같은 노드 최적화는 이러한 응력집중을 완화할 수 있으나, 상대밀도 증가 없이 하중경로를 효과적으로 분산하고 그 원인을 미세조직적 변형과 연계하여 규명한 연구는 제한적이다[1,2].

본 연구에서는 기존 Octet-truss의 노드 응력집중을 완화하기 위해 Primitive 유래의 곡면 노드, 중공부, 십자형 보강부 및 부재별 반경비를 결합한 하이브리드 격자구조를 설계하였다. 기존 다중 단위셀 압축시험에서 하이브리드 격자구조는 15.4%의 상대밀도에서 397.3 MPa의 최대 압축응력과 35.8 kJ/kg의 비에너지흡수량을 나타냈다. 이는 상대밀도 16.2%인 기존 Octet-truss의 최대 압축응력 295.3 MPa 및 비에너지흡수량 23.5 kJ/kg보다 각각 약 34.5% 및 52.3% 높은 값이다. 또한 최대응력 도달 변형률은 Octet-truss

의 5.8%에서 하이브리드 격자의 9.2%로 증가하였다.

본 연구에서는 이러한 거시적 압축성능 향상이 단순한 노드부의 단면 증가가 아니라, 복합 노드 형상에 의해 형성된 다중 하중전달경로와 국부 소성변형의 재분배에 의해 발생하였음을 규명하였다. 이를 위해 확대 단위셀에 대한 단계별 중단 압축시험과 유한요소해석을 수행하고, 노드 및 스트럿의 국부 변형을 전자후방산란회절 분석 결과와 연계하였다.

2. 연구 방법

2.1 단위셀 설계 및 제조

노드부의 절단, 연마 및 EBSD 분석을 용이하게 하기 위해 기존 단위셀과 동일한 기하학적 비율을 유지하면서 Octet 및 하이브리드 단위셀의 크기를 10 × 10 × 10 mm로 확대하였다. 모든 길이 방향 형상변수에는 동일한 확대비를 적용하여 단위셀 크기 대비 스트럿 직경, 노드 크기, 중공부 직경 및 보강부 직경의 비율을 유지하였다.

하이브리드 단위셀은 Octet 골격을 기반으로 하되, 스트럿 교차부에 Primitive 유래의 연속 곡면형 노드를 배치하였다. 노드 내부에는 중공부를 형성하여 질량 증가를 억제하였으며, 인접 스트럿 사이에는 십자형 보강부를 배치하여 기존 노드 중심을 통과하지 않는 추가 하중전달경로를 형성하였다. 또한 주 스트럿, 보강부 및 노드–스트럿 전이부에 서로 다른 반경을 부여하여 하중경로에 따른 재료 배치를 구현하였다.

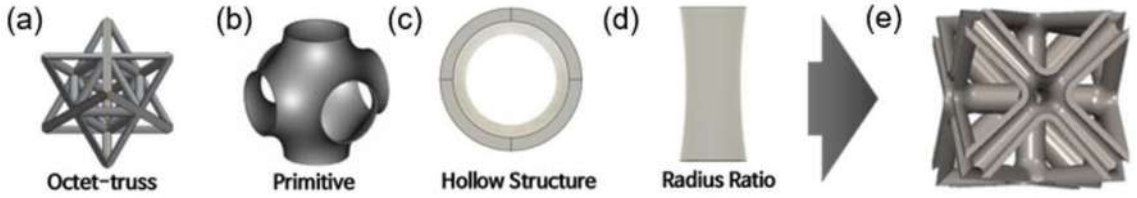


Fig. 1. (a) Octet-truss, (b) Primitive TPMS 구조, (c) Hollow 구조, (d) radius ratio, (e) 최종설계 hybrid 구조

설계된 단위셀은 Ti-6Al-4V 합금 분말을 이용한 레이저 분말베드용융 공정으로 제조하였다. Octet 및 하이브리드 단위셀은 동일한 빌드 플레이트, 적층방향 및 공정조건으로 제조하여 공정조건과 열이력 차이가 구조 간 비교에 미치는 영향을 최소화하였다. LPBF 미세 스트럿은 설계 크기에 따라 표면 거칠기, 형상오차 및 결함의 상대적 영향이 달라질 수 있으므로[3], 제조 후 실제 스트럿 직경과 노드 형상을 주사전자현미경으로 확인하였다.

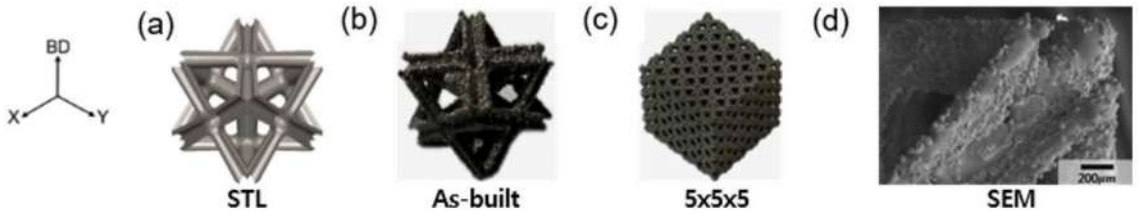


Fig. 2. 하이브리드 단위셀의 (a) STL 형상, (b) 제조 후 단위셀, (c) 5×5×5 반복 배열 구조체, (d) SEM 이미지

2.2 단계별 중단 및 유한요소해석

Octet 및 하이브리드 단위셀의 변형 진전을 비교하기 위해 미변형 상태와 압축변형 단계별 중단시험을 수행하였다. 중단지점은 단일셀의 하중–변위 곡선을 기준으로 다음과 같이 설정하였다. 각 구조의 최대하중 도달시점이 서로 다르므로, 동일한 전역 압축변형률에서의 비교와 함께 각 구조에서 동일한 기계적 상태에 해당하는 변형단계를 비교하였다.

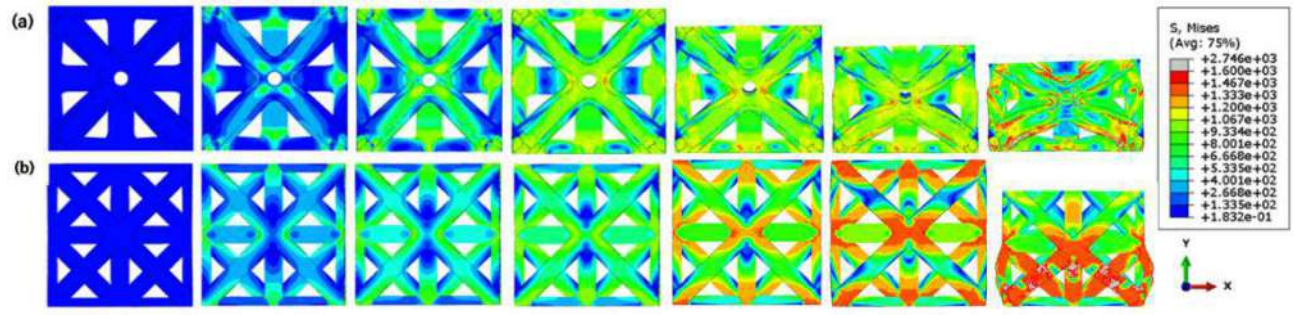


Fig. 3. 설계된 격자구조와 Octet-truss의 유한요소해석 결과

유한요소해석에는 실제 10 mm 단위셀 형상과 상·하부 압축판을 적용하였다. 하부 압축판을 고정하고 상부 압축판에 변위를 부여하였으며, 구조체–압축판 접촉과 구조체 내부의 자가접촉을 고려하였다. 해석 결과로 von Mises 응력, 최대주변형률, 등가소성변형률 및 소성소산에너지를 산출하였다. 또한 노드 중심부, 노드–스트럿 전이부, 주 스트럿 및 보강부의 등가소성변형률을 각각 추출하여 부재별 하중분담 변화를 분석하였다.

2.3 미세조직 및 국부 변형 분석

Octet 및 하이브리드 단위셀의 노드 형상에 따른 국부 변형거동을 비교하기 위해 변형률 단계별 중단 압축시험을 수행하였다. 각 구조는 미변형 상태와 3, 6, 10%의 전역 압축변형률에서 시험을 중단하였으며, 압축 후 단위셀의 전체 변형 형상을 정면과 측면에서 촬영하였다.

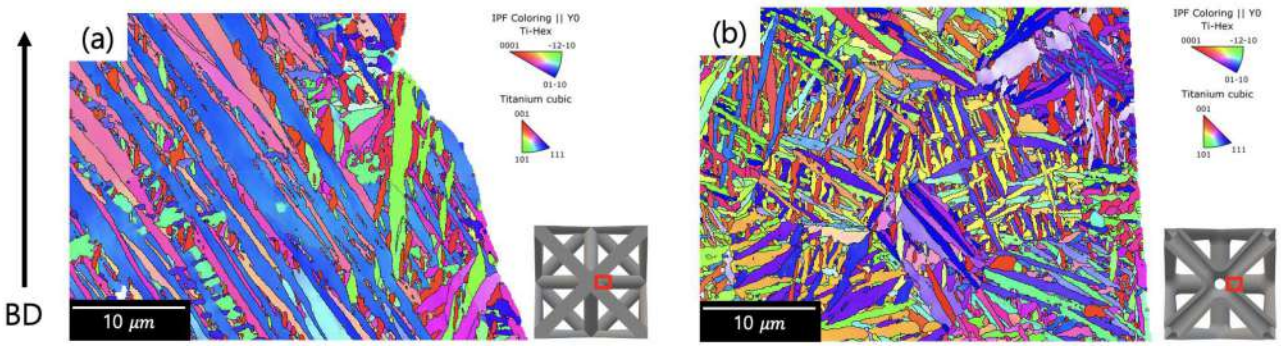


Fig. 4. As-built 상태에서 노드 중심부의 전자후방산란회절 분석 결과: (a) Octet 구조 및 (b) 하이브리드 구조

국부 분석은 각 구조에서 응력 및 소성변형이 집중되는 노드 중심부를 대상으로 수행하였다. Octet 단위셀에서는 복수의 주 스트럿이 직접 교차하는 중심부를 관찰영역으로 설정하였으며, 하이브리드 단위셀에서는 Primitive 유래 곡면 노드와 십자형 보강부가 결합되는 중심부를 관찰영역으로 설정하였다. 구조 간 정량적 비교를 위해 모든 시편에서 압축방향, 절단면, 관찰배율 및 분석영역의 크기를 동일하게 유지하였다.

각 변형단계에서 노드 중심부의 형상 변화, 국부 회전, 좌굴, 표면균열 및 균열 개시 위치를 주사전자현미경으로 관찰하였다. 또한 관찰 결과를 유한요소해석에서 계산된 노드 중심부의 von Mises 응력 및 등가소성변형률 분포와 비교하여, 기존 Octet 노드의 국부 변형 집중과 하이브리드 노드의 하중 및 변형 분산 거동을 분석하였다. 이를 통해 하이브리드 노드의 복합 형상이 노드 중심부의 응력집중과 손상 개시를 완화하는 구조적 메커니즘을 규명하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 기존 다중 단위셀의 압축거동

기존 다중 단위셀 압축시험에서 하이브리드 격자구조는 Octet-truss보다 낮은 상대밀도에도 불구하고 높은 최대 압축응력과 비에너지흡수량을 나타냈다. Octet-truss의 최대 압축응력과 비에너지흡수량은 각각 295.3 MPa 및 23.5 kJ/kg이었으나, 하이브리드 격자는 397.3 MPa 및 35.8 kJ/kg을 나타냈다. 최대응력 도달 변형률 또한 5.8%에서 9.2%로 증가하였다.

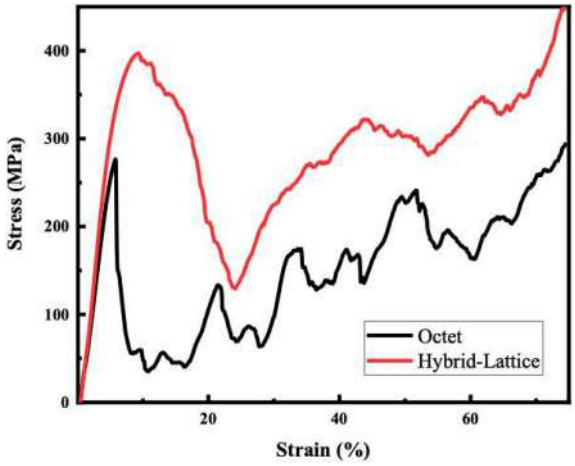


Fig. 5. 설계된 격자구조와 기존 Octet-truss의 압축응력 그래프

Table 1. 설계된 격자구조와 기존 Octet-truss의 압축 응력 표

	Relative Density (%)	σ_{peak} (MPa)	ε_{peak} (%)	*SEA* (kJ/kg)
Octet truss	16.2	295.3	5.8	23.5
Hybrid Lattice	15.4	397.3	9.2	35.8

이는 하이브리드 구조의 성능 향상이 단순한 상대밀도 증가에 의한 것이 아니라, 노드 형상 변화와 추가 보강경로에 의해 발생했음을 보여준다.

Hybrid 구조에서는 주 스트럿을 통해 전달된 하중이 Primitive 유래 곡면 노드와 십자형 보강부로 분기되었다. 곡면 노드는 스트럿–노드 사이의 급격한 단면변화를 완화하였으며, 보강부는 노드 중심부를 우회하는 추가 하중전달경로를 형성하였다. 이에 따라 응력과 소성변형이 하나의 접합부에 집중되지 않고 곡면 노드, 보강부 및 주변 스트럿으로 분산되었다. 이러한 결과는 노드 필렛과 곡률 변화가 Octet 구조의 국부 응력집중을 완화한다는 선행연구 결과와 일치한다[4,5].

3.2 노드 형상에 따른 미세조직 및 응력분포

그림 4에서의 전자후방산란회절 분석 결과, 동일한 LPBF 공정조건에서도 노드 형상에 따라 국부 미세조직의 차이가 나타났다. Octet 노드에서는 특정 방향으로 길게 발달한 비교적 조대한 침상 조직이 관찰된 반면, Hybrid 노드에서는 짧고 미세한 침상 조직이 여러 방향으로 분포하였다. LPBF Ti-6Al-4V의 국부 미세조직은 냉각속도와 반복 열이력뿐만 아니라 부품의 형상, 단면적 및 열전도 조건에도 영향을 받는 것으로 보고되어 있다[6,7].

전자후방산란회절 분석 결과, Octet 노드는 중심부의 열 축적과 반복 재가열로 비교적 조대한 침상 조직이 형성되고 노드–스트럿 접합부에 응력이 집중되었다. 반면, Hybrid 노드는 곡면과 다방향 연결부를 통한 열 방출로 더욱 미세한 침상 조직이 형성되었으며, 하중경로가 곡면 노드와 보강부로 분기되어 응력 및 국부 변형이 효과적으로 분산된 것으로 판단된다.

미세조직과 유한요소해석 결과를 종합하면, Hybrid 구조의 응력분산은 기본적으로 곡면 노드와 보강부가 형성한 복수의 하중전달경로에 의해 발생하였다. Hybrid 노드에서 관찰된 미세한 침상 조직은 응력분산의 직접적인 원인이라기보다, 슬립 및 전위 이동의 유효거리를 제한하여 국부 항복과 변형집중을 억제하는 보조적인 미세조직 요인으로 해석된다. 따라서 Hybrid 구조의 안정적인 압축거동은 노드 형상에 의한 하중경로 재분배와 이에 수반된 국부 미세조직 미세화가 함께 작용한 결과로 판단된다.

참고문헌(References)

1) N. Khan and A. Riccio, Prog. Aerosp. Sci. 149, 101021 (2024).
2) H. Yin, W. Zhang, L. Zhu, F. Meng, J. Liu, and G. Wen, Compos. Struct. 304, 116397 (2023).
3) S. Cao, Y. Zou, C. V. S. Lim, and X. Wu, Light Adv. Manuf. 2, 20 (2021).
4) R. M. Latture, R. X. Rodriguez, L. R. Holmes, and F. W. Zok, Acta Mater. 149, 78 (2018).
5) D. Disayanan, P. Buntornvorapan, T. Sukprasertchai, and V. Uthaisangsuk, Compos. Struct. 337, 118067 (2024).
6) C. Zhou, N. Garcia, R. Pu, P. Sun, and Z. Z. Fang, Materials 18, 3756 (2025).
7) J. Munk, E. Breitbarth, T. Siemer, N. Pirch, and C. Häfner, Metals 12, 482 (2022).

[학생2-2 | 10:55]

고온 내마모성 향상을 위한 Ti-6Al-4V/AlTiCrV$_{0.5}$Fe$_{0.5}$ 고엔트로피 합금 이종 다층재의 복합 마모 거동: 강민욱(발표자)[1], 이한성[2,3], 정상연[1], 안병민[1,3*]; [1]아주대학교(에너지시스템학과), [2]Yale University(Department of Materials Science), [3]아주대학교(첨단신소재공학과)

Keywords: high-entropy alloy, Ti-6Al-4V, wear, multilayer, diffusion bonding

기계 부품의 반복적인 마모 환경에서는 마찰열과 주변 열원의 영향으로 접촉부 온도가 상승하며, 이러한 고온 환경은 표면 변형, 재료 전이 및 마모 파편의 거동을 변화시켜 마찰 안정성과 마모 특성에 영향을 줄 수 있다. Ti-6Al-4V는 우수한 비강도와 내식성으로 다양한 부품에 활용되지만, 낮은 열전도도로 인해 마찰열이 접촉부에 집중되고 상대재와의 융착 및 국부적인 표면 손상이 발생하여 낮은 내마모성을 보인다. 따라서 고온 마모 환경에서 안정적인 표면 특성을 확보하기 위한 재료 설계가 요구된다. 서로 다른 기계적 물성을 갖는 재료를 교대로 배치한 이종 다층 구조는 각 구성 재료의 특성을 함께 활용할 수 있다. 이때 각 층의 경도와 변형 특성이 함께 작용하여 마찰계수와 마모 거동에 영향을 줄 수 있다. 이에 본 연구에서는 고경도 특성을 가지는 AlTiCrV$_{0.5}$Fe$_{0.5}$ 고엔트로피 합금(High-entropy alloy, HEA)을 Ti-6Al-4V에 교대로 적층한 이종 다층재를 제조하여 내마모성 향상을 유도하고자 한다. AlTiCrV$_{0.5}$Fe$_{0.5}$ HEA는 Ti-6Al-4V와 Ti, Al 및 V 공통 원소의 확산접합을 유도하고, BCC 및 C14 Laves상으로 구성되어 높은 경도를 갖는다. 건식 마찰 접촉에서 발생하는 고온에 의해 재료마다 변형과 마모 파편의 산화 및 tribo-layer 형성 거동이 달라질 수 있다. 이러한 열적 영향이 나타나는 고온 조건으로 300°C로 선정하고, 상온과 300°C에서 Ti-6Al-4V, HEA 및 이종 다층재의 마찰계수와 마모율을 비교하였다. 이를 통해 온도와 다층 구조가 각 재료의 마찰·마모 거동에 미치는 영향을 평가하였다.

AlTiCrV$_{0.5}$Fe$_{0.5}$ HEA 분말은 24시간의 고에너지 볼 밀링을 통해 제조하였으며, Ti-6Al-4V는 가스 분무법으로 제조된 구형 분말을 사용하였다. 두 분말을 총 4개의 층, 각 층당 두께 약 3mm로 교대로 적층한 후 방전 플라스마 소결을 통해 이종 다층재를 제조하였다. 제조된 시편의 상 구성은 X선 회절 분석(X-ray diffraction, XRD)을 이용하여 분석하였으며, 층별 미세조직과 계면의 원

소 분포는 주사전자현미경-에너지 분산형 분광분석기(scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscope, SEM-EDS)를 통해 분석하였다. 또한 각 구성 영역은 비커스 경도를 통해 분석하였으며, 50gf 하중에서 10초 유지하였다. 마찰·마모 거동은 WC ball을 상대재로 사용한 직선 왕복동 마모시험을 진행하였으며, 상온과 300°C에서 과도한 소성변형을 제한하고 반복 접촉에 따른 마찰 거동 및 재료 손실을 함께 비교하기 위해 10N의 하중, 4cm/s의 미끄럼속도에서 30분 수행하였다. 이때 이종 다층재는 마모 트랙이 Ti-6Al-4V층, 계면 및 HEA층을 연속적으로 통과하도록 배치하여, 하나의 마모 경로에서 각 구성 영역의 손상 거동을 비교하였다. 시험 후에는 마모 트랙과 debris의 형상 및 조성을 관찰하고, WC ball의 표면과 질량 변화를 분석하여 재료 전이 여부를 분석하였다.

제조된 이종 다층재에서는 Ti-6Al-4V의 α/β lamellar 조직과 HEA의 BCC계 기지 및 C14 Laves상이 관찰되었다. Ti-6Al-4V/HEA 계면은 뚜렷한 균열이나 기공 없이 형성되었으며, 계면에서는 추가적인 상 형성 없이 각 층의 원소가 상호확산한 영역이 관찰되었다. 상온 마모시험에서는 세 재료 마찰계수가 0.4 이하의 값으로 공통적으로 관찰되었으나, 마찰계수의 변동 폭과 마모율에서 차이가 나타났다. 이종 다층재는 세 재료 중 상대적으로 좁은 마찰계수 변동 폭을 보여 가장 안정적인 접촉 거동을 보인 반면, HEA는 순간적인 마찰 변동이 가장 크게 나타났다. 상온 마모율은 HEA, 이종 다층재, Ti-6Al-4V 순으로 증가하여, 경질 HEA가 가장 낮은 재료 손실을 나타냈으며 다층재는 Ti-6Al-4V 단일재보다 낮은 재료 손실을 나타냈다. 300°C에서는 시간에 따라 변화하는 마찰 거동이 관찰되었다. HEA와 이종 다층재는 시험 초기에 높은 마찰계수를 나타낸 후 점차 감소한 반면, Ti-6Al-4V는 시험전반에 걸쳐 지속적인 변동을 보였다. 이러한 마찰계수 감소는 반복적인 미끄럼 과정에서 생성된 마모 파편이 WC ball과 마모 트랙에 응집 및 융착되면서 tribo-layer를 형성하여 ball과 모재 간의 직접적인 접촉을 감소시킨 결과로 판단된다. 반면 형성된 tribo-layer가 반복적인 마찰에 의해 균열 또는 박리되면, 분리된 경질 파편이 접촉면에 재유입되어 일시적인 3체 마모와 급격한 마찰계수의 변동을 유발할 수 있다. 따라서 300°C에서 나타난 마찰 거동은 마모 파편층의 형성, 응집·융착, 국부적인 파괴 및 재형성이 반복되는 동적 tribo-oxidation 과정과 관련된 것으로 판단된다.

본 연구에서 설계한 이종 다층재는 300°C에서도 Ti-6Al-4V 단일재보다 낮은 재료 손실을 나타내어 HEA층의 도입이 Ti-6Al-4V의 고온 마모 거동을 보완할 수 있음을 확인하였다. 또한 층별 표면 형상은 Ti-6Al-4V층에서 넓은 groove와 표면 변형이 관찰되어 abrasive wear 및 adhesive wear가 복합적으로 발생하였다. 반면 HEA층에서는 미세한 groove와 국부적인 박리 흔적이 관찰되었으며, 이를 통해 abrasive wear 및 delamination이 발생한 것으로 판단된다. 이와 같이 두 층은 서로 다른 방식으로 변형되고 마모되었음을 보여주었다. 이러한 결과는 Ti-6Al-4V와 $AlTiCrV_{0.5}Fe_{0.5}$ HEA의 이종 다층화가 고온 마찰 환경에서 마찰 안정성과 재료 손실을 조절할 수 있는 재료 설계 방법으로 활용될 가능성을 확인하였다.

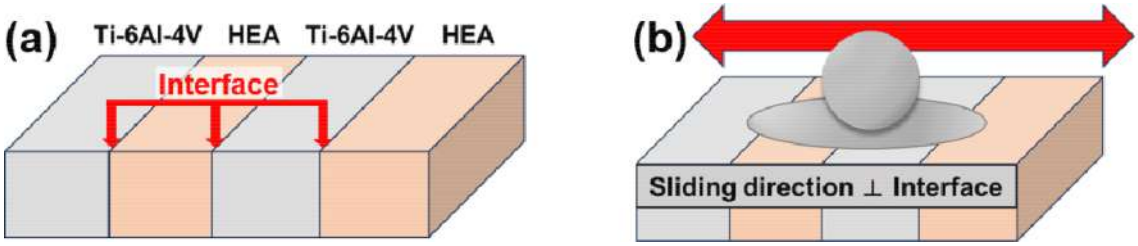


Fig. 1. Schematic of (a) the Ti-6Al-4V/HEA multilayer structure, (b) cross-interface reciprocating sliding.

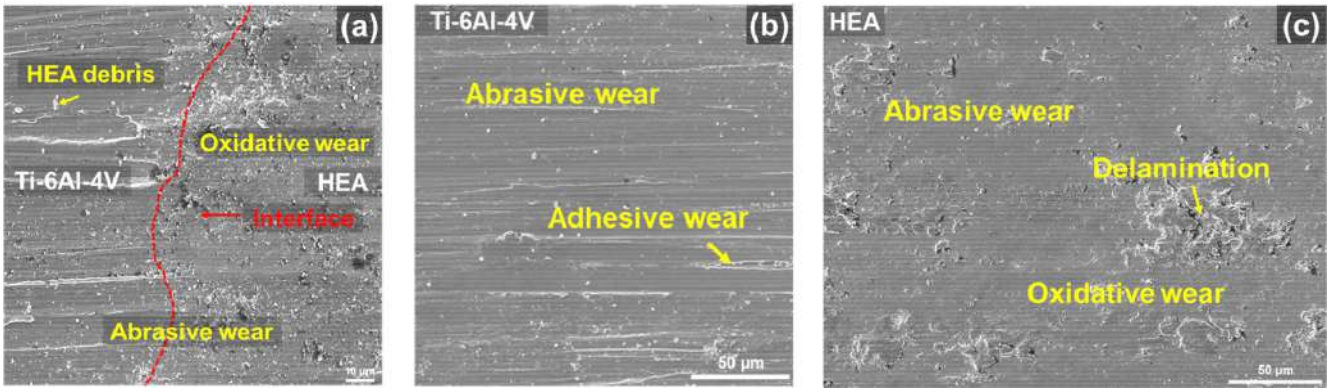


Fig. 2. SEM image of room-temperature wear track of Ti-6Al-4V, HEA, and multilayer specimens: (a) Ti-6Al-4V/HEA interface, (b) Ti-6Al-4V, (c) HEA.

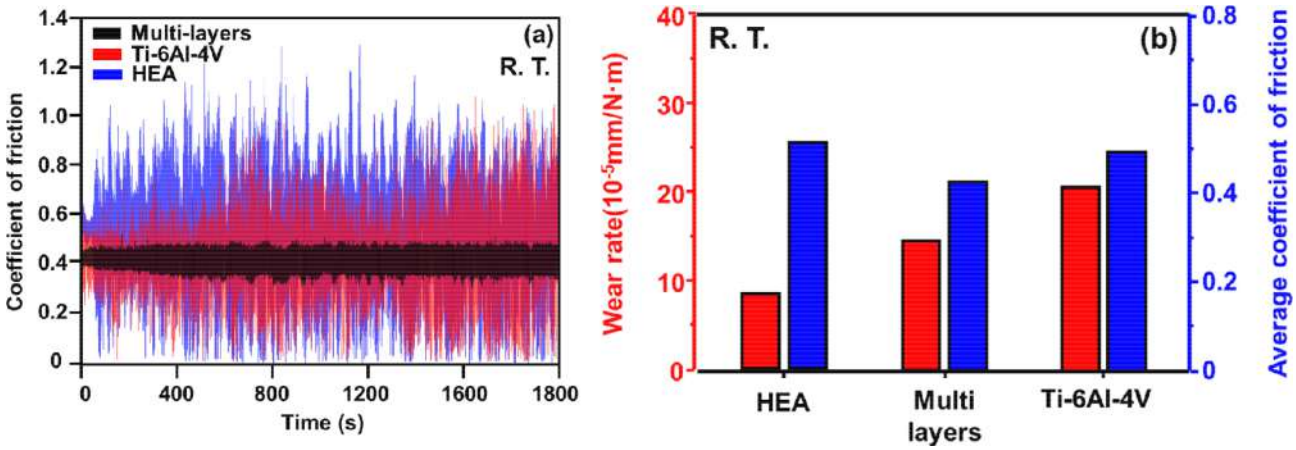


Fig. 3. (a) COF curves and (b) average COF and wear rate of HEA, Ti-6Al-4V, and multilayer specimens at room temperature.

참고문헌(References)
1) C. Nagarjuna, H. Lee, S. K. Dewangan, K. R. Rao, G. M. Pillai, V. Kumar, and B. Ahn, J. Mater. Res. Technol. 33, 5119-5135 (2024).
2) D. R. Lesuer, C. K. Syn, O. D. Sherby, J. Wadsworth, J. J. Lewandowski, and W. H. Hunt Jr., Int. Mater. Rev. 41, 169–197 (1996).
3) M. Khadem, O. V. Penkov, H. K. Yang, and D. E. Kim, Friction 5, 248–262 (2017)

[학생2-3 | 11:10]

실리사이드 코팅된 Nb–16Si–22Ti–5Cr–3Al 합금의 1500°C 산화 거동 및 면적 분율 기반 코팅 수명 예측: 양하영[1], 김선진[1], 정현준[1], 강전준[1], 박준식[1*]; 1.국립한밭대학교 신소재공학과

Keywords: Nb–Si alloy, High-temperature oxidation, Surface degradation, Coating lifetime, Pack cementation

Nb-Si계 합금은 높은 융점과 우수한 고온 기계적 특성으로 인해 차세대 초고온 구조재료로 주목받고 있다. 그러나 1500 °C 이상의 초고온 환경에서는 산화 저항성이 매우 낮기 때문에 고온 환경에서의 내구성을 확보하기 위한 보호 코팅과 함께 코팅의 유효 수명을 정량적으로 평가하는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 Nb-16Si-22Ti-5Cr-3Al 합금에 pack cementation을 적용하여 실리사이드 코팅을 형성하고, 1500 °C 산화시험을 통해 보호상인 (Nb,X)Si_2 상의 소모 거동을 정량화하여 코팅 수명을 예측하는 새로운 방법을 제안하였다.

Nb–16Si–22Ti–5Cr–3Al 합금은 아크 용해로 제조하였으며, Pack Cementation 코팅 후 1500 °C에서 산화시험을 수행하였다. 산화 후 단면 미세구조는 주사전자현미경(SEM) 및 에너지 분산형 X선 분광기(EDS)를 활용해 분석하였다. 또한 산화 시간에 따른 (Nb,X)Si_2 상의 면적 분율 변화를 ImageJ 프로그램을 이용하여 정량 분석하였으며, (Nb,X)Si_2 면적 분율과 산화 시간의 관계를 선형 회귀 분석하여 실리사이드 코팅의 수명을 예측하였다.

코팅 후 합금 표면에는 104 μm 두께의 균일한 (Nb,X)Si(X=Ti, Cr, Al) 층이 형성되었다. 1500 °C 산화시험 결과, 무코팅 합금은 20 h 후 –350.5 mg/cm^{2}의 큰 질량 감소와 심한 산화가 발생한 반면, 실리사이드 코팅 합금은 20 h 후에도 2.7 mg/cm^{2}의 낮은 질량 변화로 우수한 산화 저항성을 나타내었다.

Fig. 1은 산화 시간에 따른 (Nb,X)Si_2 상의 면적 분율 변화와 코팅 수명 예측 결과를 나타낸다. (Nb,X)Si_2의 면적 분율은 1 h에서 73.2%였으며, 산화 시간이 증가함에 따라 20 h에서 8.4%까지 감소하였다. 면적 분율과 산화 시간의 선형 회귀식은 높은 결정계수(R^2 = 0.99)를 나타냈으며, (Nb,X)Si_2의 면적 분율이 0%에 도달하는 시점인 약 22.4 h를 코팅 수명으로 예측하였다. 실제로 23 h 산화 후에는 보호성 (Nb,X)Si_2가 고갈되고 기지 산화가 발생하여 질량 변화가 −238.8 mg/cm^{2}로 급격히 감소하였다. 이는 전체 혼합층 두께만을 이용한 방법보다 보호상 자체의 면적 분율을 이용한 방법이 코팅 열화를 더 직접적으로 반영할 수 있음을 보여준다.

따라서 Nb-16Si-22Ti-5Cr-3Al 합금에 실리사이드 코팅 시 합금의 산화 저항성이 향상되었으며 본 연구에서 제안한 (Nb,X)Si_2 상의 면적 분율 기반 수명 예측 방법은 초고온 환경에서 실리사이드 코팅의 실제 사용 가능 시간을 정량적으로 평가할 수 있는 새로운 접근법임을 확인하였다.

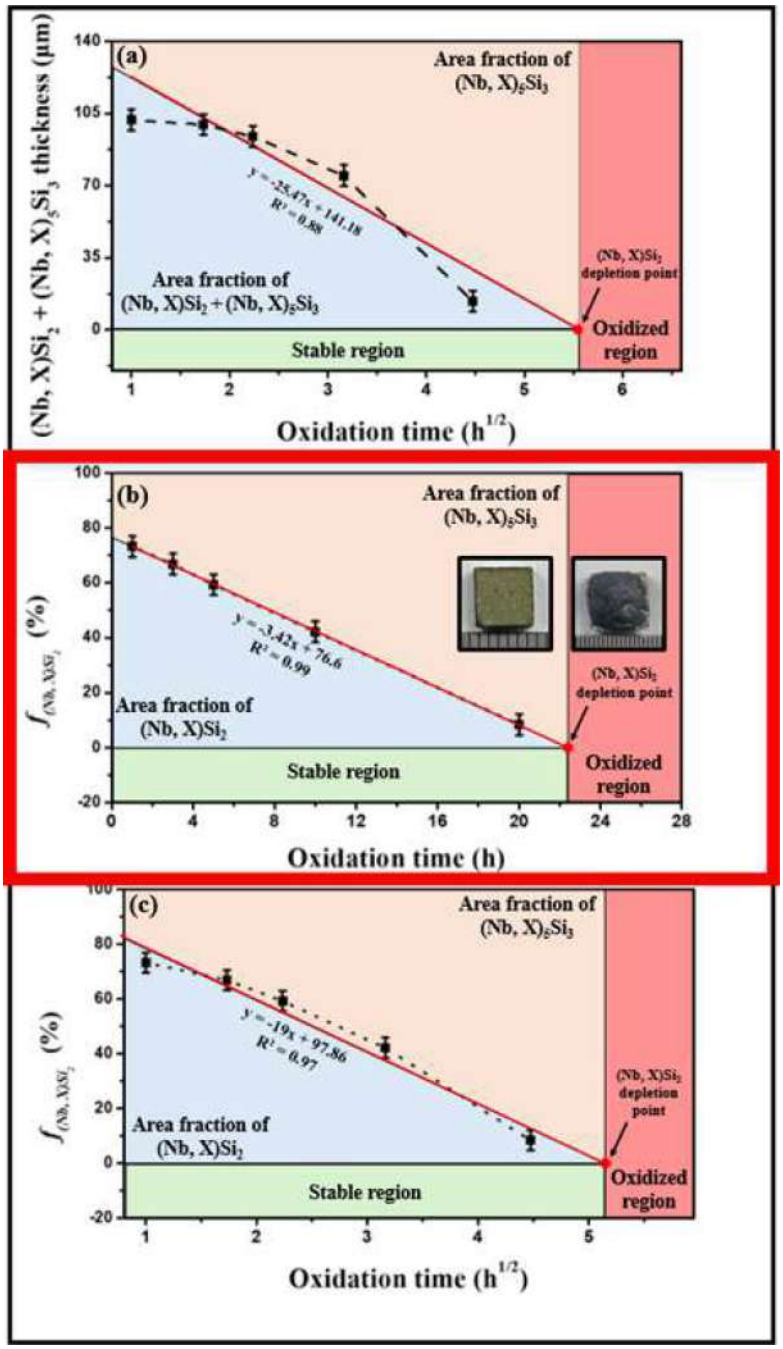


Fig. 1. (a) Thickness of the (Nb, X)Si_2 + (Nb, X)$_5Si_3$ layers as a function of the square root of oxidation time at 1500 ºC. The red lines represent the linear fittings, and the red points indicate the predicted depletion points of the (Nb, X)Si_2 + (Nb, X)$_5Si_3$ phase, (b) area fraction of (Nb, X)Si_2 as a function of oxidation time at 1500 ºC, in which the red lines represent the linear fittings, and the red points indicate the predicted depletion points of the (Nb, X)Si_2 phase with respect to area fraction of (Nb, X)Si_2 at 1500 ºC, (c) area fraction of (Nb, X)Si_2 at 1500 ºC, presented versus the square root of oxidation time.

참고문헌(References)

1) J.S. Oh, J.N. Park, S.J. Kim, K. Ku, J.M. Kim, S. Cho, and J.S. Park, Mater. Today Commun. 46, 112473 (2025).
2) M.Z. Alam, A.S. Rao, and D.K. Das, Oxid. Met. 73, 513–530 (2010).
3) W. Zhang, Y. Qiao, and X. Guo, Intermetallics 172, 108395 (2024).

[학생3-1 | 13:30]

초고강도강에서의 트램프 원소 입계편석이 수소취성 거동에 미치는 영향: 이정민[1,3*], 이진종[1], 박형권[1], 박성준[1], 이태호[1], 정승필[2], 전종배[3,*], 유지성[1,*]; [1]한국재료연구원, [2]현대제철, [3]동아대학교

Keywords: 전기로, 트램프 원소, Sn, Sb, 수소취성

최근 전기로 공정에서 스크랩 사용 비율이 증가함에 따라, 제강 공정 중 제거가 어려운 트램프 원소(Tramp elements)의 축적 문제가 대두되고 있다. 대표적인 트램프 원소로는 Cu, Ni, Sn, Sb 등이 있으며, 특히 Sn과 Sb는 입계 편석 경향이 강한 원소로 알려져 있다. 이에 따라 트램프 원소가 강재의 기계적 물성 및 수소취성 특성에 미치는 영향에 대한 체계적인 분석이 요구된다. 특히 1.8 GPa 급 초고강도강은 높은 강도로 인해 수소취성에 더욱 민감하므로, Sn과 Sb의 영향을 규명하는 것은 전기로 기반 고신뢰성 강재 개발에 중요한 의미를 가진다 [1,2].

본 연구에서는 1.8 GPa급 초고강도강을 대상으로 Sn과 Sb 첨가가 미세조직, 기계적 물성 및 수소취성 거동에 미치는 영향을 평가하였다. Sn, Sb 첨가(Sn+Sb: 0.04~0.2 wt.%)에 따른 미세조직 변화는 Martensite 조직과 Prior austenite grain boundary (PAGB) 크기 및 입계 편석 여부를 중심으로 분석하였으며, 비커스 경도 시험과 준정적 인장 시험을 수행하여 강재의 기본적인 기계적 물성을 평가하였다. 수소취성 저항성은 전기화학적 수소 장입 후 Slow strain rate tensile test(SSRT)를 수행하여 평가하였으며, 수소 장입 전후의 연신율 변화와 파단 거동을 비교하여 수소취성 민감도를 분석하였다. 또한 열탈착분석(Thermal desorption spectroscopy,TDS)을 통해 수소의 트래핑 및 방출 거동을 조사하였으며, Atom probe tomography(APT)를 이용하여 Sn과 Sb의 PAGB 편석 거동을 분석하였다 [3].

분석 결과 Sn, Sb 첨가는 전체적인 Martensite 조직 형상과 PAGB 크기에 유의미한 변화를 유발하지 않았으며, 비커스 경도와 준정적 인장 특성 또한 첨가 여부에 관계없이 유사한 수준을 유지하였다. TDS 분석 결과에서도 수소 함량 및 방출 거동에는 뚜렷한 차이가 나타나지 않아 Sn과 Sb 첨가가 강재의 기본적인 조직, 기계적 물성 및 수소 트래핑 특성에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 반면, 수소취성 평가에서는 뚜렷한 차이가 관찰되었다. SSRT 결과 Sn과 Sb가 첨가된 강재는 수소 장입 후 연신율이 현저히 감소하였으며, 취성 파괴 거동이 더욱 두드러지게 나타났다. 파면 분석 결과에서도 Sn, Sb 첨가 시 수소 장입 조건에서 입계 파괴 양상이 더욱 증가하는 경향을 확인하였다. 더불어 EBSD 분석에서는 균열이 PAGB를 따라 우선적으로 전파되는 양상을 보였으며, APT 분석을 통해 Sn과 Sb가 PAGB에 우선적으로 편석하는 거동을 확인하였다. 이러한 결과는 Sn, Sb가 PAGB의 decohesion을 촉진하고, 결과적으로 수소취성 민감도를 증가시키는 주요 인자로 작용한다는 것을 의미한다 [4,5].

본 연구는 스크랩 사용 확대에 따라 잔존 트램프 원소의 영향이 증가하는 전기로 공정 환경에서 Sn과 Sb가 초고강도강의 수소취성 거동에 미치는 영향을 체계적으로 규명하였다. 이러한 결과는 전기로 기반 초고강도강의 구조 신뢰성 향상과 수소취성 저항성 확보를 위한 트램프 원소 관리 및 합금 설계의 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

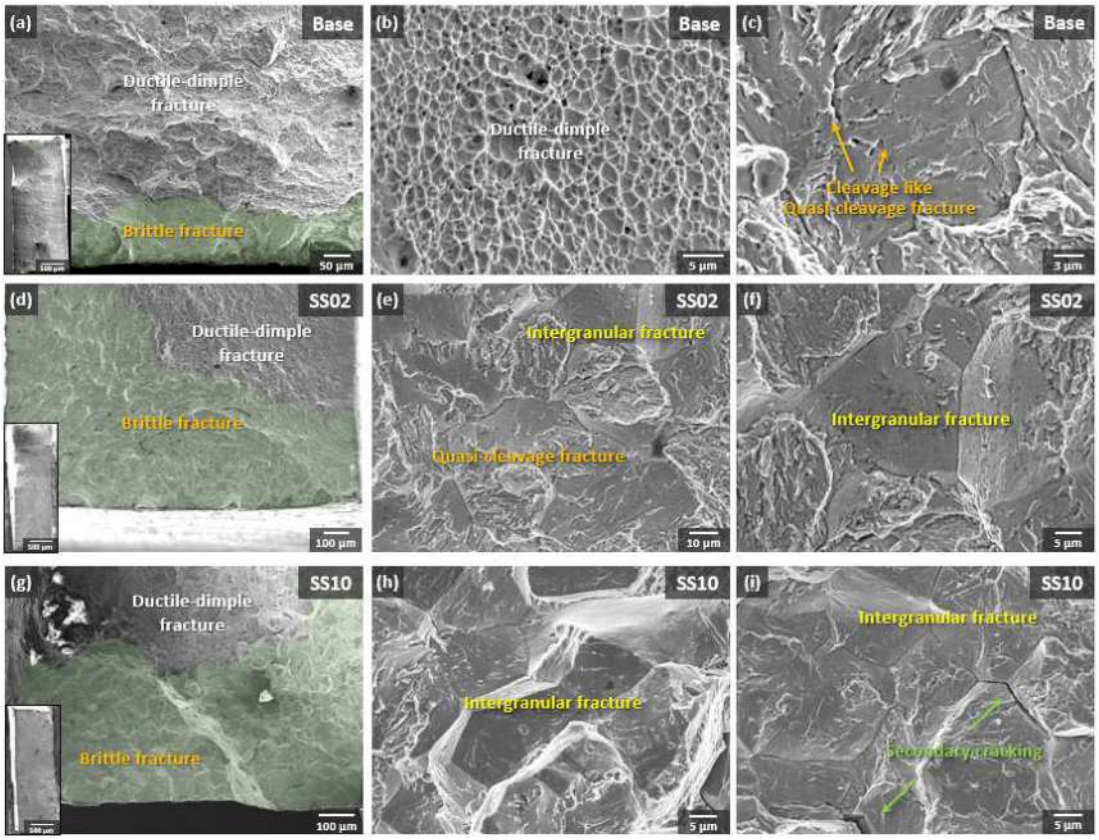


Fig. 1. SEM fractography of the SSRT specimens after hydrogen charging

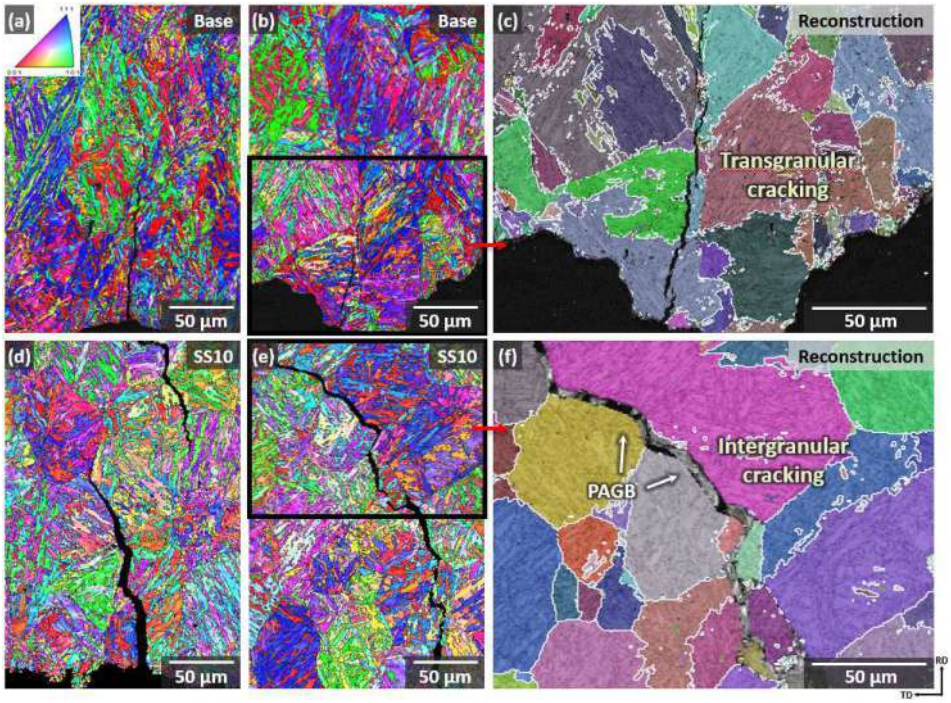


Fig. 2. EBSD analysis of the fracture surfaces of SSRT specimens after hydrogen charging

참고문헌(References)
1) D. Raabe et al. Nature. 575, 64-74 (2019).
2) S. Ahmed et al. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1284, 012041 (2023).
3) J. Yoo et al. J. Mater. Res. Technol. 35, 5230-5241 (2025).
4) Q. Zhu et al. Corros. Sci. 265, 113795 (2026).
5) A. Shibata et al. Int J Fract. 205, 73-82 (2017).

[학생3-2 | 13:45]

자동차용 초고강도강의 다양한 미세조직 구성에 따른 수소 확산 및 트랩 특성 규명: 김유리(발표자)[1], 김혜진[1*]; [1] 한국공학대학교 신소재공학과

Keywords: Ultra-High Strength Steel(UHSS), Martensitic Microstructure, Retained Austenite, Electrochemical Hydrogen Charging, Hydrogen Diffusivity

1. 서론

최근 자동차 산업에서는 연비 규제 강화와 충돌 안전성 요구 증대에 따라 차체 경량화와 고강도화를 동시에 만족하는 초고강도강(Ultra-High Strength Steel, UHSS)의 적용이 확대되고 있다. 980~1470 MPa급 강판은 Full-Martensite 조직의 MS(Martensitic Steel)강, Ferrite+Martensite 복합조직의 DP(Dual Phase)강, 잔류 오스테나이트(Retained Austenite, RA)를 포함하는 다상조직의 QP(Quenching & Partitioning)강 등 서로 다른 미세조직 설계로 구현되며, 강도와 조직 복잡도가 높아질수록 수소 취성 민감도가 급격히 상승하는 문제가 있다.

선행연구에 따르면 DP강에서는 마르텐사이트 상의 결합력 저하(decohesion)에 의해 손상이 개시되고 수소에 의해 페라이트의 균열 정지(crack-arresting) 능력이 저하되어 손상이 성장하며, QP강의 RA는 마르텐사이트 대비 최대 3배 높은 수소 용해도로 인해 수소유기균열의 경로로 작용하는 것으로 보고되었다. 최근에는 U-bend 지연파괴 시험을 통해 DP·QP강의 수소취성을 비교한 연구도 수행되었으나, 확산계수·트랩밀도 등 확산론적 파라미터에 대한 정량 비교는 여전히 제한적이다.

이에 본 연구에서는 상용 자동차용 강종인 DP980, QP980, DP1180, MS1470을 대상으로 전기화학적 수소투과법 (Devanathan-Stachurski, D-S법)과 TDS (Thermal-Desorption Spectroscopy)을 이용해 수소 확산계수, 용해도, 트랩 사이트 종류 및 결합 활성화 에너지를 정량적으로 비교함으로써, 미세조직 설계를 위한 내수소취성 강종 개발의 기초 자료를 확보하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 공급재 및 시편 준비

본 연구에서는 강도 수준(980/1180/1470 MPa급) 및 미세조직 유형이 상이한 5개 강종(DP980, QP980, DP1180, MS1470)을 비교 대상으로 선정하였으며, 화학조성은 Table 1과 같다. DP·QP강은 Austenitizing 및 Ms~Mf 구간 Partitioning(350~500°C) 공정을 통해, MS강은 급냉 열처리 공정을 통해 각각 제조되었다.

Table 1. DP980, QP980, DP1180, MS1470S 강의 화학조성 비교 (wt.%).

강종	C	Si	Mn	P	S	Fe
DP980	0.07–0.15	1.0–1.5	2.0–2.5	<0.02	<0.005	Bal.
QP980	0.15–0.23	0.5–2.0	2.0–2.5	<0.02	<0.005	Bal.
DP1180	0.12-0.15	0.10-1.5	2.3–2.8	<0.02	<0.005	Bal.
MS1470	0.22±0.03	0.20±0.05	1.7±0.3	<0.02	<0.005	Bal.

2.2 미세조직 분석

각 강종의 상 분율, 결정립 크기 및 RA 분포는 SEM 및 EBSD(IQ/Phase/KAM map)로 정량화하고, EDS point 분석을 통해 상별 합금원소 분포를 함께 확인하였다.

2.3 수소투과시험(Devanathan-Stachurski Cell)

수소 확산 거동은 Devanathan-Stachurski(D-S) cell을 이용한 전기화학적 수소투과시험으로 분석하였다. 검출측 표면은 -0.5 mA/cm^2·300초 조건으로 Pd 도금하였으며, 검출셀(H-D, 0.1M NaOH)은 Potentiostatic 모드(기준전극 SCE, 상대전극 Pt Mesh), 충전셀(H-C, 3% NaCl+0.3% NH_4SCN)은 Galvanostatic 모드(-0.5, -5 mA/cm^2, 상대전극Graphite)로 운용하였다. 정상상태 투과전류밀도(Jss), 63% 도달시간(tlag) 기반 유효 확산계수(Deff), 가변수소농도(C0R)를 산출하였다. 검출 신뢰도 향상을 위해 검출측 Potentiostatic 안정화 단계 개시 후 1시간 동안 N_2가스를 퍼징하여 용존산소를 제거하는 절차를 신규로 도입하였으며, DP980을 대상으로 검출측 인가조건(0.25 및 0.5) 비교를 통한 최적화를 진행한 후 나머지 강종(MS, DP1180)에 대한 시험을 진행할 계획이다.

2.4 TDS(Thermal Desorption Spectroscopy) 분석

충전은 수소투과시험에서 도출된 정상상태 도달 시간과 동일한 시간 동안 Electrochemical Hydrogen Charging으로 수행하였으며, TDS는 Carrier Gas N_2(99.999%) 분위기에서 25ºC→700ºC, 승온속도 5/10/20 ºC/min(각 온도 10초 유지) 조건으로 분석하고, Kissinger 방법으로 트랩 활성화에너지(Ea)를 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

현재까지 DP980 및 QP980에 대한 미세조직 분석, 수소투과시험, TDS 분석이 완료되었으며, 이를 중심으로 결과를 제시한다.

3.1 미세조직 분석 결과

SEM 및 EBSD 분석 결과 DP강은 Ferrite+Martensite 복합조직을, QP강은 Ferrite+Martensite+잔류 오스테나이트(RA)로 구성된 다상조직을 나타내었다. EBSD Phase map 분석 결과 QP강 내 RA 분율은 약 4%(95.8% BCC / 4.2% FCC)로 확인되었으며, EDS point 분석에서 RA는 Martensite·Ferrite 대비 Mn 함량이 높게 나타나 오스테나이트 안정화 원소의 편석 경향과 부합하였다.

3.2 수소투과 거동

-0.5 mA/cm^2 충전 조건에서 QP강은 DP강 대비 정상상태 도달이 지연되고 투과 전류밀도도 낮게 나타났다(Fig. 1).

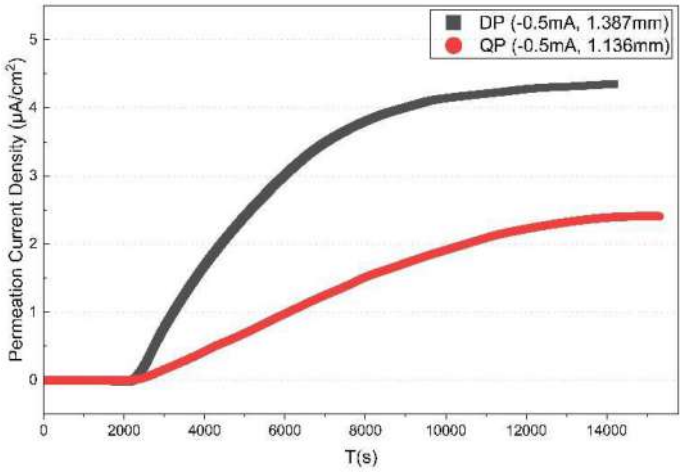


Fig. 1. -0.5 mA/cm^2 충전 전류밀도 조건에서 DP980 및 QP980의 수소투과 전류밀도 곡선 비교.

산출된 수소투과 및 TDS 트랩 특성 파라미터는 Table 2와 같다. QP강은 DP강 대비 C0R은 소폭 높으나 Deff는 약 2.4배 낮게 나타났으며, 이는 RA(FCC)의 낮은 확산 계수에 기인한 확산 제어형(Diffusion-controlled) 거동이 지배적임을 시사한다. Constant Concentration(CC) 및 Constant Flux(CF) 이론적 확산 모델 피팅 결과 역시 실측 거동과 높은 일치도를 보여 산출된 파라미터의 신뢰성을 뒷받침하였다.

3.3 TDS 트랩 거동

승온속도 20ºC/min 조건에서 DP강은 저온 영역에서 단일 주요 피크(Peak 1)를 나타낸 반면, QP강은 Peak 1, 2에 더하여 고온 영역(300ºC 이상)에서 결합 활성화에너지 82.5 kJ/mol의 Peak 3가 추가로 관찰되어(Fig. 2), RA 및 상경계에서의 강한 수소 트랩 거동을 시사하였다.

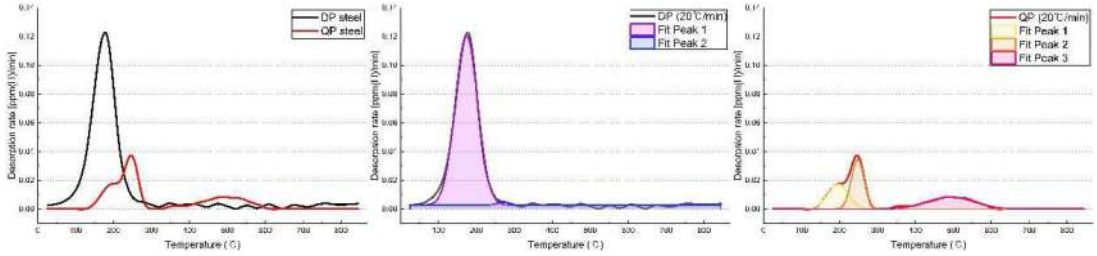


Fig. 2. 승온속도 20ºC/min 조건에서 DP980 및 QP980의 수소탈착 거동 및 트랩 사이트(Peak 1–3) 비교.

Table 2. DP980·QP980의 수소투과 및TDS 파라미터 비교. Htotal 및 Peak1–3 함량[ppm](괄호: Ea[kJ/mol]).

강종	Jss[mol/cm^2·s]	Deff[cm^2/s]	C0R[mol/cm^3]	Htotal	Peak1	Peak2	Peak3
DP980	4.83×10^{-11}	5.82×10^{-7}	1.15×10^{-5}	2.78	2.737(29.8)	0.023(46.8)	N/A
QP980	2.72×10^{-11}	2.47×10^{-7}	1.25×10^{-5}	1.37	0.415(23.7)	0.503(44.3)	0.452(82.5)

QP강은 DP강 대비 높은 표면 수소농도(C_{0R})에도 불구하고 낮은 확산속도로 인해 내부 침투가 표면 인근으로 제한되어, 총 수소량이 DP강(2.78 ppm) 대비 낮은 1.37 ppm으로 나타났다. 이는 QP강이 RA에 의한 확산 지연 및 강한 트랩(strong trapping) 효과를 통해 동일 수소 주입 조건에서 DP강보다 우수한 수소 침투저항성을 보유함을 정량적으로 뒷받침한다.

4. 향후 연구계획 및 결론

본 연구에서는 DP980·QP980 비교를 통해 QP강 내 RA의 확산 지연 및 강한 트랩 효과를 정량적으로 규명하였다. 향후 동일한 실험 절차를 DP1180, MS1470에 확대 적용하여 강도 등급 및 미세조직 인자가 수소 확산·트랩 거동에 미치는 영향을 종합적으로 비교할 예정이며, 강도 등급이 상승할수록 DP·QP강 간 트랩 거동의 격차가 더욱 뚜렷해질 것으로 예상된다. 아울러 DP980을 대상으로 검출측 Potentiostatic 인가 조건(0.25, 0.5) 비교를 통한 측정 신뢰도 개선과, 고전류밀도(-5 mA/cm^2) 충전 시 관찰된 기포 발생 문제 해결을 위한 D-S cell 구조 개선을 병행하여, 최종적으로 강도 등급 및 미세조직 설계 인자를 모두 고려한 자동차용 초고강도강의 내수소취성 설계 가이드라인을 제시하고자 한다.

참고문헌(References)

1) R. Kuziak, R. Kawalla, and S. Waengler, Arch. Civ. Mech. Eng. 8, 103 (2008).
2) M. Koyama, C. C. Tasan, E. Akiyama, K. Tsuzaki, and D. Raabe, Acta Mater. 70, 174 (2014).
3) X. Zhu, W. Li, H. Zhao, L. Wang, and X. Jin, Int. J. Hydrogen Energy 39, 13031 (2014).
4) H. Li, J. Venezuela, Q. Zhou, Z. Shi, M. Yan, R. Knibbe, M. Zhang, F. Dong, and A. Atrens, Mater. Sci. Eng. A 785, 139343 (2020).
5) M. A. V. Devanathan and Z. Stachurski, Proc. R. Soc. Lond. A 270, 90 (1962).
6) Y. Park, I. S. Maroef, A. Landau, and D. L. Olson, Weld. J. 81, 27S (2002).
7) H.-J. Kim and M.-G. Lee, J. Alloys Compd. 904, 164018 (2022).
8) H.-J. Kim, H.-Y. Jung, T.-W. Kwon, and Y.-D. Chung, Mater. Trans. 60, 1614 (2019).

[학생3-3 | 14:00]

고강도 후물 장갑강의 용접재료, 개선 형상 및 입열량에 따른 미세조직-기계적 특성 상관관계 분석: 전소희[1*], 유현종[1], 김보민[1], 김상훈[2], 이종민[3], 김동인[3], 문중식[4], 김정한[1]; [1]국립한밭대학교, 신소재공학과, [2]국방과학연구소 제3기술연구원, [3]한국화학융합시험연구원 표면기술센터, [4]한국화학융합시험연구원 지능형기계센터

Keywords: 고강도 장갑강, 용접 와이어, 개선 형상, 입열량, 미세조직

미래 전장 환경에서는 고강도·고신뢰성 장갑 소재가 요구되며, 후물 장갑강 용접부의 성능은 방산 플랫폼의 경쟁력을 좌우하는 핵

심 요소이다. 고강도 후물 장갑강(Armox 500t)은 높은 경도와 강도를 가지지만, 용접 열사이클에 의해 용접금속과 열영향부에서 상변태, 조직 조대화 및 국부적인 연화가 발생한다. 특히 용접 재료의 화학조성 및 강도 수준은 용접부의 경화능과 상변태 거동을 변화시켜 미세조직, 경도, 강도 및 충격 인성에 영향을 미친다. 또한 Single-V 및 Double-V 개선 형상은 용접 체적, 패스 순서 및 열 전달 거동을 변화시키며, 이에 따라 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ), 용접금속부(Weld Zone, WZ)의 미세조직 및 잔류응력에 영향을 미친다. 또한 입열량은 최고 도달온도와 냉각속도를 결정하여 마르텐사이트의 길이 및 두께, 결정립 성장 및 잔류 오스테나이트 형성에 영향을 줄 수 있다. 이러한 미세조직적 변화는 용접부의 국부 경도 편차, 강도 저하, 연성 감소 및 충격인성 열화로 이어질 수 있다. 그러나 미세조직 분석만으로는 용접부의 실제 파괴 저항성을 직접 판단하기 어렵기 때문에, 경도시험, 인장시험 및 충격시험을 병행하여 구조적 건전성을 종합적으로 평가할 필요가 있다[2,3]. 본 연구에서는 대형 후물 장갑강 시편을 대상으로 실제 용접설비를 이용한 다층 용접을 수행하였으며, 용접 중 전류·전압·용접속도의 실시간 기록을 병행하였다. 이러한 실험은 후판의 가공과 고정, 다층 용접, 열이력 계측이 동시에 요구되므로 소규모 실험실 환경에서 구현하기 어렵고, 실제 후판 용접공정에 가까운 조건에서 데이터를 확보하였다는 점에 의의가 있다. 또한 개발 와이어와 상용 와이어의 차이와 함께 single-V, double-V 의 개선 형상 차이 및 저입열, 고입열 조건을 비교하여 각 변수의 영향을 분석하여 최적 공정 조건을 도출하고, 고강도 후물 장갑판재의 신뢰성 확보와 국방 기술 경쟁력 강화에 기여하고자 하였다.

이를 위해 12.7mm 두께의 외산 고경도 장갑강에 동일한 개선 형상과 용접 방식을 적용하고, 상용 와이어와 개발 와이어를 사용하여 용접 후 용접재료에 따른 차이를 비교하였다. 또한 38.1 mm 외산 판재인 Armox 500T 후물 장갑강에는 상용 와이어(SPOOLARC 120)를 적용하여 double-V 저입열 및 고입열, single-V 저입열 조건에서 Ar–2%O_2 혼합가스를 적용한 펄스 가스 메탈 아크 용접(Gas Metal Arc Welding, GMAW)을 수행하여, 개선 형상과 입열량의 영향을 평가하였다. 그림 1의 개선 형상에 따라 용접을 진행하였다. 각 용접 조건은 용접 경험이 풍부한 용접 업체와의 회의를 통하여 용접 후 밴딩이 최소화되도록 설정하였다[1]. 조건 설정 후 그림 2에서와 같이 후물 장갑강 시편을 실제 용접설비에 고정한 후 GMAW 용접을 수행하였다. 그림 2(a)와 같이 용접 중 최고온도와 냉각속도를 측정하기 위해 열화상 카메라를 설치하였다. 용접 과정의 온도 변화를 실시간으로 기록하였으며, 각 비드 적층 후 냉각 과정의 온도 변화를 분석하여 냉각속도를 산출하였다. 또한 그림 2(b)와 같이 용접 장비에 표시되는 전류와 전압을 기록하고 실제 용접속도를 측정하여, 각 패스의 입열량을 계산하였다. 미세조직은 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)과 전자후방산란회절(Electron Backscatter Diffraction, EBSD) 분석을 통하여 관찰하였으며, 비커스 경도시험, 인장시험 및 샤르피 V-노치 충격시험을 통해 기계적 특성을 비교하였다[2,3]. 기계적 특성 평가 결과, double-V 저입열 조건은 인장강도는 900MPa 수준, 항복강도는 800MPa 수준으로 모든 용접 조건 중 가장 높은 강도 특성을 나타냈으며 single-V 저입열 조건에서 가장 낮은 강도 특성을 나타냈다. 또한 경도시험 결과, 그림 3과 같이 Double-V 저입열 조건에서 용접금속과 열영향부 사이의 경도 변화가 상대적으로 완만하여 세 조건 중 가장 균형적인 경도 분포를 보였다. 이는 낮은 입열량 조건에서 HAZ 의 과도한 연화가 억제되고, WZ 내 미세조직이 보다 치밀하게 형성된 결과로 판단된다. 반면 double-V 고입열 조건은 충격흡수에너지에서 가장 높은 값을 나타내어 우수한 인성 특성을 보였다.

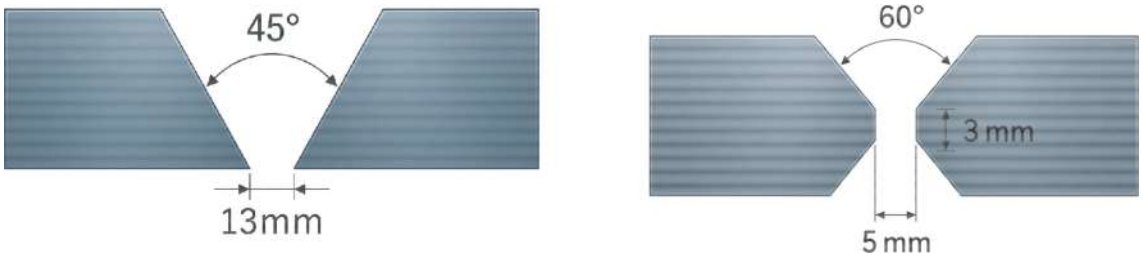


Fig. 1. 용접 개선 형상의 개략도; a. single-V 개선 형상, b. double-V 개선 형상

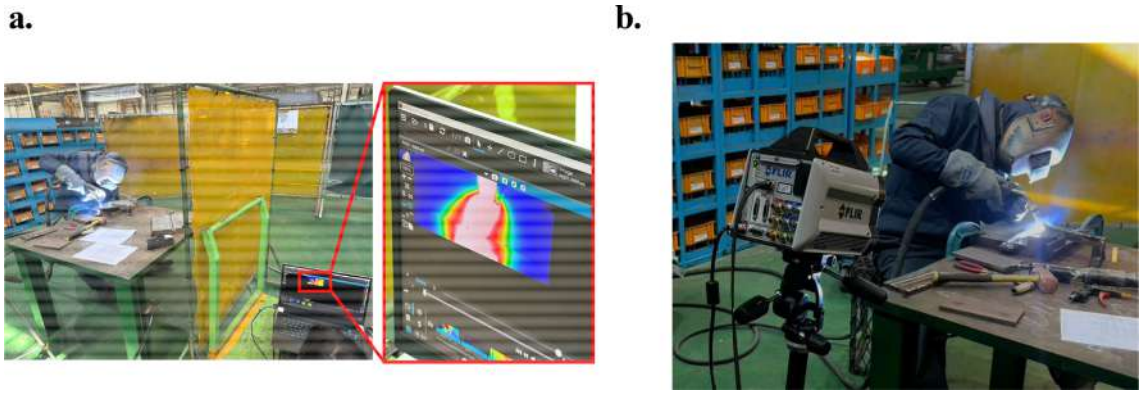


Fig. 2. 고강도 후물 장갑강의 실제 용접 수행 및 열이력 측정 현장; a. 용접 중 열화상 카메라를 이용한 용접부 온도 분포 측정, b. 후물 장갑강의 가스 메탈 아크 용접 수행

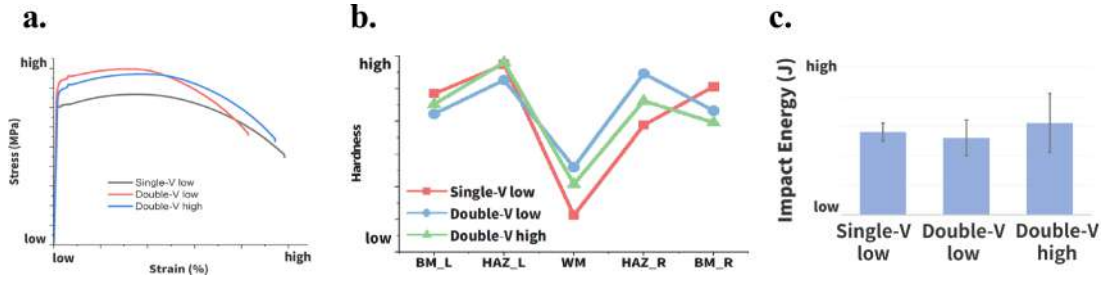


Fig. 3. 물성 평가 결과 그래프; a. 인장 평가, b. 경도 평가, c. 충격 인성 평가(보안 상의 이유로 자세한 수치는 제외하였음)

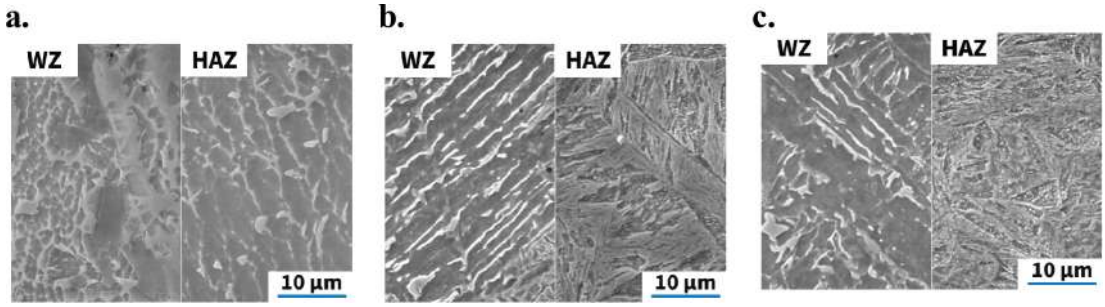


Fig. 4. SEM 분석 이미지; a. single-V low, b. double-V low, c. double-V high

전체적으로 충격흡수에너지는 모든 조건에서 큰 차이는 없었으나, 입열 조건에 따라 미세한 경향 차이가 확인되었다. SEM 및 EBSD 분석 결과, 모든 용접 조건의 WZ은 주로 템퍼드 래스 마르텐사이트 조직을 나타냈으며 일부 베이나이트가 혼재하였다. 이는 HAZ보다 상대적으로 느리게 냉각되었으며, 위치에 따라 냉각속도에 차이가 발생했기 때문으로 판단된다. HAZ에서도 래스 마르텐사이트가 형성되었다. Double-V 저입열 조건에서는 빠른 냉각으로 미세한 래스 조직이 관찰되었다. 또한 상용 와이어와 개발 와이어를 적용한 용접부는 WZ의 미세조직, 경도 및 기계적 특성에서 차이를 나타냈으며, 이는 두 용접재료의 화학조성과 강도 차이에 따른 상변태 거동의 변화와 관련된 것으로 판단된다. 이상의 결과로부터 개선 형상과 입열량, 용접 재료는 용접부의 열이력과 냉각 거동을 변화시켜 래스 크기, 경도 분포, 강도 및 충격인성에 서로 다른 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 향후 축적된 용접 데이터를 기반으로 용접조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성을 예측하는 기계학습 모델을 구축하여, 고강도 후물 장갑강의 최적 용접 공정 설계에 활용하고자 한다.

참고문헌(References)

1) SSAB, Armox Protection Plate: Workshop Recommendations for Armox Protection Steel, SSAB, Oxelosund, Sweden (2024).
2) Department of Defense, MIL-STD-3040: Welding Requirements for Ground Combat Vehicles and Associated Systems, U.S. Department of Defense, Washington, DC (2018).
3) ASTM International, ASTM A370-17a: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM International, West Conshohocken, PA (2017)

[학생3-4 | 14:15]

다중 패스 용접부의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 Ni의 영향: 홍영오[1,3], 박성준[1*], 유지성[1], 김경원[1], 조효행[1], 이진종[1], 박형권[1], 서지석[2], 유동현[2], 최윤석[3*]; [1]한국재료연구원 극한재료연구소, [2]현대종합금속, [3]부산대학교 재료공학과

Keywords: Metal Cored Wire, Multi-pass welding, Ni, C Enrichment, Embrittlement

최근 고강도 강재의 수요가 자동차, 건설기계, 해양플랜트 등 다양한 산업 분야로 확대되면서, 이에 적합한 용접 기술과 용접재 개발의 중요성이 커지고 있다. 기존 연구에서는 용접부 물성 향상을 위해 용접 조건, 용접 방법, 용접재 합금조성 등 다양한 인자가 검토되어 왔다. 그중 용접재 합금조성 설계를 위해서는 주요 원소의 함량에 따른 용접부 미세조직 및 물성 변화를 파악하는 것이 필수적이다. Ni은 일반적으로 경화능을 높여 고강도 강재용 용접재에 주로 활용되는 원소이며, 본 연구에서는 다중 패스 용접부의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 Ni의 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 Ni 함량이 낮은 용접재 LNi와 높은 용접재 HNi를 제작하고, AWS A5.28 규격에 따라 GMAW 방식으로 15 패스 용접하여 전용착 금속 샘플을 제조하였다. 제조한 전용착 금속 샘플을 이용하여 인장특성 및 경도를 평가하고, SEM/EBSD, TEM 분석을 통해 상분율, 전위밀도, prior austenite grain size(PAGS) 등을 측정하였다.

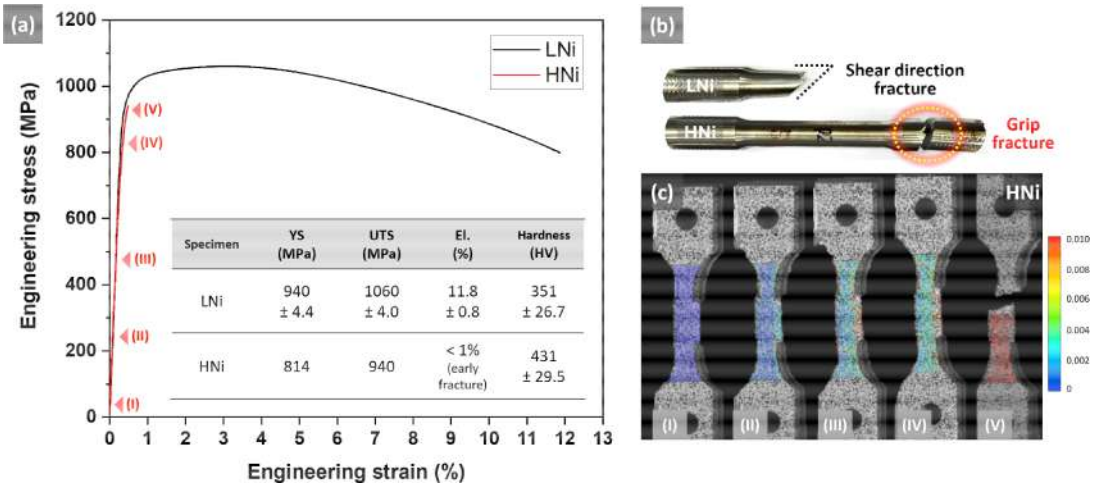


Fig. 1. LNi과 HNi의 기계적 물성 측정 결과; (a) 응력-변형률 곡선과 물성값, (b) 인장 시험 후 봉상 시편 사진, (c) HNi의 소형 인장시편 측정 경과 사진

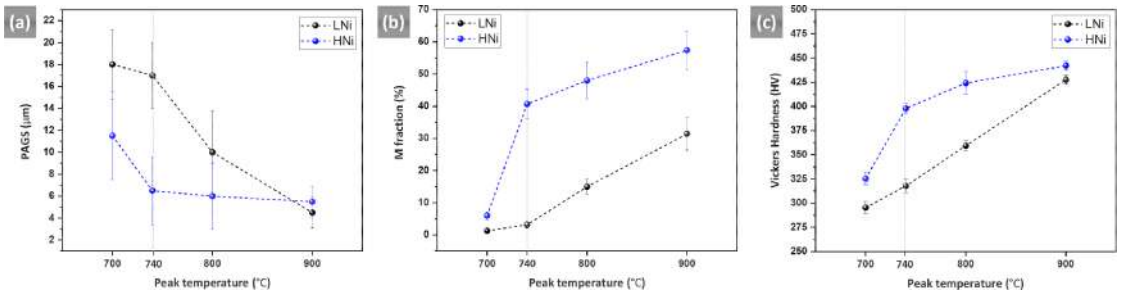


Fig. 2. 온도 이력 모사 후 실험 조건(최고 온도 700, 740, 800, 900 °C)별 측정값; (a) PAGS, (b) martensite 분율, (c) 비커스 경도값

인장 시험 시 LNi는 연성 파괴 거동을 보였으나, HNi는 전형적인 취성 파괴 거동을 보였다. 이러한 차이의 원인을 규명하기 위해 SEM, EBSD, TEM을 통해 미세조직을 관찰한 결과, Ni 함량이 높아지면서 미세조직이 bainite-dominant에서 martensite-dominant로 변화하였고, 평균 PAGS는 매우 미세화되는 것을 확인하였다.

PAGS 미세화의 원인을 분석하기 위해 다중 패스 용접 시의 온도 이력을 설정하고 다양한 최고 온도 조건에 대하여 딜라토미터를 이용하여 모사 실험을 실시하였다. EBSD 분석 결과 역변태가 시작되는 A_1 온도 이상 조건에서부터 PAGS 미세화와 함께 경도 및 martensite 분율이 증가하였으며, 이는 LNi 대비 HNi 시편에서 훨씬 급격하게 관찰되었다. EPMA 분석을 수행한 결과, 부분 역변태 조건에서 Mn 및 Ni 편석 영역에 C가 집중적으로 농화됨을 확인하였다. 이는 다중 패스 용접 과정 중 A_1 온도 이상으로 가열되는 경우 국부적인 역변태로 생성된 오스테나이트 영역으로 C가 농화되고, 재냉각 시 해당 위치에 C 함량이 높은 martensite가 형성되어 취화되었음을 의미한다. HNi 시편의 경우, 높은 Ni 함량에 의해 A_1 온도가 낮아 다중 패스 용접 시 역변태가 일어나기 쉽기 때문에 PAGS 미세화 및 취화 현상이 일어나는 것으로 판단된다.

일반적으로 Ni은 경화능을 높여 강도를 향상시키고 적절한 인성을 가지게 하지만, 상변태 온도를 낮추기 때문에 다중 패스 용접과 같은 반복되는 온도 이력 조건에서는 국부적인 역변태, C 농화 등에 의해 불균일하고 경한 미세조직을 형성시켜 오히려 기계적 특성을 저하시킬 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 향후 초고강도강 용접재 개발 시 Ni 함량 제어의 중요성과 온도 이력을 고려한 용접재 및 용접 조건 설계의 필요성을 제시한다.

참고문헌(References)

1) M. Tümer, C. Schneider-Bröskamp, and N. Enzinger, J. Manuf. Process. 82, 203-229 (2022)
2) J. Moon et al., Nat. Commun. 15, 1301 (2024)
3) G. J. Mao et al., JMEPEG 26, 2057-2071 (2017)

[학생4-1 | 14:40]

Cu 함량 변화와 초음파 처리에 따른 Fe 기반 연자성 합금 리본의 구조 및 자성 특성: 강태연[1], 이연주[1], 한선구[1], 최현주[1*]; [1]국민대학교(신소재공학과)

Keywords: Fe-based soft magnetic alloy, Nanocrystallization, Ultrasonic treatment, Cu content, Magnetic properties

1. Introduction

전기차(EV) 시장의 급격한 성장에 따라 EV Moter, Inductor, Transformer 등 핵심 부품에 사용되는 연자성 코어 소재의 수요가 증가하고 있다. Fe계 연자성 합금은 낮은 보자력(coercivity), 높은 포화자화(saturation magnetization), 높은 투자율(permeability)이 요구된다. Herzer의 random anisotropy model에 따르면 결정립 크기가 강자성 교환상관길이보다 작아지는 나노결정립 영역에서 보자력이 최소화되는 것으로 알려져 있다 [1]. 이를 구현하기 위한 대표적인 방법이 비정질 철계 합금에 Cu와 Nb를 첨가하여 열처리 시 α-Fe(Si) 나노결정을 석출시키는 것이다 [2]. 그러나 Cu 첨가는 원가 상승을 유발할 뿐만 아니라, 합금의 비정질 형성능을 저하시켜 초기 리본 제조(급랭) 단계에서의 공정 난이도를 높이고 기계적 가공성(취성 증가 등)을 떨어뜨리는 한계를 지니고 있다. 이에 산업계에서는 Cu 첨가량을 최소화하거나 이를 대체할 수 있는 새로운 공정에 대한 요구가 지속되어 왔다.

본 연구에서는 기존 Cu 원자의 clustering이 수행하던 핵생성 제공 역할을 초음파 처리(ultrasonic treatment) 시 발생하는 캐비테이션(cavitation) 현상으로 대체 및 보완할 수 있다는 점에 주목하였다. 특히, 기포 붕괴 시 발생하는 국부적 결함이 리본의 표면 영역에 집중적으로 작용한다는 점에 착안하였다.

이를 통해 리본의 표면은 국부적 결함이 α-Fe(Si) 상의 우선 핵생성 사이트로 작용하여 나노결정화되고, 내부는 기존의 비정질 구조를 유지하는 일종의 '코어-셸(Core-Shell) 구조'를 유도할 수 있을 것으로 가설을 세웠다. 따라서 본 연구에서는 Cu 함량을 최소화한 조건에서 초음파 처리만으로 이러한 표면 선택적 나노결정화를 구현할 수 있는지를 검증하고, 최적의 초음파 처리 조건을 도출하고자 하였다.

2. Experimental

본 연구에서의 시편은 $Fe_{81}Si_7B_{12}$(Cu0), $Fe_{80.3}Si_7B_{12}Cu_{0.7}$(Cu0.7), $Fe_{79.6}Si_7B_{12}Cu_{1.4}$(Cu1.4) 세 조성으로 설계하였으며, 아크 용해(arc melting)로 모합금을 제조한 뒤 melt spinning 공정을 통해 리본 형태로 제작하였다. 세 조성의 as-spun, 2분 초음파 처리, 열처리 후 상태에 대해 XRD, DSC 분석을 비교한 결과, Cu0.7 조성이 초음파 처리 및 열처리 후 모두에서 가장 높은 결정화 엔탈피를 나타내어 초음파 처리 기반 나노결정화에 가장 적합한 조성으로 선정되었다. 이에 따라 이후 실험은 Cu0.7 조성을 대상으로, 초음파 처리 시간(2, 10, 30, 60분)을 변수로 진행하였다. 리본은 sonicator로 초음파 처리한 뒤 Ar 분위기의 tube furnace에서 340 ºC, 10분간 열처리하였으며 XRD, DSC, VSM, TEM으로 미세조직 및 자기적 특성을 평가하였다.

3. Results

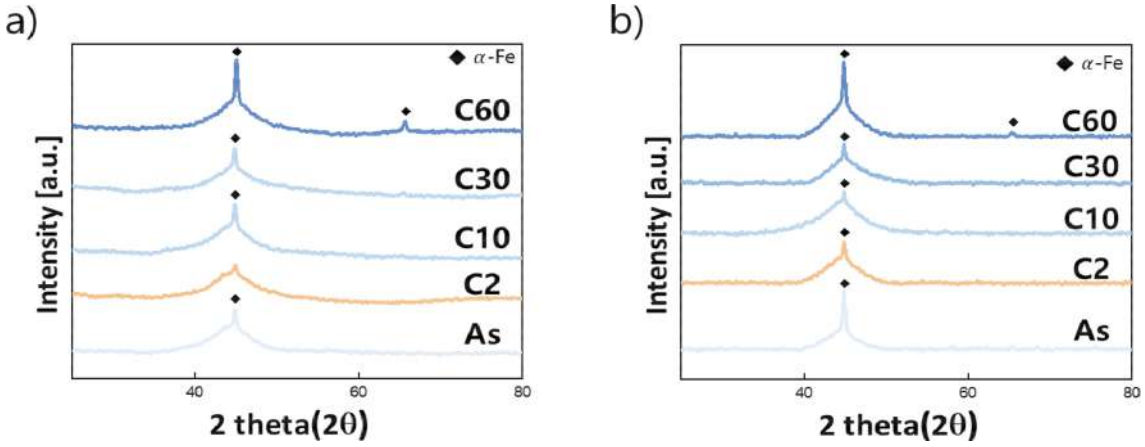


Fig. 1. Cu0.7 시편 초음파 시간 다변화에 따른 XRD 결과 (a) 초음파 (b) 열처리

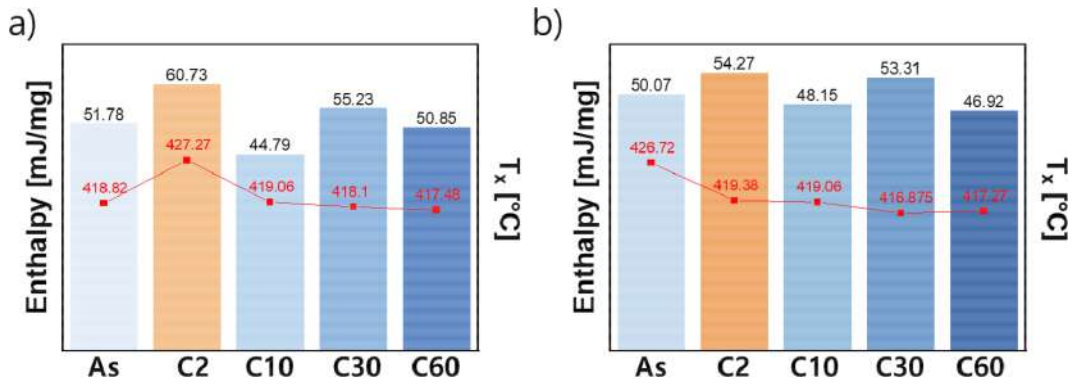


Fig. 2. Cu0.7 시편 초음파 시간 다변화에 따른 DSC 결과 (a) 초음파 (b) 열처리

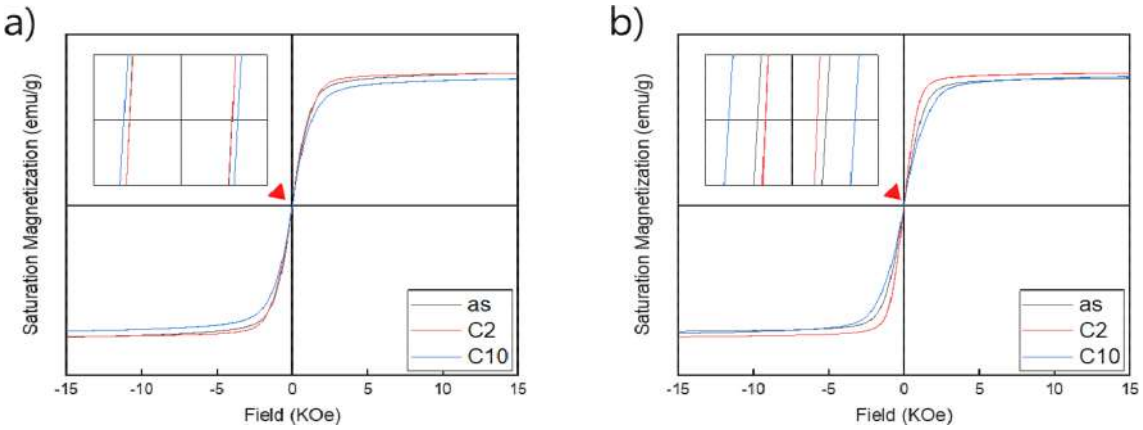


Fig. 3. Cu0.7 시편 초음파 시간 다변화에 따른 VSM 결과 (a) 초음파 (b) 열처리

그림 1의 XRD 기반 결정립 크기 분석 결과 2분 초음파 처리(C2) 진행 시 가장 작은 결정립 크기가 나타났다. 그림 2의 DSC 분석에서도 C2 조건이 가장 높은 결정화 엔탈피와, 가장 높은 결정화 온도(T_x = 427.3 ℃)를 나타내었다. 이는 2분이라는 비교적 짧은 처리 시간에서 비정질 구조에 영향을 준다는 것을 시사한다.

그림 3의 VSM 측정 결과, 열처리 후 C2 조건이 포화자화 174.552 emu/g, 보자력 19.18 A/m으로 As 및 C10 조건에 비해 가장 높은 포화자화와 가장 낮은 보자력을 나타내어 가장 이상적인 연자성 특성을 보였다. 이는 XRD 및 DSC 결과와 일치하는 경향으로, C2 조건에서 형성된 미세하고 균일한 나노결정립이 우수한 연자성 특성 발현에 기여한 것으로 판단된다.

이상의 결과를 종합하면, Cu0.7 조성에 2분간 초음파 처리를 가한 뒤 열처리하는 조건이 가장 작은 결정립 크기와 가장 우수한 연자성 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 Cu 함량을 줄인 조성에서도 초음파 처리만으로 결정화 거동에 변화를 유도할 수 있음을 확인하였으며, 이는 초음파 처리가 Cu 첨가를 대체하거나 저감할 수 있는 공정 대안이 될 가능성을 시사한다.

참고문헌(References)

1) G. Herzer, “Modern soft magnets: Amorphous and nanocrystalline materials,” Acta Materialia, 61, 718–734 (2013).
2)Y. Yoshizawa, S. Oguma, and K. Yamauchi, “New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure,” J. Appl. Phys. 64, 6044 (1988).
3) Y. Lee, “Soft magnetic properties of Fe-based amorphous powder containing small amounts of nano-crystals,” M.S. Thesis, Kookmin University (2018).

[학생4-2 | 14:55]

중간재 구조 설계를 통한 Ti/SUS304 브레이징 접합부의 계면 반응 제어 및 기계적 특성: 노주림[1*], 김동우[1], 김태엽[1], 이진규[1]; 1. 국립공주대학교, 신소재공학과

Keywords: 브레이징, 중간재, 이종 접합, 계면 반응, 기계적 특성

티타늄과 스테인리스강의 이종 접합은 두 소재의 특성을 상호 보완적으로 활용하여 구조물의 경량화, 내식성 및 경제성을 동시에 확보할 수 있어 항공, 화학, 에너지, 해양 등 다양한 분야에 적용될 수 있다. 그러나 Ti/SUS 접합에서는 Ti와 Fe의 상호 확산으로 인해 취성인 Ti-Fe계 금속간화합물이 형성될 수 있으며, 이는 접합부의 기계적 특성을 저하시키는 주요 원인으로 알려져 있다. Ti-Fe계 금속간화합물의 형성을 억제하기 위한 방안으로 비교적 낮은 온도에서 접합이 가능한 브레이징 공정이 적용되고 있으나, 삽입재 조성의 최적화만으로는 계면에서의 확산 거동과 취성 반응상의 형성을 충분히 제어하기 어렵다. 따라서 Ti/SUS 브레이징 접합부의 기계적 신뢰성을 확보하기 위해서는 중간재 조성과 적층 구조를 통해 계면에서의 원소 확산과 취성 반응상의 형성을 효과적으로 제어하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 Zr-Ti계 비정질 삽입재를 이용한 Ti/SUS304 브레이징에서 중간재의 조성과 적층 구조에 따른 계면 반응 및 반응상 형성 거동을 규명하고, 이들이 접합부의 기계적 특성에 미치는 영향을 평가하였다 . 이를 위해 Cu 단일 중간재를 기준 구조로 적용하여 계면 반응 거동을 분석하고, 이 과정에서 확인된 문제점을 보완하기 위해 Cu/Ni 및 V/Ni 다층 중간재를 순차적으로 설계하였다. Cu는 Fe와 금속간화합물을 형성하지 않는 점을 고려하여 선정하였으며, Ti가 SUS측으로 확산하여 Fe와 직접 반응하는 것을 억제하기 위해 Cu 및 Fe와 고용체를 형성할 수 있는 Ni를 추가하였다. 또한 원자 크기와 전기음성도 차이, Ti 및 Fe와의 고용체 형성 가능성, 그리고 예상되는 반응상 형성 경향을 종합적으로 고려하여 V를 새로운 중간재 후보로 선정하였다.

Ti/삽입재/Cu/SUS304, Ti/삽입재/Cu/Ni/SUS304, 그리고 Ti/삽입재/V/Ni/SUS304의 세 가지 접합 구조를 설계하였으며, 중간재 두께, 브레이징 온도 및 유지 시간을 변화시켜 접합을 수행하였다. 접합부의 미세조직과 원소 분포는 주사전자현미경(SEM)과 에너지

분산형 X선 분광분석법(EDS)을 이용하여 분석하였다. 기계적 특성은 비커스 경도, 나노인덴테이션, 그리고 상온 인장시험을 통해 평가하였으며, SEM을 이용하여 파단면과 파단 경로를 분석하였다.

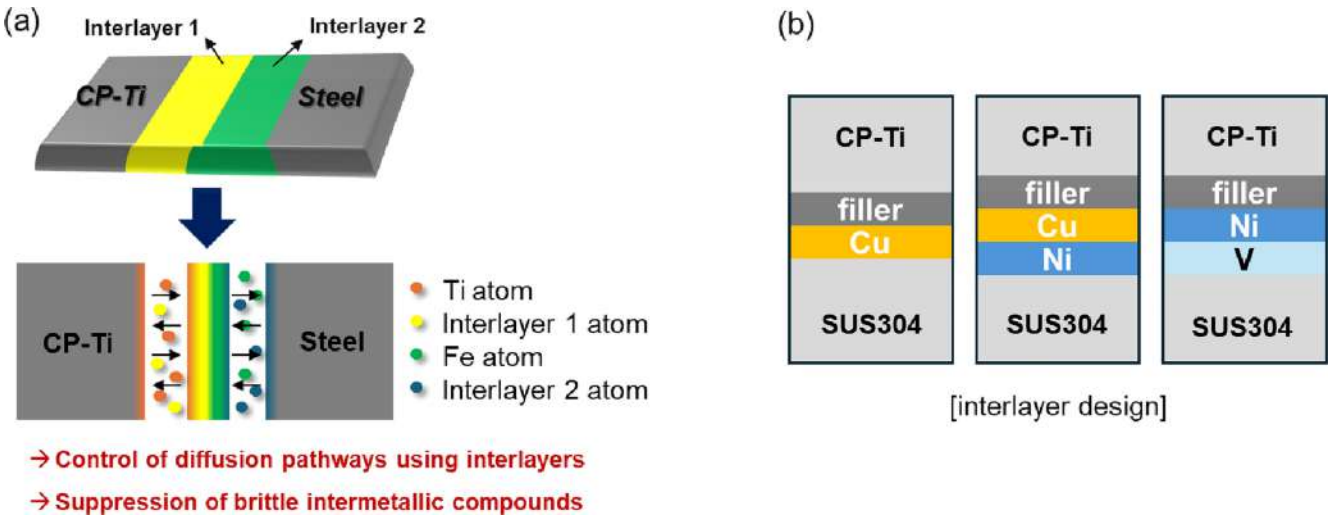


Fig. 1. Schematic illustrations of (a) the interlayer design strategy and (b) the corresponding interlayer configurations.

Cu 단일 중간재를 적용한 경우, 접합 과정에서 Cu층의 소모 정도에 따라 계면에서의 원소 확산과 반응상 형성 거동이 크게 달라졌다. Cu층이 완전히 소모되지 않고 충분한 두께로 유지된 조건에서는 Ti-Cu계 반응이 우세하게 진행되어 Ti-Fe계 반응이 억제되었으나, SUS 계면에서는 여전히 Ti-Fe계 반응상이 관찰되었다. 또한 Cu/SUS 계면에서는 Ti의 확산에 의해 Cr이 농도 구배에 역행하여 확산하는 현상(uphill diffusion)이 확인되었다. 이는 Cu 중간재가 Ti와 Fe의 직접적인 반응을 일부 억제할 수 있으나, Cu 단일 중간재만으로는 Ti의 확산과 계면 반응을 충분히 제어하기 어렵다는 것을 보여준다. 이러한 한계를 개선하기 위해 Cu/Ni 다층 중간재를 적용한 결과, Ti와 Fe 사이의 직접적인 반응은 효과적으로 억제되었다. 그러나 검토한 모든 브레이징 온도 조건에서 $TiNi_3$로 추정되는 취성 반응층이 형성되었으며, 인장 시험에서는 해당 반응층을 따라 조기 파단이 발생하였다. 이는 Ti-Fe계 반응의 억제만으로는 충분하지 않으며, 중간재와의 반응으로 새롭게 형성되는 취성 반응상까지 함께 고려해야 함을 보여준다.

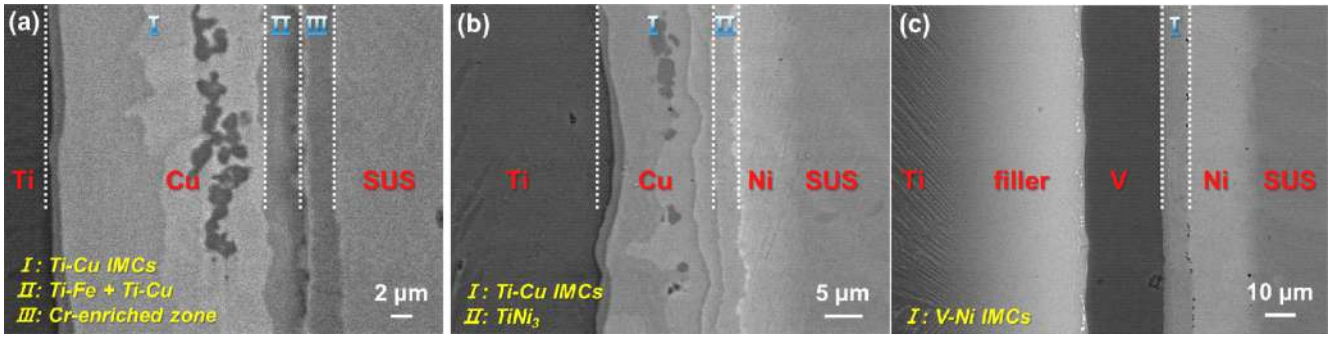


Fig. 2. Interfacial microstructures of (a) Ti/filler/Cu/SUS304, (b) Ti/filler/Cu/Ni/SUS304, and (c) Ti/filler/V/Ni/SUS304 brazed joints.

Cu/Ni 중간재에서 Ti-Ni계 취성 반응층을 따라 조기 파단이 발생함에 따라, Ti와 Ni의 직접적인 반응을 줄이기 위해 Cu를 V로 대체한 V/Ni 다층 중간재를 설계하였다. V는 Ti 및 Fe와 고용체를 형성할 수 있다는 점을 고려하여 선정하였다. V/Ni 계면에서는 V-Ni계 반응상이 형성되었고, NiV_2계 σ상으로 추정되는 반응층은 주변 영역보다 높은 국부 경도를 나타내었다. V/Ni 중간재를 적용한 접합부는 최대 293 MPa의 인장강도를 보였으며, 이는 Ti 모재 인장강도의 약 92%에 해당한다. 파단은 주로 σ계 반응층과 연관된 경로를 따라 발생하였고, 해당 반응층의 국부적 형성과 분포가 접합부의 파단 경로와 인장 특성에 영향을 미치는 주요 요인으로 판단된다.

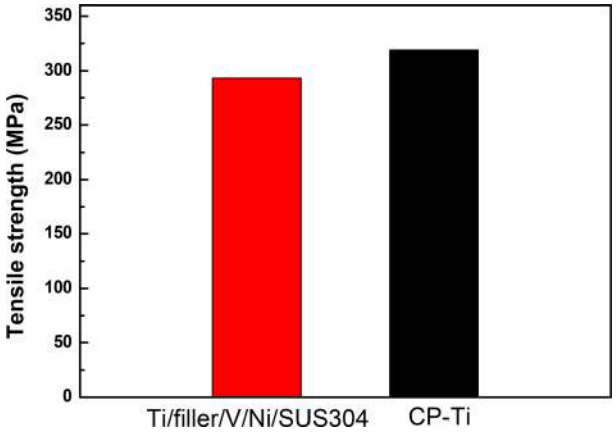


Fig. 3. Tensile strength of the Ti/filler/V/Ni/SUS304 brazed joint.

본 연구를 통해 Ti/SUS304 브레이징에서 중간재는 단순한 확산 차단층이 아니라, 계면에서의 원소 확산, 반응 경로 및 반응상 형성을 변화시키며 접합부의 파단 거동과 기계적 특성을 제어하는 데 중요한 역할을 하는 것으로 확인되었다. 따라서 Ti/SUS304 브레이징용 중간재는 Ti와 Fe의 직접적인 반응을 억제하는 것뿐만 아니라, 중간재와의 반응으로 형성되는 새로운 취성 반응상과 이에 따른 파단 경로를 함께 고려하여 설계할 필요가 있다.

참고문헌(References)

1) A. Elrefaey, and W. Tillmann, J. Alloys Compd. 487, 639 (2009).
2) S. Kundu and S. Chatterjee, Mater. Sci. Eng. A 480, 316 (2008).
3) L. Hu, Y. Xue, and F. Shi, Mater. Des. 130, 175 (2017).
4) W. S. Liu, Q. S. Cai, Y. Z. Ma, Y. Y. Wang, H. Y. Liu, and D. X. Li, Mater. Charact. 86, 212 (2013).

[학생4-3 | 15:10]

CoCrNi(AlTi) 기반 중엔트로피 합금의 γ'-σ 상의 열경로 의존적 석출 거동 분석: 한상윤[1*], 박은수[1], 류채우[2]; [1]서울대학교 재료공학부, [2]홍익대학교 신소재공학과

Keywords: 중엔트로피 합금(Medium-entropy alloy), 실시간 중성자 회절(In-situ neutron diffraction), 열경로 의존적 석출 거동(Thermal-path-dependent precipitation behavior).

고엔트로피 및 중엔트로피 합금은 우수한 강도–연성 균형과 높은 열적 안정성을 바탕으로 차세대 고온 구조용 소재로 주목받고 있다. 특히 CoCrNi 기반 중엔트로피 합금에 Al과 Ti를 첨가하면 FCC 기지와 정합 계면을 갖는 $L1_2$ 구조의 γ′상이 형성되며, 이 γ′상은 전위 이동을 효과적으로 억제함으로써 합금의 고온 강도와 미세조직 안정성을 향상시키는 핵심 강화상으로 작용한다. 그러나 고온 특성 향상을 위한 다원소의 첨가는 원소 분배와 국부적인 조성 변화를 유발하여 σ상과 같은 topologically close-packed(TCP) 상을 안정화할 수 있다. σ상은 기지 내 주요 합금 원소를 소모하여 장기 미세조직 안정성과 기계적 특성을 저하시킬 수 있으므로 γ′상의 석출 강화 효과를 유지하면서 σ상 형성을 제어하기 위해서는 열적 경로에 따른 두 상의 형성 조건과 상호 연관성을 체계적으로 규명할 필요가 있다.

본 연구에서는 실시간 중성자 회절(in-situ neutron diffraction)을 활용하여 CoCrNi(AlTi) 기반 합금의 가열-냉각 과정에서 나타나는 γ′상과 σ상의 석출 및 상변태 거동을 분석하였다. FCC 단일상 미세조직을 갖는 시편을 γ′상이 용해되는 γ′ solvus 온도 이상까지 가열 후에 냉각하는 열처리 공정을 진행하였으며, 열처리 전 과정에서 각 상의 회절 피크 변화를 연속적으로 추적하였다. 이를 바탕으로 가열 중 γ′상의 석출 및 용해 거동과 냉각 과정에서의 σ상의 형성 및 γ′상의 재석출 거동을 비교하였으며, 각 상의 회절학적 검출 개시 온도와 열적 경로에서 따른 석출물 형성 거동을 분석하였다.

가열 과정에서는 γ′상에 해당하는 초격자 회절 피크 (superlattice peak)가 관찰되었으며, 온도가 약 1079 °C 이상으로 증가함에 따라 해당 피크가 소멸하여, 이는 γ′상이 기지 내로 완전히 용해되었음을 의미한다. 냉각 과정에서 온도가 γ′ solvus(1079 °C) 이하로 감소한 이후에도 γ′상은 즉시 재석출되지 않았다. CALPHAD 평형 계산에서 예측한 σ solvus 온도(951°C)보다 높은 약 1000 °C에서 σ상에 해당하는 회절피크가 먼저 검출되었으며 이후 온도가 약 920 °C까지 감소한 시점에서 γ′ 초격자 회절피크가 다시 나타났다. 이러한 결과는 냉각 과정에서 γ′상이 재석출되기 위해서는 추가적인 과냉각이 필요하며, 그 이전의 온도 구간에서 σ상이 우선적으로 형성될 수 있음을 보여준다. 또한 냉각 중 재석출된 γ′상의 회절 강도는 가열 과정에서 관찰된 초기 γ′상보다 크게 나타났다. 이는 용체화 처리 이후 충분한 과냉각을 거쳐 형성된 γ′상이 초기 γ′상과는 다른 재석출 동역학 또는 규칙화 거동을 나타낼 가능성을 시사한다.

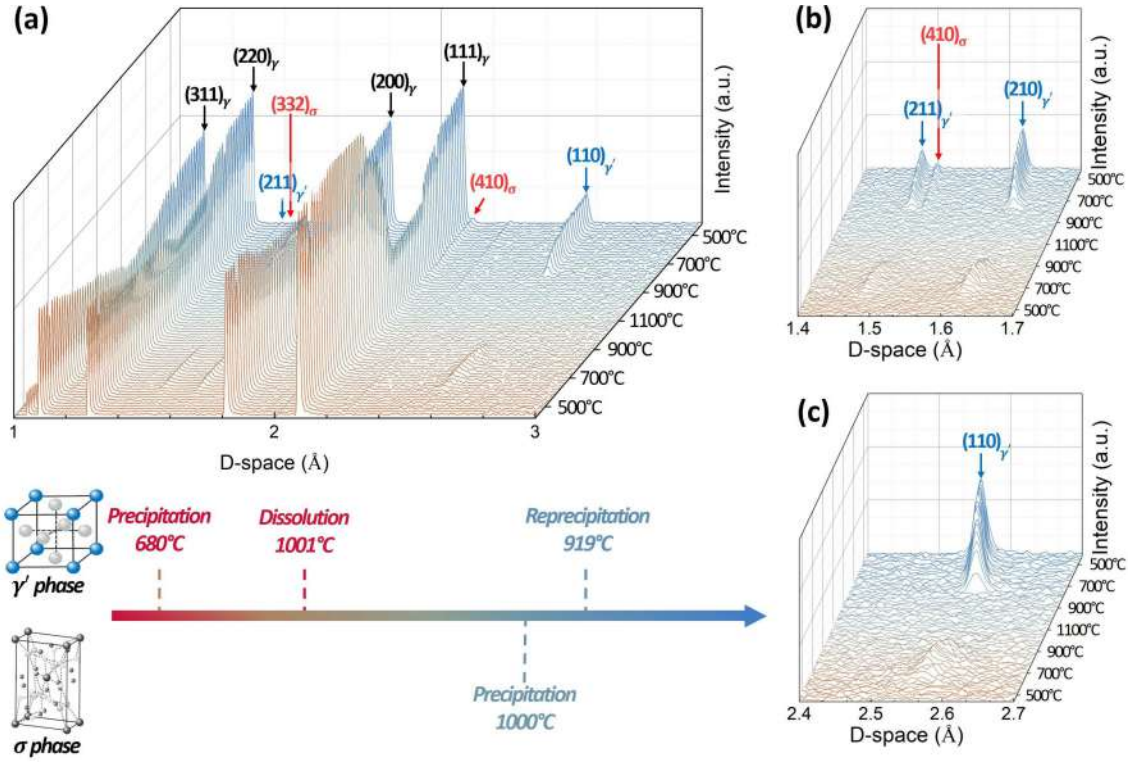


Fig. 1. CoCrNi(AlTi) 기반 합금의 가열–냉각 중 석출물 γ′상과 σ상의 회절학적 변화: (a) 전체 열처리 과정에서 획득한 실시간 중성자 회절패턴, (b) 온도변화에 따른 γ′ (211), σ (410) 및 γ′ (210) 회절피크를 포함하는 d-space 1.4–1.7 Å 구간의 확대 회절 패턴, (c) γ′ (110) 초격자 회절피크가 위치한 d-spacing 구간의 확대 회절 패턴.

위 결과를 통해, CoCrNi(AlTi) 합금에서 γ′상과 σ상이 각각 독립적으로 형성되는 것이 아닌 γ′상의 용해 이력과 후속 냉각 경로에 따라 σ상 석출과 γ′상 재석출이 순차적으로 진행됨을 확인하였다. 또한, 두 상의 형성은 평형 상안정성뿐 아니라 선행 열처리 이력과 냉각 조건에도 크게 의존하는 열경로 의존적 석출 거동(thermal-path-dependent precipitation behavior)을 나타내었다. 특히 약 1000–920 °C 구간은 σ상이 형성된 이후 γ′상이 재석출되기 전까지 존재하는 임계 냉각 구간으로 확인되었으며, 이 구간에서의 체류시간과 냉각 속도는 σ상의 형성 정도와 γ′상의 재석출 거동, 나아가 최종 석출상 분율 및 미세조직 제어에 중요한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이러한 결과는 TCP상 형성을 억제하면서 γ′ 강화상을 효과적으로 확보하기 위한 열처리 공정 설계와 CoCrNi 기반 고온 구조용 합금의 장기 미세조직 안정성 향상을 위한 초석을 제공할 것으로 기대된다.

참고문헌(References)

1) D. Porter, K. Easterling, and M. Sherif, Phase Transformation in Metals and Alloys, 3rd edition (2014).
2) Y. Wu, Y. Li, J. Lu, S. Tan, F. Jiang, and J. Sun Materials Science & Engineering A 742 (2019).
3) W. Polkowski, , A. Polkowska, and S. Lech Journal of Alloys and Compounds 860 (2021).
4) F. Vogel, N. Wanderka, S. Matsumura, and J. Banhart, Intermetallics 22 (2012).
5) Y. Li, S. Li, and T. Zhang, Journal of nuclear materials 395 (2009).
6) W. Soffa, D. Laughlin, and N. Singh, Philosophical Magazine 90 (2010).
7) G. Viswanathan, R. Banerjee, A. Singh, S. Nag, J. Tiley, and H. Fraser, Scripta Materialia 65 (2011).
8) D. Collins, N. Souza, C. Panwisawas, C. Papadaki, G. West, A. Kostka, and P. Kontis, Acta Materialia 200 (2020).
9) X. Tan, D. Mangelinck, C. Perrin-Pellegrino, L. Rougier, C. Gandin, A. Jacot, D. Ponsen, and V. Jaquet, Metallurgical and Materials Transactions A 45 (2014).
10) V. Nandal, R. Sarvesha, S. Singh, E. Huang, Y. Chang, A. Yeh, S. Neelakantan, and J. Jain, Journal of Alloys and Compounds 855 (2021).
11) J. Fang, W. Liu, J. Luan, T. Yang, M. Fu, and Z. Jiao, Journal of Alloys and Compounds 925 (2022).
12) Z. Yang, Z. Wang, B. Guo, R. Cao, Q. Wu, D. Cui, K. Zhang, J. Li, J. Wang, and F. He, Journal of Alloys and Compounds 906 (2022).
13) X. Du, W. Li, H. Chang, T. Yang, G. Duan, B. Wu, J. Huang, W. Chuang, Y. Lu, M. Sui, and E. Huang, Nature communications 11 (2020).
14) C. Liu, X. Zhang, L. Ge C. Wang, T. Yu, and Z. Zhang, Materials Science & Engineering A 754 (2019).

[학생4-4 | 15:25]

결정방위와 응력모드에 따른 준안정 오스테나이트의 변형 거동 및 변형기구별 기여도 분석: 이태현(발표자)[1], 박진홍[1*]; [1]서울과학기술대학교 기계공학과

Keywords: TRIP강, 변형유기 마르텐사이트 상변태, 결정방위, 응력 모드, 결정소성

1. 연구의 목적과 의의

TRIP강은 변형유기 마르텐사이트 변태를 통해 높은 강도와 연성을 동시에 확보하며, 이는 결정학적 슬립과 상변태의 상호작용에 의해 결정된다[1]. 결정방위와 응력상태는 슬립계의 분해전단응력과 마르텐사이트 변태의 기계적 구동력에 영향을 미치므로, 동일한 등가변형률에서도 각 변형기구의 상대적 기여가 달라질 수 있다[2]. 그러나 기존 연구는 주로 거시적 응력–변형률 응답과 마르텐사이트 분율에 집중해 왔으며, 결정방위와 다축 응력상태가 슬립 및 상변태에 미치는 영향을 분리하여 정량화한 연구는 제한적이다.

본 연구에서는 결정소성과 변형유기상변태가 결합된 구성 모델을 이용하여 TRIP강 단결정의 결정방위와 응력 모드를 체계적으로 변화시켰다. 각 조건의 응력, 마르텐사이트 분율 및 24개 variant의 선택 거동을 비교하고, 오스테나이트 및 마르텐사이트 슬립, 상변태의 비탄성 일과 등가 변형량을 분리(decoupling)하여 분석하였다. 이를 통해 변태 구동력과 variant 성장이 변형 수용과 기계적 거동에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

2. 연구 방법론 개요

본 연구에서는 상용 유한요소해석 소프트웨어 Abaqus의 사용자 서브루틴 UMAT에 결정소성 이론과 변형유기 마르텐사이트 변태가 결합된 구성 모델을 구현하여 준안정 오스테나이트 단결정의 기계적 거동을 해석하였다[3]. 24개의 마르텐사이트 variant를 고려하였으며, 변형 과정에서 발생하는 오스테나이트 및 마르텐사이트의 소성변형 및 상변태에 의한 비탄성 일(inelastic work)과 등가 변형량을 각각 분리하였다. 오스테나이트 및 마르텐사이트의 슬립 및 상변태에 의한 누적 일은 다음과 같이 계산하였다.

$$W_{\gamma}^{slip}=\int(f_{(0)}\sum_{\alpha=1}^{N_{fcc}}\tau_{(0)}^{\alpha}\dot{\gamma}_{(0)}^{\alpha})dt, W_{\alpha'}^{slip}=\int(\sum_{i=1}^{N_{tr}}f_{(i)}\sum_{\alpha=1}^{N_{bcc}}\tau_{(i)}^{\alpha}\dot{\gamma}_{(i)}^{\alpha}), W^{trans}=\int(\sum_{i=1}^{N_{tr}}U_{(i)}\dot{f}_{(i)})dt \tag{1}$$

그리고 각 메커니즘에 의한 누적 등가 변형량은 해당 속도 텐서의 편차 성분을 이용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\epsilon_{\gamma}^{slip}=\int\sqrt{\frac{2}{3}D_{\gamma}^{p}:D_{\gamma}^{p}}dt,\quad D_{\gamma}^{p}=f_{(0)}D_{(0)}^{p}=f_{(0)}\mathrm{sym}(L_{(0)}^{p}) \tag{2}$$

$$\epsilon_{\alpha'}^{slip}=\int\sqrt{\frac{2}{3}D_{\alpha'}^{p}:D_{\alpha'}^{p}}dt,\quad D_{\alpha'}^{p}=\sum_{i=1}^{N^{tr}}f_{(i)}D_{(i)}^{p}=\sum_{i=1}^{N^{tr}}f_{(i)}\mathrm{sym}(L_{(i)}^{p}) \tag{3}$$

$$\epsilon^{trans}=\int\sqrt{\frac{2}{3}D^{trans}:D^{trans}}dt,\quad D^{trans}=\mathrm{sym}(L^{\mathrm{TRIP}}) \tag{4}$$

또한, 각 메커니즘에 의한 응력 기여도도 분석하기 위해서 세 가지 구성 모델을 비교하였다: (1) 상변태와 TRIP효과를 모두 포함한 기준 모델(DIMT w/ TRIP), (2) TRIP효과만 제거한 모델(DIMT w/o TRIP), (3) 상변태를 완전히 억제한 모델(No DIMT). 각 모델 간 비교를 통해 상변태, TRIP효과가 응력 거동에 미치는 영향을 평가하였다. 더 나아가서, 결정방위와 응력 모드의 영향을 독립적으로 비교하기 위해 동일한 재료 물성과 해석 조건을 적용하고, 결정방위와 하중 조건만을 변화시켰다. 결정방위는 인장축을 기준으로 [100], [110] 및 [111]의 세 조건으로 설정하였으며, 각 방위에 대하여 단축 인장(UT), 단축 압축(UC), 등이축 인장(EBT), 평면변형률 인장(PST)의 네 가지 응력 모드를 적용하여 총 12개 조건을 해석하였다.

3. 주요 연구 결과

Fig. 1은 [100] 방위의 단축 인장 조건에서 변형률에 따라 응력, 일, 등가 변형률에 대해 각 상의 슬립 및 상변태의 기여도를 분리하여 보여준다. Fig. 1(a)에서 강도는 No DIMT, DIMT w/ TRIP, DIMT w/o TRIP 순으로 증가하였다. DIMT w/o TRIP 모델이 DIMT w/ TRIP 모델보다 높은 응력을 나타내는 것은, TRIP 변형이 전체 변형의 일부를 수용함으로써 동일한 전체 변형률에 도달하는 데 필요한 슬립 변형과 이에 수반되는 응력 증가를 감소시키기 때문이다. 즉, 본 해석 조건에서 마르텐사이트의 형성과 이에 따른 하중 분담은 재료의 강도를 증가시키는 반면, TRIP 변형은 추가적인 비탄성 변형을 제공하여 이러한 응력 증가를 부분적으로 완화한다.

DIMT w/ TRIP 모델의 변형기구별 누적 기여도를 분석한 결과, 기계적 일의 관점에서는 마르텐사이트 슬립이 전체 변형 과정에서 지배적인 역할을 하였다(Fig. 1(c)). 반면, 각 변형기구에 의해 누적된 등가 변형률은 각각 0.0248, 0.0297 및 0.0437로 나타났으며, TRIP 변형의 기여가 가장 컸다(Fig. 1(d)). 이러한 결과는 상변태가 기계적 일에 대한 기여 측면에서는 마르텐사이트 슬립보다 작지만, 전체 변형을 수용하는 데에는 중요한 역할을 한다는 것을 보여준다. 따라서 변형유기상변태는 변형 수용 능력과 가공경화 거동에 영향을 줌으로써 변형 국부화의 발생을 지연시키는 데 기여할 수 있다.

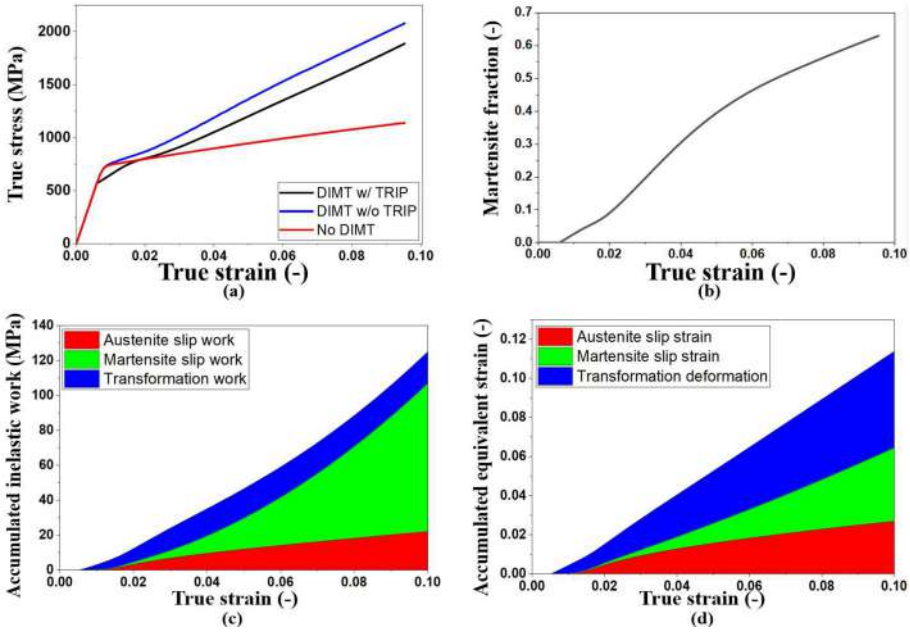


Fig. 1. Comparison of constitutive responses and deformation-mechanism contributions under [100] uniaxial tension: (a) Mecahnical responses of the DIMT w/ TRIP, DIMT w/o TRIP, and No DIMT models; (b) martensite fraction evolution; (c) accumulated work contributions; and (d) accumulated strain contributions in the DIMT w/ TRIP model.

결정방위와 응력 모드의 영향을 종합적으로 평가하기 위해 등가 진변형률 약 0.1에서 12개 조건의 마르텐사이트 분율과 변형기구별 누적 일 및 등가 변형량을 비교하였다(Fig. 2). 모든 조건에서 마르텐사이트 슬립의 일 기여가 가장 컸으나, 오스테나이트 슬립과 상변태의 상대적 기여는 결정방위와 응력 모드에 따라 달라졌다. 특히 PST [100]와 PST [110] 조건은 최종 마르텐사이트 분율이 각각 0.722와 0.723으로 거의 동일하였지만, 상변태에 의한 누적 일은 각각 15.94 MPa와 7.33 MPa, 누적 등가 변형량은 각각 0.0429와 0.0260으로 뚜렷한 차이를 보였다. 이는 동일한 양의 마르텐사이트가 생성되더라도 선택된 variant와 각 variant의 변태 구동력 및 변태변형 방향에 따라 상변태의 기계적 기여가 달라질 수 있음을 보여준다(Fig. 3).

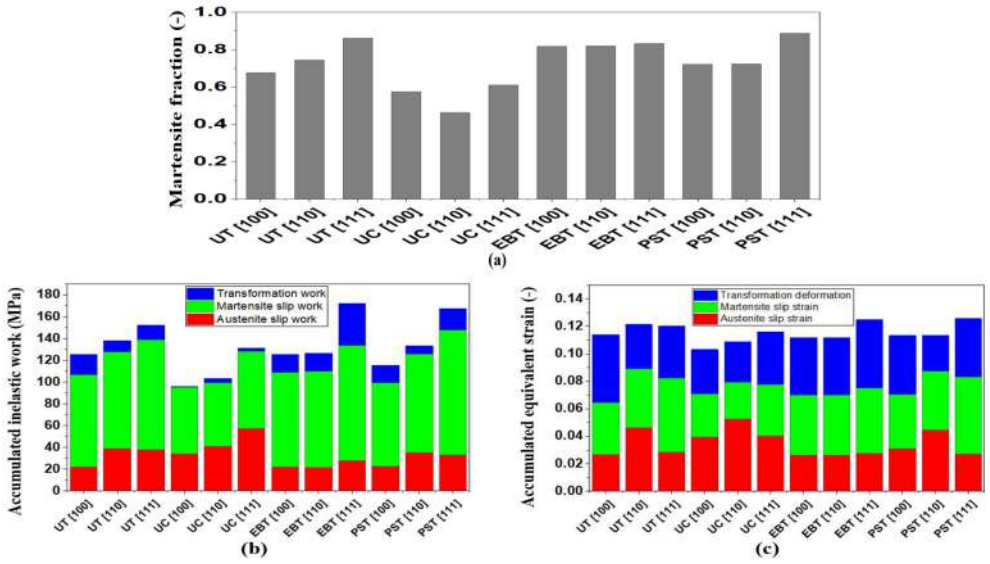


Fig. 2. Martensite fraction and accumulated mechanism contributions at an equivalent true strain of approximately 0.1 for the 12 crystal-orientation and stress-mode conditions: (a) final martensite fraction, (b) accumulated work contributions, and (c) accumulated strain contributions.

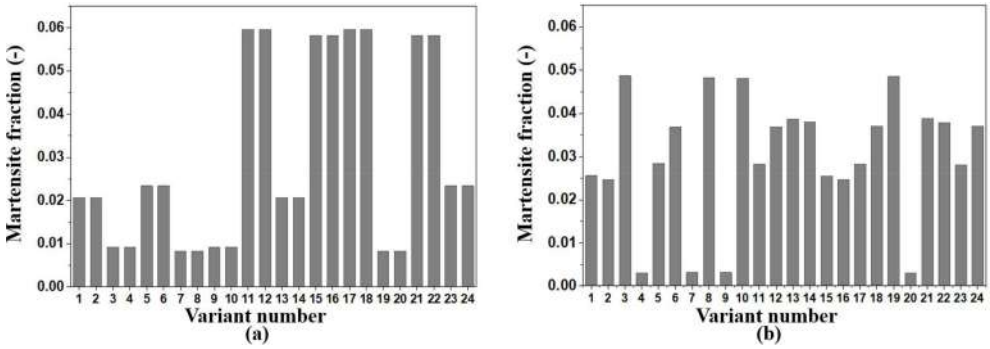


Fig. 3. Martensite variant fractions under (a) PST [100] and (b) PST [110] conditions at an equivalent true strain of approximately 0.1.

종합하면, 준안정 오스테나이트계 재료의 거시적 변형 거동은 마르텐사이트 분율만으로 충분히 설명할 수 없으며, 상분율 변화에 따른 강화, TRIP 변형에 의한 변형 수용, variant 선택 및 상별 슬립 분담을 함께 고려해야 한다. 본 연구는 결정방위와 응력 모드에 따른 변형기구별 기여를 정량적으로 규명함으로써, 다양한 하중조건에서 변형유기 상변태 재료의 기계적 거동을 이해하고 예측하기 위한 기초를 제공한다.

참고문헌(References)

1) M. J. Sohrabi, M. Naghizadeh, and H. Mirzadeh, Arch. Civ. Mech. Eng., 20, 124 (2020).
2) H. Yang, G. Zhou, H. Wang, P. Wu, M.-G. Lee, and D. Li, Int. J. Plast., 160, 103499 (2023).
3) J. Park, Y. Hou, J. Min, Z. Hou, H. N. Han, B. He, and M.-G. Lee, Int. J. Plast., 180, 104075 (2024).

[학생4-5 | 15:40]

Influence of Na_2SO_4 Addition in Nickel Electric Furnace Slag on MgO Refractory Corrosion: Dahye Han(발표자)[1], Yuri Kim[1], Min Seok Seo[2], Jong Ho Kim[2], Il Sohn(책임저자)[1*]; [1]Materials Science and Engineering, Yonsei University, [2]Research Institute of Industrial Science and Technology (RIST)

Keywords: Sodium sulfate, Electric furnace slag, MgO refractory, corrosion, Nickel smelting

As nickel demand increases with the growth of the battery and stainless-steel industries, the use of relatively abundant nickel oxide ores is becoming more important because high-grade nickel sulfide ores have limited reserves and declining ore grades. Saprolite is commonly processed through the RKEF (Rotary Kiln–Electric Furnace) route to produce ferronickel, which can be subsequently converted into low grade nickel matte through sulfidation and Fe removal. To remove impurities from nickel matte, downstream hydrometallurgical leaching is conducted using H_2SO_4 or NaOH, generating Na_2SO_4 as a by-product that can be fed back into the upstream processes as an additive. However, when Na_2SO_4 is introduced into an electric furnace, it can modify the slag composition and properties, thereby affecting the chemical dissolution, refractory diameter loss, and slag penetration of MgO refractory. Therefore, refractory corrosion should be evaluated for the application of the Na_2SO_4 assisted ferro-nickel to nickel matte conversion process.

In this study, MgO saturation and slag viscosity were calculated using FactSage 8.3, while MgO refractory reaction with the slag was experimentally evaluated through the rotating finger corrosion tests conducted at 1,600 °C under a $p(CO)/p(CO_2)=1$. Time dependent corrosion was first evaluated using MgO refractory at 25wt% Na_2SO_4 slag for 10, 20, 40, and 120 min, as this composition showed the highest calculated MgO saturation solubility. The reaction time was then fixed at 120 min to compare slags containing 0, 5, 15, and 25 wt% Na_2SO_4. The reacted slag was analyzed by X-ray fluorescence (XRF, Bruker, USA). After submersion of the machined refractory specimen with an initial length of 60 mm to an immersion depth of 20 mm, the specimen was sectioned 10 mm from the bottom end and analyzed using a scanning electron microscope (SEM, Tescan Vega LMS, Czech Republic) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS, Oxford Instruments, UK) to evaluate diameter loss, slag penetration, interfacial microstructures, and elemental distributions. A separate 36 h saturation experiment was conducted using the 25 wt% Na_2SO_4 slag to evaluate the saturated MgO dissolution potential during prolonged exposures.

Thermodynamic calculations showed non-linear changes in MgO saturation with Na_2SO_4 addition, as shown in Figure 1. This behavior resulted from the different positions of the initial slag compositions relative to the olivine[Mg_2SiO_4] precipitation boundary. The 5 and 15 wt% Na_2SO_4 slags were close to this boundary and therefore showed only limited additional MgO dissolution to reach saturation, whereas the 25 wt% slag was far from the saturation point and exhibited considerabl MgO dissolution. In contrast, slag viscosity continuously decreased with increasing Na_2SO_4 addition, which was attributed to the depolymerized silicate network.

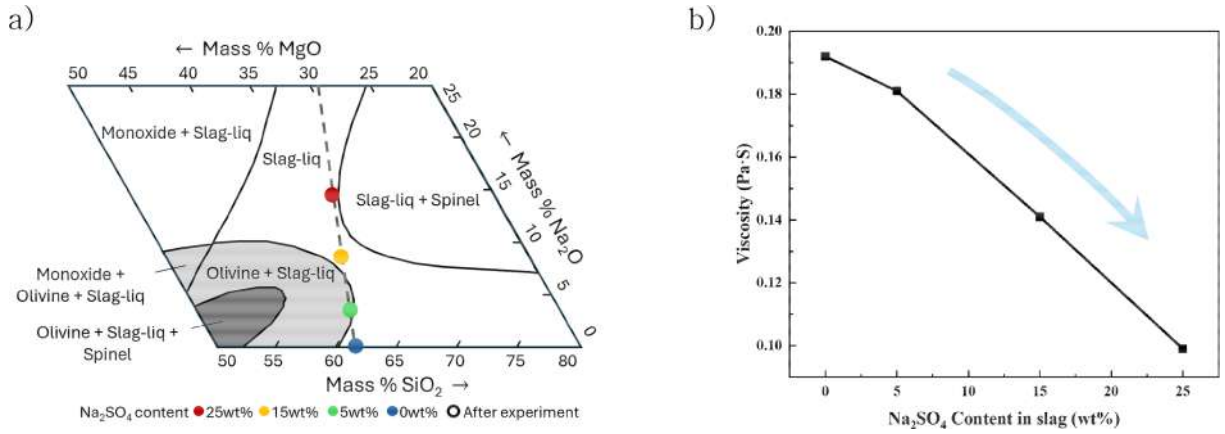


Fig. 1. Calculated changes in (a) equilibrium phases and MgO saturation at 1,600 °C and CO/CO_2=1 and (b) viscosity of electric furnace slag with Na_2SO_4 addition

Experiments with varying reaction times were conducted using slag containing 25 wt% Na_2SO_4. The results showed that the MgO content of the slag gradually increased, whereas the refractory diameter gradually decreased with increasing reaction time, as shown in Figure 2. After 120 min, the MgO content had increased from its initial value but remained below saturation. However, in the separate 36 h experiment conducted to examine long-term dissolution behavior, the slag composition approached MgO saturation. These results indicate that, under prolonged reaction conditions, refractory dissolution may continue beyond 120 min as the slag approaches saturation.

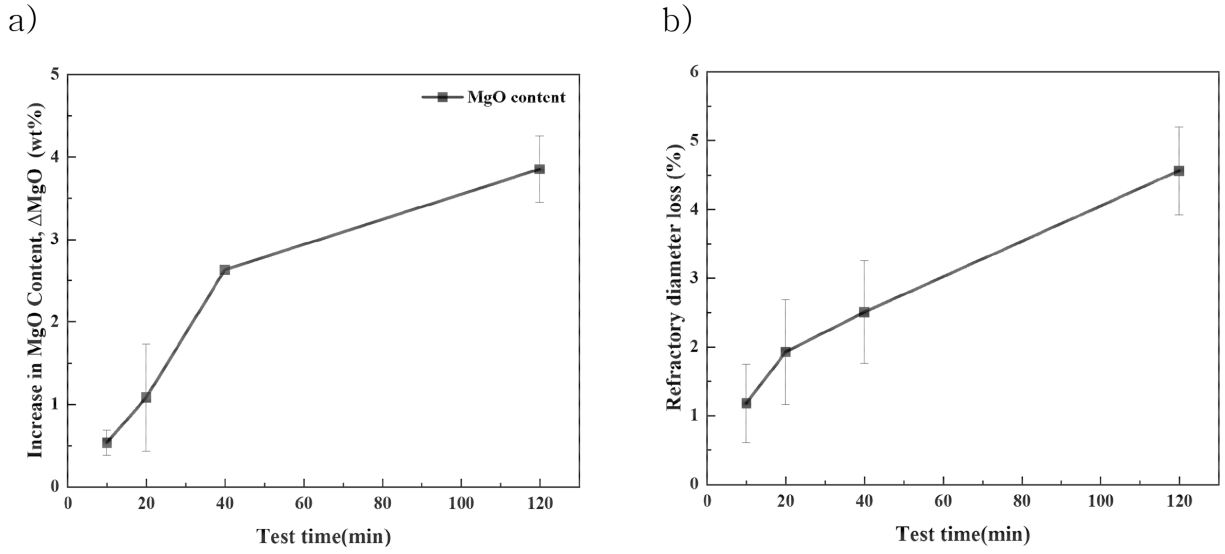


Fig. 2. Corrosion behavior of MgO refractory as a function of reaction time under the 25 wt% Na_2SO_4 condition: (a) MgO content in the slag and (b) change in refractory diameter.

With the reaction time fixed at 120min, the refractory corrosion behavior exhibited a clear dependence on the Na_2SO_4 content. The slags containing 5 and 15 wt% Na_2SO_4 approached MgO saturation, thereby limiting refractory diameter loss. In contrast, the MgO content of the slag, refractory diameter loss, and internal slag penetration increased markedly at 25 wt% Na_2SO_4, as shown in Figure 3. SEM-EDS analysis further revealed a magnesio-wüstite[(Mg,Fe)O] layer at the slag–refractory interface, which became thinner with increasing Na_2SO_4 content because the lower FeO content reduced the Fe supply required for layer formation. These results indicate that MgO refractory corrosion was controlled by the combined effects of MgO dissolution capacity, slag penetration, and interfacial phase layer stability.

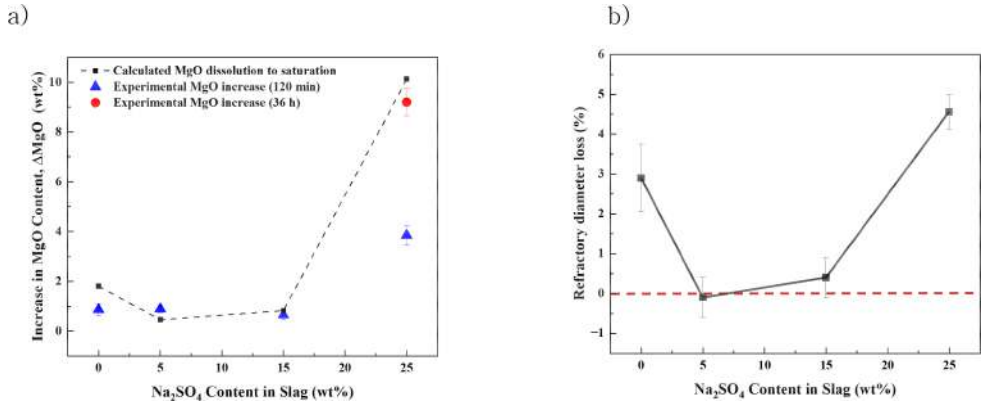


Fig. 3. Corrosion behavior of MgO refractory with Na_2SO_4 addition after 120min (a) MgO content in the slag compared with the calculated saturation and (b) change in refractory diameter.

In summary, MgO dissolution and refractory diameter loss in the Na_2SO_4 containing electric furnace slag and MgO refractory system were primarily governed by the MgO saturation state of the slag. The 36 h experiment further indicated that MgO dissolution may continue during prolonged operation as long as the slag remains undersaturated with respect to MgO, with the slag composition progressively approaching saturation. Meanwhile, decreasing slag viscosity with increasing Na_2SO_4 addition promoted slag penetration, whereas the magnesio-wüstite layer became thinner and showed limited effectiveness as a stable protective layer. Therefore, the long-term stability of MgO refractory should be evaluated by considering MgO saturation together with internal slag penetration and interfacial layer stability. These results provide fundamental information for optimizing Na_2SO_4 addition in the ferronickel to nickel matte conversion process.

참고문헌(References)

1) M. Elias, Giant Ore Deposits: Characteristics, Genesis and Exploration, CODES Spec. Publ. 4 (eds., D. R. Cooke and J. Pongratz), pp. 205-220, Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania, Hobart, Tasmania (2002).
2) H. S. Sohn, Resour. Recycl. 30, 3 (2021).
3) M. Rao, G. Li, X. Zhang, J. Luo, Z. Peng, and T. Jiang, Sep. Sci. Technol. 51, 1408 (2016).
4) J. S. Choi and B. S. Lee, Korean Patent Publication 10-2025-0094405 (2025).
5) G. Song, Z. Deng, and M. Zhu, Metall. Mater. Trans. B 54, 2383 (2023).
6) Petkov, Jones, Boydens, Journal of European Ceramic Society,27(2007).
7) J. Han, J. Heo, J. Park, , Ceramics International, 45 (2019).

[학생4-6 | 15:55]

EBSD 기반 결정소성 RVE 하이브리드 해석을 통한 Cu-Ti 극박재의 V-굽힘 국부 변형 거동 평가: 조규민(발표자)[1], 성낙훈[2], 최재일[2], 이창환[1], 박진홍[1*]; [1]서울과학기술대학교 기계공학과, [2]협진커넥터

Keywords: Cu-Ti 합금, 미세조직, 대표체적요소, 결정소성, V-굽힘

1. 연구의 목적과 의의

전자·전기 부품의 소형화와 고집적화에 따라 커넥터용 동합금 박판에는 높은 강도와 우수한 굽힘 성형성이 동시에 요구된다. Cu-3Ti 합금은 시효 석출을 통해 높은 강도와 실용적인 전도 특성을 확보할 수 있어, 환경·안전 문제가 제기되는 Cu-Be 합금의 대체 소재로 주목받고 있다[1]. 그러나 굽힘 공정에서는 두께방향으로 급격한 변형 구배가 형성되며, 특히 0.1 mm급 박판은 두께방향 결정립 수가 제한적이어서 재료 응답의 평균화 전제가 성립하기 어렵다. 이 경우 굽힘부의 국부 거동은 개별 결정립의 방위와 쌍정 배열에 직접 지배되므로, 평균화된 물성에 기반한 균질 유한요소해석만으로는 굽힘부의 불균일 변형과 국부 변형 집중을 설명하는 데 한계가 있다.

본 연구에서는 EBSD 분석으로부터 구축한 대표체적요소(RVE)에 결정소성(CP) 모델을 적용하여, Cu–3Ti 박판의 굽힘 과정에서 나타나는 미세조직과 국부 변형의 상관관계를 분석하였다. 이를 위해 거시 균질 모델과 국부 CP-RVE를 결합한 하이브리드 해석을 수행하여 V-굽힘 거동을 평가하였다. 이를 통해 Cu–3Ti 박판의 압연·열처리 조건과 굽힘 공정을 설계하기 위한 미세조직적 근거를 마련하고자 하였다.

2. 연구 방법론 개요

두께 0.1 mm의 Cu–3Ti 합금 박판에 대해 압연방향 일축인장시험을 수행하여 응력–변형률 곡선을 확보하고, 펀치 반경 0~0.6 mm 조건의 V-굽힘 시험을 통해 굽힘 성형성을 평가하였다. 또한 초기 시편, 인장 파단부 인근 및 굽힘 시험편의 굽힘부

에 대해 EBSD를 측정하여 변형 조건별 미세조직 데이터를 확보하였다. EBSD 데이터로부터 MTEX를 이용하여 결정립 크기, KAM, 집합조직 및 Σ3 쌍정 특성 등을 정량화하였다. 이어서, Neper를 이용하여 Σ3 쌍정 경계를 병합한 모결정립의 크기와 구형도 분포를 재현하는 Laguerre tessellation을 생성하고, 쌍정 데이터 및 Σ3 방위 관계를 적용하여 쌍정을 포함한 최종 RVE를 구축하였다.

구축된 RVE는 상용 유한요소해석 소프트웨어 Abaqus에 구현하였으며, CP 모델은 사용자 서브루틴 UMAT을 통해 적용하였다. Cu–3Ti 합금의 일축인장 물성을 기준으로 CP 모델을 보정하고 이를 V-굽힘 해석에 적용하였다. V-굽힘 해석은 먼저 균질 탄소성 모델로 굽힘부의 소성변형률 분포를 분석하고, 확인된 변형 집중 영역에 CP-RVE를 배치하는 방식으로 구성하였다. 나머지 시편 영역에는 동일한 인장 물성으로 정의한 균질 재료 모델을 적용하였으며, 두 영역은 변위 연속성이 유지되도록 결합하였다. 이와 같이 국부 영역만을 결정립 단위로 이산화하고 그 외 영역을 균질 모델로 처리한 구성을 CP 하이브리드 모델이라 정의하였으며, 이를 통해 전체 시편을 결정립 단위로 모델링하는 경우보다 계산 비용을 절감하면서도 굽힘부의 미세조직 의존적 국부 변형률 분포를 반영하였다[2].

3. 주요 연구 결과

Fig. 1(a)에서 Cu–3Ti 박판은 인장강도 약 1300 MPa, 균일변형률 약 0.16의 고강도 인장 특성을 나타내었다. Fig. 1(b)에서 인장 후 Brass 성분은 약 11%에서 14.5%로, R-Copper는 약 8%에서 11%로 증가한 반면 Goss는 감소하여, 저적층결함에너지 FCC 합금에서 보고되는 brass-type 집합조직의 발달 경향과 정성적으로 유사하였다[3]. Fig. 1(c)의 GB map에서는 인장 후 저각 입계와 Σ3 쌍정 경계 길이분율이 함께 증가하였으며, 이는 소성변형에 따른 결정립 내부 방위 구배의 발달과 쌍정 경계 특성의 변화를 보여준다. Fig. 1(d)의 R=0 굽힘 시편 단면에서는 굽힘부 내·외측에 걸쳐 두께방향으로 상이한 입계 및 결정방위 분포가 관찰되어, 굽힘에 따른 변형 구배가 국부 미세조직에 반영됨을 확인하였다.

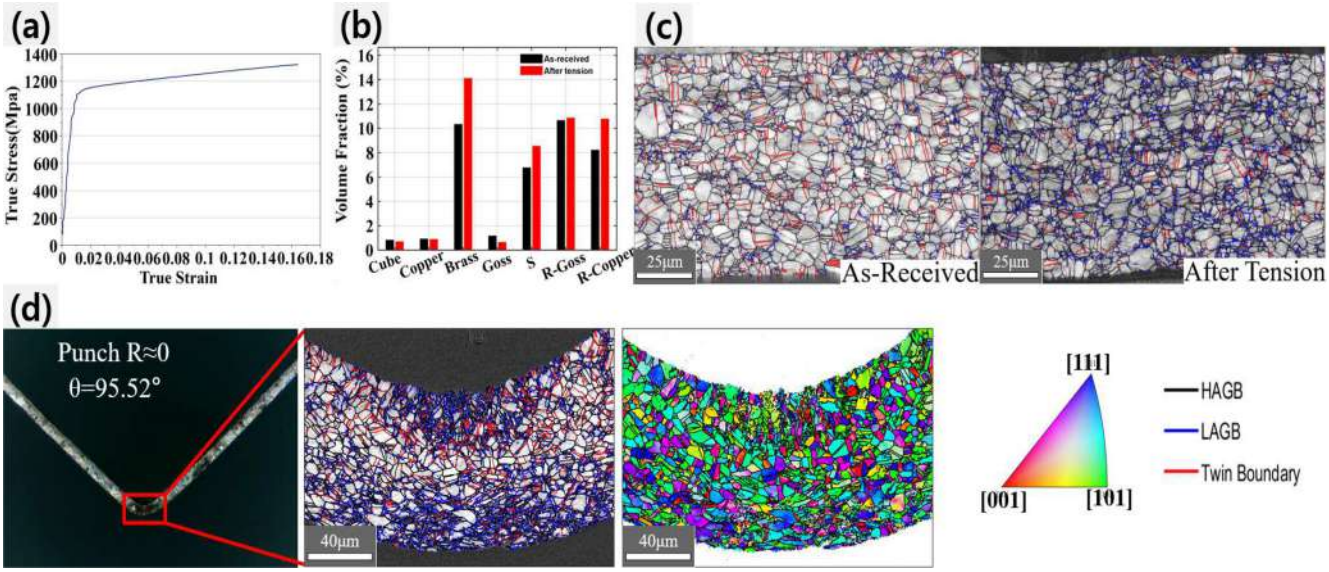


Fig. 1. Cu-3Ti 박판의 기계적 특성 및 미세조직 분석 결과: (a) 일축인장 진응력-진변형률 곡선, (b) 인장 전후 주요 집합조직 성분 분율, (c) 인장 전후 EBSD GB map(LAGB, HAGB, Σ3 Twin boundary), (d) R=0 V-굽힘 시험편의 단면 형상과 굽힘부의 GB map 및 ND-IPF map

초기 EBSD 미세조직의 통계적 특성을 해석 모델에 반영하기 위해 Fig. 2(a)와 같이 모결정립 생성, 쌍정 영역 도입 및 결정방위 부여 과정을 순차적으로 수행하여 2차원 RVE를 구축하였다. Fig. 2(b)의 극점도 비교에서 생성된 RVE는 초기 EBSD의 주요 집합조직 성분 위치와 분포를 유사하게 재현하였다. 또한 Fig. 2(c)에서 RVE의 쌍정 면적 분율과 쌍정 경계 길이 분율은 초기 EBSD 대비 전체적으로 유사한 수준을 보여, 생성된 RVE가 초기 미세조직의 결정방위 및 쌍정 특성을 합리적으로 반영하고 있음을 확인하였다.

V-굽힘 해석에서는 Fig. 3(a)와 같이 굽힘부 중앙의 국부 변형 집중 영역에 CP-RVE를 배치하였다. Fig. 3(b)의 균질 연속체 모델에서는 굽힘부를 따라 매끄럽고 연속적인 등가소성변형률 분포가 나타난 반면, Fig. 3(c)의 CP 하이브리드 모델에서는 결정립 방위와 쌍정 배열에 따라 불균일한 국부 소성변형 분포가 형성되었고, 인접 결정립 사이에서도 상당한 변형률 차이가 확인되었다. 또한 CP 하이브리드 모델의 굽힘부 내측에서는 결정립 단위의 요철이 발달하였으며, 이는 Fig. 1(d)에서 관찰된 굽힘부 표면 형상과 정성적으로 부합하였다. 굽힘부 실험 EBSD와의 정량 비교를 포함한 상세 결과는 학회 발표에서 다룰 예정이다.

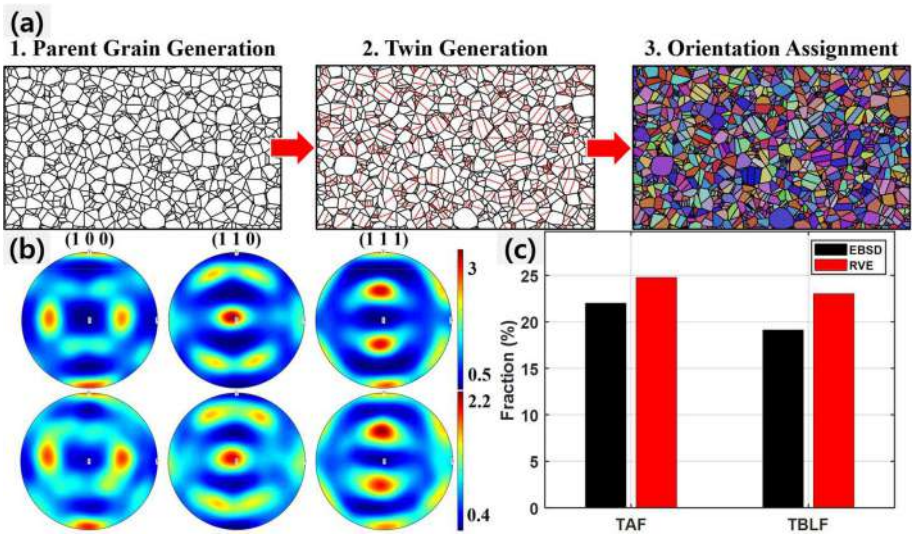


Fig. 2. 초기 EBSD와 생성된 CP-RVE의 비교: (a) RVE 생성 과정, (b) 극점도 비교, (c) 쌍정 면적 분율(TAF) 및 쌍정 경계 길이 분율(TBLF) 비교

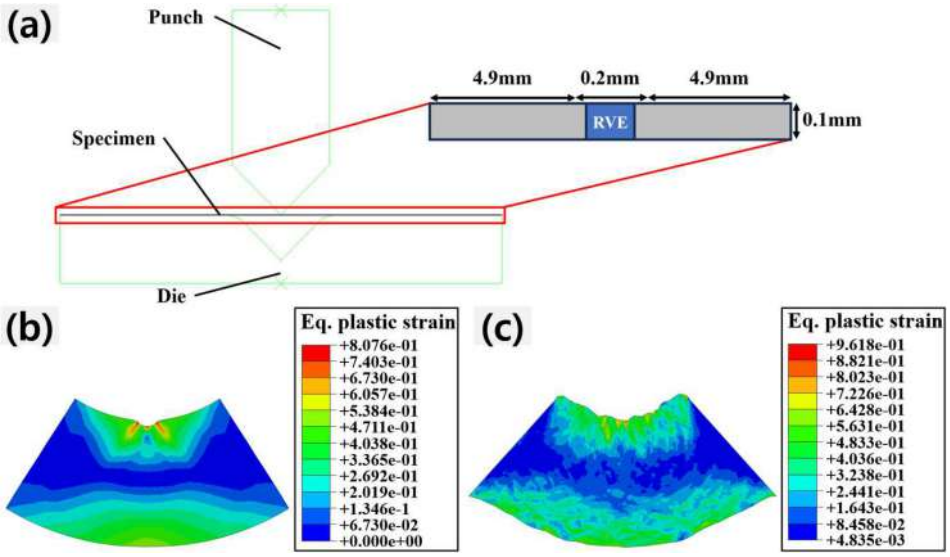


Fig. 3. 균질 연속체 모델과 CP 하이브리드 모델의 V-굽힘 등가소성변형률 분포 비교: (a) V-굽힘 유한요소모델 및 CP-RVE 배치 영역, (b) 균질 연속체 모델, (c) CP 하이브리드 모델

참고문헌(References)

1) K. Yang, Y. Wang, M. Guo, H. Wang, Y. Mo, X. Dong, and H. Lou, Prog. Mater. Sci. 138, 101141 (2023).
2) J. Wang, C. Li, H. Gong, Z. Xu, and Y. Wan, J. Mater. Process. Technol. 348, 119164 (2026).
3) R. Li, Z. Xiao, Z. Li, X. Meng, and X. Wang, Materials 16, 424 (2023).

[학생4-7 | 16:10]

P-Termination-Biased Defect Tuning of Molybdenum Phosphide for Selective Hydrogen Peroxide Electrosynthesis: Jieun Seo(발표자)[1+], Jeong-Gyu Lee[2+], Bogeun Park[3+], Byung-Hyun Kim[3*], Min-Jae Choi[2*], Hyeuk Jin Han[1*]; [1]Sungshin Women's University, [2]Sungkyunkwan University, [3]Hanyang University ERICA

Keywords: Defect engineering, Tranision-metal phosphides, Molybdenum phosphide, two-electron oxygen reduction reaction

1. Purpose and Significance of the Research

Hydrogen peroxide (H_2O_2) is a vital oxidant in water treatment, semiconductor cleaning, and environmental remediation, yet it is produced almost exclusively via the anthraquinone process, which requires centralized infrastructure, hazardous organic solvents, and

high-risk transport and storage. Electrochemical synthesis via the oxygen reduction reaction (ORR) offers a decentralized alternative, but its viability hinges on steering the ORR toward the two-electron ($2e^-$) pathway rather than the competing four-electron ($4e^-$) reduction to water.

Selectivity is dictated by how the OOH* intermediate binds, reorganizes, and transforms on the catalyst surface, positioning surface termination, local coordination, and defect chemistry as pivotal design parameters. On conventional transition-metal catalysts, however, the linear scaling relationship between OOH* and O* adsorption energies means that stabilizing OOH* inadvertently triggers O–O bond cleavage, preventing simultaneous optimization of activity and selectivity. Compounding this challenge, conventional synthetic routes intrinsically couple surface termination with defect generation, making their individual contributions methodologically inseparable.

Here, we break this coupling using molybdenum phosphide (MoP), whose Mo 4d–P 3p hybridization imparts metallic conductivity and a highly tunable surface electronic structure. A phosphorus-rich chemical vapor conversion strategy fixes a P-termination-biased surface while independently modulating the phosphorus-vacancy (V_P) concentration through conversion temperature and dwell time. This strategy unambiguously isolates the distinct roles of termination and defect chemistry in $2e^-$ ORR selectivity and establishes termination-biased defect engineering as a transferable design paradigm for transition-metal phosphide electrocatalysts.

2. Methodology

Polycrystalline MoP was synthesized via the phosphorization of a MoO_3 precursor. Commercial MoO_3 (Sigma-Aldrich, ≥99%) was purified by vapor transport and recrystallization at 900 °C for 1 h under flowing air (500 sccm); the crystallites recovered from the quartz tube wall were ground and pressed into a pellet. The pellet was positioned 15–17 cm upstream of the furnace center. After sequential Ar/H_2 purging and evacuation to 200 mTorr, the chamber was returned to atmospheric pressure under a continuous 20 sccm H_2 flow. The furnace was ramped at 23 °C min^{-1} to 700–850 °C and held for 0.5–4 h before rapid cooling. Phosphine generated in situ from NaH_2PO_2 served as the phosphorus source. The upstream placement of the precursor, combined with continuous PH_3 delivery, established a phosphorus-rich conversion environment in which the conversion temperature and dwell time determined the extent of conversion—and hence the local V_P population—while maintaing an essentially fixed P-biased termination. Samples were denoted as MoP-T-t (e.g., MoP-700-2h).

Structural and surface characterizations were performed using XRD, FE-SEM with EDS mapping, FE-TEM/HR-TEM, and XPS. The ORR performance was evaluated using a rotating ring-disk electrode (RRDE) with a collection efficiency of 0.232 in O_2-saturated 0.1 M KOH at 1,600 rpm. LSVs were recorded from 0.80 to 0.05 V vs. RHE at a scan rate of 10 mV s^{-1} with the ring potential held at 1.2 V vs. RHE. ECSA estimation, EIS, and KSCN poisoning tests were subsequently performed. Spin-polarized DFT calculations (VASP 6.5.1, PAW/PBE, and a 500 eV cutoff) modeled the MoP (0001) and (10-10) surfaces using five-layer slabs. Because the operating surface does not correspond to a clean termination, surface Pourbaix diagrams for H*-, O*-, and OH*-covered MoP were constructed to identify the electrochemically relevant adsorbate-covered states before evaluating the corresponding adsorption energies. The P p-band centers obtained from PDOS and the Bader charges at the OOH* adsorption site were then used to link phosphorus vacancies to OOH* binding strength. Practical performance was assessed in a membrane-separated flow cell (0.25 mg cm^{-2}, 1 M KOH) under pure O_2 and an Ar/O_2 (8:2, v/v) simulated-air feed, with H_2O_2 quantified using the Ce^{4+}/Ce^{3+} colorimetric method.

3. Principal Results

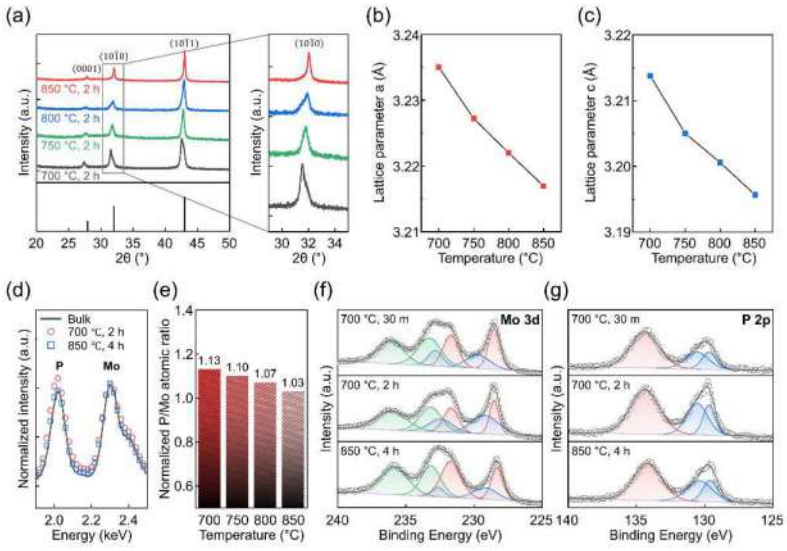


Fig. 1. Structural, compositional, and surface-chemical evolution of P-rich MoP.

XRD confirms a pure hexagonal MoP phase with no secondary reflections across the entire 700–850 °C window, while the selected reflection shifts to higher 2θ with increasing temperature and Rietveld refinement reveals a monotonic contraction of both lattice parameters a and c—the structural signature of progressive excess-phosphorus removal. EDS-derived P/Mo atomic ratios, normalized to the bulk benchmark, quantify this: the normalized P/Mo ratio falls stepwise from 1.13 at 700 °C through 1.10 and 1.07 to 1.03 at 850 °C, moving from a clearly P-rich state toward bulk-like stoichiometry. Critically, P 2p XPS retains persistent phosphide P (Mo–P bonding) at every condition, with Mo 3d showing Mo^{3+} alongside surface oxide components. Termination character is thus preserved while composition is tuned, without macroscopic phosphorus depletion, secondary-phase formation, or detectable P segregation—the decoupling on which this study rests.

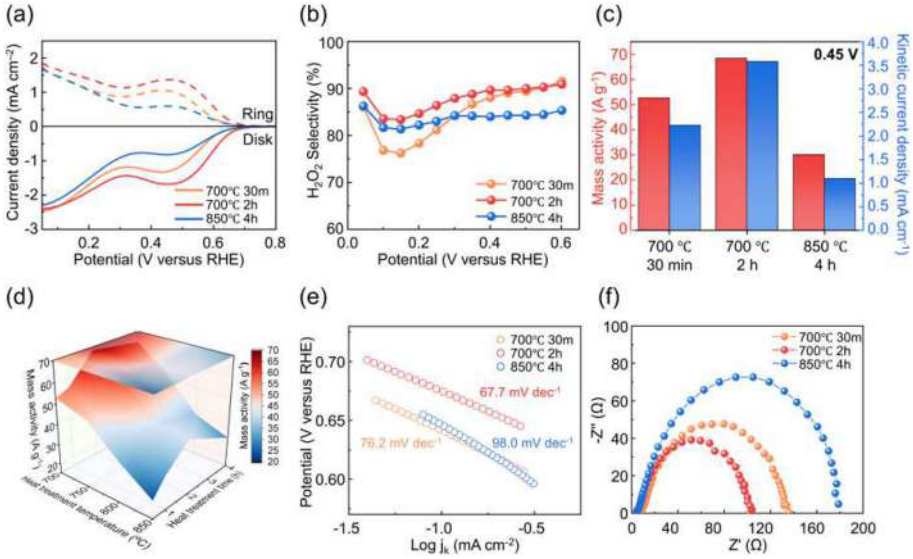


Fig. 2. Electrochemical performance of MoP for H_2O_2 production.

RRDE screening reveals a volcano-type, not monotonic, dependence on conversion severity. MoP-700-2h sustains the highest H_2O_2 selectivity across 0.05–0.60 V vs. RHE and simultaneously delivers the highest mass activity and kinetic current density at 0.45 V vs. RHE. The three-dimensional activity map over the temperature–time space locates a single well-defined optimum. Tafel slopes span 67.7–98.0 mV dec^{-1} and the Nyquist semicircle contracts at the optimum, indicating faster interfacial charge transfer. KSCN poisoning suppresses the peroxide response, supporting a V_P-modulated Mo–P surface ensemble — rather than an isolated Mo or bare P site — as the catalytically relevant motif.

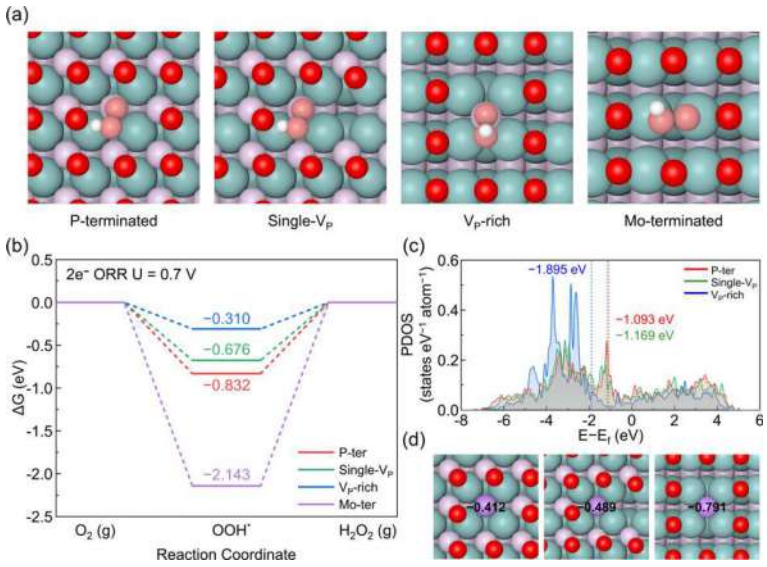


Fig. 3. DFT analysis of $2e^-$ ORR activity on MoP surfaces.

DFT uncovers the electronic origin. On Mo-terminated MoP, OOH* binds far too strongly (ΔG = −2.143 eV), driving O–O scission toward the $4e^-$ product. P-termination weakens this dramatically to −0.832 eV, and a single V_P shifts it further toward thermoneutrality (−0.676 eV), whereas a V_P-rich surface overshoots to −0.310 eV. PDOS shows the P p-band center descending from −1.093 eV (P-terminated) to −1.169 eV (single-V_P) and −1.895 eV (V_P-rich), progressively weakening OOH* binding, while Bader analysis shows the active P site becoming more negative. Termination therefore sets the coarse binding regime and V_P supplies the fine adjustment — the electronic counterpart of the experimental volcano.

4. Conclusion

This work decouples surface termination and defect chemistry, two design variables normally entangled in transition-metal phosphide synthesis. By fixing a P-termination-biased MoP surface via phosphorus-rich chemical vapor conversion, we systematically tuned the local phosphorus vacancy (V_P) concentration. This strategy reveals a volcano-type $2e^-$ ORR selectivity trend—optimized at MoP-700-2h with >83% H_2O_2 selectivity—driven by a V_P-modulated Mo–P surface ensemble that balances OOH* binding energetics. Demonstrated by high flow-cell productivity (29.3 mol $gcat^{-1}$ h^{-1}) under simulated-air, termination-biased defect engineering offers a general design principle for conductive phosphide electrocatalysts.

참고문헌(References)

1) S. H. Kim, J. H. Kim, B. Park, Adv. Mater. 37, 2500250 (2025).
2) H. J. Han, K. Sushant, G. Jin, Adv. Mater. 35, 2208965 (2023).
3) J. G. Lee, J. W. Choi, S. Kim, W. Zhang, J. Am. Chem. Soc. 148, 9268−9276 (2026).

표면계면
Room 1층 104호, 10월 28일

[표면계면1-1 | 08:30
Wavelength-Dependent Carrier Injection in Ag Nanomesh-Integrated Si Photodetector: JeongYeol Park, Jihoon Huh, Yohan Lee, Seung Ji Lo, Jae Hyun Kim, Narae Lee, Moonsang Lee*(Inha University, Program of Semiconductor Convergence, Inha University)
Keywords: LSPR, SPP, Hot carrier, Plasmon

Plasmonic nanostructures can enhance photodetector performance, but the impact of different plasmonic modes on carrier dynamics remains unclear. Here, we investigate Ag nanomesh–integrated Si photodetectors by comparing LSPR and hybrid LSPR–SPP modes. The LSPR mode localizes fields at the Ag/air interface, leading to transport-limited carrier injection. In contrast, the hybrid mode concentrates fields at the Ag/Si interface, enabling efficient carrier injection and enhanced photocurrent. These results highlight the critical role of field localization in plasmon-mediated carrier dynamics.

[표면계면1-2 | 08:45]
Integrated Artificial Synaptic and Sigmoid Neuronal Functions in a Low-Subthreshold-Swing Cold-Source Field-Effect Transistor: Narae Lee(Department of Materials Science and Engineering, Inha University, Program in Semiconductor Convergence, Inha University), Seyoung Oh, Ojun Kwon(Department of Advanced Materials Engineering, Chungbuk National University), Jihoon Huh, Jeongyeol Park, Seung-Ji Lo, Yohan Lee, Jae Hyun Kim, Moonsang Lee*(Department of Materials Science and Engineering, Inha University, Program in Semiconductor Convergence, Inha University), Byungjin Cho*(Department of Advanced Materials Engineering, Chungbuk National University)
Keywords: CSFET, IGZO, Neuromophic, Synapse, Neuron

Neuromorphic computing enables energy-efficient information processing by emulating the computational functions of biological neural networks. However, neuronal and synaptic functions are typically implemented using separate devices, increasing hardware complexity and limiting efficient system integration. In this work, a cold-source field-effect transistor (CSFET) exhibiting low subthreshold swing was used to implement both synaptic and neuronal operations in a single device. The CSFET exhibited steep subthreshold switching with a low SS of 49 mV/dec and showed distinct neuromorphic responses depending on the gate-pulse amplitude. Synaptic behaviors such as short-term and long-term plasticity (STP and LTP) were emulated using relatively high-amplitude gate pulses, whereas threshold-dependent neuronal behavior was induced by relatively low-amplitude gate-pulse trains. In the on-state region, the output current gradually increased toward saturation, and was well fitted by a sigmoid function. The measured device characteristics were incorporated into an artificial neural network (ANN) simulation to demonstrate the applicability of the single-device dual functionality to neural networks. This study provides a promising pathway toward efficient ANN-based neuromorphic systems.

[표면계면1-3 | 09:00]
Optoelectronic Synaptic Device Based on a Graphene Quantum Dot/Monolayer WSe_2 Hybrid Heterostructure for Neuromorphic Computing: KIM JAEHYUN, Yohan Lee, Jihoon Huh, Jeongyeol Park, Seung Ji Lo, Narae Lee, Moonsang Lee*(Inha University, Program in Semiconductor Convergence, Inha University)
Keywords: Graphene Quantum Dot, Monolayer WSe_2, Optoelectronic, Neuromorphic Computing

Hybrid structures of quantum dots (QDs) and two-dimensional (2D) semiconductors provide a promising platform for optoelectronic neuromorphic computing by combining efficient light absorption with excellent charge transport. Here, we demonstrate a graphene quantum dot (GQD)/monolayer WSe_2 heterostructure that integrates enhanced photodetection and optoelectronic synaptic functionalities within a single device. The strong light absorption of GQDs and photoinduced charge transfer across the GQD/WSe_2 interface lead to enhanced photoresponsivity compared with pristine WSe_2 devices. Furthermore, the light-assisted memory effect enables optically controlled synaptic weight modulation, and the device exhibits key synaptic behaviors including short-term plasticity (STP) and long-term plasticity (LTP). Optimized optical pulse stimulation enables linear weight modulation with sub-picojoule energy consumption per event. The experimentally measured synaptic weight-update characteristics are incorporated into an artificial neural network simulation, achieving high recognition accuracy on the MNIST handwritten-digit dataset. These results demonstrate the potential of GQD/WSe_2 hybrid heterostructures as energy-efficient optoelectronic synaptic devices for neuromorphic computing.

[표면계면1-4 | 09:15]
Optically Reconfigurable Quaternary Logic in MoS2/WSe2 Heterojunction Inverters: Lee Yohan, Huh Jihoon, Park Jeongyeol, Lo SeungJi, Lee Narae, Kim Jaehyun, Lee Moonsang*(Inha University, Program in Semiconductor Convergence, Inha University)
Keywords: two-dimensional semiconductors, MoS_2/WSe_2 heterojunctions, negative differential transconductance, optical reconfiguration, multivalued logic

In an artificial intelligence era, data volumes and processing power demands are expected to surge dramatically. In response to this challenge, there has been renewed interest in multi-valued logic (MVL) computing technology. In this study, we present the devices using MoS_2/WSe_2 heterojunction as the channel material, bringing forth negative differential transconductance (NDT) characteristics through an elegantly simplified process. In addition, laser irradiated transistor achieves quaternary logic operation. Our simplified fabrication process, which fabricates two transistors in a single heterojunction channel, also enables stable MVL operation at room temperature. These findings illuminate a promising route to surpass the limitations of current 2D-based MVL devices, opening new horizons for the development of high-performance, densely integrated memory technologies.

[포면게면2-1 | 09:40]

Drain-Field-Modulated Carrier Dynamics for Dual-Timescale Synaptic Plasticity in an Ambipolar WSe_2 Transistor: SEUNGJI LO, Moonsang Lee*, Jihoon Huh, Jeongyeol Park, Yohan Lee, Narae Lee, Jae Hyun Kim(Inha Univ., Program in Semiconductor Convergence, Inha Univ.)

Keywords: WSe_2, Ambipolar transport, Drain-field modulation, Synaptic plasticity, Neuromorphic device

The development of synaptic devices is essential for realizing energy-efficient neuromorphic systems capable of emulating the parallel information processing of the human brain. In this work, we demonstrate a multifunctional synaptic transistor based on mechanically exfoliated WSe_2 with drain-voltage-controlled ambipolar transport. By modulating the drain bias, the dominant carrier transport can be switched between p- and n-type regimes within a single device, enabling carrier-dependent synaptic dynamics. Notably, the two transport regimes exhibit distinctly different temporal responses: the p-type branch shows relatively slow synaptic relaxation, whereas the drain-induced n-type branch exhibits substantially faster dynamics. This pronounced separation in response times enables the emulation of dual-timescale synaptic processing within a single transistor. Furthermore, excitatory and inhibitory synaptic functions, including paired-pulse facilitation and activity-dependent plasticity, are reproduced through appropriate electrical bias modulation. These results demonstrate that drain-field-controlled ambipolar transport provides an effective strategy for dynamically selecting different synaptic timescales without additional device components. The proposed WSe_2 synaptic transistor therefore offers a compact device platform for multifunctional and adaptive neuromorphic computing.

[포면게면2-2 | 09:55]

LC 공진 기반 미세플라스틱 검출 및 정량 분석 센서: 박루빈, 이금비 *(경북대학교)

Keywords: 미세플라스틱, LC 공진회로, 임피던스 센서, 무선 검출

환경 중 미세플라스틱의 축적은 플라스틱 소비 증가에 따른 심각한 환경문제로 대두되고 있다. 직경 1 μm~5 mm의 미세플라스틱은 환경오염뿐만 아니라 식품을 통해 인체에 유입되어 건강에 영향을 미칠 수 있다. 기존의 미세플라스틱 검출 기술은 다단계 전처리 공정, 높은 비용 및 장시간의 분석 시간이 필요하며, 실제 환경 시료에서 미세플라스틱의 농도를 구분하고 정량적으로 분석하는 데 한계가 있다. 이에 따라 간편하고 비용 효율적인 미세플라스틱 검출 센서의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 유선 및 무선 측정 방식을 적용하여 미세플라스틱의 검출 및 농도 분석이 가능한 LC 공진 기반 센서 플랫폼을 제안한다. 센서는 인덕터(인덕턴스, L)와 캐패시터(정전용량, C)로 구성된 LC 공진회로를 기반으로 하며, 외부 환경에 따른 전기적 특성 변화는 임피던스 및 공진 주파수의 변화로 나타난다. 센서는 금(Au) 전극을 이용하여 제작하였으며, 캐패시터 영역에 미세플라스틱의 주요 성분 중 하나인 polystyrene (PS) 입자를 도입하여 전기적 특성 변화를 유도하였다. PS 입자는 캐패시터 주변의 유전환경을 변화시켜 정전용량을 변화시키며, 이에 따라 LC 공진회로의 임피던스 및 공진 주파수에 변화를 유도한다. 유선 측정에서는 전기화학적 임피던스 분광법(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)을 이용하여 임피던스 변화를 분석하였으며, 무선 측정에서는 벡터 네트워크 분석기(vector network analyzer, VNA)를 이용하여 LC 공진 특성을 측정하였다. PS 농도에 따른 임피던스 및 공진 특성을 분석한 결과, 미세플라스틱의 농도를 구분하고 정량적으로 분석할 수 있음을 확인하였다

[포면게면2-3 | 10:10]

Opto-Electrical Dual-Input Logic based on Light-Induced Anti-Ambipolar WSe2 Transistor: Jihoon Huh, Moonsang Lee*, Jeongyeol Park, Seung-Ji Lo, Yohan Lee, Narae Lee, Jae Hyun Kim(Inha University, Program in Semiconductor Convergence, Inha University), Su Jin Jo(Inha University)

Keywords: WSe2, Anti-ambipolar, Opto-Electric

While two-dimensional transition-metal dichalcogenides (TMDs) enable compact optoelectronic logic, achieving light-programmable and reconfigurable Boolean functionality within a single transistor remains a significant challenge. Here, we demonstrate a dual-input reconfigurable logic device based on a light-induced anti-ambipolar transition in a back-gated WSe_2 field-effect transistor fabricated from a mechanically exfoliated multilayer flake. At a low drain bias (V_{DS} = 0.001 V), the device exhibits a p-type-dominant transfer characteristic in the dark. Under 638 nm illumination, however, the transfer response evolves into a pronounced anti-ambipolar behavior, featuring a sharp current peak near $V_{GS} \approx 0$ V when the optical power density exceeds a threshold (~3.06 mW cm^{-2}). Peak–valley analysis reveals systematic optical tunability of both the peak position and the peak-to-valley current ratio, enabling a quantitative two-dimensional operating map in the input space defined by optical power density (P) and gate voltage (V_{GS}). Based on this operating map, we assign P (Input 1) and V_{GS} (Input 2) as independent logic inputs and digitize the drain current output through current

thresholding. This approach enables multiple Boolean logic functions (AND, OR, NAND, and NOR) to be implemented within a single transistor by appropriately selecting input coordinates and threshold levels. Finally, time-domain simulations using a PSpice lookup-table device model reproduce the expected logic outputs under pulsed inputs, demonstrating a practical pathway from a measured optoelectronic response surface to circuit-relevant logic operation.

[표면계면2-4 | 10:25]

Atomic-scale analysis of Low Earth Orbit satellite materials exposed to atomic oxygen: Yeon Ha Jo, Aleksander Albrecht, Se-Ho Kim*(Korea Univ.)

Keywords: satellite, atomic oxygen, oxidation, atom probe tomography

Space sustainability investments for Low Earth Orbit (LEO) applications, such as satellites, reached $500M in 2025. Demanding conditions in LEO, that is a wide range of electromagnetic radiation, temperature fluctuations, vacuum pressure, and the presence of high-energy particles, require further development of protection materials for spacecraft. The most degrading among these is atomic oxygen (AO), which occurs in LEO due to the UV-photodissociation of oxygen molecules. Besides its reactivity, it collides with an impact energy of ~4.5 eV. In our study, we implemented an in-house-built LEO simulation instrumentation to comprehensively test materials for LEO spacecraft. The instrument allows for AO exposure of materials at controlled pressure, temperature, and UV irradiation. While the current state of the art focuses on self-healing coatings, we initially focused on model systems, such as Kapton (polyimide) and single crystalline Al, Ag and Ni. These materials were broadly characterized before and after AO exposure using microscopic and spectroscopic methods. Importantly, atom probe tomography (APT) was utilized to study AO degradation due to its ability for 3D atomic mapping with sub-nanometer resolution. This technique allowed for detailed analysis of AO subsurface penetration, segregation, and reactivity. The focus of the research was to establish protocols for measurements of a wide array of AO-resistant materials for future LEO missions.

[표면계면3-1 | 10:50]

온도 제어형 레이저 표면 열처리에 따른 회주철 브레이크 디스크의 미세조직 및 마모 특성: 구본준, 박창규*(서울과학기술대학교)

Keywords: Gray cast iron, Brakes disc, Temperature – controlled laser heat treatment, Surface hardening, Wear resistance

최근 자동차 환경규제가 배기계뿐만 아니라 브레이크 및 타이어 마모에 의해 발생하는 비배기계 입자까지 확대됨에 따라, 비배기계 미세먼지 저감의 중요성이 증가하고 있다. 특히 브레이크 제동 과정에서 발생하는 마모 분진은 마찰재와 디스크의 마찰 및 마모에 의해 생성되므로, 브레이크 디스크의 마모를 억제하기 위한 내마모성 향상 기술이 요구된다. 이를 위해 코팅, 열처리 및 소재 개질 등 다양한 표면처리 기술이 적용되고 있으나, 코팅 공정의 경우 추가 소재 및 공정에 따른 생산비용 증가와 계면 결함 발생 가능성이 있으며, 브레이크의 마찰 특성을 함께 고려해야 하는 한계가 있다. 반면 레이저 표면 열처리는 별도의 코팅 소재 없이 국부적인 급속 가열 및 냉각을 통해 표면 미세조직과 경도를 선택적으로 변화시킬 수 있어, 기존 회주철 디스크의 특성을 유지하면서 내마모성을 향상시킬 수 있는 표면처리 기술로 활용될 수 있다.. 본 연구에서는 회주철 브레이크 디스크의 내마모성 향상을 위해 온도 제어형 레이저 표면 열처리를 적용하고, 열처리 온도에 따른 표면 경화 거동과 마찰·마모 특성의 변화를 비교·분석하였다. 회주철 시편에 레이저를 조사하는 동안 표면 온도를 제어하여 온도 조건별 표면 열처리를 수행하였으며, 처리 온도에 따른 열영향부(HAZ) 및 경화층(hardened layer)의 형성 거동을 비교하였다. 레이저 열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화를 분석하기 위해 표면과 단면의 미세조직을 관찰하여 기지조직 변화 및 경화층 형성 범위를 확인하였으며, 마이크로 비커스 경도 시험을 통해 표면으로부터 깊이 방향에 따른 경도 분포를 측정하였다. 이를 통해 레이저 열처리 온도와 미세조직 변화, 경도 및 경화 깊이 간의 상관관계를 평가하였다. 또한 실제 브레이크의 마찰 접촉 조건을 모사한 Pad-on-disc 마모시험을 수행하여 비처리 회주철과 온도 조건별 레이저 열처리 시편의 마찰계수 및 디스크 마모량을 비교하였다. 이를 통해 레이저 열처리에 의해 형성된 경화조직과 경도 변화가 디스크의 마찰·마모 거동에 미치는 영향을 분석하고, 기존 회주철 대비 마찰 특성과 마모량 저감에 대한 연구를 진행하였다.

[표면계면3-2 | 11:05]

PVD 나노 코팅 브레이크 디스크의 미세구조·화학조성 분석 및 제동/소음 특성 연구: 박종성(현대자동차)

Keywords: PVD 코팅, 브레이크 디스크, 회주철, 편상흑연, 전이막(Transfer film), 토크휠, 스퀼소음

최근 EURO7 등 비배기계(Non-Exhaust) 분진 배출 규제가 강화됨에 따라, 브레이크 마모 분진 저감을 위한 신규 표면처리 코팅 공법 개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 초내마모성 PVD(Physical Vapor Deposition, Atomic-Forged) 표면처리 브레이크 디스크를 대상으로, 코팅층의 미세구조 및 화학조성을 분석하고 다이나모미터 기반 제동·소음 특성을 평가하였다. PVD 코팅층은 410/420계 스테인리스강에 Co가 소량 첨가된 조성으로, 스테인리스강 층과 Cr-rich 산화물 층이 교대로 반복되는 다중 나노층(17층 이상, 총 두께 1~2 um 수준) 구조를 가짐을 확인하였다. 디스크 모재 미세조직은 FC250이였다. 제동 전/후 코팅 표면의 EDS 분석에서 Cr, Co, S 등 마찰재 유래 성분이 증가하는 전이막(Transfer film) 형성 거동이 확인되었다. 다이나모미터 토크휠(Torque Wheel) 및 스퀼(Squeal) 평가 결과, PVD 디스크와 전용 마찰재 조합은 자체 개발기준 대비 마찰계수 수준·변동율 및 스퀼 소음 발생률에서 미흡한 결과를 나타내었다. 특히 Burnish 이후 마찰계수가 급격히 저하하는 경향과 모닝(10 ºC) 및 고온 조건에서의 소음 다발 경향이 관찰되었으며, 이는 코팅층 표면에서의 전이막 형성 거동과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 본 연구는 신규 표면처리 코팅 기술의 제동성능 및 NVH 특성에 미치는 영향을 규명함으로써, 향후 비배기 분진 저감형 브레이크 디스크 개발을 위한 기초 자료를 제공한다.

[포면게면3-3 | 11:20]

고온 열처리 후 절연 특성이 향상되는 규소강판용 무기 절연코팅: 정창우*(현대제철)

Keywords: Si강판, 규소강판, 후처리, 절연코팅, SRA

규소강판은 모터, 발전기 및 변압기와 같은 전력기기의 핵심 소재로 사용되며, 우수한 자기 특성을 확보하기 위해 높은 투자율과 낮은 철손을 요구한다. 특히 고효율 전기기기 적용이 확대됨에 따라 철손 저감과 함께 층간 전류(Interlaminar Current)를 억제하기 위한 표면 절연 특성의 중요성이 더욱 증가하고 있다. 규소강판 표면의 절연코팅은 적층 구조에서 발생하는 와전류를 감소시켜 철손을 저감하고 기기의 에너지 효율을 향상시키는 역할을 수행한다. 고성능 규소강판 제조 공정에서는 자기 특성 회복 및 가공으로 인한 잔류응력 제거를 위해 SRA(Stress Relief Annealing) 열처리가 필수적으로 수행된다. 일반적으로 SRA 열처리는 약 850 ºC 수준에서 진행되며, 이를 통해 가공 중 발생한 변형 및 내부 응력이 제거되어 자기적 성능이 향상된다. 그러나 기존 후처리 절연코팅의 경우 고온 SRA 환경에서 열적 열화가 발생하여 절연 특성이 저하되거나, 코팅층이 단순히 내열성을 유지하는 수준에 머무는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 850 ºC SRA 열처리 조건에서도 안정적으로 유지될 뿐만 아니라, 열처리 이후 절연성이 향상되는 후처리 절연코팅 기술을 연구하였다. 개발된 코팅은 열처리 과정 중 코팅층 내 구조적 변화 및 치밀화 거동을 통해 절연 특성이 개선되도록 설계되었으며, 이를 통해 기존 후처리 코팅의 내열 한계를 극복하고자 하였다. SRA 열처리 전후의 표면 상태 및 절연 특성을 평가한 결과, 개발 코팅은 열처리 이후 절연 저항이 증가하는 특성을 나타내었으며, 이는 고온 공정을 수반하는 규소강판 적용 환경에서 우수한 층간 절연 성능을 제공할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 진행한 절연코팅은 규소강판의 자기 특성 확보를 위한 SRA 열처리 공정과 양립 가능할 뿐만 아니라, 열처리 후 절연 성능 향상을 통해 철손 저감 및 전기기기 효율 향상에 기여할 것으로 기대된다.

[포면게면3-4 | 11:35]

재활용 알루미늄을 활용한 Al-Si 도금강판의 도금특성 및 조업성 영향: 소성민*, 이재민(현대제철연구소)

Keywords: 재활용 알루미늄, Al-Si 도금, 도금성, 조업성

지속가능한 제조에 대한 요구가 증가함에 따라 산업 분야에서 재활용 알루미늄의 활용에 대한 관심이 높아지고 있다. 국제알루미늄협회(IAI)에 따르면, 1차 알루미늄 생산의 탄소발자국은 재활용 알루미늄 생산에 비해 현저히 크다. 1톤의 1차 알루미늄 생산 시 약 15.1톤의 CO_2가 배출되는 반면, 동일한 양의 재활용 알루미늄 생산 시에는 약 0.6톤만이 배출되어 약 96%의 온실가스 배출 저감 효과를 나타낸다. 철강 제조 분야에서 본 연구는 Al-Si 도금 공정에 재활용 알루미늄을 적용할 수 있는 가능성을 검토하였다. 그러나 재활용 알루미늄에 포함된 불순물은 도금 품질 및 생산성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 이에 본 연구에서는 재활용 알루미늄이 Al-Si 도금강판의 도금 특성과 생산성에 미치는 영향을 조사하였다.

[포면게면3-5 | 11:50]

NCM 양극의 경사형 엣지 영역의 펨토초 레이저 클리닝 및 탭 용접 특성 평가: 김민혜, 박창규*(서울과학기술대학교), 조지웅, 김민지(홍익대학교)

Keywords: NCM cathode, Tapered edge region, Femtosecond laser cleaning, Aluminum current collector, Tab welding, Lithium-ion battery

리튬이온배터리 산업의 성장과 함께 고에너지밀도 및 고출력 배터리의 안정적인 제조를 위한 전극 공정의 중요성이 커지고 있다. 리튬이온배터리 양극의 습식 공정에서는 알루미늄 집전체 위에 활물질 슬러리를 코팅한 후 건조 및 압연 공정을 거쳐 전극을 제조하며, 이 과정에서 무지부와 유지부 경계에는 코팅 두께가 점진적으로 감소하는 경사형 코팅 엣지 영역이 형성된다. 이러한 영역은 중앙 코팅부와 비교하여 활물질층의 두께와 활물질 로딩량이 감소하는 비균일한 형상을 나타내므로, 일정한 코팅 경계를 확보하기 위해 엣지 영역의 선택적 제거가 요구된다. 레이저 클리닝은 비접촉 방식으로 국부적인 코팅층을 선택적으로 제거할 수 있으나, 얇은 알루미늄 집전체의 손상과 활물질 잔류를 최소화하기 위한 공정 조건 선정이 중요하다. 또한 제거 후 노출된 알루미늄 집전체를 전류 인출을 위한 탭 용접 영역으로 활용할 수 있으므로, 후속 용접 적용성까지 함께 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 NCM 양극의 경사형 코팅 엣지 영역을 펨토초 레이저로 선택적으로 제거하고, 노출된 알루미늄 집전체의 후속 탭 용접 적용 가능성을 평가하였다. 레이저 공정 조건에 따른 활물질 제거 거동과 집전체 손상 특성을 분석하기 위해 광학현미경(OM)을 이용하여 클리닝 영역의 표면 및 단면 형상을 관찰하였으며, 공초점 현미경을 통해 표면 거칠기와 형상 변화를 분석하였다. 또한 투과전자현미경(TEM)을 이용하여 레이저 처리에 따른 알루미늄 집전체 표면 산화층의 변화를 관찰하였다. 용접성 평가는 레이저 클리닝을 통해 노출된 알루미늄 집전체를 다층으로 적층한 후 알루미늄 리드탭과 레이저 용접하여 수행하였다. 용접 후 용접비드 및 용접부 단면을 분석하여 접합부 형상을 관찰하였으며, 인장 시험을 통해 접합강도를 평가하였다. 또한 용접부의 전기저항을 측정하여 전기적 접합 특성을 분석함으로써 레이저 클리닝된 엣지 영역의 전류 인출부 적용 가능성을 평가하였다.

한국형 수소환원제철 실증기술개발 심포지엄
Room 1층 104호, 10월 28일

[수소환원1-1 | 13:35] 초청강연

한국형 수소환원제철 유동환원로 기술개발 현황 및 계획: 이영석*, 김선영, 윤시경, 김도형, 정승우, 이원희, 김태현, 김진영, 박재훈, 신명균(포스코)

Keywords: 수소환원제철, 수소환원, 직접환원철, 유동환원로

철강은 세계에서 가장 많이 사용되는 소재이지만, 철광석 환원제로 탄소를 사용하는 공정 특성상 전 세계 CO_2 배출량의 약 7~8%를 차지한다. 향후에도 철강 수요가 지속 증가할 것으로 전망되는 만큼, 환원제를 탄소에서 수소로 전환하는 공정 혁신은 철강 산업의 탄소중립을 위한 핵심 과제이다. 이에 세계 주요 철강사와 연구기관은 수소환원제철기술을 개발하고 있으며, 이들 기술개발은 대부분 현재 상용화된 샤프트로(shaft furnace) 기반 직접환원공정을 바탕으로 펠렛(pellet)을 원료로 활용하고, 기존 천연가스 기반 환원가스를 수소로 대체하는 방향으로 추진되고 있다. 펠렛은 별도의 괴성화 및 소성 공정이 필요하여 추가 에너지와 비용이 소요되며, 세계 철광석 물동량의 대부분을 차지하는 분철광석(fine ore)에 비해 수급 유연성이 낮다. 이에 대응하여 한국형 수소환원제철 기술은 분철광석을 직접 사용할 수 있는 수소유동환원로(Hydrogen-Based Fluidized-Bed Reduction Reactor)와 전기용융로(Electric Smelting Furnace)를 연계한 공정을 기반으로 한다. 수소유동환원로에서 수소를 환원제로 사용하여 분철광석으로부터 직접환원철(DRI)을 제조하고 이를 전기용융로에서 용융 및 제련하여 기존 전로 공정에 공급 가능한 쇳물을 제조하는 것이 기본 개념이다. 이를 통해 철광석 원료 수급 유연성을 높이고, 기존 제강공정과의 연계성을 확보하여 생산 가능한 강종의 제약을 완화하고자 한다. 이를 위해 산-학-연 협력으로 수행된 수소 유동환원공정 기초설계 기술개발(2023.7~2025.12)에서는 분철광석의 수소 환원 거동과 반응속도, 유동층 내 입자 거동 및 점착(sticking) 특성을 분석하고, 수소 환원에 수반되는 흡열 반응을 고려한 열·물질수지 해석 등을 수행하였다. 이를 바탕으로 주요 설계 인자를 도출하였으며, 유동환원로 형상, 다단 수소 유동환원 조건, 고환원율 확보를 위한 조업 기술 및 배가스 순환 공정 등을 포함하는 공정 개념을 수립하였다. 이어지는 한국형 수소환원제철 실증기술개발 사업(2026.4~2030.12)은 2단계로 추진된다. 1단계에서는 2028년까지 실증 플랜트의 설계·구축과 시험조업 준비를 수행하고, 2단계에서는 2030년까지 본격적인 실증조업을 통해 연속공정의 성능과 안정성을 검증할 계획이다. 이를 통해 실증 규모 수소유동환원 공정에 대한 통합 운영 및 안정조업 기술을 확보하고, 연속 조업을 통한 공정 및 조업 신뢰성을 검증하여 저탄소 철강공정으로의 전환 기반을 마련하고자 한다. 본 발표에서는 분철광석 기반 수소유동환원 공정의 개발 배경과 특징, 기초설계 기술개발의 주요 결과, 실증기술개발 사업의 추진 방향과 향후 기술개발 계획을 소개하고자 한다.

[수소환원1-2 | 14:00] 초청강연

무탄소 철강공정 실현을 위한 고농도 수소가스의 고온 가열 기술 개발: 이수환, 오현민, 김인호, 오혁진(포항산업과학연구원)

Keywords: Heat transfer, Gas heating, Hydrogen combustion, Hydrogen reduction ironmaking

Carbon-free ironmaking is best represented by hydrogen-based direct reduction (H_2-DRI) processes, also known as hydrogen reduction ironmaking, which require the supply of high-purity hydrogen at approximately 800–900 ºC. Large-scale gas heating for the steel industry has conventionally relied on flame-based combustion, typically using natural gas fired with air. However, this approach generates NOx due to atmospheric nitrogen and contributes to carbon emissions. When applied to the direct heating of hydrogen, it introduces the additional problem of carbon and NOx species contaminating the final heated hydrogen stream—an outcome incompatible with the purity requirements of downstream reduction reactions. To overcome these limitations, a hydrogen combustion-based heating system, in which hydrogen is burned to supply heat to the hydrogen process gas, has been under development. To evaluate this concept, a pilot facility was constructed and operated with the goal of heating a total flow of 100 Nm^3/h of hydrogen to above 800 ºC. The hydrogen-containing feed gas, prepared by blending hydrogen and nitrogen at a fixed ratio, was heated by passing through radiant-section and convection-section heat transfer tubes, both of which were heated by a hydrogen burner. Using this setup, combustion tests were conducted under varying oxidant conditions to determine whether the 800 ºC target could be achieved. When air was used as the sole oxidant, the target outlet temperature could not be reached; the target was attained only after supplying approximately 6.6% additional fuel. Increasing the oxygen enrichment of the oxidant beyond 30% improved overall heat transfer efficiency and allowed the target temperature to be reached at the intended heat input; however, this configuration resulted in excessive NOx generation exceeding 300 ppm. Taken together, these results indicate that combustion of hydrogen with pure oxygen, rather than air or oxygen-enriched air, is fundamentally required to simultaneously satisfy the thermal target and the emission constraints of the system. This finding establishes hydrogen–oxygen (H_2/O_2) combustion as the technical basis for a heating solution capable of delivering clean, high-temperature hydrogen without nitrogen- or carbon-derived contamination, supporting the broader goal of realizing a carbon-free ironmaking process.

[수소환원1-3 | 14:25] 초청강연

Surrogate-assisted integrated process simulation and economic assessment of multistage fluidized-bed hydrogen-based ironmaking: Min Cheol Bae*, Sang Hwan Son(Pusan National University)

Keywords: Hydrogen-based ironmaking, Multi-stage fluidized bed reactor, Surrogate model, Process integration

An integrated process simulation framework was developed for a hydrogen-based direct reduced iron (H2-DRI) process employing

multi-stage fluidized bed reactors (MFBRs). A physics-based MFBR model was replaced by a neural-network surrogate and coupled with Aspen Plus, enabling system-level simulation of gas recirculation, hydrogen recovery, heat recovery, compression, and heating. Sensitivity analysis showed that the recycle split ratio governs a trade-off between reduction performance and hydrogen utilization: stronger purification suppresses nitrogen accumulation and improves reducing-gas quality, but increases hydrogen loss and energy demand. An intermediate split ratio was therefore identified as a balanced operating condition. Economic analysis showed that the competitiveness of the proposed H2-DRI route relative to conventional ironmaking strongly depends on green hydrogen price and carbon pricing. The framework provides a practical approach for integrating rigorous reactor models with process simulators and assessing hydrogen-based ironmaking.

[수소환원 1-4 | 14:50] 조청강연

한국형 수소환원제철 전기용융로 기술개발 현황 및 계획: 박상채*, 이상범, 이상동, 강동수, 최진석, 김민경, 남준현, 김종명, 박재훈, 신명균(포스코)

Keywords: 수소환원제철, 전기용융로, 탄소중립, 기초설계, 공정실증

세계는 현재 탄소중립 이행이라는 공동의 목표 달성을 위해 총력을 기울이고 있으며, 이는 국제사회의 미래 정책과 산업·기술 혁신의 주요 의제로 작동하고 있다. 특히, 철강산업은 대표적인 온실가스 다배출 산업으로, 탄소중립 달성을 위해 기존 고로–전로 중심의 생산 체계에서 저탄소·수소 기반 공정으로의 전환이 요구되며, 수소를 환원제로 활용하는 수소환원제철은 철강산업의 탄소배출을 근본적으로 저감할 수 있는 핵심 기술로, 전 세계적으로 다양한 공정 및 기술 개발이 진행되고 있다. 한국형 수소환원제철은 국내 철광석 수급 여건과 자동차 외판재 등 고급강 생산 요구를 고려한, 분철광석을 수소로 환원하는 수소유동환원로 공정(Hydrogen-Based Fluidized-Bed Reduction Reactor, HBR)과 수소환원철을 용융·정련하여 고품질 쇳물을 생산하는 전기용융로 공정(Electric Smelting Furnace, ESF)을 결합한 기술이다. 정부는 이를 신성장·원천기술 및 국가전략기술로 지정하였으며, 산업부는 '탄소중립산업핵심기술개발사업'을 통해 분철광석 기반 수소유동환원로와 전기용융로의 기초설계 및 핵심 기술개발(~'25)을 지원하였고, 후속 '한국형수소환원제철실증사업'을 통해 전기용융로 실증장비 구축(~'28)과 공정기술 실증(~'30)도 지원하고 있다. 본 발표에서는 산·학·연 협력으로 수행된, 수소환원철 용해·정련용 전기용융로 공정의 기초설계 기술개발 결과 및 전기용융로 실증사업의 추진 방향과 향후 기술개발 계획을 소개하고자 한다.

[수소환원 1-5 | 15:15] 조청강연

전기용융로 전력제어 기술개발 현황 및 계획: 한무호, 김아롱, 서용(포항산업과학연구원), 김종명(포스코 기술연구원), 석진한(포스코 HyREX 추진반)

Keywords: 전기용융로, 임피던스 제어, 침지모드, 아크모드, 전력제어

전기용융로를 이용하여 고환원율의 수소 환원철을 용해시키기 위해서는 전극봉 끝단부가 슬래그에 침지되어 운전하면서 이때 발생하는 저항열을 이용하는 침지방식과 전극봉의 끝단부가 슬래그 탕면에서 이격되어 짧은 아크를 발생하며 이때 발생하는 아크 열을 이용하는 아크 방식이 있다. 특히 아크 방식의 경우 전극봉 주위로 고전도성의 원료투입 시 전기부하 급변에 의한 영향을 최소화하고 안정적인 전력을 투입하기 위한 임피던스 제어 기반의 전력제어가 필요하다. 임피던스 제어의 경우 임피던스 안정 영역을 설정하고 벗어나는 정도에 따라서 전극봉의 이동 거리 및 제어 주기를 변경하도록 하는 밴드 제어 알고리즘을 개발하였다. 전력제어의 경우 임피던스 제어 기반하에 설정 전력 추종위하여 전기로 변압기 탭을 연계 제어되도록 알고리즘을 개발하였다. 또한 실시간으로 전극봉에 투입되는 전압과 전류를 실측하여 전기로 투입 전력의 운전 상태를 분석하여 효율을 진단하고 고효율 운전 가능하도록 하는 가이던스 알고리즘을 개발하여 전력제어 시스템과 연계하였다. 개발한 전기 등가 부하 모델, 전력제어 모델 및 가이던스 모델의 성능을 검증하기 위하여 시뮬레이터를 개발하고 이를 활용하여 검증 완료하였다. 개발된 전력제어 알고리즘을 적용한 전력제어 시스템을 1ton/hr Pilot Plant에 다수 적용하여 성능을 검증하였다. 본 발표에서는 개발 전력제어 시스템의 시뮬레이터 및 Pilot Plant 조업을 통한 검증 결과 및 이를 활용한 향후 Demo Plant용 전력제어 기술개발 계획을 설명하고자 한다.

[수소환원 2-1 | 15:55] 조청강연

Development for Nondestructive Estimation of Residual Refractory Thickness: Sung-Yong Kim*, Jun-Jae Lim, Sang-Joon Lee(Changwon National University)

Keywords: Acousto-ultrasonic echo, electric smelting furnace, residual refractory thickness, temperature correction factor, automated measurement impactor

For the stable operation of industrial furnaces and effective management of refractory service life, nondestructive diagnostic techniques capable of continuously evaluating the remaining thickness of refractory linings during high-temperature operation are required. The objective of this study is to develop an automated impact and response measurement device for impact-echo-based estimation of refractory remaining thickness and to estimate the remaining thickness by combining time-frequency analysis with a correction procedure that accounts for the longitudinal wave velocity and temperature distribution of the refractory material. The developed automated impactor was subjected to field trials at the SNNC EF1 and HyREX Pilot facilities, and was confirmed to operate normally for three days at SNNC EF1 and for 17 days at the HyREX Pilot, where the maximum steel-shell surface temperature reached 246 °C. The geometry of the refractory lining was measured before and after operation using LiDAR, a laser-based three-dimensional measurement system, and the results were compared with those estimated from the field AU-E measurement signals. Through this comparison, it was confirmed that the actual measured values and the estimates obtained through the impact-echo method generally agree well.

[수소환원2-2 | 16:20] 조청강연

EAF Waste Heat Utilization Technology for the Application of Hydrogen-Reduced New Raw Materials: Jong Oh Jo(Hyundai Steel)

Keywords: Hydrogen-Reduced Iron (H-DRI), Hydrogen-Reduced Cold Pig Iron, EAF, Waste Heat Recovery, Continuous Charging Technology

Domestic electric arc furnace (EAF) steelmakers are expanding the utilization of hydrogen-reduced iron (H-DRI) and hydrogen-reduced cold pig iron as alternative metallic iron unit replacing high-grade scrap in pursuit of carbon neutrality. While these materials offer significant potential for reducing carbon emissions in the production of reinforcing bars, structural steel, and specialty steels, their application may result in operational challenges, including reduced EAF efficiency, lower productivity, and deteriorated economic performance compared with conventional scrap-based operations. Therefore, the development of high-efficiency, high-speed melting technologies based on both equipment and process innovations is required to minimize these risks. This research project focuses on several key areas to address process-related challenges associated with the use of hydrogen-reduced iron, including the development of hydrogen-reduced iron-based feedstock products, the evaluation of process characteristics according to charging methods for hydrogen-reduced iron and hydrogen-reduced cold pig iron, and the development of advanced EAF control technologies. Among these research areas, this presentation focuses on continuous charging EAF technologies utilizing waste heat to enable the stable charging and high-efficiency melting of hydrogen-reduced iron and hydrogen-reduced cold pig iron. In particular, commercially available technologies and recent developments related to hot scrap charging and hot direct charging of direct reduced iron (DRI) and hot briquetted iron (HBI) will be reviewed. Furthermore, operational optimization strategies for EAF steelmaking will be proposed to facilitate the proactive assessment and mitigation of potential process-related risks associated with the future adoption of hydrogen-reduced iron and hydrogen-reduced cold pig iron.

[수소환원2-3 | 16:45] 조청강연

수소환원철용 전기로의 특성과 내화재연구: 정용석*, 명재우, 장태훈, 김기원, 이지혁, 하주영(한국공학대학교)

Keywords: 전기로, 전기용융로, 고속용해, 고내식 고강도 내화재료

철강 산업의 탄소중립 실현을 위한 수소환원철(HyREX) 용강 제조 공정은 크게 두 가지로 구분된다. 하나는 수소환원철을 전기용융로(Electric Smelting Furnace, ESF)에서 용융하는 방식이며, 다른 하나는 수소환원철 용선 및 냉선을 전기로(Electric Arc Furnace, EAF)에서 용해하는 방식이다. 두 공법 모두 기존 스크랩 용해용 전기로 대비 수소환원철을 효율적으로 용융해야 하는데, 수소환원철에 포함된 맥석(Gangue) 성분은 스크랩에 비해 용해가 어려워 요구되는 전력 에너지와 교반 에너지가 더 높은 것으로 알려져 있다. 이에 따라 전기로 조업에서는 기존 설비 대비 교반력을 강화하기 위해 전자기 교반(Electromagnetic Stirring, EMS)이나 저취교반법(Bottom Gas Stirring) 등이 도입되고 있다. 이러한 교반 방식은 용강 온도의 균일화와 원료의 신속한 용해·반응 촉진에는 유리하지만, 동시에 내화물 부식을 가속화하는 문제를 동반한다. 본 발표에서는 널리 사용되는 MgO-C계 내화물의 강도 및 내부식성 향상 연구 결과를 소개하고, 특히 저취용 Plug로 적용될 경우 용강 및 가스 유동에 의한 MgO-C 내화물의 부식 기구를 제시하고자 한다. 또한, 전기로 조건의 산소분압 조건에서 온도에 따른 MgO-C의 산화안정성에 대해서도 논의하고자 한다. 한편, 앞서 언급한 두 전기로 공정은 생산성 확보를 위해 수소환원철을 연속적으로 용융하는 연속 조업 방식을 채택해야 한다. 이 경우 내화재의 교체 및 보수가 제한적이므로, 내화재 부식을 억제하기 위한 프리징 라이닝(Freezing Lining) 기법 등의 적용이 요구된다. 본 발표에서는 현대제철 시험 전기로에 프리징 라이닝을 적용하기 위한 전산모사 모델을 제시한다. Fluent 전산모사를 통해 에너지 손실을 최소화하면서도 안정적인 슬래그 응고층을 형성할 수 있는 최적의 열유속 조건을 도출하고자 한다.

[수소환원2-4 | 17:10] 조청강연

Thermodynamic and Experimental Investigations of HBI Melting Behaviors in EAF Steelmaking Conditions for Mitigation of CO2 Emissions: Minjoo Lee, Joo Hyun Park*(Hanyang University)

Keywords: HBI, EAF, Melting, Gangue oxide, Intrinsic carbon

The global steel industry is currently facing a critical mandate to develop CO2 reduction technologies to mitigate environmental impacts. Consequently, the transition from BF-BOF route to EAF steelmaking route is accelerating. However, the production of high-quality steel via EAF is increasingly challenged by the growing demand and scarcity of high-grade steel scrap, alongside the accumulation of tramp elements in recycled materials. To address these feedstock limitations, Direct Reduced Iron (DRI) and Hot Briquetted Iron (HBI) have been widely adopted as clean alternative iron sources. Despite their industrial importance, the detailed internal melting mechanisms and phase evolution of HBI under complex EAF conditions remain largely unexplored. In this lecture, a comprehensive investigation into the melting behavior of commercial HBI will be discussed to provide a precise description of its reaction mechanisms. In particular, computational thermodynamic predictions of HBI behavior within the EAF will be highlighted. Moreover, in parallel with thermodynamic modeling, experimental aspects of actual high-temperature melting phenomena—such as the interplay between intrinsic carbon and gangue oxides, liquid slag exudation, and phase separation—will be presented. By comparing the theoretical predictions with microstructural observations, this study aims to provide vital insights for optimizing sustainable EAF operations.

철강A-제선, 제강, 환경, 에너지
Room 1층 102호, 10월 28일

[철강A1-1 | 08:30]
유동층 반응기 내 분철광석의 암모니아 직접환원 특성 및 수소환원과의 비교 평가: 민성구(한국에너지기술연구원, 서울시립대학교), 박성진, 김경민, 임호태(한국에너지기술연구원), 서명원*(서울시립대학교), 문태영*(한국에너지기술연구원, 과학기술연합대학원대학교)
Keywords: Bubbling Fluidized bed, low-carbon steelmaking, Direct reduced iron, ammonia

철강산업의 탄소중립 실현을 위해 수소환원제철이 추진되고 있으나, 그린 수소의 높은 단가와 운송 한계가 상용화의 걸림돌로 지목된다. 이에 암모니아가 수소 캐리어로 도입되어 크래킹 공정을 통해 수소를 활용하는 것이 대안이 될 수 있지만, 암모니아를 직접 환원제로 활용 시 크래킹 공정을 생략할 수 있어 경제성을 확보할 수 있다. 하지만 유동층 반응기 내의 암모니아 직접 환원에 관한 연구는 부족한 상황으로 기초 반응 거동 규명이 필요하다. 본 연구는 실험실 규모 유동층 반응기에서 분철광석의 암모니아, 수소, 수소/질소 혼합가스 직접환원 특성을 비교 평가하였다. 환원반응 중 유동층 반응기 내 온도 및 압력 거동을 실시간으로 분석하였으며, 직접 환원철(DRI) 물리화학적 분석을 진행하였다. 주요 분석으로는 XRD 단계적 상변화, SEM 미세기공 형성, TEM-EDS 내부 원소 분포 특성을 검증하였다. 본 결과는 유동층 내 암모니아 직접환원 공정의 기술적 가능성을 제시한다.

[철강A1-2 | 08:45]
유동환원로 실시간 조업 모니터링을 위한 딥러닝 기반 압력장 활용 유동장 복원 연구: 진봉민, 양현진*(인하대학교)
Keywords: U-Net, Eulerian-Eulerian Two Fluid Model, 유동 구조, 물리장

FINEX 및 HyREX에 적용되는 유동환원로는 극한의 조업조건으로 인해 온도와 압력 등 제한된 정보를 이용하여 간접적으로 조업을 모니터링하게 된다. 이를 보안하기 위해 보편적으로 물리기반의 시뮬레이션 기법들 (예: 전산유체역학, CFD)이 널리 활용되어 왔으나 유동층 모사에 소요되는 컴퓨팅 부하가 매우 높아 이러한 모델을 실시간 모니터링에 직접 활용하기에는 한계가 존재하였다. 반면CFD 데이터를 학습한CNN기반 딥러닝 모델들(예: U-net) 을 이용하여 제한된 측정 데이터로부터 내부 유동장을 빠르게 복원하는 다양한 연구가 최근 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 주어진 압력장을 통해 기포 유동층의 유동 구조를 실시간으로 추론할 수 있는 U-net 기반의 방법론 (Pressure-guided Cross-Modality Reconstruction, PCMR)을 제안하고자 한다. Eulerian–Eulerian Two-Fluid Model을 이용하여 생성한 CFD 데이터를 기반으로 U-Net 기반 딥러닝 모델을 학습 후 임의의 압력장이 주어졌을 때 고체 분율과 속도장을 복원하도록 구축하였다. 여러 공탑속도 조건을 이용하여 모델을 학습 후, 학습 범위 내의 내삽 조건과 학습 범위를 벗어난 외삽 조건에서 복원 성능을 평가하였다. PCMR의 복원 성능 평가 결과, 추론된 유동층 고체 분율과 속도장에 대한 평균 제곱근 오차는 각각 0.04와 0.164 m/s로 나타났다. 복원된 고체 분율은 기체–고체 접촉과 반응 특성에 영향을 미치는 기포의 형상과 공간적 분포를 정교하게 재현할 수 있었으며, 기체와 고체의 속도장 분포 또한 재현이 가능함을 확인하였다. PCMR은 압력장이 주어졌을 때 8.1ms 내에 주요 물리장을 복원할 수 있었으며, 이를 통해 적절한 해상도의 압력장이 주어진다면 직접 관측하기 어려운 유동층의 유동 구조를 실시간으로 추론할 수 있음을 확인하였다. 향후 제한된 측정 압력 정보로부터 유동층 내 압력장을 구축하는 기술과 결합된다면, 유동환원로 내부의 조업 상태를 실시간으로 모니터링하는 시스템으로 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

[철강A1-3 | 09:00]
Effects of Highly Reactive Green Pellets on Liquid-Phase Formation and Sinter Quality during Low-Grade Iron Ore Sintering: Jungyu Kim, Sungmo Jung*(GIFT, POSTECH), Sungwan Kim(POSCO), Ahmad Raza Javed(GIFT, POSTECH)
Keywords: Sintering, Green Pellet, Low-grade iron ore, Liquid-phase formation, Assimilation behavior

With increasing demands for sustainability in the ironmaking industry and the depletion of high-grade iron ore resources, the utilization of low-grade iron ores in the sintering process has become increasingly important. However, low-grade ores can deteriorate sinter quality due to their low reactivity, which limits liquid-phase formation and bonding phase development. In this study, a highly reactive Green Pellet (GP) was developed using iron-bearing by-products and fine iron ores and applied to increase the utilization of low-grade iron ores. To determine the optimal GP composition, pellets with different basicities (B2 = 1.37~3.00) were evaluated in terms of assimilation behavior, high-temperature characteristics, and thermodynamic phase formation. The results showed that B2 = 2.00 improved assimilation and promoted the formation of Ca–Fe–Al-based calcium ferrite (CFA) bonding phases at lower temperatures. In contrast, excessive basicity increased C2S formation and melt viscosity, limiting further improvements in reactivity. Therefore, B2 = 2.00 was selected as the optimal GP composition. The selected GP was applied to sintered specimens in which the proportion of low-grade iron ore was increased from 15% to 30%. The addition of 5% GP improved compressive strength under all blending conditions, with a greater improvement at higher proportions of low-grade ore. GP addition also reduced coarse pores and refined the pore structure, accompanied by a decrease in magnetite and an increase in SFCA-based bonding phases. In addition, the deterioration in reduction degradation behavior (RDI) associated with increased low-grade ore utilization was mitigated. These results demonstrate that highly reactive Green Pellets can compensate for the low reactivity of low-grade iron ores by promoting liquid-phase formation and bonding phase development, thereby improving sinter quality and enabling increased utilization of low-grade iron ores.

[철강A1-4 | 09:15]
수소 가스의 주입이 고로 슬래그와 코크스 간의 젖음 거동에 미치는 영향: 신현우(동아대학교 금속공학과), 강영조*(동아대학교 신소재공학과)
Keywords: Wettability, Slag/Coke, Blast furnace Slag, Hydrogen Atmosphere

최근 철강 공정 중 탄소 배출 저감에 대한 요구가 증가함에 따라, 철강 공정에서 기존 탄소 기반 제선 공정을 대체하거나 보완하기 위한 저탄소 공정 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 고로 내 환원가스의 일부분을 수소로 대체하는 함수소 조업은 고로 내 코크스의 투입량을 감소시킬 수 있으며, 이로 인해 CO2 배출을 줄일 수 있는 방안으로 주목받고 있다. 그러나 수소 주입에 따른 고로 내부 분위기의 변화는 철광석의 환원 거동뿐만 아니라 고로 슬래그와 코크스 간의 젖음 거동에도 영향을 미칠 수 있다. 고로 슬래그와 코크스 간의 젖음 거동은 고로 하부의 가스 투과성과 안정적이고 효율적인 조업에 영향을 미치므로 함수소 분위기에서의 젖음 거동 변화를 확인할 필요가 있다. 본 연구에서는 함수소 분위기에서 합성 CaO-SiO2-Al2O3-MgO-FeO 5원계 슬래그와 코크스 간의 접촉각을 측정하였다. 실험은 1500 ℃에서 진행되었으며, N2-(5, 10, 30%)H2의 혼합 분위기에서 시간에 따른 접촉각 변화를 관찰하였다. 실험 결과 수소의 함량이 30%로 증가함에 따라 접촉각의 감소가 빠르게 진행되어 슬래그와 코크스 간의 젖음성이 촉진되었다. 또한 각 함수소 분위기에서 코크스에 대한 XRD 분석 결과 수소 함량 30%에서 SiC Peak Intensity가 더 높게 관찰되었으며, 이는 수소 함량의 증가가 SiC의 형성이 촉진되었을 가능성을 시사한다. 슬래그의 겉보기 부피 변화를 이용하여 슬래그/코크스 젖음 거동을 Stable, Spreading, Penetration의 세 단계로 구분하였다. Stable Step은 뚜렷한 형상 변화가 없는 단계, Spreading Step은 코크스 표면에서의 퍼짐 단계, Penetration Step은 코크스 내부로 침투가 진행되는 단계로 정의하였다. 젖음 거동 단계는 5% 및 10%H2에서 각 단계의 전이 시점이 유사한 반면, 30%H2에서는 Stable Step이 단축되고 별도의 Spreading Step없이 Penetration이 진행되었다. 이러한 결과는 수소 함량의 증가가 슬래그와 코크스 간의 계면반응 및 젖음 거동을 가속화하며, 특히 높은 수소 함량에서는 슬래그의 코크스 내부 침투가 상대적으로 빠르게 진행될 수 있음을 시사한다. 따라서 함수소 조업에서 수소 함량에 따른 슬래그와 코크스 간의 젖음 거동 변화는 고로 하부에서의 용융 슬래그 유동 및 가스 투과성에 미칠 수 있는 중요한 인자로 판단된다.

[철강A1-5 | 09:30]
용융 철 촉매 기반 메탄 열분해를 통한 청록수소와 결정성 탄소 생성 연구: 위태규, 강우석, 이찬준(포항공과대학교), 박영준(델프트 공과대학교), 이은도(한국생산기술연구원), 조창신, 강윤배*(포항공과대학교)
Keywords: 청록수소, 메탄 열분해, 용융 금속 촉매, 열분해 탄소, LIB 음극재

용융 금속을 활용한 메탄 열분해 공정은 코킹에 의한 촉매 비활성화를 방지할 수 있어 청록수소 생산에 유리하나, 공정 경제성 확보를 위해서는 고활성·저원가 촉매 및 고부가 열분해 탄소 생산 기술 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 저원가 철(Fe) 기반 용융 금속 촉매가 기존의 저융점-활성 금속 촉매 대비 월등히 우수한 메탄 열분해 활성을 나타냄을 확인하였다. 이는 철 성분 자체가 용융 금속 표면에서 반응 활성점으로 직접 작용하기 때문으로 규명되었다. 특히, 본 용융 철 시스템에서는 '동적 촉매적 흑연화' 메커니즘을 통해 일반적인 비철 금속 촉매와 차별화되는 고결정성의 흑연성 탄소가 생성된다. 1000 ℃ 연속 공정에서 수거된 열분해 탄소를 리튬이온배터리(LIB) 음극재로 평가한 결과, 일반적인 비정질 계열의 열분해 탄소와 달리 뚜렷한 리튬 이온 층간 삽입(Intercalation) 단계(Staging) 거동과 높은 가역 용량 등 고결정성 흑연 특유의 전기화학적 특성을 명확히 나타내었다. 또한, 단축된 리튬 이온 확산 경로 덕분에 뛰어난 고율 방전(High-rate) 특성을 보여주었으며, 향후 입자 구상화 및 비정질 탄소 코팅 등 상용 음극재 수준의 후처리 공정을 도입한다면 고부가 배터리 소재로서의 잠재력이 기대된다.

[철강A1-6 | 09:45]
용융금속 촉매 기반 청록수소 공정 중 메탄열분해 역반응의 속도론적 분석 및 잔류탄소 결정성 분포에 미칠 수 있는 영향: 이찬준, 위태규, 강윤배*(포항공과대학교)
Keywords: 청록수소, 메탄열분해, 역반응

용융금속 촉매 기반 메탄열분해는 CO_2-free 수소생산과 함께, 비정질-결정질로 분포하는 생성탄소의 결정성 제어를 통한 경제성 확보가 가능한 유망한 기술로, 공정 거동 예측을 위한 공정 모델 연구가 진행되어 왔다. 그러나 기존 모델은 잔류탄소의 결정성을 다루지 않았고, 메탄열분해 중 축적된 수소와 탄소로 촉진되는 역반응(메탄화)속도를 평형상수와 정반응속도로 산정했으나 실험적 검증이 부족했다. 본 연구에서는 이를 실험적으로 검증하고, 비정질 탄소의 선택적 메탄화가 잔류탄소 결정성 분포에 미칠 수 있는 영향을 확인하기 위해 반응기 내 용존 및 고상(결정질·비결정질)탄소의 메탄화를 모사하였다. 용존탄소의 반응속도는 전자기유도 부양용해로에서 용융금속 시료 내 탄소의 메탄화를 유도하고, 배가스의 메탄농도를 측정하여 결정하였다. 결정질·비결정질 고상탄소의 반응속도는 모사체인 인조흑연·활성탄을 저항가열로에서 수소와 개별 및 혼합조건으로 반응시킨 후 질량감소로 결정하였다. 그 결과 용존탄소의 메탄화속도는 수소농도의 2차, 탄소활동도의1차 의존성을 보이며 평형상수 기반 계산 예측과 부합하였으며, 활성탄은 인조흑연 대비 빠르게 소모되었고 혼합조건에서 선택적으로 제거되었다. 이 결과를 바탕으로 결정성별 고상탄소 메탄화속도를 반영한 반응기 모델로 잔류탄소의 결정질·비결정질 분율 변화를 추정하였다.

[철강A2-1 | 10:10]
분철광석의 수소환원 하 부원료의 도입 가능성 연구: 김성진, SEMEN IURCHENKOV, 정성모*(포항공과대학교)
Keywords: 수소환원, 분철광석, 부원료, 동역학분석

친환경적 제선 공법의 연구 및 개발의 중요성이 높아지고 있는 현 시대에서 수소 환원을 기반으로 한 제선 공법은 수소의 높은 환원력을 바탕으로 유망한 연구 분야로 주목받고 있다. 그럼에도 수소 환원은 기존의 발열 반응 중심의 CO 기반 제선 공법과 달리

흡열 반응으로 인한 열손실 및 저온분화 거동 상승 등 현업 적용에는 다양한 장벽을 마주하고 있다. 이를 유동 환원 제철 공법의 관점에서 확대해보면 환원철의 높은 환원율을 기대할 수 있음에 반해 계면 에너지가 높은 환원철 입자간의 sticking 현상의 발생 가능성이 남아있고, 제거되지 못한 맥석 성분은 ESF 등의 후공정 내 슬래그 분리에 있어 막대한 부담을 가할 수 있다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 분철광석과 부원료(석회석, 백운석)를 배합하여 다수의 실험을 통해 수소 유동 환원 공정 내 부원료의 장입 가능성을 검토하였다, 금년도에는 DSC 열분석 및 TGA 환원 실험을 통해 부원료 배합 시 분철광석의 다단 환원 거동 변화를 관찰하였으며, cold model test로 분철광석-부원료 배합의 유동 및 분화 거동을 수치화하였다

[철강A2-2 | 10:25]

Prospective Life Cycle Assessment of Hydrogen-Based Steelmaking: Jieun Ryu, Yeongrae Cho, Minho Kim, Seungyeon Lee, Il Sohn*(Yonsei Univ.)

Keywords: Hydrogen-based steelmaking, Process coupling, Prospective life cycle assessment, Uncertainty analysis, Robust decision-making

The transition from conventional blast furnace-based hot metal steelmaking to hydrogen-based direct reduced iron steelmaking is being promoted as a pathway toward carbon neutrality. However, assessing the environmental and economic benefits of this transition remains challenging because hydrogen-based steelmaking has limited industrial operating data and its performance is strongly influenced by country- and the prospective year-specific electricity and hydrogen supply conditions as well as feedstock characteristics. Consequently, considerable uncertainty remains in life cycle assessment (LCA) and techno-economic assessment (TEA) results. In this study, the raw material-beneficiation-reduction-melting processes were integrated based on mass balances and thermodynamic relationships, and an LCA framework was developed in which the material and energy inputs and outputs of each process vary with operating conditions. This framework was then used to evaluate how uncertainty affects process decision-making. Uncertainty in parameters such as H_2 utilization and electrical efficiency was propagated through the process model using Monte Carlo simulation, and Shapley effects were used to identify the major contributors to uncertainty in CO_2 emissions, cost, and resource use. In addition, operational feasibility and Pareto optimality were repeatedly evaluated for each Monte Carlo sample to identify robust operating regions under uncertainty. Finally, feasibility and Pareto status were defined as decision-related targets, and target Shapley effects were applied to compare the variables contributing most strongly to output uncertainty with those affecting the robustness of process selection. Through this approach, a decision-aware prospective LCA framework was proposed to distinguish uncertainty in environmental, economic, and resource-use indicators from uncertainty in process selection arising from multi-objective optimization. The framework therefore provides a basis for prioritizing further data collection and model refinement to reduce decision-relevant uncertainty in hydrogen-based steelmaking.

[철강A2-3 | 10:40]

BOF용 고강도 MgO-C 내화물: 김기원, 이지혁, 황지원, 정용석*(한국공학대학교)

Keywords: MgO-C 내화재, 금속 산화방지제, 탈탄, CO-rich 분위기, 기계적 특성

MgO-C 내화물은 제강 공정에서 널리 사용되며, 고온에서 탄소의 산화에 의해 기공 구조가 변화하고 기계적 강도가 저하될 수 있다. 특히 최근 스크랩 사용량 증가에 따른 조업 조건 변화로 인해 전로 내 스크랩 장입량이 증가하면서 내화물과의 직접적인 물리적 접촉 및 교반이 강화되고, 이에 따라 내화물의 물리적 마모 및 구조적 파괴 가능성이 커지고 있다. 또한 스크랩을 용해시키기 위한 로 내 온도 상승으로 인해 고온 산화 환경이 형성되며, 이로 인해 탄소의 산화 저항성과 고온에서의 기계적 강도 유지 특성이 더욱 중요하게 요구되고 있다. 본 연구에서는 BOF 조업 환경을 단순화한 CO-rich 분위기에서 금속 단일 산화방지제의 종류 및 첨가량이 MgO-C 내화물의 탈탄 및 기계적 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 1100, 1300 및 1500 ºC에서 열처리한 후 질량변화, 기공률 및 압축강도를 측정하여 온도 및 첨가 조건에 따른 탄소 손실 억제와 강도 변화의 상관관계를 분석하였다. 금속 산화방지제의 첨가는 무첨가 시편 대비 질량감소 및 기공률을 감소시키고 압축강도를 향상시키는 경향을 나타냈다. 그러나 동일한 질량감소 수준에서도 기공 구조 및 압축강도 변화는 산화방지제 종류 및 첨가량에 따라 상이하게 나타나, 단순한 탄소 손실 억제 효과뿐만 아니라 미세구조 변화까지 함께 고려해야 함을 확인하였다. 이를 통해 BOF용 고강도 MgO-C 내화물 설계를 위한 금속 산화방지제의 역할과 최적화 방향을 고찰하였다.

[철강A2-4 | 10:55]

Investigation for the MgO saturation in the CaO-FeO-SiO_2 EAF slag system: Dahee Gwak, Marie-Aline Van Ende, In-Ho Jung*(Seoul National University)

Keywords: EAF slag, MgO refractory, Phase equilibria

The CaO-MgO-FeO-SiO_2 system is one of the most fundamental oxide systems in pyrometallurgy and refractory applications. In particular, MgO-based refractories are widely used in steelmaking, and EAF furnace slag is mainly composed of CaO-FeO-SiO_2, the solubility limit of MgO in CaO-FeO-SiO_2 slag is very important for EAF operation. In the present study, MgO saturation slag composition in the CaO-MgO-FeO-SiO_2 system was experimentally studied. For the experiments, Fe crucible and MgO crucible containing Fe were used for 1600 ºC for the equilibrium experiments. The resultant slag was analyzed using Electron Probe MicroAnalysis (EPMA) to accurate determine liquid composition. The present experimental results were compared with literature data and FactSage calculations.

[철강A2-5 | 11:10]

$CaO–Al_2O_3–MgO$ 슬래그 중 몰리브덴의 산소분압 의존 용해거동과 이를 통한 실수율 지배 인자 고찰: 김영근, 위태규, 강윤배*(포항공과대학교)

Keywords: Mo, 몰리브덴, 실수율

몰리브덴(Mo)은 고부가 특수강의 내식성과 고온강도를 좌우하는 핵심 합금원소이나, 페로몰리브덴·산화물·황화물 등 투입 원료의 형태에 따라 실수율 편차가 크게 나타나며 그 근본 원인은 명확히 규명되지 않았다. Mo 손실 경로는 크게 슬래그로의 용해와 기상으로의 휘발로 나뉘는데, 두 경로의 상대적 기여를 정량적으로 구분하기 위해서는 넓은 산소분압 범위에 걸친 슬래그–메탈 간 Mo 용해 거동의 열역학적 이해가 선행되어야 한다. 그러나 기존 연구는 대부분 동제련 등 산화성 분위기에 국한되어, 제강 정련이 이루어지는 강환원 영역과 두 영역 사이의 전이 거동은 다루어지지 않았다. 본 연구에서는 저산소분압 조건에서 성분 변동이 억제되는 $CaO–Al_2O_3–MgO$ 슬래그계를 선정하고, 순수 Mo 도가니와 슬래그를 평형시켜 산소분압 10^{-20}~$10^{-8.5}$ atm의 넓은 범위에서 Mo 용해 거동을 폭넓게 조사하였다. 산소분압 및 염기도 의존성으로부터 용해 반응의 화학량론을 결정하고, 이로부터 겉보기 평형상수와 슬래그–메탈 분배비를 열역학적으로 도출한 뒤 별도의 평형실험으로 검증하였다. 그 결과 Mo 용해도는 특정 산소분압에 대해 최소점을 갖는 거동을 나타내었으며, 강환원 영역과 산화 영역에서 각각 상이한 화학량론의 용해 반응이 지배함을 확인하였다. 서로 다른 변수를 제어한 두 독립 실험에서 도출한 평형상수가 상호 일치함으로써 제안된 용해 반응식의 타당성이 뒷받침되었다. 특히 열역학적으로 예측한 분배비는 정련 조건에 해당하는 강환원 영역에서 슬래그로의 Mo 손실이 무시할 수준임을 시사하였고, 이를 실험적으로 재현하여 검증하였다. 반대로 산화 영역에서의 급격한 Mo 손실 구간을 확인하여 몰리브덴 투입시 기술적용에 있어 시사점을 제시하고자 한다.

[철강A2-6 | 11:25]

Si 탈산강의 비금속 개재물 생성과 진화거동에 미치는 슬래그 중 Al_2O_3의 영향: 장민관(한양대학교), 김태성(현대제철), 박주현*(한양대학교)

Keywords: 전기로, Si 탈산강, 비금속 개재물, 슬래그

탄소중립이 전세계적 이슈가 됨에 따라 저탄소 공정인 전기로(Electric Arc Furnace, EAF) 사용과 고급강 생산 요구가 점차 확대되고 있다. 그러나 전기로 원료인 스크랩은 그 출처가 다양하여 조성이 불균일하다. 특히 Cu, Sn 등 트램프 원소는 정련을 통한 제거가 어려워 최종 강재에 잔류하기 쉬우며, Al, Si, Mn 등 개재물 유발원소 또한 배치별로 편차가 커 청정도 확보를 위한 개재물 제어가 중요한 과제로 여겨진다. 신선가공성이 우수한 선재를 생산할 경우, 경질 개재물은 신선 중 단선의 원인이 될 수 있어 Si 탈산을 통해 우수한 변형능을 가지는 SiO_2-MnO-Al_2O_3계 저융점 개재물로 제어하는 방법이 일반적으로 활용되고 있다. 선행연구에 따르면 개재물 내 Al_2O_3 함량이 약 20 wt%일 때 변형능이 가장 우수하며, 이를 위해서는 용강 내 [Al] 함량을 수 ppm 수준의 극미량으로 정밀 제어해야 하는 것으로 보고된다. 이러한 극미량의 [Al] 제어는 탈산제 첨가만으로는 어려우며, 슬래그 조성 변화를 통한 슬래그-메탈 평형 제어가 매우 중요한 수단이 된다. 이에 본 연구에서는 고주파 유도 용해로를 사용하여 1600 ºC, MgO 도가니, 슬래그 염기도(CaO/SiO2)=0.7 조건에서 슬래그 내 Al_2O_3 함량을 0, 5, 10, 15 wt%로 변화시키고, 반응 시간에 따른 개재물의 단위면적 당 개수, 크기 분포, 상과 평균 조성 변화를 Auto-SEM을 통해 관찰하였다. 그 결과 슬래그 중 Al_2O_3 함량이 증가함에 따라 단위면적당 개재물 수는 다소 감소하는 경향을 보였으며, 크기는 대체로 2.5~3.5 μm 범위에서 유지되었다. 반응 시간이 경과함에 따라 개재물 내 MnO, Al_2O_3 함량은 감소하고, SiO_2-rich한 방향으로 개질되는 경향을 나타내었는데, 이는 본 실험 용강의 Mn/Si 비와 관련이 있는 것으로 판단된다. 한편, 슬래그 중 Al_2O_3 함량 증가에 따라 Si 투입 후 개재물 내 Al_2O_3 함량도 함께 증가하는 경향이 관찰되었다. 이러한 결과는 개재물의 진화거동이 용강 조성과 슬래그 조성의 영향을 함께 받으며, 두 인자를 종합적으로 고려한 슬래그 설계가 필요함을 시사한다.

[철강A3-1 | 13:30]

수소 기반 철광석 유동층 환원에서 반응속도와 입자 유동의 분리 계산 및 RTD 기반 연계 해석: 이소명, 정진호*(포항공과대학교/Pohang University of Science and Technology (POSTECH))

Keywords: 수소 환원, 유동층, 반응속도론, 체류시간분포, CPFD/MP-PIC, RTD–kinetics coupling

본 연구에서는 수소 기반 기포 유동층 반응기의 연속 철광석 환원성능을 예측하기 위해 반응속도와 입자 유동을 각각 계산한 후, 입자 체류시간분포(residence time distribution, RTD)를 이용하여 두 결과를 연결하는 해석 방법을 제안하였다. 반응 해석에서는 전체 환원과정 중 체류시간의 영향을 크게 받는 FeO → Fe 단계를 대상으로 화학반응, 입자 내부 확산 및 외부 물질전달 저항으로 구성된 직렬저항 수축핵 모델을 적용하였다. 계산된 회분식 환원곡선은 문헌의 유동층 환원 실험자료를 이용하여 검증 및 보정하였다. 이와 별도로 CPFD/MP-PIC 기반 비반응성 입자 추적 시뮬레이션을 수행하여 연속 고체 흐름에서의 출구 추적자 신호를 계산하고, 이를 정규화하여 입자 RTD를 도출하였다. 반응 계산과 유동 계산에는 동일한 반응기 형상과 운전조건을 적용하여 두 해석 결과의 일관성을 확보하였다. 최종적으로 각 체류시간에서의 회분식 환원율을 RTD 확률밀도로 가중평균하여 연속 반응기의 평균 환원율을 계산하였다. 회분식 반응모델은 실험 환원곡선을 평균 절대오차 2.16%로 재현하였으며, 3000초에서 약 0.96의 환원율을 나타냈다. 그러나 동일한 반응곡선을 보정된 RTD와 연결한 결과, 연속 운전에서의 평균 환원율은 약 0.64로 계산되었다. 이는 모든 입자가 동일한 반응시간을 갖는 회분식 환원율만으로는 연속 유동층 반응기의 성능을 평가하기 어렵다는 것을 보여준다. 제안된 방법은 반응 고유의 속도 특성과 유동에 따른 체류시간 효과를 분리하여 계산한 후 확률적으로 연결함으로써, 수소 기반 유동층 환원 공정의 연속 운전성능을 보다 명확하게 평가할 수 있는 해석 틀을 제공한다.

[철강A3-2 | 13:45]

바이오매스 가스화 기반 직접환원철 침탄 공정 물질수지 및 경제성 평가: 임지수*, 선민주, 이유빈, 김수연(현대제철)

Keywords: 수소환원, 탄소중립, 바이오매스, 침탄, 바이오매스 가스화, 경제성 평가

탄소중립 실현을 위한 철강산업의 저탄소 전환이 가속화됨에 따라, 화석연료 사용을 저감하기 위한 수소환원제철 기술과 화석기반 탄소원을 대체할 수 있는 친환경 탄소원 활용 기술의 중요성이 증가하고 있다. 수소환원제철은 철광석 환원 과정에서 화석연료 사용을 크게 줄일 수 있으나, 생산된 DRI의 탄소 함량 확보를 위해서는 별도의 침탄용 탄소원이 필요하다. 이에 재생 가능한 탄소원인 바이오매스가 주목받고 있으며, 가스화 공정을 통해 CO, H_2 및 CH_4 등을 포함하는 합성가스로 전환할 수 있어 직접환원공정의 환원 및 침탄용 가스로 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 그러나 바이오매스 기반 합성가스를 직접환원공정의 주요 환원가스로 적용할 경우, 높은 환원가스 수요로 인해 상당한 양의 바이오매스가 필요하며, 이에 따라 원료 확보 및 운송뿐만 아니라 전처리, 가스화 및 가스 정제 과정에서 추가적인 비용이 발생할 수 있다. 또한 지속 가능한 바이오매스의 공급량이 제한적이라는 점을 고려할 때, 환원 및 침탄 공정 전반에 적용하기보다 상대적으로 가스 요구량이 적은 침탄 공정에 선택적으로 적용하는 것이 자원 활용 및 경제성 측면에서 보다 효과적일 수 있다. 이에 본 연구에서는 바이오매스 가스화 공정 기반 가스의 적용 대상을 DRI 침탄 공정으로 한정하고, 해당 공정에 적용할 경우의 경제성 평가를 위해 기존 천연가스 기반 침탄 공정과의 운영비 비교를 하였다. 경제성 평가는 금속화율 94%, 탄소 함량 2.5 wt.%의 DRI 1 ton 생산을 기준으로 수행하였다. 바이오매스 가스화 공정은 견과류 껍질을 이중 유동층 가스화 공정의 원료로 바이오매스 가스를 생산했을 ?의 물질수지를 기반으로 구성하였으며, 고농도 CO 합성가스 생산을 위해 CO_2를 가스화제로 적용하여 바이오매스 투입량과 합성가스 발생량을 산정하였다. 이후 CO 및 CH_4의 침탄 평형을 적용하여 목표 탄소 함량 확보에 필요한 침탄 가스량을 계산하였다. 공정 비용은 25년 단가를 기준으로 바이오매스 원료비와 가스화 및 가스 정제 비용을 반영하였으며, 공정 내 가스 재활용을 통한 비용 저감 방안도 함께 검토하였다. 물질수지 결과, 목표 탄소 함량 확보를 위해DRI 1 ton당 약 197.3 Nm^3의 합성가스와 294.9 kg 바이오매스가 필요한 것으로 산정되었다. 바이오매스 기반 침탄 공정 비용은 363, 427원/t-DRI로 천연가스 기반 공정의 48, 002원/t-DRI 대비 약 7.6배 높았으며, 외부 CO_2 공급비와 바이오매스 원료비가 주요 비용 요인으로 나타났다. 반면Top Gas 및 CO_2 재활용을 적용할 경우 총 공정 비용은 124, 735원/t-DRI로 기본 공정 대비 약 65.7% 감소하였으며, 여기에 바이오매스 단가가 약 150원/kg 이하가 될 경우 천연가스 기반 공정 비용 수준에 근접할 가능성이 있는 것으로 평가되었다. 따라서 바이오매스 기반 침탄 공정의 경제성 확보를 위해서는 저가 바이오매스의 안정적인 확보와 함께 Top Gas 및 CO_2 재활용을 통한 외부 원료 사용 최소화가 중요할 것으로 판단된다.

[철강A3-3 | 14:00]

H_2-CO-CH_4 혼합가스 분위기에서 산화성 가스(H_2O, CO_2) 첨가가 직접환원철의 침탄 거동에 미치는 영향: 최지원, 조다한(인하대학교), 이유빈(현대제철), 김영재*(인하대학교)

Keywords: 직접환원철(DRI), 침탄(Carburization), 탈탄(Decarburization), Carbon activity, 기공구조, 압축강도

현재 철강 산업에서는 CO_2 배출 저감을 위해 수소환원제철 공정과 직접환원철(DRI, Direct Reduced Iron)의 활용이 증가하고 있다. 그러나 H_2 기반으로 환원된 DRI는 탄소 함량이 낮아 별도의 침탄 공정이 요구된다. 침탄 공정에서 COG 등의 부생 가스를 활용할 경우, CH_4, CO 외에도 H_2O, CO_2와 같은 산화성 가스를 포함하게 되나 이들이 침탄 거동에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 상업용 DR Pellet를 1000 ºC에서 H_2로 환원한 후, H_2-CO-CH_4 침탄 분위기에 H_2O, CO_2를 각각 및 동시에 첨가하여 침탄 거동을 열중량분석(TGA)으로 측정하고, 이에 따른 기공구조(MIP), 탄소 분포(EPMA), 압축강도(UTM) 변화를 종합적으로 분석하였다. 실험 결과, H_2 함량이 증가할수록 침탄이 촉진되었으나 과도하게 높은 조건에서는 오히려 저해되었다. H_2O, CO_2 첨가 농도가 높아질수록 침탄이 억제되었으며, 일부 조건에서는 탈탄 거동으로 전환되는 경향을 보였다. 이는 탄소 활동도(carbon activity)가 낮아지는 열역학 계산 결과와 일치하였다. EPMA 분석에서는 펠렛 외부에서 내부로 갈수록 탄소 농도가 낮아지는 경향이 확인되었다. 본 연구를 통하여 H_2O, CO_2 첨가에 따른 침탄 속도 변화를 정량적으로 평가하였으며, 산화성 가스 혼합을 통한 침탄 반응의 제어가 가능함을 확인하였다.

[철강A3-4 | 14:15]

소형 전기아크로에서 냉각조건에 따른 Freezing lining 형성 거동의 Computational Fluid Dynamics(CFD) 해석: 하주영(한국공학대학교), 김예림, 신승환(현대제철), 장태훈, 정용석*(한국공학대학교)

Keywords: 전기로, Freezing lining, Slag solidification, Heat flux, CFD

전기로 내부의 고온 슬래그가 냉각된 노벽과 접촉하면 일부 슬래그가 응고하여 Freezing lining 을 형성하며, 이는 고온 슬래그와 내화재의 직접적인 접촉을 억제하여 내화재를 보호하는 역할을 한다. 하지만 과도한 냉각은 슬래그의 열손실을 증가시키므로, 불필요한 열손실을 줄이면서 필요한 두께의 Freezing lining 을 빠르게 형성할 수 있는 냉각조건을 확보하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 현대제철의 연구용 소형 전기아크로를 대상으로 Freezing lining 의 형성 거동을 예측하기 위해 시간에 따른 열전달과 슬래그의 상변화를 고려한 Computational Fluid Dynamics(CFD) 해석 모델을 구축하였다. 대상 설비의 슬래그 조성 및 조업조건을 반영하여, 슬래그–Freezing lining 내화재–냉각구조로 구성된 모델을 통해 전기로 내부에서 노벽 및 냉각부 방향으로 전달되는 열의 거동을 해석하였다. 전기로 내부의 열조건을 모사하기 위해 전극봉 주변의 열전달 영역을 3개로 구분하고, 그 외 영역을 포함하여 총 5 개의 열부하 영역을 설정하였다. 슬래그 영역에서는 유체 유동 및 열전달을 고려하였으며, 내화재 영역에서는 전도 열전달을 고려하였다. 전기로 경계에는 대류 및 복사에 의한 열전달을 적용하였다. 또한 냉각부에는 별도의 냉각조건을 설정하여 시간에 따른 전기로 내부의 온도분포와 노벽을 통한 열유속을 계산하고, 냉각된 노벽 부근에서 형성되는 Freezing lining 의 위치와 두께 변화를 시간에 따라 확인하였다. 다양한 슬래그 특성의 영향을 확인하기 위해 슬래그의 점도와 밀도 및 열전달계수를 변화시켜 각 인자가 Freezing

lining 형성 거동에 미치는 효과를 분석하였다. 이를 통해 전극봉 주변의 열조건, 냉각구조 및 슬래그 물성 변화가 전기로 내부의 온도분포와 Freezing lining 형성 거동에 미치는 영향을 분석하고, 적정 두께의 Freezing lining 을 안정적으로 형성하면서 열손실을 최소화할 수 있는 냉각조건을 도출하고자 한다. 최종적으로 본 연구의 CFD 해석결과는 향후 산업용 대형 전기로의 Freezing lining 형성 거동 예측 및 냉각시스템 설계를 위한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

[철강A3-5 | 14:30]

전기용융로 내 아크 거동 및 전극 부하 특성 분석: 난류 효과 및 3차원 불안정성의 영향: 심승현, 김현진, 양현진*(인하대학교)

Keywords: 자기유체역학 (Magnetohydrodynamics, MHD), 대형 와류 시뮬레이션 (Large Eddy Simulation, LES), 유동 영역, 아크 저항

수소환원제철의 한 축을 담당하는 전기용융로(ESF) 브러시아크 조업에 있어 전력원단위 절감에 관한 다양한 연구가 이루어지고 있으나 극한의 조업 환경으로 인해 조업 주요지표인 전극 부하 및 전력 안정성 등에 영향을 미치는 내부 아크 거동을 직접 관찰 및 분석하기에는 어려움이 있다. 이에 따라 아크 거동과 전극 지표 간 상관관계를 분석 및 예측하기 위한 다양한 모델링 연구가 수행되어 왔다. 아크 불안정성은 난류와 부력, 로렌츠 힘의 불균형, 아크-탕면 상호작용 등 다양한 요인에 의해 발생하며, 특히 3차원 유동에서는 이러한 영향으로 아크 경로가 지속적으로 변화할 수 있다. 이러한 아크 불안정성은 아크 길이를 통해 아크 저항을 변화시켜 전력원단위 및 전력안전성에 영향을 미치므로, 전극 부하 및 아크 불안정성을 정량화하여 평가하는 것이 중요하다. 기존 전기용융로 모델링 연구에서는 플라즈마 아크의 유동 영역에 따른 난류 특성이 충분히 고려되지 않았다. 그러나 실험실 규모에서 실증 규모에 이르는 넓은 전류 범위에서 아크의 유동 특성이 크게 달라질 수 있으므로, 유동 영역을 구분하고 이에 따른 난류 효과를 분석할 필요가 있다. 또한 기존 연구에서는 2차원 축대칭 모델이 주로 활용되어 왔으나, 실제 아크에서는 로렌츠 힘의 불균형에 의해 아크 경로가 휘어지며 이에 따라 아크 길이와 저항이 증가할 수 있으므로 이러한 3차원 효과를 고려한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 3D 1/12 대칭 모델에 대하여 LES 난류 시뮬레이션을 수행하고 이를 2차원 축대칭 k-ε 모델의 계산 결과와 비교하여, 폭넓은 전류 조건에서 난류가 아크 거동에 미치는 영향과 유동 영역에 따른 난류 모델 선택의 적합성을 검토하였다. 또한 Full 3D LES 계산을 수행하여 3차원 불안정성에 따른 아크 경로 변화가 아크 거동과 전극 부하 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 선행 연구에서 제안된 등가 레이놀즈 수를 이용하여 유동 영역을 평가한 결과, 실험실 규모 조건 (520, 1150, 2160 A)의 플라즈마 아크는 층류와 천이 영역에 위치한 반면, 36 kA의 산업 규모 조건에서는 완전 난류 영역에 해당하는 것으로 나타났다. 1150 A의 경우 실험 결과와 비교한 결과, 아크 최대 속도의 상대오차는 k-ε 모델이 LES 대비 최대 약 3배 크게 나타났으며, 이를 통해 LES가 실험 결과를 보다 정확하게 재현함을 확인하였다. 반면, 36 kA 조건에서는 k-ε 모델과 LES로 계산한 최대 속도의 차이가 약 10% 이내로 나타났다. 이를 통해 플라즈마 아크의 유동 영역에 따라 적절한 난류 모델을 선택하는 것이 중요함을 확인하였다. 3차원 LES 계산 결과, 아크의 횡방향 변위와 굴곡으로 인해 실제 아크 경로가 최단 경로보다 크게 증가하였다. 2160 A 조건에서는 아크 경로 길이가 최단 경로의 최대 1.8배까지 증가하였으며, 이에 따라 전압은 2차원 축대칭 모델 대비 29% 증가하였다. 36 kA 조건에서는 아크 경로 길이가 최대 2.4배까지 증가하였고, 전압은 37% 증가하였다. 이는 3차원 불안정성으로 인한 아크 경로의 증가가 전극 부하에 영향을 미치는 것을 보여준다. 또한 아크 경로 길이와 기울어짐 각도의 스펙트럼 중심 주파수를 비교한 결과, 36 kA 조건에서 각각 2160 A 조건보다 39%와 38% 높은 값을 나타내어, 완전 난류 영역에서 아크의 변동이 더 빠르고 불안정한 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 유동 영역에 따른 난류 효과와 3차원 불안정성이 아크 거동, 아크 저항 및 전극 부하 특성에 미치는 영향을 정량적으로 규명하였다. 이러한 결과는 전기용융로 아크 모델의 난류 모델 선택에 대한 기준을 제시하고, 향후 전기용융로 공정의 조업 안정성 향상과 전력 효율 개선을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

[철강A3-6 | 14:45]

철강 연속주조 노즐 토출구 형상에 따른 몰드 유동 거동 변화: 박정섭, 정준민, 조성묵*(부경대학교)

Keywords: 철강, 연속주조, 노즐, 토출구, 몰드 유동

철강 슬라브 연속주조 노즐을 통해 몰드로 유입되는 토출류는 유동 패턴을 형성하며, 몰드 내 재순환 형태와 탕면 거동을 결정한다. 그렇기 때문에 침지 노즐의 토출구 형상은 몰드 내 토출류의 거동을 변화시키며, 이는 몰드 벽면으로의 충돌 형태와 상하부 재순환 유동 구조의 차이로 이어진다. 특히 몰드 벽면 충돌 후 형성되는 상부 재순환 유동은 탕면 부근의 유동 방향, 유속을 결정하며 탕면 높이 차와 시간에 따른 변동을 결정하기에, 토출구 형상에 따른 유동 패턴과 탕면 불안정성에 미치는 영향을 규명하는 것은 중요하다. 본 연구에서는 랩스케일 수모델 실험과 전산시뮬레이션을 통해 노즐 토출구 형상에 따른 몰드 내 토출류 거동과 유동 패턴, 이에 따른 상부 재순환 유동 특성을 비교 분석하였다. 더불어, 탕면 유속 및 탕면 레벨의 시계열 변화 분석을 통해서, 탕면 불안정성이 슬래그 유동과 용탕 내 혼입 거동에 미치는 영향에 대해서도 정량적으로 고찰하였다.

[철강A3-7 | 15:00]

자선분광 분사연마 공정 내 분광과 연마재 충돌 거동 모델링: 신재원(국립부경대학교), 조성구(포항산업과학연구원), 조성묵*(국립부경대학교)

Keywords: 철강, 분사연마, 분광 베드, 충돌 거동, 수치해석

철강 제조 공정 내 Kanbara Reactor (KR) 공정에서 형성되는 KR 슬래그의 냉각, 파쇄 및 자력선별을 통해 회수되는 자선분광은 Fe 성분을 포함하고 있어 철강 부산물의 재자원화 측면에서 재활용의 필요성이 존재한다. 하지만 자선분광의 표면에는 잔류 슬래그가 존재하므로 이를 제거하기 위한 후처리 공정이 요구되며, 연마재를 분사하여 분광으로부터 슬래그상을 물리적으로 제거하는 분사연마 공정이 사용될 수 있다. 본 연구에서는 공정 내 분광 베드 형성과 분광 입자의 운동 및 충돌 거동을 전산모사하였다. 전산모델링을 통해서 계산된 분광 베드 형상, 면적, 상승각은 랩스케일 실험 결과와 비교하였다. 더불어, 공정내 연마재 분사 과정에서의 분광내 충돌력을 분석하여 분광 입자의 충돌 거동을 정량적으로 해석하였다. 이를 통해서 회전 바스켓 내 분광 베드 내 분광간 충돌과 분광-연마재 충돌 거동을 개별 입자 수준에서 고찰하였다.

[철강A4-1 | 15:25]

폐타이어의 바이오 유래 탄소 분율과 원료탄 대체에 따른 코크스 품질 변화: 신윤재, 이윤모, 이종협*(현대제철)

Keywords: 폐타이어, 원료탄 대체, 코크스 품질, 바이오 유래 탄소, 자원순환형 탄소원

제선 공정은 일관제철소 온실가스 배출의 상당 부분을 차지하며, 코크스 제조에 사용되는 석탄은 주요 화석탄소원이다. 최근 철강산업의 탄소중립 대응에 따라 원료탄 사용 저감과 순환자원 활용이 요구되고 있으며, 향후 코크스오븐 감산에 따른 코크스오븐가스(COG) 공급 감소 가능성에도 대비할 필요가 있다. 폐타이어는 높은 탄소 함량과 발열량을 갖는 탄소계 폐자원으로, 원료탄 대체뿐만 아니라 에너지원으로서의 활용 가능성이 있다. 또한 천연고무 유래 바이오카본을 포함하고 있어 화석탄소 대체와 탄소저감 측면에서도 잠재적 가치가 있다. 본 연구에서는 폐타이어의 원료 특성과 코크스 적용성을 평가하여 자원순환형 탄소원으로서의 활용 가능성을 검토하였다. 폐타이어를 1 mm 이하, 2~4 mm, 5~7 mm 및 25 mm 이상의 네 가지 입도 조건으로 구분하고, 공업분석, 원소분석, 발열량 분석, 회분 조성 분석 및 열중량분석(TGA)을 수행하였다. 이를 통해 폐타이어의 탄소원 특성과 열분해 거동을 분석하고, 건류 과정에서의 가스 및 에너지 발생 잠재력을 평가하였다. 또한 입도별 폐타이어를 원료탄의 일부로 대체하여 코크스를 제조하고, 폐타이어의 입도와 대체율이 코크스 품질에 미치는 영향을 비교하였다. 아울러 탄소동위원소 분석을 통해 폐타이어 내 바이오 유래 탄소 분율을 정량화하고, 이를 기반으로 화석탄소 대체량과 탄소저감 잠재력을 평가하고자 하였다. 폐타이어의 원료탄 대체는 코크스 품질 저하 위험을 수반하지만, 높은 휘발분과 발열량을 활용한 건류가스 발생, 에너지 회수 및 가스화 측면에서는 긍정적인 효과가 기대된다. 본 연구에서는 폐타이어의 원료 특성, 코크스 품질 영향 및 바이오카본의 환경적 가치를 종합적으로 평가함으로써 자원순환형 탄소원으로서의 가치와 적용 한계를 제시하고자 하였다. 이를 통해 향후 코크스오븐 감산에 따른 가스 공급 감소에 대응하고, 제선 공정의 탄소저감 및 대체 에너지원 확보를 위한 폐타이어 활용 가능성을 검토하였다.

[철강A4-2 | 15:40]

석탄 반사율 분포 지수를 이용한 코크스 냉간강도 예측 기술: 주정희, 권동일, 이윤모, 이종협*(현대제철)

Keywords: 제선, 코크스, 원료탄, 반사율 분포, 코크스 냉간강도

고로 공정에서 코크스는 열원 및 환원제로 작용할 뿐만 아니라, 장입물의 하중을 지지하고 가스와 용융물의 유동 통로를 유지하는 중요한 역할을 수행한다. 코크스의 분화는 고로 내 통기성과 조업 안정성에 직접적인 영향을 미치므로, 원료탄 특성과 코크스 강도 간의 관계를 이해하는 것은 매우 중요하다. 비트리나이트 평균 반사율은 원료탄의 탄화도를 나타내는 대표적인 품질 지표로 활용되고 있으나, 단일탄과 배합탄 간 반사율 분포의 구성과 형상 차이를 충분히 반영하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 원료탄의 반사율 분포 특성을 정량화하고, 이를 코크스 냉간강도와 연계하여 분석하였다. 비트리나이트 평균 반사율 측정값을 반사율 구간별로 분류한 후, 각 구간의 구성 비율을 활용하여 반사율 분포 지수를 산출하였다. 이를 통해 단일탄 및 배합탄의 반사율 분포 특성을 정량적으로 비교하였다. 최근 3년간의 실제 조업 데이터를 분석한 결과, 반사율 분포 지수와 코크스 냉간강도 지표인 드럼강도지수(DI150/15) 사이에 유의한 상관관계가 확인되었으며, 이는 평균 반사율만으로는 구분하기 어려운 배합탄의 반사율 분포 특성이 코크스 냉간강도에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 반사율 분포 지수는 기존 평균 반사율이 제공하지 못하는 배합탄 특성 정보를 추가적으로 반영할 수 있었으며, 코크스 냉간강도 예측의 정확성을 향상시키는 지표로 활용될 가능성을 확인하였다. 이러한 결과는 향후 원료탄 배합 설계 및 코크스 품질 예측 모델의 고도화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[철강A4-3 | 15:55]

고로 내 스크랩 최적 장입을 통한 저탄소 조업 기술 개발: 김주훈*(포스코)

Keywords: 고로, 저탄소, 스크랩, 고온 연화 하중 실험, EDEM

철강산업의 탄소중립 실현을 위해 고로 내 철스크랩 활용을 통한 저탄소 조업 기술을 연구하였다. 철스크랩의 최적 혼합비와 장입 구조를 도출하기 위해 연화·하중시험(Softening Under Load, SUL), X선 용융시험 및 이산요소법(Discrete Element Method, DEM) 기반 EDEM 시뮬레이션을 수행하였다. 시험 결과, 철스크랩은 소결광보다 연화 개시 온도가 높고 연화 구간이 좁아 고로의 통기성을 개선하는 것으로 나타났다. 또한 코크스와 접촉하면 약 2~3%까지 빠르게 침탄되어 용융점이 약 1, 300 ℃로 낮아지므로 소결광과 동시에 용융될 수 있음을 확인하였다. 다만 철스크랩 비율이 20%를 초과하면 가스 흐름 변화가 발생하고, 40% 이상에서는 연화융착대 소실로 조업 불안정 위험이 증가하였다. EDEM 분석을 통해 저환원가스 영역에 철스크랩을 배치하고 노벽 손상을 방지하면서 코크스와 접촉시키는 최적 장입 조건을 도출하였다. 철스크랩 5% 적용 시 석탄비를 22.759 kg/t-p 절감하고 총 CO_2 배출량을 약 4% 저감할 수 있어, 고로 조업 안정성을 유지하면서 탄소 배출을 줄이는 실용적 방안으로 평가된다.

[철강A4-4 | 16:10]

E-DEM 기반 고로 장입 분포 디지털 트윈 모델 개발 및 탈탄소 공정 최적화 적용: 이성희*(포스코)

Keywords: 고로, 장입분포, 디지털트윈, 탈탄소

고로 장입 분포 제어는 조업 효율 및 안정성을 결정하는 핵심 요소이다. 본 기술은 E-DEM(Enhanced Discrete Element Method)을 활용하여 저장조부터 노정 호퍼, 장입 슈트에 이르는 연원료 흐름을 모사하고, 고로 내 적층 구조를 디지털 트윈으로 구현하였다. 이를 통해 장입 층상의 구조 및 편석을 정량적으로 예측하고, 최적의 조업 조건을 도출하기 위한 의사결정 지원 체계를 구축하였다. 또한 해당 기술을 고로 탈탄소를 위한 장입물 분포 설계에 활용하여 조업 테스트를 성공적으로 완료하였다.

[철강A4-5 | 16:25]
직접환원 샤프트로 내 펠렛 입도 분포에 따른 공극 구조 및 통기성 변화: 이선영*, 선민주, 김수연(현대제철)
Keywords: 직접환원, 입도 분포, 통기성, 압력강하, DEM, CFD

샤프트로는 철광석 펠렛을 환원가스로 환원하여 고체 상태의 직접환원철(DRI)을 생산하는 직접환원 공정의 반응로이다. 샤프트로 내부의 안정적인 가스 흐름은 환원 효율과 제품 품질을 확보하기 위한 주요 조건이며, 펠렛 입도 분포에 따른 충전층 구조와 반경 방향 공극률 분포의 영향을 받는다. 그러나 기존 전산유체역학 모델은 충전층의 공극률과 입경을 단일값으로 적용하여 다분산 펠렛의 적층 거동, 입도 편석 및 벽효과에 따른 반경 방향 공극률 변화를 반영하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 펠렛 입도 분포에 따른 샤프트로의 공극 구조와 통기성을 평가하기 위해 이산요소법(DEM)과 전산유체역학(CFD) 연계 해석 방법을 구축하였다. 축소 규모 DEM 모델로 다분산 펠렛의 적층 거동을 모사하고, 도출된 반경 방향 공극률 분포를 실제 규모의 샤프트로 CFD 모델에 적용하였다. 해석 조건은 기준 입도 분포, 입도 범위를 단계적으로 축소한 조건 및 단일 입도 조건으로 구성하였으며, 충전층 유동 저항은 반경 방향 공극률과 Sauter 평균 입경을 반영한 Ergun 식으로 계산하였다. 해석 결과, 입도 분포 폭이 감소함에 따라 입자 간 충진 효과가 감소하여 평균 공극률은 증가하고 전체 압력강하는 감소하였다. 입도 편차가 가장 작은 조건에서 평균 공극률은 기준 조건 대비 약 4% 증가하고, 전체 압력강하는 약 16% 감소하였다. 단일 입도 조건은 가장 높은 공극률을 나타냈으나, 기준 입도 분포보다 Sauter 평균입경이 작아 압력강하는 입도 범위를 축소한 일부 조건보다 높았다. 이를 통해 공극률과 Sauter 평균 입경이 충전층 유동 저항에 복합적으로 영향을 미침을 확인하였다. 반면, 반경 방향 가스 유량 분포의 균일성은 입도 조건에 따른 차이가 크지 않았다. 가스 취입구 인접 상부의 불균일한 유량 분포는 샤프트로 상부로 이동하면서 균일해졌다. 본 해석 조건에서는 펠렛 입도 분포가 가스 유동의 공간적 분포보다 전체 유동 저항에 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 이는 국부적인 유동 불균일에 가스 취입 구조와 경계조건이 지배적인 영향을 미칠 가능성을 시사한다. 본 연구의 DEM-CFD 연계 해석 방법은 펠렛 입도 분포와 반경 방향 공극 구조를 반영한 샤프트로 통기성 평가 및 향후 장입물 입도 관리와 통기성 최적화에 활용될 수 있다.

[철강A4-6 | 16:40]
Autothermal Hydrogen Generation by O_2-H_2O Co-injection during Steelmaking Converter Decarburization: GYOKHANG PARK, WANHO KIM(Yonsei Univ.), IL SOHN*(Yonsei Univ., Recycling Development Solution Co. Ltd.)
Keywords: Steelmaking, Hydrogen production, Exergy analysis, Carbon neutrality, Decarburization

Reducing the carbon and energy intensity of steelmaking requires not only low-carbon reductants, but also more effective utilization of energy already available within existing processes. Converter steelmaking releases substantial exothermic heat during oxidation and decarburization, a portion of which represents an opportunity for internal energy recovery. In this study, steam (H_2O) is introduced with oxygen (O_2) to redirect part of this heat toward process-integrated hydrogen production, while maintaining the thermal requirements of primary refining. Thermochemical equilibrium calculations were performed using FactSage 8.3 to determine suitable O_2-H_2O co-injection conditions that balance the heat released from exothermic reactions with the energy required for endothermic reactions while sustaining decarburization and hydrogen generation. The calculations indicated autothermal conditions could be maintained at an H_2O fraction of up to approximately 31% without external heat input. At this condition, the predicted hydrogen production reached approximately 562.2 mol H_2 (≈1.13 kg H_2) per ton of liquid steel. Laboratory-scale experiments were subsequently conducted to validate the thermodynamic predictions, with measured H_2 yields corresponding to approximately 82-90% of the calculated values under O_2-H_2O co-injection. Furthermore, exergy analysis showed a progressive improvement in process exergy efficiency with increasing H_2O fraction, reaching its optimum at the O_2-31% H_2O condition. These results demonstrate that converter reaction heat can be partially transformed into recoverable chemical energy in the form of H_2 without requiring an additional external heat source. The resulting H_2-containing off-gas could subsequently be utilized within an integrated steelworks as a fuel or reductant, providing a route for simultaneous process-energy recovery and reduction of fossil-fuel demand and associated CO_2 emissions.

[철강A4-7 | 16:55]
슬래그 내 free-CaO와 free-MgO 분석과 공정별 슬래그의 특성: 유윤재*, 김현희, 이윤정, 강훈철(현대제철)
Keywords: 전기로 슬래그, 전로 슬래그, free-CaO, free-MgO

제철 슬래그의 재활용 확대와 고부가가치 자원화에 대한 관심이 증가함에 따라 슬래그의 체적 안정성 평가가 중요해지고 있다. 특히 슬래그 내 free-CaO와 free-MgO는 수화 반응에 의해 체적 팽창을 유발하는 대표적인 성분으로 알려져 있으며, 슬래그의 장기 안정성 및 활용 가능성을 평가하기 위한 정량 분석이 요구된다. 그러나 free-CaO에 비해 free-MgO는 분석 표준이 확립되지 않았으며, 공존 광물상 및 수화 생성물, 그리고 각 산화/수산화물의 열 중량 분석 간 열 반응 구간 간섭 등의 장애 요인이 발생 할 수 있다. 본 발표를 통해 슬래그 내 free-CaO와 free-MgO의 분석 간 장애 요인에 대해 제시하고, 이를 해소하기 위해 에틸렌글리콜 추출과 마이크로웨이브 수화, 열중량 분석을 연계한 방식의 분석법을 소개하고자 하며, 전로 슬래그와 전기로 슬래그를 대상으로 보이는 화학조성 및 광물상 특성과 free-CaO / free-MgO의 차이를 제시하고자 한다. 최종적으로, 슬래그 내 팽창성 성분의 분석 방법을 고찰하고, 공정별 슬래그 특성을 제시하여 슬래그의 자원화 및 활용성 증대 및 안정성 평가 분석법에 대한 고찰을 제시하고자 한다.

철강B-압연, 강종개발, 후처리
Room 1층 101호, 10월 28일

[철강B1-1 | 08:30]
Texture Influence on Austenite Nucleation During Intercritical Annealing of a Cold-rolled Microalloyed Steel: Mohammadmilad Jafarzadshayan, Dong-Woo Suh*(Pohang University of Science and Technology)
Keywords: Microalloyed steel, intercritical annealing, austenite nucleation, double K-S relation, texture-dependent nucleation, crystallographic texture, grain boundary character

Austenite (γ) transformation during intercritical annealing is of great importance in controlling the microstructural evolution and mechanical performance of low-carbon microalloyed steels. Although preferential γ nucleation sites in cold-rolled and partially recrystallized microstructures have been extensively investigated, the influence of ferrite (α) crystallographic texture on selective nucleation has received considerably less attention. In the present study, a statistical framework based on the double Kurdjumov–Sachs (K-S) relation, originally proposed to explain the texture memory effect during the α↔γ transformation, was developed with the aid of microtextural analysis using electron backscatter diffraction to compare the propensity of the major texture orientations in a cold-rolled and partially recrystallized microalloyed steel in γ nucleation through a newly proposed double K-S potential parameter. Two subcritical annealing temperatures were selected to examine the influence of texture evolution associated with recrystallization on γ nucleation propensity. Complementary intercritical heat treatment with multiple interruptions revealed a low tendency for γ to nucleate at the boundaries of deformed α-fiber grains oriented between (001) [110] and (112) [110]. To investigate the role of oriented growth of γ, five-parameter grain boundary characterization was performed on recrystallized and non-recrystallized ferrite grains. The results indicate that the aforementioned part of the α-fiber has a strong preference for {001} grain boundary planes, which favors the formation of highly coherent α/γ interfaces and consequently suppresses γ growth into these α grains. Thus, the identified α-fiber segment, already known to be unfavorable for recrystallization, is also preferentially retained during intercritical γ transformation, consistent with its relatively low double K-S potential predicted by the proposed model.

[철강B1-2 | 08:45]
Cr 함량에 따른 2 GPa급 핫스탬핑강의 시멘타이트 용해 거동 및 구오스테나이트 결정립 제어: 한정훈, 남정훈, 송상윤(고려대학교), 백주현(한국과학기술연구원), 이창욱, 오욱진(현대자동차), 유병길(현대제철), 손석수*(고려대학교)
Keywords: press-hardened steel, chromium, cementite, prior austenite grain, 전위 밀도

향상된 충돌 안전성과 차량 경량화를 위해 인장강도 2 GPa급 press-hardened steel 개발이 요구되고 있다. Carbon 첨가는 강도를 높이는 가장 직접적인 방법이지만, ductility와 공정 안정성을 저하시키는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 1.0 wt.% 및 1.4 wt.%의 Cr이 첨가된 0.31 wt.% C 기반 2 GPa급 프레스 경화강을 활용하여, Cr 함량이 상변태, cementite dissolution, prior austenite grain evolution 및 기계적 물성에 미치는 영향을 체계적으로 조사하였다. 그 결과, Cr 함량이 증가함에 따라 cementite 내부로의 Cr 분배가 촉진되어 오스테나이트화 과정 중 cementite의 dissolution kinetic이 현저히 지연되었다. 이렇게 용해가 지연된 Cr-enriched cementite는 prior austenite grain boundaries의 이동을 지속적으로 방해하여, 930 ºC의 고온 조건에서도 결정립 조대화를 효과적으로 억제하였다. 결과적으로 1.4Cr 강은 조대화가 억제된 미세한 결정립을 바탕으로 퀜칭 후 BCC 결정구조를 갖는 마르텐사이트 내부에 높은 전위 밀도를 안정적으로 유지할 수 있었다. 이를 통해 1.4Cr 강은 810–930 ºC의 매우 넓은 오스테나이트화 온도 범위에서도 약 2 GPa의 초고강도와 5% 수준의 균일 연신율을 견고하게 달성하였다. 따라서 본 연구는 cemenitite dissolution kinetic 제어를 통해 초고강도와 공정 안정성을 동시에 확보할 수 있는 효과적인 합금 설계 전략을 제시한다.

[철강B1-3 | 09:00]
Bimodal 결정립 조직를 갖는 3Mn TRIP강의 미세조직 및 Delamination 크랙 형성 거동: 임용수, 김진경*(한양대학교)
Keywords: 중망간강, 이상영역 열처리, Bimodal 결정립 구조, 항온 열처리, TRIP, 변형 거동, 크랙 거동

3–12 wt.% Mn을 함유하는 중망간강은 우수한 강도–연성 조합을 나타내어 차세대 자동차용 고강도 강판 소재로 활발히 연구되고 있다. 본 연구에서는 Fe–3Mn–0.2C–1Al (wt.%) 중망간강에서 형성된 bimodal 결정립 구조와 이에 따른 delamination 크랙의 형성 및 전파 거동을 규명하였다. 냉간 압연 후 700 및 720 ºC에서 5분간 이상영역 열처리(IA)를 수행하였으며, 일부 시편에는 720 ºC IA 후 항온 열처리(IHT)를 추가로 적용하였다. IA 후 미세조직은 주로 페라이트와 잔류 오스테나이트로 구성되었으며, 720 ºC IA 조건에서는 최종 냉각 중 마르텐사이트가 형성되었다. 반면, IHT를 적용한 경우 냉각 중 마르텐사이트 형성이 억제되어 잔류 오스테나이트 분율이 증가하였으며, IA만 적용한 조건에 비해 항복강도와 연신율이 향상되었다. 모든 조건에서 열간 압연 조직의 미세조직적 불균일성으로 인해 오스테나이트와 미세 페라이트로 구성된 미세 결정립 영역과 조대한 페라이트 영역이 공존하는 bimodal 결정립 조직이 형성되었다. 두 영역의 결정립 크기와 경도 차이에 의해 변형 중 영역 간 불균일한 변형이 발생하였으며, 경계 부근에서 국부적인 변형 집중이 나타났다. 파단 시편의 ND–RD 및 ND–TD 면에 대한 단면 분석 결과, delamination 크랙은 주로 미세 결정립 영역과 조대한 페라이트 영역의 경계에서 발생하여 해당 경계를 따라 전파하였다. 이러한 결과를 통해 bimodal 결정립 구조에서 발생하는 영역 간 변형 불균일성이 delamination 크랙의 형성 및 전파에 중요한 역할을 함을 확인하였다.

[철강B1-4 | 09:15]
Al, Ti 및 Nb 복합 첨가에 따른 보론 첨가강의 석출 거동과 충격인성: 정민섭(서울과학기술대학교 신소재공학과), 유승호, 고성웅(포스코 기술연구원), 황병철*(서울과학기술대학교 신소재공학과)
Keywords: Boron-added steel, Hardenability, Precipitation behavior, Impact toughness

대형 구조물, 압력 용기 및 방탄재에 사용되는 두꺼운 강판에서 두께 방향으로 균일한 미세조직을 얻기 위해서는 충분한 경화능이 요구된다. 보론은 효과적인 경화능 원소로 알려져 있으며, 수십 ppm 정도의 낮은 농도에서도 용질 보론은 오스테나이트 결정립계에 편석되어 결정립계 에너지를 낮추고 페라이트 핵생성을 억제하여 경화능을 향상시킨다. 또한 용질 보론은 결정립계의 정합성을 향상시켜 입계 강화 효과를 나타낼 수 있다. 그러나 제강 과정에서 불가피하게 발생하는 부산물인 질소는 응고 및 열처리 과정에서 보론과 강하게 반응하여 BN (Boron nitride)를 형성함으로써 용질 보론 함량을 감소시킨다. 이를 방지하기 위해 BN보다 높은 온도에서 형성되는 AlN (Aluminium nitride) 및 TiN (Titanium nitride)와 같은 질화물을 이용하여 질소를 우선적으로 고정할 수 있다. 그러나 질화물 석출을 통해 확보된 용질 보론은 붕화물의 석출을 촉진할 수 있으며, 과도한 Al 및 Ti 첨가는 조대한 질화물의 형성을 유도하여 균열 개시점으로 작용할 수 있다. 따라서 충격인성이 높은 보론강을 제조하기 위해서는 유해한 석출물의 형성을 억제하면서 용질 보론 함량을 최대화하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 Al, Ti, Nb를 단독 또는 복합 첨가한 보론강을 제조한 후 질화물과 붕화물의 경쟁 석출 거동을 예측하고 석출물의 종류 및 형태 등을 분석하여 보론, 질소 및 합금 원소 간의 상호작용 메커니즘을 체계적으로 분석하였다. 또한, 경도 및 충격 인성을 평가하고 석출물 등 미세조직과의 상관관계를 규명하였다.

[철강B1-5 | 09:30]
템퍼링 온도가 초고강도 고니켈강의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향: 손성하, 전상명(포항공과대학교), 김유섭, 박시욱, 김용진(국방과학연구소), 서동우*(포항공과대학교)
Keywords: 초고강도 고니켈강, 템퍼링, 잔류 오스테나이트 안정성, TRIP 효과, 저온 충격인성

극한 환경용 구조용 강재는 고강도와 우수한 저온 충격인성을 동시에 필요로 한다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위해, 우수한 저온 인성을 갖는 9% Ni강에 Cr, Mo, V와 같은 석출물 형성 원소를 첨가하여 초고강도화를 구현한 고니켈강이 개발되어 왔다. 본 연구에서는 이러한 초고강도 고니켈강에서 템퍼링 온도(570, 600, 630 ºC) 변화에 따른 미세조직과 인장 및 충격 특성의 변화를 조사하였다. 템퍼링 온도가 증가함에 따라 강도–연신율 간의 trade-off 관계가 관찰되었으며, 항복강도가 인장강도보다 더 가파르게 감소하는 한편 균일연신율과 총연신율은 점진적으로 증가하였다. 570 ºC 템퍼링 후에는 최종 미세조직에서 잔류 오스테나이트가 거의 관찰되지 않았으나, 600 ºC 및 630 ºC 템퍼링 후에는 잔류 오스테나이트의 분율이 각각 약 3% 및 10%로 증가하였다. 600 ºC 템퍼링 조건에서 형성된 잔류 오스테나이트는 낮은 분율에도 불구하고 630 ºC 조건보다 우수한 안정성을 나타내었으며, 이로 인해 저온 충격 인성이 가장 우수하였다. 이는 초고강도 고니켈강에서 요구되는 기계적 특성을 확보하기 위해서는 매우 정밀한 템퍼링 온도 제어가 필요함을 나타내고 있으며, 특히 잔류 오스테나이트의 안정성과 분율 제어가 핵심 인자임을 시사한다.

[철강B1-6 | 09:45]
Concurrent Tempering and Bainitic Transformation during Short-Time Austempering between M_s and M_f: Implications for Strength–Ductility Balance in Low-Alloy Steel: Jangjung Kim, Seunghyun Hong, Kisub Cho*(Kookmin Univ.)
Keywords: Low-alloy steel, Below-M_s austempering, Martensite, Bainite, Complex microstructure

Austempering of low-alloy steels can provide a favorable strength–ductility balance through the formation of complex martensite–bainite microstructures. In particular, isothermal holding below the martensite-start temperature (M_s) allows transformation to proceed in the presence of primary martensite and untransformed austenite, producing a complex microstructure distinct from that formed by conventional austempering above M_s. In this study, austempering was conducted between M_s and M_f, and the effects of holding time on microstructural evolution and mechanical properties were investigated. During isothermal holding at 300 ºC, primary martensite was tempered and bainitic transformation proceeded concurrently, while additional (fresh) martensite formed during the final quench to room temperature. With increasing holding time, the fraction of this fresh martensite decreased, whereas the fractions of tempered martensite and bainitic constituents increased. Lattice parameter and full width at half maximum (FWHM) obtained from X-ray diffraction(XRD) were used to evaluate carbon redistribution and changes in lattice defect density, respectively. Tensile testing showed that the specimen austempered at 300 ºC for 1 min exhibited an ultimate tensile strength of 1859.6 MPa and an elongation of 8.0%, comparable to a conventional quenching-and-tempering(QT) specimen tempered at the same temperature for 2 h (1884 MPa, 7.8%). These results suggest that short-time austempering between M_s and M_f can achieve mechanical properties comparable to conventional QT processing while substantially reducing heat-treatment time, offering an effective strategy for efficient heat-treatment design.

[철강B1-7 | 10:00] [Canceled]

[철강B2-1 | 10:25] 초청강연
마르텐사이트강의 구오스테나이트 입계 취약성 원인 분석: 계면 특성과 용질 편석의 상관관계: 김지훈*(부산대학교 재료공학부)
Keywords: 철강, 저탄소 마르텐사이트, 계면 편석, 계면 에너지, 구오스테나이트 입계

용질 편석은 철강재료의 계면 강도 및 파괴 거동에 큰 영향을 미침. 마르텐사이트강에서는 균열이 구오스테나이트 입계(prior austenite grain boundary, PAGB)를 따라 우선적으로 전파되며, 이는 계면 특성에 따른 용질 편석 차이와 관련될 수 있음. 본 연구에서는 마르텐사이트의 다양한 계층적 계면에서 용질 편석을 정량적으로 분석하고, 계면 특성과의 상관관계를 규명하고자 함. Fe–0.1C–3Mn (mass%) 합금을 1100 ºC에서 30분간 오스테나이트화 후 수냉하고, 550 ºC에서 24시간 템퍼링하였음. EBSD와 FIB 기반 계면 trace 분석을 통해 PAGB, 패킷, 블록/서브블록 및 래스 계면의 특성(Orientation Relation & Grain Boundary Plane Normal)을 규명하였으며, 3DAP를 이용하여 C 및 Mn 편석을 정량 분석하였음. 편석량은 V1/V1 < V1/V4 ≈ V1/V2 < V1/V6 ≈ V1/V17 순으로 증가하였으며, 패킷 계면과 PAGB에서 가장 높은 값을 나타냈음. 이러한 경향은 계산된 계면 에너지와 잘 일치하였으며, 정합성이 높고 계면 에너지가 낮은 계면에서는 편석이 적은 반면, 비정합성이 크고 계면 에너지가 높은 계면에서는 편석이 증가하였음. 이를 통해 마르텐사이트의 계면 특성과 계면 에너지가 용질 편석을 지배하며, PAGB의 높은 편석이 우선적인 균열 전파와 밀접하게 관련됨을 확인하였음.

[철강B2-2 | 10:50]

TMCP형 고강도 저합금강의 냉각 조건에 따른 미세조직과 내수소취성 변화: 오동규, 배영훈, 황병철*(서울과학기술대학교 신소재공학과)

Keywords: High-strength low alloy (HSLA) steel, Thermo-mechanical controlled process (TMCP), Hydrogen embrittlement, Bainite

수소 기반 에너지 시스템의 확산에 따라 대량의 수소를 생산지부터 사용처까지 안전하고 효율적으로 운송하기 위한 수소용 구조재로서 고강도 저합금강 (high-strength low alloy, HSLA) 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 고강도 저합금강은 저합금 조성 범위 내에서 높은 강도와 인성을 확보하기 위해 다양한 공정을 통해 제조된다. 그 중 제어압연과 가속냉각을 포함하는 TMCP (thermo-mechanical controlled process)는 가속 냉각 과정에서 형성되는 다양한 종류의 베이나이트계 미세조직을 통해 요구 물성을 확보하며, 냉각조건에 따라 미세조직의 분율과 형태가 변화하여 기계적 특성에 영향을 미친다. 베이나이트를 기반으로 설계된 고강도 저합금강은 높은 전위 밀도와 다양한 내부 결함을 포함하며, 수소 환경에서는 유입된 수소가 결함과 상호작용하여 강도와 연성이 저하되는 수소취성이 발생할 수 있다. 따라서 베이나이트계 미세조직과 수소취성의 상관관계를 규명하고, 적절한 냉각 조건을 통해 우수한 기계적 특성과 내수소취성을 동시에 확보할 수 있는 미세조직을 설계하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 동일한 화학조성에서 냉각조건을 달리하여 고강도 저합금강을 제조한 후 형성된 베이나이트계 미세조직을 자세히 분석하였다. 또한 전기화학적 수소 주입과 동시에 저속 변형률 시험 (slow strain-rate test, SSRT)을 수행하여 내수소취성을 평가하고 파면 분석을 통해 미세조직과 내수소취성 간의 상관관계를 고찰하였다.

[철강B2-3 | 11:05]

마르텐사이트 강의 수소 분위기 하 건식 마모 및 표면 손상 거동: 김현, 김혜진, 이승준*(한국공학대학교)

Keywords: 마르텐사이트 강, 건식 마모, 수소 주입

본 연구는 마르텐사이트 강을 대상으로, 수소가 건식 마모 및 표면 손상 거동에 미치는 영향을 분석하는 것을 목적으로 한다. 건식 왕복 마모 실험은 지르코니아(ZrO_2) 볼을 이용하여 10 N 하중, 5 Hz 주파수, 15 mm 스트로크 조건에서 수행하였으며, 수소 주입 전·후 시편에 대해 마모 거리를 50 m, 200 m, 500 m, 1000 m로 나누어 비교하였다. 마모트랙의 형상 변화와 wear rate는 3D laser scanning confocal microscope를 이용하여 분석하였고, 표면 손상 양상 및 마모입자층은 SEM-EDS를 통해 관찰하였다. 또한 micro-Vickers hardness와 EBSD 분석을 통해 마모트랙 하부의 경도 변화 및 국부 변형 거동을 평가하였다. 추가적으로 본 발표에서는 수소 주입 전·후 조건에서 마모 거리 증가에 따라 나타나는 표면 손상 양상과 마모트랙 하부 변형 거동의 차이를 비교하고, 이들이 마모트랙 형상 및 wear rate 변화와 어떠한 연관성를 갖는지 논의하고자 한다.

[철강B2-4 | 11:20]

희토류 원소를 활용한 구리 함유 저탄소강의 해수 내식성 향상: 조현석, 나질라 줄피카, 김경덕*(포항공과대학교)

Keywords: 내식성, 푸베이 도표, 희토류 원소, 동전위 분극 실험

해양 환경에서 사용되는 철강은 염화물이 풍부한 해수로 인해 전기화학 반응과 국부 부식이 촉진되므로 높은 내식성이 요구된다. 구리 함유 저탄소강은 장시간 해수 환경에서 구리가 부식 생성물층 내에 농축되어 치밀한 보호층 형성을 유도함으로써 우수한 내식성을 나타낸다. 본 연구에서는 희토류 원소를 첨가하여 구리 함유 저탄소강을 새롭게 설계하였다. 열역학 기반 Pourbaix diagram 계산을 통해 보호 산화물 형성에 유리한 희토류 원소를 선별하였다. 또한, 질산 침지 공정을 통해 산화층 형성을 촉진함으로써 희토류 원소의 보호 산화층 안정화 효과를 검증하였다. 세륨 첨가강에서는 CeO_2와 $Ce(OH)_3$를 포함하는 치밀한 보호층이 형성되었다. 특히 CeO_2는 산성 조건에서 열역학적으로 안정하지 않은 것으로 예측되었으나, 질산염 환원에 의해 유도된 계면 국부 알칼리화가 $Ce(OH)_3$ 침전과 CeO_2로의 후속 산화를 촉진하여 CeO_2 형성을 유도한 것으로 판단된다. 이에 따라 세륨 첨가강의 산화층은 세륨 미첨가강보다 얇고 치밀한 구조를 나타냈다. 3.5 wt.% NaCl 용액에서 수행한 동전위 분극 시험 결과, 0.0143 wt.% 세륨 강의 부식 전류 밀도(I_{corr})는 세륨 미첨가강 대비 34 ± 3% 감소하였다. 이는 세륨 첨가가 세륨 기반 산화물/수산화물 형성뿐만 아니라 FeOOH 및 Fe_2O_3상의 상대 분율 증가를 통해 보호 산화층의 안정성을 향상시킴을 의미한다. 본 연구는 계산과학 기반 원소 탐색과 실험적 검증을 결합한 합금 설계 방식이 고내식강 개발에 효과적인 접근법임을 보여준다.

[철강B2-5 | 11:35]

Y 첨가량에 따른 Zn-Al-Mg계 합금의 미세조직 및 상별 나노기계적 특성 평가: 고경민, 서위걸, 유태현, Khushahal Thool, 최시훈*(국립립순천대학교/Sunchon National University.)

Keywords: Zn–Al–Mg–Y alloy, Yttrium, Microstructure, Nanoindentation, Mechanical Properties, SEM/EDS

Zn–Al–Mg계 합금은 우수한 내식성을 기반으로 고내식 Zn계 소재로 주목받고 있으며, 다양한 구성상으로 이루어진 다상 미세조직은 합금의 기계적 거동에 중요한 영향을 미친다. 특히 합금 원소의 첨가에 따른 구성상의 형성 및 분포 변화는 미세조직과 기계적 특성에 영향을 미치는 주요 인자로 작용한다. 본 연구에서는 Zn–Al–Mg계 합금의 Y 첨가량에 따른 미세조직 변화와 구성상의 국부 기계적 특성을 분석하였다. Y 함량은 각각 0.2, 0.6 및 1.0 wt.%로 설정하였으며, 주사전자현미경(SEM)의 후방산란전자(BSE) 이미지를 이용하여 조성별 미세조직과 구성상의 형태 및 분포를 관찰하였다. 또한 에너지 분산형 X선 분광법(EDS)을 이용하여 미세조직을 구성하는 각 영역의 화학조성을 분석하고, 이를 바탕으로 구성상의 조성적 차이를 비교하였다. 미세조직 내 서로 다른 영역의 국부 기계적 거동을 평가하기 위해 나노인덴테이션 시험을 수행하였으며, 하중–변위 거동과 기계적 특성을 분석하였다. 이를 통해 Y 첨가량에 따른 미세조직 및 구성상의 변화를 비교하고, 미세조직과 국부 기계적 거동의 연관성을 검토하고자 하였다. 본 연구는 Zn–Al–Mg–Y계 합금의 미세조직과 국부 기계적 특성의 관계를 이해하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[철강B2-6 | 11:50]

빅데이터 기반 고성능 내화강 설계 및 고온 기계적 물성 메커니즘 규명: 이영주, Salsabila Syifa Salmi, Alireza Zargaran(포항공과대학교), 양홍석(포스코), 정찬원(부산대학교), 김지훈(부경대학교), 김경덕*(포항공과대학교)

Keywords: 내화강, 석출강화, 탄화물, 빅데이터 분석, 고온인장강도

도심지 고층 건축물의 대형화에 따라 화재 상황에서도 구조적 안정성을 확보할 수 있는 고강도 내화강의 야금학적 설계 요구가 증대되고 있다. Mo는 고온 강도 향상에 효과적인 합금 원소로 널리 활용되어 왔으나, 높은 원가로 인해 Mo 함량을 저감하거나 대체할 수 있는 경제적인 합금계 개발이 요구된다. 본 연구에서는 전통적인 제한적 합금 설계 방식에서 벗어나, 열역학 시뮬레이션 기반 고속 스크리닝을 통해 광범위한 조성 영역을 탐색하고 포괄적인 합금 데이터베이스를 구축하였다. 이를 바탕으로 도출된 대표 조성 6종을 대상으로 고온 기계적 물성 및 미세조직 변화를 분석하여 다원계 내화강에서 고온 강도 발현 메커니즘을 규명하고자 하였다. 도출된 6종 조성에 대해 고온 인장시험과 미세조직 분석을 수행한 결과 상온에서는 유사한 항복강도를 보였으나 고온(600 ºC)에서는 극명한 항복강도 차이가 발생하여 그 중 4종(Mo강, Mo–V강, Nb–Ti–W–Mo강, Nb–Ti–W–V강)이 내화강 규격(상온 대비 고온 항복강도를 2/3 이상)을 만족함을 확인하였다. EBSD 미세조직 분석 결과, 설계 합금들은 고온 노출 과정에서 기지 내 잔류하던 마르텐사이트/오스테나이트(M/A) 섬 조직의 열적 분해가 유도되어 잔류 오스테나이트 분율이 감소함과 동시에 2차 탄화물의 석출이 촉진됨을 규명하였다. 이는 합금 조합별로 서로 다른 2차 석출강화 거동이 고온 강도를 결정하는 주된 메커니즘임을 시사한다. APT 및 STEM–EDS 분석 결과, 탄화물 형성 원소들은 단독으로 첨가되었을 때보다 다른 원소와 복합적으로 작용할 때 석출물의 조대화가 억제되고 보다 미세한 석출물이 형성되어 더욱 효과적인 석출강화 효과를 나타냄을 확인하였다. 그중 (Mo, W)C계 석출물은 W의 partitioning을 통한 석출물 미세화 효과로 6강종 중 가장 좋은 석출강화 효과를 나타냈다. 특히 Mo를 배제한 Nb–Ti–W–V 합금계에서도 W가 VC 석출물에 partitioning되어 조대화를 억제함으로써, 원소 간 상호작용을 통해 강화 효과가 크게 증대되어 내화강 요건을 충족할 수 있었다. 본 연구는 고가의 전략 원소인 Mo를 대체할 수 있는 유망한 합금 조성 설계안을 제시함과 동시에, 다성분계 합금에서 고용 원소의 조합에 따른 고온 물성 변화 메커니즘을 규명하였다는 점에서 의의를 갖는다. 이러한 결과는 탄화물 형성 원소 간의 상호작용에 대한 새로운 이해를 제공할 뿐 아니라 고속 전산 합금 설계 기법이 경제적인 차세대 내화강 개발에 활용될 수 있는 잠재력을 입증하며 향후 내화강 설계를 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

[철강B3-1 | 13:30]

고노점 탈탄 기술 적용 2.0GPa급 고굽힘형 핫스탬핑 강종 개발: 강재욱*, 김제우수, 유병길, 박민서, 황석민(현대제철 기술연구소)

Keywords: 철강, 핫스탬핑 강판, 탈탄 기술

최근 자동차 산업에서는 연비 향상 및 전동화 대응을 위한 차체 경량화 요구와 더불어 지속적으로 가혹화되고 있는 차체 충돌 성능 평가법 트렌드에 따라 충돌 안전성 확보를 동시에 만족시키기 위한 고강도 소재의 적용이 확대되고 있다. 특히, 핫스탬핑강(Press-Hardened Steel, PHS)은 열간 성형과 금형 내 급냉을 통해 마르텐사이트 조직을 형성함으로써 인장강도 1.5 GPa 이상의 초고강도를 요구하는 자동차 구조 부재에 널리 적용되고 있으며, 추가적인 경량화 및 충돌 성능 향상을 위해 2.0 GPa급 이상의 핫스탬핑강의 적용이 주목받고 있다. 그러나 2.0 GPa급 핫스탬핑강은 성형 후 형성되는 고강도의 마르텐사이트 조직으로 인해 굽힘성이 저하되고 표면 균열에 대한 민감도가 증가할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 도금 전 열처리로의 노점 제어를 통해 강판 표면에 제어된 탈탄층을 형성하였다. 노점 제어에 의해 강판 표면에 약 50 μm 두께의 페라이트 조직 기반 탈탄층이 형성되었으며, 이후 핫프레스 성형 과정에서 표층부에 상대적으로 연질인 저경도 마르텐사이트 조직이 형성되었다. 이러한 탄소 농도 구배에 의한 저경도 마르텐사이트로부터 내부 고강도 마르텐사이트로 구성되는 구배 미세조직은 굽힘 변형 시 표면의 변형 집중과 균열 발생을 억제하였다. 그 결과, 내부의 높은 강도를 유지하면서 굽힘성이 유의미하게 향상되었으며, 축방향 충돌 시험에서도 균열 발생이 감소하고 안정적인 변형 거동이 나타났다. 따라서 표면 탈탄을 이용한 미세조직 제어는 2.0 GPa급 핫스탬핑강의 강도와 굽힘성 간 상충관계를 개선하는 효과적인 방법이며, 자동차 차체 부품 적용 시 균열 억제와 충돌에너지 흡수 성능 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

[철강B3-2 | 13:45]

트램프 원소 함량에 따른 기계적 성질 영향 연구: 이석규*(현대자동차)

Keywords: 철강, 트램프 원소, 기계적 특성, 탄소저감 강판, 전기로

철강 산업의 탄소중립 및 자원순환 요구가 확대됨에 따라 여러 철강사들이 고로 공정에서 전기로 공정으로 전환하고 있으며, 철스

크랩, DRI 등을 주요 원료로 활용하는 전기로 공정의 특성 상 트램프 원소 제거가 어렵고 Cu, Sn 등 트램프 원소의 축적을 동반하며, 자동차용 강판의 특성에 영향을 미치고 있다. 트램프 원소의 누적은 미세조직 안정성, 기계적 특성 등 소재 특성에 영향을 미칠 수 있고 차체 부품 적용 시 성형성, 용접성, 수소취성 등과 같은 품질 이슈를 야기할 수 있다. 본 연구에서는 탄소저감 강판에서 스크랩 활용 시 유입될 수 있고 제어가 어려운 Cu, Sn, N 등의 영향을 확인하기 위해, 일반적인 고로재 성분을 기반으로 각 트램프 원소 함량을 제어한 랩 스케일 합금을 제조하고 미세조직, 인장특성을 분석하여 강종별로 트램프 원소가 소재 특성에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다.

[철강B3-3 | 14:00]

Mechanism of enhanced J-Integral fracture toughness in TRIP-maraging steel developed via segregation engineering: 예정원, 김민석, 박은수*(서울대학교)

Keywords: Maraging steels, nano precipitation, Grain boundary segregation engineering, Austenite reversion, BCC decomposition, J-based fracture test

마레이징 강(Maraging steel)은 로켓 엔진 케이스, 잠수함 선체 및 극저온 미사일과 같은 중요한 응용 분야에서 중요한 부품으로 사용되는 중요한 소재이다. 그러나 고강도가 요구되는 환경에서 주로 사용되는 마레이징 강은 강도-연신 trade-off를 극복하지 못하며 취성 특성을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서 Intragranular complex compound 석출에 의해 초고강도 특성을 가지는 Martensite 기지를 갖는 합금에Segregation engineering을 통하여 complexion 석출제어를 통한 마레이징 CCA의 고인성화를 달성하고자 한다. 이를 위해 grain boundary segregation 경향성을 정량적으로 평가하기 위하여 segregation enthalpy를 계산하였다. Segregation enthalpy는 1 mol의 고용원소가 입계로 편석될 때 발생하는 전체 시스템의 에너지 변화로 정의되며, 이를 통해 segregation enthalpy가 양의 값을 나타내는 원소를 도출하였다. 결과적으로 Mn 원소가 첨가되는 다른 원소에 대해 양의 segregation enthalpy를 갖는 것을 확인하였다. 또한 Mn 원소는 Fe 기반 합금에 첨가되었을 때 FCC 상의 안정성을 크게 증가시킨다고 알려져 있어Mn 원소를 segregation engineering의 최적 원소로 선정하였다. 이 합금 설계 전략을 통해 intergranular에 FCC 오스테나이트(Y) 상이 석출된 합금을 설계할 수 있었다. 그러나 연성 FCC Y 상이 석출에 의해 발상하는 강도-연신 trade-off를 극복하기 위해, 열역학적 계산을 통해 석출된 FCC Y 상의 안정성이 낮은 합금을 선정함에 따라 변형 중 마르텐사이트 변태가 발생하는 변형 기구 (TRIP)를 갖는 합금을 설계하였으며, 추가적으로 pseudo ternary에서 miscibility gap에 의한 BCC decomposition으로 인해 석출되는 α-Mn상의 석출 가능 열처리 조건을 최적화하여 약 1GPa 정도의 우수한 강도를 갖는 합금을 선정하였다. 또한 상기 전략에 따라 설계된 TRIP 마레이징 강의 J-based 균열 저항 곡선(J–R curve) 및 비선형 탄성 파괴역학 분석을 수행하여 균열 성장 과정에서의 elastic 및 plastic 기여를 정량적으로 고찰하였다. 그 결과, 상용 마레이징 강 대비 우수한 J-integral 파괴 인성을 나타냄을 확인하였다. 이러한 인성 향상의 기원을 규명하기 위하여 SEM–STEM 분석을 통해 마르텐사이트 래스 간 거리와 해당 영역 내 orientation distribution을 분석하였으며, 이를 기반으로 균열 전파 경로와 미세조직 간의 상관관계를 고찰하였다.

[철강B3-4 | 14:15]

Quantitative Analysis of Precipitation and Recrystallization Behavior in Ti-Nb Alloyed Cold-Rolled UHSLA Steels with Different Contents: Sang Hun Shin*, Changgeun Lee(Hyundai Steel), Asmaa Albeltagy, Alexander Gramlich(RWTH AACHEN, STEEL INSTITUTE)

Keywords: Recrystallization kinetics, Quantitative precipitate analysis, Ti-Nb alloying, Zener pinning, UHSLA steel

This study investigates the effects of titanium content on precipitation and recrystallization in Ti-Nb alloyed cold-rolled ultra-high-strength low-alloy steels containing 1000, 1500, 2000 ppm Ti. Microstructural evolution was examined under various soaking temperatures and holding times. Precipitate size, morphology, number density, and volume fraction were quantitatively characterized using transmission electron microscopy and in-situ X-ray diffraction. Recrystallization behavior was evaluated through Vickers hardness and electron backscatter diffraction, focusing on the recrystallized fraction, grain orientation spread, grain morphology, and crystallographic texture. The measured results further examined classical models. Recrystallization kinetics and precipitate-induced boundary retardation were assessed using the Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov model and Zener pinning relationships, respectively. Strengthening contributions were estimated using the Ashby-Orowan and Hall-Petch equations. The results show that titanium content controls recrystallization through changes in precipitate size distribution, number density, volume fraction, and thermal stability. This combined experimental and analytical approach clarifies the coupled precipitation-recrystallization behavior and provides guidance for optimizing alloy composition and annealing conditions in Ti-Nb alloyed UHSLA steels.

[철강B3-5 | 14:30]

잔류 오스테나이트 역할에 대한 신경망의 해석: 강전연*(한국재료연구원), 강민우, 김동휘(현대자동차)

Keywords: 신경망, 철강, 미세조직, 인장물성

잔류 오스테나이트를 포함하는 다상복합조직 강판의 미세조직을 신경망을 활용해 분석하였다. 19 개의 상용 고장력강판 미세조직을 후방산란전자회절을 활용해 기록하였고, 상온 인장물성을 측정하였다. 다결정 금속 미세조직 인식에 최적화된 합성곱신경망 구조와 목적함수를 구성하였고, 측정된 미세조직-물성 데이터에 대해 훈련시켰다. 도출된 모델은 상구성에 따른 강도-연신율 분배, 상계면에 의한 항복강도 강화 등의 야금학적 기본 원리를 시각적으로 충실히 재현하였으며, 저온변태상에 의한 취성을 보완해주는 잔류 오스테나이트의 특징적인 연성과 가공경화능을 예측하였다.

[철강B3-6 | 14:45]

잔류 오스테나이트 특성에 따른 고성형 초고장력 강판 성형성 향상 메커니즘: 엄호용*, 김로사, 이선규, 문주연, 이상욱, 박진성(현대제철연구소)

Keywords: 3세대 강판, 초고장력 강판, 초기 미세조직 효과, 성형성, 잔류 오스테나이트

자동차 부품의 형상이 점차 복잡해짐에 따라, 자동차용 초고강력 강판(AHSS)에는 높은 복합 성형 모드(Global Formability, Local Formability)가 성형성이 요구되고 있다. 이에 대응하기 위해 개발된 고성형 초고강도강 중 하나인 3세대 강판은 최종 미세조직 내 잔류 오스테나이트(Retained Austenite, RA)에 기인한 변형유기상변태(TRIP) 효과를 통해 우수한 강도와 연성을 동시에 확보할 수 있다. 그러나 지금까지의 연구는 주로 잔류 오스테나이트의 분율 제어를 통한 연신율 향상에 집중되어 왔으며, 특히 국부 및 난성형에 필요한 홀확장성(Hole Expansion Ratio, HER)과의 관계 도출도 필요하다. 본 연구에서는 냉간프레스용 고성형 초고장력 강판인 3세대 강판을 활용하여 잔류 오스테나이트 특성과 성형성 간의 상관관계를 분석하고자 한다. 특히 최종 미세조직 내 지배적인 기지조직(Matrix Microstructure)을 유지한 상태에서 잔류 오스테나이트의 형상(필름형(Film-type)과 블록형(Blocky-type)) 및 그 비율을 제어하여, 잔류 오스테나이트 형상에 따른 안정도 차이 및 구성 비율이 제품의 성형성(연신율, 홀확장성)에 미치는 영향을 규명하여 잔류 오스테나이트의 분율, 형태 및 안정성과 성형성 간의 상관 관계를 확인하고자 한다. 이를 통해 향후 산업계에서 요구할 수 있는 차세대 고성형 초고강력 강판 개발을 위한 미세조직 컨셉을 구축하고자 한다.

[철강B3-7 | 15:00]

열간 압하율에 따른 마르텐사이트강 구멍확장비(HER) 연구: 머신러닝 기법을 활용한 기계적 시험 기반 HER 예측: 이승호, 정든봄, 김이재(서울대학교 재료공학부), 이제웅, 김성일(POSCO 광양 기술연구소), 채준영*, 한흥남*(서울대학교 재료공학부)

Keywords: 열연 마르텐사이트, 미세조직 분석, Prior austenite grain, 구멍확장비 (hole expansion ratio, HER), 탄화물 석출, 머신 러

자동차 산업에서는 차체 경량화 및 충돌 안전성 확보를 위해 열연 마르텐사이트강의 적용이 확대되고 있으나, 높은 강도에 비해 열위한 구멍확장성은 부품 적용을 제약하는 주요 원인이다. 특히, 마르텐사이트강의 구멍확장성은 인장강도와 연신율과 같은 기계적 특성만으로 설명하기 어려우며, 다양한 하부조직을 비롯한 미세조직적 특성에 대한 이해가 필수적이다. 본 연구에서는 동일한 화학조성을 가지지만 서로 다른 열간 압하율로 제조된 두 종류의 열연 마르텐사이트강을 대상으로 열연 조건에 따른 미세조직 변화와 구멍확장성의 상관관계를 분석하였다. 구멍확장비 (Hole Expansion Ratio, HER)은 방전가공 구멍에서 측정한 소재 고유의 HER인 HER_0와 펀칭에 따른 HER 감소율을 나타내는 ΔHER로 분리하여 평가하였다. 이 때, 열연 마르텐사이트강의 HER은 소재 자체의 변형능 뿐 아니라 펀칭에 대한 민감도에 의해 함께 결정되며, 두 요인의 서로 반대되는 경향으로 인해 HER_0가 높은 강재가 더 큰 ΔHER을 보여 펀칭 공정 후의 HER이 오히려 낮아지는 현상을 확인하였다. 미세조직 분석 결과 열연 압하율 차이는 Prior Austenite Grain (PAG) 크기와 마르텐사이트강 내부의 탄화물 석출 거동을 변화시켰다. 조대한 PAG를 가지는 강재는 더 적은 결정립 분율에 의해 탄소가 밀집되어 탄화물 석출이 활성화되고, 이로 인한 국부적인 균열 개시와 취성 파괴 거동으로 인해 미세한 PAG을 가지는 강재와 일축 인장 및 전단 변형 시험, 그리고 구멍확장시험에서의 변형 및 파괴 거동이 달라져 기계적 물성에 차이를 가져오는 것으로 확인하였다. 본 연구에서는 열연 마르텐사이트강에서 압연 조건에 의해 형성된 PAG와 탄화물 석출 특성이 기계적 물성을 각각 다르게 변화시킬 수 있음을 규명하였다. 이에서 나아가, HER_0와 ΔHER을 분리하여 구멍확장시험과 펀칭의 대체 시험법인 일축 인장 시험과 전단 변형 시험의 결과에서 도출한 파라미터들을 통해 HER_0과 HER을 별도로 예측하는 머신러닝 모델을 개발하였다.

[철강B3-8 | 15:15]

Deep Learning-Based Automated Identification and Quantification of Complex Low-Temperature Transformation Microstructures in Advanced High-Strength Steels: PARK TAECHANG*(현대제철), LIM YONGSOO, KIM JINKYUNG*(한양대학교), KANG HUNCHUL(현대제철)

Keywords: Advanced High-Strength Steels (AHSS), Nanoindentation, Deep Learning, Automated Microstructure Quantification

Advanced high-strength steels (AHSS) achieve an excellent balance between strength and ductility through the control of complex multiphase microstructures. Among them, Quenching and Partitioning (Q&P) steels and Complex Phase (CP) steels consist of various low-temperature transformation microstructures such as ferrite, martensite, bainite, and retained austenite, whose fractions and distributions critically influence mechanical properties. However, the reliable identification and quantification of individual microstructural constituents remain challenging due to their similar morphological characteristics and complex spatial distributions observed in scanning electron microscopy (SEM) images. In particular, Q&P steels contain fresh martensite and tempered martensite, which coexist as complex low-temperature transformation microstructures. Fresh martensite, formed during rapid quenching, exhibits a body-centered tetragonal (BCT) structure with high carbon supersaturation, contributing significantly to strength. In contrast, tempered martensite undergoes carbon diffusion and carbide precipitation during subsequent partitioning or tempering treatments, resulting in a softened microstructure with enhanced ductility and toughness. Similarly, CP steels contain bainitic microstructures that play a critical role in achieving a desirable balance of strength, ductility, and hole-expansion performance. Nevertheless, these constituent phases are difficult to distinguish and quantify accurately using conventional metallographic analysis alone. In this study, an automated microstructure classification framework based on nanoindentation testing and deep learning was developed for the identification and quantification of complex low-temperature transformation microstructures in AHSS. SEM image datasets were constructed using microstructural regions labeled according to hardness values obtained from nanoindentation measurements. Various deep learning architectures and hyperparameter combinations were systematically evaluated to determine the optimal model for microstructure

classification. The methodology was first applied to distinguish fresh martensite and tempered martensite in Q&P steels and subsequently extended to identify bainitic microstructures in CP steels. Furthermore, image-processing techniques were incorporated into the training workflow to enhance characteristic microstructural features and improve classification performance. The proposed approach demonstrates the feasibility of automated identification and quantitative analysis of complex low-temperature transformation microstructures that have been difficult to classify using conventional methods. The developed framework is expected to provide a practical tool for microstructure characterization and quality control in advanced high-strength steel development and manufacturing.

[철강B4-1 | 15:40]

고내구화 대응을 위한 디프 피니언 샤프트 소재 및 열처리 연구: 이준영*, 강창원, 박재홍(현대자동차)

Keywords: 디프 피니언 샤프트, 굽힘 피로, 산질화, 화합물층, 잔류 응력

최근 자동차 산업의 전동화 전환에 따라 파워트레인 구동계 부품의 응력 밀도가 급증하고 있다. 특히 디프 피니언 샤프트는 전기차 특유의 즉각적인 최대 토크 발현과 회생 제동으로 인해 가혹한 굽힘 하중을 받으며, 기존 범용 구조용 강재인 SCM435H에 산질화 처리를 적용한 양산 사양은 피로 강도의 한계를 보이고 있다. 이에 본 연구는 기존 소재를 대체하여 고내구성을 확보할 수 있는 최적의 소재 및 열처리 공정을 도출하고자 하였다. 평가 대상으로는 질화 전용강인 31CrMoV9과 고탄소 베어링강인 SUJ2를 선정하였으며, 표면처리 조건으로 산질화 및 인산염 피막 처리를 조합하여 총 네 가지 사양에 대한 비교 평가를 수행하였다. 실제 대형 변속기 샤프트 형상의 단품 및 시편을 제작하여 정강도, 굽힘 피로, 잔류 응력, 인장 및 충격 시험, 미세조직 및 표면 경도 분석을 진행하였다. 평가 결과, 굽힘 피로 한도 측면에서는 SUJ2에 인산염 피막을 적용한 사양이 가장 우수했으나, 충격 인성이 극히 저조하여 실제 구동 환경에서 충격 하중 인가 시 취성 파괴의 위험이 높은 것으로 나타났다. 반면 31CrMoV9에 산질화 처리를 적용한 사양은 기존 SCM435H 대비 뚜렷하게 향상된 피로 강도와 양호한 충격 인성을 동시에 확보하였다. 특히 파괴역학적 관점에서 산질화 공정 시 생성되는 최표면 화합물층(Compound layer)의 두께가 피로 수명에 미치는 영향을 분석한 결과, 31CrMoV9이 SCM435H보다 더 얇은 화합물층을 형성하는 것으로 확인되었다. 화합물층을 초기 피로 균열로 간주하여 파리스 법칙(Paris' law)을 적용했을 때, 이러한 화합물층의 두께 차이가 응력 확대 계수(ΔK)를 낮추어 31CrMoV9의 피로 균열 진전 속도를 기존 대비 크게 지연시키는 것으로 규명되었다. 또한, 합금 원소(Cr, V)에 의한 미세 질화물 석출 강화 기구로 인해 31CrMoV9이 더 우수한 표면 경도를 나타내는 것을 확인하였다. 결론적으로, 기계적 물성과 파괴역학적 요인을 종합할 때 31CrMoV9 소재에 산질화 처리를 적용하는 것이 가혹한 파워트레인 환경에서 디프 피니언 샤프트의 고내구화를 달성하기 위한 최적의 사양임을 확인하였다.

[철강B4-2 | 15:55]

Effect of Annealing Temperature on Nano-Precipitation Behavior and Strengthening Mechanisms of EAF-Based 1000 MPa Grade Cu-Bearing HSLA Steel: Chang Geun Lee*, Sang Hun Shin, Jong Hyun Jeong, Su Heon Kim(Hyundai Steel), Asmaa Elbeltagy, Alexander Gramlich(RWTH Aachen University)

Keywords: EAF-based steel, 1000 MPa-grade HSLA steel, nano-precipitation, APT, TEM

To expand the use of carbon-neutral electric arc furnace (EAF) feedstocks, a 1000 MPa-grade HSLA (High Strength Low Alloy) steel was developed using a low-carbon, Cu-bearing Ti-Nb-V-Mo microalloyed composition. Tensile testing, EBSD, TEM, and atom probe tomography (APT) were employed to clarify the relationships among annealing temperature, microstructural evolution, precipitation behavior, and mechanical properties. TEM revealed 1-20 nm NaCl-type (Nb, Ti, V)C complex carbides. APT further confirmed Nb-Ti-V-Mo-rich clusters and nanoscale precipitates within the ferritic matrix and at grain boundaries after cold rolling and annealing. Under the low-temperature annealing condition, a refined ferritic microstructure together with a high density of nanoscale precipitates enabled a yield strength exceeding 1000 MPa. These results demonstrate that precipitation strengthening and grain refinement are the principal strengthening mechanisms. Although distinct Cu precipitates were not identified, the developed alloy achieved the target strength under EAF-compatible steel chemistry, providing a practical alloy and process design strategy for ultra-high-strength cold-rolled HSLA steel.

[철강B4-3 | 16:10]

API X60강의 수소 주입 전후의 마모 거동 및 메커니즘 분석: 한지혜, 이승준*(한국공학대학교)

Keywords: API X60강, 마모, 수소 주입

본 연구에서는, API X60강의 수소 주입 전후에 따른 마모 거동과 마모 메커니즘의 변화를 체계적으로 분석하였다. 수소 주입은 ex-situ 전기화학적 방법으로 수행하였으며, 40 g NaOH + 3 g NH_4SCN 수용액에서 1.0 mA/cm^{2}의 전류밀도로 상온에서 24시간 동안 진행하였다. 마모 특성 평가는 reciprocating 방식의 ball-on-disc로 수행하였으며, 15 N의 하중에서 마모 거리 50 m 부터 1000 m 까지의 조건으로 진행하였다. 이후, 주사 전자현미경과 전자 후방산란 회절은 활용하여 마모 형상 및 트랙을 정밀 분석하여, 수소 주입 전후 API X60강의 마모 거리별 내마모 특성에 미치는 영향을 비교하교 마모 메커니즘을 규명하고자 한다.

[철강B4-4 | 16:25]

해양 구조용 강재의 인성에 미치는 응력 환경 및 트램프 원소의 영향: 오성탁*, 윤덕빈, 이형근, 이상협, 김영우, 한성경(현대제철)

Keywords: 철강, 트램프 원소, 조직, 인성

탄소중립을 향한 전 세계적인 전환이 가속화됨에 따라 친환경 철강재 생산을 위한 전기로 제강 공정의 적용이 확대되고 있다. 전기로 공정은 기존 고로 공정과 비교하여 철스크랩 사용 비율이 높기 때문에 Sn 및 N과 같은 트램프 원소의 함량이 불가피하게 증

가한다. 이러한 성분 변화에 대응하여 해양구조용 강재의 인성 신뢰성을 확보하는 것은 중요한 기술적 과제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 인장 및 압축 응력 상태에서 Sn과 N이 해양구조용 강재의 기계적 특성, 특히 충격인성에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 기존 연구에서는 Sn이 결정립계에 편석되어 취화를 유발하는 원소이므로, Sn 첨가가 강재의 충격인성을 저하시키는 것으로 일반적으로 보고되어 왔다. 그러나 이러한 연구 결과는 대부분 외부 응력이 작용하지 않는 무응력 조건에서 도출되었으며, 응력이 부가된 상태에서 트램프 원소가 강재의 인성에 미치는 영향은 아직 명확히 규명되지 않았다. 이에 본 연구는 크게 세 단계로 수행되었다. 첫째, Sn 및 N이 첨가된 강재를 대상으로 미세조직, 기계적 특성 및 표면 특성에 대한 기초 분석을 수행하였다. 둘째, 인장 및 압축 응력 조건이 충격인성에 미치는 영향을 분석하였다. 마지막으로, 트램프 원소 및 응력 상태에 의한 인성 저하를 방지하기 위한 방안을 검토하였다. 실험 결과, 무응력 조건에서는 Sn 및 N의 첨가가 충격인성에 유의미한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 반면, 응력이 작용하는 조건에서는 충격인성이 뚜렷하게 감소하였다. 이러한 거동의 원인을 규명하기 위하여 인장 및 압축 응력이 부가된 영역에서 채취한 시험편을 대상으로 추가 분석을 수행하였다. 응력 상태에 따른 충격인성 변화와 트램프 원소의 작용 거동에 관한 상세한 결과 및 고찰은 발표에서 제시하고자 한다.

[철강B4-5 | 16:40]

자동차용 GI, GA 및 Al-Si 도금강판의 침식-부식 복합 환경에서의 EIS 기반 전기화학 특성 및 표면 손상 거동 비교 평가: 최호준*, 김혜진(한국공학대학교 신소재공학과)

Keywords: 부식, 침식, 도금강판, 전기화학 임피던스 분광법

본 연구에서는 자동차용 도금강판인 용융아연도금강(Galvanized Steel, GI), 합금화 용융아연도금강(Galvannealed Steel, GA), 그리고 Al-Si 도금강판을 대상으로, 도금층 특성 및 침식-부식 복합 열화 조건에 따른 손상·부식 거동 차이로 체계적으로 비교·평가하였다. 자동차용 도금강판은 주행 중 자갈·모래 등에 의한 물리적 충격(침식)과 염화물 노출(부식)이 복합적으로 작용하는 환경에 상시 노출되나, 이러한 복합 열화 조건에서 도금층 종류에 따른 손상 및 부식 거동을 정량적으로 분석한 연구는 여전히 부족한 실정이다. 특히 침식과 부식은 작용 순서에 따라 상호작용 양상이 달라지므로, 두 인자의 결합 방식을 구분한 체계적 평가가 요구된다. 이에 본 연구에서는 세 종류의 도금 강판에 대하여 염화물 침지만을 수행한 부식 조건, water jet 침식만을 수행한 침식 조건, 침식을 선행한 후 염화물에 노출시킨 침식-부식 조건, 부식을 선행한 후 침식을 가한 부식-침식 조건의 네 가지 처리를 적용하여, 손상 이력에 따른 거동 변화를 규명하고자 한다. 부식은 3.5 wt% NaCl 용액에 3일간 침지하여 유도하며, 침식은 부식 기여를 배제한 순수 기계적 손상을 분리하기 위해 water jet 장비를 이용하여 탈이온수(DI water)를 분사함으로써 수행한다. 각 조건에 대하여 개방회로 전위(OCP), 전기화학 임피던스 분광법(EIS), 동전위 분극시험(PD)을 체계적으로 수행하고, 시험 후 시편의 표면 및 단면을 주자전자현미경(SEM-EDS)으로 고나찰하여 도금층의 상조성, 물리적 결함 형태, 부식 생성물의 형성 거동을 분석하며, X선 회절분석(XRD)을 통해 부식 생성물의 상을 동정하고자 한다. 특히 침식에 의해 형성된 도금층 결함이 후속 부식의 개시·전파에 미치는 영향과, 선행 부식으로 생성된 부식 생성물층이 후속 침식 저항성에 미치는 영향을 구분하여, 손상 순서에 따른 상호작용을 전기화학적 인자와 연계하여 고찰하고자 한다. 이를 통해 세 도금강판 간의 부식 전위, 부식 전류밀도, 분극저항 및 임피던스 특성 차이를 정량적으로 비교하고, 서로 다른 도금층 구조가 물리·화학적 복합 환경에서 나타내는 내식성 열화 거동을 종합적으로 규명하고자 한다.

[철강B4-6 | 16:55]

Al-Zn-Si계 도금 핫스탬핑 열처리 조건이 열간 성형 거동에 미치는 영향: 이재민, 소성민*, 정창우*(현대제철연구소)

Keywords: 핫스탬핑, 열간 성형, Al-Zn-Si 도금, 액상금속취성

자동차 산업에서는 차량 경량화와 충돌 안전성 향상을 동시에 달성하기 위해 핫스탬핑(Hot Stamping) 공정을 적용한 초고강도강(UHSS)의 사용이 지속적으로 확대되고 있다. 그러나 기존 Al-Si 코팅 핫스탬핑강은 희생방식(Sacrificial Protection)에 의한 내식성 확보가 어렵고 수소취성에 취약하다는 한계를 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 GI(Galvanized) 및 GA(Galvannealed) 도금강판이 핫스탬핑용 소재의 대안으로 연구되어 왔다. 특히 GA 도금은 우수한 내식성을 제공하지만, 공정 제어 범위가 좁고 ZnO 산화물 제어가 요구되며, 액상금속취성(Liquid Metal Embrittlement, LME) 발생 위험이 높다는 문제점을 갖고 있다. 최근에는 이러한 한계를 극복할 수 있는 대안으로 Al-Zn-Si 도금이 주목받고 있다. 본 연구에서는 Al-Zn-Si 도금강판의 열간 변형 거동에 미치는 열처리 조건의 영향을 체계적으로 조사하였다. 핫스탬핑 공정 중 발생하는 열적·기계적 조건을 모사하기 위해 Gleeble 시험기를 이용한 고온 인장시험을 수행하였다. 실험 결과, 가열 온도 930 ℃, 유지 시간 60초 및 변형 온도 650 ℃ 조건에서 액상금속취성의 발생으로 인해 인장강도와 연신율이 현저하게 감소하는 것으로 나타났다. 미세조직 분석 결과, 균열 경로를 따라 아연(Zn)이 농축된 현상이 관찰되었으며, 이는 액상 아연이 결정립계를 따라 침투함으로써 LME가 발생하였음을 확인시켜 주었다. 반면, 유지 시간을 증가시키고 변형 온도를 낮춘 조건에서는 LME 발생이 효과적으로 억제되었으며, 이에 따라 강도 및 연성 특성이 향상되는 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 Al-Zn-Si 도금 핫스탬핑강의 열처리 조건과 변형 거동 간의 상관관계에 대한 기초적인 이해를 제공하며, 향후 최적 공정 조건 수립과 LME 저감 기술 개발을 위한 유용한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[철강B4-7 | 17:10]

핫스탬핑용 Zn-Ni 및 Al-Zn-Si-Mg-Ca 용융도금층의 오스테나이징 후 미세구조 변화 및 내식 특성: 왕은찬(한국생산기술연구원, 전남대학교), 최윤일*(한국생산기술연구원), 박찬진(전남대학교)

Keywords: hot press forming (HPF), hot-dip coating, corrosion resistance

핫스탬핑 (Hot Press Forming, HPF)용 자동차 강판은 약 900 ℃ 이상의 오스테나이징 열처리 중 발생하는 고온 산화와 탈탄을 억제하기 위해 용융도금 공정이 적용된다. Zn계 도금은 우수한 희생방식 성능을 가지지만 액상 Zn에 의한 액체금속취화(Liquid

Metal Embrittlement, LME) 가능성이 있으며, Al계 도금은 고온 안정성이 우수한 반면 희생방식 성능이 제한적이다. 본 연구에서는 이러한 상반된 장단점을 개선하기 위해 (1) Zn-xNi계 도금과 (2) Al-xZn-Si-Mg-Ca계 도금을 구분하여 오스테나이징 전후의 미세구조, 전기화학적 특성, 내식성 및 고온 인장 중 LME 거동을 평가하였다. 첫째, Zn-xNi계 도금층은 초기 δ-NiZn상과 ζ-FeZn계 금속간화합물로 구성되었으며, 오스테나이징 후 Fe 확산에 따라 α-Fe(Zn)상과 γ-FeZn상이 형성되었다. Ni는 γ-FeZn상에 주로 고용되어 해당 상의 고온 안정성을 높이고 열처리 후에도 γ상이 잔존하는데 기여한 것으로 판단된다. 열처리 후 도금층은 모재와 약 0.25-0.35 V의 부식전위 차이를 나타냈으며 잔존 γ상은 안정적인 희생양극 구동력 확보에 기여하였다. 또한 고온 인장시험에서는 모재 내부까지 전파되는 LME 균열은 관찰되지 않았다. 둘째, Al-xZn-Si-Mg-Ca계 도금층은 오스테나이징 후 모재 상부에 Fe-Al 합금화층이 형성되고 그 상부에 Zn 함유상(Zn-containing phase)이 잔존하였다. Zn 함량이 증가할수록 Zn-rich 영역은 증가한 반면 Fe-Al 합금화층의 성장은 감소하였다. 열처리 후 도금층은 모재와 약 0.43-0.60 V의 부식전위 차이를 나타내어 높은 희생양극 구동력을 확보하였다. 또한 복합염수분무시험(Cyclic Corrosion Test, CCT)에서는 기존 Al-Si 도금재보다 적녹 출현 시점이 약 18-64배 지연되었다. 그러나 Zn 함량이 높은 시편에서는 고온 인장 중 Zn에 기인한 LME 균열이 모재 내부로 전파되면서 조기 파단이 발생하였다. 종합하면, Zn-xNi계 도금은 Ni에 의한 γ-FeZn상의 고온 안정화를 통해 희생방식 성능을 유지하면서 LME 민감도를 낮출 수 있었다. 반면, Al-xZn-Si-Mg-Ca계 도금은 오스테나이징 후 Zn 함유상을 잔존시켜 Al계 도금의 희생방식 성능과 내식성을 크게 향상시켰으나, Zn 함량 증가에 따른 LME 위험이 확인되었다. 따라서 Zn-xNi계의 핵심 설계 인자는 γ-FeZn상의 고온 안정화이며, Al-xZn-Si-Mg-Ca계에서는 Zn 함유상 확보와 LME 억제를 동시에 만족하는 Zn 함량 최적화가 필요하다.

[철강B4-8 | 17:25]

Optimization of cryogenic thermal conductivity via microstructure tailoring in 316L stainless steel: Seungmin Jeon, Young Kyun Kim, Tae Jin Jang, Hyun Jun Kwon, Young Sang Na*(한국재료연구원)

Keywords: Liquid hydrogen storage tank, Thermal conductivity, Mechanical Properties, Microstructural tailoring

The challenge of conductive heat intrusion, driven by the large thermal gradient from room temperature (300 K) to cryogenic temperature (20 K) in liquid hydrogen (LH2) storage tank component was addressed by lowering the thermal conductivity of stainless steel via microstructural tailoring. In this study, the thermal conductivity of STS 316L, a widely used material for cryogenic storage tanks, was effectively reduced from room temperature (300 K) to cryogenic temperature (20 K) by controlling dislocation density and grain size. The total thermal conductivity was further decomposed into its electronic and phononic contributions, and the influence of microstructural tailoring on each component was quantitatively analyzed. Furthermore, the relationship between thermal and mechanical properties was explored through cryogenic tensile testing. Based on the findings, heat transfer simulations were conducted, demonstrating that microstructural tailored STS 316L can effectively suppress heat intrusion in LH2 storage tank. These findings provide valuable insights for mitigating conductive heat intrusion and enhancing the efficiency of LH2 storage systems.

상변태
Room 1층 108호, 10월 28일

[상변태1-1 | 10:00] 초청강연

결정학적 제어를 통한 Ti-Zr-Hf HCP 다성분계 합금의 변형기구 조절: 윤국노*(University of California, Berkeley, 국립한밭대학교), Haomin Lyu, Xiaoyu Chen, Andrew M. Minor, Mark Asta(University of California, Berkeley, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley), Daryl Chrzan, Peter Hosemann*(University of California, Berkeley)

Keywords: 고엔트로피 합금, HCP 구조, c/a 비, 소성, 변형기구

일반적으로 HCP 구조를 갖는 금속은 제한된 슬립계로 인해 FCC 구조에 비해 소성변형의 자유도가 낮고, 높은 강도와 연성을 동시에 확보하기 어려운 것으로 알려져 있다. 그러나 HCP 구조는 조성과 결정학적 특성에 따라 슬립, 변형쌍정 및 적층결함과 같은 다양한 변형기구의 상대적 활성도를 조절할 수 있다는 점에서 새로운 합금 설계 가능성을 제공한다. 본 연구에서는 단일 HCP 고용체를 형성하는 Ti-Zr-Hf 다성분계 합금을 모델 시스템으로 선정하고, 조성 변화에 따른 결정학적 특성, 미세조직 및 변형거동의 상관관계를 조사하였다. 조성 변화에 따른 c/a 비의 차이에 따라 활성 변형기구가 뚜렷하게 변화하였으며, 낮은 c/a 비의 합금에서는 변형쌍정과 적층결함이 활발하게 형성된 반면, 높은 c/a 비의 합금에서는 슬립 변형이 상대적으로 우세하게 나타났다. 또한 Hf 함량에 따라 수지상 및 마르텐사이트 래스 조직이 형성되어 초기 미세조직과 가공경화 거동에도 차이가 나타났다. 특히 등원자비 Ti-Zr-Hf 합금에서는 높은 강도와 우수한 연성이 동시에 확보되었으며, 변형쌍정의 활성화가 지속적인 가공경화에 기여하였다. 본 연구는 제한적인 소성변형 능력을 갖는 것으로 인식되어 온 HCP 구조가 조성과 결정학적 특성의 제어를 통해 다양한 변형기구를 선택적으로 활성화할 수 있는 합금 설계 플랫폼으로 활용될 수 있음을 보여준다.

[상변태1-2 | 10:25]

EV구동 모터 냉각 성능 개선을 위한 비자성 SUS소재 기초 연구: 박훈영*, 김종천, 박성환(현대자동차)

Keywords: 스테인리스, 성형, 비자성, 상변태

자동차 산업이 내연기관에서 전동화로 전환됨에 따라 전동화 부품의 폭넓은 연구가 진행 중이다. 전동화 차량은 엔진 역할을 하는 구동모터의 열 관리를 위해 냉각 플레이트를 활용한다. 현재 EV구동 모터의 냉각에는 알루미늄 냉각 플레이트가 사용되고 있지만 최근 고성능, 고출력 전기차의 수요가 증가하면서 높은 EV의 출력에 맞추기 위해 고강도 SUS(Stainless steel)를 사용한 냉각 플레이트 개발이 진행중이다. 향후 더욱 가혹한 환경에서의 구동 모터를 적용한 전기차를 출시할 것이므로, 고강도 냉각 플레이트의 개발이 더욱 필요할 것으로 보인다. 냉각플레이트의 경우 구동모터의 로터 샤프트 주변에 장착된 회전자 가운데에 장착되어 냉각 오일 흐름에 의해 회전자를 냉각시켜주는 기능을 한다. 낮은 강성을 요구하는 일반적인 전기차에서는 냉각플레이트의 주재료로 알루미늄이 활용되고 있다. 냉각플레이트의 효율은 설계 형상, 생산 기술, 재료 등의 요소에 의해 향상될 수 있으며, 고성능 EV 구동 모터일수록 고강성의 재료를 사용함으로서 EV구동모터의 내구성을 개선할 수 있다. 고강성 냉각플레이트를 위해 적용한 SUS는 부품 형상을 위한 단조성형을 실행할 시, SUS의 미세조직이 오스테나이트에서 마르텐사이트로 상변태가 발생하여 미세한 자성을 띄게 된다. 여기서 발생한 자성은 구동 모터의 효율 저하, 진동, 내구성 저하 등의 문제를 유발한다. 자동차용 모터의 경우 산업용 모터 대비 고출력, 고RPM이 요구되므로 위와 같은 문제는 더 중요시 대두된다. SUS소재의 성형량에 따른 마르텐사이트 상변태에 관한 연구는 오래 전부터 진행되고 있지만 전기차의 대중화에 따른 냉각플레이트에 요구되는 비자성질에 대한 연구는 부족함이 있다. 또한, 명확한 자화 임계량, 성형임계량에 관한 연구는 부족한 상태이므로 이에 대한 연구 개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 SUS의 소재와 성형량에 따른 자화 임계량 및 성형임계량을 신뢰성 공법을 사용하여 정량적으로 분석하였고, 해결법과 결과에 대해 다루고자 한다.

[상변태1-3 | 10:40]

압연율에 따른 Fe-Ni Invar 합금의 미세조직 및 물성 변화: 장준호, 류채우*(홍익대학교 신소재공학과)

Keywords: Invar 합금, 열팽창 특성, 자기적 특성, 냉간 압연

Fe-36 wt. % Ni Invar 합금은 자기적 상태와 격자 부피 간의 상호작용에 의해 매우 낮은 열팽창계수 (Coefficient of thermal expansion, CTE) 를 나타내며, 우수한 치수 안정성이 요구되는 고정밀 분야에 널리 활용되고 있다. 그러나 Invar 합금의 열팽창 거동은 조성 및 온도와 같은 고유 인자뿐만 아니라 냉간가공에 의해 형성되는 미세조직과 변형 상태에 의해서도 달라질 수 있다. 특히 압연율이 증가함에 따라 재료 내부에 축적되는 변형과 응력 상태가 변화하며, 이는 기계적 특성뿐만 아니라 자기적 거동과 열팽창 특성에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Fe-36 wt. % Ni Invar 합금을 대상으로 다양한 압연율에서 나타나는 미세조직 및 물성 변화를 체계적으로 분석하였다. 기계적 특성은 인장 실험 및 비커스 경도 시험을 통해 평가하였으며, Electron backscatter diffraction (EBSD)를 이용하여 압연율에 따른 미세조직과 변형 상태를 분석하였다. 자기적 특성은 Vibrating sample magnetometer (VSM)를 활용하여 평가하였고, Dilatometer (DIL)를 통해 열팽창 거동의 변화를 분석하였다. 각 물성의 변화를 비교함으로써 압연율에 따른 미세조직 및 변형 상태와 기계적·자기적 거동 사이의 연관성을 분석하고, 이러한 변화가 Invar 합금의 열팽창 특성과 어떠한 관계를 갖는지 고찰하였다. 이를 통해 냉간가공에 따른 미세조직과 변형 상태의 변화가 Invar 합금의 전반적인 물성에 미치는 영향을 규명하고, 고정밀 Invar 소재의 물성 제어를 위한 압연 공정 설계의 기초 자료를 제시하고자 한다.

[상변태1-4 | 10:55]

상용 Invar 합금의 미량 잔류 원소가 재결정 거동 및 열·기계적 특성 분석에 미치는 영향: 이희상, 류채우*(홍익대학교)

Keywords: Invar 합금, 미세구조, 열팽창계수(CTE), 기계적 물성

Invar 합금은 Fe–36 wt.%Ni 조성에서 매우 낮은 열팽창계수(Coefficient of Thermal Expansion, CTE)를 나타내어 fine metal mask, 정밀 계측 부품 및 항공우주용 구조재 등 높은 치수 안정성이 요구되는 산업 분야에 활용되고 있다. 그러나 높은 연성과 낮은 경도로 인해 가공성과 형상 안정성이 제한되며, 특히 박판 제조 및 후속 열처리 과정에서 Waviness와 같은 형상 불량이 발생할 수 있다. 상용 Invar 합금에서는 제조 과정에서 기인한 Al, Mn 및 Si 등의 미량 잔류 원소와 개재물이 존재하며, 이들은 고용 원소 또는 제2상으로 존재하면서 열팽창 특성, 재결정 거동 및 잔류 변형 상태에 영향을 미칠 수 있다. 이에 본 연구에서는 고순도 Fe–36 wt.%Ni 이원계 Invar 합금과 미량 잔류 원소를 포함한 상용 Invar 합금을 비교하여, 잔류 원소와 개재물이 미세조직 변화, 기계적 특성 및 열팽창 특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 고순도 Fe–36 wt.%Ni 합금은 진공 아크 용해(arc melting)를 통해 제조하였으며, 상용 Invar 합금과 함께 고온 균질화 열처리, 냉간압연 및 다양한 온도 조건에서의 후속 열처리를 통해 시편을 준비하였다. 인장시험과 비커스 경도시험을 통해 기계적 물성을 평가하였으며, X-ray diffraction(XRD)을 이용하여 결정구조의 변화를 분석하였다. 또한 electron backscatter diffraction(EBSD)과 scanning electron microscopy–energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM–EDS)를 활용하여 재결정 거동, 국부 변형 및 개재물의 형상과 조성을 분석하였다. 열팽창 특성은 dilatometer를 이용하여 측정하였으며, 동일한 열처리 조건에서 두 합금의 CTE 거동을 비교·분석하였다. 본 연구는 상용 Invar 합금에 존재하는 미량 원소와 개재물이 재결정 거동, 잔류 변형, 그리고 열·기계적 특성을 동시에 제어하는 핵심 인자임을 확인하였다. 이러한 결과는 Invar 합금의 낮은 열팽창 특성과 기계적 안정성을 동시에 확보하기 위한 합금 설계 및 열가공 공정 최적화의 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

[상변태1-5 | 11:10]

CoCrNi계 중엔트로피 합금의 Al 및 Ti 첨가에 따른 부식 거동 분석: 강승연, 류채우*(홍익대학교)

Keywords: 중엔트로피 합금, 내식성, 부동태 피막

고강도·고연성 합금에 대한 산업적 수요가 증가함에 따라, 우수한 기계적 특성을 갖는 고엔트로피 및 중엔트로피 합금에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 FCC 단상 구조를 갖는 CoCrNi계 중엔트로피 합금은 우수한 연성과 가공경화능뿐만 아니라, Cr을 주성분으로 하는 부동태 피막의 형성을 통해 우수한 내식성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 최근에는 CoCrNi계 중엔트로피 합금의 기계적 특성을 더욱 향상시키기 위해 Al과 Ti를 첨가하고, 열처리를 통해 FCC 기지와 정합 계면을 이루는 $L1_2$ 석출물을 형성하는 석출 강화 연구가 활발히 진행되고 있다. 이때 Al과 Ti의 첨가는 합금의 화학적 조성뿐만 아니라 부동태 피막의 조성과 안정성을 변화시킬 수 있으며, 이후 형성되는 $L1_2$ 석출물에 의한 원소 분배 또한 국부적인 전기화학적 불균일성을 유발할 수 있다. 따라서 석출 강화형 CoCrNi계 합금의 내식성을 이해하기 위해서는 Al 및 Ti 첨가 자체의 영향과 $L1_2$ 석출에 따른 영향을 구분하여 규명할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 결정립 크기가 유사한 FCC 단상의 CoCrNi 합금과 $(CoCrNi)_{94}Al_3Ti_3$ 합금을 대상으로 전기화학적 부식 거동과 부동태 특성을 비교하여 Al 및 Ti 첨가에 따른 영향을 분석하였다. 또한 $(CoCrNi)_{94}Al_3Ti_3$ 합금에 열처리를 적용하여 $L1_2$ 석출물을 형성하고, 석출물 형성에 따른 전기화학적 특성의 변화를 추가적으로 분석하였다. 본 연구 결과는 기계적 특성과 내식성을 동시에 고려한 CoCrNi계 중엔트로피 합금의 조성 및 미세조직 설계를 위한 기초 지표가 될 것으로 기대된다.

[상변태1-6 | 11:25]

Hf 포함된 고엔트로피 합금의 싸이클릭 산화 거동: 김선진, 양하영, 오용준, 박준식*(국립한밭대학교)

Keywords: 고엔트로피 합금, Pack cementation Coating, 코팅 수명, Cycle 산화, 미세구조

Ni기 초합금은 항공 우주 및 국방 분야에서 터보 엔진으로 사용되고 있다. 하지만 녹는점의 문제로 1200 ºC 이상의 온도에서 사용이 제한된다. 이에 극한 환경에서 사용될 합금 중 하나로 고엔트로피 합금이 주목받고 있다. 고엔트로피 합금은 상온 및 고온에서 우수한 기계적 특성, 내마모성 및 내부식성 등 우수한 특성을 가지고 있지만 고온 산화 저항성이 매우 취약한 단점을 가지고 있다. 이를 방지하기 위해서 Al, Si, Cr등 내산화성 산화물을 형성하는 원소를 넣어 합금을 제조하거나 표면에 코팅을 통해 내산화성을 향상시켜 사용하고자 한다. 코팅 방법 중 Pack cementation 코팅은 복잡한 형상의 모재에도 코팅이 가능하며, 코팅층과 모재의 접착력이 우수하다. 본 연구에서는 HfMoNbTaTi 고엔트로피 합금을 주조 후 내산화성을 향상시키기 위해 Si 코팅을 진행하였고 1500 ºC의 고온에서 등온 산화와 사이클 산화에 따른 미세조직의 변화를 관찰하며 내산화성을 비교하고자 하였다. 등온 산화에 비해 사이클 산화 시 산화물과 코팅층의 열응력 차이에 의해 내산화성이 변화하는 것을 측정하고자 하였다.

[상변태1-7 | 11:40]

Phase separation–guided amorphous–crystalline hybridity overcomes the strength–ductility trade-off: Minkyung Kwak(Seoul National University, ETH Zurich), Robin E. Schaeublin, Indranil Basu, Joerg F. Loeffler*(ETH Zurich), Eun Soo Park*(Seoul National University)

Keywords: Hybrid materials, Metallic glass, Phase separation, Micropillar compression

Achieving strength without sacrificing ductility remains a fundamental challenge in structural materials, because a single microstructure rarely serves both. Here we show that a metallic glass can escape this trade-off by generating its own hybrid microstructure through liquid–liquid phase separation. Upon conventional-rate heating of a Pd–Au–Si metallic glass, spinodal-type decomposition in the supercooled liquid chemically partitions the alloy chemically, and crystallization follows the partitioning: Au-

enriched regions crystallize into soft FCC domains while the rejected solute enriches—and thereby hardens—the remaining glassy Pd–Si matrix. Micropillar compression shows that this amorphous–crystalline hybrid combines a yield strength of ~2.2 GPa with ~18% compressive ductility, outperforming both its fully amorphous and fully crystalline counterparts, which follow the conventional trade-off. Nanoscale hardness mapping and molecular dynamics simulations reveals the underlying division of labor: strength is carried by the hardened glassy matrix—the domains themselves add no strength—while ductility is supplied by the soft domains that multiply and deflect shear bands; once the matrix itself crystallizes, local hardness and collective strength decouple and ductility is lost. This self-generated hybridity, requiring only a heating scheme, offers a general route to strong yet ductile materials in phase-separating glass-forming systems.

[상변태2-1 | 13:30] 조청강연

금속 액체의 구조와 원자 운동: 액체 속 원자들은 어떻게 함께 움직이는가?: 류채우*(홍익대학교)

액체의 원자 구조는 장거리 주기성이 없어 일반적으로 무질서하거나 무작위적인 것으로 간주된다. 그러나 액체 구조에 존재하는 원자 간 상관관계와 이러한 구조적 특성이 점도 및 원자 이동과 같은 물성에 미치는 영향은 아직 충분히 규명되지 않아 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 발표에서는 분자동역학 시뮬레이션과 고에너지 X선 산란 실험을 바탕으로 금속 액체의 원자 구조를 정량화하고 그 물리적 의미를 해석한다. 특히 최근접 원자 배열을 넘어 더 넓은 영역에서 나타나는 중거리 원자 상관에 주목하고, 온도에 따른 구조적 상관성의 변화가 원자들의 집단 운동 및 동역학적 거동과 어떻게 연결되는지를 논의한다. 또한 이러한 구조–동역학적 상관관계를 바탕으로 액체마다 점도의 온도 의존성과 취성도(fragility)가 서로 다르게 나타나는 원자 수준의 기원을 살펴본다. 이를 통해 무질서해 보이는 액체 구조에 내재된 규칙성과 동역학적 특성 간의 관계를 제시하고, 액체의 유동과 유리 형성 거동을 이해하고 제어하기 위한 구조적 기준을 제안한다.

[상변태2-2 | 13:55]

열처리가 Ni-Ti 형상기억합금의 상변태 온도 및 미세조직에 미치는 영향: 신우승(한국생산기술연구원, 인하대학교), 이미영(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교, 한국과학기술연구원), 박지욱(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교), 조상현, 박예린(한국생산기술연구원), 김재황*(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교, 한국과학기술연구원, 전북대학교)

Keywords: 액츄에이터, 형상기억합금, 상변태, 어닐링, 미세조직

산업용 액츄에이터에 사용되는 형상기억합금은 안정적인 구동 응답성을 확보하기 위해 오스테나이트 변태 완료 온도(A_f) 제어가 필수적이다. 제조 공정 중 발생하는 미세한 화학 조성 변동 및 열이력 차이로 인해 A_f온도가 목표 사양을 벗어나는 불량 시편이 발생하며, 이는 생산수율을 저하시키는 주요 원인이 된다. 본 연구의 목표는 형상기억합금의 열처리 공정이 A_f온도 변화에 미치는 영향을 조사하는 것이다. 다양한 온도(200 ºC~500 ºC) 및 시간(5분~1시간)조건에서 어닐링 열처리 공정을 수행하였다. 열처리에 따른 상변화 온도 및 열 유동은 시차주사열량계(DSC)로 분석하였으며, 미세조직 관찰 및 상 분석은 주사전자현미경(SEM)과 X선 회절 분석(XRD)을 통해 수행하였다. 후열처리 조건에 따라 기질 내 Ni-rich 석출물의 분율 및 크기가 변화됨에 따라 기지의 Ni농도가 변화할 것으로 예상되며, 이를 통해 Af온도가 변화될 것으로 기대된다.

[상변태2-3 | 14:10]

Effect of heat treatment on the shape memory effect of Ti–Pd shape memory alloy: Kwangil Seo(The University of Tokyo), Haruki Ikeda, Mitsuhiro Matsuda(Kumamoto University), Yoko Yamabe-Mitarai*(The University of Tokyo)

Keywords: Heat treatment, Shape memory effect, Shape memory effect

【Introduction】 Shape memory alloys (SMAs) are materials that can recover their original shape upon heating above the transformation temperatures after being deformed, a phenomenon known as the shape memory effect (SME). The application range of SMAs has been expanding into aerospace and energy-related industries; however, most conventional SMAs exhibit relatively low operating temperatures due to their low transformation temperatures. Ti–Pd alloys have attracted attention as candidates for high-temperature SMAs because they exhibit high transformation temperatures, exceeding 570 ºC. However, Ti–Pd suffers from limited shape recovery at elevated temperatures [1]. To improve the SME, various heat treatments, such as annealing [2] and aging, are applied to SMAs. Nevertheless, the influence of solution treatment temperature on the SME remains unclear, particularly for high-temperature SMAs. In this study, the effect of solution treatment temperature on the shape memory effect of a Ti–Pd was systematically investigated. 【Experimental Methods】 A Ti–50 at% Pd alloy was prepared by arc melting under an argon atmosphere. Differential thermal analysis (DTA) was conducted to determine the transformation temperatures; the reverse transformation started at 571 ºC(A_s) and finished at 611 ºC(A_f). No dendritic structure was observed in as-cast state; therefore, homogenization annealing was not performed. Solution treatment was conducted at two temperatures: 200 ºC above A_f (800 ºC) for 3h and 600 ºC above A_f (1200 ºC) for 3h, followed by water quenching to room temperature. Shape memory effect was evaluated by thermal cycling between 440 and 680 ºC at a heating/cooling rate of 40 ºC min^{-1} under a constant applied stress. 【Results】 The transformation strain decreased with increasing solution-treatment temperature, whereas the shape recovery ratio did not change significantly. These results are related to the microstructural evolution, particularly the volume fraction of martensite variant pairs formed at the early stage of transformation. With increasing solution-treatment temperature, the amount of fine oxide particles that hinder the growth of variants was reduced, resulting in an increased volume fraction of variant pairs formed at the early stage. At the early stage, variant pairs favorable for reducing the transformation-

induced shape strain are preferentially selected. Consequently, higher solution-treatment temperatures promote self-accommodation through an increased fraction of early-stage variant pairs, leading to a reduction in transformation strain. 【References】 [1] K.Otsuka. et al. (1993). Scripta Metallurgica, 29, 1355–1358. [2] X.Huang. et al. (2001). Scripta Materialia, 45, 153–160.

[상변태2-4 | 14:25]

Multi-Scale Defect Engineering toward Superior Recovery Properties in Fe–Mn–Si-Based Shape Memory Alloys: 윤제인, 김지영, 박은수*(서울대학교 재료공학부)

Keywords: Keywordss: Shape Memory Alloys, Thermomechanical Treatment (TMT), Recovery stress

Fe–Mn–Si 기반 형상기억합금(shape memory alloy, SMA)은 Ni–Ti계 합금 대비 우수한 원가 경쟁력을 갖는 구조용 형상기억 소재로서 최근 내진 보강 및 프리스트레싱 적용을 위한 대안으로 주목받고 있다. 특히 SMA의 회복응력(recovery stress)을 활용한 프리스트레싱 기법은 구조 부재의 강도 향상과 재긴장 가능성 측면에서 기존 프리스트레스 콘크리트(PSC)가 갖는 시공 복잡성 및 재긴장 한계를 극복할 수 있는 잠재력을 지닌다. 따라서 실제 구조재 적용을 위해서는 높은 회복응력과 함께 충분한 회복변형률(recovery strain)을 확보하는 것이 중요하다. 회복응력은 응력 유도 마르텐사이트 변태가 소성 slip 변형보다 우선적으로 발생할 때 향상되며, 이는 오스테나이트 기지의 항복강도와 밀접한 상관관계를 갖는다. 따라서 본 연구에서는 결정립계 강화와 석출강화를 통해 기지를 강화하는 동시에, 형상회복을 저해하는 미세조직 결함을 선택적으로 제어하는 다중 스케일 결함 제어 전략을 적용하였다. 이를 통해 회복응력과 회복변형률을 동시에 향상시키고자 하였다. 미세조직 제어에 앞서 CALPHAD 기반 합금 설계를 수행하여 오스테나이트 안정성, 적층결함에너지(Stacking Fault Energy, SFE) 및 탄화물 석출 거동을 고려한 Fe–Mn–Si–Cr–Ni–(V, C)계 합금을 설계하였다. 이후 냉간압연–재결정화 공정을 반복하여 약 10 μm 수준의 균일한 미세 결정립을 형성하였다. 추가적으로 예비변형과 시효 처리를 연계한 TMT-aging 공정을 적용하여 결정립계 밀도는 유지하면서 ATB 밀도를 감소시키고, 응력 유도 ε-마르텐사이트와 적층결함 및 상 계면과 같은 고에너지 결함을 석출 핵생성 위치로 활용하였다. 이를 통해 나노 석출상의 형성과 결함 구조를 동시에 제어함으로써 석출강화와 가역 마르텐사이트 변태를 효과적으로 유도하고자 하였다. 미세조직 제어에 따라 항복강도와 회복응력은 단계적으로 증가하였으며, 최적화된 TMT-aging 조건에서 약 570 MPa 수준의 높은 회복응력을 확보하였다. 또한 결정립 미세화 과정에서 증가하는 ATB를 선택적으로 감소시키고 적층결함 및 상 계면을 효과적으로 제어함으로써, 결정립 미세화에 따른 회복변형률 저하를 완화할 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 Fe–Mn–Si계 SMA에서 결정립계 강화와 석출강화뿐만 아니라 미세조직 내 다양한 결함을 다중 스케일에서 제어함으로써 회복응력과 회복변형률을 동시에 향상시키기 위한 새로운 열–기계 처리 전략을 제시하였다. 이러한 결과는 향후 고성능 Fe 기반 SMA의 조성 설계 및 공정 최적화를 위한 가이드라인 마련에 기여할 것으로 기대된다.

[상변태2-5 | 14:40]

CrMnFeCo계 고엔트로피 합금의 형상기억 특성 향상을 위한 탄소 함량 최적화: 정회윤, 이제인*(부산대학교)

Keywords: Shape memory alloys, High-entropy alloys, Solid-solution strengthening, Interstitial atom

FCC 구조를 갖는 형상기억합금의 형상기억 특성을 향상시키기 위해서는 소성변형 단계에서 응력 유기 마르텐사이트 상변태가 일어날 때, 비가역적인 슬립 변형이 억제되어야 한다. 탄소와 같은 침입형 원소는 오스테나이트 강에서 격자 왜곡 극대화를 통한 고용강화 효과를 증가시킨다. 하지만, 오스테나이트 안정화 원소인 탄소는 합금의 적층결함에너지를 변화시켜 응력 유기 마르텐사이트 변태에 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 고용한이 큰 고엔트로피 형상기억합금에 탄소를 첨가시켜 FCC 상안정성 조절 및 고용강화를 통해 비가역적인 슬립을 억제하고자 한다. 구체적으로, 탄소가 첨가된 합금들을 제작하였고, 탄소 함량이 증가할수록 모상의 FCC가 안정하지만, 1.5 at.% 이상 고용될 때, 입계에 미세한 탄화물이 관찰되었다. 또한, 탄소 함량이 증가할수록 시차 열량 주사계(DSC) 분석 결과 마르텐사이트 변태 개시 온도(M_s)의 급격한 감소를 확인하였다. 탄소 함량이 0.7 at.%인 합금에서 최대 회복 연신율인 5.8 %를 보였고, 이는 기존에 보고된 고엔트로피 합금보다 약 1.0 % 증가한 결과이다. 온도-응력 의존성 결과를 통해 탄소가 첨가될 때, 비가역적인 슬립 개시 변형률이 2.8 %에서 약 4.0 %까지 확장됨을 알 수 있었다. 이를 확인하기 위해, EBSD를 통하여 소성변형이 진행될수록 0.7C가 탄소가 고용되지 않은 합금에 비해 국부적인 방위차가 덜 형성됨을 확인하였다. 본 연구 결과를 통해, 적절한 탄소 첨가가 FCC 상안정성 최적화 및 고용강화 효과로 인해 고엔트로피 형상기억합금의 회복 특성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

[상변태2-6 | 14:55]

Cr-rich CrFeCoNi 고엔트로피합금의 결정립 조대화 및 형상기억특성 향상 전략: 임진수랑, 정회윤, 이제인*(부산대학교)

Keywords: High-entropy alloy, Shape memory alloy, Martensitic transformation, Grain growth

CrMnFeCoNi계 형상기억합금에선 응력유기 HCP 마르텐사이트의 역변태로 형상기억특성이 발현된다. 이때, 입계 및 어닐링쌍정 등의 고각경계는 응력유기 마르텐사이트 변태를 억제하고, 고각경계-마르텐사이트에서 발생하는 변형은 마르텐사이트의 가역성을 감소시켜 회복특성을 낮춘다. 따라서, 회복특성 향상을 위해선 결정립 성장을 통한 고각경계 밀도 감소가 효과적이며, 이를 활용한 주조 후 열처리된 합금에선 가공재 대비 향상된 회복특성을 보여준다. 다만, 현재까지 주조 후 열처리로 인해 조대화된 결정립 크기는 약 730 μm 수준으로, 여전히 단결정의 형상기억합금 ([-144] $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{35}Ni_5$, 최대 15.7 %) 보다 매우 낮은 회복 변형률 (최대 4.7 %)을 보여준다. 이에 본 연구에서는 주조재의 제한된 결정립 성장을 뛰어넘는 mm 급의 결정립을 구현할 수 있는 CrFeCoNi 신합금 조성 및 주조재 열처리 방법을 개발하고, 이를 통해 회복 변형률을 향상시키고자 하였다. 개발한 CrFeCoNi 신합금은 Mn을 빼고, 고융점 원소인 Cr을 다량 첨가해 기존 CrMnFeCoNi 합금보다 녹는점이 100 ºC가량 높게 설계되었다. 열분석을 통해 개발 CrFeCoNi 신조성의 고상선 온도를 확인하고, 이로부터 결정립 조대화가 가능한 열처리 온도를 탐색하였다. 이후, 조대화된 신합금의

인장 회복 변형률 평가를 수행하였고, 최대 15.8 %의 회복 변형률을 확인하였다. 본 연구를 통해 CrFeCoNi계 형상기억합금의 결정립 크기 제어 전략을 제시하고, 본 합금계의 상용화를 위한 토대를 마련하고자 한다.

[상변태2-7 | 15:10]

인자 분리를 통한 SUS304 강의 변형유기 마르텐사이트와 전위밀도의 열전도도 기여도 규명: 이정훈, 천세호(부산대학교), 구현곤, 안재웅(한화에어로스페이스), 이태경*(부산대학교)

Keywords: SUS304, 열전도도

오스테나이트계 스테인리스강은 우수한 내식성과 기계적 특성을 바탕으로 다양한 열전달 구조물의 대표적 소재로 활용되고 있다. 이러한 응용에서는 구조 건전성과 함께 열전달 성능을 확보해야 하므로, 스테인리스강의 열전도도 변화와 이를 지배하는 미세조직 인자를 이해하는 것이 중요하다. SUS304는 소성변형 과정에서 전위 축적과 동시에 변형 유기 α' 마르텐사이트가 형성되며, 이에 따라 기계적·열적 특성이 크게 변화한다. 특히, 인장 또는 압연 변형에서는 α' 분율과 전위밀도가 변형률에 따라 동시에 증가하므로, 두 인자의 개별 영향을 분리하기 어렵다. 기존 연구에서는 주로 변형량 또는 α' 분율과 열전도도 사이의 단순 상관관계를 제시해 왔으며, 열전도도 변화에 대한 상변태와 전위 축적의 상대적 기여를 정량적으로 구분한 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 상이한 초기 가공 이력을 갖는 SUS304 강에 단계적인 인장변형을 부여하여 α' 분율과 전위밀도가 서로 다른 조합을 갖는 시편군을 구성하였다. X선 회절 분석을 통해 오스테나이트와 α'의 상분율을 평가하였으며, Williamson-Hall 분석을 적용하여 각 상의 전위밀도를 평가하였다. 또한 laser flash analysis(LFA)를 이용하여 열확산도를 측정하였고, 밀도와 비열을 고려해 열전도도를 산출하였다. 나아가 두 가지 후속 열처리 경로를 도입하여 α'의 분율과 전위밀도를 실험적으로 분리하고자 하였다. α'의 역변태가 개시되지 않는 온도에서의 회복 열처리를 통해 전위밀도만을 감소시켰고, 역변태 온도에서의 열처리는 α'의 분율을 감소시킨다. 동일한 변형률에서 준비한 시편에 두 열처리를 각각 적용함으로써, 전위 회복과 α′ 역변태에 따른 열전도도 변화를 구분하여 비교하였다. 이를 통해 SUS304 강의 변형에 따른 열전도도 변화에 대한 α′ 분율과 전위밀도의 상대적 기여를 분리하여 해석하고, 향후 가공 및 열처리 이력을 활용한 열전달 구조재 설계를 위한 정량적 근거를 제시하고자 한다.

[상변태3-1 | 15:35] 조청강연

핵생성 동역학 제어를 통한 In-situ 나노결정상 석출 및 알루미늄계 비정질 합금의 강도-연성 한계 극복: 김완(서울대학교, University of Wisconsin-Madison), 박은수*(서울대학교), John H. Perepezko*(University of Wisconsin-Madison)

Keywords: 핵생성 동역학, 등온변태곡선, 나노결정상, 비정질 합금,

합금의 미세구조를 설계하고 기계적 특성을 제어하기 위해서는 핵생성이 개시되기까지의 시간 (nucleation delay time), 석출상의 핵생성 속도 (nucleation rate), 그리고 냉각속도에 따른 핵생성 속도 변화 (transient nucleation rate)를 정량적으로 평가할 수 있어야 한다. 하지만 일반적인 핵생성 동역학 연구법은 복잡한 분석 모델과 방대한 실험데이터를 필요로 하므로, 보다 효과적인 연구 방법론의 개발이 요구된다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 Al계 비정질 합금의 FCC-Al 나노결정상 석출을 모델시스템으로 선정하여, 효과적으로 등온변태곡선 (TTT diagram)을 작도하고 핵생성 속도를 예측할 수 있는 새로운 핵생성 동역학 모델을 제시하였다. 구체적으로 10^4 K/s 수준의 고속 승온 열분석이 가능한 Flash DSC와 TEM 분석을 통해 새롭게 수립한 동역학 모델의 타당성을 검증하였다. 더 나아가 냉각속도에 따른 핵생성 속도변화를 예측하여 FCC-Al 나노결정상의 in-situ 석출거동을 제어하였으며, 이를 통해 강도와 연성이 동시에 향상된 Al계 비정질 합금을 개발하였다. 본 연구는 다양한 조성의 합금의 상변태 거동을 예측하고 미세구조 및 기계적 특성을 효과적으로 제어하는 기반을 제공할 것으로 기대된다.

[상변태3-2 | 16:00

Orientation-Dependent Deformation Behavior of Al-Cu-Fe Icosahedral Quasicrystals under Micropillar Compression: Go Eun Kim, Wan Kim, Eun Soo Park*(Seoul National University)

Keywords: Icosahedral quasicrystal, Al-Cu-Fe, Micropillar compression, EBSD, Orientation analysis, Mechanical anisotropy

Icosahedral quasicrystals (i-QCs) possess long-range order without translational periodicity, making their mechanical anisotropy difficult to interpret using conventional crystallographic frameworks. Our previous nanoindentation results showed that hardness of polycrystalline Al-Cu-Fe i-QC follows H(3f) > H(5f) > H(2f), yet the complex stress state of indentation obscures the origin of this hierarchy. Here, we investigated orientation-dependent anisotropy using EBSD-guided micropillar compression. Grains with 2-fold, 3-fold, or 5-fold axes aligned near the sample normal were selected; micropillars were fabricated by focused ion beam milling and compressed using a flat-punch nanoindenter. Compression revealed clear orientation-dependent differences in peak stress, fracture strain, displacement-burst behavior, and post-deformation morphology, with deformation resistance broadly following the indentation-based trend. These results provide direct evidence that mechanical anisotropy in Al-Cu-Fe i-QCs persists under uniaxial loading and is governed by orientation-dependent plastic instability and fracture response.

[상변태3-3 | 16:15]

Integrated Thermodynamic and Processing Framework for Composition Design of Fe-Based Nanocrystalline Soft Magnetic Alloys: Subin Ahn, Hyun Gi Min, Wan Kim, Eun Soo Park*(Seoul National Univ.)

Keywords: Composition Design, Immiscible Element, Nanocrystallization

Positive mixing enthalpy is often used to select immiscible additions for Fe-based nanocrystalline soft magnetic alloys, but it does not

alone predict whether an element will form useful nanoscale clusters, coarse segregates, or competing compounds. We therefore propose an integrated composition-design framework based on four criteria: mixing enthalpy with Fe, equilibrium solubility in alpha-Fe at 673 K, Fe-X binary phase-diagram topology, and rapid-solidification processability. These criteria classify candidate elements into cluster-forming, segregation-prone, compound-forming, and process-limited groups. To validate the framework, Fe-Co-B-Si alloys containing Cu, Ag, or Sn were prepared by melt spinning and analyzed by X-ray diffraction and differential scanning calorimetry. Cu and Ag showed composition thresholds accompanied by decreases in the primary-crystallization onset temperature and first-event enthalpy, whereas Sn produced no comparable onset depression. This contrast is consistent with controlled nanoscale rejection for Cu, extremely low Fe solubility and segregation tendency for Ag, and compound-coupled partitioning for Sn. The proposed framework links thermodynamic descriptors and processing constraints to experimentally observed crystallization behavior, providing a practical method for selecting single-element additions and concentration ranges in Fe-based nanocrystalline alloy design.

[상변태3-4 | 16:30]

AI 기반 조성설계를 통한 Fe계 연자성 합금의 미세구조 연구: 한선구, 박세진, 이연주(국민대학교), 최영신(한국생산기술연구원), 강태연(국민대학교), 김휘준(한국생산기술연구원), 조기섭, 최현주*(국민대학교)

Keywords: Fe계 연자성 합금, AI 기반 합금설계, 준지도학습, 나노결정립, 결정화 거동

Fe계 연자성 소재는 변압기, 인덕터, 전력변환장치 등 다양한 전자·전력기기의 핵심 코어 재료로 널리 사용되며, 소자의 에너지 효율과 소형화를 좌우하는 핵심 요소이다. 특히 전기자동차의 고주파 전력변환 부품에서는 높은 포화자화(Ms)와 낮은 보자력(Hc)을 동시에 만족하는 소재에 대한 수요가 커지고 있다. 그러나 두 특성은 합금 조성과 비정질/나노결정립 미세구조에 따라 서로 다른 방향으로 변화하는 트레이드오프 관계를 가지며, 방대한 조성-공정 변수 공간과 제한된 실험 데이터로 인해 실험만으로 최적 조성을 탐색하는 것은 매우 비효율적이다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 문헌·특허 기반 LLM 데이터베이스 구축, 준지도 오토인코더(Semi-supervised autoencoder) 기반 표현학습, GPR 기반 능동학습을 결합한 AI 조성설계 프레임워크를 활용하였다. 이를 통해 (i) 보자력 최소화(Set-Hc), (ii) 포화자화 최대화(Set-Ms), (iii) 포화자화/보자력 비율 최대화(Set-Ms/Hc)라는 세 가지 목표에 대해 각각 최적 조성을 추천받고, 이를 melt spinning 리본으로 제작하여 미세구조 및 자기적 특성을 실험적으로 검증하였다. 상분석은 XRD로, 결정화 거동은 승온속도별 비등온 DSC와 Kissinger식을 통한 활성화에너지 산출로, 자기적 특성은 VSM으로 평가하였다. XRD 분석 결과, Set-Ms는 뚜렷한 α-Fe (110) 피크와 함께 결정립 크기 약 22.8 nm로 as-spun 상태에서 이미 결정화가 진행되어 있었던 반면, Set-Hc와 Set-Ms/Hc는 결정 피크 없이 완전한 비정질 구조를 유지하였다. 이러한 차이는 조성 자체의 특성에서 비롯되었는데, 높은 Fe 함량과 Cu 첨가를 갖는 Set-Ms는 강자성 α-Fe 상의 형성과 핵생성이 촉진된 반면, Fe 함량이 낮고 C·P 함량이 높은 Set-Hc는 결정화 구동력이 낮아 비정질 상태가 안정적으로 유지되었다. Set-Ms/Hc는 Set-Ms와 유사한 Fe 함량에도 불구하고 Nb과 P의 조합이 원자 확산 및 결정 성장을 효과적으로 억제하여 비정질 구조를 유지하였다. DSC 및 Kissinger 분석에서도 이러한 경향이 일관되게 확인되었다. Set-Hc는 1차 결정화 이후 2차 화합물 형성까지의 온도 구간(ΔT)이 가장 좁아 급격한 연속 결정화 경향을 보인 반면, Set-Ms와 Set-Ms/Hc는 상대적으로 넓은 안정 구간을 나타냈다. 1차 결정화 활성화에너지는 Set-Ms에서 가장 낮고 Set-Hc에서 가장 높았으며, Set-Ms/Hc는 2차 결정화 활성화에너지가 가장 높아 1차 결정화 이후에도 상당한 열적 안정성을 유지함을 확인하였다. VSM 측정 결과, Set-Hc는 낮은 보자력과 함께 낮은 포화자화를 보였고, Set-Ms는 가장 높은 포화자화를 달성하였으나 조대한 α-Fe 결정립으로 인해 보자력 역시 가장 높게 측정되었다. 반면 Set-Ms/Hc는 낮은 보자력과 높은 포화자화를 함께 확보하여 Ms/Hc = 8.75로 세 합금 중 가장 우수한 값을 달성하였다. 이는 비정질 구조로 자기결정이방성과 결정립계 피닝을 억제하면서도 높은 Fe 함량을 유지해 자화값 손실을 최소화했기 때문으로 해석된다. 종합적으로, 동일한 조성-공정-특성 데이터만으로 학습된 AI 프레임워크는 세 가지 특성 목표에 대해 뚜렷이 구분되는 결정화 경로와 미세구조를 갖는 조성을 성공적으로 제시하였으며, 단일 지표의 극대화보다 Ms/Hc와 같은 균형 지표를 목표로 설정하는 전략이 실제 소재 활용 관점에서 더 실용적일 수 있음을 시사한다. 향후 TEM 분석과 열처리를 통해 단일상 나노결정화를 검증할 계획이다.

[상변태3-5 | 16:45]

ECP 모델 기반 Ni-TM 이원계 금속유리의 기계물성의 경향성 변화: 송원택, 안혜상, 박은수*(서울대학교)

Keywords: Metallic glass, Elastic modulus, ECP model

금속유리의 원자 규모 구조적 불균질성은 기계적 응답을 지배하는 중요한 요인이지만, 그 조성 의존성은 아직 명확하게 밝혀지지 않았다. 본 연구에서는 고에너지 X선 회절, 쌍분포함수 분석, X선 흡수 미세구조 분광법, 시차주사열량법 및 나노압입시험을 이용하여 용융방사로 제조한 $Ni_{100-x}Zr_x$ 및 $Ni_{60}TM_{40}$(TM = Ta, Nb, Ti 및 Zr) 금속유리의 단·중거리 질서, 탄성 거동 및 전단띠 핵생성을 조사하였다. Ni–Zr 유리는 효율적 클러스터 패킹(efficient cluster packing) 모델과 부합하게 Ni 기반 및 Zr 기반 조성에서 각각 용질-희박 및 용질-풍부 구조 영역, 즉 총 네 개의 구조 영역으로 분류되었다. 조성에 따른 탄성계수 변화는 구조적으로 약한 결합 환경이 지배적으로 기여함을 시사하였으며, Cu–Zr과의 비교를 통해 이원계 금속유리에 대한 준경험적 탄성계수 지도를 구축하였다. $Ni_{60}TM_{40}$ 금속유리에서는 탄성계수, 유리전이온도 및 경도가 Zr < Ti < Nb < Ta 순으로 증가하였다. 이와 함께 국부적인 정적 무질서도는 감소하고 클러스터 간 연결성은 증가하였다. 첫 번째 팝인(first pop-in) 통계 분석 결과, 조성이 $Ni_{64}Zr_{36}$에서 $Ni_{36}Zr_{64}$로 변화함에 따라 이종 핵생성 사이트에 기인하는 비율은 47.4%에서 83%로 증가하였으며, 해당 사이트의 특성 핵생성 응력은 감소하였다. 본 연구는 조성에 의해 제어되는 원자 규모의 구조적 불균질성과 탄성 응답 및 초기 전단띠 핵생성 사이의 연관성을 보여준다.

[상변태3-7 | 17:00]

Al-Si 이원계에서의 금속 유도 결정화 거동: 문준혁, 박은수*(서울대학교), 류채우*(홍익대학교)

Keywords: 비정질 실리콘, 급속 응고, 금속 유도 결정화

비정질 실리콘(a-Si)은 결정질 실리콘과 구별되는 구조적·전기적 특성을 가지며, 다양한 에너지 및 전자소자 분야에서 활용되고 있다. 비정질 실리콘의 구조와 물성은 열처리에 따른 구조적 완화 및 결정화 과정에서 변화할 수 있기 때문에, 비정질상의 열적 안정성과 결정화 거동을 이해하는 것이 중요하다. 특히 비정질 실리콘이 금속과 공존하는 경우, 금속과 실리콘 간의 상호작용에 의해 결정화 온도 및 거동이 변화하는 금속 유도 결정화(Metal-induced crystallization, MIC)가 발생할 수 있다. 따라서 금속의 존재에 따른 비정질 실리콘의 열적 안정성과 구조 변화를 분석하는 것은 금속 유도 결정화 메커니즘을 이해하는 데 중요하다. 본 연구에서는 Al-Si 공정 조성 영역의 합금을 급속 응고하여 비정질 실리콘이 형성된 금속 리본을 제조하고, 가열 과정에서 나타나는 열적 및 구조적 변화를 분석하였다. 비정질 실리콘은 인접한 금속의 존재 여부에 따라 결정화 온도가 변화하는 특징적인 거동을 나타냈으며, 이를 바탕으로 Al과 비정질 실리콘 간의 상호작용이 결정화 과정에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구 결과는 Al-Si 이원계에서의 금속 유도 결정화 메커니즘을 이해하기 위한 기초 자료를 제공하며, 다양한 금속과 비정질 실리콘 간의 상호작용에 따른 결정화 거동을 이해하는 데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[상변태3-8 | 17:15]

Effect of Cu Microalloying on Quasicrystal Grain Growth and Mechanical Properties in Ti–Zr–Ni Alloys: Thiri Shwe Sin, Go Eun Kim, Geunhee Yoo, Wan Kim, Eun Soo Park*(Department of Materials Science and Engineering, Research Institute of Advanced Materials & Institute of Engineering Research, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea)

Keywords: Quasicrystal, icosahedral phase, Ti–Zr–Ni alloy, Cu microalloying, EBSD, nanoindentation, nanoscratch

Quasicrystals exhibit a unique quasiperiodic atomic structure and possess mechanical properties distinct from those of conventional crystalline and amorphous materials. Ti–Zr–Ni alloys are particularly attractive for the development of high-strength quasicrystal-reinforced materials because of their ability to form thermodynamically and kinetically accessible icosahedral phases. In this study, the effect of Cu microalloying on the formation, grain-size evolution, and mechanical behavior of quasicrystals in Ti–Zr–Ni alloys was investigated. Base and Cu-microalloyed Ti–Zr–Ni alloys were fabricated, followed by controlled thermal processing to promote the formation of quasicrystalline phases. The resulting microstructures and phase distributions were characterized using scanning electron microscopy, X-ray diffraction, and electron backscatter diffraction. Electron backscatter diffraction analysis confirmed that the quasicrystal grains in the Cu-microalloyed alloy were larger than those formed in the Cu-free Ti–Zr–Ni alloy, demonstrating that minor Cu addition significantly influences the nucleation and growth behavior of the quasicrystalline phase. The local mechanical properties of the quasicrystals and surrounding matrix were evaluated using nanoindentation. Hardness, elastic modulus, and indentation-induced displacement responses were analyzed to identify differences in deformation behavior between the quasicrystalline phase and the adjacent matrix. Nanoscratch testing was additionally performed to investigate resistance to localized deformation, frictional sliding, and surface damage. The combined nanoindentation and nanoscratch results provide insight into the relationship between Cu-induced quasicrystal grain growth and the local mechanical response of the alloy.

알루미늄
Room 2층 201호, 10월 28일

[알루미늄1-1 | 08:30]
Mn, Cr 합금성분에 의한 압출재 조직 및 물성 영향 연구: 이재형*, 강문구(현대자동차)
Keywords: 알루미늄, 재활용, 6000계, 압출, 강도, 망간, 크롬

자동차 탄소 감소를 위한 6000 계 알루미늄 압출재의 재활용성을 향상시키기 위해, 본 연구는 망간(Mn)과 크롬(Cr) 규제 완화가 미세조직과 충돌 안전성에 미치는 영향을 조사했다. 서로 다른 Mn과 Cr 함량을 가진 12가지 합금 변종(저강도, 중강도, 고강도)을 주조한 후 압출 성형하여 범퍼 크러쉬박스 시제품을 제조했다. 미세조직 분석 결과, Mn과 Cr의 증가는 β-AlFeSi에서 α-Al(FeMn)Si로의 상 변태를 유도하였으며, 결정립 크기를 감소시키고 주변 조대 결정층(PCG) 두께를 감소시켰다. 높은 Mn과 Cr 함량에서 저강도 합금은 강도가 감소하였지만, 중강도 및 고강도 합금은 강도를 유지하였다. 반면 V-벤딩 성능은 모든 재료에서 향상되었다. 결과적으로 중강도 합금(A6N01)이 강도를 유지하면서 충돌 성능을 크게 향상시켜 재활용에 가장 적합한 것으로 입증되었다. 저강도 합금은 강도 손실로 인해 충돌 요구 사항을 만족하지 못할 위험이 있으며, 고강도 합금은 본질적으로 열악한 충돌 성능을 나타내었다.

[알루미늄1-2 | 08:45]
Al–Mg–Si 합금에서 TEM 및 APT를 활용한 β″ 분석: 이미영(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교, 한국과학기술연구원), 박지욱(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교), 조상현(한국생산기술연구원), Mimi Narita(Nagoya Institute of Technology, Department of Physical Science and Engineering), 김재황*(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교, 한국과학기술연구원, 전북대학교)
Keywords: Al-Mg-Si alloys, β″, TEM, EELS, APT

Al–Mg–Si계 합금에서 시효 중 형성되는 β″석출상은 합금의 주요 강화상이다. β″의 결정구조와 원자배열에 관한 다양한 모델이 제안되어 왔으나, TEM에서 관찰되는 2차원 투영구조만으로는 투영 방향으로 중첩된 원자층의 Mg, Al 및 Si 분포를 구분하기 어렵다. APT는 원자 수준의 3차원 조성정보를 제공하지만, 재구성 과정에서 발생하는 공간적 왜곡으로 인해 원자 위치를 결정구조와 직접 연결하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 TEM 및 APT를 상호보완적으로 활용하여 β″의 원자구조와 조성분포를 분석하였다. TEM을 통해 β″의 투영 원자배열과 Al matrix와의 계면을 관찰하고, EELS를 이용하여 β″의 사이즈 분포에 대한 정량분석을 실시하였다. β″의 구조분석을 위해 APT의 원자 위치를 보정하고, 석출물 내부와 계면에서 Mg, Al 및 Si의 3차원 분포와 위치별 조성 변화를 분석하였다. 이를 통해 TEM에서 중첩되어 관찰되는 원자층의 구조정보를 APT의 3차원 조성정보와 연결하고, β″의 구조 및 조성을 분석하였다.

[알루미늄1-3 | 09:00]
Atom Probe Tomography 및 근사적 에너지 계산 방법을 이용한 Al-Mg-Si 합금의 나노클러스터 분석: 박지욱(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교), 이미영(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교, 한국과학기술연구원), 조상현, 박예린(한국생산기술연구원), 신우승(한국생산기술연구원, 인하대학교), 김재황*(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교, 한국과학기술연구원, 전북대학교)
Keywords: Atom probe tomography, Al-Mg-Si, 알루미늄합금, 나노클러스터, 클러스터분석

Al-Mg-Si 합금의 시효 경화 초기에 발생하는 클러스터의 형성은 클러스터의 미세한 크기로 인해 기존 전자현미경 분석 기법으로는 관찰에 한계가 있다. Atom Probe Tomography는 이러한 나노구조를 3차원으로 해석할 수 있게 하는 강력한 기술로, 원자 수준에서 클러스터의 크기, 형상 및 조성에 대한 정량적 분석을 가능하게 한다. 기존 연구에서 다루어 온 클러스터 부피, 수밀도, 크기 분포 등의 인자만으로는 개별 클러스터의 열역학적 안정성을 규명하는데 본질적인 한계가 존재한다. 본 연구에서는 Al-Mg-Si 합금의 APT 실험 데이터에 근사적 에너지 계산 방법을 적용하여 나노클러스터의 에너지 상태를 평가하였으며, 이를 통해 다양한 크기 및 조성을 갖는 클러스터 간 열역학적 안정성의 비교 분석을 수행하였다. APT는 원자가 증발하여 검출기에 도달하는 과정에서 위치의 왜곡이 발생하거나 누락되는 원자가 발생한다. 이를 고려하여 APT 데이터의 나노클러스터를 일관성 있게 평가할 수 있는 근사적 해석 프레임워크를 도입하였다. 유사한 크기의 클러스터일지라도 내부 원자 배열 및 국소 화학 조성에 따라 에너지 상태가 달라질 수 있음을 확인하였다. 이는 클러스터가 기지 내로 재용해될지, 유지될지, 혹은 강화 석출물로 성장할지를 결정하는 주된 요인이 단순 물리적 크기가 아닌, 열역학적 안정성도 고려해야함을 시사한다. 본 연구는 Al-Mg-Si 합금의 APT 데이터에서 관찰된 다양한 원자 배치에 대하여 클러스터 구조를 정량적으로 비교, 평가할 수 있는 근거를 제공한다.

[알루미늄1-4 | 09:15]
거대언어모델 기반 문헌 데이터 후처리를 통한 7xxx계 알루미늄 합금 CPSP 데이터베이스 구축 방법론: 최준혁, 천재은(국민대학교 신소재공학부), 어광준(한국재료연구원), 조기섭*(국민대학교 신소재공학부)
Keywords: 거대언어모델, 소재 데이터 추출, 7xxx 알루미늄 합금, 데이터 후처리

Al-Zn-Mg-Cu계 7xxx 알루미늄 합금은 우수한 비강도를 바탕으로 항공우주·방산·전기차 부품 등으로 적용이 확대되고 있다. 그러나 다원계 조성과 다단계 열처리로 조성–공정–조직–물성(Composition–Process–Structure–Property, CPSP) 탐색 공간이 방대하여, 신합금 개발에 상당한 시행착오가 요구된다. 대안으로 주목받는 AI 기반 소재 탐색 역시, 단일 연구실의 실험 데이터가 양적으로 제한적이고 연구 그룹 간 데이터 또한 고립되어 있어 학습 데이터 확보라는 병목에 직면해 있다. 결국 대규모 CPSP 데이터를 확보할 현실적인 통로는 공개 문헌이나, 논문마다 기록 방식이 상이하여 하나의 학습 데이터셋으로 통합하기 어렵다. 이에 본 연구에서는

유효 문헌 선별부터 데이터 추출을 포함한 전처리 단계와 기계학습을 위한 데이터 후처리 단계로 구분하여 자동화하는 거대언어모델(Large Language Model, LLM) 기반 파이프라인을 구축하였다. 이를 통해 논문 내 복수의 실험 조건을 개별 레코드로 분리하는 방식으로 7xxx계 문헌 2, 390편으로부터 CPSP 데이터를 확보하였다. 후처리 단계에서는 공정 용어를 표준화하고 결측은 유형별로 구분하여 보완하였으며, 공정 이력은 공정 종류 기준으로 재구성함으로써 문헌 간 공정 표현의 일관성을 확보하였다. 이를 바탕으로 조성 및 공정 조건으로부터 인장강도와 연신율을 예측하는 모델을 구축하였다. 공정 이력 재구성 시 별도 변수로 보존한 수행 순서는 인장강도 예측에서 높은 중요도를 보였으며, 이는 후처리 설계의 유효성을 뒷받침한다. 구축된 데이터베이스와 예측 모델은 향후 목표 강도와 연신율을 동시에 만족하는 조성·공정 역설계의 토대가 될 것으로 기대된다.

[알루미늄1-5 | 09:30]

전류 밀도와 온도 구배를 통한 알루미늄 합금 내 Fe 원소 제거에 대한 연구: 김하늘, 김희국, 장병록*(인하대학교 제조혁신전문대학원)

Keywords: 재활용, 알루미늄, 주조, 정출, SEM

세계적으로 탄소 배출량 감소에 대한 요구가 증가하고 있으며, 알루미늄 산업계에서도 이를 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. 이 중 스크랩을 재활용하는 방법은 1차 알루미늄을 생산하는 것에 비해 큰 탄소 배출 감소 효과를 가지기 때문에 많은 연구가 진행되고 있으며, 또한 필요한 실정이다. 특히 Fe는 알루미늄 재활용시 혼입되기 쉬우며 일정 수준 이하로 제거하기 어렵기 때문에 해당 원소가 미치는 영향과 그 제어 방법에 대한 연구가 필요하다. 본 연구는 전류 밀도 및 온도 구배를 통한 알루미늄 합금 내 혼입된 Fe 원소의 제어를 시도하고, 효과를 정량적으로 분석하였다. 6082 알루미늄 합금에 연철을 첨가하여 재활용 과정에서 Fe가 혼입된 스크랩을 모사하였으며, 해당 합금의 응고 과정에서 전극봉을 통한 전류 밀도와 SiC 발열체를 통한 온도 구배를 야기함으로써 응고 과정에서 발생하는 Fe-rich 정출상의 침강 거동을 유도하였다. 미세 조직 분석을 통해 응고 과정에서 형성된 Fe-rich 정출상의 거동을 확인하였으며, 성분 분석을 통해 Fe 제거 효율을 검토하였다. 이러한 결과를 바탕으로 알루미늄 재활용을 보다 활성화하여 통한 탄소 배출 감소에 기여하고자 한다.

[알루미늄2-1 | 09:45]

Al-Mg-Si-Cu합금에서 미량원소 첨가에 의한 Cu확산지연현상: 손현우*, 어광준(한국재료연구원)

Keywords: Al-Mg-Si-Cu, 열안정성, 미량원소, 시효석출

Al-Mg-Si-Cu계(6000계) 알루미늄 합금은 자동차 및 구조용 경량 소재로 널리 활용되고 있으나, 고온 장시간 노출 환경에서 석출물의 조대화 및 상 안정성 저하가 소재의 기계적 물성과 전기전도도 저하를 야기하는 주요 원인으로 지적되어 왔다. 특히 4원계 L상은 Mg-rich 조성 특성상 잉여 Mg에 의한 총석출량 감소 및 전도도 저하 문제를 동반하며, Ag/Ge 등 미량원소 첨가를 통한 기존의 석출상 구조 개선 접근으로는 열안정성 확보에 한계가 있음이 확인되었다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 Sc 첨가를 통한 Cu 확산 지연 메커니즘에 주목하였다. Sc은 기지 내에서 Cu 및 공공(vacancy)과 결합하여 Sc-Cu-Va 형태의 삼체 복합체(solute-vacancy complex)를 형성하는 것으로 판단되며, 이러한 결합이 Cu 원자와 공공을 국부적으로 속박함으로써 Cu의 확산에 필요한 유효 공공 농도 및 이동도를 저하시키고 결과적으로 Cu 확산 속도를 직접적으로 지연시키는 것으로 사료된다. 이러한 공공 매개 확산 지연 효과에 의해 고온 노출 시 L상 및 관련 석출물의 조대화 거동이 억제되고, 결과적으로 합금의 열안정성이 향상됨을 미세조직 관찰 및 열분석을 통해 확인하였다. 또한 합금 성분 제어와 다단 열처리 조건의 조합이 이러한 복합체 형성 및 확산 지연 효과를 극대화하는 데 유효하게 작용함을 확인하였다. 본 발표에서는 위 접근을 통해 확보한 미세조직적 근거와 열적 거동 변화를 중심으로, Sc-Cu-Va 삼체 복합체 형성에 기반한 Cu 확산 제어 전략을 제시하고, 기존 미량원소 첨가 전략과의 차별점 및 확장 가능성에 대해 논의하고자 한다.

[알루미늄2-2 | 10:00]

머신러닝 기반 고압 다이캐스팅용 알루미늄 합금의 조성 및 T5 열처리 공정 조건에 따른 기계적 물성 예측: 박예린(한국생산기술연구원), 신우승(한국생산기술연구원, 인하대학교), 이미영(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교, 한국과학기술연구원), 박지욱(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교), 조상현(한국생산기술연구원), 김재황*(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교, 한국과학기술연구원, 전북대학교)

Keywords: 다이캐스팅, 알루미늄 합금, 열처리, 머신러닝, 물성 예측

탄소배출 규제 강화에 따라 차체 경량화에 대한 요구가 커지면서, 다이캐스팅 산업에서도 높은 강도와 연신율을 동시에 만족하는 소재 개발이 요구되고 있다. 그동안 합금 개발은 연구자의 경험과 반복적인 시행착오에 의존해 상당한 시간과 비용이 소요되어 왔다. 이를 개선하기 위해 최근 머신러닝을 활용한 물성 예측 연구가 시도되고 있으나, 예측 결과에 대한 실제 주조 검증이 이루어지지 않아 신뢰성 확보에 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 데이터 기반 머신러닝 기법을 다이캐스팅용 알루미늄 합금 개발에 접목하여 조성 및 열처리 공정 조건에 따른 기계적 물성 예측 모델을 구축하고, 이를 실제 주조 검증을 통해 신뢰성을 확보함으로써 합금 설계 및 공정 최적화의 기초 자료로 제공하고자 한다. 본 연구를 위해 Si 0~11.5 wt%, Mg 0.06~6.5 wt% 등 다양한 조성으로 다이캐스팅용 알루미늄 합금을 설계하고, 주조 후 시효온도 및 시효시간을 달리한 T5 열처리를 거쳐 시편을 제작하였다. 제작된 시편은 인장시험을 통해 항복강도, 인장강도, 연신율을 측정하였으며, 이를 바탕으로 조성, 열처리 공정 조건, 기계적 물성을 포함한 총 1, 272개의 데이터셋을 구축하였다. 합금 원소(Si, Mg, Cu 등)의 함량과 열처리 공정 조건(시효온도, 시효시간)을 입력 변수로, 기계적 물성(항복강도, 인장강도, 연신율)을 출력 변수로 설정하고, 데이터의 비선형적 특성을 반영할 수 있는 트리 기반 알고리즘을 활용해 예측 모델을 구축하였다. 구축된 모델을 이용하여 고강도 고연신의 합금 조성 및 열처리 공정 조건을 도출하고, 이를 바탕으로 신규 시편을 주조하여 예측값과 실험값을 비교함으로써 모델의 신뢰성을 검증하였다.

[알루미늄2-3 | 10:15]

Al-Si-Mg계 주조재의 미세조직에 따른 국부적 부식 거동 평가: 김영서(한국재료연구원, 한양대학교), 신한균, 김정한(동아대학교), 장재일(한양대학교), 조영희*(한국재료연구원)

Keywords: 알루미늄 합금, 미세조직, 금속간화합물, 전기화학, 부식

Al-Si-Mg계 합금은 주조용 합금으로써, 경량화를 통한 연료효율 향상과 탄소배출 저감에 효율적으로, 차체 구조 부품에서 모터 하우징 등 전장 부품으로의 적용이 확대되고 있다. Al-Si-Mg계 합금의 설계는 산업적으로 요구되는 특성을 확보하기 위해 주목을 받아왔다. 다양한 산업적 요인으로 인해 본 합금은 재활용의 중요성도 증가하고 있는데, 재활용 과정에서는 Fe의 혼입이 불가피하며, Al-Si-Mg계 합금에서 Fe는 다양한 금속간화합물을 형성하여 특성을 저하시킨다. Fe계 금속간화합물 제어를 위해 산업에서는 보통 Mn을 첨가하고, 이에 따라 Fe 및 Mn 함량 변화와 미세조직 변화가 소재의 기계적 특성에 미치는 영향이 많이 연구되어 왔다. 그러나, 전기차의 전장 및 모터 하우징 부품은 다양한 습윤 환경에 노출될 수 있어 부식 거동에 대한 고려는 필수적이다. 본 연구에서는 상용 소재 (Silafont-36)를 기준으로 Fe 함량 및 Mn 첨가에 따른 Al-Si-Mg 주조재의 미세조직 변화와 부식 거동의 상관관계를 분석하였다. 거시적 부식 거동을 비교하기 위해 분극시험 및 침지시험을 진행하였으며, 상용 소재 대비 Fe 함량을 증가시킨 신합금에서 상대적으로 우수한 내식성을 확인하였다. 미세조직적으로는 Fe 및 Mn 첨가에 따라 형성되는 금속간화합물의 종류와 분포에 차이가 나타났으며, 이에 따라 각 상과 기지 사이에서 전위차가 관찰되었다. SECM 분석에서는 금속간화합물에 따른 국부 패러데이 전류의 차이가 확인되었으며, 특히 α-Al(Fe, Mn)Si 주변에서 상대적으로 높은 전기화학적 활성이 나타났다. 이는 Fe 및 Mn 첨가에 따른 금속간화합물의 변화가 국부 전기화학적 반응성과 부식 거동에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

[알루미늄2-4 | 10:30]

Mn 함량 및 냉각속도에 따른 Al-7Si-Mg 주조합금의 미세조직과 전기·열전도 특성: 강주원(한국재료연구원, 한양대학교), 이윤호, 이상익(한국재료연구원), 장재일*(한양대학교), 조영희*(한국재료연구원)

Keywords: Al-Mg-Si 합금, 망간(Mn), 냉각속도, 전기전도도, 열전도도

차량의 경량화를 통한 연비 향상과 탄소배출 저감, 전기자동차의 주행거리 확보를 위해 차체 및 열관리 부품에 경량 알루미늄 합금의 적용이 확대되고 있다. 특히 고압다이캐스팅 공정은 복잡한 박육 형상의 부품을 높은 생산성으로 제조하고 다수의 부품을 일체화할 수 있어 차량 경량화에 유리하며, 이에 따라 차체 구조재뿐만 아니라 방열 및 열관리 부품으로 Al-Si계 주조합금의 적용이 확대되고 있다. 한편, 고압다이캐스팅 공정에서는 용탕과 금형 간의 소착 제어가 안정적인 성형성과 금형 수명 확보를 위한 중요한 요소이다. Al-Si계 주조 합금에서 Fe는 금형과 용탕 간의 소착을 억제하는 데 기여하는 원소이나, 침상 또는 판상의 β-Al_5FeSi 금속간화합물을 형성하여 기계적 특성을 저하시킬 수 있다. 이에 β-Al_5FeSi상의 형성을 억제하고 Chinese-script 형태의 α-Al(Fe, Mn)Si 상 형성을 유도하기 위해 Mn을 소량 첨가하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 Mn은 Al 기지에 고용될 경우 전자 산란을 증가시켜 전기 및 열전도도를 저하시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Al–7Si-Mg계 주조합금을 기반으로 Mn 함량을 0–0.60 wt% 범위에서 단계적으로 변화시키고, 스텝 몰드를 이용해 2-50 K/s의 냉각속도 조건에서 중력 주조를 수행하였다. 이를 통해 Mn의 고용 및 금속간화합물 형성 거동이 전기 및 열전도도에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 각 조성 및 냉각 조건에서 생성되는 금속간화합물(IMCs)을 열역학 시뮬레이션을 통해 예측하고, 미세조직 관찰 및 이미지 분석을 통해 Mn 및 Fe계 금속간화합물을 포함한 제2상의 형상과 분포를 관찰하고, 상분율 변화를 정량적으로 분석하였다. 전기전도도는 와전류법으로, 열전도도는 레이저 플래시법(LFA)을 이용하여 평가하였다. 또한 TEM 분석을 통해 기지 내 Mn계 및 Mg-Si계 상의 형성 및 분산 거동을 분석하여 전기 및 열전도도 특성에 영향을 미치는 주요 인자를 규명하였다. 이러한 기초 데이터를 바탕으로 향후 비열처리형 고열전도 다이캐스팅 합금 개발을 위한 적용 가능성을 평가하고자 한다.

[알루미늄2-5 | 10:45]

Ni 첨가에 따른 고강성 Al-18Si-xNi 주조 합금의 미세조직 변화와 물리적 특성의 상관관계: 이윤호, 이상익(한국재료연구원, 한양대학교), 이정무(한국재료연구원), 장재일(한양대학교), 조영희*(한국재료연구원)

Keywords: Al-Si-Ni casting alloy, Ni addition, Elastic modulus, Thermal expansion coefficient, Composition model

선행 연구에서 본 연구진은 100GPa급 고강성 알루미늄 주조용 소재 개발을 위하여 과공정 Al-18Si 합금계에 Ni을 4-28 wt.% 수준으로 점진적으로 첨가하였고, 응고 거동과 미세조직 제어에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 Al-18Si-xNi (x = 4–28 wt.%) 합금에서 Ni계 금속간화합물(IMC)의 형성이 탄성계수(E)와 열팽창계수(CTE)에 미치는 영향을 냉각속도 5 및 25 K/s 조건에서 조사하였다. Ni 함량 증가에 따라 Ni계 금속간화합물은 단일 Al_3Ni상에서 Al_3Ni, Al_6Ni_3Si 및 Al_3Ni_2가 공존하는 다상 구조로 변화하였으며, 이에 따라 E는 증가하고 CTE는 감소하였다. 특히 Al_3Ni_2와 Al_6Ni_3Si는 각각 235 GPa와 190 GPa의 높은 탄성계수 및 7.7×10^{-6}/K와 7.4×10^{-6}/K의 낮은 CTE를 나타내어 물성 변화에 주요한 영향을 미쳤다. Al_6Ni_3Si와 Al_3Ni_2의 순차적인 형성은 각각 약 20 및 24 wt.% Ni에서 Ni 첨가량에 의존하는 물성(e.g., 탄성계수, 열팽창계수) 변화량에 영향을 미쳤다. 즉, 냉각속도를 5에서 25K/s로 증가시키면, 탄성계수 변화량은 1.23에서 0.34 GPa/Ni wt.%으로 감소한 반면, 열팽창계수 변화량은 0.02 에서 0.33 $10^{-6}K^{-1}$/Ni wt.%으로 증가하였다. 이는 높은 냉각속도(e.g., 25 K/s)에서 Al_3Ni_2의 형성이 촉진되고 이후 Ni계 금속간화합물의 추가적인 상변태가 억제되어 E 증가를 억제하고 효과적으로 CTE 감소시키는 것으로 판단된다. 복합재 모델 분석 결과, Ni 함량 증가에 따라 α-Al 기지 지배 거동에서 IMC 간 하중분담이 증가하는 거동으로 전환되었으며, CTE는 구속효과를 고려한 Turner 및 Kerner 모델과 잘 일치하였다. 이상의 결과는 Ni-rich IMC의 종류, 분율 및 연결성이 Al-Si-Ni 합금의 탄성 및 열팽창 특성을 지배하며, 이들의 형성 거동은 냉각속도에 크게 의존함을 보여준다.

[알루미늄3-1 | 11:00]

Al-Si-Mg 합금의 냉각속도에 따른 부식거동 규명: 이상익, 이윤호, 김영서(한국재료연구원, 한양대학교), 김정한(동아대학교), 장재일(한양대학교), 조영희*(한국재료연구원)

Keywords: Al-Si-Mg alloy, cooling rate, microstructure, corrosion

전 세계적으로 탄소중립 실현을 위한 정책과 기술 개발이 확대됨에 따라 자동차 산업에서도 탄소 배출 저감을 목적으로 내연기관 차량에서 전기차를 비롯한 전동화 차량으로의 전환이 빠르게 이루어지고 있다. 이에 따라 차량의 에너지 효율 향상과 주행거리 확보를 위한 차체 경량화의 중요성이 증가하고 있으며, 낮은 밀도와 우수한 성형성 및 경제성을 갖는 알루미늄 합금의 적용 범위 또한 확대되고 있다. 특히 전기차에 적용되는 배터리, 모터, 인버터 등의 알루미늄 부품은 다양한 전해질 환경 및 전기화학적 조건에 노출될 수 있어 부식에 대한 신뢰성 확보가 중요한 과제로 대두되고 있다. 전기차 구동 모터 하우징에는 경량성과 우수한 주조성을 확보하기 위해 Al-Si-Mg계 주조용 합금이 널리 사용되고 있다. 그러나 실제 모터 하우징은 복잡한 형상과 부위별 두께 차이로 인해 주조 시 위치에 따라 상이한 냉각속도를 나타내며, 이러한 열적 이력은 응고조직과 국부 부식특성에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 Al-Si-Mg 합금의 냉각속도 변화가 응고 미세조직과 부식거동에 미치는 영향을 규명하고, 이들 특성 간의 상관관계를 분석하고자 하였다. 미세조직 분석을 통해 냉각속도에 따른 2차 수지상간격(secondary dendrite arm spacing, SDAS)의 변화와 공정 Si 및 Fe계 금속간화합물(intermetallic compound, IMC)의 크기, 분포 및 분율을 비교하였다. 또한 분극시험과 침지시험을 실시하여 거시적·미시적 부식특성을 평가하였다. 실험 결과, 냉각속도 변화에 따른 분극곡선의 전반적인 전위-전류 거동에서는 뚜렷한 차이가 나타나지 않았으나, 침지시험과 국부 부식 관찰에서는 냉각속도가 증가할수록 부식의 개시 및 진행이 지연되는 경향이 확인되었다. 이는 빠른 냉각조건에서 공정 Si와 Fe계 금속간화합물이 상대적으로 미세하고 균일하게 형성됨으로써 기지와 제2상 사이의 국부적인 전기화학적 불균일성이 완화되고, 결과적으로 부식의 개시 및 전파가 억제되었기 때문으로 판단된다. 또한 KPFM(Kelvin probe force microscopy)을 이용하여 기지와 주요 생성상 사이의 표면 전위차를 분석함으로써 부식 개시와 관련된 주요 상을 확인하였으며, SECM(scanning electrochemical microscopy)을 통해 부식 진행 과정에서 발생하는 국부 전기화학 반응을 실시간으로 분석하여 냉각속도에 따른 미시적 부식 메커니즘을 규명하고자 하였다.

[알루미늄3-2 | 11:15]

열간압출 및 시효 열처리한 $Al_{(68-x)}Mg_{10}Si_{10}Cu_5Zn_5Ni_{(x=0,\ 2)}$합금의 미세조직–기계적특성 상관관계: 전정민, 이상화, 박성현(전북대학교), 신은주(한국원자력연구원), 안지혁, 이윤수(한국재료연구원), 정재길*(전북대학교)

Keywords: Al-based metal matrix composites, Microstructure, Precipitation, Transmission electron microscopy, Small-angle neutron scattering

알루미늄 기반 금속기지 복합재료 (Al-based metal matrix composites, Al-based MMCs)는 낮은 밀도와 우수한 기계적 특성으로 인해 자동차 및 항공우주 산업에서 차세대 경량 구조재로 주목받고 있다. 특히 다량의 합금원소를 첨가할 경우 다양한 금속간화합물이 형성될 수 있으며, 이러한 금속간화합물은 합금의 경도 및 강도 향상에 기여할 수 있다. 또한, 다량의 석출 형성 원소를 포함하는 합금은 후속 시효 처리를 통해 추가적인 석출강화를 유도할 수 있어, 기존 상용 Al 합금과는 다른 복잡한 석출 거동을 나타낸다. 그러나 주조 과정에서 형성되는 조대하고 취성인 금속간화합물은 응력집중 부위로 작용하여 균열의 발생과 전파를 촉진하고, 결과적으로 합금의 연성 및 변형능을 저하시킬 수 있다. 따라서 높은 강도와 우수한 연성을 동시에 확보하기 위해서는 금속간화합물의 크기, 형상 및 분포를 효과적으로 제어하는 것이 중요하다. 열간압출과 같은 열기계적 공정은 주조 과정에서 형성된 기공을 제거하고 조대한 금속간화합물을 미세화할 수 있을 뿐만 아니라, 후속 용체화 및 시효처리 과정에서 용질 원자의 재분배 및 석출 거동에도 영향을 미칠 수 있어 기계적 특성 향상을 위한 효과적인 방법으로 고려되고 있다. 그럼에도 불구하고 기존 Al-based MMCs에 대한 연구는 주로 주조 상태의 미세조직과 열처리에 따른 상변화 및 석출 거동에 집중되어 있으며, 열간압출에 따른 금속간화합물의 변화와 후속 시효 석출 거동, 그리고 이러한 미세조직 변화가 기계적 특성에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구는 여전히 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 $Al_{70}Mg_{10}Si_{10}Cu_5Zn_5$ 및 $Al_{68}Mg_{10}Si_{10}Cu_5Zn_5Ni_2$ 합금을 대상으로 Ni 첨가 및 열간압출에 따른 금속간화합물의 변화와 후속 용체화 및 시효처리에 따른 석출 거동을 분석하였으며, 이들이 압축 기계적 특성에 미치는 영향을 규명하였다. 그 결과, 열간압출을 통해 주조 기공이 제거되고 조대한 금속간화합물이 파쇄됨에 따라 두 합금의 압축 변형능이 크게 향상되었다. 또한, 자연 및 인공시효 과정에서 뚜렷한 시효경화 거동이 나타났으며, 투과전자현미경 및 소각 중성자 산란을 통해 Zn 및 Cu 관련 석출물의 형성과 성장 거동을 확인하였다. 특히 Ni 첨가 합금에서는 δ-Al_3CuNi 상의 형성으로 Al 기지 내 Cu 함량이 감소하여 후속 석출 반응이 억제되었다. 이러한 금속간화합물과 나노 석출물의 변화는 압축 특성에도 직접적인 영향을 미쳤으며, Ni-free 합금은 T6 처리 후 우수한 압축강도와 변형능을 나타냈다. 이러한 결과는 고분율 금속간화합물과 나노 석출물을 함께 제어하는 것이 Al-based MMCs의 강도와 연성을 향상시키는 데 효과적임을 보여준다.

[알루미늄3-3 | 11:30]

Mn 첨가량 저감 및 고온 열처리를 통한 고Fe 함유 6XXX계 알루미늄 합금의 물성 향상: 손은지(한국재료연구원, 부산대학교), 손현우*(한국재료연구원)

Keywords: 알루미늄, 금속, 스크랩, 저탄소, 자원순환

EOL(End-of-Life) 알루미늄 스크랩은 1차 알루미늄 생산 대비 약 95%의 에너지 절감이 가능하여 생산 비용 및 탄소 배출 저감을 위한 중요한 2차 자원으로 주목받고 있다. 그러나 재활용 과정에서 축적되는 Fe 불순물은 조대한 침상형 β-AlFeSi상을 형성하여 응력 집중 및 균열을 유발하고 합금의 강도와 연성을 저하시킨다. 일반적으로 Mn 첨가와 열처리를 통해 β-AlFeSi상을 α계 Fe상으로 개량할 수 있으나, 과도한 Mn 첨가는 금속간화합물의 크기와 분율을 증가시켜 기계적 특성 향상을 제한할 수 있다. 본 연구에

서는 Mn 함량이 서로 다른 고Fe 함유 6XXX계 Al-Mg-Si-Cu 합금을 대상으로 조성 설계와 고온 열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화를 분석하였다. 합금은 550 ºC에서 균질화 처리한 후 열간압출하였으며, 이후 550 ºC에서 용체화 처리 및 수냉한 뒤 175 ºC에서 인공시효하였다. SEM/EDS 분석 결과, Mn-free 합금에서도 β-AlFeSi상의 α-AlFeSi상으로의 개량이 확인되었다. 또한 TEM 분석을 통해 Al-Mg-Si-Cu계 석출상이 관찰되었으며 해당 상이 석출강화에 기여한 것으로 판단된다. Mn-free 합금은 320 MPa의 항복강도와 366 MPa의 인장강도, 약 20%의 연신율을 나타내어 우수한 강도와 연성을 확보하였다. 굽힘시험에서는 Orange peel 결함이 발생하기 시작하는 임계각도가 8.94 º로 가장 높게 나타나 비교 합금 대비 우수한 표면 성형성을 보였다. 이를 통해 Mn-free 조건에서도 Fe계 금속간화합물의 개량과 석출강화를 병행할 수 있음을 확인하였으며 EOL 알루미늄 스크랩의 고부가가치 재활용을 위한 6XXX계 합금 설계 전략을 제시하였다.

[알루미늄3-4 | 11:45]

Fe 함량이 Al–Mg–Si 합금 압출재의 Peripheral Coarse Grain (PCG) 형성 및 표면 형상에 미치는 영향: 김형준(한국재료연구원, 부산대학교), 민경문, 김규낙, 윤연희, 안지영, 손현우, 이윤수*(한국재료연구원), 이제인*(부산대학교), 안지혁*(한국재료연구원)

Keywords: Al–Mg–Si alloy, Fe-bearing intermetallics, Peripheral coarse grain, Particle-stimulated nucleation, Zener pinning

수송기기 분야에서 경량화를 목적으로 수요가 증가하고 있는 6XXX계 알루미늄 합금은 탄소 배출 저감을 위해 스크랩 알루미늄을 활용한 소재 제조가 요구되고 있다. 그러나 스크랩 사용 증가는 Al–Mg–Si계 압출용 합금의 잔류 Fe 함량을 증가시키므로, Fe가 압출 과정에서 미세조직 발달에 미치는 영향을 이해하는 것이 중요하다. 특히, 압출재 표면부에서 발생하는 재결정 조직인 Peripheral Coarse Grain (PCG)은 압출재의 표면 품질을 저하시킬 수 있다. Fe는 재결정 거동에 영향을 미치는 조대한 금속간화합물과 미세 분산상의 분포 및 특성을 변화시키므로 PCG 형성 거동 또한 달라질 수 있다. 그러나 이들의 상관관계는 아직 명확하게 규명되지 않았다. 본 연구에서는 Fe를 각각 0.2, 0.4 및 0.6 wt.% 첨가한 Mn 함유 Al–Mg–Si계 합금을 4:1, 16:1의 압출비로 압출하여 Fe 함량에 따른 입자 분포와 PCG 형성 거동을 분석하였다. Fe 함량이 증가함에 따라 조대한 α-Al(Fe, Mn)Si 금속간화합물의 number density는 증가하여 Particle-Stimulated Nucleation (PSN)을 촉진하는 요인으로 작용하였다. 반면, Fe 함량이 증가함에 따라 미세한 α-Al(Fe, Mn)Si 분산상의 volume fraction 변화는 크게 나타나지 않았으며, 0.6Fe 합금에서는 분산상의 크기가 현저히 감소하였다. 이에 따라 0.6Fe 합금의 Zener pinning pressure는 약 70% 증가하였다. 연속적인 PCG 층은 압출비 16:1에서만 형성되었으며, PCG 두께는 0.4Fe 합금에서 최대 54.0 μm였으나, 0.6Fe 합금에서 25.0 μm로 Fe 함량 증가에 따라 비단조적인 변화를 보였다. 이러한 결과는 조대한 금속간화합물에 의한 PSN 촉진과 미세 분산상에 의한 Zener pinning이 상호 경쟁적으로 작용하여 PCG 형성에 영향을 미친 것으로 해석된다. 압축 변형 후 표면 거칠기 변화 또한 PCG 두께 변화와 유사하게 0.4Fe 합금에서 최대 7.44 μm였으나, 0.6Fe 합금에서 2.22 μm로 감소하였다. 이는PCG 발달이 압축 변형 후 표면 변형 거동과 연관되어 있음을 시사한다. 반면, 벌크 유동 거동은 Fe 함량에 따라 큰 차이는 나타나지 않았다. 따라서 본 연구의 합금 조성 및 공정 조건 범위에서 잔류 Fe 함량의 증가는 반드시 PCG 형성을 촉진하거나 변형 후 표면 품질을 저하시키지 않았으며, 이는 스크랩을 활용한 Al–Mg–Si계 압출용 합금에서 상대적으로 높은 잔류 Fe 함량의 허용 가능성을 제시한다.

[알루미늄3-5 | 12:00]

Effect of processing by hot extrusion and rolling on microstructure and plastic anisotropy in AA6082 alloy: Kyo-Min Kwon(Korea Automotive Technology Institute (KATECH), Korea University), Seok Su Shon*(Korea University), Sehoon Kim*(Korea Automotive Technology Institute (KATECH))

Keywords: AA6082 alloy, Extrusion, Rolling, Plastic anisotropy, Recrystallization behavior

In this study, the microstructure and plastic anisotropy of AA 6082 alloy depending on hot extrusion was studied. The chemical compositions of as-casted AA 6082 alloy were Al-0.8 Mg-0.95Si-0.2Fe-0.5Mn (wt.%). The content of elements such as chromium, copper, titanium, and zinc did not exceed 0.2 wt.%. The billet was extruded into shape of plate with thickness of 10 mm. Both non-extruded and extruded specimens were processed following the sequence of hot rolling, cold rolling, solution treatment, and artificial aging. To compare the mechanical properties and plastic anisotropy of both specimens, the tensile specimen was machined along 0º, 45º, and 90º directions with respect to the rolling direction (RD). Tensile tests were conducted at a crosshead speed of 3 mm/min, and the r-value was determined using digital image correlation (DIC) to evaluate normal and planar anisotropy. After Rolling and T6 treatment, the precipitates were observed by using a field-emission scanning electron microscope (SEM), attached with an energy dispersive X-ray spectrometer (EDS), while nanoscale precipitates were investigated using transmission electron microscopy (TEM). Electron backscatter diffraction (EBSD) was employed to analyze the microstructure, crystallographic texture, and recrystallization behavior. In addition, fracture surfaces and crack propagation behavior after tensile testing at 0 º, 45 º, and 90 º were examined to elucidate the deformation and fracture mechanisms. We aimed to elucidate on the effect of combined hot extrusion and rolling on formability of AA 6082 alloy for industrial application through correlation with the microstructures and related to mechanical properties anisotropies.

저탄소 알루미늄 심포지엄
Room 2층 201호, 10월 28일

[저탄소1-1 | 13:30] 조청강연

PIR/PCR 기반 저탄소 자동차용 알루미늄 판재 및 부품화 제조 기술: 최성규*, 심현석, 신종옥((주)동산테크)

Keywords: PIR/PCR, 탄소배출, 저탄소 알루미늄, 스크랩, 재활용

EU 탄소국경조정제도(CBAM) 시행에 따라 알루미늄 등 탄소 다배출 소재에 대한 저탄소 전환 필요성 증가로, 자동차 및 전동화 부품 분야의 선제적 대응이 요구되고 있다. 과거 자동차 산업의 경우 운행단계의 탄소배출 저감을 강조하였으나, 친환경차 보급 등 장기적 관점에서는 운행단계에서의 탄소배출 비중보다 소재 제조 단계에서의 배출량이 부각될 가능성이 높다. 특히 전기차의 경우 Life Cycle 탄소배출량 중 60%가 제조 단계에서 발생하기 때문에 알루미늄과 같이 원소재 제조 단계에서의 탄소배출량이 많은 소재는 대응 방안 마련 및 해소 기술개발이 시급하다. 본 기술개발은 PIR/PCR 기반 50% 이상 알루미늄 스크랩 활용하여 범세계적인 환경규제에 따라 완성차 업계에 요구되고 있는 탄소배출량 20% 저감 자동차용 저탄소 알루미늄 판재 및 부품화 기술개발이며 국외 전량 역수출중인 고품질 스크랩의 재활용 기술 확보를 통해 국내 자원의 Closed-loop Recycling System 및 소재 공급망을 확보하고 핵심기술의 국산화를 통한 국내 완성차사 수요 대응 및 세계시장에서의 경쟁력 확보에 기여할 것으로 기대된다.

[저탄소1-2 | 13:55] 조청강연

알루미늄 스크랩 용탕 청정도 평가의 신뢰성 확보: 김덕*, 하원, 김명균(포항산업과학연구원)

Keywords: 알루미늄, 용탕, 스크랩, 개재물, 정량평가

알루미늄 제품의 특성은 합금 조성뿐만 아니라 용탕 내 비금속개재물의 품질에 크게 의존한다. 비금속개재물은 종류와 크기에 따라 차이는 있으나, 일반적으로 기계적 물성을 저하시키며, 탄소중립 요구에 따른 스크랩 적용 비율 증가로 그 영향이 더욱 부각되고 있다. 그러나 비금속개재물은 공정 중 제어 난이도가 높고, 정량적인 평가와 생성원인 분석이 어렵다는 점에서 이를 효율적으로 저감하는 데 한계가 있다. 따라서 알루미늄 용탕 내 비금속개재물을 종류별로 정량 분석하고, 이를 바탕으로 발생 원인을 규명하는 것은 제품 품질 향상을 위해 필수적이다. 본 연구에서는 용탕 여과 방식을 이용하여 알루미늄 용탕 내 비금속개재물을 정량적으로 평가할 수 있는 자체 설비를 구축하고, 이를 통해 제조한 다양한 시편의 분석 결과를 제시하고자 한다. 약 3 kg의 소재를 용해한 후 준비된 도가니를 약 40분간 예열하고, 일정한 기공도를 갖는 필터를 통해 2분 내외로 용탕을 여과함으로써 용탕 내 비금속개재물을 신속하게 농축한 시편을 확보하였다. 이후 시편을 경면 연마한 뒤 광학현미경으로 미세조직을 관찰하고, 이미지 분석 기법을 적용하여 비금속개재물의 종류, 크기, 면적 분율 등을 정량화하였다. 또한 이미지 분석 과정에서 분석자의 경험 및 수작업 차이에 따른 편차를 최소화할 수 있도록 분석 절차를 표준화하여 재현성을 확보하고자 하였다. 제안된 비금속개재물 정량 평가 장치와 분석 방법은 기존 방법에 비해 빠르고 경제적이면서도 현장 품질 관리를 위한 수준의 정확도를 제공하므로, 비금속개재물 제어를 통한 알루미늄 용탕 품질 개선에 유효한 수단이 될 것으로 기대된다. 아울러 다양한 종류와 상태의 알루미늄 스크랩에 대해 여러 종류의 플럭스와 처리 조건을 적용한 후, 각 용탕에 대하여 비금속개재물의 정량 평가를 수행하였다. 이를 상호 비교함으로써 스크랩의 종류와 상태에 따른 최적의 용탕 정련 조건을 도출하고자 하였다.

[저탄소1-3 | 14:20] 조청강연

국내 알루미늄 자원 순환 시나리오별 온실가스 배출량 분석 및 CBAM 대응 연구 - 알루미늄 빌렛 공정을 중심으로: 최윤실, 김현찬, 김다진*, 홍석진((주)트레스웍스)

Keywords: 저탄소 알루미늄, CBAM, 알루미늄 빌렛, 자원순환, 탄소발자국

국내 알루미늄 자원 순환 시나리오별 온실가스 배출량 분석 및 CBAM 대응 연구 - 알루미늄 빌렛 공정을 중심으로

[저탄소2-1 | 14:55] 조청강연

자동차 열교환기 클래드용 알루미늄 스크랩 내 Mg 정련기술: 황종일*, 김선기, 신성진((주)나이스엘엠에스), 김병철, 김경수((주)디에스리퀴드)

Keywords: 알루미늄, 스크랩, 재활용, Mg 저감

범세계적 환경 규제와 탄소중립 정책에 따라 재활용 알루미늄 소재에 대한 요구는 급격하게 증가하고 있으며, 재활용 알루미늄 시장 규모도 꾸준한 성장세를 나타내고 있다. 원소재 제조단계에서 저탄소 알루미늄 소재는 전력원의 친화경화와 공정 중 발생하는 CO2의 양을 감축하기 위한 노력을 기울고 있으나, 국내 알루미늄 원소재 공급망을 고려하면서 가장 현실적인 방안은 원소재(primary materials) 대신 스크랩을 적극적으로 적용하는 방안이 가장 효과적이다. 그러나 공정 중 알루미늄 스크랩을 첨가시 청정한 용탕의 품질 확보 뿐만아니라 전신재용 알루미늄 합금은 요구되는 성형성을 확보하기 위해 특정 성분 관리가 합금원소의 정련이 중요한 이슈로 부각되고 있다. 자동차용 열교환기용 소재는 전량 해외에서 수입되고 있는 현실에서, 국내 공급망 확보와 동시에 탄소저감 및 원가절감이 가장 큰 이슈이며, 특히 자동차의 온도를 제어하는 열교환기 방열판의 경우, 클래드 접합된 핀(3천계 합금/4천계 합금)과 튜브(1천계 합금) 등 다양한 소재로 구성되어 이에 대한 소재 국산화가 필요하다. 본 발표에서는 자동차 열교환기용 클래드 소재 중 가장 핵심이 되는 알루미늄 3000계 및 4000계 판재 원료를 알루미늄 스크랩으로 대체하기 위한 연구의 일환으로, 국내외에서 가장 공급이 원활한 UBC(Used Beverage Can) 스크랩 및 자동차용 Wheel 스크랩을 원소재로 활용함에 있어 스크랩 내 핵심성분인 Mg 원소를 제거하는 플럭스를 사용하여 PP급에서 정련실험을 실시하고 그에 대한 경과를 보고한다. (과제번호 RS-2024-00467980)

[저탄소2-2 | 15:20] 조청강연

알루미늄 합금 가공칩의 고상 재활용을 위한 공정기술 개발: 이병덕*, 최진주, 정재윤(고등기술연구원), 조영래, 이지용(현대자동차)

Keywords: Aluminum Recycling, Solid-State Recycling, Aluminum-Chip

완성차 산업은 CBAM, ELV 등 환경규제 강화로 재생원료 활용과 탄소저감이 요구되고 있으나, 비표면적이 넓은 절삭가공 칩 스크랩은 재용해 시 산화 손실과 오염으로 인해 고가의 6000계열조차 주조용 원료로 다운사이클링되고 있다. 본 연구에서는 용해·주조 없이 압축 성형과 열간압출만으로 칩을 벌크 소재로 전환하는 고상 재활용(SSR) 공정기술을 개발하였다. 6000계열 가공칩을 브리켓으로 압축 후 열간압출 및 용체화·시효 열처리하여 압출재를 제조하고, 동일 이력의 신재 빌렛 압출재와 기계적 특성(인장·항복강도, 연신율, 굽힘강도)을 비교하였다. XRF·ONH, XRD 분석으로 성분·불순물과 석출상을 확인하고, OM, SEM-EDS, EBSD 및 파단면 분석을 통해 칩 계면 접합 상태, 산화물 분포, 재결정 거동과 파괴 양상을 관찰하였다. 그 결과 산화물·불순물 혼입이 기계적 특성 저하에 미치는 영향을 규명하고, 특성을 제약하는 핵심 미세조직 변수를 도출하여 공정 개선 방향을 제시하였다

[저탄소2-3 | 15:45]

소재부품 생산공정과 탄소중립에 대한 비파괴기술의 역할: 김정석*(조선대학교)

Keywords: 비파괴기술, 생산공정, 소재부품, 탄소중립

금속 제조공정 (압연, 주조, 단조, 용접, 적층제조)에서 발생되는 결함과 잔류응력은 구조물의 기계적 성능과 수명에 중대한 영향을 미치게 된다. 이러한 결함은 공정 조건, 열-기계적 이력, 미세조직 변화 등에 의해 발생하며, 조기에 검출되지 않을 경우 최종 제품의 신뢰성 저하, 손상과 파손 등의 커다란 손실로 이어질 수 있다. 본 연구에서는 다양한 금속 제조공정에서 적용되는 비파괴검사 (Nondestructive Testing, NDT) 기술이 공정관리와 탄소중립 달성에 미치는 역할을 고찰하였다. 초음파검사 (Ultrasonic Testing, UT), 방사선검사 (Radiographic Testing, RT), 와전류검사 (Eddy Current Testing, ECT)와 같은 전통적 NDT 기법을 기반으로, 최근 주목받고 있는 펄스와전류 (Pulsed Eddy Current Testing, PECT), X-ray 전산화단층촬영 (Computed Tomography, CT), 그리고 인공지능 기반 결함 평가 기술을 포함하여 공정별 적용 가능성과 특징을 비교 분석하였다. 특히, 제조공정 중 실시간으로 품질을 평가하는 인라인 (in-line) 및 온사이트 (on-site) 비파괴검사 기술은 결함의 조기 검출을 가능하게 하여 불량률 감소와 재작업 최소화에 크게 기여한다. 이를 통해 원재료 낭비를 줄이고, 제조 공정의 효율성을 향상시킬 수 있다. 또한, 불필요한 재용해 및 재가공 공정을 줄임으로써 에너지 소비를 저감하고, 궁극적으로 이산화탄소(CO_2) 배출 감소에 기여할 수 있게 된다. 적층제조 (Additive Manufacturing, AM) 공정에서는 in-situ 모니터링 기술을 통해 용융풀 거동, 결함 형성, 열 이력 등을 실시간으로 분석함으로써 결함 발생을 사전에 제어할 수 있으며, 이는 친환경 제조 및 고효율 생산체계 구축에 중요한 역할을 한다. 결과적으로, 비파괴검사는 단순한 사후 품질검사 기술을 넘어, 공정 제어와 최적화를 위한 핵심 요소로서 기능하며, 스마트 제조 환경에서 필수적인 기술로 잘 알려져 있다. 또한, AI 지속가능한 제조 시스템 구축과 탄소중립 실현을 위한 필수 기반 기술로서 그 중요성이 더욱 증대될 것으로 기대된다.

[저탄소3-1 | 16:10] 조청강연

저탄소 재생 Al–Si 다이캐스팅재에서 산화 이중막 기공(bifilm porosity)이 초고주기 피로에 미치는 영향: 윤상일, 최지석, 송호섭((주)삼기), 박재순((주)한국주조산업), 조영래, 이지용, 강희삼(현대자동차), 조인식*(선문대학교)

Keywords: 초고주기피로, 재생 알루미늄, 산화 이중막, 초음파 피로시험, 다이캐스팅

알루미늄 산업의 탈탄소 전환은 스크랩을 투입한 재생(2차) Al–Si 합금의 자동차 구조부품 적용을 빠르게 확대시키고 있으며, 이에 따라 재생재의 피로신뢰성을 지배하는 인자를 규명하는 것이 중요한 학술적·산업적 과제로 대두되고 있다. 주조 알루미늄의 피로파괴는 응고 결함에서 개시되며, 특히 초고주기(VHCF) 영역에서는 균열이 표면이 아니라 재료 내부의 결함에서 개시되어 종래의 피로한계 개념으로 예측되지 않는다. Campbell의 이중막(bifilm) 이론에 따르면, 용탕의 난류 충전 시 접힌 산화피막이 결합되지 않은 내부 계면을 형성하여 기존재 균열로 작용하는데, 재생재는 반복적 재용융과 스크랩 혼입으로 이러한 산화물 혼입 결함이 증대될 개연성이 높다. 그러나 재생재를 1차재와 구분 짓는 이중막 결함의 형태와 그 VHCF 유해성은 정량적으로 규명되지 않았다. 본 강연에서는 신재 및 재생 Castasil®-37 다이캐스팅재를 대상으로, 하중모드를 축방향으로 동일하게 유지한 채 주파수만 20 Hz(유압)와 20 kHz(초음파)로 달리한 완전교번(R = −1) 피로시험 결과를 중심으로 이 문제를 고찰한다. 신재는 두 주파수의 데이터가 하나의 S–N 밴드로 통일되어 피로거동이 주파수가 아닌 결함에 의해 지배됨을 보였으며, 이는 초음파 피로시험이 결함지배 조건에서 통상 시험과 등가임을 입증한다. 반면 재생재는 고주기 영역에서는 신재와 대등하였으나 초고주기 영역에서 평균수명이 저하하고 산포가 크게 증가하여, 주파수 등가성이 저응력 장수명 영역에서 선택적으로 붕괴됨을 확인하였다. 파면 관찰 결과 신재는 단일 기공에서 균열이 개시된 데 비해, 재생재는 다수의 미세 기공이 파면 전역에 분포하였으며, 이들은 주름진 Al_2O_3 산화막으로 피복되고 내부가 매끈한 폴리포이드(polypoid) 형태의 이중막 기공으로 관찰되었다. 주목할 점은 재생재가 개별 기공이 더 작음에도 초고주기 피로강도가 낮게 나타난 것으로, 이는 최대 단일결함이 피로한도를 지배한다는 $\sqrt{\text{area}}$ 패러다임으로는 설명되지 않으며, 다수의 이중막 기공이 경쟁적 균열개시원으로 작용하는 개체군적(population-controlled) 유해성으로 해석된다. 즉 재생재의 VHCF 신뢰성은 결함의 크기뿐 아니라 개수밀도·분포·형태에 의해 지배되며, 이는 결함지배 피로의 고전적 관점을 확장할 것을 요구한다. 본 발표에서는 이러한 결과를 종합하여, 저탄소 재생 Al–Si 소재의 확대 적용에서 용탕 청정도 관리와 산화막 이중막 저감이 피로신뢰성 확보의 핵심임을 제시하고, 재생 주조재의 초고주기 피로설계에 대한 학술적 시사점을 발표하고자 한다.

[저탄소3-2 | 16:35] 조청강연

알루미늄 스크랩 재활용을 위한 직류 전류 인가 기반 Fe상 제거 공정 기술: 배장현, 조하은(한국생산기술연구원), 한흥남(서울대학교),

김문조*(한국생산기술연구원)
Keywords: 알루미늄, 재활용, Fe 저감, 전류 인가

알루미늄 재활용 과정에서 발생하는 철(Fe)의 축적은 응고 시 취성이 강한 Fe계 금속간화합물 형성을 촉진하여 연성 및 인성을 저하시키므로 심각한 문제를 야기한다. 합금화 기반의 침강법이나 외부장(external field) 보조 분리법 등 기존의 Fe 저감 방식은 효율이 제한적이거나 잔류 원소를 남겨 재활용성을 저해하는 한계가 있다. 본 연구에서는 Fe계 금속간화합물 상의 조대화 및 침강 거동을 향상시키기 위해 직류(DC) 전류 인가 기반의 응고 공정 기술을 제안하였다. Sn 첨가 유무에 따른 Al–Fe 합금을 대상으로 응고 중 직류 전류를 인가하여 주조를 수행하였다. 그 결과, 직류 전류 인가는 Fe계 상의 성장과 하향 침강을 현저히 촉진하였다. Sn 단독 첨가 시에는 효과적인 침강 없이 부분적인 조대화만 유도된 반면, Sn 첨가와 직류 전류를 복합 적용했을 때 조대화 및 침강 거동이 모두 크게 향상되었다. 이러한 향상 효과는 로렌츠 힘(Lorentz force)에 의해 유도된 용탕 대류가 용질 전달을 가속화하고 확산 제어 기반의 Fe계 금속간화합물 성장을 촉진한 데 기인한다. 본 연구 결과는 직류 전류 인가 응고 기술, 특히 Sn 첨가와의 복합 공정이 재활용 알루미늄 합금 내 과잉 Fe를 저감할 수 있는 유망하고 친환경적인 재활용 공정 기술임을 보여준다.

[저탄소3-3 | 17:00] 조청강연

6000계 알루미늄 합금의 열처리 조건에 따른 미세조직 제어 및 압출재 특성 평가: 이원진, 오승환*((주)에이알알루미늄)
Keywords: 알루미늄, 열처리, 주조, 미세조직

6000계 알루미늄 합금은 우수한 성형성과 경량성으로 수송기기 및 산업용 구조 재료로 널리 활용되고 있다. 그러나 성형 전 빌렛(Billet) 단계에서의 균질화 열처리 조건에 따른 편석 해소 및 석출상 제어의 한계로 인해, 후속 압출재의 미세조직 불균일성과 물성 편차가 발생하는 문제가 있다. 이에 본 연구에서는 압출 및 후속 공정 조건을 고정한 상태에서 빌렛의 균질화 열처리 온도 및 시간 조건만을 주요 변수로 미세조직 변화를 정밀 제어하고, 이에 따른 압출재의 기계적 물성과 성형성을 평가하였다. 본 연구는 압출 전 빌렛의 최적 균질화 열처리 공정 기준을 확립하고, 고품질 알루미늄 압출재 생산을 위한 산업적 기초 자료를 제공하는 데 의의가 있다.

반도체
Room 2층 202호, 10월 28일

[반도체1-1 | 10:00]
Interface Engineering of 2D Semiconductors via Damage-Free Charge Transfer Doping: Ji Hoon Park*(Pukyong National University)
Keywords: 2D semiconductors, transition metal dichalcogenides (TMDs), charge-transfer doping, van der Waals stamping, interface engineering

The electronic properties of two-dimensional transition metal dichalcogenides (2D TMDs) are highly sensitive to surface and interfacial conditions because of their atomically thin nature. Therefore, interface engineering is essential for controlling carrier transport and realizing reliable 2D electronic devices. Charge-transfer doping with inorganic or organic materials offers a straightforward approach to modulating carrier concentration and polarity in 2D semiconductors. However, direct deposition of dopant materials can damage the semiconductor surface and introduce interfacial defects through energetic deposition species, leading to charge trapping, hysteresis, and degraded device performance. Here, we present a damage-free interface-engineering strategy for 2D TMDs based on van der Waals stamping of charge-transfer dopant layers. MoO_3 and LiF thin films were first deposited onto polydimethylsiloxane (PDMS) stamps and subsequently transferred onto $MoTe_2$ and MoS_2 channels. By decoupling thin-film deposition from the semiconductor surface, this method minimizes deposition-induced damage while preserving effective electronic coupling between the 2D channel and the dopant layer. Structural characterization confirmed the formation of clean, damage-free interfaces, while electrical measurements showed markedly reduced hysteresis relative to directly deposited devices. The transferred MoO_3 and LiF layers produced effective p-type and n-type charge-transfer doping, respectively, demonstrating carrier-polarity control without exposing the 2D semiconductor directly to the deposition environment. Furthermore, selective transfer of MoO_3 and LiF onto ambipolar $MoTe_2$ channels enabled the fabrication of p-type and n-type transistors from the same semiconductor. Integration of these devices into a complementary inverter demonstrated the device-level applicability of the proposed approach. These results establish van der Waals transfer of functional thin films as a versatile strategy for tuning the electronic properties of atomically thin semiconductors while preserving their structurally sensitive surfaces and interfaces.

[반도체1-2 | 10:15]
Post-Growth Residue Control for Stable and 3R-Enriched NaCl-Assisted WS_2: Lia Saptini Handriani, Won Il Park*(Hanyang University)
Keywords: WS_2, MOCVD, NaCl-assisted growth, post-growth annealing, 3R stacking, density functional theory

Salt-assisted metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) enables large-domain growth of two-dimensional transition-metal dichalcogenides, but residual species introduced during growth can compromise their environmental stability. Here, we investigate the ambient degradation and stacking evolution of NaCl-assisted MOCVD-grown WS_2. Optical microscopy, AFM, Raman/PL, EDS, and XPS analyses reveal that Na- and W-containing residues remain after growth and promote blister formation and oxidative degradation upon air exposure. EDS identifies Na-, W-, and O-rich residues, while XPS confirms oxidation of W and S together with persistent Na-containing species. To suppress this instability, sulfur-rich post-growth annealing (PGA) was applied immediately after growth, effectively removing residual species and preserving the morphological and optical characteristics of WS_2. Beyond stabilization, PGA also induces pronounced 3R stacking enrichment in multilayer regions. HAADF-STEM and electron diffraction analyses show a transition from mixed 2H/3R stacking before annealing to predominantly 3R stacking after PGA. DFT calculations further reveal that interlayer Na reverses the intrinsic 2H preference and stabilizes 3R by approximately 48 meV per formula unit, supporting Na-driven 3R selection during annealing. These results show that controlling residual species after growth can improve environmental stability while providing a route to stacking control in salt-assisted WS_2.

[반도체1-3 | 10:30]
Thermal Analysis of System-on-Chip using Finite Element Modeling: Experimental Validation and Physics-informed Graph Neural Operator for Acceleration: minjun cheon(Hanbat National University), Seong Jin Kim(Pohang University of Science and Technology), Jung-Won Lee, Lewis Kang(Nepes Co.), Jae Yong Song(Pohang University of Science and Technology), Hoon-Hwe Cho*(Hanbat National University)
Keywords: Finite element analysis, System-on-Chip, Thermal distribution, Physics-informed, Graph neural operator

The rapid advancement of AI semiconductors necessitates strategies to effectively manage the adverse impact of heat generation on system performance. This study investigates the heat transfer of a system-on-chip (SoC) using finite element (FE) analysis and a Physics-Informed Graph Neural Operator (PI-GNO). Using COMSOL software, thermal behavior is analyzed by precisely setting boundary conditions, thermal properties, and processing parameters. Transient thermal analysis of the SoC is performed under actual

operating conditions, and the computed results are used to analyze the heat transfer behavior of the system. Thermal equilibrium is reached after 900 s, which is consistent with the infrared thermography measurements. FE simulations are performed under various power conditions to generate a PI-GNO training dataset. The PI-GNO incorporates the heat transfer governing equations and boundary conditions into the loss function, enabling accurate temperature prediction with only a limited number of collocation points while reducing data requirements and training time. A gradient residual loss is applied to mitigate locally concentrated prediction errors, thereby improving the prediction accuracy and robustness of the PI-GNO model. In addition, adaptive loss weighting (ALW) balances the relative contributions of the data, PDE, and gradient residual losses during training, preventing any single loss term from dominating the optimization process. A comparison between the computed and predicted data is performed across the SoC, which indicates that the applied PI-GNO model is robust and adequately captures the transient thermal behavior. These results demonstrate that the PI-GNO model accurately captures the thermal behavior of the SoC under actual operating conditions while significantly accelerating temperature prediction compared to the FE model. The proposed integrated approach contributes to the advancement of semiconductor packaging technologies by effectively addressing key challenges related to heat dissipation and structural reliability in high-performance computing systems.

[반도체1-4 | 10:45]

RDE 도금 기반 (111) 결정면 제어와 표면처리 기반 산화막 억제를 통한 Cu-Cu 직접 접합 공정 제어: 안성민, 김미림, 한병준, 노진성, 김정철(국립한밭대학교), 윤창민(인하대학교), 노정철(홍익대학교), 김정한*(국립한밭대학교)

Keywords: 반도체, 하이브리드 본딩, Cu-Cu 접합, 표면처리

하이브리드 본딩(hybrid bonding)은 범프를 제거하여 I/O 밀도를 획기적으로 높이고 동일 높이 내 다층 적층을 가능하게 하는 차세대 패키징 기술로, HBM 및 3D 집적에 필수적이다. 접합은 Cu-Cu 확산으로 이루어져 접합강도를 제공하지만, Cu 표면에 형성되는 자연 산화막이 접합을 방해하여 강도를 저하시킨다. 본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위해 결정방위 제어와 표면처리를 동시에 적용하였다. 구리의 (111)면은 다른 결정면에 비해 확산 계수가 높아 첨가제 없이 회전 원판 전극(Rotating Disk Electrode, RDE) 도금법을 이용하여, 표면 확산계수가 가장 큰 (111) 집합조직을 갖는 미세결정립 Cu 박막을 형성하였다. 회전속도가 증가함에 따라 (111) 분율은 최대 60%까지 증가하였으며, 첨가제 없이 RDE 도금만으로 (111) 집합조직이 확보됨을 EBSD로 확인하였다. 이후 CMP로 평탄화한 표면에 플라즈마 없이 대기 중에서 진행 가능한 습식 표면처리를 적용하여 산화막을 제거하고 반응성 활성층을 형성하였다. 접합은 대기 중 250 ºC, 20 MPa에서 수행하고 진공 280 ºC에서 8시간 어닐링하였다. XPS 분석 결과 산화막이 효과적으로 억제됨을 확인?였으며, SAT와 단면 SEM/EBSD 분석에서 미접합 영역 감소와 접합계면을 가로지르는 신결정립 성장이 관찰되어 연속적이고 청정한 계면이 형성되었음을 확인하였다. 다이 전단시험 결과 처리된 시편은 미처리 대비 향상된 접합강도를 보였다. 본 연구는 RDE 도금에 의한 (111) 결정방위 제어와 습식 표면처리에 의한 산화막 억제를 통해 저온에서 고강도 Cu-Cu 직접 접합이 가능함을 보였다.

[반도체1-5 | 11:00]

CMP 의존도 저감을 위한 마이크로콘 구조 기반 HBM용 저온 Cu–Cu 하이브리드 본딩: 김미림, 안성민, 김정한*, 김정철, 노진성(국립한밭대학교), 윤창민(인하대학교), 노정철(홍익대)

Keywords: 도금, 접합, 마이크로콘, CMP, 표면처리

고집적 HBM 적층을 위해서는 Cu 배선 간 접합 두께를 최소화하면서도 높은 접합 강도와 신뢰성을 확보할 수 있는 저온 Cu-Cu 확산접합 기술이 요구된다. 본 연구에서는 flat Cu와 마이크로콘(micro-cone) 구조 Cu 표면을 이용한 Hybrid Cu Bonding(HCB) 기반 접합 전략을 제안하였다. 마이크로콘 구조는 상대 Cu 계면에 국부적으로 삽입되도록 설계하여 기계적 맞물림을 유도하고, 후속 열처리 과정에서 원자 확산을 촉진하도록 하였다. Flat Cu 표면은 전해도금 후 연마하여 평탄한 접합면을 형성하였으며, 마이크로콘 구조 Cu 층은 첨가제 조성과 전기도금 조건을 제어하여 제작하였다. 접합 전에는 Cu 자연산화막을 제거하고 표면을 활성화하기 위해 화학적 표면처리를 수행하였다. 이후 대기 분위기에서 플립칩 본더를 이용하여 마이크로콘 구조 Cu와 flat Cu를 접합한 뒤 열처리를 진행하였다. 마이크로콘 구조 Cu 층에서는 nano-twin 조직이 형성되었으며, 이는 Cu 원자 확산과 계면 결합 향상에 유리한 미세조직을 제공하였다. 또한 마이크로콘을 적용한 시편은 flat Cu끼리 접합한 시편보다 높은 접합 강도를 나타냈다. SEM 분석 결과, 열처리 후 계면 공극이 현저히 감소하였으며, EBSD 분석에서는 마이크로콘이 flat Cu 표면에 기계적으로 맞물린 형태가 확인되어 효과적인 확산접합이 이루어졌음을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 마이크로콘 기반 HCB 공정은 기존 고온 접합 공정의 한계를 완화하면서, 향후 HBM 적층을 위한 얇고 신뢰성 높은 Cu 배선 구현에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[반도체1-6 | 11:15]

Ag-Al-Si 합금 기반 나노다공성 은 분말의 탈합금 공정에 따른 미세조직 제어: 김영규, 성재욱*, 현승균*(인하대학교 제조혁신전문대학원)

Keywords: 나노다공성 은, 탈합금 공정, Ag-Al-Si 합금, 리가먼트 구조

전자 소자의 고집적화·고성능화에 따라, 낮은 공정 온도에서도 접합강도와 신뢰성을 동시에 확보할 수 있는 접합 소재에 대한 필요성이 커지고 있다. 대표적인 접합 소재인 은 나노입자(Ag nanoparticles)는 큰 비표면적 덕분에 저온에서도 우수한 소결 특성을 보이지만 입자가 미세하여 취급이 까다롭고 높은 재료 비용으로 한계를 가진다. 나노 다공성 은(nanoporous Ag)은 리가먼트 구조에 의한 높은 비표면적 덕분에 저온 소결 접합을 구현할 수 있어 이런 한계를 보안할 수 있는 이점이 있다. 본 연구에서는 기계적 분쇄가 가능한 Ag-Al-Si계 합금을 설계하였고, 이를 급속 냉각 공정(RSP, Rapid Solidification Process)을 활용하여 나노 복합 구조

를 갖도록 개발했다. 이와 같은 나노 복합 조직 합금은 Al과 Si 원소를 선택적으로 용출하는 탈합금 공정을 통해 Ag 리가먼트 구조를 유도했다. 탈합금 공정 조건(반응 온도와 시간)이 미세조직에 끼치는 영향을 확인하기 위해 FE-SEM 분석으로 공정 조건과 리가먼트 사이즈 간 경향성을, BET 분석을 통해 공정 조건과 비표면적 간의 경향성을 분석했다. 분석 결과 리가먼트 조대화는 표면확산에 의한 것이며 표면확산에는 온도가 주된 변수로 작용하지만 시간 또한 기여하는 것으로 확인됐다. 또한 여러 분석 결과를 통해 저온 접합용 나노 다공성 은(nanoporous Ag)에 적합한 탈합금 공정 조건을 도출했다. 이를 통해 본 연구에서 개발된 나노 다공성 은 분말은 저온 접합 소재로의 적용 가능성을 확인했다.

제35회 피로 및 파괴 심포지엄
Room 2층 202호, 10월 28일

[피로1-1 | 13:30]
KF-21 벌크헤드 웹 응력 예측을 위한 AI 모델 소개: 박상선*, 서창보((주)한국항공우주산업)
Keywords: KF21, AI
본 연구에서는 KF-21 벌크헤드의 웹 응력 및 수명 예측을 위한 AI 모델을 개발하고 학습 데이터 수에 따른 성능을 비교하였다. AI 모델은 단일 웹 평면의 컷-아웃 형상 등을 반영한 단면 형상 이미지와 단일하중의 작용 각도 정보를 벡터 형태로 입력 받아 응력을 예측하도록 구성하였다. 작용 하중에 대한 내력의 방향은 Kirsch 법칙을 사용하여 prior map 으로써 학습 채널에 추가했다. 모델은 U-Net Encoder-Decoder 기반으로 구성했다. 학습 데이터 수를 변경해가며 모델의 예측성능을 비교한 결과, 2만개 이상의 학습 데이터로 학습했을 때 10%내외의 오차율을 보였다. 본 연구는 AI 기반 항공기 구조 설계 및 수명관리 분야의 적용 가능성을 제시한다.

[피로1-2 | 13:45]
타이타늄 합금 품질 판정 객관성 향상을 위한 인공지능 기반 이미지 분석 제언: 박주영, 정유인*(한국항공우주산업(주))
Keywords: 타이타늄 합금, 미세조직, AI 기반 이미지 분석, 품질 검사, 객관화
Ti 합금 제품의 품질검사에서는 미세조직 이미지 및 육안검사 결과를 기반으로 공정 수행의 적절성, 열처리 상태, 기계적 특성의 적합성을 판단하고 있다. 그러나 일부 미세조직 및 육안검사 판정기준은 정량적 수치보다 표준 이미지와 실측 정보의 비교 및 검사자의 경험에 의존하는 정성적 기준으로 제시되어 판정의 일관성과 객관성 확보에 한계가 있다. 본 발표에서는 Ti 합금의 미세조직 이미지와 육안검사 측정 이미지를 기반으로 제품의 적합성을 판정하기 위한 AI 기반 학습모델의 활용 방안을 제안하고자 한다. 이를 위해 공정 조건별 미세조직 및 육안검사 이미지를 획득하고 기존 검사기준에 따른 적합 및 부적합 정보를 학습 데이터로 구성하는 방법을 통해 AI 모델이 학습하도록 하여 기존 정성적 판정기준의 객관화를 달성하고자 한다. 향후 충분한 학습 데이터와 검증 결과가 확보될 경우, Ti 합금 제품의 열처리 적합성 및 품질검사를 지원하는 효율성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[피로1-3 | 14:00]
제작공정 및 미세조직 기반 AI 활용 항공기 구조물 건전성 평가: 김영순*(경상국립대학교)
Keywords: 항공기 구조건전성 평가, 미세조직, 인공지능, 물성 예측, Ti-6Al-4V
항공기 구조재는 동일한 소재라 하더라도 열처리, 냉각 및 가공과 같은 제작공정 조건에 따라 서로 다른 미세조직이 형성될 수 있으며, 이러한 미세조직의 차이는 강도, 경도, 피로수명 및 파괴인성과 같은 기계적 물성에 영향을 미친다. 따라서 항공기 구조물의 건전성을 평가하기 위해서는 운용 중 발생하는 손상 정보뿐만 아니라 제작단계에서 형성된 재료의 초기 상태를 함께 고려할 필요가 있다. 본 발표에서는 미세조직 영상을 활용하여 재료의 물성을 예측하고 이를 항공기 구조건전성 평가에 연계하는 인공지능 기반 접근방법을 제시한다. 광학현미경, SEM, EBSD 등의 미세조직 영상으로부터 결정립, 상 분율, 조직 형태, 기공 및 결함과 같은 특징을 추출하고, 머신러닝 및 딥러닝 기법을 활용하여 강도, 경도, 피로특성 등의 물성을 예측하는 분석 과정을 살펴본다. 또한 대표적인 항공 구조재인 Ti-6Al-4V를 사례로 미세조직 영상과 제작공정 정보를 결합한 물성 예측 가능성을 설명하고, 예측된 물성을 구조해석, SHM 센서정보, 잔여수명 평가 및 정비 의사결정에 활용하는 방향을 제안한다. 마지막으로 영상의 대표성, 데이터 부족, 모델 일반화 및 예측 불확실성과 같은 실제 적용상의 한계를 검토한다. 이를 통해 미세조직 기반 AI 분석은 기존 구조건전성 평가를 대체하기보다는 구조물의 초기 재료 상태와 운용 중 상태를 함께 고려할 수 있도록 보완하는 기술로 활용될 수 있음을 제시한다.

[피로1-4 | 14:15]
미세조직 제어를 통한 적층제조 Ti-6Al-4V 옥텟트러스 격자구조체의 취성 파괴 억제 및 압축 변형 안정성 향상: 강성규*(경상국립대학교)
Keywords: Ti-6Al-4V, 격자구조체, Laser powder bed fusion, 취성파괴, 변형 안정성
격자구조체를 경량 구조 및 충격 흡수 부품으로 활용하기 위해서는 압축 변형 안정성, 그중에서도 항복 직후 하중지지능력이 불연속적으로 상실되는 응력 감소(stress drop) 거동의 억제가 핵심적이다. 옥텟트러스 격자는 stretch-dominated 구조로 높은 비강도를 갖지만, 압축 시 스트럿의 좌굴 및 파단에 의해 급격한 응력 감소가 발생할 수 있으며, laser powder bed fusion (LPBF)으로 제조된 Ti-6Al-4V의 경우 빠른 냉각속도로 형성된 취성의 α' 마르텐사이트가 이러한 거동을 심화시킨다. 그러나 기하학적 인자와 미세조직 인자가 응력 감소 거동에 미치는 영향을 분리하여 평가한 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 스트럿 직경을 0.4, 0.5, 0.6 mm (aspect ratio 5.87, 4.7, 3.92)로 달리한 Ti-6Al-4V 옥텟트러스 격자구조체를 LPBF로 제조하고, 900 °C에서 10–120분간 진공 열처리하여 기하와 미세조직을 독립적으로 제어하였다. X-ray computed tomography 분석 결과 내부 기공은 주로 node 인근에 구형으로 분포하였으며, EBSD 분석에서는 열처리 후 α/α' lath가 조대화되고 kernel average misorientation이 감소하여 잔류 응력이 완화됨을 확인하였다. 압축 실험 결과, as-built 시편은 파편을 동반한 취성 파단과 함께 최대응력 직후 가파른 응력 감소를 보인 반면, 열처리 시편은 최대응력이 낮음에도 완만한 응력 감소를 나타내어 두 조건의 응력–변형률 곡선이 교차하였다. 또한 스트럿 직경이 증가할수록 응력 감소 개시가 지연되고 변형 모드가 shear band 형성에서 균일 변형으로 전이되었다. 본 연구는 적층제조 격자구조체의 파괴 개시 및 하중 전달 안정성이 기하학적 인자와 미세조직 인자의 결합 효과로 제어될 수 있음을 보이며, 충격 흡수 구조체 설계에 활용될 수 있다.

[피로2-1 | 14:40]

Multiscale modeling and AI-based mechanical properties and structural Integrity prediction of metallic materials: Myoung-Gyu Lee*, Gyu-Jang Sim, Jehyun You, Hyeongseo Kim, Taehyeok Choi(Seoul National Univ.)

Keywords: Multiscale modeling, Microstructure, AI

This presentation introduces a multiscale and multiphysics modeling framework for establishing process–microstructure–property–performance relationships in advanced metallic materials for aerospace applications. The framework integrates process simulation, microstructure evolution, constitutive modeling, and damage and fracture mechanics to predict mechanical performance, and failure behavior under complex loading conditions. Microstructure evolution is modeled using approaches such as cellular automata and other microstructure formation models, while crystal plasticity finite element methods (CPFEM) are employed to capture the effects of microstructural features and crystallographic heterogeneity on macroscopic mechanical behavior. AI-based methods, including graph neural networks (GNNs), are further incorporated to efficiently learn complex process–microstructure–property relationships and accelerate high-fidelity multiscale simulations. Applications to Ti alloys, steels, high-temperature alloys, and additively manufactured materials are discussed, with particular emphasis on linking manufacturing history and microstructural characteristics to fatigue and fracture behavior. The proposed physics-informed and data-driven framework provides a promising approach for advanced structural integrity assessment and performance prediction of aerospace structures.

[피로2-2 | 14:55]

초음파 초고주기 피로시험의 신뢰성 검증과 원심주조 내열강의 고온 피로거동 평가: 조인식*((주)엠브로지아)

Keywords: 초음파 피로시험, 초고주기피로, 내열강, 피로 데이터베이스, 고온 동탄성계수, 결함기반 수명평가

고온에서 장수명으로 사용되는 구조소재의 초고주기(VHCF) 피로 물성은 부품 설계와 잔여수명 평가의 핵심 자료이나, 20 Hz 급 통상 시험으로 10^8 사이클 이상에 도달하려면 과도한 시험시간이 소요되어 규격 데이터가 부족한 실정이다. 20 kHz 초음파 피로시험(Ultrasonic Fatigue Testing, UFT)은 이러한 시험시간의 장벽을 크게 낮추어 고온 VHCF 물성을 신속하게 확보할 수 있는 유효한 수단이며, 이를 데이터베이스로 축적하면 소재의 사용조건별 피로강도와 잔여수명 평가의 정량적 기반을 제공한다. 다만 고주파 공진구동에 수반되는 자기발열, 시험편 공진설계, 그리고 시험주파수 자체가 피로거동에 미치는 영향에 대한 검증이 데이터의 신뢰성을 좌우한다. 본 연구에서는 초음파 고온 피로시험 기술의 신뢰성을 검증하고, 이를 실제 내열강 소재에 적용하여 고온 피로 데이터베이스 구축 가능성을 제시하였다. 신뢰성 검증을 위하여 시험편 게이지부를 동일 치수로 설계하고, 동일 시편규격에 대해 20 Hz 유압식 시험과 20 kHz 초음파 시험의 피로강도대가 정합함을 확인하였으며, 고온 분위기는 고주파 유도가열과 파이로미터 제어로 균일하게 유지하고 공진주파수를 지배하는 탄성계수의 온도 의존성을 시험편 설계에 반영하였다. 이 기반 위에서 원심주조 45Ni-35Cr 오스테나이트계 내열강(KHR45A)을 대상으로 상온 및 고온(871 ºC) 초고주기 피로거동을 평가한 결과, 10^8 사이클 기준 피로강도가 상온 190 MPa에서 고온 110 MPa로 저하함을 정량적으로 확인하였고, 파면 분석을 통해 결정립계 탄화물에서 형성된 공동(cavity)이 균열개시와 밀접하게 관련됨을 규명하였다. 아울러 동일 소재의 고온 인장 및 크리프 특성을 함께 평가하여, 초음파 피로시험이 인장·크리프 데이터와 연계된 통합 고온 물성 데이터베이스의 핵심 축으로 활용될 수 있음을 제시하였다. 본 연구는 초음파 피로시험 기술의 신뢰성을 실증하고, 고온 구조소재의 초고주기 피로 데이터베이스 구축을 위한 방법론적 기반을 제공하고자 한다

[피로2-3 | 15:10]

항공기 주요 구조 부위 피로 수명 평가 및 예측방법: 박세진*(공군항공기술연구소)

Keywords: ASIP, 피로수명

장기 운영 항공기는 반복 하중이 누적됨에 따라 주요 구조 부위의 피로손상이 점진적으로 심화되며, 이에 따라 구조 건전성 저하에 대한 우려가 지속적으로 제기되고 있다. 특히 운영 연한이 증가함에 따라 기존에 설정된 피로수명의 재평가와 함께 수명연장 필요성이 확대되고 있는 실정이다. 본 발표에서는 손상허용 및 안전수명 개념에 기반한 항공기 구조 건전성 평가 프로세스의 방법론을 소개한다. 하중 스펙트럼 분석을 통해 임계 부위(Control Point)를 선정하고, 균열성장해석을 수행하여 검사주기(Inspection and Analysis Time, IAT)를 설정하는 일련의 절차를 다루며, 실제 운영환경의 사용조건 및 임무 프로파일을 반영함으로써 예측 정확도를 제고하는 방안에 대해 논의한다. 아울러 장기 운영 항공기를 대상으로 한 구조 건전성 평가 및 수명연장 적용 사례를 통해, 운영환경별 하중 스펙트럼 차이를 고려한 수명 재산정 및 검사주기 조정 방안을 제시한다. 마지막으로 기존 정기점검 기반 평가 방식의 한계를 보완할 수 있는 최신 기술로서 구조건전성모니터링(Structural Health Monitoring, SHM)을 소개한다. 센서 기반 실시간 손상 감지 기술이 예측정비(CBM+)와 연계될 수 있는 가능성을 검토하고, 향후 피로수명 평가 체계의 고도화 방향으로서 SHM의 활용 전망을 논한다. 본 발표를 통해 전통적 손상허용 기반 평가 방법론과 SHM 기술의 융합이 항공기 구조 건전성 관리의 발전에 기여할 수 있는 방향을 제언하고자 한다

[피로2-4 | 15:25]

항공기 왕복엔진 구성품 손상원인 분석: 이병현*, 손경숙, 조형진(공군 항공기술연구소)

Keywords: 왕복엔진, 피로파괴, 금속, 손상

항공기 왕복엔진은 고온, 고압, 고진동 등 극한의 환경에서 운용되므로 부품의 구조적 건전성이 항공기 안전과 직결된다. 따라서 크랭크샤프트, 피스톤, 밸브 등의 핵심 부품들의 건전성을 보장하기 위해 설계단계부터 정/동적 하중해석, 고/저주기 피로해석, 열전달

등 다양한 요구조건을 검증한다. 하지만 운영단계에서 예상하지 못했던 부품의 손상이 종종 발생하기 때문에 원인분석 및 예방대책이 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 항공기 왕복엔진에서 발생한 주요 손상 사례에 대해 작동환경, 거시적/미시적 관찰, 전산 구조해석, 손상 메커니즘 등을 분석하고, 이에 대한 예방대책을 고찰하였다.

[피로3-1 | 15:50]

계장화 압입시험을 이용한 항공 구조재의 피로손상 및 잔여수명 평가: 국부 기계적 물성 및 잔류응력 기반 접근: 오은지, 홍정화((주)프론틱스), 권동일*(서울대학교)

Keywords: 계장화 압입시험(IIT), 항공 구조재, 피로손상, 잔류응력, 잔여수명 평가

항공 구조재는 제작 및 운용 과정에서 가공, 용접, 열처리와 반복하중의 영향을 받으며, 이에 따라 국부 기계적 물성과 잔류응력이 변화하고 피로손상이 점진적으로 축적된다. 기존의 피로 평가는 주로 피로시험, 균열 검출 및 파괴역학적 해석에 의존하고 있으나, 실제 구조물에서 균열 발생 이전의 재료상태 변화와 피로손상을 정량적으로 평가하는 데에는 한계가 있다. 본 연구에서는 계장화 압입시험(Instrumented Indentation Testing, IIT)을 이용하여 항공 구조재의 국부 기계적 물성과 잔류응력을 동시에 평가하고, 이들의 변화로부터 피로손상을 정량화하여 잔여수명 평가로 연계하는 접근법을 제안한다. IIT의 하중–변위 응답으로부터 강도, 가공경화 특성 등의 국부 물성을 평가하고, 기준 상태와의 압입 응답 차이를 이용하여 잔류응력을 측정한다. 이를 통해 반복하중에 따른 국부 물성 변화뿐만 아니라 잔류응력의 완화 및 재분포를 추적할 수 있다. 특히 가공부, 용접부 및 열영향부, 응력집중부와 같이 피로균열 발생 가능성이 높은 영역에서 국부 물성–잔류응력–피로손상 간의 상관관계를 분석함으로써 피로 취약부를 식별하고자 한다. 이러한 접근은 기존의 균열 검출 중심 평가를 보완하여 균열 발생 이전부터 실제 구조재의 재료상태 변화를 정량적으로 파악할 수 있다는 장점이 있다. 궁극적으로 본 연구는 IIT를 단순한 기계적 물성 측정기술에서 국부 재료상태 및 피로손상 평가기술로 확장하고, 향후 피로시험 및 손상역학 모델과 연계하여 항공 구조물의 상태기반 건전성 평가와 잔여수명 관리에 활용할 수 있는 가능성을 제시한다.

[피로3-2 | 16:05]

Micro-Splatting: 재료·표면 특성을 반영한 Physical AI의 Sim2Real 문제 해결을 위한 제조 AI 뉴럴 렌더링 기법: 최종성*(한국뉴욕주립대학교)

Keywords: 컴퓨터 비전, 시각인공지능, SIM2Real

Physical AI는 로봇, 자율주행, 디지털 트윈 등 실제 물리 세계에서 인지와 행동을 수행하는 차세대 AI 패러다임으로 주목받고 있다. 그러나 현실 환경에서 직접 학습을 수행하는 것은 비용과 위험이 크기 때문에, 시뮬레이션에서 학습한 모델을 현실에 적용하는 Sim2Real 기술이 핵심 과제로 떠오르고 있다. 하지만 물리 파라미터 차이, 표면 재질 정규화, 센서 노이즈 등으로 인해 시뮬레이션과 현실 사이에는 Reality Gap이 존재하며, 이를 해결하기 위한 대안으로 실제 환경 데이터를 기반으로 장면을 재구성하는 Neural Radiance Fields 등 Neural Rendering 기술이 주목받고 있다. 기존 CAD기반의 모델링에는 Reality Gap 문제가 발생한다. LiDAR 기반 재구성은 정확한 거리 측정으로 geometry 정보에는 강점이 있지만 데이터가 희소하고 appearance 표현이 제한적이다. 반면 Structure-from-Motion은 카메라 기반으로 저비용 3D 복원이 가능하지만 여전히 희소한 구조와 특징점 의존성이라는 한계를 가진다. 결과적으로 두 접근 모두 현실의 시각적 분포와 센서 특성을 동시에 반영하는 통합적 표현에는 제약이 존재한다. 현실 장면을 직접 3차원으로 복원하는 Neural Radiance Fields 기반 뉴럴 렌더링은 Novel View Synthesis와 Photorealism을 통해 현실과 유사한 가상 환경을 구축할 수 있는 방법으로 주목받고 있다. 이후 계산 효율을 개선한 3D Gaussian Splatting 기법이 등장하면서 실시간에 가까운 3차원 장면 표현이 가능해졌다 [4]. 그러나 산업 환경에서는 배관, 케이블 등 얇고 복잡한 구조를 안정적으로 표현하는 데 여전히 한계가 존재한다. 공장·설비의 결함은 대개 크고 눈에 띄는 문제가 아니라, 아주 작고 국소적인 변화(미세 균열, 얇은 배관의 단차, 전선의 처짐, 체결부의 미세한 틈)에서 시작된다. Micro-Splatting의 접근은 얇은 구조, 경계, 고주파 기하 영역과 같이 시뮬레이션에서 중요한 구조 및 표면적 요소에 3D Gaussian Splatting의 표현 요소를 선택적으로 집중시켜 장면 표현의 정밀도를 높인다. 반면 평탄한 영역에서는 표현 밀도를 과도하게 증가시키지 않아 계산 효율을 유지한다. 이러한 방식은 실제 설비 환경을 보다 안정적으로 재현하는 고충실도 시뮬레이션을 가능하게 하며, 로봇 학습과 자율 시스템 검증 등 Physical AI 기반 응용을 보다 현실적인 환경에서 수행할 수 있도록 지원한다. 또한 제조 환경에서 Sim2Real 문제를 완화할 수 있는 뉴럴 렌더링 기반 시뮬레이션 기술의 가능성을 제시한다. Neural Rendering 기반 Sim2Real 기술은 빠르게 발전하고 있지만, 산업 현장에서 Physical AI를 구현하기 위해서는 여전히 해결해야 할 과제가 남아 있다. 대표적으로 Non-Lambertian Reflection 재질 표현, 동적 장면 처리, 그리고 물리적 상호작용을 평가할 수 있는 검증 가능한 metric의 부족이 주요 문제로 지적된다. 결국 Physical-AI에서 중요한 기준은 시각적 유사성이 아니라, 현실 환경을 정확히 이해하고 안전하게 상호작용할 수 있는 능력이다.

[피로3-3 | 16:20]

Microstructure-Informed Local Property Mapping in Additively Manufactured 17-4PH Stainless Steel: Toward AI-Assisted Structural Integrity Assessment: Jungho Shin*(Kangwon National University), Moon-Jo Kim(Korea Institute of Industrial Technology), Daehyun Kim, Sunghee Han, Bokyu Kim, Junhee Han(Kangwon National University), Jaewoo Kim, In-Suk Choi(Seoul National University)

Keywords: Additive manufacturing, 17-4PH stainless steel, EBSD, nanoindentation, microstructure-informed AI

Aircraft structural integrity assessment increasingly requires quantitative links among manufacturing process, microstructure, local mechanical response, and macroscopic reliability. In this talk, I will present a conservative proof-of-concept study using laser powder

bed fusion 17-4PH stainless steel as a model heterogeneous alloy system. Electron backscatter diffraction (EBSD) descriptors were co-registered with continuous-stiffness nanoindentation data to examine how local phase constitution, boundary features, and misorientation-related metrics relate to micrometer-scale hardness and modulus variations. The results indicate that local hardness is primarily governed by FCC/BCC-BCT phase distribution, with secondary contributions from misorientation-based descriptors associated with local strain and defect structures. In contrast, elastic modulus prediction remains more limited, suggesting that EBSD-only descriptors do not fully capture the volumetric and nanoscale factors relevant to elastic response. Rather than presenting AI as a stand-alone predictor of structural performance, this work emphasizes how process- and microstructure-informed data pipelines can support more interpretable local property mapping. The broader implication is that EBSD–nanoindentation–AI workflows may serve as one component of aircraft structural health and integrity evaluation, especially when integrated with bulk mechanical testing, defect characterization, and physics-based reliability models.

[피로3-4 | 16:35]

작은 칩 하나로 예측하는 Ti-6Al-4V 전체 물성: 딥러닝 기반 워크프레임: 강석형*(경상국립대학교)

Keywords: 티아티늄, 딥러닝, 비파괴검사

Ti-6Al-4V의 인장강도(UTS), 경도, 피로한계 등 핵심 물성은 인장 시험편을 별도로 제작해야만 확보할 수 있어 시간과 비용 부담이 크다. 본 연구는 가공 공정에서 발생하는 부산물인 칩(chip)이 모재의 미세조직 정보를 물리적으로 담고 있다는 점에 착안하여, 칩 표면 이미지와 공정 파라미터만으로 인장 시험 없이 UTS·경도·피로한계를 예측하는 딥러닝 워크프레임을 제안한다. Ti-6Al-4V의 물성은 크게 α상의 형태와 배열, α/β 상분율과 결정립 크기, 결정립 배향(texture)이라는 세 가지 미세조직 인자에 의해 결정된다. 또한, 통계적 중요도 분석에 따르면 Mean Edge Length와 콜로니 크기 두 변수가 UTS 변동의 44%를 설명하며, 특히 결정립 배향 정보는 EBSD 없이 확보하기 어려운 핵심 병목으로 작용한다. 본 워크프레임은 이 네 가지 정보를 칩 이미지로부터 자동으로 추출하는 것을 목표로 하고 있다. 전체 파이프라인은 Phase 0부터 7까지 8단계로 구성된다. Phase 0(전처리·촬영)에서는 열처리 이력과 가공 파라미터를 기록하고 칩 자유면·단면을 SEM으로 촬영한다. Phase 1(유형 분류)은 ResNet50 전이학습으로 lamellar·bimodal·acicular 세 유형을 98% 정확도로 분류하고, Phase 2(피처 정량화)는 U-Net·DeepLabV3+ 세그멘테이션을 통해 prior-β 결정립 크기, α lath 두께 등 7가지 정량 피처를 추출한다. Phase 3(열이력 역추론)은 FDMC 물리 모델과 JADE-Kriging surrogate로 α/α' 분율을 상관계수 0.98 수준으로 예측하며, 선택 단계인 Phase 4(결정립 위상 포착)는 EBSD 가용 여부에 따라 PGCNN 또는 CNN descriptor 기반 통계적 근사를 적용한다. Phase 5(멀티모달 융합 예측)는 이미지 피처·열이력 descriptor·공정 파라미터·결정립 위상 정보를 FC Fusion Layer로 통합하여 UTS(R^2≥0.98), 경도, 피로한계(R^2≥0.93)를 동시에 예측한다. Phase 6(불확실성 정량화)은 MC Dropout에서 시작해 장기적으로 PI-BNN-VI로 전환함으로써 점예측을 95% 신뢰구간을 포함한 예측으로 격상시키며, 선택 단계인 Phase 7(역설계)은 GNN surrogate와 베이지안 최적화로 목표 물성을 만족하는 최적 공정 조건을 역방향으로 탐색한다. 구현은 단기(PoC·UTS R^2≥0.90)·중기(핵심 파이프라인 완성·R^2≥0.95)·장기(EBSD 고정밀화·다공정 일반화·역설계 통합)의 3단계 로드맵으로 추진하며, 단기 필수 경로는 Phase 0→1→2→5→6이고 Phase 3·4·7은 인프라 구축 이후 점진적으로 추가할 수 있다. 본 연구의 핵심 가치는 비파괴·무비용 부산물인 칩을 딥러닝 기반 물성 센서로 전환함으로써, 기존 인장 시험 대비 시간과 비용을 획기적으로 절감하면서도 신뢰구간이 포함된 물성 예측 결과를 설계에 직접 활용할 수 있게 한다는 점이다.

[피로4-1 | 17:00]

항공기용 엔진 부품의 내구성 및 손상허용 관리 계획: 이홍철*(한화에어로스페이스)

Keywords: Durability, Damage Tolerance, Low Cycle Fatigue, High Cycle Fatigue, Thermo-Mechanical Fatigue

항공기용 엔진 부품에 대한 내구성 및 손상허용 관리 계획은 엔진의 설계 수명 동안 구조 건전성을 확보하고 설계, 제작, 시험, 운영에 이르기까지의 전 과정을 체계적으로 관리하기 위한 핵심 계획이다. 예상되는 엔진 임무 환경을 기준으로 부품에 작용하는 하중과 온도 프로파일을 정의하고, LCF, HCF, TMF, Creep 등 주요 손상 모드에 대한 안전-수명(Safe-Life) 기준의 내구 수명을 평가한다. 또한 초기 결함을 고려한 파괴역학 기반 균열성장 해석을 통해 임계 균열크기, 잔류강도, 검사 주기를 산출하여 엔진 구조물의 손상 허용성을 확보한다. 또한 소재 및 부품 평가, 구성품 시험과 엔진 내구 시험을 통해 해석 결과를 검증하고, 실제의 운영 데이터를 이용하여 내구성 및 손상허용 평가 결과를 개정한다. 결론적으로, 임무 환경-해석-시험-인증-운영-수명 평가를 연결하는 Digital Thread 기반의 엔진 구조 건전성 관리체계는 엔진 부품의 구조적 안전성과 신뢰성을 확보하고 내구 수명 및 검사 주기의 최적화와 유지비 절감을 동시에 달성할 수 있을 것이다.

[피로4-2 | 17:15]

초기 균열 형상 및 하중조건에 따른 Ni기 내열 합금 터빈 디스크의 균열 특성 연구: 엄희진*, 박태규, 김경희(한화에어로스페이스)

Keywords: 가스터빈 엔진, 응력확대계수, 균열 진전

항공용 가스터빈 엔진은 고온·고압·고속 회전이라는 복합 하중 환경에서 운용되는 추진기관으로, 부품 표면 및 재료 내부에 존재할 수 있는 미세 결함이 반복 하중 하에서 피로균열로 성장하여 부품 파손을 유발할 수 있다. 이러한 초기 결함을 전제로 균열의 성장 거동을 파괴역학적으로 예측하는 것은 부품의 잔존수명 평가 및 손상허용 설계의 핵심 요소이다. 균열 진전 거동은 균열 선단 응력확대계수(Stress Intensity Factor)에 의해 지배되며, 특히 초기 균열의 길이와 방향각과 같은 형상 파라미터는 응력확대계수의 모드 혼합비(Mode Mixity)를 변화시켜 균열의 진전 경로와 성장 속도에 영향을 미친다. 본 연구에서는 항공용 가스터빈 엔진 부품을 대상으로 유한요소해석을 통해 다양한 초기 균열 길이 및 방향각 조건에서의 응력확대계수를 산출하고, 균열 진전 경로를 예측하였다.

또한 균열 성장 해석을 통해 초기 균열 파라미터가 균열 성장 속도와 잔존수명에 미치는 영향을 분석하였다. 해석 결과, 초기 균열의 방향각에 따라 KII 성분의 상대적 기여도가 변화하며, 이에 따라 균열의 진전 경로가 초기 방향으로부터 전환되는 거동이 확인되었다. 본 연구를 통해 도출된 초기 균열 파라미터별 균열 진전 거동 특성은, 추후 손상허용 설계 평가 시 잔존수명에 미치는 영향이 상대적으로 큰 초기 균열 조건을 식별하고 우선적으로 고려해야 할 결함 조건을 선별하는 데 기초 판단 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[피로4-3 | 17:30]

Critical Plane Approach를 이용한 단결정 블레이드의 LCF 수명평가: 김양균, 박태규, 김경희*(한화에어로스페이스)

Keywords: 저주기 피로수명, 단결정, 터빈 블레이드

항공용 가스터빈 엔진의 고압터빈 블레이드는 운용조건에 따라 1000 ℃ 이상의 고온과 고압의 환경에 놓이게 된다. 이때 발생하는 크리프와 산화, 부식 등으로 인한 강도저하를 막기위해 고압터빈 블레이드에는 기존의 다결정 금속대신 단결정 소재를 사용하게 된다. 단결정 소재의 물성은 등방성이 아니기 때문에 구조해석 및 안정성 평가시 일반 금속 소재와 다른 방법을 사용한다. 본 발표에서는 critical plane approach를 이용한 단결정 소재로 제작된 부품의 LCF 수명평가 방법을 소개한다. Critical plane이란 재료에 작용하는 shear strain 또는 stress가 최대가 되는 면을 의미하며, 다축 피로의 경우 shear stress(strain)의 크기와 그 면에 수직한 방향의 normal stress가 주요 인자로 작용하여 Mode I Crack을 발생시킨다. 따라서 이 인자들이 부품의 피로수명에 주된 영향을 미치게 된다. 수명평가 프로세스 소개에 더하여, 본 방법을 열, 압력, 원심하중이 작용하는 고압터빈 블레이드의 미션에 적용하여 transient LCF 수명평가를 수행하였다.

[피로4-4 | 17:45]

항공기 착륙장치 구성품의 결함 원인 분석: 김영찬, 이상희, 김용세*(공군 항공기술연구소)

항공기 착륙장치는 착륙 시 발생하는 충격하중을 흡수하는 동시에 지상 활주, 조향 및 착륙장치의 수납·전개 과정에서 반복적인 기계적 하중을 받는 주요 구조계통이다. 특히 착륙 및 지상 운용 과정에서 반복하중, 응력집중, 마찰·마모 및 부식환경에 지속적으로 노출되므로 미세 결함이 피로균열로 진전되어 최종 파단에 이를 가능성이 있다. 본 연구에서는 항공기 착륙장치의 구조 및 작동환경을 분석하고, 수송기와 전투기의 착륙장치 결함 자료와 실제 파손 구성품의 파단면 분석 결과를 바탕으로 주요 결함 발생 특성과 파손 원인을 고찰하였다. 결함자료 분석 결과, 착륙장치 구성품에서는 피로균열 및 파단이 주요 결함 형태로 확인되었으며, 기종 및 착륙장치 구조에 따라 결함의 발생 위치와 유형에 차이가 나타났다. 대표적인 파손 사례로 CN-235 전방착륙장치 조향 실린더 장착 Screw와 C-130 주착륙장치 Shoe 및 Track 구성품을 분석하였다. CN-235 Screw의 경우, 실린더 작동 시 반복적인 인장하중이 작용하는 Head Undercut 경계부에 응력이 집중되면서 피로균열이 발생하였으며, 균열이 단면을 따라 점진적으로 진전한 후 최종 파단에 이른 것으로 판단되었다. C-130 Shoe의 경우, Track과의 반복적인 상대운동에 의해 표면 마모가 발생하고 산화피막 손상 및 국부 부식이 진행되면서 피로균열이 발생·진전된 것으로 분석되었다. 또한 Shoe 파단 이후 Strut의 정렬 불량으로 인한 과하중이 Track에 작용하여 2차 파손이 발생한 것으로 판단되었다. 본 연구를 통해 항공기 착륙장치의 파손은 단일 하중에 의한 급격한 파괴뿐만 아니라 반복하중, 응력집중, 마찰·마모 및 부식이 복합적으로 작용하여 발생할 수 있음을 확인하였다. 따라서 주요 응력집중부와 반복 접촉부에 대한 주기적인 비파괴검사와 함께 윤활, 마모 및 부식 상태를 체계적으로 관리할 필요가 있다. 또한 기종별 착륙장치 결함 및 파손 데이터를 지속적으로 축적·분석함으로써 선제적 예방정비와 구조건전성 확보에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

가공-용접 및 접합
Room 2층 204호, 10월 28일

[용접1-1 | 08:30]
전류 인가가 304 스테인리스 용접부의 미세조직 기계적 물성에 미치는 영향: 방종원*, 오연준, 정현도, 문중식(한국화학융합시험연구원(KTR)), 배장현(한국생산기술연구원)
Keywords: 304 Stainless steel, Weldment, Direct Current, Recrystallization, Hardness, Heat Affected Zone (HAZ)

본 연구에서는 직류 전류 인가 공정이 304 스테인리스 용접부의 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향을 고찰하였다. 용접 시편에 100~600A의 직류 전류를 5초간 인가한 후, 용접부 및 열영향부(HAZ)의 미세조직을 광학현미경(OM)과 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였으며, 비커스 경도 측정을 통해 기계적 물성 변화를 분석하였다. 나아가 EDS, EBSD, XRD 등의 정밀 분석을 추가로 수행하여 전류 인가에 따른 미세구조적 변화를 종합적으로 평가하였다. 실험 결과, 전류 인가에 따라 용접부 내 수지상(Dendrite) 조직의 미세화가 관찰되었으며, 용접부와 열영향부 전반에서 비커스 경도가 크게 상승하였다. 이는 전류 인가 시 발생하는 줄 발열(Joule heating) 등의 전기적·열적 작용으로 인해 재결정화가 촉진되고 내부 결함이 개선된 결과로 판단된다. 본 연구를 통해 직류 전류 인가가 304 스테인리스 용접부의 조직 및 물성 제어에 유효하게 작용함을 규명하였다.

[용접1-2 | 08:45]
API X70 대구경 후육강관 원주용접부의 그루브 형상 및 용접 시퀀스에 따른 잔류응력 저감 연구: 김성환*, 손정현, 서상원, 문형순(한국생산기술연구원 동남기술실용화본부)
Keywords: API 5L X70, 수소배관, FCAW, 잔류응력, 수소취성

고압수소 이송용 대구경 후육 API 강관의 원주용접부에 형성되는 인장 잔류응력은 장기 운전 환경에서 수소취성(HE) 및 응력부식균열을 유발하는 주요 원인이다. 본 연구에서는 20인치 구경 및 25.4mm 두께의 API 5L X70 강관에 플럭스 코어드 아크 용접(FCAW)을 적용하여 그루브 형상 및 용접 시퀀스에 따른 내면 잔류응력 형성 거동을 조사하였다. 기존의 Single-V 그루브 맞대기 용접을 대조군으로 설정하고, 내/외면 용접 순서를 달리한 3가지 케이스의 Double-V 그루브 맞대기 파이프를 제작하였다. 용접부 내면의 용착금속(WM), 열영향부(HAZ), 모재(BM) 영역에서의 잔류응력은 홀드릴링법(Hole-drilling method)을 통해 측정되었으며 유한요소해석(FEA) 결과와 비교·검증되었다. 실험 결과, Double-V 그루브에서 내면과 외면을 교차 순서로 다층 용접한 경우 내면 축방향 잔류응력(axial residual stress)이 0에 가깝게 완화되는 최적의 응력 분포를 확보하였다. 본 연구의 잔류응력 평가 결과는 FEA 수치해석 모델과 높은 일치성을 나타냈으며, 내·외면 교차 용접 시퀀스가 수소이송용 후육강관 내면의 인장 잔류응력 저감에 유효한 공정 제어 전략임을 입증하였다. 이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 RS-2024-00444679)

[용접1-3 | 09:00]
적층 제조된 SS316L/인코넬 718 이종접합에서 고엔트로피 합금 버퍼층을 통한 균열 회피 전략: 김래언, 김형섭*(POSTECH)
Keywords: 고엔트로피합금, 이종접합, 균열

최근 하나의 소재에서 다양한 기능성을 동시에 구현하기 위한 전략으로 이종소재 기반의 다중소재 설계가 주목받고 있다. 특히 금속 적층제조을 활용해 Inconel 718과 SS316L을 직접 접합하면, 두 소재 간의 큰 열팽창계수 차이 때문에 열응력이 집중되고 이종계면에서 유해한 취성상이 형성돼 균열이 발생하기 쉽다. 이 연구에서는 적층제조된 이종소재 계면에서의 균열 발생을 억제하기 위해 SS316L과 Inconel 718 사이에 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금을 버퍼층으로 도입했다. 미세조직 분석과 Scheil–Gulliver 응고 시뮬레이션을 통해, HEA 버퍼층이 SS316L과 Inconel 718 간의 직접적인 조성 혼합을 완화하고, 이에 따라 취성 Laves상 형성에 유리한 국부적 조성 편차를 효과적으로 억제한다는 걸 확인했다. 또 두 소재의 중간 수준에 해당하는 HEA의 열팽창 특성은 계면에서 발생하는 급격한 열적 불일치를 완화해 열응력 집중을 줄이는 데 기여했다. 그 결과, HEA 버퍼층을 적용한 다중소재 구조에서는 계면 균열이 효과적으로 억제됐고, 안정적인 인장 변형 거동과 향상된 기계적 신뢰성을 확보할 수 있었다. 또 버퍼층이 없는 SS316L/Inconel 718 직접 접합 구조와 비교해 우수한 공정 재현성을 보였다. 이 연구는 CoCrFeMnNi HEA가 단순한 구조용 합금을 넘어, 서로 다른 물리적·화학적 특성을 갖는 이종 금속 간의 조성 및 열적 불일치를 동시에 완화하는 기능성 중간층으로 쓰일 수 있음을 보여준다. 이를 통해 HEA 버퍼층을 활용한 계면 설계가 앞으로 다양한 이종 합금 시스템의 안정적인 적층제조와 고신뢰성 다중소재 부품 구현을 위한 효과적인 설계 전략이 될 수 있음을 제시한다.

[용접1-4 | 09:15]
Ti 첨가 및 낮은 템퍼링 온도 적용에 따른 저방사화강의 미세조직 안정성 향상과 GTAW·EBW 용접부의 크리프-피로 손상 거동 및 미세조직 변화: 박정현, 한재연, 이상현(국립창원대학교), 김치원, 박형권(한국재료연구원), 정승진(조선선재), 홍현욱*(국립창원대학교)
Keywords: Reduced-Activation Ferritic/Martensite (RAFM) steel, EBW, GTAW, Heat-Affected-Zone (HAZ), Thermal stability, MX precipitate, Creep-Fatigue interaction

핵융합 발전은 환경오염 물질 발생이 없고, 자원 고갈 위험이 없어 미래 청정에너지원으로 주목받고 있다. 핵융합로 운용 환경은 높은 중성자속 및 열속의 극한 환경으로, 저방사화강(Reduced activation ferritic/martensitic steel)이 유력한 후보 소재로 고려되고

있다. 그러나 저방사화강 용접부는 높은 변형 불일치도, 준안정 석출물 조대화 및 유해상 석출 등의 열화 저항성이 우려되는 실정이다. 본 연구에서는 MX 석출물 분율 증가를 위해 Ti을 첨가하였고 높은 전위 밀도를 위해 낮은 tempering 온도(730 ℃)를 적용하였다. 또한 열영향부(Heat-affected-zone) 폭을 줄이기 위해 EBW 공정을 적용하였고 특성 평가를 위한 비교재는 GTAW 공정을 적용하였다. 모재 미세조직 분석 결과, 0.013 wt% Ti 첨가는 MX 석출물의 분율을 증가시켰고(2.0 → 4.6 %), 또한 $M_{23}C_6$ 석출물의 평균 크기를 감소시켰다(148.9 → 119.3 nm). 저방사화강의 운용 온도인 550 ℃ 에서 Ti 첨가 강재와 EBW 적용재가 인장, 크리프 및 피로 시험에서 우수한 특성을 나타내었다. EBW 적용재의 우수한 인장, 크리프 및 피로 특성은 EBW 공정으로 인한 HAZ의 좁은 폭에 기인한 것으로 판단된다. EBW 적용재의 Ti 첨가 및 미첨가 저방사화강의 크리프 파단 및 피로 파단된 시편에 대해 TEM 미세조직 분석을 진행하였고, 그 결과 Ti 첨가 저방사화강에서 크리프 및 피로 시험 이후에도 lath 구조가 부분적으로 유지되고 있으며, 더 높은 전위밀도가 관찰되었다. 크리프-피로 시험 결과 Ti첨가에 따른 수명의 차이는 뚜렷하지 않았다. 하지만 GTAW 적용재의 파단부 반대쪽 OTHAZ에서 EBSD 분석을 진행한 결과 재결정이 확인되었으며, Ti 첨가 저방사화강에서 더 낮은 분율의 재결정이 나타났다. 또한 EBW 적용재의 EBSD 분석 결과 더 높은 분율의 HAGB이 유지되었으며, 회복에 의한 LAGB의 형성이 억제된 것이 확인되었다. 이는 Ti 첨가에 따른 높은 MX 분율에 기인한 것으로 판단된다. 더 낮은 변형률 조건에서 크리프-피로 시험 진행 시 Ti 첨가 저방사화강에서 더 우수한 크리프-피로 특성이 나타날 것으로 예상된다. 본 연구결과를 통해 핵융합로 구조용 저방사화강에 대한 Ti 첨가 및 EBW 공정은 열화 저항성 향상에 기여하는 것으로 판단된다.

[용접1-5 | 09:30]

고강도 오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 응고 특성에 따른 응고균열 및 석출 거동: 오정민(국립부경대학교), 정수경(고려용접봉), 이윤상(두산에너빌리티), 천은준*(국립부경대학교)

Keywords: High-strength austenitic stainless steel, Multi-pass weld metal, Solidification cracking, Microstructural evolution, Corrosion resistance

최근 고성능 컴퓨팅 및 데이터센터 확산에 따라 안정적이고 효율적인 전력 공급 기술에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이를 위해 SMR(Small Modular Reactor)과 같은 차세대 원자력 발전시스템 관련 소재 및 접합 기술의 중요성도 함께 증대되고 있다. 고강도 오스테나이트계 스테인리스강은 우수한 기계적 성질과 방사성 조사 환경 적합성으로 인해 관련 구조용 소재 후보로 검토되고 있다. 그러나 해당 소재를 포함한 오스테나이트계 스테인리스강의 용접성은 응고 거동에 따른 균열 민감도, 다층 용접 시 재가열에 의한 미세조직 변화, 그리고 내식성 등을 종합적으로 고려하여 평가될 필요가 있다. 또한 적절한 용접 재료와 공정 조합에 대한 기초 검토가 요구되며, 관련 비교 연구는 제한적으로 보고되어 있다. 본 연구에서는 서로 다른 응고 특성을 갖는 용접재료와 일반적인 아크 용접 공정을 적용하여 고강도 오스테나이트계 스테인리스강 다층 용접부를 제작하였다. 응고균열 민감도는 정량 평가 기법을 활용하여 비교하였으며, 다층 용접 과정에서 발생하는 재가열 영역의 미세조직 변화와 석출 거동을 분석하였다. 아울러 이러한 특성 변화를 응고 거동과 연계하여 고찰하고, 용접부의 기계적 성질과 내식성을 포함한 다각도적 용접성 평가를 수행하였다. 이를 통해 고강도 오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 특성에 영향을 미치는 주요 인자를 비교 분석하고, 관련 용접 재료 및 공정 적용 시의 가이드라인을 도출하였다.

가공-용접 및 접합
Room 2층 204호, 10월 28일

[용접2-1 | 09:55]
냉간 기가스틸용 저입열 고속 용접솔루션 개발: 한도경*, 홍석현, 배규열*(포스코 기술연구원)
Keywords: GMA Welding, PosZET, Welding Solution, Aritificial Intelligence, Weld Prediction Platform

최근 전기차(BEV) 시장의 성장으로 배터리 하중을 견딜 수 있는 고강도·고내구성 BIW(Body In White) 부품의 수요가 증가하고 있다. 그러나 강재의 초고강도화 과정에서 발생하는 수소 유입 및 수소취화(Hydrogen Embrittlement) 현상은 소재의 물성 저하를 유발해 적용을 제한하는 요인으로 작용한다. 이러한 한계로 인해 페라이트 기지 조직 중심의 DP(Dual Phase)강이 주로 활용되었으나, 최근 승객 안전 기준 강화로 인해 한층 더 높은 강도가 요구되는 상황이다. 이에 따라 자동차 업계에서는 마르텐사이트 기지 기반의 열간성형(HPF)강뿐만 아니라, 냉간 성형용 마르텐사이트(Mart)강을 차체 부품에 확대 적용하기 위한 기술 개발이 추진되고 있다. 본 연구에서는 PosZET(120~130S급) 기술이 적용된 1.5 GPa급 냉연 마르텐사이트(Mart)강의 저입열 GMAW(Gas Metal Arc Welding) 공정 최적화 솔루션을 개발하였다. 기가급 초고강도강 용접 시, 해당 GMA 용접와이어를 사용하여도 일정수준 이상의 용입 및 용착량 확보에 필요한 입열로 인해 열영향부(HAZ) 연화와 용접부 파단 위치 천이(HAZ 파단) 현상이 발생할 수 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 고속 용접 및 아크 파형 제어가 용이한 PMC(Pulse Multi Control) 모드를 적용해 용접 중 발생하는 입열을 최소화하면서 생산성을 확보하고자 했다. 고속 용접 조건 및 파형 제어 기술 최적화를 수행한 결과, PMC 모드 적용 시 우려되는 연화 현상을 크게 완화시켰다. 또한, 빠른 냉각속도를 유도함으로써 기존에 연구한 저속·저입열 방식인 CMT 용접부 대비 인장강도가 7.8% 이상 향상된 우수한 용접부 물성을 구현하였다. 한편 PosZET 기술 적용 GMA 용접 데이터를 기반으로 '포스코 용접부 통합 물성 예측 플랫폼'을 구축하였다. 제한된 데이터로 인한 예측 성능 저하를 극복하기 위해 극단 구간 오버샘플링 기반의 데이터 증강(Data Augmentation) 기법을 도입함으로써 예측 정합성을 유의미하게 향상시켰다. 본 플랫폼은 물성 예측뿐 아니라 사용자 입력 조건에서 더 향상된 용접 물성을 확보할 수 있는 최적 GMA 용접조건 추천 기능까지 탑재하여 AI 기반 이용기술 솔루션 고도화를 목표로 한다. 결론적으로 본 연구는 기가급 초고강도 마르텐사이트(Mart)강의 GMA 용접부 품질을 확보할 수 있는 저입열·고속 용접 솔루션을 개발하고 유효성을 검증함과 동시에, 인공지능 기술과의 융합을 통한 이용기술 솔루션의 미래를 제시하고자 하였다. 이는 전기차 시장 확대에 대응해 차체 안전성과 에너지 효율을 동시에 제고하는 초고강도 경량화 기술 발전에 크게 기여할 것으로 기대된다.

[용접2-2 | 10:10]
Cell-To-Pack용 중대형 배터리팩 레이저 용접부의 응고균열 치유 거동에 대한 Phase-Field 해석적 접근: 김희은, 천은준*(국립부경대학교), 강희신(한국기계연구원)
Keywords: aluminum alloy, single-mode laser welding, solidification crack healing, Phase-Field simulation

Abstract 전기차 시장의 일시적 수요 정체를 극복하고 배터리 팩의 에너지 밀도를 향상시키기 위한 기술로 CTP(Cell-to-Pack)가 주목받고 있다. CTP는 모듈을 배제한 구조적 특성으로 인해 개별 셀의 강성 및 용량이 배터리 팩의 성능과 신뢰성을 좌우하며, 개별 셀은 Can-Cap 맞대기 용접을 통해 조립된다. 높은 생산성과 치수 정밀도를 확보하기 위해 레이저 용접이 적극적으로 검토되고 있으나, Can-Cap용 알루미늄 합금의 높은 응고균열 민감도로 인해 용접공정과 응고균열 거동 간의 상관관계 규명 및 공정 최적화가 요구된다. 기존 연구에서는 용접 패턴 및 G/R 제어를 통한 응고균열의 발생 및 전파 억제가 검토되어 왔으나, 워블 용접 경로에서 발생하는 반복적 재용융 및 재응고가 응고균열을 치유(Crack healing)하는 현상과 그 야금학적 메커니즘에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 CTP용 알루미늄 합금 Can-Cap 용접부의 최적 레이저 용접공정 확보를 위해 워블 용접 과정에서 발생하는 응고균열 치유 거동에 대한 Phase-field 해석적 접근법을 제시하였다. 레이저 용접용 자기구속 시험을 이용하여 3종의 알루미늄 합금(AA3003, AA5052 및 AA6061)에 대한 응고균열 민감도와 균열 치유 거동을 실험적으로 평가하였으며, 실험 결과를 기반으로 워블 용접에 따른 반복적인 용융·응고 거동을 Phase-field 모델링하였다. 특히 초고속 재용융 및 재응고 과정에서 Mg 및 Si의 미시편석 거동과 잔류 액상의 액상 투과도(Liquid permeability)를 가시화하고, 이들이 응고균열 치유 거동에 미치는 영향을 고찰하였다. 특정 워블 패턴에서는 재용융 잔류 액상의 용질 편석이 완화 및 응고온도범위 축소와 함께 액상 투과도가 증가가 확인되었으며, 이로 인해 응고균열 치유능(Crack healing ability)이 향상될 수 있음을 확인하였다. 자기구속 시험과 Phase-field 모델링을 연계함으로써 초고속 레이저 워블 용접에서 응고균열 치유에 대한 야금학적 제어 인자를 규명하였다. 이상의 결과는 CTP용 알루미늄 합금 Can-Cap 용접부의 건전성을 확보하기 위해 단순한 레이저 워블 패턴의 기하학적 최적화를 넘어, 재용융 잔류 액상의 응고온도범위와 액상 투과도를 동시에 제어하는 야금학적 최적화가 필요함을 시사한다.

[용접2-3 | 10:25]
다이오드 레이저 클래딩 예열 온도 변화가 압력용기용 SA508 Gr.3 저합금강 클래딩부의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향
: 김재성, 김정훈, 문준오*(국립창원대학교), 조성우, 구남기, 윤강준(두산에너빌리티)
Keywords: Preheating temperature, Heat-Affected Zone (HAZ), Diode Laser Cladding (DLC), SA508 Gr.3 Low-Alloy Steel (LAS), Cladding layer, 미세조직, 기계적 특성

탄소중립 실현을 위한 친환경 규제가 강화됨에 따라, 저탄소 기저전원인 원자력 발전에 대한 관심이 증가하고 있다. 이에 따라 원

자로의 장기 운전 안정성 확보를 위한 구조재 신뢰성 연구가 활발히 진행되고 있다. 원자로 압력용기는 고온, 고압 및 중성자 조사 환경에서 장시간 사용되는 핵심 구조물로, 우수한 강도와 인성이 요구된다. 이러한 요구 특성을 만족하는 소재로 SA508 Gr.3 저합금강이 널리 사용되고 있으나, 실제 산업 적용 시 내식성이 상대적으로 열위하다는 한계가 있어 표면 클래딩을 통한 내식성 확보가 필요하다. 기존 아크 기반 클래딩 공정은 산업적으로 널리 활용되어 왔으나, 높은 입열량으로 인해 모재 희석, 열영향부 형성 및 계면부 조직 변화와 같은 용접부 특유의 취약 영역을 형성할 수 있다. 반면, 다이오드 레이저 클래딩(Diode laser cladding, DLC)은 국부적인 열원을 이용하여 낮은 희석률과 좁은 열영향부를 갖는 고품질 클래딩층 형성에 유리한 공정이다. 그러나 압력용기용 SA508 Gr.3 저합금강에 대한 DLC 적용 연구는 아직 제한적이며, 특히 예열 온도 변화가 클래딩부 조직 및 물성에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구는 부족하다. 본 연구에서는 예열 온도 변화에 따른 다이오드 레이저 클래딩된 SA508 Gr.3 저합금강 클래딩부의 미세조직 및 기계적 특성을 평가하였다. SA508 Gr.3 Cl.2 저합금강을 모재로 사용하였으며, 309L 및 308L 오스테나이트계 스테인리스강 분말을 이용하여 다층 클래딩 시편을 제작하였다. 예열 조건은 비예열 조건과 함께 50–200 ºC 범위의 다양한 예열 온도로 설정하였다. 제작된 시편의 클래딩부 미세조직은 (OM), 주사전자현미경 (SEM), 전자후방산란회절 (EBSD), 투과전자현미경 (TEM)을 이용하여 분석하였으며, 기계적 특성은 비커스 경도시험, 나노인덴테이션 시험 및 마이크로 인장 시험을 통해 평가하였다. 이를 통해 예열 온도가 DLC 클래딩부의 미세조직, 희석 거동 및 물성에 미치는 영향을 고찰하였다.

[용접2-4 | 10:40]

고강도강 다층 용접 시 용접금속 재가열부에서의 미세조직 변화가 저온 충격인성에 미치는 영향: 배민혁(한국재료연구원, 부산대학교), 강용준*, 송상우(한국재료연구원), 강남현(부산대학교)

Keywords: Multi-pass welding, Reheated zone, Oxygen content, Impact toughness

최근 조선 및 해양플랜트 산업에서 구조용 강재의 고강도화가 지속되고 있으며, 용접부의 건전성 확보를 위해 용접금속에도 높은 강도와 우수한 저온 충격인성이 동시에 요구되고 있다. 이에 따라 고강도 저합금강 용접금속의 미세조직이 저온 충격인성에 미치는 연구가 활발히 이루어져 왔으나, 용접금속의 재가열부(reheated zone, RZ)에 대한 체계적인 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 다층용접에서는 후속 패스에 의한 반복 열사이클로 인해 용접금속 내 넓은 면적의 재가열부가 형성되며, 재가열에 따른 미세조직 변화는 용접금속의 저온 충격인성에 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 강도 등급 및 산소함량이 상이한 용접금속의 재가열 거동과 저온 충격인성 간의 상관관계를 분석하고자 하였다. 이를 위해 인장강도 70 및 110 ksi급 저합금강 용접와이어를 사용하였으며, 용접금속의 산소함량을 제어하기 위해 각 용접와이어에 Ar-20%CO_2, Ar-5%CO_2 및 100% Ar 보호가스를 적용하여 단일 패스 용접금속을 제작하였다. 또한 용접금속의 재가열부를 구현하기 위해 Gleeble thermo-mechanical simulator를 이용하여 coarse-grained reheated zone(CGRZ), fine-grained reheated zone(FGRZ), intercritically reheated zone(ICRZ) 및 후속 열사이클에 의한 tempering 조건을 모사하였다. 미세조직 및 기계적 특성 분석 결과, 단일 패스 용접금속의 columnar zone(CZ)과 비교하여 RZ에서 비커스 경도는 전반적으로 감소하였으며, 저온 Charpy 충격 흡수에너지는 대부분의 재가열 조건에서 증가하는 경향을 보였다.

[용접3-1 | 11:00]

화력 발전소 재열증기배관(P92) 용접 열영향부 크리프 손상 분석: 한수지*, 이한상, 정진성(한국전력공사 전력연구원)

Keywords: P92, 고합금강, 열영향부, 크리프

화력발전소 재열증기 배관은 고온, 고압의 증기에 장시간 노출되는 압력부품으로, 특히 용접 열영향부(HAZ)는 모재 대비 크리프 손상에 취약하여 운전 중 반복적인 결함 및 누설의 주요 발생 지점으로 알려져 있다. 이러한 고합금강 용접부 크리프 손상은 대부분 모사 시편 또는 가속 크리프 시험을 통해 연구되어 왔다. 이에 본 연구에서는 약 11년간 운전 후 교체된 화력발전소 P92 재열증기 배관을 대상으로, 동일 배관 내 손상 이력이 있는 부위와 없는 부위를 위치별로 비교함으로써 재질·운전조건이 동일한 조건에서의 손상 진행 양상을 확인하고자 하였다. 관찰 결과 크리프 기공은 모재 및 용융부보다 열영향부에 집중적으로 분포하였으며, 일부 위치에서는 기공이 서로 연결되어 선형 결함 및 균열로 성장하는 단계까지 관찰되었다. 배관 형상에 응력 집중 구조 위치에서는 기공이 연결되어 균열로 성장하는 단계까지 관찰되었다. 배관 용접부의 시계방향에 따른 특성 및 크리프 손상 진행 정도를 분석하였다.

[용접3-2 | 11:15]

로터스형 다공성 구리를 이용한 무가압 은 소결 접합부의 접합계면 분석 및 기계적 특성 평가: 백정연, 현승균*(인하대학교), 김근수(호서대학교), 황승환(인하대학교)

Keywords: Pressureless Ag Sintering, Lotus-type Porous Copper, Outgassing Bypass

최근 SiC 및 GaN 기반 차세대 전력반도체의 상용화에 따라 250 ºC 이상의 고온 환경에서도 안정적인 열 방출 및 패키징 신뢰성을 확보하는 무가압 은(Ag) 소결 어태치 기술이 크게 주목받고 있다. 그러나 무가압 은 소결 공정은 소결 과정 중 유기 바인더 및 용매의 분해 가스가 배출되지 못하고 갇히면서 불규칙한 거대 보이드(blow-out void)가 형성되는 고질적인 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 가스 포집 결함을 해결하기 위해 수직 일방향 기공 채널을 보유한 로터스형 다공성 구리(Lotus Cu, 기공률 42.17%) 기판을 도입하여 유기 가스의 수직 배출(bypass) 메커니즘을 구현하고, 소결 분위기별 계면 미세조직 및 기계적 특성을 정량적으로 평가하였다. 소결 재료인 반소결형 은 페이스트(Henkel ABP 8068TB)의 열적 거동을 DSC 및 TGA로 분석한 결과, 약 190 ºC에서 유기 레진의 가교 경화 반응이 진행되고 약 260 ºC에서 분해 온셋이 관찰되었으며, 총 유기물 함량은 7.38 wt%로 확인되었다. 실험은 130 ºC에서 60분간 프리드라이 공정을 거친 후, 250 ºC에서 120분간 진공(Vacuum), 질소(N2), 공기(Air) 분위기별로 무가압 소결을 진행하였다. 3차원 X-ray CT로 상호 검증된 초음파 미세탐상(SAM) 비파괴 평가 결과, 로터스 구리 접합부는 모든 분위기에서 6.5~9.8%의 지극히 낮고 치밀한 보이드율을 유지한 반면, 벌크 구리(Bulk Cu) 접합부는 진공 조건에서 최대

44.0%의 거대 보이드율을 보였다. 단면 SEM 분석 결과, 로터스 구리 진공 시편은 소결층 두께(BLT) 38.76 ± 0.90 μm, 틸트 각도 0.02 º (0.43 μm/mm)를 기록하여 벌크 구리 대비 약 6배 뛰어난 두께 및 평행도 균일성을 입증하였다. 전단강도 평가에서 로터스 구리 시편은 분위기와 무관하게 10~11.5 MPa의 일정한 명목 강도를 보였으며, 이는 은 소결층의 파괴가 아닌 다공성 구리 구조체 자체의 소성 항복(Yielding, 10~15 MPa) 한계에 기인함을 규명하였다. 기공률을 반영한 유효 접합 면적(58%) 기준 환산 강도의 최소 하한치는 진공 19.3 MPa, 질소 19.5 MPa, 공기 17.1 MPa를 달성하였다. 특히 대기(Air) 분위기에서 로터스 구리는 표면 산화 및 가스 들뜸으로 강도가 급감한 벌크 구리(7.5 MPa) 대비 2.3배 우수한 실질 강도를 보였다. 파단면 EDX 분석을 통해 질소 분위기 벌크 구리는 레진 불완전 분해에 따른 탄소 잔류 장벽(48.1 at% C)이 강도 저하의 원인임을 밝혔다. 본 연구는 로터스 구리 구조체가 고가의 진공 및 불활성 가스 설비 없이도 대기 환경에서 무가압 은 소결을 가능하게 하여 전력반도체 패키징 공정 단가를 획기적으로 절감할 수 있음을 입증한다.

[용접3-3 | 11:30]

FCAW 적용 해양용 H 형강의 용접부 특성 및 염수 노출 후 저주기 피로 거동: 이상현, 한재연, 박정현(국립창원대학교 소재융합시스템공학과), 이창훈(한국재료연구원 극한재료연구소), 정준호(현대제철 기술연구소), 김재성(조선선재 기술연구소), 홍현욱*(국립창원대학교 소재융합시스템공학과)

Keywords: H-Beam, FCAW, Fatigue, Corrosion

본 연구는 해양용 개발 강재의 용접 공정의 실용성 확인을 위해 구조용강 용접 시 주로 이용되는 플럭스 코어드 아크용접 (Flux Cored Arc Welding, FCAW)에 의해 제작된 용접부 및 모재의 상온 저주기 피로 특성을 고찰하고, 미세조직학적으로 해석하고자 하였다. FCAW 용접을 위해 FCAW-460S(작업 개선용) 용접 와이어를 사용하였다. 용접금속은 Acicular ferrite와 bainitic ferrite가 혼합된 조직이 나타났고, 열영향부(Heat-Affected zone, HAZ)에서는 피크 온도에 따른 상이한 조직이 나타났다. CGHAZ(Coarse Grained Heat-Affected-Zone)에서는 베이나이트 조직이 나타났으며, FGHAZ(Fine Grained Heat-Affected-Zone)에서는 베이나이트와 페라이트가 혼합된 조직이 나타났고, ICHAZ/SCHAZ(Inter Critical Heat-Affected-Zone/Sub Critical Heat-Affected-Zone)에서는 페라이트와 시멘타이트가 분절되어 있는 Degenerated pearlite가 혼합된 조직이 확인되었다. 모재에서는 페라이트와 펄라이트 조직이 나타났다. 또한, 용접된 강재의 건전성 평가를 위해 경도 traverse를 측정한 결과, 모재에 비해 용접금속의 경도가 높은 overmatching 경향이 나타났다. 인장 시험 시 모재 대비 용접 시험편의 경우 더 높은 강도가 나타났으며, 이는 용접 시험편의 경우 상대적으로 경화된 조직에 의해 높은 강도를 나타낸 것으로 판단된다. 저주기 피로 시험 결과, 용접 시험편의 경우 모든 변형률 조건에서 모재시험편에 비해 더 낮은 피로 수명이 나타났으며, 이는 용접 시험편에서 상대적으로 연질의 페라이트 및 펄라이트 조직이 응력 집중에 더 취약하게 작용하였기 때문으로 사료된다. 해양용 형강은 일반적으로 염수 환경에 노출되는 동시에 해파에 의한 영향을 받으므로 splash zone을 모사하기 위해 염수 분무 시험을, submerged zone을 모사하기 위해 염수 침지 시험을 진행하였고 이후 피로 시험을 진행하였다. 부식 환경 모사 시험 전과 비교하였을 때 모재 시험편의 경우 침지 시험 이후에도 유사한 피로 수명이 나타났으며, 염수분무 시험 이후 뚜렷한 수명의 감소가 나타났다. 용접부 시험편의 경우 침지 시험 및 용접부 시험 모두 뚜렷한 수명의 감소가 나타났다. 이후 피로 파면 및 파단면에 대한 미세조직 분석 결과 침지 시험에 비해 염수 분무 시험 이후 피로 파면에서 조대한 피트가 확인되었으며, 파단면 분석 결과 표면에서 산화 스케일 및 입계를 따라 secondary crack이 다수 형성되었다. 또한 EPMA 결과 표면의 Secondary crack은 피로 과정이 아닌 부식 시험 중 형성된 secondary crack이라고 판단된다. 상기 결과를 통해 해양용 H형강재의 용접부 피로 특성을 향상시키기 위해서는 용접 공정 최적화가 필요하다. 또한 부식 과정 및 부식-피로 취약 인자에 대한 규명을 위해 추가적인 연구가 필요하다.

[용접3-4 | 11:45]

LT-FH32에서의 Nb 첨가로 인한 모재의 강도 향상과 대입열용접시 CGHAZ의 저온 충격인성 확보: 박현준, 유성훈(부산대학교), 서인식(H2C), 강남현*(부산대학교)

Keywords: HSLA steel, Nb, Ti, DP (degenerated pearlite), high heat input welding, SAW (submerged arc welding), CGHAZ (coarse grained heat affected zone), microalloying, FEM (finite element method)

HSLA (high strength low alloy)강은 대형 구조물에 사용되는 철강재료로써, 제어압연과 가속냉각을 통해 높은 강도와 인성을 가지고 낮은 탄소 당량으로 인해 용접성이 우수하다고 알려져 있다. 대형 구조물을 제작하기 위해서는 제작 효율을 고려하였을 때 SAW (submerged arc welding)와 같은 대입열 용접이 불가피한데, 용접 시 가열과 냉각 과정을 거치면서 CGHAZ (coarse grained heat affected zone)에서는 결정립의 조대화되고, DP (degenerated pearlite) 또는 MA (martensite-austenite) constituents와 같은 단단한 2차상이 형성되면서 저온 충격인성에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이는 Ti와 Nb와 같은 microalloying 원소를 첨가함으로써 해결할 수 있는데, Ti는 고온에서 안정한 탄질화물을 형성함으로써 결정립 성장을 억제하고, Nb은 냉각 시에 상변태를 지연시켜 2차상의 거동을 제어할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 FEM 시뮬레이션과 GLEEBLE 시험으로 FGB-SAW (flexible glasswool backing submerged arc welding)의 CGHAZ를 재현하고, 이에 대해 미세조직 분석, 저온 충격시험을 실시하였다. 위 결과들로부터 HSLA강의 CGHAZ에서 Nb이 미세조직과 저온 충격인성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

타이타늄
Room 2층 204호, 10월 28일

[타이타늄1-1 | 13:30]
WLAM 공정으로 제조된 Ti-6Al-4V의 미세조직, 극저온 인장 특성 및 변형 거동: 박령주, 송노건(인하대학교), 김영균(한국재료연구원), 이종익, 이빈(경희대학교), 이기안*(인하대학교)
Keywords: Wire laser additive manufacturing, Ti-6Al-4V, Microstructure, Heat treatment, Deformation behavior, Cryogenic tensile

Ti-6Al-4V는 높은 비강도와 우수한 내식성 및 피로 특성을 갖는 대표적인 α+β titanium alloy로, aerospace, nuclear and energy industry, biomedical 등 다양한 분야에 활용되며, 극한 환경에서의 적용 또한 시도되고 있다. 최근 대형 Ti 합금 부품에 대한 수요가 증가함에 따라, 높은 재료 활용률과 형상 자유도를 갖는 적층제조 기술의 적용이 시도되고 있다. Wire Laser Additive Manufacturing (WLAM)은 wire 형태 금속 소재를 laser로 용융·적층하는 wire 기반 DED 공정으로, wire feedstock에 의한 높은 소재 이용률과 증착속도, 그리고 laser 열원의 정밀한 에너지 제어를 동시에 확보할 수 있어 대형 near-net-shape 제조에 적합한 공정으로 제시되고 있다. 본 연구에서는 as-built (AB) 및 열처리를 통해 미세조직을 제어한 heat-treated (HT) WLAM Ti-6Al-4V의 상온 및 77 K 인장 특성과 변형 기구를 조사하였다. AB는 0.05% 미만의 낮은 면적 공극률과 α′ martensite 및 α/β lamellar로 구성된 미세한 basket-weave microstructure를 가진 반면, 열처리 후에는 basket-weave 구조에서 벗어나 coarse α lath와 β가 층상으로 배열된 조대한 α/β lamellar microstructure가 형성되었다. 인장 시험 결과, AB 시편은 상온 대비 77 K에서 UTS가 33.7% 증가하고 연신율이 18.4% 감소한 반면, HT 시편은 UTS가 49.4% 증가하면서도 연신율 감소는 13.3%로, HT lamellar microstructure에서 보다 우수한 극저온 강도–연성 균형을 가졌다. 미세조직 분석 결과, 77 K 조건에서의 AB, HT sample 모두 deformation twinning의 활성화가 나타났지만 twin propagation scale과 이에 따른 변형 메커니즘은 초기 미세조직에 따라 뚜렷한 차이를 나타냈다. EBSD 관찰을 통한 Schmid factor와 KAM 분석은 이러한 미세조직 의존적 slip과 twinning의 상호 작용을 뒷받침하였다. 상기 결과들을 바탕으로 WLAM Ti-6Al-4V에서 lath/lamella scale에 의해 결정되는 deformation twinning의 propagation scale이 강도와 연성에 미치는 영향에 대하여 함께 토의하고자 하였다.

[타이타늄1-2 | 13:45]
L-PBF로 제조된 Ti-6Al-4V 합금의 초기 미세조직에 따른 고온 크리프 변형 거동: 김준혁, 한재연(국립창원대학교), 권영삼(CetaTech), 박정효, 김대웅, 김규식(국방과학연구소 극한금속재료팀), 홍현욱*(국립창원대학교)
Keywords: Ti-6Al-4V, Selective Laser Melting (SLM), high temperature, Heat treatment, Creep properties

적층제조된 Ti-6Al-4V의 크리프 거동은 급속 응고 과정에서 형성되는 준안정 마르텐사이트 조직, 높은 결함 밀도 및 계층적 미세조직 특성에 의해 크게 영향을 받는다. 그러나 기존 연구의 대부분은 주로 파단 후 미세조직 분석에 초점을 맞추어 왔으며, 크리프 변형을 지배하는 초기 미세조직 안정성과 결함 구조의 근본적인 역할은 충분히 규명되지 않았다. 본 연구에서는 선택적 레이저 용융(selective laser melting, SLM)으로 제조된 Ti-6Al-4V의 적층제조 상태 α′ 마르텐사이트 조직과 열적으로 안정화된 α+β 조직에 대해 500 ºC에서 크리프 시험을 수행하였다. 분석은 초기 미세조직 안정성, 전위 밀도, 상 분포 및 계면 특성의 차이가 크리프 변형 거동에 미치는 영향에 중점을 두었다. 크리프 시험 전, 시험 중 및 시험 후의 미세조직 변화를 EBSD, XRD 및 TEM을 이용하여 분석하였으며, 전위 재배열, α′ 마르텐사이트 분해, α/β 계면 상호작용 및 내부 응력 완화 거동을 정량적으로 평가하였다. 높은 전위 밀도와 준안정 α′ 마르텐사이트를 갖는 적층제조 상태 시편은 응력 완화 과정에서 빠른 조직 재배열을 나타냈으며, 이는 국부 변형과 계면 불안정성을 초래하였다. 반면, 결함 밀도가 낮고 상 안정성이 향상된 α+β 미세조직에서는 보다 균일한 전위 이동이 촉진되었다. 또한 β상과 α/β 계면은 전위의 소멸처이자 확산 경로로 작용하였다. 이러한 초기 미세조직 특성의 본질적인 차이는 전위–계면 상호작용과 공공 거동을 지배하였으며, 궁극적으로 크리프 손상의 축적과 파단 특성을 결정하였다. 본 연구는 SLM Ti-6Al-4V의 크리프 변형을 미세조직 안정성과 결함 진화의 관점에서 재해석하였으며, 적층제조 티타늄 합금의 고온 신뢰성 향상을 위한 열처리 최적화 및 미세조직 설계 전략에 기초적인 이해를 제공한다.

[타이타늄1-3 | 14:00]
통전 이방성에 의한 LPBF Ti-6Al-4V 합금의 α variant selection 매커니즘 규명: 이성호, 천세호, 이정훈, 윤재원(부산대학교), 김정기(경상국립대학교), 이태경*(부산대학교)
Keywords: titanium, variant selection, transformation, prior beta grain

레이저 분말 베드 융합(laser powder bed fusion, LPBF)으로 제조된 Ti-6Al-4V 합금은 columnar prior-β 결정립과 집합조직 효과로 인해 미세조직 및 기계적 물성 측면에서 강한 이방성을 나타낸다. 본 연구에서는 전류 펄스 처리(electropulsing treatment, EPT) 인가 방향이 상변태 과정의 α-variant selection과 기계적 물성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. As-built 소재에서는 α-variant 간 결정학적 방위 관계에 따른 type 4가 우세하게 형성되었으며, BD 방향 인장 시 1022 MPa의 인장강도와 10.7%의 연신율을, SD 방향 인장 시 1, 153 MPa의 인장강도와 9.48%의 연신율을 나타냈다. β 천이 온도 이하의 sub-EPT를 SD 방향으로 적용한 결과 α-variant 분포가 전반적으로 균일하며, 인장강도는 1, 055 MPa로 감소한 반면 연신율은 13.1%로 증가하였다. 이에 따라 UTS×EL은 약 26.5% 향상되었다. sub-EPT를 BD 방향으로 적용한 결과 여전히 type 4가 우세하였으며, 연신율은 11.74%로 약간 회복되었지만 인장 강도는 1011 MPa로 SD-EPT 만큼의 변화는 나타나지 않았다. 반면, β 천이 온도 이상의 super-EPT 조건에

서는 모든 조건에서 기존 columnar 조직이 제거되고 equiaxed 조직이 형성되었으나, 인장강도와 연신율은 각각 978 MPa와 11.34%로 감소하였다. TEM 분석을 통해 super-EPT 조건에서는 nano-twin이 형성됨을 확인하였으며, 이는 기계적 물성 저하에 기여한 것으로 판단된다. 본 연구는 EPT 인가 방향이 LPBF Ti-6Al-4V 합금의 α-variant selection과 미세조직을 정밀하게 제어할 수 있음을 확인하였으며, 특히 sub-EPT를 통해 미세조직 균일화와 강도-연성 균형을 동시에 향상시킬 수 있음을 제시하였다.

[티이타늄1-4 | 14:15]

Image Data Learning 기반 항공용 Ti-6Al-4V 합금 미세조직 적합성 평가 AI 모델 개발: 임종섭, 송영석*, 장대건, 김경민, 이장호(세아창원특수강)

Keywords: 타이타늄, AI

항공용 Ti-6Al-4V 합금의 제품화 시 Airbus를 비롯한 글로벌 OEM사에서는 AIMS 및 EN3114 규격에 제시된 미세조직 이미지를 기준으로 엄격한 합격/불합격 판정을 요구한다. 기존 미세조직 평가는 숙련된 전문 인력의 경험에 크게 의존하여 판정의 주관성이 개입될 여지가 컸으며, 사내 전문 인력 또한 부족한 실정이다. 이에 본 연구는 Image Data Learning 기법을 활용한 딥러닝 기반의 미세조직 적합성 자동 평가 모델을 개발하여, 검사의 객관성을 확보하고 타이타늄 제품의 품질 관리 정확도를 혁신적으로 향상시키고자 하였다. EN3114-003 규격 내 Acceptable(합격) 및 Unacceptable(불합격) 기준 미세조직 원천 데이터 101장을 수집하였다. 특징 추출의 용이성을 위해 언샤프 마스크(Unsharp Mask, USM) 전처리 기법을 적용하여 이미지의 윤곽을 선명화하였고, 좌우/상하 반전 및 회전 기법(Data Augmentation)을 통해 3, 216장으로 학습 데이터셋을 증폭시켰다. 딥러닝 모델은 이미지 분류에 특화된 CNN(Convolutional Neural Network) 구조를 채택하였으며, VGG16, ResNet50, EfficientNetB2, DenseNet121 4개 모델에 대해 코사인 유사도(Cosine Similarity) 산출 방식을 적용하여 성능을 비교 분석하였다. 비교 검증 결과, 파라미터 대비 특징 추출 및 분류 정확도가 가장 우수하며 전문가 육안 판별 결과와 가장 높은 일치도를 보인 DenseNet121 모델을 최종 판정 모델로 선정하였다. 구축된 AI 모델의 신뢰성 검증을 위해 당사에서 실제 생산한 Ti-6Al-4V 60T(500W) 및 100T(300W) 압연 Plate 열처리재의 미세조직(100배, 500배율) 판정 테스트를 수행하였다. 그 결과 AI 모델의 예측은 전문가 판정 결과와 100% 일치하였다. 특히 압하량이 상대적으로 적은 60T 소재에서 국부적으로 구상화되지 않은 Primary alpha 조직(불합격)을 정확히 검출해내는 높은 성능을 입증하였다. 본 연구를 통해 작업자의 주관적 판단을 최소화하고 판정 기준을 표준화할 수 있는 AI 기반 미세조직 객관적 평가 체계를 구축하였다. 이를 통해 인적 오류에 의한 고객사 품질 클레임을 획기적으로 방지하고 미세조직 검사에 소요되는 시간을 큰 폭으로 감축시킬 수 있다. 향후 본 모델을 품질 검사 실공정에 도입하고, 다양한 규격의 제품 및 타 항공용 합금으로 적용 범위를 고도화해 나갈 계획이다.

[티이타늄1-5 | 14:30]

셀룰러 오토마타 기반 Ti-6Al-4V 합금의 고온 압축 중 미세조직 진화 및 유동응력 예측: 조서연(서울대학교), 박진흥*(서울과학기술대학교), 이명규*(서울대학교)

Keywords: Ti-6Al-4V, 셀룰러 오토마타, 고온 압축, 미세조직 진화, 유동응력, 동적재결정, 동정상변태

Ti-6Al-4V 합금은 우수한 비강도와 고온 특성으로 항공우주 분야의 주요 구조용 소재로 활용되며, 열간가공 과정에서 형성되는 미세조직은 최종 소재 특성에 큰 영향을 미친다. 따라서 공정조건에 따른 미세조직 변화와 변형 거동을 정량적으로 예측하는 것은 열간가공 공정 설계 및 최적화를 위해 중요하다. Ti-6Al-4V 합금은 고온 변형 중 동적 재결정(DRX), 동적 상변태(DPT) 및 α/β 상간 상호작용이 복합적으로 발생하여 미세조직과 유동응력의 통합 예측이 요구된다. 본 연구에서는 고온 압축 과정에서의 미세조직 진화와 고온 변형 거동을 예측하기 위한 셀룰러 오토마타(CA) 기반 모델링 프레임워크를 구축하고자 한다. 고온 압축시험 및 EBSD 분석을 통해 확보한 온도, 변형률속도 및 변형률에 따른 상분율, 결정립 크기, 재결정 거동 및 유동곡선 데이터를 모델의 보정 및 검증에 활용한다. 개발 모델은 DRX와 DPT를 포함한 α/β 미세조직 변화를 모사하고, 미세조직 상태와 연계하여 유동응력을 예측하도록 구성한다. 다양한 고온 압축 조건에서 계산된 미세조직 지표와 유동응력을 실험 결과와 비교하여 모델 파라미터를 보정하고 예측성을 검증함으로써, Ti-6Al-4V 열간가공 공정조건에 따른 미세조직 및 고온 변형 특성을 통합적으로 예측할 수 있는 기반을 제시하고자 한다.

[티이타늄2-1 | 14:50]

열처리에 따른 βsup 안정성 제어를 통한 준안정 β 타이타늄 합금의 변형기구 및 기계적 특성 향상: 주재성(한국재료연구원, 고려대학교), 홍재근(한국재료연구원), 손석수(고려대학교), 김재혁*(한국재료연구원)

Keywords: Metastable β titanium alloy, β-phase stability, Transformation-induced plasticity, Twinning-induced plasticity, ω phase

준안정 β 타이타늄 합금은 βsup의 안정성에 따라 변형유기 마르텐사이트 변태(TRIP), 변형 쌍정(TWIP) 및 전위 활주 등 다양한 변형기구가 활성화될 수 있어 우수한 강도와 연성을 동시에 확보할 수 있는 소재로 주목받고 있다. 특히 βsup의 안정성과 함께 β 기지 내 형성되는 나노 크기의 ωsup은 초기 강도뿐만 아니라 변형 중 활성화되는 변형기구에도 영향을 미치므로, 이들의 적절한 제어가 기계적 특성 향상에 중요하다. 본 연구에서는 열처리 온도를 변화시켜 준안정 β 타이타늄 합금의 초기 미세조직과 βsup 안정성을 조절하고, 이에 따른 ωsup 형성 및 TRIP/TWIP 변형 거동과 기계적 특성의 상관관계를 분석하였다. 860, 880 및 900 ℃에서 열처리한 결과, 열처리 온도가 증가함에 따라 αsup 분율이 감소하고 βsup 분율이 증가하였으며, 900 ℃ 열처리 조건에서는 단상 β 조직이 형성되었다. 또한 βsup의 조성 변화를 바탕으로 β 안정성을 평가하였으며, TEM 분석을 통해 β 기지 내 나노 크기의 ωsup이 형성됨을 확인하였다. 인장시험 결과, βsup의 안정성이 상대적으로 높은 조건에서는 항복강도는 감소하였으나 변형 중 TRIP/TWIP 활성화에 의해 높은 가공경화능이 나타났으며, βsup이 지나치게 안정화될 경우 변형유기 변태의 활성도가 감소하여 강도–연성 조합이

저하되는 경향을 나타냈다. 특히 880 °C 열처리재는 약 936 MPa의 항복강도와 1, 286 MPa의 인장강도, 24%의 균일 연신율 및 31%의 파단 연신율을 나타내어 가장 우수한 강도–연성 조합을 확보하였다. In-situ EBSD 분석 결과, 변형이 증가함에 따라 β 기지에서 α′ 마르텐사이트가 점진적으로 형성되고 변형이 지속됨에 따라 추가적인 마르텐사이트 variant가 발달하였으며, 이러한 연속적인 변형기구의 활성화가 변형의 국부화를 지연시키고 높은 가공경화능을 유지하는 데 기여하였다. 이상의 결과로부터 열처리를 이용한 βsp 안정성 및 나노 ωsp의 제어를 통해 TRIP/TWIP 변형기구를 효과적으로 조절할 수 있으며, 이를 통해 준안정 β 타이타늄 합금의 강도와 연성을 동시에 극대화할 수 있음을 확인하였다.

[타이타늄2-2 | 15:05]

βsp 안정도 제어를 통한 TRIP α+β 타이타늄 합금 설계 가이드라인 개발: 서기완, 김도향, 박은수*(서울대학교)

Keywords: 타이타늄, Ti-6Al-4V, Strain-induced martensite, Transformation-induced plasticity

Ti-6Al-4V 합금은 경량 고강도 소재로서 높은 비강도와 우수한 내열성 및 내식성 때문에 항공기 엔진이나 우주 발사체 등 항공우주 산업 분야에서 주요 소재로 활용되고 있다. 이와 같은 특성적인 우위에도 불구하고 제한적인 가공 경화 능력과 낮은 성형성은 해당 합금 소재의 광범위한 산업적 적용을 제약한다. 본 연구에서는 이와 같은 Ti-6Al-4V 합금의 특성적 제약을 보완하기 위해, Ti-6Al-4V 합금 조성에 소량의 β 상 안정화 원소를 첨가함으로써 βsp의 안정도를 체계적으로 증대시켜 TRIP 기작을 보일 수 있는 α+β 타이타늄 합금을 설계하고자 한다. 이를 위해 기존 β-Ti 합금의 설계에 활용되었던 Bo–Md 상 안정성 도표를 기반으로 한 Ti-6Al-4V 조성 중심의 새로운 합금 설계 전략을 확립하였으며, 특히 합금의 nominal composition 대신 CALPHAD 열역학 계산을 통해 산출한 βsp의 조성을 기준으로 Bo–Md 상 안정성 도표를 확장할 수 있는 전략을 제시하였다. 계산된 β 상 조성의 상 안정성을 분석하기 위해 몰리브덴 등가 ($[Mo]_{eq}$) 수치를 정량적인 지표로 활용하였으며, 이를 통해 TRIP 기작을 보일 수 있는 합금 조성 범위를 Bo-Md 도표 상에 도출할 수 있었다. 이러한 접근은 βsp의 안정성을 정밀하게 제어하고, Ti-6Al-4V 합금 조성 중심으로 Bo–Md 상 안정성 도표를 체계적으로 확장함으로써, TRIP 기작을 보이는 α+β 타이타늄 합금의 설계를 가능하게 하였다. 본 연구는 Bo–Md 도표와 열역학 모델링의 통합 활용 범위를 확장함으로써, 첨단 타이타늄 합금 설계를 위한 프레임워크를 제시한다.

[타이타늄2-3 | 15:20]

Ti-xMo-4Fe (x=3.4, 5) 준안정 베타 합금의 고온 변형 시 활성화에너지 변화에 따른 변형 메커니즘의 분석: 이재관, 김홍민, 이동근*(국립순천대학교)

Keywords: Metastable β alloy, high-temperature deformation, activation energy (Q), dislocation, re-dynamic recrystallization (re-DRX), dynamic recovery (DRV)

최근 titanium 합금은 다양한 산업 분야에 사용되고, 고강도화와 적절한 연신율이 결합된 성능을 요구하고 있다. β-stabilizing 원소를 첨가한 β 계 titanium 합금의 개발과 연구가 활발히 연구되고 있는데, 주조 후 열기계적 가공을 통해 제조되는 것이 일반적이다. 이때 변형 공정은 미세조직학적 변화에 매우 민감하게 반응하며, DRX, DRV, 및 dislocation의 이동에 따른 다양한 변형 메커니즘이 발생한다. 대부분 선행 연구에서는 동적 재료 모델을 활용한 공정 변수에 따른 변형 메커니즘 분석에 초점이 맞춰져 있다. 이러한 분석은 거시적인 분석은 가능하지만, dislocation 및 원소들의 확산에 대한 영향은 충분히 고려되지 않았다. 본 연구에서는 metastable β titanium인 Ti-xMo-4Fe (x=3.4, 5) 합금의 고온 변형 시 activation energy (Q)를 계산하였다. 계산된 activation energy (Q)는 dislocation slip/climb, 입계 이동에 대한 에너지 장벽을 반영하며, Mo 함량 차이에 따른 activation energy (Q) value 변화와 이 값이 고온 변형 메커니즘에 미치는 영향의 상관관계를 분석하였다. Mo 함량이 증가함에 따라 확산속도 감소가 발생하여 변형 초기 DDRX의 억제가 발생하고, 축적된 dislocation의 재배열이 용이하여 CDRX가 쉽게 발생하였다.

[타이타늄2-4 | 15:35]

Effect of β-stabilizing element addition on the microstructure and mechanical properties of porous Ti fabricated by liquid metal dealloying: Bo Hyun Park, Sung Hyuk Park*(Kyungpook National University)

Keywords: Porous Ti, Liquid metal dealloying, Precursor alloying, Phase constitution, Elastic modulus

Titanium and its alloys are extensively used for dental and orthopaedic implants owing to their high specific strength, excellent corrosion resistance, and outstanding biocompatibility. Nevertheless, the elastic modulus of fully dense Ti remains substantially higher than that of natural bone, which can induce stress shielding and ultimately compromise implant fixation. Porous Ti structures have therefore been widely investigated as an effective strategy to reduce elastic modulus through the introduction of interconnected pores. However, increasing porosity to achieve lower stiffness is generally accompanied by a reduction in mechanical strength, limiting the control of mechanical properties through porous structure alone. In this study, three-dimensional interconnected porous Ti was fabricated via liquid metal dealloying (LMD) using Ti–Cu precursor alloys containing a β-stabilizing element, and porous Ti derived from conventional Ti–Cu precursor alloys was used as a reference for comparison. The influence of β-stabilizing element addition on phase constitution, ligament morphology, and compressive mechanical properties was systematically examined. Microstructural characterization was conducted to identify changes in the Ti ligament structure and phase constitution induced by precursor alloying. Mechanical properties, including elastic modulus, were evaluated by compression testing. The relationships among precursor alloying, microstructural evolution, and mechanical properties were examined through direct comparison with the reference porous Ti. These findings provide insight into the effect of β-stabilizing element addition on LMD-derived porous Ti and contribute to the development of porous Ti with tailored mechanical properties for biomedical implant applications.

[타이타늄3-1 | 15:55]

FeCoNiCr HEA 강화 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 매트릭스 복합재료의 계면 Interdiffusion 거동 및 기계적 특성 평가: 김홍민, 이재관, 이동근*(국립순천대학교)

Keywords: Metal matrix composite, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy, FeCoNiCr high entropy alloy, interdiffusion layer

기존 세라믹 입자 강화 titanium matrix composites (TMCs)는 매트릭스와의 낮은 계면 젖음성 및 열팽창계수 차이에 따른 결함이 발생하는 한계를 가진다. 이러한 특성은 강화재와 매트릭스 사이에 응력 집중, 계면 박리 및 균열 발생을 유발시키며, 기계적 특성 저하의 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 매트릭스와 계면 젖음성이 우수한 FeCoNiCr 고엔트로피 합금을 금속 입자 강화재로 적용하여 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 매트릭스 복합재료를 제조하였으며, 소결 온도(850 ºC~1000 ºC)에 따른 HEA 강화재와 매트릭스 간의 계면 반응 거동 및 기계적 특성을 분석하였다. 모든 소결 온도 조건에서 HEA 강화재와 매트릭스 사이에 명확한 interdiffusion layer가 형성되었으며, 계면에서는 박리 및 균열 등의 결함은 관찰되지 않았다. 또한, 소결 온도가 증가함에 따라 HEA 강화재의 구성 원소가 매트릭스로 확산되어 기계적 특성이 향상되었다.

[타이타늄3-2 | 16:10]

조성 설계 및 미세조직 제어를 통한 고강도·고연성 Ti 기반 중엔트로피 합금 개발: 이시우, 손수정, Renhao Wu, 이재홍, 하수빈, 김형섭*(포항공과대학교)

Keywords: 타이타늄, 고엔트로피합금, 부분재결정

Ti-based medium entropy alloy (Ti-MEA)는 낮은 밀도와 높은 비강도로 인해 경량 구조용 소재로 주목받고 있다. 본 연구에서는 열역학 계산과 Bo-Md 전자 파라미터를 이용한 조성 설계를 통해 body-centered cubic (BCC) 구조의 $Ti_{62}Al_{12}V_{20}Mo_3Zr_3$ Ti-MEA를 개발하였다. 미세조직 제어를 통해 회복 정도가 서로 다른 회복립, 미재결정립이 함께 존재하는 부분 재결정 조직을 형성하였다. 개발 합금은 약 231.7 MPa·cm^3/g의 비항복강도와 약 33.8%의 연신율을 나타냈으며, 기존 경량 합금과 비교하여 우수한 강도–연성 조합을 확보하였다. 높은 강도는 다원소 첨가에 의한 고용강화에 기반하며, 우수한 연성 및 가공경화능은 각 미세조직 영역에서 작동하는 변형기구와 밀접한 관련이 있다. 변형 과정에서 미세조직 간 계면에 형성되는 hetero-deformation-induced (HDI) stress와 변형 쌍정은 추가적인 가공경화를 유도하였고, kink band는 소성변형을 수용하여 국부적인 변형 집중을 완화하였다. 이를 통해 조성 설계와 부분 재결정 미세조직의 도입이 경량 BCC Ti-MEA의 강도와 연성을 동시에 향상시키기 위한 효과적인 설계 전략임을 제시하였다.

[타이타늄3-3 | 16:25]

In situ TiC 강화 타이타늄 기지 복합재료의 WC 함량이 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향: 김태윤(부산대학교), 김재혁(한국재료연구원), 이제인*(부산대학교)

Keywords: Arc-plasma melting, Titanium, Titanium carbide, compressive test

최근 고온환경에서 구동되는 엔진, 가스터빈의 연료 효율 향상을 위해 경량성과 고온 내구성을 동시에 만족시키는 금속-세라믹 복합소재의 필요성이 증가하고 있다. 타이타늄 합금은 높은 비강도와 우수한 내식성을 지녀 항공우주 및 운송 산업에서 주목받고 있으며, 이를 기반으로 TiC, TiB, SiC 등의 입자 또는 섬유를 분산시킨 타이타늄 기지 복합재료가 활발히 연구되고 있다. 하지만, 타이타늄의 높은 융점 및 산소친화도로 인해 액상공정을 통한 복합재 제조에 제약이 존재한다. 고상공정으로써 기지와 강화재 분말을 혼합하여 소결하는 분말야금법이 주로 적용되고 있는데, 이는 복합재료 내 높은 기공률, 약한 계면 결합력 및 강화상 응집과 같은 문제를 유발하고 있다. 본 연구에서는 아크 플라즈마 용해를 이용하여 액상의 순수 타이타늄과 WC 입자를 고온에서 반응시킴으로써, WC보다 열역학적으로 안정한 Ti를 자발합성하여 기지 내 최대 70 vol.%까지 균일하게 분산시킨 Ti(W)-TiC 복합재료를 제조하였다. X-선 회절 분석기 및 주사전자현미경을 이용하여 WC 첨가량 증가에 따른 기지 상과 TiC 형상의 변화를 분석하였으며, 시차주사열량계를 이용하여 WC함량 증가에 따른 기지 내 W 고용량 증가와 그에 따른 기지 상의 안정성을 확인하였다. 압축시험을 통해 기지 상의 고용강화 및 강화재의 분율 증가가 압축강도와 연신율에 미치는 영향을 평가함으로써 WC분율과 미세조직, 기계적 특성 간의 상관관계를 분석하였다.

[타이타늄3-4 | 16:40]

Effect of Al Content on Passive Film Stability and Corrosion Resistance of Ti–xAl Alloys: Hyo joo Lee(Hanbat National University), Yongha Joo(Pohang University of Science and Technology), Jae Hyuk Kim, Jae-Keun Hong(Korea Institute of Materials Science), Kyoungdoc Kim(Pohang University of Science and Technology), Hoon-Hwe Cho*(Hanbat National University)

Keywords: Ti–Al alloys, Passive film, Corrosion behavior, Oxygen vacancy

The effect of Al content on the passive film characteristics and corrosion behavior of Ti–xAl alloys is investigated. Electrochemical measurements reveal that Ti–2Al exhibits the highest corrosion resistance among the investigated alloys, indicating the existence of an optimum Al content for passive film stabilization. To elucidate the origin of this behavior, the passive film characteristics are systematically examined. X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) reveals progressive O 1s peak broadening in Ti–4Al and Ti–6Al, indicating an increase in oxygen-vacancy-related defects with increasing Al content. Consistent with these observations, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and Mott–Schottky analysis demonstrate that Ti–2Al possesses the most protective passive film with the lowest donor density. Based on the Point Defect Model (PDM), the effective oxygen vacancy diffusion coefficient is determined, demonstrating that suppressed oxygen vacancy transport is responsible for the enhanced passive film stability and corrosion resistance

of Ti–2Al. Finally, density functional theory (DFT) calculations reveal the interaction between Al dopants and oxygen vacancies, providing an atomic-scale understanding of oxygen vacancy transport and confirming that an optimum Al content exists for maximizing passive film stability and corrosion resistance.

[타이타늄4-1 | 17:00]
가공열처리를 통한 쾌삭 Ti-Ce 합금의 기계적 특성 향상: 최진솔, 김재혁, 이상원, 홍재근, 염종택(한국재료연구원), 이제인*(부산대학교), 박찬희*(한국재료연구원)
Keywords: Ti-Ce alloy, Grain refinement, Thermomechanical processing, Machinability

타이타늄은 우수한 비강도와 내식성 및 생체적합성을 갖지만, 가공 시 낮은 열전도도로 인해 연속 칩이 형성되어 가공성이 낮다. 본 연구에서는 CP-Ti의 기계적 특성과 가공성을 향상시키기 위해 Ti–Ce 합금을 제조하고, 열간압연 및 열처리에 따른 미세조직, 기계적 특성 및 가공 특성을 조사하였다. 특히 OM, EDS 및 EBSD를 이용해 가공열처리에 따른 미세조직과 기계적 특성 변화를 고찰하였다.

[타이타늄4-2 | 17:15]
항공용 대형 타이타늄 합금 단조품 제조를 위한 선행 연구: 송민철*, 조재영, 원종철(현대아이에프씨)
Keywords: 대형 타이타늄 합금 단조품, 열간 형단조, 열처리

타이타늄 합금은 우수한 내부식성, 내열성 및 높은 비강도를 가지고 있어서 항공 분야의 필수 소재이다. 첨단 항공 엔진 개발 계획이 수립되고 국산 전투기가 개발되면서 국내 타이타늄 합금 항공 부품에 대한 국산화 필요성이 증대되고 있다. 항공용 타이타늄 합금 부품의 주요 제작 방법 중 하나는 형단조이다. 국내 타이타늄 합금 단조품에 대한 연구 현황을 살펴보면 대부분이 수킬로그램 정도의 소형 부품으로 대형 부품에 대한 연구는 상대적으로 적다. 타이타늄 합금은 대표적 난성형재로 제품 중량에 비하여 매우 큰 용량의 프레스 설비가 필요하기 때문이다. 본 연구에서는 대형 타이타늄 합금 형단조 부품을 양산하기 위해 단조 및 열처리 기술의 개발되었다. 베타 천이온도 측정 결과를 바탕으로 온도-성형 연계 시뮬레이션을 통해 대형 타이타늄 합금의 단조 가열 온도가 선정되었으며 형만톤 프레스를 활용하여 실제 스케일 부품에 대한 형단조가 수행되었다. 열처리는 AMS4928에 따라 수행되었으며 대형 타이타늄 단조품의 사이즈를 고려한 열처리 시험을 통해 규격에 준하는 기계적 물성을 확보 할 수 있는 열처리 공정을 개발하였다. 개발 공정의 타당성은 컷업 시험을 통해 규격에 지정된 물성의 만족여부를 검증하였다.

[타이타늄4-3 | 17:30]
인장 변형률에 따른 강한 집합조직을 갖는 α+β 티타늄 합금의 소성변형 기구: 오선근(Massachusetts Institute of Technology (MIT), 한국표준과학연구원), Cemel Cem Tasan*(Massachusetts Institute of Technology (MIT))
Keywords: 타이타늄 합금, 집합조직, 변형쌍정, 실시간 관찰

α+β 이상(dual-phase) 티타늄(Ti) 합금은 우수한 강도, 연성 및 손상 수용성의 조합으로 인해 다양한 산업 분야에서 널리 활용되고 있다. 이들 합금 중, 주된 α상이 특정 결정학적 방향으로 우선 배향된 강한 집합조직의 초기 미세조직을 갖는 Ti 합금은 전위 슬립과 기계적 쌍정의 동시 활성화에 의해 지배되는 복잡한 소성변형 거동을 나타낼 수 있다. 특히, 조밀육방(hexagonal close-packed, hcp) 구조의 α상은 복잡한 슬립계와 연관된 뚜렷한 소성 이방성을 나타낸다. 따라서 해당 합금의 기계적 거동과 변형률 국부화 거동은 α상의 기저면 법선 방향과 하중 방향 사이의 결정학적 불일치에 매우 민감하다. 본 연구에서는 기계적 쌍정과 전위 소성의 상호작용을 기반으로, 강한 집합조직을 갖는 α+β Ti 합금의 소성변형 기구를 규명하고자 하였다. 또한 높은 변형률 수준에서의 미시적 변형률 국부화 거동을 이해하기 위해 사전 변형을 부여한 후 실시간 (in-situ) 관찰 기법을 적용하였다.

[타이타늄4-4 | 17:45] [Canceled]
순수 타이타늄 판재의 초기 집합조직에 따른 스프링백 현상 및 미세조직 변화 분석: 이종언, 원종우*(한국재료연구원)

마그넷
Room 2층 205호, 10월 28일

[마그넷1-1 | 08:30]
Enhanced Diffusion Efficiency of Pr-Based HRE-Free GBDP via Low-Temperature Hydrogenation-Induced Diffusion Pathways: Seong Min Choi, Wooyoung Lee*, Ho-Jeong Kim, Kyungmi lee, Jaehyuk Kim, Hye Su Kim(Yonsei Univ.)
Keywords: Nd–Fe–B sintered magnets, Grain boundary diffusion process (GBDP), Low-temperature hydrogenation

Nd–Fe–B sintered magnets are widely employed in traction motors for electric and hybrid vehicles, wind power generators, and other high-efficiency electrical systems owing to their superior magnetic performance. Grain boundary diffusion processing (GBDP) has been widely adopted as an effective approach for enhancing coercivity while reducing the overall consumption of rare-earth elements. Conventionally, heavy rare-earth (HRE) elements such as Dy and Tb have been used as diffusion sources because of their high magnetic anisotropy. However, their high cost, limited availability, and supply instability have stimulated increasing interest in HRE-free GBDP using light rare-earth elements such as Pr. Although Pr-based diffusion sources can enhance coercivity through the formation of Pr-rich grain-boundary and shell structures, their effectiveness is strongly influenced by the depth and uniformity of diffusion. In conventional GBDP, narrow or discontinuous grain-boundary pathways can restrict the penetration of the diffusion source into the interior of the magnet, resulting in preferential accumulation near the surface. Therefore, further improvement of HRE-free GBDP requires not only optimization of the diffusion-source composition but also an effective strategy for establishing additional grain-boundary diffusion pathways prior to the diffusion process. Based on this concept, low-temperature hydrogenation was introduced as a pre-treatment for grain-boundary pathway formation. Rather than inducing extensive hydrogen decrepitation, controlled low-temperature hydrogenation is utilized to induce localized structural changes associated with hydrogen interaction at Nd-rich grain-boundary regions, including local expansion and microcrack formation along grain boundaries and triple junctions. These microstructural changes can provide additional, non-mechanically generated pathways for subsequent diffusion. In this strategy, low-temperature hydrogenation first establishes grain-boundary diffusion pathways, while the subsequent Pr-based grain boundary diffusion step promotes the formation of a Pr-rich shell, resulting in a functionally separated diffusion process. This hydrogenation-assisted strategy shifts the focus of HRE-free GBDP from diffusion-source optimization alone toward the pre-formation of effective grain-boundary diffusion pathways. By combining diffusion-pathway formation through low-temperature hydrogenation with subsequent Pr-based grain boundary diffusion, deeper and more uniform diffusion can be promoted, thereby improving the diffusion efficiency of HRE-free GBDP. This approach provides a promising strategy for enhancing the effectiveness of Pr-based grain boundary diffusion in high-performance Nd–Fe–B permanent magnets.

[마그넷1-2 | 08:40]
Micro-Scale Iron Nitride by De-nitridation: Phase Control through Quenching and Nitrogen Ordering: Ho-Jeong Kim, Kyungmi Lee, Jaehyuk Kim, Seong Min Choi, Hye Su Kim, Seung Yong Lee(Yonsei University), Jung-Suk Lee, Jisung Lee, Taegwan Heo, Dohoon Kim(Hyundai Motor Company), Kyu Hyoung Lee, Wooyoung Lee*(Yonsei University)
Keywords: Iron Nitride, De-nitridation, Quenching, Nitrogen Ordering

The metastable α″-$Fe_{16}N_2$ phase has attracted considerable attention as a promising rare-earth-free magnetic material because of its high saturation magnetization and large magnetocrystalline anisotropy. However, conventional synthesis methods generally rely on low temperature nitridation using ammonia (NH_3). These processes require precise control of nitriding conditions and are strongly limited by sluggish nitrogen diffusion, making the synthesis of α″-$Fe_{16}N_2$ particularly difficult in micron-sized particles. In this study, we developed a simple denitridation-based route for synthesizing α″-$Fe_{16}N_2$ from commercially available, micron-sized mixed-phase Fe_xN (x = 3–4) powder. The starting powder, composed primarily of ε-Fe_3N and γ′-Fe_4N, was selectively denitrided under a 4 vol.% H_2/Ar atmosphere to obtain a single-phase γ′-Fe_4N precursor. Subsequently, a secondary denitridation treatment was performed at an elevated temperature for a very short duration to generate a transient nitrogen-supersaturated γ-Fe(N) phase, followed by rapid liquid-nitrogen quenching to induce martensitic transformation into the nitrogen-disordered BCT α′-Fe_8N intermediate. Subsequent low-temperature tempering under an N_2 atmosphere induced the ordering of interstitial nitrogen atoms, thereby promoting the formation of α″-$Fe_{16}N_2$. The phase evolution and magnetic properties were strongly dependent on the secondary denitridation time. These results demonstrate that α″-$Fe_{16}N_2$ can be produced from micron-sized over-nitrided Fe_xN powder through sequential control of denitridation, martensitic transformation, and nitrogen ordering. The proposed approach does not require direct NH_3 nitridation and provides a potentially safer and scalable route for the controlled synthesis of micron-scale α″-$Fe_{16}N_2$.

[마그넷1-3 | 08:50]
Activating Diffusion through Grain-Boundary Continuity in La-Engineered Ce-Fe-B Hot-Deformed Magnets: Kyungmi Lee, Wooyoung Lee*, Ho-Jeong Kim, Jaehyuk Kim, Seong Min Choi, Hye Su Kim(Yonsei Univ.)
Keywords: permanent magnets, Ce-Fe-B magnets, hot deformation, La substitution, grain-boundary diffusion
Ce-Fe-B permanent magnets are promising low-cost alternatives to Nd-Fe-B magnets, but their practical performance is constrained by inferior intrinsic magnetic properties and discontinuous grain-boundary networks that inhibit texture development and restrict diffusion during subsequent processing. Here, the grain-boundary structure of Ce-Fe-B hot-deformed magnets is engineered through partial La substitution and stepwise diffusion using a low-melting Nd-Al-Cu alloy. The results demonstrate that diffusion is governed not only by the diffusion source but also by the continuity of the grain-boundary network. Partial La substitution suppresses $CeFe_2$ formation and transforms thin (<5 nm), discontinuous grain boundaries into thicker (~10 nm), continuous rare-earth-rich pathways, enabling deeper penetration and more uniform redistribution of the diffusing elements. Consequently, the La-substituted Ce-Fe-B magnet after double diffusion achieves a maximum energy product $(BH)_{max}$ of 13 MGOe, significantly outperforming the corresponding Ce-Fe-B magnet. This work establishes grain-boundary continuity as a key design parameter for enhancing diffusion efficiency and magnetic performance in Ce-rich hot-deformed magnets.

[마그넷1-4 | 09:00]
적층제조된 AlFeCoCrMn 연자성 고엔트로피 합금에서 상 구성 및 미세구조와 자기 특성 사이의 상관관계 분석: 채동현(한국과학기술원), 박예준(한국재료연구원), 장규선(막스플랑크 지속가능재료 연구소), 정찬원(부경대학교), 최벽파*(한국과학기술원)
Keywords: 고엔트로피 합금, 연자성체, 보자력, Electron backscatter diffraction(EBSD), Atom probe tomography(APT)
본 연구에서는 적층제조된 AlFeCoCrMn 고엔트로피 연자성 합금에서 상 구성과 미세구조가 자기 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 최근 고엔트로피 합금은 우수한 기계적 물성 뿐만 아니라 열적 안정성, 내부식성, 자기 특성 등 다양한 기능적 특성으로 주목받고 있다. 그 중, 연자성체로서의 활용 가능성이 있는 AlFeCoCrMn 합금 시스템에 대해서 다양한 조성의 합금 스크리닝으로 효율적인 합금 설계가 가능하고 기존의 절삭 가공으로 인해 낭비되는 재료 없이 복잡한 3D 형상을 제조할 수 있는 적층제조 공정을 적용하여 조성 변화에 따른 합금의 미세구조 및 자기적 특성에 대해 연구하였다. 분말화한 reference 합금을 기반으로 추가적인 순원소 분말을 섞어 direct energy deposition(DED) 공정으로 여러 조성의 합금을 제조하였다. Al, Cr의 첨가는 BCC 상분율 증가에 기여하였고 Fe, Co의 첨가는 FCC 상분율 증가에 기여하는 것을 확인할 수 있었으며 포화자화는 BCC 상분율과 밀접한 관계를 보였다. 그러나 보자력은 결정립 크기와 BCC, FCC 상 분포와 같은 마이크로 스케일 분석만으로 설명되지 않았기 때문에 transmission electron microscopy(TEM)와 atom probe tomography(APT) 분석으로 나노 스케일에서의 분석을 추가적으로 진행하였다.

[마그넷1-5 | 09:10]
NdFeB 소결 영구자석 개발을 위한 문헌 기반 검색증강생성(RAG)과 도메인 특화 언어모델을 향한 다중 LLM 비교: 남충희*(한남대학교)
Keywords: 영구자석, 거대언어모델, AI-Agents, 검색증강생성, 자성재료
희토류 영구자석 개발에 필요한 조성, 공정, 미세조직 및 자기특성에 관한 지식은 방대한 문헌에 분산되어 있어, 이를 체계적으로 검색하고 정량적으로 활용하는 데 상당한 어려움이 있다. 본 연구에서는 소결 NdFeB 자석 문헌을 대상으로, 검색된 근거와 출처에 기반하여 답변을 생성하는 검색증강생성(Retrieval-Augmented Generation, RAG) 시스템을 구축하고, 서로 다른 대규모 언어모델의 과학 문헌 응답 성능을 비교·평가하였다. NdFeB 소결 영구자석을 키워드로 하여 800편 이상의 Elsevier 에서 출판된 논문을 섹션 단위로 파싱하고, 정규화된 본문 해시를 이용하여 중복 문헌을 제거하였다. 이후 조성, 제조공정, 미세조직 및 자기특성 관련 내용을 청크 단위로 분할하고 임베딩하여 문헌 검색 인덱스를 구축하였다. 사용자의 질의는 NdFeB 분야의 용어 사전에 기반한 규칙 기반 동의어 확장과 결정론적 검색 절차를 통해 처리하였다. 이를 통해 답변 모델과 무관하게 동일한 검색 근거를 제공하고, 정량적 또는 논문별 주장에는 출처를 연결하며, 검색된 문헌만으로 신뢰성 있는 답변이 어려운 경우에는 답변을 보류하도록 설계하였다. 동일한 검색 문맥과 동일한 지시문을 GPT-4o, Gemini 및 Llama 계열 모델에 입력하는 통제 비교를 수행하였으며, 모델별 특성을 평가하였다. 프런티어급 LLM은 상대적으로 높은 인용 밀도와 근거 활용도를 보인 반면, 소형 로컬 모델에서는 일부 문헌 내용의 방향성 오독, 질문 제약조건의 불완전한 반영, 또는 과도한 답변 보류가 나타났다. 이는 동일한 검색 근거가 제공되더라도 최종 답변의 신뢰성과 완성도는 생성 모델의 문헌 해석 및 근거 정렬 능력에 의해 달라질 수 있음을 시사한다.. 본 연구에서 확보한 근거 기반 RAG 파이프라인은 신뢰성 있게 정리된 문헌 지식을 지속적으로 축적할 수 있는 플랫폼 구축을 중간단계 목표로 하며. 궁극적으로는 보고된 문헌, 물성 예측과 근거 기반 질의응답, 고보자력 자석 설계, 연자성소재, 자기냉각 소재를 아우르는 자성재료 특화 언어모델(가칭: MagBERT) 개발로 나아가고자 한다.

[마그넷2-2 | 09:25] 조청강연
Functional Iron-BasedMagnetic Materials for Sensing, Actuation and Electromagnetic Wave Absorption: Youn-Kyoung Baek*, Jihyeong Jeong(한국재료연구원), Jiyun Kim (울산과학기술원)
Keywords: Hard magnet, Iron nitride, Ferrite, Electromagnetic absorption, Magnetic actuation, Triboelectric sensing
Magnetic materials are key enablers of emerging technologies because their magnetic responses can be coupled with mechanical, electrical, and electromagnetic functions for sensing, actuation, and electromagnetic-wave control. This work presents our recent

advances in functional iron-based magnetic powders tailored for these diverse applications. First, the composition, phase constitution, and microstructure of iron-based magnetic particles are controlled to obtain tailored magnetic responses. These powders are incorporated into triboelectric platforms to integrate magnetic-field-driven actuation with contact and motion sensing, providing a material-level approach to adaptive and self-sensing structures. Second, ferrite-based absorbers are developed to attenuate electromagnetic interference in selected microwave and millimeter-wave frequency bands relevant to satellite communications, short-range radar, sensing systems, and autonomous vehicles. Composition and phase constitution control, particle-structure engineering, and interfacial hybridization are employed to tailor magnetic losses while maintaining favorable impedance matching. These studies demonstrate that iron-based magnetic powders can be systematically engineered for triboelectric sensing, magnetic actuation, and electromagnetic-wave absorption. They also establish practical and scalable processing routes for extending these materials to a broad range of functional devices and systems. Acknowledgment: This work was supported by the Fundamental Research Program of the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea Government (MSIT) (RS-2026-25604779).

[마그넷2-3 | 09:55] 조청강연

입계확산공정 기반 중희토류 극저감 고성능 Nd–Fe–B 자석 개발 전략: 김정민*(대구경북과학기술원), 이동현(경북대학교), 김성찬, 정현종(대구경북과학기술원), Vitalii Galkin(경북대학교), 백주영, 윤태영, 김종태, 정석환(대구경북과학기술원), 김동환, 이상협, 배경훈(성림첨단산업), 노종욱(경북대학교), 김동환(대구경북과학기술원)

Keywords: Nd-Fe-B magnet, Grain boundary diffusion, Coercivity, Remanence

기존 상용 영구자석인 알리코 및 페라이트 자석은 저가라는 장점에도 불구하고 성능이 제한적이다. 반면, 1980년대 개발된 Nd계 희토자석은 약 10배 이상의 우수한 성능을 바탕으로 자동차, 가전, IT 및 다양한 산업 분야에서 수요가 급격히 증가하고 있다. 특히, 2030년에는 전기차, 수소차, 하이브리드차 등 친환경차 시장의 확대로 인해 희토자석 생산량이 두 배 이상 증가할 것으로 예상되며, 약 10조 원 규모의 신규 시장이 형성될 것으로 전망된다. 친환경차 구동 모터용 자석은 (BH)max+Hcj ≥ 70 이상의 초고특성이 요구되고, 200 ºC 환경에서도 안정적인 성능을 유지해야 한다. 이를 위해 합금 제조 시 6~10 wt% 수준의 중희토 사용이 필수적이지만, 중희토는 자원 편중, 가격 변동성, 환경오염 등의 문제와 더불어 Nd2Fe14B 구조에서 반강자성 결합으로 인한 잔류자속밀도 저하라는 한계를 갖는다. 이에 본 연구에서는 중희토 사용량을 최소화하면서도 우수한 보자력을 확보할 수 있는 입계확산형 고성능 희토자석 개발을 목표로 한다. 자성소재 결정립계에 중희토를 균일하게 확산시키는 입계확산기술을 기반으로 공정 및 소재 탐색을 최적화 하여 향후 미래 수요 산업에서 요구되는 고보자력 Nd계 희토영구자석 소재의 개발 및 제조 기반을 구축하였다. 본 연구의 성과는 친환경자동차 산업에서의 안정적 자원 수급과 고효율 모터 구현에 기여할 것으로 기대한다.

[마그넷2-4 | 10:25] 조청강연

Can we realize high coercivity in Nd–Fe–B sintered magnets without heavy rare-earths? Part II: Grain refinement: Sumin Kim*, So-Yeon Kim, Seong-Jun Yoon, Tae-Hoon Kim, Jung-Goo Lee(Korea Institute of Materials Science)

Keywords: permanent magnet, Nd-Fe-B, grain refinement, coercivity

Heavy rare-earth elements (HREs), such as Dy and Tb, have conventionally been used to enhance the coercivity of Nd–Fe–B sintered magnets by increasing the anisotropy field of the $Nd_2Fe_{14}B$ phase. However, the limited availability and high cost of HREs have driven intensive efforts toward HRE-free high-coercivity magnets. Grain refinement is one of the most effective approaches for this purpose because reducing the grain size suppresses reverse-domain nucleation and increases the coercivity ratio, ($k = H_c/H_a$). Recent studies have further shown that increasing (k) can change the angular dependence of coercivity from Kondorsky-type to Stoner–Wohlfarth-like behavior, indicating that crystallographic misalignment becomes increasingly important for coercivity as well as remanence. Therefore, achieving high coercivity through grain refinement requires not only the fabrication of ultrafine Nd–Fe–B powders but also precise control of their magnetic alignment. In this presentation, our recent approaches to fine-powder preparation, magnetic alignment, and microstructure control for HRE-free Nd–Fe–B sintered magnets will be introduced. Particular attention will be given to the relationship between grain refinement, powder alignment, coercivity, and to the processing strategies required to realize high-performance Nd–Fe–B magnets without relying on heavy rare-earth elements.

[마그넷2-5 | 10:55] 조청강연

Nd-Fe-B 자석의 보자력에 대하여: 장태석*(엠리써치, 선문대학교)

Keywords: Nd-Fe-B 소결자석, 보자력, 미소자기 시뮬레이션, HRE-free 자석

Nd-Fe-B 자석은 모터, 발전기 및 액추에이터의 자기장 소스로 사용되는 가장 중요한 산업 재료 중 하나이며, 전기 자동차, 드론, 로봇 및 풍력 터빈용 모터 및 발전기와 같은 녹색 에너지 분야의 응용 분야가 빠르게 확장됨에 따라 앞으로 고성능 Nd-Fe-B 자석에 대한 수요는 더욱 증가할 것으로 예상된다. Nd-Fe-B의 최대 에너지적은 이론적 한계에 도달하고 있는 반면 영구자석 응용에 있어 가장 중요한 외인성 특성인 보자력은 여전히 이론적 한계치보다 훨씬 낮다. 물리적으로 영구자석의 보자력은 강자성물질의 이방성 자장인 H_A에 따라 증가하여야 한다. 그러나 상업용 다결정 자석의 일반적인 보자력 값은 약 $0.2H_A$에 불과하며 이는 브라운의 역설로 잘 알려져 있다. N50 grade의 Nd-Fe-B 소결자석의 경우, 일반적으로 보자력은 약 1.2 T이며, 이는 $Nd_2Fe_{14}B$이 갖는 이방성 자장의 약 15%에 불과하다. 이 보자력은 열 감자 효과로 인해 HEV/EV 트랙션 모터에서 자석의 작동 온도인 약 160 ºC에서는 약 0.2 T로 더욱 감소한다. 이에 대한 산업적 해결책은 $Nd_2Fe_{14}B$의 Nd 일부를 Dy (또는 Tb)로 대체하여 이방성을 증가시키는

것이다. 보자력은 자석의 미세구조에 의해 크게 좌우되기 때문에, 그동안 Nd-Fe-B 자석의 미세구조와 보자력과의 상관 관계를 밝히기 위한 연구들이 자석 발견 초기부터 꾸준히 수행되어 왔다. 그러나 보자력의 실체에 대해 보다 자세하고 정확하게 이해할 수 있게 된 것은 비교적 최근의 일로서, 이는 구조적 특성분석 기술과 미소자기 시뮬레이션 (micromagnetic simulation)의 발전에 힘입은 바 크다. 이 발표에서는 최근에 수행된 미세구조 특성분석 결과와 미소자기 시뮬레이션 결과들을 통해 Nd-Fe-B 자석의 보자력에 대해 밝혀진 몇 가지 주요 결과에 대해 알아보고자 한다. 아울러 궁극적으로 중희토류 원소를 사용하지 않고도 최고의 성능을 갖는 HRE-free Nd-Fe-B 자석을 구현하기위한 전략에 대해서도 다루고자 한다.

[마그넷2-6 | 11:25] 초청강연

K-문샷 희토류 소재 로드맵: 이상관*(국가과학기술연구회 K-문샷 추진 지원단)

중국의 희토류 소재 수출통제 강화로 글로벌 희토류 공급망 위기가 본격화되고 있다. 2010년 중·일 외교 분쟁 과정에서 발생한 이른바 '희토류 파동'을 계기로 희토류의 전략적 중요성이 크게 부각되었다. 이후 희토류 생산과 공급망에서 압도적인 비중을 차지해 온 중국은 희토류 원료뿐만 아니라 최근에는 영구자석 등 희토류 소재와 관련 기술까지 수출통제를 확대·강화하고 있다. 이에 따라 세계 각국은 안정적인 희토류 공급망 확보를 위한 치열한 경쟁에 나서고 있다. 우리나라가 이러한 희토류 공급망 위기에 대응하기 위해서는 향후 배출량이 급증할 것으로 예상되는 폐영구자석을 재활용하여 희토류를 회수·확보하는 한편, 영구자석 등 희토류 소재에 사용되는 희토류의 사용량을 획기적으로 저감하거나 궁극적으로 배제함으로써 특정 국가에 대한 의존도를 낮추는 것이 매우 중요하다. 이를 위해서는 무엇보다 기존 공정의 한계를 뛰어넘는 친환경 재활용 공정기술과 희토류 사용을 최소화하면서도 소재의 임계 성능을 구현할 수 있는 독창적인 원천기술 확보가 필요하다. 아울러 기술개발과 사업화의 속도를 획기적으로 높이기 위해 소재 설계와 공정 최적화 전반에 AI를 적극 활용하는 기술혁신도 동시에 이루어져야 한다. 정부는 AI 활용을 통한 과학기술 혁신의 가속화와 국가적 미션 해결을 위해 2026년 2월 「K-문샷 프로그램 추진전략(안)」을 발표하였다. K-문샷 프로그램은 과학기술 연구개발 전반에 AI를 적극 도입하여 2030년까지 연구생산성을 2배로 높이고, 2035년까지 국가 경쟁력의 대도약을 견인할 12대 국가 미션 해결을 목표로 하는 범국가적 프로그램이다. 12대 국가 미션에는 '소재' 분야가 포함되어 있으며, 소재 분야의 핵심 미션은 바로 '세계 최고 성능의 희토류 대체·저감·재활용 영구자석 개발'이다. 이를 통해 세계 최고 수준의 원천기술을 확보하고, 산·학·연 및 수요기업 간 협력을 기반으로 개발 기술의 실증과 사업화를 가속화함으로써 희토류 소재의 국산화를 넘어 세계 시장으로 진출하는 것을 목표로 하고 있다. 이러한 목표를 달성하기 위한 K-문샷 희토류 로드맵을 중점적으로 소개하고, 이와 함께 최근 국가 소재 연구개발 정책의 변화와 과학기술정보통신부의 주요 소재 연구개발 사업 동향을 간략하게 소개하고자 한다.

제22회 중성자 및 방사광 X-선 이용 금속 및 나노 구조 재료 분석 국제 심포지엄
Room 2층 205호, 10월 28일

[NeXS1-1 | 13:30] Invited Talk

The steel technology of European arms and armour as non-invasively analyzed using neutron methods: an overview: Francesco Grazzi*(CNR-IFAC, Sesto Fiorentino, INFN Sez. Firenze, Sesto Fiorentino)

In European culture, starting from the beginning of the Iron Age to modern times, the development of iron and steel technology is directly related to the development of tools, arms and armour. Many of the tools were common use objects, which soon were lost for degradation and mineralization while it is more common that arms and armour, especially those related to personal status of important historical characters, survived the test of time. Such artefacts can be used as a picture of the time- and place-specific steel production and working methods as well as specialized tricks of the trade employed for their production. Among the many features that are of importance in steel production there are, quality of the ore refinement, carburization process, forging and forge welding, thermal treatments as quenching and tempering. All these features as well as specific ones as shaping, engraving, surface treatments, can be observed by destructive methods as optical and electronic microscope observation (metallography, SEM), chemical analysis (pyrolysis, EDX) thus providing decent answers to many questions. The approach is anyway destructive and often localized to specific sacrificed areas. Since 2009, we developed a different approach based on the use of neutron methods (mainly diffraction and imaging) to characterize, in a non-invasive way, wide volume of historical steel artefacts, aiming to obtain relevant answers about steel technology. We established several collaborations with scholars, museum, and research institutions all over Europe (and beyond) to study steel features using neutron methods, also developing an analytical protocol. Here we present some selected examples ranging from Roman times to 17th Century CE based on both neutron diffraction and neutron imaging analysis showing general features of steel technology as evolved in history and specific manufacturing features related to time and place.

[NeXS1-2 | 14:05] Invited Talk

Complementary Applications of Neutrons and X-rays to Cultural Heritage and Paleontological Studies: Ito Daisuke*(Kyoto university)

This presentation highlights the synergistic and complementary applications of non-destructive neutron and X-ray analytical techniques in cultural heritage and paleontological research. Quantum beam technologies have become essential tools for investigating precious historical artifacts and fossil specimens without causing physical damage. While X-rays provide high spatial resolution and excellent sensitivity to heavy elements, neutrons possess high penetration capabilities through dense metallic or stone structures and exhibit exceptional sensitivity to light elements such as hydrogen. By integrating these two distinct probe types, researchers can overcome the limitations inherent in single-technique analyses. This talk presents key analytical case studies illustrating how this dual-beam strategy addresses complex archaeological and paleontological questions. The combination of neutron radiography and tomography with advanced X-ray techniques allows for comprehensive structural characterization and elemental mapping. This holistic approach not only uncovers long-lost manufacturing techniques and ancient trade networks but also provides vital insights into fossilized anatomical structures and paleobiological evolution. Furthermore, practical methodologies for data integration and outline future perspectives for beamline inter-facility collaboration will be discussed.

[NeXS1-3 | 14:40] Invited Talk

In-situ X-ray imaging system to investigate the solidification behaviors of metallic materials: Hyeong Uk Mo, Seon Ho Choi(Pohang Accelerator Lab. / POSTECH), Jihoon Han(Korea Light Source / Korea Basic Science Institute), Jina Kim(Pohang Accelerator Lab. / POSTECH), Wonjun Cho, In Sung Han(Kyungpook National University), Chang Wook Seol, Jong Hyun Kim*, Ho Jae Kwak*(Pohang Accelerator Lab. / POSTECH)

Keywords: X-rays, Metal and alloys, Solidification, dendritc growth, in-situ imaging, synchrotron X-rays

Understanding the dynamic evolution of microstructures during solidification is essential for controlling the properties of metallic materials and optimizing manufacturing processes. An in-situ visualization system using synchrotron white X-rays has been established at the 9D WX beamline of Pohang Light Source-II (PLS-II), Pohang Accelerator Laboratory, to directly investigate phase transformation and solidification behaviors of metallic materials. The developed system enables high-resolution and high-speed imaging of microstructural evolution during melting and solidification under controlled thermal and atmospheric conditions. In particular, dynamic phenomena such as dendritic growth and solid–liquid interface evolution of carbon steels, TRIP steels, stainless steels and Cu-Fe immiscible alloys can be directly visualized, and quantitative parameters including dendrite spacing and liquid fraction can be evaluated from the acquired images. To further extend the capability from two-dimensional imaging to three-dimensional characterization of microstructural evolution, a new high-temperature furnace system is currently under development, referring to the furnace configuration implemented at the FXI (18-ID) beamline of NSLS-II. The new furnace is being designed to be compatible with

synchrotron X-ray tomography while providing controlled high-temperature environments for metallic materials. The integrated in-situ visualization platform is expected to provide fundamental insights into solidification and phase-transformation mechanisms that are difficult to obtain using conventional post-mortem characterization. Furthermore, systematic accumulation of real-time experimental data will contribute to overcoming current limitations in manufacturing processes, establishing databases for the development of new alloys and industrial applications, reducing process costs, and improving process reliability. Ultimately, the development of advanced two- and three-dimensional in-situ X-ray characterization capabilities will expand synchrotron X-ray applications and strengthen research capabilities in metallic materials and advanced manufacturing technologies.

[NeXS1-4 | 15:05] Invited Talk

Characterization of Hydrogen-Induced Fatigue Damage in Pressure Vessel Steel Using Neutron Dark-Field Imaging: Youngju Kim*(Korea Atomic Energy Research Institute)

Keywords: hydrogen embrittlement, nano-void, fatigue damage, neutron, dark field imaging

Hydrogen can significantly accelerate fatigue damage in pressure vessel steels through changes in deformation and microstructural evolution. In this study, 4130 pressure vessel steel specimens subjected to strain-controlled fatigue testing in air and high-pressure hydrogen were characterized using neutron dark-field imaging. A far-field neutron grating interferometer was employed to measure small-angle scattering signals over a range of autocorrelation lengths. Differences in the dark-field response between specimens tested in air and hydrogen were observed depending on the applied fatigue condition. Quantitative analysis using a polydisperse scattering model further indicated changes in characteristic microstructural length scale and scattering volume fraction. The results demonstrate the potential of neutron dark-field imaging as a spatially resolved, nondestructive method for evaluating hydrogen-assisted fatigue damage in structural steels.

[NeXS1-5 | 15:20] Invited Talk

Energy-Selective Neutron Imaging for Spatially Resolved Crystallographic Analysis of Metallic Materials: junyoung son(Korea Atomic Energy Research Institute, Pusan Nat'l Univ), tae joo kim, youngju kim, jongyul kim(Korea Atomic Energy Research Institute), seung wook lee*(Pusan Nat'l Univ)

Keywords: Energy selective neutron imaging, Phase mapping, Strain mapping, Crystallographic information

Neutrons have high penetration capability into metallic materials and wavelength-dependent scattering characteristics related to crystal structures. Therefore, neutron imaging techniques are useful for the nondestructive analysis of microstructural and crystallographic information inside bulk materials. In particular, energy-selective neutron imaging can control the contrast of transmission images by selecting a specific neutron wavelength range. This technique enables the spatially resolved analysis of crystallographic information, such as phase distributions, lattice strains, and crystallographic textures, together with the internal structural information obtained by conventional neutron imaging. In this presentation, the measurement principle and main features of energy-selective neutron imaging are introduced, and its potential applications to the spatially resolved crystallographic analysis of metallic materials are discussed. In addition, the system configuration and current development status of the energy-selective neutron imaging system at the HANARO Ex-core Neutron Irradiation Facility (ENF) are presented. The main technical considerations for neutron wavelength selection, image detection, and data analysis, as well as future plans for system performance evaluation, are also discussed. The system under development is expected to provide a useful tool for the nondestructive characterization of spatial distributions of phases and lattice strains in multiphase metallic materials, welded components, and additively manufactured materials.

[NeXS2-1 | 15:50] Invited Talk

Two decades (almost) of strain scanning on KOWARI: Vladimir Luzin (ANSTO)

Residual stress analysis by neutron diffraction is an effective and well-established technique, which allows studying of stress distribution inside bulk components non-destructively, Due to the high demand for such measurements, a residual stress diffractometer is a standard piece of instrumentation in most of the neutron facilities. KOWARI is a residual stress diffractometer at the Australian Centre for Neutron Scattering (ACNS) of the Australian Nuclear Science and Technology Organisation (ANSTO), which has been in continuous user operation since 2008. Due to generic versatility of the technique and design of KOWARI, a wide range of projects can be accommodated for stress measurements with spatial resolution from 0.1 to 10 mm. Additionally, various in-situ setups and texture measurement are routinely available on the instrument. With sufficiently long history of operation (18+ years) and high throughput (~40 proposals per year), a great deal of experience with different projects was acquired, some of which are reported in a systematic manner within this presentation.

[NeXS2-2 | 16:25] Invited Talk

Assessment of Stress-Driven Regional Hydrogen Embrittlement in TIG-Welded 304L Stainless Steel: WORAKAN TONGPRAPAI(충남대학교), 채호병(한국원자력연구원), 이동현(충남대학교), 우완측(한국원자력연구원), 이수열*(충남대학교)

Keywords: 304L stainless steel, TIG-welded, Hydrogen embrittlement, Neutron diffraction, Machine learning

In hydrogen-exposed TIG-welded 304L, the localization of embrittlement is governed primarily by residual stress-driven hydrogen transport across distinct zones rather than by bulk alloy chemistry. The weld zone (WZ), heat-affected zone (HAZ), and base metal

(BM) yield a systematic hierarchy of γ-austenite morphologies, dislocation structures, and residual stresses. Residual stress measurements by neutron diffraction confirm that the highest stress concentration is localized in the WZ and the lowest in the BM. Integrating with the simulated slow strain rate tensile experiments under hydrogen charging with pre-load, the hierarchy of weld joints discloses the distinct regional hydrogen behavior: the WZ contains the highest hydrogen content in the unloaded state, whereas the HAZ shows the largest stress-induced hydrogen uptake and reveals stress-assisted accumulation toward triaxially constrained zones despite similar weak-trapping behavior in thermal desorption. The ductility across all regions decreases due to hydrogen charging. However, the resulting magnitude and fracture mode follow the varying stress and local microstructural features rather than hydrogen content alone. The BM remains superior in embrittlement resistance, while the WZ suffers the most severe ductility loss with mixed quasi-cleavage and transgranular fracture. Notably, the HAZ acts as a stress-activated hotspot exhibiting a sharp escalation in hydrogen susceptibility under pre-load. The data-driven machine learning analysis developed in this study establishes a consistent, stress-influenced hierarchy of regional hydrogen embrittlement, providing valuable insights for assessing welded components in hydrogen infrastructures.

[NeXS2-3 | 16:45] Invited Talk

Hydrogen-Induced Anisotropy in Single-Crystal Elastic Constants of 304L Stainless Steel via In-Situ Neutron Diffractionn and Kröner Modeling: Byungrok Moon, Baek-Seok Seong, Donghyeon Choi, Jimin Nam, Jungbin Park(Pusan National University), Seung-Gun Lee(Korea Institute of Materials Science), Wanchuck Woo, Hobyung Chae(Korea Atomic Energy Research Institute), Namhyun Kang*(Pusan National University, Institute of Materials Technology)

Keywords: hydrogen embrittlement, 304L stainless steel, neutron diffraction, Kröner modeling, single-crystal elastic constants, elastic anisotropy

While investiations into hydrogen embrittlement predominantly target the plastic regime, the fundamental impact of interstitial hydrogen on elastic behavior remains inadequately resolved. Understanding hydrogen-induced elasticity is vital, as lattice-level perturbations drive microstructural instability and macroscopic failure. This study determines the hydrogen-influenced single-crystal elastic constants and anisotropy of 304L stainless steel, establishing their direct link to dislocation-mediated embrittlement mechanisms. Utilizing in-situ neutron diffraction combined with the Kröner self-consistent model, the single-crystal elastic constants (C_{ij}) of 304L austenitic stainless steel were successfully derived. Hydrogen charging expanded the lattice parameter by ~0.7 % (from 3.558 Å to 3.583 Å), selectively elevating C_{11} and C_{12} while maintaining C_{44} nearly constant. Consequently, while bulk polycrystalline Young's and shear moduli remained unperturbed, Zener's anisotropy and Poisson's ratios increased. Hydrogen reduced the shear modulus of the {111}<110> slip system by ~8.3 %, lowering the Peierls-Nabarro stress by approximately 38 %. These findings confirm that lattice modifications enhance volumetric stiffness while concurrently reducing slip-direction shear resistance, providing direct experimental validation for the volumetric and modulus components of the hydrogen-enhanced localized plasticity (HELP) mechanism.

[NeXS2-4 | 17:05] Invited Talk

Neutron and synchrotron X-ray diffraction studies on medium-entropy alloys: neutron-absorbing capability and deformation mechanisms: JAEHEUNG LEE(POSTECH), Hyeonseok Kwon*(Kookmin University), Bon Woo Koo(POSTECH), Sang Guk Jeong(Hanwha Aerospace), Hobyung Chae, Wanchuck Woo(Korea Atomic Energy Research Institute), Wu Gong, Stefanus Harjo(J-PARC Center), Emad Maawad(Helmholtz-Zentrum Hereon), Changwan Ha(Pohang Accelerator Laboratory), Sangbong Yi(Kumoh National Institute of Technology), Hyoung Seop Kim*(POSTECH)

Keywords: Neutron, Synchrotron X-ray, In situ diffraction, Neutron-absorbing capability, Deformation mechanism

High- and medium-entropy alloys offer a vast compositional space that can be directed at bottlenecks conventional alloys have not overcome. This talk presents three case studies where neutron and high-energy synchrotron X-ray diffraction were used in distinct roles: as a quantitative probe of thermal-neutron attenuation, and as an in situ tool for resolving deformation in heterogeneous microstructures. The first study concerns neutron-absorbing structural materials. Borated stainless steels are widely used because boron has a large thermal-neutron absorption cross-section. However, the solubility of boron in steel is limited, so heavy boron alloying leads to the formation of brittle borides and a loss of ductility. To address this trade-off between neutron-absorbing and mechanical properties, gadolinium, whose cross-section is about sixty times larger per atom than boron, was microalloyed into a CoCrNi medium-entropy alloy selected for its strength-ductility balance and toughness. The attenuation performance was quantified at the Residual Stress Instrument of the HANARO reactor, KAERI, by a transmission method in which a peak diffracted from an iron pin acts as the flux monitor, yielding the linear attenuation coefficient. The coefficient increased from 1.92 to 2.83 cm^{-1} while tensile properties were retained. The other studies concern high-strength alloys with heterogeneous microstructures, in which the constituent domains deform and transform differently under load. Post-mortem analysis covers only a few fields of view, whereas in situ diffraction gives globally averaged, statistically reliable data at every stage of deformation. In an additively manufactured maraging alloy, reverted austenite formed along the cellular structure was introduced to improve plasticity. In situ time-of-flight neutron diffraction at BL19 TAKUMI of J-PARC was employed to reveal how this plasticity was gained without sacrificing the high yield strength. Tracking the phase fraction, lattice strain and phase stress of both phases throughout deformation showed that the soft austenite does not yield prematurely before macroscopic yielding, and that deformation-induced martensitic transformation occurs after macroscopic yielding and contributes to the improved

plasticity. In a partially recrystallized metastable alloy, partial recrystallization was used to boost the yield strength, but the recrystallized and non-recrystallized domains transform simultaneously during deformation, which had made the deformation behavior difficult to analyze. In situ synchrotron X-ray diffraction was therefore carried out at P07 of PETRA III, DESY. Although the two domains share the same crystal structure and their reflections overlap, the high-energy beam resolved the peak profiles finely enough to deconvolute the asymmetric austenite reflections. This separated the deformation behavior of the two domains and quantified the contribution of each to the bulk response.

[NeXS2-5 | 17:25] Invited Talk

공정 중 실시간 열화상 및 형상 계측을 활용한 금속 3D 프린팅 잔류응력 추정과 중성자 회절 기반 검증: 신수빈(한국과학기술원), 이수열(충남대학교), 우완측, 채호병(한국원자력연구원), 손훈*(한국과학기술원)

Keywords: 스테인리스, 금속적층, 중성자회절, 잔류응력, 인공신경망

금속 3D 프린팅 공정(Directed Energy Deposition, DED)에서는 급격한 가열·냉각과 반복적인 재가열로 잔류응력이 형성되며, 이는 변형과 균열을 유발하고 심한 경우 적층 중 파괴로 이어질 수 있다. 본 연구에서는 실시간 동축 적외선 열화상과 공정 중 레이저 라인 스캐닝으로 획득한 온도 및 형상 정보를 활용하는 잔류응력 추정 프레임워크를 제안하였다. 측정된 층별 형상을 기반으로 해석 영역을 갱신하고, 실시간 표면 온도 데이터를 물리정보 신경망(PINN)에 적용하여 열적 특성과 3차원 비정상 온도장을 추정하였다. 이후 추정된 온도 이력을 열-탄성-소성 해석에 적용하여 잔류응력을 산출하였다. 제안 방법은 서로 다른 열 축적 특성을 갖는 두 적층 경로의 다중 비드·다중 층 시편에 적용하였으며, 중성자 회절로 측정한 내부 잔류응력과 비교하여 검증하였다.

에너지재료
Room 2층 206/8호, 10월 28일

[에너지1-1 | 08:30]
Mechanochemical Interface Engineering of ZnP_2/Carbon Anodes for Sodium-Ion Batteries: PYOCHAN KIM, CHANJIN PARK*(Chonnam Univ.)
Keywords: Sodium-Ion Batteries, High-Energy Ball Milling, Zinc Phosphide, Alloy-Based Anode, Carbon Coating

Sodium-ion batteries are promising alternatives to lithium-ion batteries for large-scale energy storage because of the natural abundance and low cost of sodium. However, conventional graphite exhibits limited Na^+ storage in typical carbonate electrolytes, motivating the development of alternative anode materials. ZnP_2 offers a high theoretical capacity through conversion and alloying reactions, but its practical application is hindered by large volume changes, limited electronic conductivity, and continuous interfacial degradation during cycling. In this study, ZnP_2 was synthesized by high-energy ball milling for 1 h and subsequently combined with carbon through secondary milling. The carbon-milling time was varied from 1 to 12 h, and ZnP_2/C-6 h provided the most balanced rate and cycling performance. To address both bulk structural degradation and interfacial instability, carbon-framework engineering was combined with the use of a DME-based electrolyte. Structural characterization showed that the crystalline ZnP_2 phase was retained after carbon milling, while TEM revealed intimate contact between ZnP_2 domains and an amorphous carbon matrix. XPS components assigned to P-C and P-O-C bonding further suggested interfacial chemical interactions between ZnP_2 and carbon. The ZnP_2/C-6 h electrode delivered reversible capacities of 320.6 and 177.3 mAh g^{-1} at 100 and 2, 000 mA g^{-1}, respectively, over 0.01–2.0 V vs. Na/Na^+. When the current density returned to 100 mA g^{-1}, the capacity recovered to or 322 mAh g^{-1}, indicating good capacity recovery after high-rate operation. In the DME-based electrolyte, the electrode retained 169 mAh g^{-1} after 500 cycles at 500 mA g^{-1}, corresponding to 62.5% capacity retention. To clarify the role of electrolyte chemistry in long-term stability, cycled electrodes from DME and EC/DMC electrolytes were compared using post-mortem XPS and SEM. The DME-based electrolyte produced an organic-rich interphase containing salt-derived NaF and better preserved the Zn-P chemical environment. It also reduced electrode cracking and pulverization relative to EC/DMC. These results indicate that mechanochemical carbon integration, complemented by interfacial stabilization in a DME-based electrolyte, can improve the rate capability and cycling stability of ZnP_2 conversion-alloying anodes.

[에너지1-2 | 08:45]
Materials-Descriptor-Based Machine Learning for Pre-Cycling Lifetime Estimation of Aluminum Foil Anodes for Li ion batteries: Junoh Jung, Hee-Tae Jeong, Woo Jin Kim*(Hongik Univ.)
Keywords: aluminum foil anode, lithium-ion battery, end-of-life cycle number, pre-cycling prediction, physics-guided machine learning, interpretable modeling

Aluminum foil anodes offer a binder-free architecture in which the active material and current collector are integrated, thereby providing high volumetric capacity for lithium-ion batteries. Their practical application remains limited by rapid capacity fading. Lithium storage proceeds through the α-Al ↔ β-LiAl phase transformation, which generates a volumetric strain approaching one hundred percent and promotes plastic deformation, crack nucleation, and pulverization. The fresh surfaces thereby exposed sustain repeated renewal of the electrode–electrolyte interface, while the passivating α-Al layer formed upon delithiation impedes lithium extraction from the underlying β-LiAl phase and contributes to lithium trapping. Cycling durability therefore depends on both electrochemical conditions and the capacity of the foil to accommodate transformation strain, which is influenced by solute content, grain-boundary density, and the resulting mechanical properties. Several established data-driven approaches to battery lifetime prediction use electrochemical signals obtained during the initial stages of cycling, including capacity trajectories, differential-voltage features, and impedance responses. Although effective for forecasting the subsequent degradation of fabricated cells, their reliance on post-assembly measurements limits their use in selecting materials and experimental conditions before electrochemical testing. Initial Coulombic efficiency, which was incorporated into our previous physics-guided lifetime model for aluminum foil anodes, presents a similar practical limitation because it becomes available only after cell fabrication and initial cycling. Accordingly, the present study investigates whether the end-of-life cycle number of aluminum foil anodes can be estimated from descriptors established before cycling, without requiring the target cell to be fabricated or subjected to preliminary cycling. The framework developed in this study is based on experimental data compiled from published studies on aluminum foil anodes and is being supplemented by measurements obtained in this laboratory. The input descriptors comprise alloy composition and purity, thermomechanical processing history, grain size, hardness, foil geometry, prelithiation condition, and the prescribed cycling protocol. The physics-guided additive scaling relations developed in our previous work capture the dominant lifetime trends of this material class but assume mutually independent descriptor contributions, limiting their representation of interactions among mechanical strengthening, lithium utilization, electrode geometry, and current loading. The present framework therefore retains the physically motivated descriptor set while replacing the additive functional form with nonlinear ensemble models. Direct estimation from pre-cycling descriptors is evaluated alongside a two-stage approach in which

initial Coulombic efficiency is first inferred from material and design variables and subsequently supplied to the lifetime model. The analyses indicate that nonlinear ensemble learning improves condition-specific lifetime estimation relative to the additive scaling baseline and that, within the present dataset and validation framework, measured initial Coulombic efficiency provides limited additional information beyond that encoded in the pre-cycling descriptors. Interpretability is pursued in parallel through descriptor attribution and response surface analyses, which characterize the model-derived descriptor hierarchy, nonlinear responses, and coupled effects. These results guide the derivation of compact closed-form expressions with exponents constrained to physically admissible ranges, enabling direct comparison with established scaling behavior. Controlled experiments using fixed-composition Al alloy foils subjected to systematically varied thermomechanical processing are being incorporated to evaluate whether relationships learned from literature-derived data remain valid across independently prepared material conditions. Rather than replacing electrochemical validation, the proposed framework is expected to support the pre-cycling prioritization of Al foil compositions, processing routes, and operating conditions, thereby narrowing the experimental search space for durable aluminum foil anodes and providing a descriptor-based methodology applicable to other metal-foil anode systems.

[에너지1-3 | 09:00]

Microstructural and Compositional Control of NASICON $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ Electrolytes for High-Performance Solid-State Sodium-Metal Batteries: Hyun Su Kim, Chan Jin Park*(전남대학교)

Keywords: NASICON, Sintering additive, Grain boundary, Solid-state battery, Ionic conductivity.

Driven by the growing demand for large-scale energy storage, Li-ion batteries have been favored for their high energy density, yet the geographical concentration of Li resources poses a critical supply-chain bottleneck. Sodium-ion batteries offer an abundant alternative, but hard-carbon anodes limit their attainable energy density. Solid-state sodium metal batteries (SSSMBs) circumvent this limitation, combining intrinsic safety with high theoretical energy density. Among candidate electrolytes, the NASICON-structured $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$(NZSP) stands out for its favorable ionic transport and wide electrochemical window. However, its performance is often limited by high grain-boundary resistance, further compounded by the loss of volatile Na and P species during sintering. These combined challenges collectively restrict the electrochemical performance of SSSMBs. To address these limitations, $Na_4P_2O_7$ (NPO) was employed as a sintering additive during the solid-state synthesis of NZSP. Acting as a multifunctional additive, NPO simultaneously promotes the formation of a grain-boundary glass phase while suppressing Na/P volatilization. This concurrently lowers grain-boundary resistance and mitigates the segregation of non-conductive ZrO_2. XRD and ICP-OES confirmed the tailored composition, while SEM/TEM and solid-state ^{31}P NMR revealed a continuous Na^+ conducting network established by the glass phase. As a result of these microstructural refinements, the NZSP electrolyte with 2 wt% NPO (NZSP-2NPO) achieved a total ionic conductivity of 0.91 mS cm^{-1} at 30 °C, surpassing the pristine NZSP (0.30 mS cm^{-1}). Furthermore, NZSP-2NPO demonstrated superior Na metal compatibility, exhibiting an improved critical current density of 0.6 mA cm^{-2} compared with 0.2 mA cm^{-2} for pristine NZSP, and the Na|NZSP-2NPO|Na symmetric cell sustained stable Na plating/stripping for over 1000 h at 0.1 mA cm^{-2}. When assembled into a solid-state full cell, Na|NZSP-2NPO|$Na_3V_2(PO_4)_3$ exhibited superior rate capability, delivering 111.7 mAh g^{-1} at 0.1 C and 92.7 mAh g^{-1} at 2 C, outperforming the pristine NZSP counterpart (53.8 mAh g^{-1} at 2 C). Moreover, the cell retained 91.1% of its initial capacity with an average Coulombic efficiency of 99.6% after 500 cycles at 1 C. Overall, these results demonstrate that grain-boundary phase modification combined with compositional control provides an effective route toward the practical implementation of high-performance SSSMBs.

[에너지1-4 | 09:15]

Ultrathin lithium-metal reservoirs enabled by microstructure-engineered Mg–Li precursor foils: Hee-Tae Jeong, Jun Oh Jung, Woo Jin Kim*(Hongik Univ.)

Keywords: Magnesium, Lithium, Mg–Li alloy, Anode, Grain refinement, Lithium metal batteries

Li-metal batteries require ultrathin Li reservoirs with precisely controlled thickness, microstructure, and dimensional stability. However, the direct fabrication of freestanding ultrathin Li foils remains challenging because metallic Li is mechanically soft, highly adhesive, susceptible to creep, and dimensionally unstable during processing and handling. Here, we introduce an indirect metallurgical strategy in which the freestanding foil architecture is established prior to Li enrichment. Room-temperature high-ratio differential speed rolling transforms a Mg–Li alloy into an ultrathin, freestanding, ultrafine-grained precursor, thereby avoiding the direct thermomechanical processing of fragile ultrathin Li. Subsequent controlled prelithiation converts the precursor into a Li-rich metallic reservoir while preserving a continuous residual Mg–Li scaffold. This mechanically continuous and electronically conductive framework provides structural support and an integrated current-collecting pathway, enabling Cu-free full-cell configurations. The coexistence of adjacent body-centered-cubic reflections suggests the development of compositionally distinct Li-rich and residual Mg–Li domains associated with a lattice-parameter mismatch. The resulting electrode exhibits sustained cycling under Li-limited conditions and maintains stable electrochemical operation at a low negative-to-positive capacity ratio. Overall, this precursor-to-reservoir strategy provides a microstructure-engineered route for fabricating self-supporting, self-collecting ultrathin Li-metal reservoirs for high-energy-density battery architectures.

[에너지2-1 | 09:35]

Effect of Surface-Grafted LLZTO Fillers on the Electrochemical Performance of Composite Solid Polymer Electrolytes for Solid-State Lithium-Oxygen Batteries: Jun-Hyeong Seo, Chan-Jin Park*(Chonnam National Univ.)

Keywords: Li-O2 battery, Composite solid polymer electrolyte, PEO, LLZTO, Surface grafting

Lithium-oxygen batteries (LOBs) have attracted attention as next-generation energy storage systems owing to their high theoretical energy density. However, liquid electrolyte-based LOBs suffer from electrolyte evaporation, leakage, and safety hazards associated with lithium dendrite growth. Solid polymer electrolytes (SPEs) offer a safer alternative, but their limited room-temperature ionic conductivity necessitates the incorporation of ceramic fillers to form composite solid polymer electrolytes (CSPEs). Surface modification of the fillers has been widely adopted to alleviate filler agglomeration and interfacial resistance. Nevertheless, most studies have compared only filler-free and filler-containing electrolytes, convoluting bulk changes such as suppressed polymer crystallinity with interfacial changes at the filler surface, leaving the intrinsic role of the grafted layer unresolved. In this study, methoxy poly(ethylene glycol) (mPEG) chains were covalently anchored onto $Li_{6.4}La_3Zr_{1.4}Ta_{0.6}O_{12}$ (LLZTO) using a silane coupling agent, and the grafted filler was incorporated into an mPEG/PEO/LiTFSI/succinonitrile matrix at 5 wt%. A bare LLZTO subjected to the same solvent treatment without the coupling agent was prepared as a control, and three free-standing membranes, namely the filler-free SPE, the bare-filler CSPE (b-CSPE), and the grafted-filler CSPE (g-CSPE), were compared at identical matrix composition and filler loading. X-ray photoelectron spectroscopy confirmed the formation of Si-O-Zr/La bonds, verifying covalent grafting. Filler incorporation markedly suppressed matrix crystallization, with the degree of crystallinity decreasing from 27.9% for the SPE to 13.4% and 10.9% for the b-CSPE and g-CSPE, respectively, while the activation energy decreased from 0.17 eV for the SPE to 0.14 eV for both CSPEs. Notably, the two CSPEs exhibited essentially identical glass transition temperatures of -51.9 and -52.8 ^{o}C and comparable ionic conductivities of 0.26 and 0.33 mS cm^{-1} at 30 ^{o}C, yet their electrochemical behavior differed considerably. Lithium symmetric cells with the g-CSPE sustained stable plating and stripping for 1000 h at 0.1 mA cm^{-2} with the lowest overpotential, and for 800 h even at 0.5 mA cm^{-2}. Solid-state Li-O_2 cells cycled at 0.1 mA cm^{-2} with a capacity cut-off of 500 mAh g^{-1} under dry O_2, delivered 269 cycles at 30 ^{o}C with the g-CSPE, outperforming the b-CSPE and SPE, which sustained 226 and 148 cycles. Since the two CSPEs possess comparable bulk transport properties, the difference in cycling stability is likely associated with the modified filler-polymer interface. These results demonstrate that filler surface chemistry plays a decisive role in CSPEs and provide a design guideline for solid-state lithium-oxygen batteries.

[에너지2-2 | 09:50]

Microstructure-engineered Li/$Li_{22}Sn_5$ composite foil anodes for stable high-rate lithium-metal batteries: JunYoung Kim, Hee-Tae Jeong, Woo Jin Kim*(Hongik Univ.)

Keywords: Lithium, anode, Li-Sn intermetallic, grain refinement, high-current-density cycling

Lithium-metal anodes are promising for high-energy-density batteries, but their practical application is hindered by nonuniform Li plating and rapid interfacial degradation, particularly at high current densities. In this study, Li/$Li_{22}Sn_5$ composite foils were fabricated through repeated fold-and-roll processing of Li and Sn foils with a nominal composition of Li–43.6 wt% Sn. This process produced discrete $Li_{22}Sn_5$ intermetallic particles dispersed throughout a continuous Li matrix. Increasing the number of processing repetitions refined the intermetallic particles, decreased their spacing, and shortened the characteristic structural length scale of the Li matrix. The highly refined composite exhibited reduced Li nucleation overpotential, stable plating/stripping polarization in symmetric cells, and low interfacial resistance. It also delivered enhanced cycling stability in $LiFePO_4$ full cells under demanding conditions of 2–3 mAh cm^{-2} and 6 mA cm^{-2}. Thermal treatment at 353 K deteriorated the electrochemical performance despite causing no significant coarsening of the $Li_{22}Sn_5$ particles, indicating that preservation of the deformation-induced Li-matrix structure is essential. These findings demonstrate that the simultaneous control of intermetallic dispersion and Li-matrix refinement is an effective metallurgical approach for stabilizing high-rate Li plating and stripping.

[에너지2-3 | 10:05]

Defect-Engineered Ceria Interlayers for High-Performance Solid Oxide Electrochemical Cells: Hyeongmin Yu(KAIST), Incheol Jeong(KIGAM), Sang Won Lee(KICET), Hansu Chang, Seeun Oh(KAIST), Tae Ho Shin(KICET), Kang Taek Lee*(KAIST)

Keywords: Fuel cells, Electrolysis cells, Hydrogen

Solid oxide electrochemical cells (SOCs) offer a versatile platform for efficient power generation and green hydrogen production. However, their broader deployment is constrained by the demand for high operating temperatures, as performance declines sharply at lower temperatures due to growing polarization and ohmic resistance at the oxygen electrode/electrolyte interface. Here, we present a deliberately engineered, defect-rich ceria thin-film interlayer that accelerates interfacial oxygen exchange kinetics and shortens ion transport pathways, thereby suppressing both polarization and bulk ohmic losses. Density functional theory calculations show that heavy Gd doping weakens cation–oxygen bonding and induces tensile lattice strain, which together lower the oxygen vacancy formation energy and promote surface vacancy clustering. These defect-driven effects substantially improve oxygen storage/release capacity and accelerate oxygen incorporation and evolution kinetics. Incorporated into SOCs, the engineered ceria interlayer delivers outstanding

electrochemical performance, reaching a peak power density of 3.00 W/cm^2 in fuel cell mode and a current density of 1.85 A/cm^2 in electrolysis mode at 700 ºC, considerably outperforming conventional ceria-based interlayers. This work establishes new design principles for interlayer engineering in SOCs and offers a practical route toward next-generation energy conversion technologies.

[에너지2-4 | 10:20]

Understanding the Effects of Sc/Nb Composition on Defect Chemistry and Hydration Behavior in $BaCoO_{3-\delta}$ Oxygen Electrodes: Seeun Oh(KAIST), Incheol Jeong(KIGAM), Jiwon Kim, Dongyeon Kim, Hyeonggeun Kim, Kang Taek Lee*(KAIST)

Keywords: electrochemical cells, solid oxide electrochemical cell, protonic ceramic electrochemical cell, proton, hydrogen

The practical implementation of protonic ceramic electrochemical cells (PCECs) at intermediate temperatures requires oxygen electrodes that combine rapid reaction kinetics with reliable stability under humid operating conditions. Ba-based cobaltite perovskites exhibit excellent electrocatalytic properties owing to their high oxygen-vacancy concentrations; however, an excessive concentration of defects often compromises lattice integrity and accelerates structural degradation. In this work, the oxygen-electrode properties of $BaSc_{0.2-x}Nb_xCo_{0.8}O_{3-\delta}$ (BSNC) are tailored by systematically varying the relative amounts of Sc and Nb at the B-site. Changing the Sc/Nb ratio alters oxygen-vacancy formation, lattice distortion, and metal–oxygen interactions, thereby providing a means of coordinating catalytic performance and structural stability. Structural and spectroscopic analyses indicate that Nb incorporation strengthens the perovskite lattice while suppressing the formation of excessive oxygen vacancies. Accordingly, the BSNC compositions display strongly composition-dependent electrochemical behavior. The composition containing an intermediate amount of Nb achieves the most advantageous balance between electrode activity and operational stability in both fuel-cell and electrolysis modes. This study demonstrates that deliberate control of B-site composition can reconcile the competing requirements of catalytic activity and structural integrity, providing a viable design approach for durable bifunctional oxygen electrodes in reversible PCECs.

[에너지3-1 | 10:40]

Lithiation-Dependent Structural and Electronic Responses of Cation-Substituted Spinel LiMn2O4: Woo Yeong Jeong(Department of Materials Science and Engineering, Dankook University), Yong-Seok Choi*(Department of Materials Science and Engineering, Dankook University, Hydrogen research center, Dankook University)

Keywords: 이차전지, 양극재, LMO, 스피넬

Cation doping changes the response of spinel LiMn2O4 to lithium insertion and extraction, thereby affecting its structural stability and electrochemical characteristics. In this work, the lithiation-dependent effects of Al, Mg, Cu, and Fe substitution were investigated using density functional theory. Energetically favorable Li configurations were identified over a range of compositions, and their relative energies were used to obtain theoretical voltage profiles. Local structural evolution was evaluated from changes in metal-oxygen coordination and octahedral distortion. Electronic density of states and magnetic moments were further examined to trace the redox behavior of Mn and the substituted cations. The results demonstrate that each dopant produces a distinct response to changing Li content. Jahn-Teller-inactive substitution reduces Mn3+-induced distortion, while dopant-specific electronic states regulate charge compensation and voltage. These results clarify how structural and electronic effects develop throughout lithiation and provide practical criteria for designing stable, energy-dense LiMn2O4 cathodes.

[에너지3-2 | 10:55]

Effect of Electrode Materials on Corrosion Behavior and Long-Term Performance of Cellulose-Based Hydrovoltaic Generators: Yu-Na Lee(Korea Institute of Industrial Technology, Hanyang Univ.), So Hyun Baek, Seung-Hwan Lee, Yewon Do, Yongbum Kwon, Kanghyuk Lee, Taeseok Oh, Bum Sung Kim(Korea Institute of Industrial Technology), Yong-Ho Choa*(Hanyang Univ.), Da-Woon Jeong*(Korea Institute of Industrial Technology, Chung-Ang Univ.)

Keywords: Hydrovoltaic generation, Cellulose, Electrode material, Corrosion, Long-term stability

Hydrovoltaic generation is a technology that converts the energy associated with water transport and evaporation into electrical energy; it has attracted considerable attention as a sustainable energy-harvesting approach. Hydrovoltaic generation generally operates in environments containing moisture and ionic electrolytes, where metal electrodes are continuously exposed to the electrolyte and carbon-based conductive layers. However, previous studies have primarily focused on enhancing output performance through the selection of generator materials and moisture transport characteristics, while the influence of electrochemical reactions at the electrode-device interface on measured output and long-term operational stability has been relatively underexplored. In particular, when a metal electrode is in direct contact with a carbon-based conductive layer under wet electrolyte conditions, interfacial processes involving metal oxidation, passive-film formation, and corrosion may occur. These interfacial reactions can affect the measured output and may lead to interfacial degradation and reduced output stability during prolonged operation. In this study, the effect of electrode materials on electrical output and interfacial stability was investigated using a porous hydrovoltaic generator composed of cellulose and carbon black. Under identical generator structure and electrolyte conditions, Cu, Ni, Au, and stainless steel were applied as electrode materials to carbon-coated cellulose generators. Open-circuit voltage, short-circuit current, and time-dependent characteristics were measured for each electrode material to compare initial power generation performance and long-term stability. Power generation characteristics varied

with electrode material, a variation that was found to be related to the electrochemical stability and surface degradation behavior of the metals. Interfacial changes associated with electrode oxidation and corrosion were found to correlate with variations in the measured hydrovoltaic output, suggesting an additional electrochemical contribution from the electrode interface. These results demonstrate that metal electrodes in hydrovoltaic generation are not merely current collectors but important factors influencing the measured output and long-term stability. This study indicates the necessity of considering electrode effects in the output analysis of hydrovoltaic generators and provides a basis for establishing electrode-selection criteria for implementing long-term stable hydrovoltaic systems.

[에너지3-3 | 11:10]

초고농도 KOH의 고속 계면 결정화를 활용한 수동형 직접공기포집: 김동하*(울산과학기술원)

Keywords: CO2 포집, 직접공기포집

수산화칼륨(KOH)은 CO_2 직접공기포집(DAC)의 대표적 액상 흡수제로 점도와 유동성을 고려해 통상 1~3 M의 농도로 사용된다. 그러나 기존 제일원리 분자동역학 연구는 용매화되지 않은 가상의 기상 OH^- 이온이 활성화 장벽 없이 CO_2와 빠르게 반응할 수 있음을 시사해 왔다. 본 연구는 고농도(>9 M) KOH 용액에서 OH^- 이온이 물 분자 하나와만 결합한 $H_3O_2^-$ 종이 형성되고, 이로 인해 기존 포집 이론이 예측하는 수준을 뛰어넘는 빠른 CO_2 포집 속도가 발현됨을 보고한다. 이는 OH^-의 용매화가 약할수록 반응성이 높아진다는 기존 시뮬레이션 결과와 부합하며 고농도에서 KOH 활동도 계수가 급증하는 현상과도 일치한다. 나아가 이러한 고농도 영역에서는 포집된 CO_2가 기-액 계면에서 고체 탄산염으로 곧바로 결정화되는데, 이 또한 중간 농도(1~3 M) 구간에서 확립된 기존 포집 메커니즘과 구별된다. 나아가 이러한 새로운 포집 메커니즘을 연속적·수동적으로 구현하기 위해 모세관 현상을 이용한 공기 포집 장치인 탄산염 결정기(carbonate crystallizer)를 개발하였다. 선형 다공성 심지(wick)가 KOH 용액을 공기 계면으로 끌어올리면 증발에 의해 KOH가 농축되고, 농축된 KOH가 대기 중 CO_2를 빠르게 결정화시킨다. 100여 개의 결정기로 구성된 자동화 시스템은 팬과 펌프 같은 능동 부품이나 별도의 고체 화학 루프 없이도 기존 공기접촉기에 필적하는 포집 속도를 25일간 안정적으로 유지하였다.

[에너지4-1 | 11:25]

CO_2RR 향상을 위한 Cu-Si계 고엔트로피 합금 촉매의 $Cu^0/Cu^{\delta+}$ CO_2 반응 전후 변화: 이유진(아주대학교(에너지시스템학과)), 이한성(Yale University(Department of Materials Science), 아주대학교(첨단신소재공학과)), 안병민*(아주대학교(에너지시스템학과), 아주대학교(첨단신소재공학과))

Keywords: Cu–Si-based high-entropy alloys, CO_2 reduction reaction catalyst, Cu^0/Cu^+ heterosite, X-ray photoelectron spectroscopy

전기화학적 이산화탄소 환원 반응(CO_2RR)은 CO_2를 CO, 포름산, 메탄올, 에틸렌, 에탄 등 유용한 연료 및 화학물질로 전환하는 탄소자원화 기술이다. 그 중에서도 Cu는 CO_2RR 촉매 중에서도 CO_2를 C_1 생성물뿐 아니라 C–C coupling을 통해 에틸렌, 에탄과 같은 C_2+ 생성물로 전환할 수 있는 금속 촉매로 알려져 있다. 일반적으로 금속성 Cu^0는 *CO 중간체의 결합 및 C–C 결합 형성에 유리한 전자 구조를 제공하여 다탄소 생성물 형성을 촉진한다. 반면, 표면에 존재하는 Cu–O 유사 종 또는 전기화학적으로 형성되는 부분적인 산화 상태는 *CO의 흡착 에너지를 변화시키고 표면 체류 시간을 조절함으로써 C–C coupling 확률에 영향을 줄 수 있는 것으로 보고되어 있다. 그러나 실제 전기화학 반응 조건에서는 Cu 표면이 전위, pH, 전해질 조성 및 반응 중간체에 의해 지속적으로 재구성되기 때문에, 촉매 수명 저하로 이어질 수 있는 요인으로 작용할 수 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 단일 금속 기반 촉매 대신, 다원소 기반 합금 시스템 중 고엔트로피 합금(high-entropy alloys, HEAs)을 CO_2RR 촉매 플랫폼으로 활용하는 연구도 보고 되어왔다. HEAs는 구성 원소의 혼합 분포로 인해, 원자 수준에서 다양한 국소 배위 환경과 넓은 전자구조 분포를 형성한다. 이러한 전자 특성은, 전자 밀도 조절 및 흡착 에너지 미세 조정을 통해 반응 속도 조절에 도움이 될 수 있다. 고엔트로피 합금 촉매에 함께 도입한 V, Mn, Co, Sn의 원소는 각각 서로 다른 전자 구조와 산소 친화도, 그리고 CO_2RR 중간체에 대한 상호작용 특성을 통해 Cu 기반 활성 사이트의 국소 환경을 조절하는 역할을 한다. V와 Mn은 상대적으로 높은 산소 친화도를 통해 표면 산소 관련 종의 형성 및 전자 재분포에 영향을 줄 수 있으며, Co는 전자 전달 특성과 *CO 관련 중간체의 결합 강도 조절에 기여할 수 있다. Sn은 CO_2RR에서 *COOH 형성 및 C_1 경로 선택성에 영향을 주는 것으로 알려져 있으며, Cu 기반 시스템에서 C–C coupling과의 경쟁 반응을 조절하는 역할을 할 수 있다. 이러한 원소들의 조합은 Cu 단독 시스템에서 나타나는 단독 표면 상태를 넘어, 넓은 범위의 국소 전자 구조와 흡착 에너지 분포를 형성하는 데 기여한다. 특히 본 연구에서 주목하는 Si는 산소 친화도가 매우 높은 원소로, 표면에서 Si–O 결합 또는 SiO_x 유사 종을 형성할 가능성이 높으며, 인접한 Cu 원자의 전자 밀도 분포 및 국소적인 결합 환경에도 영향을 미칠 수 있다. 즉, Si의 도입은 Cu 표면에서의 전자 구조와 흡착 특성을 조절하여 CO_2RR 활성 사이트의 안정성과 반응 경로 선택성에 간접적인 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 Cu–Si 조성 비율이 서로 다른 $Cu_xSi_yV_{24}Mn_{18}Co_6Sn_6$ 고엔트로피 합금을 설계 및 합성하고, Si 함량 변화가 합금의 상 형성, 미세조직, 분말 특성 및 CO_2 분위기에서의 전기화학적 거동에 미치는 영향을 연구하였다. 특히 CO_2RR 조건에서의 전기화학적 반응 전후 표면 Cu 기반 화학 상태 변화를 XPS 및 전기화학 분석을 통해 비교함으로써, Cu 및 Si 도입이 HEAs의 활성 사이트 전자 구조 및 반응 선택성에 미치는 역할을 분석하였다. 실험 조성은 Cu와 Si 함량을 Cu24–Si0, Cu24–Si6, Cu48–Si6 및 Cu48–Si12의 네 가지 조성으로 설계하여, 고에너지 볼 밀링을 통해 제조하였다. 제조된 분말은 IPA와 증류수 혼합 용매에 Nafion 바인더와 함께 초음파 분산을 통해 촉매 잉크로 제조하였다. 제조된 잉크는 에어스프레이 방식으로 탄소 시트에 균일하게 도포하여 작업전극을 제작하였다. 제조된 분말의 결정상은 X선 회절 분석을 통해 확인하였으며, 주사전자현미경 및 비표면적 분석 장치를 통해 분말의 크기, 형상, 미세조직, 비표면적 및 기공 특성을 평가하였다. 또한, 선형 주사 전위법과 전기화학 임피던스 분광법을 통해 각각 CO_2 환원 전류 밀도와 전하 전달 저항을 분석하였다. 반응 전후 촉매의 표면 화학 상태는 X선 광전자분광법으로 비교하였으며, Cu 2p와 Cu LMM Auger 스펙트럼을 함께 분석하여 Cu^0, Cu^+ 및

Cu^{2+} 성분의 상대 분율을 추정하였다. 분말의 상 분석 결과, 모든 조성에서 43 ° 부근에서 Cu 기반의 FCC 상이 주요 상으로 나타났으며, Cu48-Si6 조성을 제외한 세 조성에서는 소량의 V-rich 상이 함께 관찰되었다. 표면 화학 상태 분석 결과, 모든 조성이 주로 환원 상태(Cu^0/Cu^+)를 유지하고 소량의 Cu^{2+}를 포함하였으며, O 1s에서 Cu^+–O 및 Si–O–Cu 결합에 해당하는 C–O(531.5 eV) 결합이 우세하게 나타나 Si 도입 시 Si–O–Cu 결합 상태가 형성된 것으로 판단되었다. Si를 포함하는 조성은 반응 이후 공통적으로 Cu^+가 우세 표면 상태로 나타났던 반면, Si가 없는 Cu24-Si0는 상대적으로 낮은 Cu^+ 분율을 유지해, Cu 기반의 고엔트로피 합금에 Si 도입 시 과산화를 억제하는 경향성을 보였다. 주사전자현미경 분석 결과, 모든 시료는 전반적으로 불규칙한 입자 응집 형태로 관찰되었다. 비표면적 분석에서는, 기계적 합금화로 형성된 불규칙 형상의 분말은 Type II/III 거동의 mesopore 구조를 가졌다. 선택적 CO_2 전류 밀도 및 전하 전달 저항 분석에서, Cu24-Si0 및 Cu24-Si6은 낮은 환원 전류 밀도를 보인 반면, Cu48-Si6은 가장 큰 총 전류 밀도를 보였으며, Cu48-Si12는 −0.8 V(vs. RHE)에서 가장 큰 선택적 CO_2 전류 밀도 및 낮은 전하 전달 저항을 나타내어, 가장 CO_2 활성화와 전하 전달을 촉진이 강하게 나타났다. 본 연구에서는 Cu–Si 고엔트로피 합금에서 Si–O–Cu 결합에 의한 과산화 억제는 Cu^0/Cu^+ 계면을 보존하는 핵심 기제로 작용하였고, 그 효과가 최적화된 Cu48-Si12에서 CO_2 선택적 전류와 낮은 전하 전달 저항이 함께 나타났다. 이는 개별 원소의 활성이 아니라 조성 설계를 통한 산화 상태 제어가 CO_2RR 활성 부위를 좌우함을 시사하며, 향후 C_2+ 생성물 분석 연구에 대한 기초 연구로써 활용될 예정이다.

[에너지4-2 | 11:40]

Vacancy-Driven 2H-to-1T' Phase Engineering in MoTex/Ni(OH)2 Heterostructures for Bifunctional Hybrid Water-Hydrazine Electrolysis: Seungjin Baek, Won-Kyu Lee*(홍익대학교)

Keywords: $MoTe_2$, $Ni(OH)_2$, Phase Boundary Engineering, Hydrazine Oxidation Reaction, Hydrogen Evolution Reaction

The hybrid water-hydrazine electrolysis, coupling the hydrogen evolution reaction (HER) with the hydrazine oxidation reaction (HzOR), offers a promising route to reduce the energy consumption of green hydrogen production. However, developing electrocatalysts with optimized interfacial structures for both high activity and durability remains a key challenge. Here, we report a MoTex/$Ni(OH)_2$ heterostructured electrocatalyst synthesized by applying electrochemical Te dissolution to mechanically exfoliated 2H-$MoTe_2$ to generate atomic Te vacancies. The resulting lattice distortion triggers a localized phase transition from the semiconducting 2H phase to the metallic 1T' phase within the MoTex matrix, generating a phase boundary between the two electronic structures that induces charge accumulation and accelerates electron transfer kinetics for the HER. Subsequently, immersion in a nickel hydrate solution induces spontaneous nucleation and growth of $Ni(OH)_2$ from these vacancy sites, completing the heterostructure; the $Ni(OH)_2$ domain acts as an electron sink that tunes the local electronic structure and facilitates H desorption. In-situ Raman spectroscopy captures the dynamic structural evolution during the reaction, providing spectroscopic evidence of stabilized intermediates and an accelerated N–N cleavage pathway during the HzOR. Consequently, the MoTex/$Ni(OH)_2$ catalyst exhibits exceptional bifunctional activity, requiring potentials of 8mV and -67mV vs. RHE for HzOR and HER, respectively, at 10 mA/cm^2, demonstrating that phase-boundary and electronic-structure engineering via electrochemical reshaping offers a scalable strategy for earth-abundant, high-performance electrocatalysts in next-generation clean energy technologies.

[에너지4-3 | 11:55]

Plasma-Induced Amorphous–Crystalline Heterophase Formation for Enhanced Electrochemical Ethanol Oxidation on $PtTe_2$: jihun Yim, Won-Kyu Lee*(hongik Univ.)

Keywords: $PtTe_2$, Ethanol oxidation reaction, TMDC, O_2 plasma, amorphous

Developing highly active, CO-tolerant, and stable electrocatalysts for the ethanol oxidation reaction (EOR) is important for direct ethanol fuel cells, but conventional Pt-based catalysts remain limited by an overarching problem of low selectivity toward the C1 pathway, which restricts the full oxidation process through complete 12-electron transfer. Here, we report a simple strategy using a single-step O_2 plasma treatment on multilayer $PtTe_2$ to induce local surface amorphization and form amorphous-crystalline interfaces. The resulting catalysts exhibit lower onset potentials, the areal activity of 30.27 mA\cm^2, the ratio of forward to backward peak current densities of ~7.38, and 28.64% current retention after 1000 seconds, representing a sixfold increase in CO tolerance and a sevenfold enhancement in stability compared to pristine Pt. Atomic force microscopy (AFM), transmission electron microscopy (TEM), ultraviolet photoelectron spectroscopy (UPS), and Raman spectroscopy verify that the plasma treatment induces local amorphization on the basal plane of the layered chalcogenides. The spatial distributions of the resulting interfacial boundaries increased the global work function of the reconstructed surfaces, facilitating surface oxidative reactions through continuous electron extraction. Furthermore, X-ray absorption spectroscopy (XAS) analysis reveals an elevated oxidation state of the partially amorphized $PtTe_2$ and local coordination distortions that favor EOR, demonstrating that a multiscale surface reconstruction has occurred. In situ Raman spectroscopy, combined with NMR analysis, detects the key reaction intermediates and reveals that the engineered amorphous-crystalline interface exhibits high selectivity toward the C1 pathway

여성수상자 초청강연
Room 2층 206호/8호, 10월 28일

[여성1-1 | 13:30] 초청강연

Interfacial Engineering and thermally assisted transfer printing for High-Performance, High-Definition Intrinsically Stretchable QLEDs: Moon Kee Choi*(울산과학기술원)

Keywords: intrinsically stretchable, quantum dot composite, quantum dot light-emitting diodes,

Future displays for augmented and virtual reality, wearable electronics, electronic skin, and soft robotics require high pixel density, high efficiency, and mechanical stretchability. High resolution is necessary for rendering fine images at short viewing distances, while high efficiency minimizes power consumption and heat generation in densely integrated systems; stretchability further enables displays to conform to curved, moving, and dynamically deformable surfaces. However, simultaneously achieving these properties remains challenging because soft elastomeric matrices introduce insulating barriers that impede charge injection and transport, while their deformation complicates high-resolution pixel patterning. Here, we present complementary nanocomposite and interface engineering strategies for charge-transport-optimized quantum-dot emissive materials. The internal structure of quantum-dot–polymer nanocomposites was controlled to maintain stable interparticle spacing under strain and establish preferential charge-transport pathways, while selective interfacial surface exchange using polar short-chain ligands created a nanoscale charge-injection region without compromising bulk mechanical compliance. These engineered nanocomposites were extended to intrinsically stretchable quantum-dot light-emitting diodes and combined with thermally assisted transfer patterning to produce high-definition pixel arrays.

[여성1-2 | 13:55] 초청강연

경계를 넘는 연구, 계획하지 않은 커리어: 김미소*(한국과학기술원)

재료공학을 전공한 이후 기능성 재료와 에너지 하베스팅에서 출발하여, 자가발전 센서와 3D 프린팅 기반 기능성 소재·구조, 최근에는 기계·음향 메타물질에 이르기까지 연구의 범위를 넓혀 왔습니다. 서로 다른 주제처럼 보이지만, 재료와 구조를 새롭게 설계하여 새로운 기능과 성능을 구현한다는 관심은 그 과정에서 계속 이어져 왔습니다. 그러나 지금의 연구와 커리어는 처음부터 계획된 경로를 따라 만들어졌다기보다, 여러 번의 고민과 방향 전환, 그리고 그때마다 내린 작은 선택들이 이어진 결과에 가깝습니다. 무엇을 좋아하고 잘할 수 있는지 고민했던 시기도 있었고, 이미 걸어온 길에서 다시 방향을 바꾸기도 했으며, 예상하지 않았던 선택이 새로운 연구로 이어지기도 했습니다. 이번 강연에서는 현재 진행하고 있는 연구와 그 확장의 과정을 간략히 소개하고, 연구가 나와 맞는지 고민했던 시기, 이미 시작한 길에서 다시 방향을 바꾸었던 경험, 그리고 연구자가 된 지금도 좋은 연구 앞에서 흔들리면서 또다시 새로운 연구를 시작하는 일상을 함께 나누고자 합니다. 이를 통해 진로와 연구에 대한 답을 일찍 정하지 못하더라도, 각자의 방식으로 다음 선택을 이어가며 자신만의 연구와 커리어를 만들어갈 수 있다는 이야기를 공유하고자 합니다.

[여성1-3 | 14:20]

Laser powder bed fusion **공정으로 제조한 A20X 합금의 직접 시효에 따른 미세조직 및 물성변화** : 한규미(포항공과대학교), 정영훈(국립경상대학교), 백민재, 조용희, 박정민, 이동준(한국재료연구원), 김정기*(국립경상대학교), 김형섭*(포항공과대학교)

Keywords: Additive manufacturing, Direct aging, Aluminum alloys, Precipitate, Mechanical properties

알루미늄 기반 적층제조는 항공우주용 경량 부품 제조에 핵심적인 기술임에도 불구하고 용융-응고 중 발생하는 응고 균열과 결정립 조대화에 의해 우수한 물성을 획득하기 어려운 문제점을 가지고 있다. 상기 문제를 해결하기 위해 최근 Ti boride를 첨가해 응고 균열을 방지하고 균일한 등축정 조직을 갖는 고강도 알루미늄 합금인 A20X가 개발되었다. 본 연구에서는 Laser Powder Bed Fusion (LPBF) 공정으로 제조된 A20X 알루미늄 합금에 용체화 처리를 생략한 직접 시효(Direct Aging, DA)를 적용하여 미세조직 및 기계적 특성 변화를 분석하였다. As-Built (AB) 미세조직에서는 Ti 및 Cu가 농축된 셀 경계가 관찰되었으며, 이러한 화학적 불균질성은 DA 과정에서 나노 크기 석출물의 빠른 형성을 촉진하였다. 석출은 셀 경계에서 우선적으로 시작되어 기지 내부로 진행되었으며, 시효 시간이 증가함에 따라 Ω 및 θ′ 상의 크기와 분율이 증가하였다. DA 조건은AB 조건 대비 인장강도가 소폭 향상되었으나, 과도한 시효 시간에서는 셀 경계를 따라 형성된 석출물의 조대화로 인해 강도가 감소하였다. 또한 시효 처리에 따라 응력–변형률 곡선에서 serrated flow의 발생 빈도가 감소하였으며, 이는 Dynamic Strain Aging (DSA)의 완화와 함께 완전 시효 조건에서 연성이 회복되는 데 기여하였다. 본 연구는 LPBF A20X 합금의 미세조직과 기계적 특성을 효과적으로 제어하기 위한 간소화된 후열처리 공정으로서 직접 시효의 적용 가능성을 제시한다.

[여성1-4 | 14:35]

원전 내부구조물 오스테나이트 스테인리스강 용접부의 열시효 거동 분석 및 활성화에너지 도출: 김유진(충남대학교), 김지수(한국원자력연구원), 서주원(서울대학교), 김종민(한국원자력연구원), 이수열(충남대학교), 홍석민*(한국원자력연구원)

Keywords: 오스테나이트계 스테인리스강 용접부, 원자로 내부구조물, 열취화, 델타 페라이트, 스피노달 분해, 나노압입시험

오스테나이트계 스테인리스강은 우수한 내식성, 강도 및 연성을 바탕으로 원자로 내부구조물(Reactor Vessel Internals, RVI)의 주요 구조재료로 널리 사용되고 있다. 그러나 원자로 내부구조물은 장기간 고온의 운전환경에 노출되기 때문에 재료의 미세조직

변화와 이에 따른 열취화가 발생할 수 있다. 특히 주조 스테인리스강(Cast Austenitic Stainless Steel, CASS) 및 오스테나이트계 스테인리스강 용접부(Austenitic Stainless Steel Weld, ASSW)에 존재하는 델타 페라이트는 원전 운전온도에서 장시간 노출될 경우 스피노달 분해(spinodal decomposition) 및 석출상 형성에 의해 경화되며, 이는 재료의 인성 저하를 유발할 수 있다. 따라서 원자로 내부구조물의 장기 건전성 평가를 위해 ASSW의 열취화에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화에 대한 정량적 평가가 필요하다. 본 연구에서는 실제 원자로 내부구조물의 용접절차사양을 기반으로 가스 텅스텐 아크 용접(Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)을 적용하여 ASSW 시험편을 제작하고, 340, 400 및 450 ºC에서 최대 15, 000시간까지 열적 시효를 수행하였다. 미세조직 분석 결과, 오스테나이트 기지 내에 약 7%의 델타 페라이트가 2 μm 이하 두께의 미세한 수지상 형태로 분포하였다. 열적 시효에 따라 델타 페라이트 내부에서 스피노달 분해에 의한 Cr-rich α′상이 형성되었으며, 시효시간이 증가함에 따라 Cr 농도가 증가하였다. 또한 340 ºC에서 14, 000시간 시효 후 Ni-rich 클러스터가 관찰된 반면, 400 및 450 ºC에서는 FCC 구조의 G-phase가 확인되었다. 한편, 모든 시효 조건에서 Cr 탄화물의 석출은 관찰되지 않아 340–450 ºC 범위에서 유사한 열취화 기구가 작용하는 것으로 판단된다. 열적 시효에 따른 기계적 특성 변화를 평가하기 위해 인장시험, 충격시험 및 나노압입시험을 수행하였다. 시효시간이 증가함에 따라 인장강도는 소폭 증가하고 연신율은 감소하였으며, 충격인성은 현저하게 감소하였다. 나노압입시험에서는 열취화에 따른 델타 페라이트의 경도 증가가 확인되었으며, 오스테나이트와 델타 페라이트의 경도비를 이용하여 시효에 따른 경도 변화를 정규화하였다. 이를 바탕으로 Cahn–Hilliard 모델을 적용하여 열취화 활성화에너지를 평가한 결과, 340–400 ºC 범위에서 약 100 kJ/mol, 340–450 ºC 범위에서 약 77 kJ/mol로 산정되었다. 이상의 결과를 통해 ASSW의 열적 시효에 따른 델타 페라이트의 미세조직 변화와 기계적 특성 저하 간의 상관관계를 분석하였으며, 나노압입시험을 활용한 원자로 내부구조물 용접부의 장기 열취화 평가 가능성을 확인하였다.

[여성2-1 | 15:00]

Inorganic Halide Perovskite Quantum Dots for Memristors: 조효민*(서울대학교)

Keywords:

할라이드 페로브스카이트는 이온 이동이 용이하고 다양한 전기적 특성을 나타내어 멤리스터의 활성층 소재로 연구되고 있다. 특히 유무기 하이브리드 페로브스카이트의 안정성 문제를 개선하기 위한 전무기 할라이드 페로브스카이트가 활발히 연구되고 있으며, 전무기 할라이드 페로브스카이트 양자점은 양자 구속 효과와 높은 표면적 대 부피 비율 등 벌크 소재와 구별되는 특성을 나타낸다. 본 강연에서는 전무기 할라이드 페로브스카이트 양자점의 구조와 주요 특성을 살펴보고, 대표적인 합성 방법을 소개한다. 이어서 양자점 기반 멤리스터에서 나타나는 주요 저항 변화 메커니즘을 살펴보고, 비휘발성 메모리와 뉴로모픽 소자로의 응용 사례를 소개한다. 또한 전무기 할라이드 페로브스카이트 양자점 기반 멤리스터의 현재 과제와 향후 연구 방향에 대해 논의한다. 마지막으로 무연 전무기 할라이드 페로브스카이트 양자점을 멤리스터의 활성층으로 적용한 연구를 소개한다. 양자점의 구조 및 물성 분석과 멤리스터 소자의 저항 변화 특성을 중심으로 연구 결과를 논의한다.

[여성2-2 | 15:15]

확신이 없던 학부생이 어떻게 대학원생이 되었나: 강태연, 최현주*(국민대학교)

Keywords: 진로 탐색, 자성재료, 미세조직

저는 어릴 때부터 뚜렷하게 좋아하는 것이나 하고 싶은 일이 많지 않은 학생이었습니다. 대학 진학 당시에도 별다른 고민 없이 성적이 좋았던 물리학과를 선택했지만, 학과 생활을 이어가면서 물리학이 제가 생각했던 방향과는 맞지 않는다는 것을 점차 깨닫게 되었습니다. 이 시기를 계기로 저는 처음으로 제가 무엇을 좋아하고 어떤 것을 하고 싶은지에 대해 진지하게 고민하기 시작했습니다. 그러던 중 신소재공학부 수업을 들으며 흥미를 느껴 신소재공학과로 전과를 결심하게 되었습니다. 이후 최현주 교수님의 강의를 들으며 금속 소재에 흥미를 느꼈고, 심도 깊은 공부를 하고 싶어 학부연구생으로 연구실 생활을 시작하게 되었습니다. 학부연구생 과정을 거치며, 단순히 결과를 얻는 것보다 그 결과가 나타난 원인을 찾아가는 과정 자체를 제가 좋아한다는 것을 깨닫게 되었고, 이는 물리학에서 쌓아온 기초와 신소재공학을 함께 살릴 수 있는 자성재료 연구로 자연스럽게 이어졌습니다. 자성재료는 개인적으로 매우 까다로운 소재라고 생각합니다. 눈에 보이지 않는 자성 특성을 미세조직을 통해 설명하고 이해할 수 있다는 점이 큰 흥미로 다가왔고, 이는 대학원 진학을 선택하게 된 계기가 되었습니다. 본 발표에서는 뚜렷한 방향 없이 시작된 저의 진로 탐색이 여러 계기와 선택을 거쳐 현재의 연구 분야로 이어지게 된 과정을 담백하게 공유하고자 합니다. 이러한 평범한 이야기를 통해, 비슷한 고민을 거쳐온 동료 연구자들과 소박한 공감대를 형성하고, 잠시나마 서로의 진로 고민을 환기할 수 있는 시간이 되기를 기대합니다.

[여성2-3 | 15:30]

잘못된 실험은 없다 - 수행원에서 연구자로: 이경환, 최현주*(국민대학교)

Keywords: 학부연구생, 대학원 진학, 성장

연구실에서의 성장은 완벽한 결과를 얻는 순간이 아니라, 예상하지 못한 결과 앞에서 그 이유를 이해하는 순간에 이루어진다. 처음 연구를 시작하는 사람에게는 주어진 실험을 정확히 수행하는 것이 가장 중요한 과제로 여겨지기 쉽지만, 연구자로서의 태도는 계획대로 되지 않은 결과를 마주했을 때 비로소 드러난다. 학부연구생으로 연구실 생활을 시작한 1년 반 동안, 정해진 조성과 조건으로 시편을 제작하고 경도를 측정하는 반복적인 실험을 수행하며 연구의 기본적인 흐름을 익혔다. 이 과정에서 스스로 질문을 던지기보다는 주어진 역할을 성실히 수행하는 데 집중하였다. 변화는 지난해 7월, 개인 연구주제로 IN939/Y2O3 나노입자 코팅 분말 제조를 맡으며 시작되었다. 기존에 다루던 Al-Zn-Mg-Cu계 알루미늄 합금을 벗어나 니켈계 초내열합금을, 벌크재가 아닌

분말 소재를 처음 접하며 연구의 폭을 넓힐 수 있었다. 분말 소재를 다루던 연구실 선배들의 어려움을 지켜보며, 낯선 영역에 대한 부담도 함께 느꼈다. 그러나 예상치 못한 전환점은 새로운 연구가 아니라, 오히려 익숙했던 본래 과제인 7xxx계 알루미늄 합금에서 찾아왔다. EBSD 분석에서 그동안 본 적 없는 낯선 형태의 mapping 결과를 얻었고, 처음에는 실험 자체의 오류로 판단하였다. 문헌 조사 결과, 이는 Zr 첨가에 따른 재결정 억제로 나타난 duplex 구조로 확인되었다. 이 경험은 잘못된 실험은 없으며 모든 결과에는 그 나름의 이유가 있다는 사실을 깨닫게 하였고, 그 이유를 더 깊이 탐구하고 싶다는 마음은 자연스럽게 대학원 진학으로 이어졌다. 본 발표에서는 주어진 실험을 수행하던 학부연구생에서, 낯선 결과 앞에 스스로 질문하고 답을 찾아 나서는 연구자로 성장해온 과정을 소개한다. 이를 통해 예상치 못한 결과가 실패가 아니라 연구자로 성장하는 계기가 될 수 있음을 공유하고자 한다.

[여성2-4 | 15:45]

Bunsenite (NiO)의 환원 및 환원제에 따른 Ni 입자 성장 거동: 조모현, 김세호*(고려대학교)

Keywords: Bunsenite, 폴리에틸렌, 환원 메커니즘, Ni 입자 성장, 탄소 침적

폐플라스틱을 활용한 환원 공정은 저탄소 금속 회수 및 자원 순환을 위한 지속가능한 기술로 주목받고 있다. 그러나 폐플라스틱 환원 과정에서의 환원 경로와 탄소 거동, 그리고 환원제 종류에 따른 금속 입자의 형성 및 성장 메커니즘에 대한 이해는 아직 충분하지 않다. 특히 환원제의 형태와 반응 특성에 따라 최종 금속 입자의 크기가 달라질 수 있으나, 이에 대한 구체적인 원인은 명확히 규명되지 않았다. 본 연구에서는 폴리에틸렌(PE)을 환원제로 활용하여 Bunsenite(NiO)의 환원 메커니즘과 탄소 거동을 분석하고, 고체 탄소계 환원제인 graphite와 비교하여 환원제 종류에 따른 Ni 입자 크기 차이의 발생 원인을 규명하고자 하였다. PE는 열분해 과정에서 H_2 및 CO 등의 환원성 가스를 생성하는 반면, graphite는 Bunsenite와의 고체–고체 반응을 통해 환원에 참여하므로 두 환원제는 서로 다른 환원 경로를 나타낸다. 이러한 차이가 Ni의 생성 및 성장 거동과 탄소 침적에 미치는 영향을 분석하였다. Bunsenite–PE 및 Bunsenite–graphite 펠렛을 제조하여 Ar 분위기에서 700 ºC, 2시간 열처리하였으며, SEM/EDS를 통해 Ni 입자의 형상, 크기 및 탄소 분포를 분석하였다. 또한 TEM을 이용하여 Ni 입자 표면의 carbon shell과 Ni–C 계면 특성을 관찰하였다. 본 연구를 통해 환원제 종류에 따른 Ni 입자 크기 차이와 탄소 거동 간의 상관관계를 규명하고, 폐플라스틱을 활용한 지속가능한 금속 회수 공정의 설계에 대한 기초적인 이해를 제공하고자 한다.

[여성2-5 | 16:00]

결과 전달에서 결과 해석으로: 학부연구생 경험을 통한 연구 인식의 변화: 한선구, 최현주*(국민대학교)

Keywords: 학부연구생, 연구 입문, 주체성, 진로, 연구자 성장

학부 교육과 연구는 문제를 해결하는 구조가 서로 다르다. 학부 교육에서는 학습 범위와 정답이 외부에서 제시되며, 성취는 자신의 풀이가 제시된 정답과 일치하는지를 통해 확인된다. 학부 과정까지의 학습은 이러한 구조에 적합하였으며, 학습에서 느끼는 만족도 역시 정답을 확인하는 과정에 기반하고 있었다. 학부연구생으로 연구실에 참여하여 Fe계 연자성 합금의 특성 평가를 담당하였다. 연구 목표와 분석 방법은 명확하게 제시되었으나, 초기의 역할은 측정을 수행하고 그 결과를 정리하여 전달하는 데 집중되어 있었다. 결과의 산출에는 참여했지만 그 결과가 무엇을 의미하는지 판단하는 과정에는 충분히 참여하지 못했다. 돌이켜보면 이 시기에 학부 과정에서와 같은 성취감을 느끼기 어려웠던 이유는 연구에 대한 능력이나 흥미보다 제한된 참여 범위와 관련되어 있었다. 이 경험에서 연구의 불확실성을 본격적으로 체감한 지점은 측정 자체보다 결과를 해석하는 과정이었다. 이후 개별 측정 결과를 전달하는 수준에서 벗어나 서로 다른 분석 결과를 하나의 설명으로 연결하는 작업을 수행하게 되었다. 구조적·열적·자기적 특성 분석 결과를 함께 검토하여 일관된 흐름으로 정리하고, 이를 학회 초록과 발표 자료로 작성하는 과정에서 수행한 측정 결과에 대한 설명 책임이 처음으로 발생하였다. 이를 통해 결과를 전달하는 것과 결과의 의미를 설명하는 것은 서로 다른 수준의 작업임을 알게 되었다. 동시에 여러 결과 사이의 관계를 독자적으로 해석하고 설명하기에는 아직 지식과 경험이 충분하지 않다는 점도 확인하였다. 대학원 진학은 이러한 인식에 근거한 결정이었다. 측정과 전달에 한정된 역할에서 벗어나 데이터를 독자적으로 해석하고, 그 해석을 후속 실험을 통해 검증할 수 있는 연구 수행 능력을 갖추는 것을 목표로 현재 학부연구생 시기에 시작한 연구를 확장하여 수행하고 있다. 본 발표에서는 정답이 제시되는 학습 구조에 적응해 온 학생이 정답이 미리 주어지지 않는 연구를 처음 접하고, 결과의 전달에서 해석으로 역할을 확장하면서 경험한 연구에 대한 인식의 변화를 공유하고자 한다.

[여성2-6 | 16:15]

DED 공정조건 고정 조합실험을 통한 학습 데이터 구축 및 AI 합금 조성 최적화: 김도원, 전서연, 안성빈, 송용욱, 박수원, 최현주*(국민대학교)

Keywords: 알루미늄, 적층제조, 강도, 전도도

우주항공소재, 모빌리티소재 특히, 전기차 배터리 하우징과 전력반도체 방열부품은 구조 하중을 견디는 강도와 발열을 빠르게 내보내는 전기전도도를 동시에 요구한다. 그러나 두 물성은 한쪽을 높이면 다른 쪽이 저하되는 트레이드 오프 특성이다. 탐색하고자 하는 조성을 그리드로 탐색하여도 조성 조합이 수천가지를 넘어, 전 조성 그리드를 실험으로 확인하는 것은 불가능하다. 이에 문헌 데이터를 수집하여 기계학습 모델을 학습시키고, 두 물성을 동시에 향상시키는 조성을 탐색하고자 하였다. 그러나 수집된 문헌 데이터는 연구마다 공정조건이 분산되어있어, 조성과 물성 사이의 상관성이 드러나지 않았다. 실제로 조성 및 공정변수와 물성 간 피어슨 상관계수는 대부분 0.5를 넘지 못하였다. 따라서 단일 DED 장비로 레이저 파워 550 W, 스캔 속도 1,000 mm/min에 공정조건을 고정하고, 적층이 가능한 조성 범위 안에서 조성만 변화시키는 조합실험을 수행하였다. 48개 시편의 조성을 OES로 실측하고 비커스 경도와 전기전도도를 측정하여, 모델 학습에 적합한 인하우스 데이터셋을 구축하였다. 이 데이터로 학습한 모델이 추천한 조성을 실제로 적층하여 검증하였다. 경도 예측에는 인공신경망(ANN)을, 전기전도도 예측에는 그래디언트 부스팅 회귀(GBR)를 적용하여 각각

결정계수 0.91과 0.94를 얻었으며, 추천 조성인 Si 3.5 wt.%·Cu 1.5 wt.%의 예측값과 측정값 편차는 5% 이내였다. 한편 공과대학 연구실은 일반적으로 여성 연구자가 소수인 환경이다. 반면 본 연구실은 지도교수님을 비롯한 구성원 다수가 여성이며 남성이 소수를 이루고 있어, 통상적인 공학 연구실과는 구성이 반대에 가깝다. 본 발표에서는 앞의 연구 내용과 함께, 이러한 환경에서 연구를 수행하며 의사소통과 협업, 연구실 적응 과정에서 경험한 바를 공유하고자 한다. 아울러 구성원 분포가 연구실 문화와 신입 연구자의 정착에 어떻게 작용하는지도 함께 발표하고자 한다.

미래 원자력 재료 심포지엄
Room 2층 209/11호, 10월 28일

[미래원자력1-1 | 09:00] 초청강연

대한민국 사고저항성핵연료 피복관 상용화 기술 개발 현황: 임광영*(한전원자력연료)

Keywords: 사고저항성핵연료, 지르코늄, 핵연료, 피복관, 코팅,

사고저항성핵연료는 원전의 안전성을 향상시키고, 원전 사고 시 대처 시간을 확장 할 수 있는 미래핵연료 기술이다. 대한민국의 사고저항성핵연료 피복관은 국내 유일한 핵연료 제조 기업인 한전원자력연료(주)에서 상용화 기술개발을 진행중이며, 국내고유 소재인 HANA 소재에 Arc ion plating 공정으로 Cr 코팅한 소재로서 기존 지르코늄 합금 대비 고온산화성능이 향상되어 원전 사고 발생 시 중대사고 확장을 지연을 통해 추가적인 사고 대처 시간을 확보 할 수 있다. 이러한 사고저항성핵연료 피복관의 사고저항성능을 통한 원전의 안전여유도 확장으로 경제적이고 효율적인 원전운영과 K-taxonomy에 따른 원전의 녹색 에너지로서 활용이 가능하다. 2031년 상용화를 목표로 개발 중인 사고저항성핵연료는 현재 상용로 시범연료봉 및 시범집합체 연소시험이 진행 중이며, 본 발표에서는 구체적인 사고저항성핵연료 피복관의 개발 동향 및 현황을 나타내고, 고온산화저항성능 등과 같은 향상된 물성을 공개할 예정이다.

[미래원자력1-2 | 09:25] 초청강연

미래 원자력용 철강 소재 개발 동향: 송병준*, 김대우, 송석원, 정성훈(포스코)

Keywords: 원자력발전, 압력용기, 격납용기, SMR, 원전용탄소강, 오스테나이트계스테인리스

AI 데이터센터의 확충, 산업·수송 부문의 전기화 및 탄소중립 정책의 확산으로 전 세계 전력 수요가 지속적으로 증가함에 따라, 안정적인 저탄소 전원으로서 원자력의 중요성이 재조명되고 있다. 이에 따라 대형 원전과 소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR), 4세대 원자로의 기술 개발 및 건설이 활발히 추진되고 있다. 경수형 SMR의 원자로용기(Reactor Vessel, RV)는 일반적으로 SA-508 계열 저합금강 단조재 또는 SA-533 계열 후판·용접구조로 제작가능하다. 또한 대형 원전 및 차세대 SMR의 격납용기(Containment Vessel, CV)는 직경 확대와 대형 단조재의 제작·공급 제약에 대응하기 위해 고강도 탄소강 압연 후판과 일반 용접공정을 활용한 제작기술이 대안으로 고려되고 있다. 한편, 500 ºC 이상의 고온 환경에서 운전되는 비경수형 4세대 SMR인 소듐냉각고속로(SFR)와 용융염로(MSR)에는 ASME BPVC Section III Division 5에 등재된 316H 및 304H 오스테나이트계 스테인리스강 등이 원전용 소재로 우선 검토되고 있다. 본 연구에서는 압연 후판을 적용한 격납용기 제작을 대상으로 소재 특성, 용접성, 용접부 기계적 특성 및 용접생산성을 고찰하고, 대형 단조재 대비 압연재의 적용 가능성을 분석하였다. 또한 비경수형 SMR에 적용 검토되고 있는 316H 및 304H 오스테나이트계 스테인리스강의 소재 특성 및 적용 가능성을 검토하였다. 이를 바탕으로 원자력 기기 제작에 적용되는 단조재와 압연재의 제조·접합 특성을 비교하고, 요구 성능과 제작 조건에 따른 소재 및 제조·접합기술의 적용 방향을 제시하고자 한다.

[미래원자력1-3 | 09:50] 초청강연

Core Component Manufacturing Technology for Heat Pipe Cooled Microreactor: JONGDAE HONG*, HONGRYOUL OH, HO-A KIM, JOONHO MOON(Korea Atomic Energy Research Institute), DAEJUNG KIM(AM Solutions), CHANGHEUI JANG(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

Keywords: heat pipe reactor, microreactor, additive manufacturing, powder metallurgy

In extreme environments such as space, polar regions, and special regions (defense), an environmentally independent and economical energy source is required, and the heat pipe nuclear system is being considered as one of the candidates. Heat pipe cooled microreactors with monolithic cores are solid-state with a robust form that are advantageous for transportation conditions and extreme operating environments, and possess many positive characteristics such as long life (>10 years) and excellent safety. In this regard, active research is being conducted worldwide, led by NASA and the U.S. DOE. However, research into their manufacturing remains relatively limited. KAERI have also begun manufacturing research to implement our 5- and 100-kW heat pipe nuclear system design into a real system. Metal hydrides (Zirconium and Yttrium) were considered as moderator. Powder metallurgy and additive manufacturing technologies were developed using metal and metal hydride powders to manufacture metal hydride bulk parts. Furthermore, a gaseous hydriding process for bulk metals was primarily applied as previous study. Meanwhile, nuclear fuel and moderator are made of ceramics, which are prone to cracking and difficulty maintaining geometry due to thermal gradients and stresses. And cladding component was introduced, as components that can connect the heat pipe to the core structure is required. To withstand stress and deformation, FeCrAl (or TZM) alloy with excellent high-temperature properties was selected as a cladding material. Additionally, a hydrogen penetration barrier coating layer was added to the cladding to address stability issues such as high-temperature decomposition of metal hydrides. Manufacturing and basic property evaluations are currently underway, and future plans include establishing manufacturing technologies for large components and conducting HANARO irradiation tests.

[미래원자력2-1 | 10:25] 초청강연

사용후핵연료 저장시설의 제작 효율성 향상을 위한 중성자흡수 구조재 개발: 천영범*, 강지훈, 박선영, 정승문, 강석훈(한국원자력연구원)

Keywords: 중성자흡수재, 사용후핵연료, 타이타늄, 중성자 독

핵연료의 임계도를 제어하기 위해 필수적으로 사용되는 중성자흡수재는 사용후핵연료 저장시설의 안전성과 제조 경제성에 큰 영향을 주는 핵심 소재이다. 중성자 흡수능, 강도, 인성, 제작성, 용접성 등 중서자흡수재가 나타내는 성능은 사용후핵연료 저장시스템의 핵심 설계 요소이며 이는 궁극적으로 시스템의 안정성과 경제성에 영향을 준다. 기존에 사용되고 있는 알루미늄-보론탄화물 복합재는 우수한 임계제어능을 갖고 있으나, 강도 및 인성과 같은 구조적 성능의 결핍으로 인해 저장시설 적용을 위해서는 별도의 구조 지지체와 함께 설치되어야 한다. 이와 관련된 제작 효율성을 개선하기 위해서는 중성자흡수능과 함께 구조성능을 겸비한 중성자흡수 구조재의 개발이 필요한데, 이를 위해서는 취성을 유발하는 중성자 독 함유 화합물의 형성을 최소화시킬 수 있는 합금설계가 필요하다. 본 연구에서는 타이타늄과 다양한 중성자 독이 다양하게 조합된 신합금을 설계 및 제조하여 기계적특성과 중성자흡수능을 평가하였고, 이를 통해 최적의 구조성능을 갖는 중성자흡수 구조재 합금조성을 도출하였다.

[미래원자력2-2 | 10:50] 초청강연

혁신제조공정으로 제조된 첨단 원자력 구조재료의 조사저항성: 류호진*(한국과학기술원)

Keywords: 혁신제조공정, 금속적층제조, 조사저항성, 원자력 구조재료

최근 금속적층제조와 열간등방압성형(PM-HIP)과 같은 혁신제조공정을 소형모듈원전(SMR)을 비롯한 첨단 원자력 시스템의 구조재료 및 부품 제조에 적용하기 위한 연구개발과 표준화가 활발히 진행되고 있다. 이러한 공정으로 제조된 SA508 저합금강, 316L 스테인리스강 및 INCONEL 718 니켈기 초내열합금 등은 기존의 주조, 단조 공정으로 제조된 동종 소재와 비교하여 결정립 구조, 전위밀도, 석출물, 계면 및 잔류응력 등에서 고유한 미세조직적 특성을 나타낸다. 따라서 혁신제조공정으로 제조된 원자력 구조재료의 건전성을 평가하기 위해서는 강도와 연신율 등의 기본 기계적 특성뿐만 아니라 원자로 운전환경에서의 조사 저항성을 체계적으로 규명하는 것이 중요하다. 특히 제조공정에 의해 형성되는 결함구조, 계면 및 석출물이 조사결함, 조사유기 석출 및 편석 거동에 미치는 영향을 이해하고, 이를 바탕으로 조사 저항성이 향상된 미세조직을 설계하고 최적화하기 위한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 혁신제조공정으로 제조된 첨단 원자력 구조재료의 조사 저항성에 관한 최근 연구동향을 검토하고, SA508 저합금강을 중심으로 제조공정에 따른 미세조직적 특성과 조사거동의 상관관계를 분석함으로써 향후 첨단 원자력 시스템 적용을 위한 재료 성능평가 및 연구방향을 제시하고자 한다.

원자력 재료
Room 2층 209/11호, 10월 28일

[원자력 1-1 | 13:30]
Ion Irradiation Research for Nuclear Energy Applications: Hwasung Yeom*(Pohang University of Science and Technology (POSTECH))
Keywords: Ion irradiation, Nuclear mateterials, accelerators

Nuclear fuels and structural materials must retain their integrity for decades under the combined environments of radiation, high-temperature coolant, and mechanical stress. Energetic neutrons displace lattice atoms for the materials, and the surviving defects evolve into dislocation loops and voids that drive hardening, embrittlement, swelling, and accelerated corrosion. Ion irradiation using particle accelerators offers a complementary path simulating expensive neutron irradiation campaign: high damage rates allow hundreds of dpa within days with little activation, precise temperature control, and access to in-situ characterization. This talk introduces the fundamentals of displacement damage, the principles and artifacts of emulating neutron damage with ions, and recent case studies: irradiation-induced amorphization of oxidized $ZrSi_2$ for advanced reactors, in-situ TEM irradiation of cold spray Cr coatings demonstrating intrinsic radiation tolerance of deformed microstructures, high-energy Xe irradiation of Cr-coated Zircaloy-4 revealing interface amorphization and irradiation softening, and irradiation-accelerated corrosion of 316L stainless steel identifying water radiolysis as the dominant corrosion driver. Opportunities for versatile use of Korean accelerator facilities such as KOMAC and KAHIF are discussed.

[원자력 1-2 | 13:45]
양성자 조사된 XM-19 전자빔 용접부의 용접 조직별 조사 경화 민감도 및 경도 불균질 정량 비교: 김대현, 한성희, 김보규, 한준희, 윤수빈, 류연아, 장민교, 길태연, 신중호*(강원대학교)
Keywords: XM-19 오스테나이트계 스테인리스강, 전자빔 용접, 양성자 조사, 조사 경화, 나노압입

XM-19 오스테나이트계 스테인리스강은 높은 강도와 고온 내식성에 더해 조사 후에도 우수한 연성과 내조사성을 유지하여 소형모듈원자로(SMR) 구조재로 주목받고 있다. 원자로 내부구조물에 널리 적용되는 전자빔 용접(EBW)은 급격한 열이력을 수반하여 미세조직 불균질을 형성하고 국부 조사 응답을 변화시킬 수 있다. 본 연구에서는 XM-19 EBW 용접재를 360 ºC에서 2.0 MeV 양성자로 조사하고, 용융부(FZ), 조대립 열영향부(CG-HAZ), 미세립 열영향부(FG-HAZ), 모재(BM)의 용접 조직별 조사 경화를 Nix–Gao 압입 크기 효과(ISE) 보정을 적용한 깊이 분해 TD 나노압입으로 정량화하였다. EBSD 분석으로 결정립 크기와 국부 방위차가 조직별로 상이한 불균질 초기 상태를 확인하였다. SRIM 계산, 단면 ECCI, 나노압입이 표면으로부터 약 19.8 μm의 손상층을 일관되게 나타냈으며, 손상 구배가 안정한 nominal 1 dpa ± 0.2(0.8–1.2 dpa) 구간을 주 비교 기준으로 채택하였다. Nominal 1 dpa에서 조직별 조사 경화량(ΔH_{self})은 BM 1.14, FZ 1.01, FG-HAZ 1.00, CG-HAZ 0.72 GPa로 용접 조직마다 상이하였다. Unirradiated 모재를 기준으로 보면 용접 조직들은 초기에 모재보다 연하였고 조사 후 불균일하게 경화되었다. 그 결과 용접부 경도 불균질($H_{max} - H_{min}$)은 0.69에서 0.98 GPa로 확대되었으며, 경도가 가장 낮은 조직은 조사 전 FZ에서 조사 후 CG-HAZ로 변경되었다. 이는 조사가 용접에 의한 경도 불균질을 완화하기보다 증폭시킬 수 있으며, 용접 직후 상태로 판단한 경도 최약 조직이 조사 후에는 유효하지 않을 수 있음을 시사한다.

[원자력 1-3 | 14:00]
중성자 조사된 LPDED 적층제조 SA508 Gr.3 저합금강의 조사경화 거동: 적층 방향 및 단조재와의 비교: 류진호(한국원자력통제기술원), 정원종(영남대학교), 류호진*(한국과학기술원)
Keywords: SA508 Gr.3, 적층제조(LPDED), 중성자 조사, 조사경화, 원자로압력용기강

원자로압력용기(RPV)용 SA508 Gr.3 저합금강을 laser powder directed energy deposition(LPDED)으로 적층제조하고, 중성자 조사 후 기계적 특성을 단조재와 비교하였다. 적층 방향에 대해 하중축이 수직(DED-X)인 시편과 평행(DED-Z)인 시편, 그리고 단조재(Conv)를 하나로(HANARO) 23M-01F 캡슐에서 278 ºC, 0.55 및 0.98 dpa로 조사한 뒤, KAERI 조사재시험시설 핫셀에서 상온 및 278 ºC 인장시험을 수행하였다. 0.98 dpa, 278 ºC 조건에서 항복강도 증가량(ΔYS)은 단조재 491 MPa, DED-Z 542 MPa, DED-X 470 MPa로 세 재료가 유사한 수준이었다. 반면 조사 전 강도로 정규화한 상대 증가율($\Delta YS/YS_0$)은 단조재 +120 %, DED-Z +89 %, DED-X +68 %로 뚜렷한 차이를 보였다. 즉 적층제조재는 단조재 대비 현저히 높은 초기 강도에도 불구하고 절대 조사경화량이 단조재 수준을 상회하지 않았으며, 이는 제조 공정과 잔류 전위밀도를 비롯한 초기 미세조직이 상이함에도 두 재료가 동등한 수준의 조사경화 저항성을 가짐을 의미한다. 0.55→0.98 dpa 구간의 ΔYS 증분은 단조재 111 MPa에 비해 DED-X 61 MPa, DED-Z 85 MPa로 작아, 적층제조재에서 조사경화 포화가 더 이른 선량에서 나타날 가능성을 보였다. 조사 후에도 세 재료 모두 연신율 15 % 이상을 유지하여, 적층제조 RPV 강의 중성자 조사 환경에서의 적용 가능성 측면에서 유의미한 결과를 얻었다. 향후 계획으로 조사 결함에 의한 강화 기여(σ_irr) 분해와 파단면 SEM 분석 등을 진행 중이다.

[원자력 1-4 | 14:15]

헬륨 이온 조사 기반 첨단 원자력재료의 스웰링 평가와 소재 개발: 신찬선*(명지대학교), 진형하, 이동원(한국원자력연구원), 노상훈(국립부경대학교), 이창훈(한국재료연구원)

Keywords: 헬륨 조사, 저방사화 페라이트/마르텐사이트강, 산화물분산강화강, 텅스텐, 스웰링

헬륨(He)의 생성과 축적은 핵융합 및 차세대 원자로에 사용되는 구조재와 대면재의 장기 건전성을 저하시키는 주요 요인 중 하나이다. 이온 조사는 중성자 조사에 비해 짧은 시간에 높은 농도의 조사 손상을 유도할 수 있어, He에 의한 미세조직 변화와 손상기구를 규명하고 후보 소재의 조사 저항성을 비교·평가하는 유용한 방법으로 활용되고 있다. 본 발표에서는 핵융합 구조재용 저방사화 페라이트/마르텐사이트(RAFM)강을 중심으로 He 조사에 따른 버블 형성 및 스웰링 거동을 평가하고, 이를 소듐냉각고속로용 산화물분산강화(ODS)강과 핵융합 대면재용 텅스텐(W)의 조사 손상 연구로 확장한 결과를 소개한다. K-RAFM강과 Eurofer97 유사 조성의 비교재에 He을 주입한 후 후열처리를 실시하고, 투과전자현미경(TEM)을 이용하여 He 버블의 크기 분포와 수밀도를 정량화하였다. 이를 바탕으로 버블 체적분율로부터 스웰링을 산출하고, He 조사부와 마스킹된 비조사부 사이의 표면 융기 높이를 3차원 표면형상 분석으로 측정하여 얻은 스웰링과 비교하였다. 두 방법 모두 약 400 ºC까지 완만한 변화 후 500 ºC에서 버블의 성장과 조대화에 따라 스웰링이 급격히 증가하는 유사한 경향을 나타냈다. 그러나 TEM은 국부적인 버블 분포를 직접 측정하는 반면, 표면 융기 높이는 조사층 전체의 수직 변형을 반영하기 때문에 두 방법으로 산출한 절대 스웰링 값에는 차이가 나타났다. 이러한 결과는 표면 융기 높이가 TEM 분석을 대체하는 절대적인 스웰링 측정법이라기보다, TEM 기반 버블 분석과 연계할 경우 소재 간 He 스웰링 저항성을 신속하게 비교할 수 있는 반정량적 평가법으로 활용될 수 있음을 보여준다. RAFM강에서는 석출물–기지 계면이 He의 포획 위치로 작용하여 버블의 핵생성, 성장 및 조대화에 영향을 미치는 것이 확인되었으며, 이는 합금 조성과 열처리를 통한 조사 저항성 향상의 가능성을 제시한다. 이러한 He 이온 조사 기반 평가법은 ODS강에서 나노 산화물–기지 계면의 결함 및 He 포획 효과를 평가하는 데 적용하고 있으며, W에서는 핵융합 플라즈마 대면환경과 관련된 표면 변형과 표면하 He 버블 형성 거동을 규명하는 데 활용하고 있다. 본 연구는 He 이온 조사와 TEM, 표면형상 분석을 연계함으로써 미세한 He 결함의 형성과 거시적인 스웰링 거동을 연결하고, 첨단 원자력재료의 조사 저항성을 효율적으로 평가할 수 있는 실험적 접근법을 제시한다.

[원자력 1-5 | 14:30]

포타슘 버블과 전위가 텅스텐의 변형과 파괴에 미치는 영향: 김정석, 류일(서울대학교), 고원석(고려대학교), 최석현, 이성민, 오철헌, 한흥남*(서울대학교)

Keywords: 포타슘 버블, 전위, 텅스텐, 변형, 파괴

포타슘 도핑 텅스텐은 재결정 저항성이 우수하여 1960년대부터 백열전구의 필라멘트로 사용되던 소재로, 순수 텅스텐보다 연성-취성 천이 온도가 낮고 고온 강도가 높다는 성질 덕분에 2010년대부터 핵융합로용 플라즈마 대면재료로 각광받고 있다. 그러나, 포타슘 도핑 텅스텐의 낮은 연성-취성 천이 온도는 소결 중 포타슘이 기화되면서 생성되는 포타슘 버블의 영향일 것이라는 추측만 있을 뿐, 그 원인은 명확히 밝혀진 바가 없다. 본 발표는 포타슘 버블과 전위가 텅스텐의 변형과 파괴에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고, 도핑 텅스텐의 연성-취성 천이 온도가 순수 텅스텐에 비해 낮은 원인을 설명한다. 인장, 굽힘, 샤르피와 같은 전통적인 평가법으로 재료의 연성-취성 천이 온도를 측정하는 경우, 재료 내 변형과 파괴가 복합적으로 발생하므로 두 거동을 독립적으로 평가하기 어렵다. 본 연구에서는 포타슘 버블과 전위라는 나노스케일의 결함들이 재료의 변형에 미치는 영향만을 평가하고자 국부적인 영역에서의 물성 평가법인 나노압입시험을 활용하였고, 재료의 파괴에 미치는 영향만을 평가하고자 분자동역학, 전위동역학과 유한요소해석을 활용한 다중스케일 모사를 수행하였다. 실험 및 모사 결과를 기반으로 파괴 분석 다이어그램을 설계하여 포타슘 도핑 텅스텐이 재결정된 순수 텅스텐 대비 낮은 연성-취성 천이 온도를 나타냄을 확인하였고, 일축 인장 시험을 통해 위 결과를 검증하였다. 본 발표는 다양한 종류의 나노스케일의 결함을 갖는 텅스텐 기반 합금의 연성-취성 천이 온도를 정량적으로 평가할 수 있는 방법론을 제시하고, 나아가 원하는 기계적 물성을 갖는 재료 설계의 기틀을 제공한다.

[원자력 1-6 | 14:45]

인성 및 산화저항성이 향상된 핵융합로용 W-Cr 복합재 제작 및 물성 평가: 이성민, 김정석, 오철헌, 곽노준, 한흥남*(서울대학교 재료공학부)

Keywords: 플라즈마 대면부품(PFCs), 고에너지밀링, 전류인가소결, 인성, 산화저항성

텅스텐(W)은 높은 융점과 우수한 열전도도로 핵융합로 플라즈마 대면재료의 후보로써 주목받고 있다. 그러나 저온 취성 및 사고 시 산화 분위기에서의 급격한 열화는 실제 적용을 제한하는 요인이다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 W-Cr 복합재를 분말야금학적으로 제조하고 미세구조, 산화 특성, 기계적 특성을 분석하였다. 제조된 복합재에 대한 미세구조 관찰 결과 치밀한 구조 및 두 상이 명확하게 구분된 것을 확인하였다. 고온 인장/굽힘 시험결과 W-Cr 복합재에서 순수 텅스텐 소재에 비해 인성이 증가한 것을 확인하였으며, 인장 시험 전후 변형 분포 분석을 수행하여 향상된 인성의 원인을 파악하였다. 또한 고온 산화시험 후 질량 변화 분석, 단면 미세구조 분석을 통해 순수 텅스텐 소재에 비해 향상된 산화저항성을 확인하였다. 개발된 W-Cr 복합재는 순수 텅스텐 대비 향상된 인성 및 산화저항성을 통해 핵융합로 플라즈마 대면부품의 안전성과 신뢰성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

[원자력 1-7 | 15:00]

산화물 분산 공정에 따른 Ni-base ODS 합금의 미세조직, 기계적 특성 및 용융염 내식성: 이원찬, 김정한*, 김대한, 정성훈, 이태규(국립한밭대학교), 김태하, 박기대(충북대학교)

Keywords: 산화물분산강화, ODS, 용융염부식, 용융염원자로, MSR

차세대 원자력 발전 시스템으로 주목받고 있는 용융염 원자로(Molten Salt Reactor, MSR)는 높은 열효율과 우수한 안전성으로

인해 활발히 연구되고 있다. 그러나 고온 용융염 환경에서 발생하는 구조재료의 심각한 부식과 이에 따른 기계적 건전성 저하는 MSR의 장기 운전 및 실용화를 제한하는 주요 요인 중 하나이다. 특히 Ni 기반 합금은 용융염 환경에서 상대적으로 우수한 내식성을 나타내어 유력한 구조재료로 고려되고 있으나, 장시간 고온 환경에서의 기계적 특성과 미세조직 안정성을 동시에 확보할 필요가 있다. 산화물분산강화(Oxide Dispersion Strengthened, ODS) 합금은 열적으로 안정한 미세 산화물 입자를 금속 기지에 분산시켜 전위 이동과 결정립 성장을 억제함으로써 고온 강도와 미세조직 안정성을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 MSR용 Ni 기반 ODS 구조재료 개발을 위한 기초 연구로서, 순수 Ni 기지에 Y_2O_3를 첨가하고 볼밀링(Ball Milling, BM), 분무열분해(Spray Pyrolysis, SP) 및 SMART 공정을 이용하여 복합분말을 제조하였다. 제조된 분말은 방전 플라즈마 소결(Spark Plasma Sintering, SPS)을 통해 벌크화하였으며, 복합분말 제조공정에 따른 분말 형상, 산화물 분포, 미세조직, 경도 및 인장 특성을 비교하였다. 분석 결과, 복합분말 제조공정에 따라 산화물의 분산 상태와 미세조직 및 기계적 특성에서 뚜렷한 차이가 나타났다. BM 공정은 결정립 미세화와 결함 밀도 증가로 인해 높은 강도를 나타냈으나, 산화물 응집으로 인해 연성이 감소하였다. 반면 SP 공정은 산화물을 비교적 균일하게 분산시켜 강도와 연성의 균형 확보에 유리하였다. SMART 공정은 초기 분말의 형상을 유지하면서 산화물을 균일하게 표면 분산시킬 수 있는 가능성을 나타냈다. 이러한 결과는 Ni 기반 ODS 합금의 성능이 단순한 산화물 첨가량뿐만 아니라 복합분말 제조공정에 따른 산화물 분산 및 미세조직 제어에 크게 의존함을 보여주며, 향후 고온 용융염 환경에서 장기 건전성을 확보하기 위한 MSR용 Ni 기반 ODS 구조재료 설계에 기초자료로 활용될 수 있다.

[원자력2-1 | 15:25]

금속 적층제조 기술을 활용한 원자력용 소재 부품 적용 연구: 김현길*, 김영범, 고은하, 심철용(InssTek)

Keywords: 금속, 적층제조, 원자력, 복합소재, 경사기능, 클래딩

금속 소재를 활용한 적층제조 기술이 발달함에 따라 산업적 적용이 크게 확대되고 있다. 특히 항공우주, 방산, 금형 및 자동차 분야에서 적층제조로 생산한 부품의 사용량이 증가되고 있다. 이는 금속 적층제조품에 대한 지속적인 평가와 검증 그리고 품질 인증이 수행되면서 시제품 제조에서 상용품 제조 단계로 진행되었기 때문이다. 원자력 분야에서도 금속 적층제조품에 대한 이해도가 증가되면서 특수 부품에 대한 상용화가 진행되고 있다. 가동 원전의 핵연료 지지격자, 상하단 고정체 그리고 임펠라 등은 이미 상용 원전에 활용되고 있다. 금속 적층제조 기술은 기존에 제조기술로 적용하기 어려운 형상의 부품뿐만 아니라 복합소재도 제작이 가능하기 때문에, 다양한 개념의 SMR 분야에 적용하면 효율성이 증대될 수 있다. 한 예로 클래딩과 같은 기술은 부식을 방지에 우수한 고가의 내열 소재을 기존소재 부품에 효율적으로 코팅이 가능하면서도 박리의 위험이 매우 낮다. 본 연구에서는 금속 적층제조 기술을 활용하여 원자력용 소재 부품을 효율적이면서도 성능을 향상할 수 있는 기능성 복합소재 개념을 수행하였다.

[원자력2-2 | 15:40]

적층제조공정으로 제조된 중성자 차폐용 Al6061-Gd_2O_3-TiB_2 복합 코팅재의 미세조직 및 물성 평가: 이원희, 이태규*, 이민제, 신주원(국립한밭대학교), 김윤희(한국과학기술원)

Keywords: Laser Directed Energy Deposition, SMART process, Al6061, Gd_2O_3, TiB_2, 열중성자 흡수재

사용후핵연료 저장시설의 열중성자 흡수재로는 Al6061 기지에 B_4C를 10-35 wt% 수준으로 첨가한 금속기지복합재가 사용되고 있으나, 고함량 세라믹 첨가에 따른 취성 증가와 다단계 제조 공정의 복잡성이 한계로 지적된다. Gd_2O_3는 B_4C 대비 열중성자 흡수능이 우수하여 보다 적은 첨가량으로 동등한 흡수능 확보가 가능하며, 적층제조 공정을 적용할 경우 구조재에 직접 흡수층을 형성할 수 있어 공정 단순화가 기대된다. 그러나 Al6061은 적층 시 응고균열이 발생하기 쉬운 합금으로, 건전한 적층성 확보가 선결 과제이다. 본 연구에서는 Surface Modification And Reinforcement Transplantation (SMART) 공정으로 복합 분말을 제조하고, Laser Directed Energy Deposition (LDED) 공정을 이용하여 Al6061, Al6061-1wt%Gd_2O_3, Al6061-2wt%Gd_2O_3, Al6061-2wt%Gd_2O_3-2wt%TiB_2의 4종 조성을 동일 조건으로 적층하였다. 광학현미경, SEM/EDS, EBSD 및 미세인장시험을 통해 미세조직과 기계적 특성을 평가하였다. Gd_2O_3 첨가는 적층부의 균열과 기공을 감소시키고 연신율을 향상시켰으며, TiB_2 추가 첨가는 응고조직을 변화시켜 강도와 연신율의 동시 확보를 가능하게 하였다. 이를 통해 Al6061의 낮은 적층성을 극복하고 건전한 흡수층을 형성할 수 있음을 확인하였으며, LDED 기반 Al6061-Gd_2O_3-TiB_2 복합 코팅재는 기존 B_4C계 상용 열중성자 흡수재를 대체할 가능성이 있을 것으로 판단된다.

원자력2-3 | 15:55]

VC-Reinforced RAFM Steel Composites Fabricated by Laser Powder Directed Energy Deposition: Wonjong Jeong*(Yeungnam Univeristy), Suh Joowon, Suk Hoon Kang, Seungmun Jung(Korea Atomic Energy Research Institute), Soon Jik Hong(Kongju National Univeristy), Ho Jin Ryu*(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

Keywords: RAFM, Composite, Additive manufacturing, Laser powder directed energy deposition

Reduced activation ferritic-martensitic (RAFM) steels have attracted considerable attention as promising structural materials for future advanced nuclear reactors. To further extend their applicability, improvement in mechanical performance and the implementation of advanced manufacturing technologies are required to reduce manufacturing complexity and processing costs. In this study, VC-reinforced RAFM steel matrix composites were fabricated using laser powder directed energy deposition (LP-DED). Composite powders containing up to 3 wt.% VC particles with sizes below 3 μm were prepared using the surface modification and reinforcement transplantation (SMART) process and subsequently deposited under identical LP-DED conditions. The microstructures of the fabricated specimens were characterized using optical microscopy, scanning electron microscopy, electron backscatter diffraction, and transmission

electron microscopy, and their mechanical properties were evaluated by room-temperature tensile testing. The addition of VC influenced the microstructural evolution during LP-DED, resulting in variations in the size and number density of secondary phases as well as grain characteristics depending on the reinforcement content. These microstructural modifications led to distinct changes in the tensile behavior compared with the unreinforced RAFM steel. The relationships among VC content, secondary-phase evolution, grain characteristics, and mechanical properties are systematically discussed. These findings provide insight into the microstructural modification of RAFM steels through ceramic reinforcement and demonstrate the potential of LP-DED-fabricated RAFM steel matrix composites for advanced nuclear structural applications.

[원자력2-4 | 16:10]

열처리 압력 조건에 따른 초오스테나이트계 스테인리스강(XM-19)의 미세조직 및 기계적 물성변화 분석: 윤준원, 박성민(한국생산기술연구원, 고려대학교), 이민수(한국생산기술연구원), 손석수*(고려대학교), 박창수*(한국생산기술연구원)

Keywords: XM-19, High-nitrogen austenitic stainless steel, Z-phase precipitation, HIP pressure effect, Mechanical properties

XM-19은 고질소 오스테나이트계 스테인리스강(High-Nitrogen Austenitic stainless steel, HNASS)으로 높은 강도와 내식성을 바탕으로 발전 및 원자력 산업의 구조용 재료로 활용되고 있다. 최근에는 소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR)와 같은 차세대 원전 부품 소재로의 적용 가능성이 주목받고 있다. 극한 환경에서 사용되는 소재의 경우 신뢰성 확보를 위해서는 균질한 미세조직과 내부 결함 제거가 필수적이다. 본 연구에서는 주·단조 XM-19에 대해 열간등압성형(Hot Isostatic Pressing, HIP)공정의 압력 조건(RT, Low, Mid, High)을 변화시키며 미세조직과 기계적 특성을 체계적으로 분석하였다. 미세조직은 광학 현미경(OM), 주사전자현미경(SEM), 전자후방산란회절(EBSD), 투과전자현미경(TEM)을 이용하여 분석하였으며, 기계적 특성은 샤르피 충격 시험 및 상온 인장 시험을 통해 평가하였다. HIP 압력이 증가함에 따라 미세조직 및 Z-phase 석출 거동이 변화하였으며, 특정 압력조건에서 인장강도와 연신율이 동시에 최대가 되었다. 특히 충격흡수에너지는 압력 인가만으로 83.2 J에서 200 J 이상으로 향상되었다. 이는 HIP 공정에서 압력이 온도·시간과 독립된 미세조직 제어 인자로 작용하며, 최적의 압력 조건이 존재함을 보여준다. 본 결과는 XM-19의 극한 환경 신뢰성 향상을 위한 열처리 압력 최적화의 실험적 근거를 제공하며, 압력 제어를 통한 미세조직 균질화 개념은 SMR을 비롯한 극한 환경용 부품 소재의 공정 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[원자력2-5 | 16:25]

HIP 온도에 따른 페라이트/마르텐사이트강내 산화물 형성 거동: 서보성, 차은빈, 박광석*(한국생산기술연구원)

Keywords: Ferritic/Martensitic steels, Fe-ODS steels, Oxides, Reactive gas atomized powder, HIP

산화물 분산 강화(Oxide Dispersion Strengthened, ODS) 페라이트/마르텐사이트강은 우수한 방사선 조사 저항성으로 인해 차세대 원자로인 소듐냉각고속로 (SFR)의 구조재로 주목받고 있지만, 상대적으로 낮은 고온 크리프 특성으로 인해 고온 강도를 높이는 연구가 진행되고 있다. 이중에서, 특히 산화물을 분산시켜 고온 강도를 높이는 산화물 분산 강화 (Oxide Dispersion Strengthened, ODS) 방법이 많은 관심을 받고 있다. 하지만, 일반적으로 많은 연구자들이 사용하고 있는 기계적 합금화 (Mechanical Alloying, MA) 방법은 실제 산업에 적용하기에는 제한이 있어, 이를 대체하기 위한 방안으로 reactive gas atomization을 이용하여, 표면에 산화막이 형성된 분말을 제조 후, 열간등방압성형 (HIP) 또는 고온 진공 열처리를 통해 표면에 형성된 산화막을 이용하여 분말 내부에 산화물 입자를 in-situ로 형성하는 방법이 연구되고 있다. 이에 본 연구에서는 페라이트/마르텐사이트강 기본 조성에, ODS를 형성하기 위한 산화물 형성 원소를 첨가한 Fe–15Cr–2W–0.25Ti–0.3Y 합금를 설계하였다. Vacuum Arc melting (VAM) 방법을 사용하여 모합금을 제조한 후, Ar 가스에 3, 500 ppm 산소가 함유된 가스를 사용하여 reactive gas atomization을 사용하여 D50 ~ 50 um 분말을 제조하였다. 이상의 분말을 사용하여, HIP 공정을 온도1, 000 ~1, 200 ºC도에서 진행하여, HIP 조건에 따라 Ti, Y 및 Cr에 대한 산화물 거동에 대해 조사하였다.

[원자력2-6 | 16:40]

Microstructure evolution of zirconium by oxidation under LOCA-relevant temperature using phase-field modeling: jiho kim, Kunok Chang*(Kyung Hee University)

Keywords: Zirconium, Oxidation, Phase-field model

The phase-field method is applied to simulate the high-temperature oxidation of zirconium-based nuclear fuel cladding under loss-of-coolant accident (LOCA) scenarios, focusing on microstructural changes induced by oxygen transport. Employing the Kim–Kim–Suzuki (KKS) model integrated within the MOOSE framework, we examine the kinetics of oxidation and the spatial phase distributions of HCP-Zr, BCC-Zr, and monoclinic zirconium oxide phases across various temperatures at both the inner and outer cladding surfaces. This approach enables a direct, microstructure-resolved description of how oxygen ingresses, how phase transforms, and how interface migration interacts during severe-temperature exposure. Oxygen transport during the oxidation is modeled through composition- and phase-dependent mobilities, which can be related to experimentally reported diffusivities. Therefore, the simulated oxidation kinetics reflect realistic material parameters. To assess the capabilities of the framework, one-dimensional simulations are performed for geometries representative of APR1400 zirconium fuel cladding under LOCA-relevant temperatures, from 1350 K to 1477 K. Despite the simplifying assumption that the cladding is pure zirconium, the simulations show that the overall oxide growth follows Wagner's metal oxidation theory, exhibiting parabolic kinetics over the examined ranges of temperature. The model further predicts the formation of an intermediate HCP-Zr layer between the BCC-Zr substrate and the outer monoclinic zirconium oxide scale. This layered structure

and the relative positioning of the phases are consistent with reported experimental observations of phase stratification in oxidized zirconium systems, lending qualitative validation to the modeling approach. Overall, this study demonstrates that a multiphase phase-field framework based on the KKS formulation can simultaneously capture oxidation kinetics and complex phase evolution in zirconium cladding under high-temperature conditions.

[원자력2-7 | 16:55]

Data-Driven Modeling of Elemental Solution Enthalpies in Liquid Lead: Feature Exploration and Predictive Insights: Seoyeon Bak(Seoul National University), Junhyoung Gil(Japan Atomic Energy Agency), Jimin Lee, Chaeyeong Kim, Takuji Oda*(Seoul National University)

Keywords: Liquid metal, machine learning potentials, molecular dynamics, density functional theory, material informatics

Liquid lead (Pb) has attracted considerable attention for applications in liquid-metal batteries and as a heat-transfer and thermal-storage medium owing to its favorable thermophysical properties. In particular, its excellent neutronic characteristics make it a promising coolant for advanced nuclear reactors. In such nuclear engineering applications, for example, a wide range of elements can be introduced into liquid Pb as fission and corrosion products, including radionuclides and constituents of structural steels. The thermodynamic stability of these elements governs their chemical activity and is therefore closely related to material compatibility, impurity control, and the overall performance of liquid-metal systems. The solution enthalpy provides a fundamental thermodynamic descriptor of the stability of elements dissolved in liquid Pb. However, solution enthalpy data across the periodic table are available only for a limited number of major elements, and systematic analyses remain scarce because of the experimental and computational challenges associated with high-temperature liquid metals and the lack of accurate yet computationally efficient methods. In this study, machine-learning moment tensor potentials (MTPs) were trained on density functional theory (DFT) data for all elements in liquid Pb through an efficient active-learning scheme. The solution enthalpies of these elements in liquid Pb were then calculated by molecular dynamics simulations using the developed MTPs. An empirical correction to the reference-state energies was applied using experimental binding energies of the impurity elements in their standard states to mitigate residual DFT errors relative to experimental data. The solution enthalpies of noble-gas elements, which interact relatively weakly with the liquid Pb host, were first analyzed to establish a baseline for understanding the general behavior of other elements. The solution enthalpies across the periodic table were subsequently modeled using machine-learning approaches, including symbolic regression. Several elemental features readily available from the literature were explored based on physical insights into the dissociation and chemical interactions of impurity elements, revealing strong correlations with the solution enthalpy. In addition, the formation energy of the Pb-X compound for each element X, available from the Materials Project, was identified as a calculation-derived feature that describes the solution enthalpy more accurately across the entire range of elements.

New Horizon : 재료강도 및 소성가공 기술의 과거, 현재 및 미래 심포지엄 - 장영원교수님 memorial symposium

Room 3층 컨퍼런스, 10월 28일

[재료가공1-1 | 13:40] 초청강연

철강 기술혁신의 역사, 그리고 새로운 도전: 김기수*(포스코홀딩스)

Keywords: 철강, 전략산업, 공급망 재편, 탄소중립, 기술혁신, 자원, 고부가가치강, 인공지능, AI, 미래

철강산업은 고로·전로 공정의 혁신을 기반으로 대량생산 체제를 확립하고, 고급강 개발을 통해 세계의 산업화와 경제성장을 견인해 온 핵심 기간산업이다. 최근에는 지정학적 리스크의 심화, 글로벌 공급망 재편, 주요국의 산업정책 강화에 대응해야 하는 전략산업으로서 그 중요성이 다시 부각되고 있다. 현재 글로벌 철강 시장은 중국발 공급과잉과 경기 둔화로 수요가 위축되는 한편, 인도를 비롯한 신흥국의 성장과 선진국의 인프라 재구축 및 에너지 전환 투자가 맞물리며 수급 구조가 빠르게 재편되는 격변기를 맞이하고 있다. 그동안 철강산업의 경쟁은 원가 경쟁력, 생산성 향상, 신제품 개발을 중심으로 전개되어 왔다. 그러나 최근 기후변화 대응과 탄소중립 전환이 핵심 과제로 부상하면서, 철강산업은 새로운 차원의 기술혁신을 요구받고 있다. 탈탄소 전환을 위해서는 저탄소 제철·제강 기술, 에너지 효율 향상, 스크랩 및 순환자원 활용 확대, 원료·조업 최적화, 공급망 안정성 확보를 포괄하는 종합적 대응이 필요하다. 또한 이러한 전환은 개별 기업의 노력만으로 달성되기 어려우며, 기초연구, 공정기술, 실증, 확산에 이르는 전 주기에 걸친 산·학·연 협력이 필수적이다. 철강소재 측면에서는 고강도, 고성형, 고내식 등 차별화된 물성이 경쟁력을 좌우하면서, 범용재에서 수요 맞춤형 고부가가치 강재 중심 시장으로 변모하고 있다. 특히 차세대 모빌리티 산업용 경량소재, 고효율 전기강판, 에너지 인프라용 특수강재 등 고기능 소재의 중요성이 더욱 커지는 추세이다. 최근에는 AI(Artificial Intelligence)를 제조현장에 도입하여 조업 최적화, 품질 예측, 설비 진단, 공급망 운영의 고도화까지 전 밸류체인(value chain)에 걸친 기술혁신이 이루어지고 있다. AI 기반 제조혁신이 실질적 제조 경쟁력 향상으로 이어지기 위해서는 데이터 인프라 구축, 도메인 지식과 융합된 AI 모델 개발, 현장 적용성 및 신뢰성 확보가 병행되어야 한다. 이와 같은 철강공정의 AI 전환을 성공시키려면 각 분야의 전문가들이 협업할 수 있는 긴밀한 산·학·연 협력체계를 갖춰야 한다. 본 발표에서는 글로벌 철강산업의 역사적 발전 과정과 기술혁신의 흐름을 고찰하고, 저탄소 공정, 순환자원 활용, 고기능 소재, 디지털 전환 등 패러다임 전환(paradigm shift)에 따른 철강산업의 미래를 전망해 본다. 향후 철강산업의 경쟁력을 확보하기 위한 방안으로 기초연구에서 상용화에 이르는 치밀한 로드맵, 그리고 속도감 있는 조기 상업화를 위한 차별화된 산·학·연 협력 방안을 논의하고자 한다.

[재료가공1-2 | 14:05] 초청강연

내부변형변수를 이용한 초소성 변형거동 해석: 하태권*(강원대학교), 신홍철(포항산업과학연구원)

Keywords: 내부변형변수, 초소성 변형, 결정립계 미끄러짐, 알루미늄합금, Pb-Sn 공정합금, 변형유기변태

본 발표에서는 고 장영원박사님이 제안한 내부변형변수이론에 대하여 간단히 돌아보고자 한다. 먼저 내부변형변수이론을 다시 한번 살펴 보고 구조적 초소성 현상에 적용한 결과들을 간략하게 설명하고자 한다. 구조적 초소성의 주된 기구는 입계 미끄러짐이며 이를 보완하는 기구로 전위활주에 의한 소성변형으로 보고 각각의 기구에 대한 구성방정식을 제시 하였다. 알루미늄, 아연 등 단상 합금들과 Pb-Sn 공정합금 및 금속간화합물 등 다양한 재료에 대하여 응력이완시험을 진행하고 변형거동을 규명하였다. 본 발표에서는 역시 고 장영원박사님이 제안한 변형유기변태거동의 해석방법에 대하여도 간단히 돌아보고자 한다.

[재료가공1-3 | 14:30] 초청강연

소성변형이론의 헤리티지: 신합금 개발과 적층제조 공정으로의 확장: 이기안*(인하대학교)

Keywords: 소성 변형 이론, 금속 재료 공정, 적층 제조, 신합금 개발, 변형 거동

본 강연에서는 평생을 금속 재료의 소성변형 및 기계적 거동 연구에 헌신하시며 후학들에게 위대한 학술적 유산(Heritage)을 남겨주신 고(故) 장영원 교수님을 추모하며, 교수님께서 정립하고 발전시키신 소성변형이론이 현대 신합금 개발 및 차세대 제조 공정에서 어떻게 계승되고 확장되고 있는지 조명하고자 한다. 전통적인 금속 가공 기술의 근간이 된 전위 기반 소성변형 및 구조-물성 상관관계 이론은 최근 주목받는 구조용 고엔트로피 합금(HEAs) 및 난가공성 신합금 설계의 핵심적 나침반 역할을 하고 있다. 특히 물리적 기반의 소성 변형 모델은 극한 환경용 소재의 변형 기구을 예측하고 제어하는 데 여전히 강력한 도구로 작용할 수 있다. 본 강연자는 이러한 소성변형이론의 유산을 금속 적층제조(3D 프린팅) 소재에 대하여 확장 적용해왔다. 다양한 금속 소재들에서 적층 제조 특유의 급랭 미세조직 내에 존재하는 미세 셀 구조, 고밀도 전위망, 그리고 잔류 응력이 가해진 하중 하에서 어떻게 기계적 물성에 영향을 주고 새로운 변형/파괴 기구를 나타내는 지 규명하고 예측해 왔다. 이러한 결과들을 바탕으로, 장영원 교수님의 학술적 헤리티지는 과거의 유산에 머무르지 않고, 디지털화된 현대의 신소재 설계 및 적층제조 공정 및 소재 개발을 관통하는 미래 지향적 핵심 이론으로 진화하고 있음을 공유하고자 한다.

[재료가공1-4 | 14:55] 초청강연

항공소재 공급망 현황과 국내 공급망 경쟁력 강화 방향: 권용남*(한국재료연구원)

Keywords: 항공소재, 공급망, 설계허용값

항공기 산업에서 소재는 성능과 안전성뿐 아니라 생산원가와 공급망 안정성을 좌우하는 핵심 요소이다. 항공기체 제작비에서 소재

가 차지하는 비중은 약 15% 수준이며, 부품을 포함할 경우 20~25%, 항공엔진의 경우에는 약 50~60%에 이르는 것으로 평가된다. 그러나 국내 항공산업은 주요 알루미늄, 타이타늄, 니켈계 합금 등을 대부분 해외 공급망에 의존하고 있으며, 최근 글로벌 항공기 생산 확대와 지정학적 불확실성으로 인한 장기 lead time과 가격 상승이 산업 경쟁력 확보의 제약요인으로 작용하고 있다. 항공용 소재는 일반 산업용 소재와 달리 높은 기술적·제도적 진입장벽을 갖는다. 항공기 구조 설계에 적용하기 위해서는 안정적으로 관리된 제조공정을 통해 소재를 생산하고, 충분한 시험 데이터를 확보한 후 통계적 처리를 통해 설계 허용값(design allowable)을 입증해야 한다. 따라서 신규 항공소재 개발에는 소재 및 공정 개발뿐 아니라 대규모 물성시험, 통계적 DB 구축, 규격화 및 지속적인 품질·인증 유지가 필요하며, 이에 필요한 비용과 기간은 신규 공급자의 시장 진입을 어렵게 하는 주요 요인이다. 본 발표에서는 이러한 진입장벽을 극복하기 위해 국내 산·학·연이 공동으로 추진한 항공기 설계용 소재 허용값 데이터 개발 사례를 소개하고, 이를 기반으로 국내 항공소재 공급망을 활성화하기 위한 방안을 논의한다. 특히 소재 제조공정의 안정화, 시험·평가, 통계적 물성 DB 구축, 소재규격 제정 및 항공기 적용을 연계하는 통합적인 qualification 체계 구축이 중요하다. 향후 글로벌 민항기 및 무인기 시장의 성장과 항공 공급망 재편은 국내 소재기업에 새로운 기회를 제공할 것으로 예상된다. 특히 기존 공급망의 생산능력 한계와 지정학적 리스크로 인해 항공기 OEM들은 안정적인 신규 공급처를 필요로 하고 있어, 품질과 가격 경쟁력을 확보한 국내 기업의 글로벌 공급망 진입 가능성도 확대되고 있다. 향후 항공소재 개발은 기존 소재의 단순 국산화를 넘어 경량화, 고성능화, 제조비용 절감 및 공급망 안정성을 동시에 확보하는 방향으로 추진될 필요가 있다. 적층제조, 고기능 미세조직 제어 소재 및 공정집약형 소재와 같이 공급망이 아직 완전히 고착되지 않은 분야를 선제적으로 발굴하는 한편, 현재 항공기 제작에 적용되는 주요 소재와 부품 제조공정의 국산화도 지속적으로 확대해야 한다. 궁극적으로는 소재 개발에서 그치지 않고 공정 qualification, 설계 허용값 구축, 부품 실증 및 글로벌 OEM 공급망 진입까지 연계하는 지원체계를 구축할 필요가 있다.

[재료가공2-1 | 15:30] 조청강연

다성분계 합금 및 이종금속소재의 미세조직 연계 강도 및 성형성 연구 사례: 이광석*(한국재료연구원), 김정수(기술보증기금), 전현준(한국원자력연구원)

Keywords: 벌크 비정질 합금(Bulk Metallic Glasses), 고엔트로피합금(High Entropy Alloys), 클래드 금속, 강도, 성형성

벌크 비정질 합금(Bulk Metallic Glasses), 고엔트로피합금(High Entropy Alloys) 등 다성분계 특수합금은 최근 30여년 간 다양한 조성 조합 및 제조 공정 적용을 통해 수요산업에의 적용 가능성을 적극 타진 중이다. 또한 이종 금속 소재(dissimilar metallic materials)는 상호 배타적인 다기능적 특성을 동시에 발휘하도록 설계된 금속 소재의 대표적인 예로, 해당 금속을 요구하는 수요산업의 특정 요구 사항을 충족하기 위해 다양한 금속(모재 및 클래딩재) 조합에 대한 연구 및 산업 적용이 진행되고 있다. 다만 벌크 비정질 합금과 고엔트로피합금은 고온에서의 결정화, 열기계적 가공 과정에서 원치 않는 상변태 등 최종 제품단 제조에 있어서 기계적 물성 및 성형성에 어려움을 주는 기술적 요소들이 존재한다. 또한 이종금속 사용자가 요구하는 핵심 특성은 이종 금속 자체의 물성, 성형성과 더불어 계면 접합 강도인데, 이는 롤 본딩 공정 조건에 따른 모재 및 계면의 미세조직 변화와 필수불가결한 관계가 있으나 이를 결정하는 메커니즘 및 강화기구에 대한 설명은 제한적으로 보고되어 왔다. 필자는 30여 년의 연구를 통해 다양한 조성의 다성분계 합금 및 다양한 조합의 이종금속 판재의 제조, 물성 및 기계적 특성 평가, 성형성 평가 등을 수행해 왔으며, 대표적인 성공-실패 사례를 소개하고자 한다.

[재료가공2-2 | 15:50] 조청강연

초고내식 클래드용 Zr702 소재의 제조기술과 열간가공 공정 설계: 이현석, 최미선*(포항산업과학연구원(RIST))

Keywords: Zr702, 열간가공성, 가공지도, 유동 불안정성, 동적재료모델

Zr702는 화학 및 에너지 산업의 설비에 사용되는 내식 클래드 소재로서, 진공아크재용해 잉곳을 내부 결함이 없는 건전한 슬라브로 제조하기 위해서는 적정 열간가공 조건의 확립이 요구된다. 본 연구에서는 Gleeble 열가공 모사시험기를 이용하여 550–900 ºC의 온도와 0.1, 1 및 10 s^{-1}의 변형률속도에서 Zr702의 고온 압축시험을 수행하였다. 실험에서 얻은 유동곡선을 동적재료모델에 적용하여 변형률속도 민감도, 동력소산효율 및 유동 불안정 지수를 산출하고 가공지도를 작성하였다. α-Zr 영역인 550–650 ºC에서는 가공경화가 지배적으로 나타났으며, 700–800 ºC에서는 최대 유동응력 이후 점진적인 연화가 관찰되어 동적 복원 거동이 활성화됨을 확인하였다. α→β 변태 온도에 근접한 850 ºC와 β-Zr 영역인 900 ºC에서는 유동저항이 크게 감소하였다. 가공지도와 유동 불안정 기준을 종합한 결과, 850–900 ºC에서 0.1 s^{-1} 및 1 s^{-1} 이상의 조건이 안정 변형영역으로 평가되었다. 한편, 1 s^{-1}에서 650–700 ºC 구간에 나타난 응력 역전과 유동 진동은 안정 유동과 불안정 유동 사이의 천이와 관련되었으며, 10 s^{-1}에서는 변형열에 의한 열적 연화의 영향이 확인되었다. 이상의 결과로부터 내식 클래드 제품용 Zr702 슬라브 제조를 위한 예비 열간단조 공정 윈도우를 제시하였다.

[재료가공2-3 | 16:10] 조청강연

응력이완 실험을 이용한 고망간 TWIP 강의 소성변형 기구 분석: 김정한*(국립한밭대학교)

Keywords: 응력이완, 고망간, TWIP, 재료강도, 소성변형

고망간 TWIP강의 높은 가공경화능은 변형쌍정과 전위 사이의 복합적인 상호작용과 밀접하게 연관되어 있으나, 소성변형 과정에서 작용하는 속도지배 변형기구와 전위장벽의 특성을 정량적으로 규명하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 Fe-29Mn-2.4Al계 완전 오스테나이트 고망간강을 대상으로 반복 응력이완 실험을 수행하고, 활성화 부피, 활성화에너지 및 응력경화지수의 변화를 분석하여 변형 단계별 열적 활성화 소성변형 기구를 규명하였다. 응력이완 시험은 항복점과 진변형률 0.07, 0.13, 0.27 및 0.43에서 수행하였으며, 서로 다른 온도에서 반복적인 응력이완 거동을 측정하였다. 시험온도와 변형응력이 증가할수록 응력강하량이 증가하여 전위의

장벽 극복 과정이 기계적 구동력과 열적 활성화 과정의 영향을 동시에 받는 것으로 나타났다. 변형률 속도와 응력이완량의 관계에서는 고응력 및 저응력의 두 선형 영역과 이들을 연결하는 천이영역이 확인되어, 변형 중 서로 다른 속도지배 전위-장벽 상호작용이 존재함을 보여주었다. 이상의 결과로부터 고망간 TWIP강의 소성변형은 단일 전위기구에 의해 지배되기보다 변형의 진행과 응력 수준에 따라 전위 증식, 전위 핵생성 및 전위-쌍정경계 상호작용이 순차적·복합적으로 작용하는 것으로 해석되었다. 특히 변형쌍정은 단순한 동적 Hall-Petch 장벽으로 작용하는 것뿐만 아니라 쌍정경계 주변의 전위 증식과 고갈을 변화시켜 전위-전위 상호작용을 강화하는 복합 강화효과를 유발하며, 이러한 기구가 고망간강의 높은 가공경화 거동에 중요한 역할을 하는 것으로 판단하였다.

[재료가공3-1 | 16:40] 장영원학술상 수상기념강연

무방향성 전기강판의 미세조직 및 잔류응력이 철손에 미치는 영향: 김주영*(UNIST)

무방향성 전기강판(Non-Oriented Electrical Steel, NOES)은 전기자동차 구동모터 및 고효율 전기기기의 핵심 소재로, 에너지 효율 향상을 위해 철손 저감이 필수적으로 요구된다. 전기강판의 철손은 결정립 크기, 집합조직, 석출물 등의 미세조직적 인자뿐만 아니라 제조공정에서 발생하는 잔류응력에 의해서도 크게 영향을 받는다. 특히 최종 소둔 과정에서 형성되는 표면 산화막과 이에 수반되는 잔류응력은 전기강판의 자기적 특성을 변화시킬 수 있으나, 미세조직 및 응력 상태와 철손 사이의 상관관계에 대한 체계적인 이해는 여전히 부족하다. 본 연구에서는 무방향성 전기강판의 제조공정에 따른 미세조직 및 잔류응력의 변화를 분석하고, 이들이 철손에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 광학현미경, 전자현미경 및 X선 분석을 통해 미세조직과 표면 산화막의 특성을 평가하였으며, 시편의 곡률 변화를 이용하여 표면 산화막에 의한 잔류응력의 영향을 분석하였다. 또한, 표면 산화막의 선택적 제거 전후에 단판자기시험(Single Sheet Test)을 수행하여 철손 변화를 비교하고, 철손 분리 및 마이크로자기 시뮬레이션을 통해 잔류응력이 자구 거동과 에너지 손실에 미치는 영향을 고찰하였다. 분석 결과, 최종 소둔 과정에서 형성된 Al_2O_3 표면 산화막은 전기강판의 탄성 굽힘과 잔류응력 분포에 영향을 미치며, 산화막 제거에 따른 응력 완화는 철손 감소로 이어지는 것으로 나타났다. 특히 전체 철손의 감소는 주로 히스테리시스 손실의 감소에 기인하였으며, 이는 잔류응력이 자벽 이동 및 자화 반전 과정에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 본 연구는 무방향성 전기강판의 미세조직과 잔류응력에 따른 철손 변화의 상관관계를 제시하며, 고효율 전기강판의 제조공정 최적화 및 철손 저감을 위한 방안을 논의한다.

[재료가공3-2 | 17:00] 장영원학술상 수상기념강연

페라이트계 스테인리스강의 집합조직과 소성변형 특성: 박지언*(POSCO)

페라이트계 스테인리스강은 가전 및 주방용품, 자동차 부품 등 다양한 산업 분야에 널리 사용되고 있다. 이러한 산업에서는 항상 미려한 표면 품질과 높은 성형 특성을 요구하고 있으나, 페라이트계 스테인리스강은 오스테나이트계 대비 상대적으로 부족한 재결정과 낮은 연신율로 인해 더 높은 수준의 제조기술이 요구된다. 특히, 내부 조직의 집합조직은 최종 제품의 성형 특성 뿐만 아니라 표면 품질에도 영향을 주기 때문에 페라이트계 스테인리스강의 집합조직을 제어하는 것이 핵심 기술이라고 할 수 있다. 성형성을 향상하기 위해서는 소성 이방성 지수(R값)가 높은 γ-fiber({111}//ND) 집합조직의 형성을 유도해야 하고, 표면에 리징 줄무늬 저감을 위해서는 압연방향으로의 집합조직의 불균일을 줄여야 한다. 이를 위해서는 주조시에 형성된 조직을 최대한 재결정 시켜 유리한 집합조직으로 전환해야 한다. 이를 위해 성분적으로 Ti 및 Nb를 미량 활용하여 재결정을 촉진시키고, 주조 조직도 미세한 등축정 형성을 유도하고, 열연에서는 조압연 구간에서 재결정 촉진 및 마무리 압연 구간에서 변형에너지 축적을 높여 후공정에서 최대한 재결정이 되도록 제어한다. 이를 통해 적정한 후속 열처리 및 냉연을 거쳐 미려한 표면 품질과 우수한 성형성을 확보할 수 있게 된다.

[재료가공3-3 | 17:20] 초청강연

BCC 철의 고용강화와 연화에 대한 연구 동향: 고전적 탄성론에서 원자론·전자구조 해석으로의 확장: 전종배*(동아대학교 신소재공학과)

Keywords: BCC 철, 치환형 고용강화, 고용연화, 나선전위, Peierls 장벽, kink-pair 핵생성, 자성

체심입방(body-centered cubic, BCC) 철에서 치환형 용질에 의한 고용강화와 연화는 합금의 저온 강도, 연성 및 온도 의존적 소성 거동을 결정하는 중요한 현상이다. 전통적인 고용강화 이론은 용질 원자의 크기 및 탄성 불일치로 형성되는 장거리 응력장과 전위 사이의 상호작용을 중심으로 발전해 왔다. 그러나 1/2<111> 나선전위의 탄성장은 정수압 성분이 작기 때문에, 이러한 접근만으로는 BCC Fe 합금에서 관찰되는 강한 용질 효과와 합금원소별 강화·연화 경향을 일관되게 설명하기 어렵다. 본 발표에서는 BCC Fe의 치환형 고용강화와 연화에 관한 실험적 연구, 원자론 계산 및 전자구조 연구를 종합적으로 검토한다. 초기의 저온 기계적 시험에서는 합금 조성, 온도 및 변형률 속도에 따라 용질의 강화 효과가 현저히 달라지는 것으로 보고되었다. 이후 투과전자현미경 관찰과 원자론 연구를 통해 BCC Fe의 저온 소성이 비평면적 코어 구조를 갖는 1/2<111> 나선전위의 열활성 이동에 의해 지배되며, 전위 이동은 주로 kink-pair의 핵생성과 확장을 통해 진행되는 것으로 이해되고 있다. 최근의 밀도범함수이론 연구는 전위의 장거리 탄성장뿐 아니라 코어 부근의 국소 화학결합과 자기적 상호작용이 치환형 용질의 거동에 중요한 영향을 미친다는 사실을 보여준다. 특히 Fe–Cr, Fe–Mn, Fe–Co 및 Fe–Ni 계에서는 용질의 종류와 Fe 기지의 자기 상태에 따라 나선전위 easy-core에 대한 편석 경향과 결합에너지가 크게 달라질 수 있다. 이러한 결과는 BCC Fe의 고용강화를 단순한 크기 불일치만으로 해석하기 어렵다는 점을 뒷받침한다. 그러나 기존 연구의 상당수는 안정한 easy-core에서 계산된 정적 용질–전위 결합에너지에 집중하였다. 정적 결합에너지는 용질의 편석 가능성을 평가하는 데 유용하지만, 전위가 Peierls 장벽을 통과할 때 용질이 이동 장벽과 kink-pair 핵생성 에너지를 어떻게 변화시키는지를 직접적으로 나타내지는 않는다. 용질이 easy-core와 saddle configuration을 서로 다른 정도로 안정화한다면, 강한 easy-core 결합이 반드시 높은 이동 저항으로 이어지지 않을 수 있다. 기존 문헌을 종합하면 BCC Fe의 고용강화와 연화는 탄성적 크기 효과, 전위 코어의 국소 구조 변화, 화학결합 및 자기적 재배열이 경쟁한 결과로 이해할 필요가 있다. 특히 용질이 easy-core에서 saddle configuration에 이르는 전이 경로의 에너지를 어떻게 변화시키는지가 Peierls 장벽과 kink-pair 활성화 엔탈피를 결

정하는 핵심 요소로 판단된다. 따라서 향후 연구에서는 정적 결합에너지뿐 아니라 전이 경로에 따른 에너지 변화, 국소 자기모멘트, 스핀 분해 상태밀도 및 전하·스핀 밀도 재배열을 함께 분석해야 한다. 또한 이러한 원자 수준의 정보를 line-tension 모델과 연계하여 응력·온도·변형률 속도에 따른 유동응력으로 변환하는 다중스케일 접근이 요구된다. 본 발표는 관련 연구의 발전 과정과 현재의 이론적 한계를 정리하고, BCC Fe 합금의 고용강화와 연화를 통합적으로 설명하기 위해 필요한 후속 연구 방향을 제시한다.

[재료가공3-4 | 17:40] 조청강연

가스터빈 고온부품의 미세조직 열화거동 및 재생정비를 통한 미세조직 회복거동: 정중은*, 김인수, 도정현, 이상원, 최백규, 정인용(한국재료연구원)

Keywords: 가스터빈, 초내열합금, 재생열처리, 미세조직, 크리프 특성

Ni기 초내열합금은 γ 기지 내에 정합 석출된 γ′상을 주요 강화상으로 활용함으로써 고온에서 우수한 강도와 크리프 저항성을 확보하며, 가스터빈 터빈 블레이드 및 베인과 같이 고온, 고응력 환경에 노출되는 핵심 부품에 널리 적용되고 있다. 그러나 장시간 운전 과정에서 열적·기계적 하중이 누적됨에 따라 γ′상의 조대화 및 rafting, TCP 상 형성, 탄화물 반응 및 입계 탄화물의 변화, 산화와 합금원소 고갈, 크리프 void 및 균열 등 다양한 미세조직 열화가 발생한다. 이러한 변화는 합금의 고온강도와 크리프 저항성을 저하시켜 부품의 잔여수명과 신뢰성에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로, 고가의 가스터빈 고온부품을 안정적으로 재사용하기 위해서는 열화기구에 대한 이해와 함께 재생열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성의 회복 가능성을 정량적으로 평가할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 장시간 사용된 다결정 및 단결정 터빈 블레이드를 대상으로 사용 중 미세조직 열화와 재생열처리에 따른 회복거동을 고찰하였다. 48, 000EOH 동안 사용된 Mar-M-247 블레이드의 경우 재생열처리 후 조대화된 primary γ′의 크기가 감소하고 미세한 secondary γ′이 재석출되는 등 γ/γ′ 미세조직의 회복이 관찰되었다. 이와 함께 크리프 파단수명이 사용품 대비 재생품에서 뚜렷하게 증가하여, 미세조직 회복이 고온 기계적 특성의 회복으로 연결될 수 있음을 확인하였다. γ′ solvus 온도를 고려한 재생열처리 적용에 따라 단결정 부품에서도 미세조직 회복 및 크리프 파단수명 향상이 확인되었으나, 제조공정에 기인한 표면 재결정이 나타나 재생 공정 적용에 한계가 있음을 확인하였다. 본 발표에서는 이러한 미세조직 열화와 크리프 특성 저하의 상관관계 및 재생열처리에 의한 회복거동과 한계점에 대해 살펴보고자 한다.

가공-열처리
Room 1층 101호, 10월 29일

[열처리1-1 | 09:00]
용체화 온도가 Ni-38Cr-3.8Al 합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향: 윤성민, 이제인*(부산대학교)
Keywords: 배기밸브 스핀들, 라멜라 구조, 용체화 온도

Ni-38Cr-3.8Al 합금은 고강도 (~2 GPa)를 가지면서 부식 저항성이 뛰어나 고온 고압의 환경에 노출되는 선박 엔진용 배기밸브 스핀들 소재로서 각광받고 있다. 본 합금의 높은 강도는 초기 γ 상의 결정립계로부터 α/γ가 불연속적으로 석출되어 형성되는 라멜라 구조에 기인한다. 하지만 라멜라 구조는 높은 취성을 가져 가공성을 저해하기 때문에 고강도 고연신 특성을 갖는 합금 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 Ni-38Cr-3.8Al 합금을 진공유도용해로를 통해 주조한 후, 1200 ℃, 8시간의 균질화열처리 후 두께 감소율 70 %로 냉간압연 하였다. 용체화 열처리는 1020, 1160 그리고 1200 ℃에서 1시간, 시효처리는 800, 900 ℃에서 16시간 수행하고, 인장 시험을 통해 기계적 특성을 평가하였다. 용체화열처리 온도가 증가할수록 시효처리 후 라멜라 간격과 구형 α-Cr의 직경이 감소하였다. 일반적으로 라멜라 간격이 미세 할수록 합금의 강도는 증가하지만, 연신율은 감소하는 것으로 알려져 있다. 하지만 용체화 온도를 최적화하였을 때 합금의 강도와 연신율이 모두 높은 독특한 거동을 확인하였다. 본 연구에서는 용체화 온도에 따른 미세조직의 변화와 인장 특성을 정량적으로 평가하였다.

[열처리1-2 | 09:15]
Pd-Cu-Ag 합금 와이어의 비혼화 간극(Miscibility Gap)에 따른 상분리가 시효 경화 및 기계적·전기적 특성에 미치는 영향: 이승준(한국재료연구원, 동아대학교), 양우석(한국재료연구원), 문정탁, 이석연(MKE전자), 신다슬*, 민경문*(한국재료연구원), 전종배*(동아대학교)
Keywords: 포고핀, Pd-Cu-Ag합금, 비혼화간극, 석출상, 용체화 열처리

최근 반도체 시장이 세계적으로 넓혀지는 추세에 반도체 검사용 포고핀(Pogo Pin)은 고집적화 및 고내구성 요구하고 있으며, 우수한 기계적 강도와 높은 전기 전도성을 동시에 만족하는 Pd-Cu-Ag계 합금 와이어 소재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 해당 합금계는 시효 과정에서 형성되는 시효 석출상에 따라 최종 기계적 · 전기적 물성 변화 거동이 현저한 차이를 보인다. 그러나 열처리 조건에 따라 상태도상 비혼화 간극(Miscibility gap) 영역으로 진입하면서 상분리가 발생하며, 이로 인한 미세조직적 변화가 시효 과정 중 β상의 형성 거동 및 최종 물성에 미치는 영향에 대한 정밀한 규명이 요구된다. 따라서 본 연구는 포고핀용 40wt.%Pd-30wt.%Cu-30wt.%Ag 합금 와이어를 대상으로, 비혼화 간극을 고려한 용체화 열처리 조건이 Ag-rich(αAg) 및 Cu-rich(αCu) FCC 2상의 형성, 상분율, 화학조성, 분포 및 결정립 구조에 미치는 영향을 규명하고자 한다. 또한 서로 다른 용체화 조건에서 형성된 2상 조직에 후속 시효 열처리를 적용하여, β / β’ CuPd 규칙상의 형성거동과 시효경화 및 전기 비저항 변화를 분석하였다. 이를 통해 용체화 열처리에 의해 형성된 초기 2상 조직과 후속 시효반응 및 최종 기계적·전기적 특성 간의 상관관계를 도출하고, 고경도와 낮은 전기 비저항을 동시에 확보할 수 있는 차별화된 열처리 공정 조건을 제시하고자 한다. 실험 결과, 특정 열처리 조건에서 비혼화 간극에 의해 미세한 αAg 및 αCu상으로의 상분리가 촉진됨을 확인하였다. 상분리로 형성된 두 상 내부에서 시효 진행에 따른 상변태 및 미세조직 변화를 정밀 분석한 결과, 이러한 상분리 조직이 핵심 강화상인 β상의 형성 거동을 제어하는 주요 인자임을 규명하였다. 특히 400℃ 시효 열처리 구간에서 상분리 및 β상 형성 제어를 통해 기존 용체화 시편 대비 약 150 Hv 상승한 560 Hv의 최고 경도를 달성하였다. 최종적으로 β상 제어를 통해 기계적 경도와 전기 비저항 특성이 동시에 최적화되는 열처리 조건을 도출하였다.

[열처리1-3 | 09:30] [Canceled]
V 첨가가 고속도강의 뜨임연화저항에 미치는 영향 분석: 최재영(영남대학교 신소재공학과), 이준오, 박노근*(영남대학교 신소재공학부)

[열처리1-4 | 09:45]
고질소 오스테나이트계 스테인리스강의 합금원소 함량에 따른 시효 중 석출 거동 및 기계적 특성: 김승현(한국재료연구원, 동아대학교), 김성훈*, 이태호, 이진종, 조효행(한국재료연구원), 정재석(두산에너빌리티), 전종배*(동아대학교)
Keywords: 고질소 오스테나이트계 스테인리스강, 석출, 기계적 물성

오스테나이트계 스테인리스강은 우수한 크리프 저항성, 내식성, 내산화성 및 고온 조직 안정성을 갖는다. 그러나 승온 및 냉각 과정에서 상변태가 발생하지 않기 때문에 열처리를 통한 강화 효과를 얻기 어렵다. 이러한 한계를 보완하기 위해 질소를 첨가할 수 있으며, 질소 첨가는 고용강화뿐만 아니라 결정립 미세화와 오스테나이트 안정성 향상에도 기여할 수 있다. 한편, 고질소 오스테나이트계 스테인리스강이 고온 환경에 노출될 경우 Cr_2N, Z-phase 및 σ-phase와 같은 석출상이 형성될 가능성이 있다. 이러한 석출상은 기지 내 합금원소의 고갈을 유발하여 내식성을 저하시킬 수 있으며, 기계적 물성에 영향을 미칠 수 있다. 특히 석출 거동은 강의 합금 조성에 민감하게 변화할 수 있으므로 합금원소 함량에 따른 석출상의 형성 거동과 이에 수반되는 기계적 특성 변화를 규명할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 N과 Nb 함량이 서로 다른 고질소 오스테나이트계 스테인리스강에 동일한 조건의 고온 장시간 시효 열처리를 실시하고, N 및 Nb 함량이 석출 거동과 기계적 특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 본 연구에서는 Fe-22Cr-

12Ni-5Mn-2Mo의 기반 조성으로 하여 N, Nb 및 V 함량을 변화시킨 3종의 합금을 제작 후 1080 ºC에서 용체화처리를 하였다. 이후 900 ºC에서 최대 100시간 동안 진공 봉입 환경에서 시효를 수행하였다. Thermo-Calc 를 통하여 열처리 조건을 설계하였고, OM, SEM, TEM-EDX 및 EPMA 분석 그리고 MatCalc 시뮬레이션을 통해 미세조직 변화와 석출 거동을 규명하였으며, 이에 따른 기계적 물성 변화를 인장 시험을 통해 평가하였다. 초기 용체화처리 상태에서는 N과 Nb 함량이 높을수록 항복 강도 및 인장강도가 증가하였으나, Nb 함량이 높은 조성에서는 Nb함량이 낮은 두 강종에 비해 낮은 연신율을 보였다. 900 ºC 시효 시, 상대적으로 N 및 Nb 함량이 낮은 조성에서는 초기 MX상이 석출되었으나 시효 100시간 후 σ-phase으로 형성되어 연신율이 급격하게 저하되었다. 질소 함량이 높은 조성의 경우, 시효 초기부터 입계에 Cr_2N이 다량 석출 및 포화되어 연신율이 하락 후 최종 100시간까지 정체되는 양상을 보였다. 반면 N 및 Nb 함량이 높은 합금에서는 입계에 Cr_2N이 일부 존재함에도 불구하고 열적으로 안정한 Z-phase가 지배적으로 석출되었으며, 100시간 시점에서는 입내 석출이 동반되면서 연신율이 다시 회복되었다. 이상의 결과는 N과 Nb 함량이 900 ºC 시효 중 Cr_2N, Z-phase 및 σ-phase의 석출 거동을 변화시키며, 석출상의 종류와 분포가 고질소 오스테나이트계 스테인리스강의 항복강도 및 연신율에 중요한 영향을 미침을 보여준다.

[열처리 1-5 | 10:00]

바나듐 및 크롬 첨가 고망간강의 열처리 온도에 따른 탄화물 석출 거동, 미세조직 및 기계적 물성 분석: 양승우, 송호정(동아대학교 금속공학과), 박시욱, 김용진(국방과학연구소), 박건우(울산과학기술원 신소재공학과), 소태일(포스코 기술연구원), 장재훈(동아대학교 컴퓨터공학과), 전종배*(동아대학교 금속공학과)

Keywords: 고망간강, 열처리 온도, 미세조직 변화, 탄화물 석출 거동, 재결정

고망간강(High-Mn steel)은 약 20–30 wt.%의 Mn을 함유하는 오스테나이트계 강으로, 우수한 극저온 인성과 높은 인장강도를 바탕으로 LNG 저장탱크 등의 극저온 구조용 소재로 주목받고 있다. 그러나 면심입방구조에 기인한 상대적으로 낮은 항복강도는 구조재 적용의 한계로 작용하며, 극저온 인성을 유지하면서 항복강도를 향상시키기 위한 미세조직 제어가 요구된다. 이를 위해 V 및 Cr 첨가와 후속 열처리를 통한 탄화물 석출 제어가 활용될 수 있으나, 입내 VC에 의한 석출강화와 입계 Cr계 탄화물에 의한 취화가 열처리 온도에 따라 기계적 특성에 미치는 영향을 종합적으로 분석한 연구는 부족하다. 본 연구에서는 V 및 Cr이 첨가된 열간압연 고망간강을 500–1000 ºC에서 30 min 동안 열처리한 후 수냉하여, 열처리 온도에 따른 탄화물 석출 거동, 미세조직, 파괴 거동 및 기계적 물성의 변화를 분석하였다. Thermo-Calc 및 TC-PRISMA 계산과 SEM-EDS, TEM 및 EBSD 분석을 통해 탄화물과 미세조직 변화를 분석하였으며, 상온 인장시험과 −84 ºC Charpy 충격시험을 수행하였다. SEM-EDS 분석 결과, 열처리 온도에 따라 결정립계에서 V-rich 및 Cr-rich 석출물이 관찰되었으며, 대표 조건의 TEM 분석을 통해 각각 VC와 $M_{23}C_6$ 탄화물로 동정하였다. 특히 600–800 ºC에서는 결정립계 $M_{23}C_6$의 석출과 조대화가 두드러졌으며, 800 ºC에서 결정립계 석출물의 평균 반경과 피복률이 최댓값을 나타냈다. EBSD 분석 결과, As-rolled 및 500–800 ºC 조건에서는 연신된 압연 조직이 유지되었으나, 900 ºC에서는 부분 재결정, 1000 ºC에서는 완전 재결정이 발생하였다. 항복강도는 600–800 ºC에서 증가하여 800 ºC에서 최댓값을 나타낸 반면, 연신율과 −84 ºC 충격에너지는 최솟값을 보였다. 또한 700 및 800 ºC 조건에서는 입계 파괴가 우세하게 나타났다. 이는 입내 VC 증가에 따른 석출강화와 결정립계 $M_{23}C_6$의 석출·조대화가 각각 강도 향상과 연성·인성 저하에 기여했기 때문으로 판단된다. 반면 900–1000 ºC에서는 재결정에 따른 GND density 감소로 항복강도가 저하되었으며, 입계 석출물 감소와 재결정에 의해 연신율과 충격인성이 회복되었다. 따라서 V–Cr 첨가 고망간강의 강도–인성 균형은 열처리 온도에 따른 입내 VC 석출, 입계 $M_{23}C_6$ 형성 및 재결정 거동의 복합적 영향에 의해 결정되는 것으로 판단된다.

[열처리 2-1 | 10:25]

ϕ1.74 mm 저탄소 용접 와이어의 열처리에 따른 연화 거동: 이종혁, 이수연, 장병록*(인하대학교 제조혁신전문대학원)

Keywords: 용접 와이어, 가공성, 열처리, 베이나이트, 재결정

자동차 및 산업용 부품의 경량화와 내구성 향상 요구가 증가함에 따라 초고강도강의 적용 범위가 확대되고 있으며, 이에 대응하기 위한 기가급 용접 와이어 소재의 개발 필요성이 높아지고 있다. 이러한 초고강도 용접 와이어는 높은 강도와 우수한 접합 성능을 확보할 수 있는 장점이 있으나, 다량의 합금원소 첨가에 따른 높은 경도로 인해 신선 및 성형 공정 중 가공성 저하, 금형 마모, 생산성 감소 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 초고강도 용접 와이어의 안정적인 제조를 위해서 적절한 연화 열처리 조건을 확립하는 것이 중요하다. 이를 위해 초고강도 자동차용 ϕ1.74 mm 용접 와이어 개발강종을 대상으로 열처리 온도 구간에 따른 연화 거동과 미세조직 변화를 분석하였다. DSC 분석을 통해 측정된 Ac1 및 Ac3 온도는 각각 709 ºC와 880 ºC였으며, 이를 기준으로 subcritical annealing, intercritical annealing 및 오스테나이징 열처리 조건을 설정하였다. subcritical annealing은 600, 640, 680 ºC에서 6h, intercritical annealing은 720, 760, 800, 850 ºC에서 6h, 오스테나이징 열처리는 900, 950, 1000 ºC에서 2h 동안 수행하였으며, 모든 조건에서 열처리 후 로냉하였다. 원소재는 탄소 함량이 0.1 wt% 이하인 저탄소강임에도 불구하고 Cr, Mo, Ni, Ti, V 등의 합금원소 첨가에 따른 경화능 증가로 베이나이트 미세조직을 나타냈으며, 441 HV의 높은 경도를 보였다. 열처리 후 미세조직 관찰과 경도 측정을 통해 연화 효과를 비교한 결과, Ac1 이하에서 수행한 subcritical annealing 조건에서 가장 우수한 연화 거동이 확인되었다. subcritical annealing 후 경도는 약 230–250 HV 수준까지 감소하였으며, 이는 원소재 대비 약 43–48%의 경도 감소에 해당한다. 이러한 연화는 오스테나이트 형성 없이 기존 베이나이트 조직 내에서 진행된 합금원소 재분배, 회복 및 부분 재결정에 기인한 것으로 판단된다. 반면, intercritical annealing과 오스테나이징 열처리에서는 부분 또는 완전 오스테나이징에 따른 미세조직 재구성이 발생하여 subcritical annealing에 비해 연화 효과가 제한적이었다. 따라서 본 연구 결과는 초고강도 자동차용 용접 와이어의 과도한 상변태를 억제하면서 경도를 효과적으로 낮출 수 있는 열처리 방법으로서 Ac1 이하 subcritical annealing이 적합함을 보여주며, 기가급 용접 와이어 제조 공정의 생산성 및 품질 안정성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[열처리2-2 | 10:40]

표면 산화층이 냉간압조용 0.3C 중탄소강의 탈탄 및 소입 경도에 미치는 영향: 이수연, 이종혁, 장병록, 김광육*(인하대학교 제조혁신전문대학원)

Keywords: Cold heading quality, Medium-carbon steel, Spheroidizing annealing, Oxidation, Decarburization, Quenching, Hardness

냉간압조용 중탄소강은 냉간가공성 확보를 위해 구상화 열처리가 적용되며, 이후 신선, 냉간단조, 소입 및 템퍼링 공정을 거쳐 최종 기계적 특성을 확보한다. 이 과정에서 강재 표면에 형성되는 산화층과 탈탄층은 후속 열처리 시 미세조직 형성과 경도에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 약 0.3 wt.% C를 함유하는 냉간압조용 중탄소강의 냉간단조 완료 시편을 대상으로, 초기 표면 산화 상태와 후속 열처리 후 탈탄층 형성 및 경도 변화의 관계를 분석하였다. 냉간단조 상태의 초기 산화층을 분석한 후 동일 조건으로 오스테나이징 및 오일 퀜칭을 실시하였다. OM과 SEM을 이용하여 열처리 전·후 산화층과 탈탄층의 형상 및 두께를 비교하고, SEM-EDS로 표면층의 원소 조성을 분석하였다. 이후 미세조직 관찰과 비커스 경도 측정을 통해 표면 상태에 따른 경화 특성을 평가하였다. 단조 상태에서 산화층이 상대적으로 얇은 시편군의 평균 산화층 두께는 약 4.1~7.1 μm, 산화층이 상대적으로 두꺼운 시편군은 약 8.6~16.1 μm로 나타났다. 열처리 후 얇은 산화층 시편에서는 1~3 μm의 산화층과 90 μm의 완전 탈탄층(ferrite decarburization layer, 이하 FD) 및 185 μm의 총 탈탄 깊이(total decarburization depth, 이하 TD)가 관찰된 반면, 두꺼운 산화층 시편에서는 산화층이 최대 15~26 μm, FD와 TD가 각각 최대 119 μm와 297 μm까지 나타났다. 소입 후 얇은 산화층 시편의 경도는 약 385~548 HV, 두꺼운 산화층 시편은 약 205~295 HV로 측정되었다. 두꺼운 산화층 시편에서 상대적으로 발달한 산화 및 탈탄층은 낮은 소입 경도와 연관되었으며, 특히 탈탄에 따른 표면 탄소 농도 감소가 마르텐사이트 형성 및 경도 저하에 영향을 미친 것으로 판단된다. 이는 동일한 후속 열처리 조건에서도 초기 표면 상태에 따라 탈탄층 형성과 소입 경도에 큰 차이가 나타났으며, 이는 열처리 전 표면 상태가 이후 탈탄층 형성과 경도 차이에 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

[열처리2-3 | 10:55]

순환성 원소 함유 강의 산화 및 고온 변형 조건에 따른 고온취성 거동 및 발생 기구: 김우진(한국재료연구원, 부산대학교), 김성훈, 장여진, 유지성(한국재료연구원), 권순환, 신명철, 조종오(현대제철), 박형권*(한국재료연구원), 강남현*(부산대학교)

Keywords: 전기로, 순환성 원소, 고온취성, 열간 압연

전 세계적인 탄소중립 기조에 따라 철강 산업은 고로 중심 공정에서 전기로 중심 공정으로 빠르게 전환되고 있으며, 이에 따라 철스크랩 수요가 급증하고 있다. 그러나 스크랩 사용량 증가는 필연적으로 저급 스크랩의 혼입을 수반하며, 스크랩에 포함된 구리(Cu), 주석(Sn) 등의 순환성 원소는 제강 및 열간가공 공정에서 심각한 고온취성을 유발하여 최종 제품의 품질 저하를 초래한다. 본 연구에서는 Cu–Sn 복합 첨가강을 대상으로 표면 고온취성 거동을 정량적으로 평가하고, 미세조직 분석을 통해 균열 발생 메커니즘을 규명함으로써 저급 스크랩 활용 확대를 위한 기술적 기초자료를 제공하고자 하였다. 이를 위해 Gleeble 장비를 활용하여 선행산화 조건, 열간압연 온도, 변형속도를 다변수로 제어한 실험을 설계하고, 각 조건에서의 균열 발생 거동을 통계적으로 분석하여 고온취성을 회피할 수 있는 공정 조건을 도출하였다. 그 결과, 약 1025 ºC의 선행산화 조건에서 고온취성이 가장 심화되는 반면, 1100 ºC 이상의 고온 변형 조건에서는 오히려 취성이 감소하는 비선형적 거동이 확인되었다. 이는 고온취성이 온도에 단순 비례하여 나타나는 것이 아니라, 산화 조건과 변형 조건의 상호작용에 의해 결정됨을 보여주는 결과로, 기존의 단순 온도 의존적 해석과 차별화된다. 본 연구는 다양한 품질의 철스크랩을 활용하는 강재에서도 공정 변수 제어를 통해 고온취성 문제를 완화·회피할 수 있음을 제시함으로써, 전기로 기반 고급 판재 생산 기술 확보 및 원료 활용 유연성 확대에 기여할 것으로 기대된다.

[열처리2-4 | 11:10]

저항복비 확보를 위한 고강도 후판의 열처리 조건별 특성 평가: 유재홍, 김영준, 송준무, 한성경*(현대제철)

Keywords: 고강도, 열처리, 저항복, 미세조직

고강도 열처리형 강재는 일반적으로 QT 공정을 통해 제조되며, 템퍼드 마르텐사이트 기반 조직에 의해 우수한 강도와 인성을 확보한다. 그러나 높은 항복강도로 인해 항복비가 증가하는 경향을 나타내며, 이는 재료의 변형 거동 제어 측면에서 한계로 작용할 수 있다. 이에 따라 강도, 인성 및 항복비를 동시에 제어하기 위한 미세조직 설계 및 열처리 기술에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 이상역 열처리는 기존 템퍼드 마르텐사이트 조직 내 연질상의 도입 및 분율 제어를 통해 항복강도를 선택적으로 감소시켜 저항복비 특성을 부여할 수 있는 공정으로 알려져 있다. 본 연구에서는 다양한 열처리 조건에 따른 미세조직 변화와 기계적 특성을 평가하였으며, 이를 바탕으로 저온인성과 저항복비를 동시에 확보할 수 있는 열처리 공정을 도출하고 그 효과를 분석하였다.

[열처리2-5 | 11:25]

금속간화합물 형상이 냉간압연된 6xxx계 알루미늄 합금 판재의 정적 재결정 거동에 끼치는 영향: 조상현(한국생산기술연구원), 박지욱(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교), 이미영(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교, 한국과학기술연구원), 박예린, 신우승(한국생산기술연구원), 김재황*(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교, 한국과학기술연구원, 전북대학교)

Keywords: 알루미늄 합금, 금속간화합물, 균질화, 냉간압연, 정적 재결정

6xxx계 알루미늄 합금의 정적 재결정 거동은 냉간가공으로 축적된 저장에너지와 금속간화합물에 의한 전위 및 입계이동 저항의 경쟁에 의해 결정된다. 기존 연구에서는 입자의 평균 크기, 체적분율 및 입자 간격을 이용하여 입자 효과를 전체 재결정 속도의 변화로 설명해 왔다. 그러나 이러한 평균화된 접근은 입자의 형상과 연결성에 따른 국부 구속 효과를 충분히 반영하지 못하며, 개별 전위의 소멸, 저경각입계(LAGB)의 이동과 아결정립 성장, 고경각입계(HAGB)의 이동과 재결정립 성장이 서로 다른 속도로 진행될 가능성을 구분하기 어렵다. 본 연구에서는 균질화 조건에 따라 형성되는 금속간화합물(IMC)의 형상이 후속 냉간압연 및 정적 재결정의 각 단계를 어떻게 제어하는지를 규명하였다. 골격형 IMC를 갖는 1-step 조건과 Chinese-script형 IMC를 갖는 2-step 조건을

구성하고, 동일한 냉간압연, 등온 어닐링을 적용하였다. 압연 전후 IMC의 형태학적 변화를 분석하고, 전위밀도와 국부 KAM 분포, LAGB 및 HAGB 분율, GOS 기반 재결정 분율, 결정립 크기와 집합조직의 시간적 변화를 종합적으로 비교하였다. 분석 결과, 어닐링 과정에서 1-step 조건은 전위 소멸, LAGB 변화 및 재결정립 성장이 비교적 연계된 반면, 2-step 조건에서는 이들 지표의 변화 시점이 일치하지 않는 독립적 거동이 뚜렷하게 나타났다. 2-step 350 ℃ 조건에서 국부 변형과 LAGB가 잔류하거나 일시적으로 증가하는 동안 HAGB 형성과 재결정립 성장이 지연되어, 군집화된 IMC 파편과 분산상이 전위 소멸, 아결정립 성장 및 재결정립 성장을 독립적으로 제한함을 시사하였다. 이러한 결과는 재결정 거동이, 압연 전 IMC의 형상 자체보다 압연 후 형성된 입자–변형조직의 구조에 의해 결정될 수 있음을 보여준다. 본 연구는 기존의 평균 입자 변수 해석을 전위 소멸–아결정립 성장–재결정립 성장의 단계별 분리 관점으로 확장하며, 균질화–압연–어닐링 과정에서 6xxx계 알루미늄 합금의 재결정 거동을 이해하고 제어하기 위한 새로운 해석 체계를 제공한다.

수소 및 청정에너지 환경 대응 표면▪계면 제어 소재기술
Room 1층 101호, 10월 29일

[청정1-1 | 13:30] 초청강연

수소 생산저장 인프라 적용을위한 Zn-Ni/Ni 다층도금의 내식성 및 수소취성 억제 거동 연구: 이정훈(국립부경대학교 금속공학전공)

Keywords:

수소 생산·저장 인프라에 사용되는 철강 소재는 염화물과 수분이 존재하는 환경에서 부식과 수소 유입이 동시에 발생할 수 있으며, 이는 설비의 장기 내구성과 구조적 신뢰성을 저하시키는 주요 원인이 된다. 본 연구에서는 철강 표면의 내식성을 향상시키고 수소 유입 가능성을 줄이기 위해, 단일 Zn–Ni 도금욕에서 전류밀도를 정밀하게 조절하여 Zn–Ni 합금층과 Ni층이 교대로 배열된 총 두께 12 μm의 다층도금층을 형성하였다. 적층 수는 6, 12, 24 및 48층으로 조절하였으며, 주사전자현미경, 에너지 분산형 X선 분광법 및 X선 회절법을 이용하여 도금층의 미세구조, 조성 분포 및 결정상을 분석하였다. 또한, 3.5 wt.% NaCl 용액에서 동전위 분극시험과 전기화학적 임피던스 분광법을 수행하고, ASTM B117에 따른 염수분무시험과 부식 깊이 분석을 통해 다층 구조에 따른 보호 성능을 비교하였다. 그 결과, 12층 구조가 가장 우수한 내식성을 나타냈으며, 이는 Zn–Ni층의 희생양극 보호 효과와 Ni층의 물리적 장벽 효과가 복합적으로 작용하고, 다층 계면이 부식성 이온의 이동 경로를 복잡하게 하여 기재까지의 부식 진행을 지연시켰기 때문으로 판단된다. 반면, 적층 수가 과도하게 증가하면 개별 층의 두께 감소, 계면 불균일성 및 잔류응력 증가로 인해 보호 성능이 저하될 수 있었다. 이러한 최적화된 다층 구조는 부식반응과 기재 노출을 억제함으로써 수소 발생 및 철강 내부로의 수소 유입을 감소시킬 가능성이 있으며, 결과적으로 수소취성 저감에도 기여할 수 있다. 본 연구는 단일 도금욕 기반 Zn–Ni/Ni 다층도금이 수전해 설비, 수소 배관 및 저장용 부품에 적용되는 철강 소재의 내식성과 장기 신뢰성을 향상시키기 위한 유망한 표면처리 기술임을 제시한다.

[청정1-2 | 13:55] 초청강연

알칼라인 수전해를 위한 니켈 기반 대면적 전극 표면처리 기술개발 및 분리판 가혹평가 시험 연구: 배상현*, 김형찬*(한국생산기술연구원)

Keywords: 그린수소, 수전해, 전극, 분리판, 표면처리

탄소중립 실현과 그린수소 생산 확대를 위한 기술로 알칼라인 수전해가 주목받고 있다. 알칼라인 수전해는 비귀금속 촉매를 적용할 수 있고 시스템 구축 비용이 비교적 낮다는 장점이 있으나, 고전류 조건에서 장시간 운전 시 발생하는 전극의 열화 및 분리판의 부식에 의한 수전해 시스템 효율 저하 문제가 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 이를 해결하기 위하여 높은 촉매 활성과 장기 안정성을 갖는 니켈 기반 물 산화 전극 설계 및 분리판 소재의 내구성을 단기간에 검증할 수 있는 가혹평가 프로토콜 개발 연구를 수행하였다. 전극 개발에서는 니켈계 전극 소재 표면 미세 구조 형성 및 전기화학적 활성점 증대를 통해 산소발생반응의 활성 및 장시간 운전 안정성 향상을 도모하였다. 특히 간단한 원스텝(one-step) 증착 공정을 이용한 전극 표면 개질을 통해 제조 공정을 단순화하고, 향후 대면적 전극으로의 확장 가능성 또한 제시하였다. 분리판 소재는 고농도 알칼리 전해질과 고온·고압의 가혹 환경에 장시간 노출한 후, 전기화학적 부식 특성과 물성 변화를 종합적으로 분석하였다. 이를 기반으로 알칼라인 수전해 운전환경에 적합한 분리판 소재를 선정하고, 소재별 내구성을 평가하기 위한 기준을 마련하고자 하였다. 본 연구에서 제안한 니켈 기반 전극 설계 전략과 분리판 가혹평가 기술은 향후 산업용 알칼라인 수전해 전극 및 스택의 소재 선정과 구성요소 최적화에 활용되어 시스템 효율 및 장기 신뢰성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[청정1-3 | 14:20] 초청강연

친환경 연료 환경 수소 부식 대응 고내식 코팅기술 및 자동차 코팅 최신기술: 차성철*(현대자동차그룹-현대케피코), 문경일, 권기훈(한국생산기술연구원)

Keywords: 바이오에탄올, 수소 부식, taC 코팅, 비전시스템, 초저마찰 코팅

자동차 산업은 2035년부터 2045년까지 탄소배출 90% 이상 저감을 목표로 하고 있으며, 이를 달성하기 위한 핵심 기술로 Multipass, 바이오연료가 자율주행 센서 및 인프라 기술과 함께 활발히 개발중이다. 이퓨얼(e-Fuel)의 세계 생산 용량은 2035년까지 1, 000억 리터 규모로 급증할 것으로 예상되고, 아울러 바이오에탄올 역시 원료 고도화 및 3세대 해조류 기반 연구 개발이 진행 중이다. 본 논문에서는 바이오에탄올 연료의 국가별 특성과 영향성을 분석하고, 수소와 수산화물에 기인한 부식 문제의 원인과 해결책을 소개하고자 한다. 바이오에탄올 연료가 적용되는 고압 인젝터는 수소에 기인한 부식과 마모에 취약하므로 강건성이 확보된 신규 코팅재가 필요하다. 최근 문헌조사 결과를 토대로 taC (tetrahedral amorphous Carbon) 코팅을 제안하고, 기존 SiO-DLC 코팅과의 특성을 비교 평가하였다. taC 코팅은 기존 SiO-DLC 코팅 대비 두께는 얇으면서도 (1.5 vs. 2-4 μm), 66 GPa의 고경도 (vs. 25 GPa), 바이오에탄올 내식성, 400 ℃ 이상의 우수한 내열성을 띈다. 특히 고온 방치 및 부식 시험을 거친 시편으로 ball on disc 마찰·마모 평가를 진행한 결과, taC 코팅이 SiO-DLC 코팅 대비 마모 깊이 기준 8배 우수한 내마모 성능을 발휘했다. 최종적으로 연료 인젝터 볼에 taC 코팅을 적용하기 위해 양산성을 검증하고 코팅 결함을 최소화하도록 공정을 개선하였다. 본 발표에서는 개선된 공정 내용과 함께 코팅 결함을 검출하기 위해 도입된 I.AI사의 비전 측정 시스템 기반 신기술을 소개한다. 현재 개선 공정의 반복 수행 및 100% 전수 검사를 통해 양산성 검증의 최종 단계를 진행 중이다. 부품의 경량화, 설계 컴팩트화 및 무윤활 극한 마찰 환경에 대응하기 위해, 한국생산기술연구원 주도로 차세대 구동부품의 경쟁력 확보에 필요한 DLC 및 taC 코팅을 능가하는 고성능 나노복합 초저마찰 코팅 연구가 수행되고 있다. 예로 ZrMoTi(CuSi), MoCu-Ni/-V, MoZrTiSi 등의 원소가 도핑된 질/탄화물 또는

taC 합성 코팅 기술로, 목표는 기존 대비 마찰 계수를 80% 저감하여 초저마찰성을 구현하고, 동시에 최소 400 ºC 이상의 내열성과 내식성 확보이다. 끝으로 초저마찰성의 코팅재 성능 극대화를 위해 표면조도 저감용 전해 연마 기술을 검토하였으며, 해당 전처리 기술이 적용된 표면에 taC 코팅을 증착하여 물성을 평가한 결과를 소개한다.

[청정1-4 | 14:45] 초청강연

Atomic-scale engineering of advanced fuel cell catalyst via atomic layer deposition: Se-Hun Kwon*(Pusan National University)

Keywords: Atomic Layer Deposition, fuel cell, Catalyst, Hydrogen Fuel Cells

Atomic layer deposition (ALD) technique has emerged as a fascinating tool for the design and synthesis of catalysts with atomic precision for hydrogen production applications and fuel cells. Herein, we demonstrate the importance of the ALD for catalyst design, in particular, the emphasis has been given to the surface/interface engineering of catalysts for improving their catalytic efficiency in hydrogen applications. To get insight into the reaction mechanism, the ALD-based routes for catalyst synthesis may revolutionize the field of sustainable hydrogen production and fuel cells. Moreover, the synthesis of supported nanoparticles with controlled shape and size has attracted great attention in catalysis owing to their unique properties. By taking advantage of the ALD, it is possible to synthesize catalysts at the atomic scale, particularly, site-selective ALD provides tremendous opportunities in catalytic efficiency and selectivity studies. Herein, after briefly introducing recent advancement in the ALD techniques on catalyst design, and interface engineering of catalysts, a few selected examples will be introduced in the presentation.

[청정2-1 | 15:20] 초청강연

Design Strategies of Metal Electrocatalysts for Green Hydrogen Production and Carrier: Jeonghoon Lim*(Chungnam National Univ.)

Keywords: Surface & Interface Engineering, Hydrogen Production, Seawater Splitting, Ammonia Synthesis, Hydrogen Carrier, Electrocatalytic Materials

My research focuses on advancing sustainable electrochemical systems through surface and interface engineering of functional nanomaterials, electrochemical engineering, and in-situ product analytics. By tailoring catalytic surface electronic structures, localized reaction microenvironments, and interfacial transport, I design highly active and durable electrocatalysts for clean hydrogen production and green chemical synthesis. Key achievements include developing robust electrocatalysts for seawater splitting, overcoming side reactions such as chlorine evolution through selective surface passivation and interfacial design. Furthermore, my work addresses nitrogen electrochemistry for electrochemical ammonia synthesis (via nitrate and nitrogen reduction), establishing ammonia as an efficient, energy-dense hydrogen carrier. Moving forward, I aim to expand these interfacial design strategies to scalable electrolyzer platforms integrated with operando/in-situ product diagnostics to decipher dynamic interfacial mechanics, paving the way for scalable, carbon-neutral green hydrogen and energy-carrier technologies.

[청정2-2 | 15:45] 초청강연

AEM 수전해 촉매층/PTL 계면 특성 향상을 위한 니켈 분말 소결 MPL 연구: 김민중*(경희대학교)

Keywords: AEM수전해, PTL, 촉매층, MPL, 니켈 분말 소결, 계면특성

수전해를 이용한 그린수소 생산 기술은 청정 수소 생산을 통한 탄소 중립 및 수소 경제를 실현할 수 있는 핵심 기술로 주목받고 있다. 수전해 기술은 사용하는 전해질의 종류에 따라 크게 알칼라인, 양이온교환막(PEM), 음이온교환막(AEM), 고온수증기 수전해로 구분될 수 있다 이들 중에서 이온전도성과 기체차단성이 우수한 이온교환막 기반의 AEM 수전해 기술은 높은 운전 전류밀도에서 운전이 가능하고 부하 응답 특성 역시 우수하여 변동성과 간헐성이 큰 재생에너지와 연계 시에도 안정적이고 효율적인 그린수소 생산이 가능하다 또한, 고가의 귀금속을 사용하는 PEM 수전해와는 달리 가격이 저렴한 전이금속 기반 소재를 전극과 여러 부품에 사용가능하기 때문에 재생에너지 연계 그린수소 생산을 위한 차세대 수전해 기술로 주목받고 있다. 이온교환막 수전해의 막-전극 접합체(Membrane electrode assembly, MEA) 내 촉매층과 다공성 수송층(PTL) 사이의 계면 특성은 수전해 시스템의 성능을 좌우하는 핵심 요소 중 하나이다. 해당 계면의 구조적·물리화학적 특성을 개선할 경우 전하 전달 및 물질 전달 특성이 향상될 뿐만 아니라, 반응 과정에서 생성되는 기포의 효율적인 배출을 유도할 수 있다. 특히, 계면 최적화를 통해 기포 탈리 거동과 반응물 수송이 개선되면 고전류밀도 영역에서의 효율 저하를 효과적으로 완화할 수 있다. 더 나아가, 촉매층의 유효 활용도를 극대화함으로써 고가 촉매의 사용량을 저감하면서도 높은 성능을 달성할 수 있어, 고효율·고경제성의 AEM 수전해 시스템 구현에 중요한 기술적 접근법이 될 수 있다. 특히, 이온전도성이 우수한 AEM이 개발됨에 따라 고전류 밀도 운전이 가능하도록 촉매층과 PTL 계면을 설계하는 연구는 갈수록 그 중요도가 커져가는 추세이다. 본 연구에서는 AEM 수전해의 촉매층–PTL 계면 최적화를 위해 니켈 분말 소결을 통한 microprous layer (MPL) 기술을 제안하여, 계면에서의 전하 및 물질 전달 특성과 기포 배출 거동을 동시에 개선하고, 이를 통해 고전류밀도 조건에서도 높은 효율과 안정적인 그린수소 생산이 가능한 차세대 이온교환막 수전해 시스템 구현의 기반을 마련하고자 한다.

[청정2-3 | 16:10] 초청강연

PEM 수전해 시스템의 경제성 확보를 위한 금속표면처리 기술 개발 현황: 최권훈(현대자동차 수전해스택개발팀)

탄소중립 실현과 재생에너지 변동성 대응을 위하여 수전해 기반 수소 생산 기술의 중요성이 증대되고 있습니다. 당사는 PEM 수

전해 개발 및 시스템 단위 실증을 추진 중이며, ESM (Electrolyzer Stack Module)를 기반으로 MW-GW 급 대용량 시스템으로의 단계적 확장을 목표로 하고 있습니다. 또한, 새만금 200 MW급 수전해 플랜트 구축과 남극 세종과학기지 친환경 에너지 전환 프로젝트를 통해 수전해 실증 진행 중에 있습니다. PEM 수전해 시스템의 상용화 단계에서는 높은 귀금속 촉매 비용, PTL/분리판 저가 코팅 기술 개발, 고내식 BOS 강건성 확보 등이 주요 기술적 난제로 대두됩니다. 특히, 귀금속 사용량 감소를 통한 비용 절감은 글로벌 기술 경쟁력 확보의 필수 과제로 인식되고 있어, 이를 위해서는 금속재료학적 기술 개발이 필수적입니다. 본 발표에서는 당사의 PEM 수전해 개발 및 실증 현황을 소개하고, 금속재료 분야에서의 산/학/연 협력의 필요성을 제시합니다.

[청정2-4 | 16:35] 초청강연

그린수소생산을 위한 복합 산화물 지지체의 표면 용출 현상 기반 촉매층 코팅 기술 연구: 이창수(충남대학교 화학공학교육과)

수전해를 통한 그린수소 생산에서 고분자전해질막 수전해(PEMWE)는 재생에너지와의 연계성이 뛰어난 기술이지만, 산화전극에서 사용되는 고가·희소 금속인 이리듐(Ir)의 저감이 핵심 과제로 남아있다. 산화물 지지체를 활용한 Ir 저감 전략이 활발히 연구되고 있으나, 지지체 자체의 낮은 전기전도도와 촉매-지지체 계면에서 발생하는 일함수 불일치로 인한 쇼트키 장벽(Schottky barrier)이 전하 이동을 저해하는 근본적인 한계로 지적되어 왔다. 본 연구에서는 Bi_3TaO_7(BTO) 지지체를 대상으로, Ir 담지 과정 중 약한 환원 분위기에서 Bi 양이온이 부분적으로 화학적 석출(chemical ex-solution)되어 Ir 표면으로 재증착됨으로써 Ir-Bi 합금 도메인과 Bi 결핍 지지체($Bi_{3-x}TaO_7$)가 동시에 형성되는 계면 통합 설계 전략을 제안하였다. XPS 및 XAS(XANES/EXAFS) 분석을 통해 Bi가 금속상으로 환원되어 Ir과 합금을 형성함과 동시에, 지지체는 부분적으로 Ta_2O_5 상으로 전이되며 산소 결핍이 유도됨을 확인하였다. 이러한 구조 변화는 촉매의 일함수는 낮추고 지지체의 일함수는 높여, 계면 접합을 기존의 정류형(rectifying)에서 오믹(ohmic) 접합으로 전환시키는 것으로 나타났다. 전기화학적 평가 결과, $IrBi/Bi_{3-x}TaO_7$ 촉매는 낮은 과전압과 높은 질량활성, 그리고 안정적인 장시간 구동 특성을 보였으며, 이는 상용 IrO_2/TiO_2 및 IrO_x 촉매 대비 현저히 우수한 성능이다. 또한 단전지 평가에서도 낮은 Ir 담지량 조건에서 우수한 성능과 장시간 안정적 구동을 달성하였다. 반응 후 XPS/XAS 분석에서도 화학 상태 변화가 거의 관찰되지 않아 뛰어난 내구성을 뒷받침하였다.본 연구는 화학적 양이온 석출을 통해 촉매와 지지체의 전자구조를 동시에 조절하는 범용적 계면 설계 전략을 제시하며, 저 Ir 담지 조건에서도 고활성/고내구성을 동시에 구현할 수 있는 PEMWE용 전극 설계 방향을 제시한다.

적층제조 및 분말Ⅱ
Room 1층 105/6호, 10월 29일

[적층5-1 | 09:00]
직접용융증착으로 제조된 15-5PH 스테인리스강의 직접 시효에 다른 기계적 특성 및 미세구조 변화: 주수빈(경상국립대학교), 한규미(포항공과대학교), 조묘현(고려대학교), 김형섭(포항공과대학교), 김세호(고려대학교), 김정기*(경상국립대학교)
Keywords: Additive Manufacturing, precipitation hardening stainless steel, mechanical properties, heat treatment

15-5PH 스테인리스 강은 우수한 내식성, 높은 경도와 인장강도를 기반으로 가스터빈의 압축기, 핵 산업의 부품 등 고온·고응력 환경의 부품 소재로 활용되고 있다. 15-5PH 스테인리스강은 열처리 중 역변태 오스테나이트가 형성되고, Cu-rich 석출물의 형태 및 결정구조가 변화하므로 열처리에 따라 기계적 특성이 크게 변화한다. 특히, 적층제조를 활용해 제조된 15-5PH 스테인리스강은 반복적인 용융-응고 및 빠른 냉각속도로 인해 기존 공정과 상이한 석출 및 상변태 거동을 가지게 되므로 해당 소재의 열처리 최적화는 중요하다. 이에 본 연구에서는 적층제조된 15-5PH 스테인리스강의 직접 시효 온도 변화에 따른 Cu-rich 석출 거동 및 기계적 특성을 분석하였다. 직접 시효 이후 경도와 인장강도는 각각 최대 472Hv, 1358MPa까지 증가하였음에도 마르텐사이트 블록 및 prior austenite grain boundary의 변화는 관찰되지 않았다. Cu-rich 석출물은 직접 시효 온도가 증가함에 따라 coherent BCC Cu cluster에서 semi-coherent 9R Cu-rich 석출물로 변화하였다. 고온 시효에서는 Cu-rich 석출물의 조대화와 역변태 오스테나이트의 분율 증가가 일어남을 확인했으며, 이로 인해 강도가 감소한 것으로 판단된다. 상기 결과를 통해 비평형 상태의 미세조직에서 직접 시효 온도에 따른 Cu-rich 석출 거동과 미세조직 및 기계적 특성과의 상관관계를 규명하였다.

[적층5-2 | 09:15]
LW-DED로 제조된 316L 스테인리스 강의 기계적 특성 및 부식 거동의 이방성 분석: 한지민, 이종익, 이유진*, 이빈*(경희대학교)
Keywords: LW-DED, 316L, 기계적 특성, 부식

레이저 와이어 직접 에너지 퇴적법(LW-DED)은 연속적으로 공급되는 금속 와이어를 레이저 열원으로 녹여 층층이 쌓아 올려 3차원 금속 부품을 제조하는 적층 제조 공정이다. 금속 적층 제조 분야에서는 분말 기반 공정이 널리 연구되어 왔으나, 원료 분말 비용, 재료 손실, 분말 회수 관리와 관련된 공정상의 부담이 존재한다. 이에 비해 LW-DED는 와이어를 원료로 사용하여 높은 재료 이용 효율, 낮은 원자재 비용, 시중의 용접 와이어 재료와의 호환성 등의 장점을 제공한다. 또한, 아크 기반 와이어 적층 제조 공정과 달리 LW-DED는 레이저 열원을 사용하여 비교적 국부적인 용융과 열입력 제어가 가능하다. 이러한 특성으로 인해 LW-DED는 중대형 금속 부품의 제조 및 보수에 적용될 수 있다. 316L 스테인리스 강은 우수한 내식성, 용접성, 기계적 성질을 갖춘 오스테나이트계 스테인리스 강으로, 에너지, 화학, 해양 및 극저온 구조 부품에 적용된다. 또한, 316L은 용접 와이어로 상용화되어 있어 LW-DED와 같은 와이어 기반 적층 제조 공정에 적합한 소재이다. 기존 LW-DED 316L에 대한 연구는 주로 공정 변수에 따른 비드 형상, 미세조직 형성, 상 분포, 상온 기계적 성질에 초점을 맞추어 왔다. 그러나 LW-DED 과정에서 발생하는 반복적인 용융 및 열이력은 LW-DED 316L 적층재 내 방향에 따른 미세조직 불균일성을 초래할 수 있다. 이러한 미세조직의 이방성이 상온 및 극저온 인장 거동과 부식 반응에 미치는 영향에 대한 연구는 상대적으로 제한적이다. 본 연구에서는 LW-DED 공정을 사용하여 316L 스테인리스 강 thin wall을 제조하였다. 제조된 시편에 대해 XY 및 XZ 평면의 미세조직 및 상을 분석하였으며, 기계적 특성 평가를 위해 빌드 플레이트에 평행한 수평 시편과 빌드 방향에 평행한 수직 시편을 사용하여 상온 및 77 K에서 인장 시험을 수행하였다. 또한, 관찰 평면에 따른 부식 거동을 평가하기 위해 XY 및 XZ 평면에서 전기화학적 부식 시험을 수행하였다. 이에 본 연구는 LW-DED 공정으로 제조된 316L 스테인리스 강의 미세조직, 기계적 성질, 부식 거동의 이방성을 분석하여, 극저온 및 부식성 환경에서 사용되는 적층 제조 316L 부품을 평가하기 위한 기초 데이터를 제시한다.

[적층5-3 | 09:30]
MEX 적층 제조 공정과 정밀 형상 출력(fine feature) 기술을 적용한 17-4PH 스테인리스강의 미세조직 및 기계적 특성: 서민서, 조용훈(인하대학교), 김대용(HRT Robotics), 이기안*(인하대학교)
Keywords: Material extrusion additive manufacturing, 17-4PH stainless steel, Microstructure, Mechanical properties

금속 재료 압출 적층 제조(material extrusion additive manufacturing of metals, metal MEX)는 금속 분말과 고분자 바인더로 이루어진 feedstock을 압출하여 형상을 적층한 후, 탈지(debinding)와 소결(sintering)을 통해 최종 금속 부품을 제조하는 공정이다. 기존 분말 사출 성형(MIM, metal injection molding)용 소재 및 후처리 기술을 활용할 수 있고 장비 구성이 비교적 단순하다는 장점이 있으나, 압출 과정에서 발생하는 불균일한 재료 공급과 래스터(raster) 사이의 air gap으로 인해 내부 결함이 형성되어 기계적 특성이 저하될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 개선하기 위해 정밀 형상 출력(fine feature) 기능을 적용하여 17-4PH 스테인리스강을 제조하고, As-sintered 및 H900 열처리 후 미세조직과 기계적 특성의 변화를 조사하였다. 정밀 형상 출력 조건으로 제조된 소결체는 96.7%의 높은 상대밀도를 나타냈으며, 래스터 사이에서 발생하는 조대한 air gap 결함이 효과적으로 억제된 치밀한 조직을 형성하였다. 미세조직 분석 결과, 소결체의 기지는 주로 lath martensite로 구성되었으며 소량의 austenite가 함께 관찰되었다. H900 열처리 이후에는 austenite 분율이 소폭 증가하는 경향을 보였다. 열처리 시편의 인장강도, 항복강도 및 연신율은 각각 1401.9 MPa, 1175.4 MPa 및 9.8%로 측정되었다. 이 물성들은 ASTM A693에서 제시하는 wrought 17-4PH 판재의 조건 기계적 특성 기준을 모두 만족하는 수준이다. 상기 결과들을 바탕으로 fine feature 기술에 의한 출력 결함 억제와 열처리에 따른 미세조직 제어가 합금의 기계적 특성을 향상시키는데 효과적임을 미세조직학적 관점에서 고찰하였다.

[적층5-4 | 09:45]

Direct Energy Deposition 공정으로 제조한 M4/G6 multi-layer 공구강의 미세조직 및 기계적 물성: 전민수, 박정현(인하대학교), 김대중((주)에이엠솔루션즈), 구용모((주)창성), 이기안*(인하대학교)

Keywords: Direct Energy Deposition, Multi-layered tool steel, Microstructure, Mechanical properties

대표적인 금속 적층 제조 공정 중 하나인 DED(Direct Energy Deposition)는 부여된 에너지원으로 인해 용융된 분말을 기판에 직접 적층하여 제조하는 공정이다. DED 공정은 빠른 제조 속도와 대형 부품 가능성, 이종 소재 적층 그리고 국부적 파손 영역의 수리에 용이하다는 장점을 가져 최근 금형, 공구 분야에서 적용 가능성이 활발히 검토되고 있다. 본 연구에 사용된 중탄소 공구강 소재인 Gridur 6 (G6)는 우수한 용접성을 가져, 균열이 없는 벌크 소재의 적층 제조 가능성이 높다. 이 G6 적층 제조 소재 위에 더 우수한 기계적 특성을 가지는 AISI M4 공구강을 표면 적층부로 적용하여 내구성 강화 및 표면 특성을 향상시키고자 하였다. M4 공구강은 탄소 함량이 약 1.3%의 고탄소 강으로, 적층 도중 열 크랙 생성 등에 의한 문제점으로 제조에 어려움을 가지며 이를 해결하기 위해 기판의 예열이 필요하다고 알려져 있다. 본 연구에서는 예열 과정 없이, G6 적층부 위에 M4를 추가로 적층하는 multi-layered 소재 제조를 수행하였다. 이 후 제조된 multi-layered 소재의 초기 미세조직을 분석하였으며 경도와 충격 인성을 조사하였다. 미세조직 관찰 결과 평균 99.72%의 areal density를 나타냈으며, macro crack은 관찰되지 않았다. 또한 G6, M4 사이에서는 원소 조성에 의한 확산이 발생한 dilution 영역이 형성되었다. M4, G6 영역에서는 공통적으로 martensite/austenite matrix를 나타내었으며 austenite 주변에서 무정형의 carbide가 다수 관찰되었다. EBSD 관찰 결과 G6에 비해 M4 영역에서 미세한 grain size와 높은 austenite fraction이 확인되었다. Dilution 영역은 다른 영역들에 비해 조대한 grain size와 높은 austenite 분율을 나타내었다. 비커스 경도 측정 결과 G6영역과 M4 영역에서 각각 650~670Hv, 820~840Hv 범위의 값이 확인되었으며, dilution 영역에서는 720~740Hv로 G6와 M4 사이의 값을 나타냈다. M4/G6 multi-layer 소재의 충격 인성은 1.9 J/cm^{2}으로 G6 단일 적층재의 값인 1.34 J/cm^{2}과 비교하여 뛰어난 특성을 나타내었다. 상기 관찰 결과를 바탕으로 DED 공정을 이용한 M4/G6 multi-layer 소재의 기계적 특성 조사 및 변형, 파괴 기구를 규명하고, 우수한 물성을 구현할 수 있는 고탄소 공구강의 제조 방안에 대하여 토의하고자 하였다.

[적층5-5 | 10:00]

적층제조 중 층간 대기시간 없이 석출강화되는 고강도 마레이징 합금: 김진우, 이재홍, 안성열, 구본우, 이시우, 이정아(포항공과대학교), 권현석(케임브리지대학교), 백건우(국립공주대학교), 허윤욱(포항공과대학교), 홍순익(충남대학교), 홍순직(국립공주대학교), 김형섭*(포항공과대학교)

Keywords: 적층제조, 직접 에너지 적층, 마레이징 합금, 마르텐사이트 변태 개시 온도, 고유 열처리, 층간 대기시간, 석출강화

적층제조 과정에서 발생하는 반복적인 열사이클은 고유 열처리로 작용할 수 있으며, 이를 통해 적층 후 열처리 없이 공정 중 미세조직을 제어할 수 있다. 마레이징 합금에서 이러한 고유 열처리에 의한 석출강화를 유도하려면 재가열에 앞서 마르텐사이트가 형성되어야 한다. 기존 연구에서는 적층된 층을 마르텐사이트 변태 개시 온도인 Ms 이하로 냉각하기 위해 층간 대기시간을 부여해 왔으나, 이는 추가적인 공정변수를 도입하고 전체 적층시간을 증가시킨다. 본 연구에서는 층간 대기시간 없이 석출강화를 구현하기 위한 적층제조 특화 합금 기준을 제안한다. 즉, 자연적인 층간 냉각 과정에서 마르텐사이트 변태가 충분히 진행될 수 있도록 Ms가 충분히 높아야 하며, 이를 통해 재가열 중 석출이 일어날 수 있는 충분한 양의 마르텐사이트가 확보되어야 한다. 또한 제한된 열적 노출 조건에서도 효과적인 강화를 달성하기 위해서는 석출이 빠르게 진행되어야 한다. 이러한 기준에 따라, Ms가 377 ºC이고 석출이 빠르게 진행되는 60Fe-25Co-10Ni-Mo5 마레이징 중엔트로피 합금을 층간 대기시간 없이 직접 에너지 적층 공정으로 제조하였다. 열이력과 미세조직에 대한 종합적인 분석 결과, 적층 과정의 층간 냉각 중 적층부의 온도가 Ms 이하로 내려가면서 마르텐사이트가 주를 이루는 기지가 형성되고, 이후 재가열 과정에서 해당 기지 내에 Mo가 풍부한 μ상 석출물이 형성됨을 확인하였다. 이러한 석출강화 마르텐사이트 미세조직을 통해 적층 후 시효처리 없이도 적층 상태에서 1.54 GPa의 항복강도와 1.72 GPa의 인장강도를 달성하였다. 이러한 결과는 적층제조 고유의 열사이클을 활용하여 고강도 석출강화형 합금을 층간 대기시간 없이 제조하는 데 있어 합금의 상변태 특성이 중요한 설계 요소임을 보여준다.

[적층6-1 | 10:25]

레이저 출력 및 계면 형상이 L-DED로 제조된 Ni/Al 이종 접합의 초기 파단 저항성에 미치는 영향: 조해주, 정종욱, 이욱진*(부산대학교 재료공학과)

Keywords: 이종 접합, Ni계 합금, Al계 합금, 레이저 직접 에너지 적층 공정(L-DED), 계면 형상

최근 우주·항공 및 에너지 관련 산업 발전에 따라 극한 환경에서 우수한 기계적 물성을유지하며, 경량성 및 방열성과 같은 복합적인 기능을 동시에 가지는 소재에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 요구의 대응 방안으로 우수한 고온 기계적 물성 및 부식 저항성을 가지는 Ni계 합금과 높은 비강도 및 열전도성을 가지는 Al계 합금의 이종 접합이 주목받고 있다. 그러나 Ni/Al의 이종 접합은 계면 반응에 의해 금속간화합물 (intermetallic compound, IMC)이 생성되고, 두 금속 간의 상당한 열·기계적 물성 차이로 인해 계면에 응력 집중이 발생한다. 이는 계면 파단의 원인이 될 수 있다. 계면 형상 설계는 이종 접합부의 계면 파단 저항성을 향상시키기 위한 방법 중 하나이다. 이를 통해 연속적인 IMC를 따라 형성되는 단순한 파괴 경로를 굴절 또는 연장시킬 수 있으며, 계면의 하중 전달 및 응력 분포를 조절할 수 있다. 그러나 전통적인 이종 금속 접합 공정인 용접 및 주조를 통해 복잡한 계면 형상을 구현하기에는 한계가 있다. 반면, 레이저 직접 에너지 적층 공정 (laser-directed energy deposition, L-DED)은 금속분말 분사와 레이저 조사를 동시에 수행하는 공정으로써, 복잡한 계면 형상을 가지는 이종 금속 제조에 용이하다. 그러나 빠른 응고 속도와 반복적인 열사이클을 수반하기 때문에 공정 조건과 계면 형상이 이종 접합부의 미세조직 및 파괴 거동에 미치는 영향을 규명할 필요가 있

다. 본 연구에서는 L-DED를 이용하여 Inconel625/AlSi10Mg 이종 접합을 제조하고, 레이저 출력 및 계면 형상이 초기 파단 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 먼저 평면 계면 조건에서 AlSi10Mg 적층 시 레이저 출력을 변화시키며 계면의 미세조직과 기계적 물성을 분석하였다. 해당 결과를 바탕으로 하나의 레이저 출력을 선정하여 평면 및 비평면 계면 형상을 제조하고, 인장 시험을 통해 각 형상의 초기 파단 응력을 측정하였다. 실험 결과를 종합하여 IMC를 포함하는 Ni/Al 이종 접합의 레이저 출력 및 계면 형상에 따른 파괴 매커니즘을 제안하고자 한다.

[적층6-2 | 10:40]

FLOW-3D 및 TC-PRISMA 해석 기반 DED 단일 적층 트랙에서의 W_2C 강화입자 용해 거동 및 위치별 미세조직 변화: 이은세, Rohit Raj(국립순천대학교 첨단부품소재공학과), 최시훈*(국립순천대학교 첨단부품소재공학과, 국립순천대학교 에너지응용공학전공)

Keywords: Directed Energy Deposition (DED), Single-track deposition, W_2C reinforcement dissolution, Microstructural evolution, Melt-pool dynamics, FLOW-3D, TC-PRISMA

Ni계 합금-W_2C 복합 클래딩은 고경도 탄화물 강화입자를 이용하여 금속 부품의 내마모성을 향상시키는 효과적인 표면개질 기술이다. DED 공정에서는 W_2C 입자의 용해와 W-rich 상의 재석출 거동이 레이저 공정조건뿐만 아니라 용융풀 내부의 국부적인 열이력, 유동 및 모재 희석에 의해영향을 받기 때문에, 동일한 단일 적층 트랙 내에서도 위치에 따른 미세조직 불균일성이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 다중 트랙 및 다층 적층에의한 열이력 중첩 효과를 배제하고, 단일 패스 DED 클래딩층에서 나타나는 W_2C 강화입자의 위치별 용해 및 재석출 거동과 이에 따른 미세조직변화를 체계적으로 분석하였다. Ni계 합금-W_2C 복합분말을 이용하여 레이저 출력과 분말 공급량이 서로 다른 세 가지 조건에서 단일 패스 클래딩층을 제조하였으며, 클래딩 단면을 상부, 중앙부 및 모재 계면부와 적층 진행방향에 따른 위치로 구분하여 분석하였다. SEM-BSE 관찰을 통해잔류 W_2C 입자의 용해 정도와 W-rich 석출상의 분포 및 형상을 비교하였다. 또한 FLOW-3D 해석을 통해 공정조건과 위치에 따른 용융풀의 온도장, 유동 및 모재 희석 거동을 분석하고, 계산된 열이력을 TC-PRISMA 해석에 적용하여 냉각 과정에서의 석출 가능 상과 석출 거동을 평가하였다. 미세조직 변화에 따른 국부 기계적 특성의 차이는 위치별 경도 측정을 통해 비교하였다. 분석 결과, 동일한 공정조건의 단일 패스 내부에서도 뚜렷한 위치 의존적 미세조직 차이가 나타났다. 상부와 중앙부에서는 부분적으로 용해된 W_2C 강화입자 주변에서 수지상, 침상 및 판상 형태의W-rich 상이 관찰된 반면, 모재 계면부에서는 Fe 희석과 국부 열이력의 영향으로 W_2C 강화입자의 용해가 상대적으로 증가하였다. 이러한 위치별 강화입자 용해 및 재석출 거동은 용융풀 내 열·유동 특성과 응고 조건의 공간적 차이와 밀접하게 연관되었으며, 실험적으로 관찰된 미세조직특징을 FLOW-3D에서 예측한 열·유동 거동 및 TC-PRISMA 기반 석출 해석 결과와 연계하여 해석하였다. 본 연구는 단일 적층 트랙 수준에서공정-열·유동-입자 용해·재석출-미세조직 간의 연계성을 제시하며, 향후 다중 트랙 및 다층 DED 적층재에서 열이력 중첩에 의해 발생하는 강화입자 용해·재석출과 미세조직 불균일성을 예측하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

[적층6-3 | 10:55]

다중 입도 Fe-Co계 분말을 이용한 고충진 연자성 복합재의 재료압출식 적층제조 및 특성 평가에 대한 연구: 이강현, 김민종(한양대학교), 임태협(한양대학교, Nanyang Technological University), 이선영*(한양대학교)

Keywords: Fe-Co 합금, 재료 압출식 적층제조, 다중입도 분포, 연자성 복합재, 자성 특성

전동화 및 전력변환 시스템의 고출력·고주파화에 따라 높은 자속밀도와 낮은 교류 손실을 동시에 갖는 연자성 코어 소재에 대한 요구가 증가하고 있다. Fe-Co계 합금은 높은 포화자속밀도를 갖는 대표적인 연자성 소재로서 고출력·고전력밀도가 요구되는 전자기 부품에 유리하지만, 상대적으로 낮은 전기 비저항으로 인해 고주파 영역에서 와전류 손실이 증가할 수 있다. 이를 개선하기 위한 방법으로 자성 입자 사이에 비전도성 고분자 바인더를 도입한 고분자 결합형 연자성 복합재가 연구되어 왔다. 그러나 비자성 고분자상의 도입은 복합재 내 자성상의 체적분율을 감소시켜 Fe-Co계 합금의 높은 자속밀도를 충분히 활용하기 어렵게 하며, 이를 보완하기 위한 자성 분말의 고충진화는 피드스톡의 유동성 및 성형성을 저하시킬 수 있다. 따라서 높은 자성 분말 장입량과 적절한 성형성을 동시에 확보할 수 있는 분말 및 피드스톡 설계가 요구된다. 또한 재료압출식 적층제조(Material Extrusion, MEX)는 금형 없이 복잡한 형상의 연자성 코어를 제조할 수 있어 기존 성형공정의 형상 제약을 보완할 수 있다. 본 연구에서는 고충진 Fe-Co계 연자성 복합재의 MEX 성형성을 확보하기 위해 산화물 유래 미세 Fe-Co 분말을 활용한 다중입도 분말 설계를 적용하였다. Fe_2O_3와 Co_3O_4 혼합분말을 비드밀링 및 분무건조한 후 수소환원하여 미세 입자와 이들의 응집체로 구성된 Fe-Co 분말을 제조하고, 이를 15–53 μm 크기의 상용 Fe-49Co-2V 분말과 혼합하였다. 산화물 유래 Fe-Co 분말의 미세 입자 및 응집체를 상용 마이크로 분말과 조합하여 계층적 다중입도 분말계를 설계하였으며, 입도분포 제어를 통해 분말 충진성을 개선하고 높은 자성 분말 장입 가능성을 확보하고자 하였다. 분말 조성 및 장입 조건에 따른 충진 특성과 레올로지 거동을 분석하고, 이를 바탕으로 Fe-Co계 고충진 피드스톡의 MEX 성형성을 평가하였다. 이후 고분자 결합형 연자성 코어를 제조하여 미세구조 및 주파수에 따른 자기적 특성을 분석하였다. 이를 통해 다중입도 분말 설계가 Fe-Co계 MEX 피드스톡의 충진 특성, 레올로지 거동 및 자기적 특성에 미치는 영향을 규명하고, 고충진 Fe-Co계 연자성 복합재의 MEX 적용 가능성을 평가하고자 한다.

[적층6-4 | 11:10]

DED 기반 P21-STS316L 경사기능재료의 조성 구배에 따른 미세조직 진화 및 기계적 특성 규명: 강수성(한국생산기술연구원, 국립부경대학교), 김중훈(한국생산기술연구원, 울산과학기술원), 김형찬, 김병준(한국생산기술연구원), 노상훈*(국립부경대학교), 김병구*(한국생산기술연구원)

Keywords: 경사기능재료, 직접에너지적층, P21, STS316L, 미세조직, 상변태

경사기능재료(Functionally Graded Material, FGM)는 위치에 따라 화학 조성과 미세조직을 점진적으로 제어하여 단일 부품 내에서 상반된 물리적, 기계적 특성을 동시에 구현할 수 있는 첨단 소재 기술이다. 발전 플랜트 및 차세대 원자로 등의 극한 환경에 적용되는 페라이트강과 오스테나이트계 스테인리스강 간의 이종 금속 접합은 급격한 계면 열팽창 계수 불일치로 인한 잔류응력 집중 문제를 야기한다. 또한, 고온 운전 시 탄소 이동에 따른 연화 및 조기 파손 등 치명적인 야금학적 한계를 수반한다. 본 연구에서는 이러한 계면 불안정성을 극복하기 위해 다중 호퍼 직접에너지적층(Directed Energy Deposition, DED) 공정을 적용하여 고강도 저합금 공구강인 P21과 고내식, 고인성 스테인리스강인 STS316L 간의 1% 단위 연속 조성 구배를 갖는 FGM 블록을 성공적으로 제작하였다. 조성 구배에 따른 위치별 미세조직 및 상변태 거동을 체계적으로 규명하기 위해 다중 스케일 미세조직 분석 및 열역학적 계산을 병행하였다. 선형적인 조성 구배에도 불구하고, STS316L이 약 30% 혼합된 천이 영역에서 모재 P21의 경도를 상회하는 비선형적 최대 경도 피크가 발현되었다. 이러한 특이점은 DED 공정 특유의 급랭 응고 및 반복적 열 사이클 하에서 용질 분배로 인해 유발된 수지상 원소 편석과 이에 따라 형성된 미세 페라이트-오스테나이트 이중상 계면의 강력한 전위 이동 억제 효과에 기인하는 것으로 확인되었다. 본 연구는 Fe계 이종 합금 적층 제조 FGM의 공정-미세조직-물성 간 상관관계를 확립함으로써, 극한 환경용 이종 금속 접합부의 응력부식균열 억제 및 구조적 건전성 확보를 위한 야금학적 설계 지침을 제시한다.

[적층6-5 | 11:25]

Interpretable Data-Driven Multiscale Modeling of Pore Morphology–Property Relationships in Additive Manufacturing: Jaemin Wang(Kyungpook National University, Max Planck Institute for Sustainable Materials), Seungyeon Lee, Yeon Woo Kim, Kyung Tae Kim, Jeong Min Park*(Korea Institute of Materials Science), Dierk Raabe*(Max Planck Institute for Sustainable Materials)

Keywords: Additive manufacturing, laser powder bed fusion, machine learning, pore morphology, mechanical property

Additive manufacturing (AM), particularly laser powder bed fusion (L-PBF), offers unprecedented design freedom but remains limited by internal defects that critically affect mechanical performance. Conventional approaches often rely on scalar porosity metrics, which fail to capture the complex role of pore morphology in governing material behavior. In this work, we present an interpretable data-driven framework that establishes explicit links across the materials–process–structure–property (MPSP) space in AM. Using generalized additive models with structured interactions (GAMI-Net), we develop a two-stage modeling approach that first predicts pore morphology descriptors from material properties and processing parameters, and subsequently relates these descriptors to mechanical properties. The framework reveals that scan speed is a dominant factor governing pore formation, while interactions with material properties such as density, thermal conductivity, and melting point define process-dependent defect regimes. Importantly, the results demonstrate non-monotonic relationships between pore morphology and mechanical performance, where moderate pore size and irregularity can enhance yield strength by promoting stress redistribution. These findings challenge the conventional assumption that all defects are detrimental and highlight the importance of morphology-aware characterization. By providing physically interpretable insights into defect formation and its mechanical consequences, this approach enables defect-aware process optimization and establishes a foundation for robust, data-driven multiscale modeling in additive manufacturing.

1st Global Symposium on Additive Manufacturing & Powder Meterallurgy

Room 1층 105/6호, 10월 29일

[AMPM1-1 | 13:30] Invited Talk

Strong, Ductile and Resource-Efficient Titanium–Oxygen–Iron Alloys by Additive Manufacturing: Ma Qian*(RMIT University)

Conventional α–β titanium alloys, such as Ti-6Al-4V, are critical engineering materials widely used in aerospace, biomedical and other high-performance applications. However, their production has historically required stringent control of oxygen from the initial feedstock stage—a major cost driver that also limits the recycling of high-oxygen titanium scrap. Recent advances have challenged this paradigm through the development of strong, ductile and resource-efficient α–β titanium–oxygen–iron (Ti–O–Fe) alloys. As reported in Nature 618, 63–68 (2023) and Nature Communications 16, 10833 (2025), these alloys deliberately exploit abundant oxygen and iron as synergistic strengthening elements, achieving exceptional uniform elongation at high yield strengths. This alloy design and processing strategy enables the use of low-cost, oxygen-tolerant feedstocks, significantly enhancing the sustainability and circularity of titanium alloy production.

[AMPM1-2 | 14:00] Invited Talk

Combining strain-assisted nanoprecipitation with nanotwins to enhance strength of laser additively manufactured high-entropy alloys: Yuan Tian, Yunzhuo Lu(Dalian Jiaotong University), R. Lakshmi Narayan(Indian Institute of Technology Delhi)

Repeated and alternating cycles of deep cryogenic and room temperature soaking (DCT) leads to stress mediated nanotwin nucleation in laser directed energy deposition (L-DED) fabricated CrMnFeCoNi high entropy alloy (HEA), which simultaneously enhances its strength and ductility. The microstructural evolution and mechanical behavior of the as-built and DCT cycled L-DED fabricated HEA after ageing at 773 K is presented. Ageing for 480 hours introduces 0.69%, 1.69% and 2.20% volume fractions of complex Cr-rich and NiMn-rich nanoprecipitates in the top, middle and bottom portions of the DCT cycled HEA, respectively, which matches well with the gradient in the volume fraction of nanotwins, V_T, in it. In contrast, a significantly lower volume fraction of nanoprecipitates, f_{np}, is observed in all portions of the aged as-built counterpart. The yield and tensile strength of the bottom portion of the aged DCT cycled HEA, which has higher V_T and f_{np}, is 726 ± 18 and 909 ± 13 MPa, which is higher than in other portions. It is deduced that minimization of lattice strain energy drives nanoprecipitation during ageing, following which, an analytical expression to estimate f_{np} in the vicinity of nanotwins is derived. Quantitative estimates of strengthening contributions from different microstructural features is provided.

[AMPM1-3 | 14:30] Invited Talk

Interfacial engineering for mitigating brittle intermetallics at steel/Al heterointerfaces through powder bed fusion: Kenta Yamanaka*(Tohoku University), Yujie Cui(University of Science and Technology Beijing), Akihiko Chiba(Tohoku University)

Joining steel and aluminum into a single component offers weight savings in automotive structures but is limited by the formation of Fe–Al intermetallic compounds (IMCs), such as Al_5Fe_2 and $Al_{13}Fe_4$, at the interface, which lowers the bonding strength. This talk discusses how powder bed fusion (PBF) additive manufacturing can suppress these brittle phases. In laser PBF of carbon steel/Al3Si1Mn, a higher scanning speed increased the solidification rate, promoting solute trapping, and reduced Fe dissolution into the melt pool. Consequently, coarse IMCs were suppressed and the bonding strength increased from 27 to 103 MPa. We then extended this approach to electron beam PBF of 304 stainless steel/AlSi10Mg and demonstrated that the IMC layer likewise became thinner at higher scanning speeds. These results show that the energy input, which determines both the melt composition and the solidification conditions, governs the interfacial microstructure of steel/Al joints.

[AMPM2-1 | 15:15] Invited Talk

Design of Lattice Structures (DoLS): From Tessellation and Nesting Strategies to Additive Manufacturing of Ceramics for Thermal Management Applications: Chinmai Bhat*(National Taipei University of Technology)

The fabrication feasibility offered by additive manufacturing (AM) has enabled the emergence of a new design paradigm termed ‘Design of Lattice Structures (DoLS)’, wherein architected geometries can be systematically designed and tailored to achieve application-specific performances. Within the DoLS framework, tessellation and nesting strategies can significantly expand the geometric and functional design space due to unique response pathways. Tessellation enables the systematic arrangement and spatial distribution of basic unit cells, while nesting introduces hierarchical features across multiple length scales. Together, these strategies facilitate control over relative density, surface area, and response pathways, thereby providing opportunities for application-specific lattice optimization. Building upon these architected design concepts, tessellation and nesting strategies are being extended to ceramic additive manufacturing of aluminum nitride (AlN). AlN is particularly attractive for advanced thermal-management applications due to its high thermal conductivity, electrical insulation, and thermal stability. Ceramic AM based on digital light processing enables the fabrication of complex AlN lattice architectures by careful consideration of slurry formulation, rheological behavior, and printability.

Integrating tessellation and nesting-based lattice designs with AlN ceramic fabrication offers a promising pathway toward architected thermal management with tailored thermal transport pathways, high surface-area-to-volume ratios, and application-specific geometries for semiconductor devices and high-power electronics.

AMPM2-2 | 15:45] Invited Talk

Multiphysics Simulation for Understanding and Controlling Microstructure Evolution in High-Silicon Fe Alloy: Seungkyun Yim(Tohoku University, Jeonbuk National University)

This study presents a multiphysics simulation framework for understanding and controlling microstructure evolution in Fe–6.5Si (wt%) alloy fabricated by powder bed fusion electron beam melting (PBF-EB). The framework integrates the discrete element method for powder-bed generation, computational thermal–fluid dynamics with free-surface melt flow, and a coupled cellular automaton–finite element model that accounts for both heterogeneous and epitaxial nucleation. Through combined experimental and numerical analyses of multi-track and multilayer melting, the relationships among process parameters, melt-pool behavior, solidification conditions, and grain selection are systematically investigated. The results reveal that line offset strongly influences heat accumulation and melt-pool geometry, thereby altering the distribution of solidification directions and the competition among growing grains. Increasing the line offset aligns the solidification direction more closely with the build direction, while increased undercooling promotes heterogeneous nucleation and reduces the columnar grain aspect ratio. In multilayer processing, however, grain selection cannot be explained solely by the solidification direction or the magnitude of undercooling. Instead, the residence time in the supercooled state is identified as a key factor governing heterogeneous nucleation. At high scan speeds, rapid solidification suppresses the formation of new grains despite relatively large undercooling, thereby sustaining epitaxial growth and promoting a highly textured, single-crystal-like microstructure. Based on these findings, key processing principles for microstructure control are discussed, including suppression of heterogeneous nucleation, alignment of the solidification direction through melt-pool geometry control, and acceleration of solid–liquid interface migration. These findings demonstrate how multiphysics simulation can provide a physics-based framework for designing additive manufacturing conditions toward tailored microstructures.

AMPM2-3 | 16:15] Invited Talk

Dual-scale Cr-rich skeleton tailored by extreme high speed broadband laser cladding for synergistically improved wear and corrosion resistance of Fe-based coatings: Renlong Xiong(Sichuan University)

The trade-off between mechanical strength and corrosion resistance in additively manufactured Cr-rich Fe-based composite coatings remains a bottleneck due to uncontrolled phase coarsening and segregation during non-equilibrium solidification. This study proposes a thermo-kinetic coupling strategy based on extreme high-speed broadband laser cladding (EH-BLC), combining rectangular beam shaping with high-speed scanning to regulate thermal gradient and solidification rate. EH-BLC regulates thermal gradient and solidification rate, constructing a dual-scale Cr-rich network consisting of a micro-scale continuous skeleton and nano-scale discrete precipitates. This architecture deflects cracks, impedes dislocation slip, and acts as a stable elemental reservoir for rapid repassivation. The coating achieves 8.5 GPa nanohardness, a wear rate of 0.93×10-6 mm3·N-1·m-1, a pitting potential of 0.18 V, and a corrosion current density of 0.16 μA/cm^2. These results demonstrate synergistic wear–corrosion resistance and provide a multi-scale design strategy for high-performance Fe-based coatings.

재료분석
Room 1층 103호, 10월 29일

[재료분석1-1 | 08:30]
Hybrid evaluation of steel polymer multi material clad using mechanical testing and finite element analysis: Zaigham Saeed Toor, Jihye Kwon, Rae Eon Kim, Yeon Taek Choi, Gang Hee Gu(Pohang University of Science and Technology (POSTECH)), Min-Hong Seo, Kyung-Hwan Chung(POSCO), Renhao Wu*, Hyoung Seop Kim*(Pohang University of Science and Technology (POSTECH))

Keywords: Layered structures, Clad steel-polymer plates, Interface/interphase, Finite element analysis (FEA)

This study combines experimental testing and numerical simulation to examine the mechanical behavior of low-carbon steel/polyketone multi-material clad plates. The clad sheets were produced by hot pressing and subsequently evaluated through forming, uniaxial tensile, peel, and lap-shear tests to characterize both their overall and interfacial mechanical performance. Microstructural observations were also conducted to clarify how the interfaces respond to mechanical loading. In parallel, finite-element simulations were developed to complement the experiments and to provide a basis for future investigations of alternative layer configurations and interfacial conditions in similar multi-material systems. The incorporation of a polymer interlayer improved the mechanical performance of the clad, yielding an 8.21% increase in specific strength relative to conventional metallic clads and demonstrating promising potential for structural applications. Delamination and interfacial debonding observed during forming were identified as key issues that require further improvement. The strong agreement between the simulated and experimental results confirms the reliability of the model and supports its use in the development of steel-based clad composites. Overall, this work offers important insight into the application of steel-polymer composites in electric vehicle manufacturing and other structural fields.

[재료분석1-2 | 08:45]
마레이징강의 석출 거동과 기계적 특성 분석: 박성현, 신우철(전북대학교), 신은주(한국원자력연구원), 이석재, 정재길*(전북대학교)

Keywords: Maraging steels, Precipitation, Transmission electron microscopy, Small-angle neutron scattering, Atom probe tomography

마레이징강은 저탄소, 고합금강의 한 종류로, 탄소 기반 강화가 아닌 마르텐사이트 기지 내 나노 크기 금속간화합물의 시효 석출을 통해 우수한 기계적 특성을 나타내는 특징이 있다. 용체화 처리 후 마레이징 강은 연질의 래스 마르텐사이트로 구성되며, 후속 시효 과정에서 다양한 석출물 (η-Ni_3Ti, Ni_4Ti_3, Ni_3Mo, B2-NiAl, Laves-Fe_2Mo 등)을 형성하여, 이에 따라 높은 강도와 함께 인성, 용접성 및 가공성을 나타낸다. 그러나 마레이징강의 시효 경화 거동은 합금 조성 및 열처리 조건에 민감하며, 특히 Co는 석출의 열역학적 및 동역학적 조건을 변화시켜 시효 경화를 촉진하는 역할을 한다. 최근 Co의 높은 가격과 공급 안정성 문제로 인해 Co-free 마레이징강이 주목받고 있으나, Co의 제거는 석출상 종류 및 석출 경로를 변화시킬 수 있으므로 이에 대한 체계적인 이해가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 Fe–Ni–Mo–Ti–Al 기반 Co-free 마레이징강의 유도가열 전처리 및 시효에 따른 나노 석출물과 기계적 특성의 변화를 확인하였다. 나노 석출물의 조성, 형상, 크기 분포 및 체적분율은 투과전자현미경 (Transmission electron microscopy, TEM), 소각 중성자 산란 (Small-angle neutron scattering, SANS) 및 원자탐침단층분석 (Atom probe tomography, APT)을 통해 정량적으로 분석되었으며, 기계적 특성 평가를 위해 경도 및 인장 시험을 실시하였다. 시효 초기 마르텐사이트 기지 내에 구형의 Ni–Ti-rich 나노 석출물이 형성되었으며, 시효가 진행됨에 따라 미세한 구형 석출물이 봉상 η-Ni_3Ti 석출물로 성장하였다. 유도 가열 전처리는 초기 미세 클러스터의 형성을 촉진하였으며, 이후 시효 처리 시 미세 구형 석출물과 조대한 봉상 석출물이 공존하는 bimodal 석출물 분포를 유도하였다. 이러한 석출물 분포 변화는 합금의 강도를 유지하는 동시에 변형경화 거동 및 연성을 향상시키는 데 기여하였다.

[재료분석1-3 | 09:00]
후속 심냉처리에 따른 고망간강 기계적 물성 평가: 이태호(충남대학교), 강전연(한국재료연구원), 이수열*(충남대학교)

Keywords: 고망간강, DCT, 초극저온, 기계적 물성

고망간강은 우수한 변형 경화 능력을 바탕으로 강도와 연성이 뛰어난 소재이나, 극한의 환경이나 더 높은 기계적 물성을 달성하기 위해 미세조직을 정밀하게 제어하는 공정이 지속적으로 요구되고 있음. 특히 초극저온 환경에서의 소성 변형은 상온과는 다른 조밀한 미세변형조직의 불균일성 (heterogeneity)을 유도하며, 이는 후속 심냉처리(Deep Cryogenic Treatment, DCT)와 결합될 때 미세구조 재배열을 통해 상온 물성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 잠재력을 가짐. 그러나 이러한 극저 온 사전 변형과 DCT 공정이 복합적으로 작용하여 미세조직 진화와 강화 기구에 미치는 영향을 정량 적으로 규명한 연구는 미비한 실정임. 따라서 본 연구에서는 Fe-26Mn-2Al TWIP 강을 대상으로 초극 저온 환경에서 다양한 사전 변형률(pre-strain)을 부여하여 미세조직의 이질성을 제어한 후, 상온 인장 거동 및 미세조직 변화를 평가함. 특히 실시간 중성자 회절(In-situ neutron diffraction) 분석을 통해 변형 과정 중 발생하는 픽 프로파일링(peak profiling)을 수행하였으며, 이를 기반으로 미세결함, 전위 밀도 및 적층결함확률(Stacking Fault Probability)의 변화를 정밀하게 분석함. 최종적으로는 분석된 미세조직 인자들을 바탕으로 변형 쌍정, 전위 밀도, 그리고 결정립 미세화(grain refinement) 효과가 각 조건에서 유동 응력에 기여하는 분배량을 정량적으로 산출함으로써, 초극저온 공정이 고망간강의 기계적 물성 향상에 기여하는 메커니즘을 종합적으로 이해하고자 함.

[재료분석2-1 | 09:15] 초청강연

In situ Analysis of Radiation-Accelerated Metal Oxidation in Gas-Cell TEM: Kunmo Koo*(Pusan National University)

Keywords: TEM, radiation, oxidation, kinetic modeling

Metals employed in extreme environments, including nuclear reactors, aerospace systems, and space applications, are frequently exposed to both ionizing radiation and reactive gaseous species. Under such conditions, radiation can alter surrounding chemical environments through ionization and dissociation, while simultaneously influencing oxidation, corrosion, and other degradation processes at material surfaces. Understanding the coupled effects of radiation and microstructure is therefore important for interpreting the stability and long-term performance of metals under extreme operating conditions. However, directly resolving these processes at the nanoscale remains experimentally challenging. Gas-cell transmission electron microscopy (TEM) provides a unique platform for observing solid–gas reactions at near-atmospheric pressure with high spatial resolution. At the same time, the energetic electron beam used for imaging inevitably interacts with the gas phase and generates reactive radiolytic species. Such beam-induced chemistry can modify the local reaction environment and consequently alter the measured kinetics and pathways of materials transformations. In the first part of this presentation, electron-beam-induced radiolysis in closed-cell gas-phase TEM is discussed through combined experimental measurements and reaction–diffusion modeling. A kinetic framework incorporating radiation yields, chemical reaction networks, and molecular diffusion is used to predict the evolution of reactive species under electron irradiation. The model reveals strong dependencies of radical concentrations on electron dose rate, gas pressure, gas composition, and illumination conditions, and provides practical considerations for separating intrinsic material responses from beam-mediated reactions. Atmospheric-pressure gas-phase electron energy-loss spectroscopy (EELS) further enables direct monitoring of electron-induced changes in gas composition. The second part focuses on radiation-assisted oxidation of metallic nanoparticles as a representative solid–gas reaction. Using facet-controlled aluminum nanoparticles, oxidation kinetics are systematically examined as a function of electron dose rate and gaseous environment. The oxidation rate increases with electron irradiation and exhibits pronounced gas-species dependence, demonstrating that radiolytically generated oxidizing species can directly govern nanoscale metal oxidation. These results highlight gas-cell TEM not only as an in situ characterization technique, but also as a controllable nanoscale radiation-chemistry platform for studying oxidation and other environmentally driven transformations of metallic materials.

[재료분석2-2 | 09:40]

전류를 이용한 Inconel 718 결정립계 δ상의 용해도 이하에서의 선택적 용해 거동과 γ/δ 계면 구조의 역할: 정찬우, 김이재, 한흥남*(서울대학교)

Keywords: Inconel 718, δ phase, Electric current, Suv-solvus dissolution, γ/δ interface

인코넬 718은 항공·발전용으로 널리 사용되는 Ni기 초내열합금으로, 결정립계에 형성되는 δ상(Ni_3Nb)은 결정립계 핀닝을 통해 결정립 크기를 제어하는 중요한 역할을 한다. δ상은 용해도선 온도 이하에서 열적으로 안정하지만, 본 연구에서는 용해도선 이하인 940 ℃ 조건에서 전류를 인가할 경우 열적으로는 안정하게 유지되어야 할 δ상이 빠르게 용해됨을 확인하였다. δ상의 용해는 전류밀도가 증가할수록 가속되었으며, 기존 열처리와는 뚜렷이 구별되는 경로를 따랐다. 용해도선 이상의 열처리에서는 곡률이 큰 미세한 입내 δ상이 우선 용해되고 조대한 결정립계 δ상이 잔류한 반면, 용해도선 이하의 전류 처리에서는 조대한 GB δ상이 우선적으로 용해되고 일부 입내 δ상이 잔류하였다. 이러한 결정립계 δ상의 조기 용해는 결정립계 핀닝을 약화시켜 결정립 성장을 유발하였다. HRTEM 분석 결과, 결정립계 δ상은 결함이 많은 계면층을 포함하는 비대칭적 $\gamma_1/\delta/\gamma_2$ 계면을 갖는 반면, 입내 δ/γ 계면과 GB δ/γ 계면의 한쪽 면은 상대적으로 정합적이었다. 이로부터 이러한 결함이 많은 계면에서 전류에 의해 유발되는 국소적 전하 불균형이 δ상의 국소 유효 안정성을 낮추어 우선 용해를 촉진하는 것으로 해석하였다. 본 연구는 전류가 γ/δ 계면 구조에 따라 δ상의 용해 경로를 변화시킬 수 있음을 보여주며, 이는 특정 위치의 석출물을 선택적으로 제어하는 공간 선택적 미세조직 제어의 가능성을 제시한다.

[재료분석2-3 | 09:55]

Real-Time Observation Platform for Localized Corrosion Initiation in High-Chromium Cast Iron: 이준섭*, 주티앤유앤(국립창원대학교)

Keywords: 국부부식, 실시간 관찰

A real-time microscopy-based observation system was developed to visualize corrosion processes in aqueous environments. The system was applied to high-chromium cast iron exposed to chloride solution. Continuous observation showed that corrosion products developed into a ring-shaped region, while localized corrosion occurred preferentially near carbide–austenite interfaces. This behavior was associated with microstructural and electrochemical heterogeneity. Carbide-rich regions were considered to promote local cathodic reactions and alkalinization, whereas adjacent austenitic regions underwent anodic dissolution. These results demonstrate that the developed system can directly capture the spatial evolution of corrosion associated with heterogeneous microstructures.

[재료분석3-1 | 10:20] 초청강연

Q&P강의 절단부 파괴 거동에 미치는 미세조직의 영향: 실시간 분석을 통한 변형 및 손상 기구 규명: 김경식*(국립금오공과대학교)

Keywords: 금속, QP강, 절단부 균열, 실시간 분석

자동차용 초고강도강의 적용 확대에 따라 전단 가공된 절단부의 국부 성형성과 파괴 저항성 확보가 중요해지고 있다. 본 연구에서는 980 및 1180 MPa급 Q&P강의 절단부 파괴 거동을 비교하고, SEM/EBSD 분석과 in-situ 미소 인장시험 및 DIC를 활용하여

미세조직 수준의 변형 및 손상 기구를 분석하였다. 980QP강은 높은 전체 연성에도 불구하고 낮은 홀 확장성을 보였으며, 이는 연한 페라이트 영역으로의 변형 집중과 손상 성장에 기인하였다. 반면 1180QP강은 보다 균일한 변형 분배를 통해 손상 발생과 성장을 지연시켰다. 이를 통해 Q&P강의 국부 성형성이 강도나 전체 연신율보다 미세조직 내 변형 분배와 상간 기계적 상호작용에 크게 좌우됨을 확인하였다.

[재료분석3-2 | 10:45] 초청강연

Atomic-Scale Structure–Property Relationships in Structural and Functional Materials: Hwangsun Kim*(Kumoh National Institute of Technology)

Keywords: Scanning transmission electron microscopy (STEM), Electron ptychography, Incommensurate modulation, Interface structure

Understanding how local structural variations govern the properties and stability of materials is a fundamental challenge in materials science. Recent advances in transmission electron microscopy (TEM) and scanning transmission electron microscopy (STEM) have enabled direct visualization and quantitative analysis of materials at the atomic scale, providing new opportunities to establish structure-property relationships. In this talk, I will present recent studies demonstrating how advanced electron microscopy can uncover the structural origins of material behavior in both structural alloys and functional oxides. First, I will discuss the interfacial structures of η precipitates in Al–Zn–Mg alloys, which play a critical role in the strength and stability of high-strength aluminum alloys. Atomic-resolution HAADF-STEM imaging combined with quantitative strain analysis revealed characteristic step-like interfacial structures that accommodate lattice misfit and reduce interfacial strain energy. These observations provide new insights into how local atomic structures influence precipitate stability and, consequently, the mechanical properties of structural alloys. I will then introduce our investigation of incommensurate structural modulation in $Ba_2TiSi_2O_8$ (fresnoite), a functional oxide exhibiting complex structural and lattice-dynamical behavior. Using in-situ TEM/STEM and electron ptychography, we directly visualized subtle atomic displacements associated with the modulation and investigated their evolution with temperature. The results demonstrate how local atomic distortions can be linked to changes in lattice dynamics and thermal transport. Together, these studies highlight the capability of advanced electron microscopy to bridge atomic-scale structural information with macroscopic material properties. By combining atomic-resolution imaging, quantitative analysis, and in-situ characterization, we aim to uncover how local structural features govern the stability, transformation, and functionality of advanced materials.

[재료분석3-3 | 11:10]

Variant-Pair Controlled Bending Anisotropy in Hot-Stamped Steel Revealed by EBSD: Nu Ri Shin(Hyundai Steel R&D Center, Sungkyunkwan University Advanced Materials Science and Engineering), Hun Chul Kang(Hyundai Steel R&D Center), Cheol-Woong Yang*(Sungkyunkwan University Advanced Materials Science and Engineering)

Keywords: Hot-stamped steel, Electron backscatter diffraction (EBSD), Variant pairing, Mechanical anisotropy

Prior austenite grain size (PAGS) is widely regarded as the dominant microstructural descriptor controlling the bendability of martensitic hot-stamped steels, yet it fails to explain directional variations in bending performance. Materials exhibiting nearly identical PAGS values (10–12 μm) showed markedly different bending angles and levels of bending anisotropy. To resolve this discrepancy, the present study decouples the influence of PAGS from local crystallographic variant architecture using electron backscatter diffraction (EBSD) and a reference-variant framework based on the Kurdjumov-Sachs orientation relationship. Martensitic variant-pair fractions (V1–Vn) were quantified and compared between materials exhibiting strongly anisotropic and nearly isotropic bending behavior. The results indicate that bendability is governed not by PAGS but by the relative enrichment of high misorientation variant pairs with respect to V1. In particular, preferential formation of block-type variant pairs within the same close-packed plane group, such as V1–V2 and V1–V3/V5, was identified as the key microstructural feature suppressing bending anisotropy. These findings demonstrate that crystallographic variant architecture provides a more reliable descriptor of bendability than conventional grain-size metrics. The proposed framework establishes a composition-independent, variant-level approach for engineering bending performance in hot-stamped steels and offers a quantitative basis for microstructural design beyond traditional grain-size-based processing strategies.

[재료분석4-1 | 11:30]

극저온+수소 복합환경에서의 316L 스테인리스강 열영향부 피로 거동 분석: 정재원, 이근형, 이태호, 이수열*(충남대학교)

Keywords: 316L 스테인리스강, 열영향부, 극저온, 수소 취성, 피로 거동

액체수소 저장 및 운송 시스템의 핵심 소재인 316L 스테인리스강은 운용 중 극저온 및 수소 환경에 동시에 노출된다. 본 연구에서는 이러한 극한 복합 환경이 재료의 미세조직 안정성 및 기계적 건전성에 미치는 영향을 규명하고자 한다. TIG 용접이 적용된 316L 판재를 대상으로 비커스 경도 매핑을 수행하여 모재와 열영향부를 구분하고, 각 영역에 대해 수소 장입 유무 및 시험 온도에 따른 피로 거동을 평가하였다. 피로 시험은 상온 및 15 K 초극저온 환경에서 수행하였으며, 확보된 S–N 곡선과 SEM 기반 파단면 관찰을 통해 환경 조건에 따른 피로 수명 및 균열 개시·전파 거동을 분석하였다. 또한, EBSD 기반의 결정학적 분석을 통해 시험 환경과 수소 장입이 오스테나이트 안정성 및 변형 유기 마르텐사이트 변태 거동에 미치는 복합적인 영향을 고찰하였다. 이를 통해 미세조직 변화와 피로 특성 간의 상관관계를 도출하고, 향후 액체수소 에너지 시스템용 소재의 신뢰성 평가 및 안전 기준 수립을 위한 핵심 기초 자료를 제공하고자 한다.

재료분석4-2 | 11:45]

초분광 이미징을 활용한 이차전지 외장케이스 제조 결함 분류: 김민규, HwaSung Yeom*(Pohang University of Science and Technology)

Keywords: 초분광 이미징, 니켈도금강판, 표준 정규 변환, 머신러닝, 비파괴 검사

이차전지 외장케이스 소재인 니켈도금강판(Ni-plated steel)은 제품의 성능과 내구성을 보장하기 위해 엄격한 표면 품질관리가 요구된다. 그러나 명암 대비에 크게 의존하는 기존의 RGB 카메라 및 육안 기반 검사는 미세결함 검출에 뚜렷한 한계를 보이며, 무엇보다 결함 판정 기준이 모호하여 검사 결과가 검사자의 주관에 크게 좌우된다는 불확실성을 안고 있다. 본 연구에서는 가시광–근적외선(VNIR, 400–1000 nm) 영역의 초분광 이미징(Hyper-Spectral Imaging)을 활용하여, 금속의 광학적 특성 차이에 기반한 제조 결함 분류 방법을 소개한다. 반사율 스펙트럼에 표준 정규 변환(Standard Normal Variate, SNV) 등의 전처리를 적용하여 저탄소강 모재와 니켈 도금층을 분광 정보만으로 일관되게 구분하였으며, 이를 기반으로 스크래치(Scratch), 핀홀(Pin-hole), 미도금(Unplated) 결함부와 정상부(Defect-Free) 간의 분광 특성 차이를 시각화하였다. 이후 결함별 분광 특성 차이를 학습 지표로 삼아 CNN(Convolutional Neural Network) 기반 이진 분류 모델을 구성하였고, 니켈의 검출 여부를 정상부와 결함부의 명확한 판정 기준으로 적용하였다. 본 발표에서는 mm 스케일 결함에 대한 분류 결과와 함께 진행 중인 연구로서 분류 성능 및 검출 한계를 논의하고, 궁극적으로 초분광 이미징이 기존의 광학 비파괴 검사(Non-Destructive Testing) 체계에 다각적인 접근을 가능하게 함을 보이고자 한다.

[재료분석4-3 | 12:00]

Atomic-scale characterization and sustainable recycling strategies of spent battery cathodes: Doo-Hyo Jeong(Korea Univ.), I-Jun Ro(Stanford Univ.), Aleksander Albrecht, Se-Ho Kim*(Korea Univ.)

Keywords: Spent Battery Cathode, LFP, NCM, sustainable recycling, Hydrogen plasma reduction, Atom Probe Tomography

The rapid growth of electric vehicle markets and energy storage systems has accelerated the expansion of the global battery industry, leading to a significant increase in battery consumption worldwide. Consequently, considerable attention has been directed toward the recycling and sustainable management of spent battery waste. In particular, spent cathode materials contain substantial amounts of valuable metals, such as Ni, Co, Mn, and Fe, which can be recovered through appropriate recycling processes. Therefore, the development of efficient and sustainable recycling technologies is becoming increasingly important for improving resource utilization, reducing dependence on raw material extraction, and minimizing the environmental burden associated with battery waste disposal and conventional mining activities. This study presents various recycling strategies for spent battery cathode materials, including LFP and NCM. First, regarding LFP cathode recycling, hydrogen-based reduction strategy is proposed, and the feasibility of recovering the valuable metal Fe is examined using plasma reduction and thermal reduction processes, respectively. Reduction behavior was evaluated using both the hydrogen plasma reduction process and the conventional thermal decomposition process in a 4 vol% H_2/Ar atmosphere. To compare the two reduction methods, structural and phase changes before and after the reduction processes were analyzed. Next, For NCM cathode recycling, the distribution and behavior of residual lithium that was not removed after the roasting and water leaching processes will be analyzed. In practice, advanced structural and compositional characterization techniques are essential to accurately track lithium within the sample. Atomic Probe Tomography (APT) is a highly powerful analytical technique that can provide high-resolution 3D compositional mapping at the atomic level. By utilizing APT, the atomic-level elemental distribution within spent battery cathode materials is identified, thereby suggesting a direction for the removal of residual lithium from spent NCM cathode. Through this research, we examine the feasibility of effectively recovering valuable metals from waste battery cathode materials and propose optimized process directions, thereby contributing to the establishment of a sustainable resource circulation system for the global battery industry.

25th KIM-JIMM Symposium

Room 1층 103호, 10월 29일

[KJ1-1 | 13:30] Invited Talk

Digital Twin Science for Creation of Materials by Super-Thermal Fields in Additive Manufacturing and Its Potential for High-Entropy Alloys: Yuichiro KOIZUMI(Division of Materials and Manufacturing Science, null), Masayuki Okugawa(Division of Materials and Manufacturing Science, null), Akihiro Mitsuhara(Division of Materials and Manufacturing Science, null), Takeshi Nagase(Graduate School of Engineering, University of Hyogo), Takayoshi Nakano(Division of Materials and Manufacturing Science, null)

Metal additive manufacturing (AM), particularly powder-bed fusion (PBF), creates super-thermal fields characterized by rapid heating and cooling, steep temperature gradients, and high solidification rates. These conditions enable materials creation through control of crystallographic texture, solute distribution, and defect structures. This presentation focuses on Digital Twin Science as a framework for understanding and controlling these processes, with emphasis on single-crystal formation and an extension to high-entropy alloys (HEAs). Our framework connects experiments with discrete-element modeling of powder spreading, computational thermal-fluid dynamics of melt-pool transport, phase-field simulations, and in-situ monitoring [1]. Powder-bed characteristics inform melting calculations, while local temperature gradients, interface velocities, and thermal histories provide inputs for microstructure prediction. Comparisons with observations identify missing physics and guide model refinement and process design. Coupled thermal-fluid and phase-field simulations of Hastelloy X link processing conditions to cellular growth and solute segregation [2]. Within this framework, beam-scanning strategies and melt-pool geometry govern repeated remelting, epitaxial growth, and grain selection during layer-by-layer fabrication. The GROUSE concept organizes the competing contributions of crystal growth, remelting, nucleation, and selection to single-crystal formation. Thermal-field engineering thereby connects component geometry with crystallographic texture, allowing anisotropy to become a design variable. In the γ′-strengthened Ni-based superalloy IN738LC, laser PBF (PBF-LB) with a μ-helix scanning strategy produces single-crystal regions. Subsequent annealing at 1200 °C promotes anomalous grain growth, expands these regions, and reduces solute segregation [3]. This example connects solidification control and post-build heat treatment as complementary steps toward single-crystal fabrication. As an extension to HEAs, we introduce the Ti-Zr-Nb-Mo-Ta alloy[4, 5]. L-PBF produces cellular structures containing Zr-rich and Ta-rich body-centered cubic phases coupled with dense dislocation networks. Microscopy and thermodynamic calculations support a mechanism involving solid-state phase separation during rapid cooling and dislocation formation to accommodate lattice misfit. Elemental partitioning is weaker than in cast material. The resulting fine cells and dislocation networks contribute to high strength through cell-boundary and dislocation strengthening. Together, these studies show how super-thermal fields can be used to design crystal orientation and hierarchical microstructures. The HEA example extends the discussion from single-crystal formation to coupled phase separation and defect formation, providing a concrete basis for exploring functional HEAs through control of processing, composition, and thermal history. References [1] Y. Koizumi and M. Okugawa, ISIJ International 62 (2022) 2183–2196. [2] M. Okugawa, K. Saito, H. Yoshima, K. Sawaizumi, S. Nomoto, M. Watanabe, T. Nakano, and Y. Koizumi, Additive Manufacturing 84 (2024) 104079. [3] M. Okugawa, K. Nose, S. Hirooka, S. Nomoto, Y. Liu, M. Watanabe, Y. Koizumi, and T. Nakano, Materials & Design 266 (2026) 116222. [4] H. Chen, D. Egusa, Z. Li, T. Sasaki, R. Ozasa, T. Ishimoto, M. Okugawa, Y. Koizumi, and T. Nakano, Addit. Manuf. 102 (2025) 104737. [5] T. Ishimoto, R. Ozasa, K. Nakano, M. Weinmann, C. Schnitter, M. Stenzel, A. Matsugaki, T. Nagase, T. Matsuzaka, M. Todai , H. S. Kim, and T. Nakano, Scripta Materialia, 194, 113658 (2021). brief biography Yuichiro Koizumi is the professor of Materials Design and Processing in the Division of Materials and Manufacturing Science at the University of Osaka, Japan. He earned his Bachelor of Engineering in 1995 and his Ph. D. in the same field both from Osaka University in 1995 and 1999, respectively. He was an assistant professor of in the Department of Adaptive Machine Systems 1999-2010 at Osaka University prior to joining Institute for Materials Research, Tohoku University, as an associate professor of materials processing 2010-2017. He published more than 250 papers. Prof. Koizumi's research is focused on the designing of novel materials and the development of processing for optimizing. Since 2021, he has led the JSPS/MEXT-supported project “Creation of Materials by Super Thermal Field: Neo-3D Printing by Manipulating Atomic Arrangement through Giant Potential Gradient, ” involving more than 50 researchers across Japan.

[KJ1-2 | 13:50] Invited Talk

Is the Cantor Alloy Really a Single Phase? A Retrospective from 2013 to the Era of Ferrous High-Entropy Alloys: Nokeun Park *, Minku Choi(Yeungnam University), Byeong-Joo Lee(POSTECH), Nobuhiro Tsuji(Kyoto University)

Keywords: High-entropy alloy, Cantor alloy, Phase stability, Sigma phase, CALPHAD, Pseudo-binary phase diagram, Ferrous medium-entropy alloy

The equiatomic CoCrFeMnNi alloy, widely known as the Cantor alloy, has long been regarded as the prototypical single-phase fcc high-entropy alloy (HEA). In the early years of HEA research, it was generally believed that the high configurational entropy of mixing

stabilizes a simple solid solution over the entire temperature range below the solidus, and this belief shaped both the alloy design strategy and the peer-review climate of the field. We began studying this alloy about fifteen years ago, and from the outset we questioned this assumption, because the entropic contribution to the Gibbs energy necessarily diminishes as temperature decreases, whereas the enthalpic driving force for compound formation remains. In 2013, we carried out CALPHAD calculations using the TCFE database (Thermo-Calc), which was originally developed for steels and Fe-based alloys. The calculations predicted that the fcc solid solution is not stable at intermediate temperatures and that a Cr-rich sigma phase should form. We subsequently verified this prediction by annealing experiments and microstructural characterization, and compared the experimental results with the calculated phase equilibria. Because this result contradicted the prevailing view of the time, the manuscript was repeatedly rejected over several years and was finally published only in 2017. By then, the metastability of the Cantor alloy had become widely recognized. This history is itself an instructive episode in how the understanding of HEAs has matured, from an entropy-centered concept to a balanced thermodynamic and kinetic description. In parallel, we approached the alloy from a commercial viewpoint from the very beginning. Since Co and Ni are expensive, practical application requires that their content be reduced, and Fe is the natural substitute. Treating equiatomic CoCrMnNi as a single component, we experimentally constructed a CoCrMnNi–Fe pseudo-binary phase diagram that continuously connects the HEA composition space to that of conventional high-alloyed steels. This diagram clarified the phase constitution as a function of Fe content, including the stability ranges of the fcc, bcc, and sigma phases, and provided a rational basis for cost-effective alloy design. It was followed by a growing body of work on ferrous high- and medium-entropy alloys (Fe-HEAs/MEAs). Although these alloys have not yet reached commercialization, this line of research has expanded the horizon of alloy thermodynamics from the corners toward the center of multicomponent composition space, provided experimental data for validating and improving thermodynamic databases, and linked HEA science with the knowledge accumulated over a century of stainless steel metallurgy. In this talk, we revisit this journey, highlight the long-standing Korea–Japan collaboration behind it, and discuss the remaining challenges and opportunities for the industrial application of ferrous multi-principal-element alloys.

KJ1-3 | 14:10] Invited Talk

High Entropy Nanoporous Alloys prepared by Liquid Metal Dealloying: Hidemi KATO(Tohoku University)

The liquid metal dealloying is a metallurgical process designed based on the heat of mixing; it is a technique in which specific component is selectively leached from a single phase precursor alloy immersed in molten metal, allowing the porous structure of the remaining components to self-organize within the molten metal. This paper reports on fabrication of the open cell type nanoporous high-entropy alloys using this method and the thermal stability of their porous structures. brief biography In 1999, Hidemi Kato received his Ph.D of Engineering from Tohoku University for his research on the viscous flow and relaxation phenomena of Zr and Pd based metallic glasses. He joined the Institute for Materials Research at Tohoku University as an Assistant Professor in 2000, was promoted to Associate Professor in 2007, and became a Professor in 2015. He discovered the Liquid Metal Dealloying (LMD) phenomenon while researching metallic glasse composites in 2010 with a collaborator Prof. T. Wada, and has been actively pursuing research on nanoporous alloys and nanocomposites using LMD.

KJ1-4 | 14:30] Invited Talk

Development of High-Strength, Low-Thermal-Expansion Complex Concentrated Alloys: Soohyun Joo(Dankook University)

Keywords: Medium-entropy alloy, Precipitation strengthening, Heterogeneous microstructure, Cryogenic mechanical properties, Low thermal expansion

The growing use of cryogenic systems, including liquid hydrogen storage and aerospace applications, requires structural alloys that can simultaneously provide high mechanical reliability and low thermal expansion. In this work, Fe–Co–Ni–Cr–Mo complex concentrated alloys (CCAs) with different compositions were investigated to clarify the relationships among alloy chemistry, thermomechanical treatment, precipitation behavior, and cryogenic performance. Changes in alloy composition and heat-treatment conditions led to distinct precipitation and recrystallization behaviors. The precipitation and subsequent evolution of Mo-rich μ phase affected the matrix chemistry and were accompanied by the development of heterogeneous microstructures consisting of recrystallized grains and retained deformation structures. Such microstructural features provided effective strengthening while preserving appreciable ductility at cryogenic temperatures. In some alloy conditions, phase-transformation-assisted plasticity also contributed to improved strength–ductility synergy. In addition to the enhanced mechanical properties, relatively low thermal expansion was retained through appropriate control of precipitation and matrix composition. These findings suggest that simultaneous control of alloy chemistry, precipitation, and microstructure is a promising approach for developing Fe–Co–Ni–Cr–Mo CCAs with a desirable combination of cryogenic strength, ductility, and low thermal expansion.

[KJ1-5 | 14:50] Invited Talk

High entropy alloy thin films for spintronic applications: Kazuya Z. SUZUKI(Japan Atomic Energy Agency(JAEA))

High-entropy alloys (HEAs) are generally defined as solid-solution alloys composed of five or more principal elements in near-equiatomic proportions, where a single phase is stabilized by high configurational entropy. Unlike conventional alloys based on a single

principal element, HEAs have attracted attention across various fields owing to their superior mechanical and physical properties originating from severe lattice distortion and unique electronic structures. In recent years, expanding this multi-component alloy design into the field of spintronics has gained strong momentum. In this invited talk, we present our recent progress on the development and characterization of HEA thin films tailored for spintronic applications1-4. reference 1) T. Kubota, K.Z. Suzuki, Y. Hirayama, S. Takahashi, and K. Takanashi, Phys. Rev. Mater. 9, 08440 8(2025). 2) K.Z. Suzuki, T. Kubota, K. Takanashi, APL Materials 13, 101108(2025). 3) H. Isshiki, K. Z. Suzuki, M. Imai, Z. Dong, H. Chudo, Y. Otani, K. Takanashi and J. Ieda High Entropy Alloys and Materials 2026. 4) K.Z. Suzuki, T. Tsuru, K. Ito, K. Takanashi, JP 2026-191914 (2026). brief biography Kazuya Z. Suzuki earned their Ph.D. from the University of Tsukuba in 2013. Following appointments as a Postdoc and Assistant Professor at AIMR, Tohoku University (2014–2022), they joined the ASRC, Japan Atomic Energy Agency (JAEA) in 2022, where they currently serve as a Team Leader for the advanced electronic materials and devices research team.

[KJ2-1 | 15:30] Invited Talk

Short-range order and its impact on dislocations in FCC multi-principal element alloy: Jae Bok Seol(POSTECH)

Multi-principal element alloys (MPEAs) have emerged as an important class of structural materials owing to their exceptional combinations of strength, ductility, and microstructural stability. Increasing evidence suggests that chemical short-range order (SRO) plays a critical role in governing these properties by modifying local bonding, defect energetics, and deformation pathways. Yet a coherent understanding of SRO in face-centered cubic (FCC) MPEAs remains elusive, not only because its formation and manifestation are highly sensitive to alloy chemistry and thermal history, but also because fundamental questions remain unresolved regarding how SRO should be defined, measured, and interpreted in chemically complex solid solutions. In particular, the rigorous distinction of SRO from clustering, deformation-induced local ordering, long-range ordered precipitates, and diffraction-related artifacts remains a central challenge in the field. In this review, we critically examine the current understanding of SRO in FCC MPEAs, with emphasis on its thermodynamic origin, thermal evolution, quantitative descriptors, and multiscale characterization. A distinctive contribution of this review is the proposal of a practical correlative protocol for identifying “true SRO”, with emphasis on the minimum evidence required to distinguish genuine SRO from clustering, long-range ordered precipitates, and measurement-related artifacts. Particular attention is devoted to recent advances in atomistic modeling, atom probe tomography, and transmission electron microscopy–based approaches, which have expanded access to local chemical ordering while also exposing important methodological limitations.

[KJ2-2 | 15:50] Invited Talk

Ultra-grain-refinement of face-centered cubic high/medium-entropy alloys: Approaching the limit of grain refinement through severe plastic deformation and recrystallization: Shuhei YOSHIDA(Kyoto University), Nokeun Park(Yeungnam University), Kohei Shiotani (Kanazawa University, Japan Atomic Energy Agency), Yu Bai (Dalian University of Technology), Tomoaki Niiyama (Kanazawa University), Akinobu Shibata (National Institute for Materials Science), Tomotsugu Shimokawa (Kanazawa University), Nobuhiro Tsuji (Kyoto University)

Keywords:

Face-centered cubic high- and medium-entropy alloys can develop fully recrystallized ultrafine-grained microstructures through deformation and subsequent annealing. This presentation discusses the mechanisms underlying this pronounced grain-refinement capability in CoCrFeMnNi and CoCrNi alloys subjected to high-pressure torsion and short-term annealing. Compared with conventional materials, the alloys develop finer nanocrystalline structures with higher dislocation densities during deformation, indicating suppressed dynamic recovery. Subsequent annealing produces fully recrystallized ultrafine-grained microstructures, while grain growth is strongly retarded. Hybrid Monte Carlo/molecular dynamics simulations of model alloys suggest that atomic-size differences reduce grain-boundary free volume, enhance solute drag, and suppress grain-boundary migration. These findings show how suppressed dynamic recovery and slow grain-boundary migration jointly promote a high density of potential recrystallization nuclei while limiting coarsening, enabling exceptional grain refinement in these alloys. brief biography Shuhei Yoshida is an Assistant Professor in the Department of Materials Science and Engineering at Kyoto University, Japan. He received his Ph.D. in Engineering from Kyoto University in March 2021 and joined the faculty in June 2021. His research focuses on physical metallurgy, particularly the relationships between microstructures and properties in various solid solution alloys, including high- and medium-entropy alloys, utilizing advanced electron microscopy techniques.

[KJ2-3 | 16:10] Invited Talk

Linking Stacking Fault Energy to Dislocation Substructures and Serrated Plastic Flow at Ultra-Low Temperatures: Jae Woong Bae (Pukyung National University)

Discontinuous plastic flow (DPF) at ultra-low temperatures is one of the primary factors limiting the mechanical stability and reliability of structural materials used in cryogenic environments. However, the microstructural factors governing the characteristics of DPF, particularly the magnitude of stress drops, remain poorly understood. In this study, we demonstrate that stacking fault energy (SFE), a key material parameter controlling plastic deformation, plays a decisive role in determining DPF behavior at ultra-low

temperatures. To investigate this effect, the SFE was systematically tailored by varying the Ni and Co contents in face-centered cubic (FCC) Fe55Cr12.5NixCo(25−x)Mo7.5 medium-entropy alloys. Tensile tests were conducted at 4.2 K to evaluate the deformation behavior. As the SFE increased, the magnitude of stress drops was significantly reduced, resulting in more stable plastic flow. Microstructural characterization revealed that low-SFE alloys deformed predominantly by planar slip, where extensive dissociation of perfect dislocations into partial dislocations promoted frequent interactions among partial dislocations and the formation of strong dislocation barriers, leading to pronounced stress drops. In contrast, higher SFE facilitated wavy slip by promoting dislocation cross-slip, thereby suppressing the formation of dislocation barriers and effectively mitigating DPF.

[KJ2-4 | 16:30] Invited Talk

Synergistic of Stacking Fault Energy and Grain Size on Mechanical Performance in H/MEAs with FCC-HCP Transformation: Koichi TSUCHIYA, Fumiyoshi YOSHINAKA(National Institute for Materials Science (NIMS))

Stacking fault energy (SFE) is a critical parameter in controlling the deformation mechanisms of metallic materials and alloys. Low-SFE alloys exhibit deformation twinning (DT) and/or the formation of HCP martensite, which enhances the strain-hardening rate (SHR) and lead to good strength-elongation balance. The present study reports the effet of SFE and grain size on the room temperature tensile-behavior of for Cr-Mn-Fe-Co-Ni High-Entropy Alloys. It was revealed that volume fraction of the HCP phase increases with the grain size up to a critical size then decreases. The critical grain size also depends on Ni content and was 26 μm for Ni10 and 18 μm for Ni15, respectively. Effect of SFE on low cycle fatigue of Co-Cr-Mo-Ni MEAs will be also explained. brief biography Dr. Tsuchiya obtained his Ph. D. in Materials Science and Engineering at Northwestern University in 1991. From 1991 to 1997, he was an Assistant Professor at Department of Applied Physics at Hokkaido University. He was a Lecturer and an Associate Professor at Department of Production Systems Engineering of Toyohashi University of Technology from 1997 to 2007. He joined NIMS in 2007. He was a Director of Research Center for Strategic Materials and Structural Materials Unit (2013-2016), a Director of Research Center for Structural Materials (2017-2018) as well as a Director of International Center for Young Scientists (ICYS) (2018-2024), He was also a Professor of Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba (2018-2020). Since 2026, he is a NIMS Emeritus Researcher.

KJ2-5 | 16:50] Invited Talk

Discovering shape memory alloys in CrMnFeCoNi system: Je In Lee, Jinsurang Lim, Hwi Yun Jeong, Ana Paula Nolasco Aguilera(Pusan National University)

Keywords:

High-entropy alloys, which are comprised of multi-principal elements with near equiatomic composition, have attract considerable interest for developing new metallic materials with exceptional mechanical and functional properties. Since stress-induced forward martensitic transformation and its reverse transformation were reported in the quinary CrMnFeCoNi high-entropy alloys, extensive investigation has been conducted for the discovery of novel shape memory alloys in the vast alloy composition space. In the present study, martensitic transformation and shape memory properties in CrMnFeCoNi high-entropy alloy system and its subsets (CrFeCo and CrCoNi) were investigated by means of structural and thermal analysis. With CALPHAD simulation, we evaluate the difference in Gibbs free energy between austenite fcc and martensite hcp phases, then find a substantial increase in phase transformation temperatures as the alloy composition is shifted to Co-rich one.

복합재료
Room 1층 104호, 10월 29일

[복합1-1 | 08:30]

차세대 반도체 heatsink-baseplate용 고방열·고내구성 cBN 강화 Al 복합소재 개발: 강화재 입도 설계와 나노스케일 계면의 영향: 김민수(한국재료연구원, 부경대학교), 조은서(한국재료연구원, 부산대학교), 이지윤(한국재료연구원, 부경대학교), 이상복, 이상관(한국재료연구원), 권한상(부경대학교), 김정환*, 조승찬*(한국재료연구원)

Keywords: 알루미늄 복합소재, 입방정 질화붕소, 방열판, 열전도도

고성능화와 고집적화를 통한 반도체 소자의 발전이 진행될수록 높은 소모전력이 수반되며, 그에 따라 단위면적당 50–200 W/cm^{2}에 이르는 고밀도 발열이 발생하게 된다. 또한 저온과 고온을 넘나드는 반복적인 열충격 환경에 노출됨에 따라 소자의 성능 저하와 수명 단축이 발생할 수 있으며, 반도체 package 내부에서 열팽창계수 차이로 인해 반도체가 휘거나(warpage), wire bonding이 탈락되거나, solder interface가 박리되는 문제가 발생할 수 있다. 이에 반도체에서 발생하는 열을 효과적으로 배출할 수 있는 솔루션의 개발이 중요한 도전과제로 대두되고 있다. 현재 소재 단계에서는 높은 방열 성능을 가지는 금속 소재들(순금속 기준 Cu 약 400 W/m·K, Al 약 220 W/m·K)을 중심으로 연구가 진행되고 있으나, Cu는 높은 밀도(8.96 g/cm^3)로 인해 경량화에 불리하며, Al은 높은 열팽창계수(약 23 ppm/K)로 인해 반도체 기판과의 열팽창 정합 측면에서 불리하다. 금속복합소재(MMCs, Metal Matrix Composites)는 금속 기지(matrix)와 세라믹 강화재(reinforcement)의 조합을 통해 우수한 치수 안정성을 확보하면서도 열적 특성의 제어가 용이하여 반도체 패키징, 우주항공 소재, 공작기계 부품 등 다양한 분야에서 주목받고 있다. 현재 Cu/Diamond 조합을 통해 약 500 W/m·K 이상의 열전도도가 보고되었으나, 소재 비용이 높고 Cu가 C와 열역학적으로 반응하지 않기에 계면 결합력이 낮아 계면 열저항이 증가하여 이론적으로 높은 열전도도의 구현이 어렵다는 한계가 있다. 이를 개선하기 위해 Cr, W등의 탄화물 형성 원소를 계면에 도입하는 연구가 이루어지고 있으나, 공정이 추가가 될 뿐만 아니라 계면 탄화물 두께에 따라 열전도 특성이 오히려 저하될 가능성이 존재한다. 반면에 cBN을 강화재로 하는 Al기지 금속복합소재는 열역학적으로 cBN/Al 계면에 AlN 층이 자발적으로 형성될 수 있기 때문에 이 계면 반응층이 두 소재간 젖음성을 개선시키면서 계면결합력을 향상시켜 별도의 추가공정 없이도 건전한 계면을 확보할 수 있다. 다만 이 층 또한 과도하게 성장할 경우 계면 열저항으로 작용하므로, 반응층의 두께를 나노미터 수준에서 제어하는 것이 핵심 과제가 된다. 이러한 관점에서 액상 가압 함침법(liquid pressure infiltration)은 타 공정(HTHP: 1400–1600 ºC, GPI: 800 ºC) 대비 낮은 공정온도(700 ºC)에서 충분한 유지시간(20 min)을 부여함으로써, 계면 반응을 유도하면서도 반응상의 과도한 성장을 억제할 수 있다는 이점을 가진다. 따라서 본 연구에서는 액상 가압 함침법을 적용하여, 높은 열전도도와 낮은 열팽창계수를 동시에 지닌 cBN(TC 약 700–1300 W/m·K, CTE 약 3.8 ppm/K)을 강화재로, 저밀도와 양호한 열전도도를 가진 Al을 기지로 사용하여 금속복합소재를 개발하였다. 강화재로는 조대 입자와 미세 입자, 그리고 이 둘을 조합한 bimodal 분포를 각각 적용하였으며, 이에 따른 강화재 분율 향상 효과와 계면이 물성에 미치는 영향을 중심으로 평가하고자 하였다. 반도체 실장 환경을 모사하여 −40 ºC ~ 150 ºC 구간의 대기분위기의 열충격 시험을 수행하고, 시험 전후의 미세구조, 열전도도, 열팽창 거동 및 굽힘강도를 비교 분석하였다. 제조된 복합소재는 강화재가 균일하게 분포된 미세조직을 나타내었으며, 우수한 열전도 특성과 낮은 열팽창계수, 양호한 굽힘강도를 보였고, 열충격 시험 이후에도 높은 물성 잔존율을 유지하였다. 본 연구를 통해 온도에 따른 치수 안정성과 높은 열전도도를 동시에 갖춘 고방열 복합소재를 제조하여 고성능 반도체의 방열에 효과적인 특성을 확인하였다. 강화재의 입도 제어를 통해 공정상 강화재 분율의 한계를 극복하여 고체적률의 세라믹 강화 금속기지 복합소재를 제조할 수 있었으며, 결함 제어와 나노미터 수준의 계면 반응상 제어를 통해 기존 연구 대비 우수한 특성을 구현할 수 있었다. 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-나노 및 소재기술개발사업의 지원을 받아 수행됨(RS-2022-NR068258, RS-2024-00444649)

[복합1-2 | 08:45]

고충진 Thermal Interface Material의 미세구조 및 계면 조건에 따른 열전달 특성: 윤한준, 장병록, 고병철*(인하대학교 제조혁신전문대학원)

Keywords: Al2O3/SEBS 복합재, 대표체적요소, 유효 열전도도

고분자 기반 Thermal Interface Material(TIM)의 열전달 특성은 충진재 함량과 고유 열전도도뿐만 아니라 입도 조성, 공간 분포, 입자 간 접촉 및 계면 열저항의 영향을 복합적으로 받는다. 특히 고충진 조건에서는 입자 접촉망이 주요 열전달 경로를 형성하므로, 단순 혼합법칙만으로 미세구조 변화에 따른 유효 열전도도의 차이를 설명하기 어렵다. Al2O3 입자가 충진된 SEBS 기반 TIM을 대상으로 주기적 대표체적요소(Representative Volume Element, RVE)를 구성하고, 미세구조와 계면 조건이 정상 및 과도 열전달 특성에 미치는 영향을 분석하였다. RVE 내부에는 서로 다른 크기의 Al2O3 입자를 명시적으로 배치하였으며, 주기경계에서 입자 간 중첩이 발생하지 않도록 기하학적 배치 및 충돌 검사 알고리즘을 적용하였다. 충진율과 입도 조성을 유지하면서 입자의 공간 분포를 변화시켜 서로 다른 접촉망을 생성하고, 접촉쌍의 수, 평균 배위수 및 주요 열전달 경로를 정량화하였다. 각 입자를 열용량 절점으로, 입자 간 직접 접촉 또는 고분자 간극을 통한 열전달 경로를 열저항 요소로 표현하는 과도 열 네트워크 모델을 구축하였다. 이를 이용하여 충진율, 접촉 판정 거리, 접촉반경, 입자–입자 계면 열저항 및 입자–기지 계면 열저항이 TIM의 유효 열전도도와 과도 열응답에 미치는 영향을 비교하였다. 또한 계산된 유효 열전도도를 이론적 Maxwell model과 비교하고, 국부 유한요소해석 결과와의 교차검증을 통해 제안 모델의 적용 범위를 검토하였다. 본 연구에서는 제안한 주기 RVE 기반 해석 방법은 고충진 TIM의 미세구조–열전도 상관관계를 규명하고, 입도 조성 및 계면 조건을 설계하기 위한 수치적 기반으로 활용한다. 시뮬레이션 결과, 동일한 충진율과 입도 조성을 갖는 경우에도 입자 접촉망의 연결성에 따라 유효 열전도도 k_eff와 열응답 시간이 유의하게 달라지는 것으로 나타

났다. 입자 재배치에 의해 평균 배위수와 RVE를 관통하는 연속 열전달 경로가 증가하면 유효 열전도도가 상승하고 정상 열유속에 도달하는 시간이 단축되었다. 반면 접촉반경이 작거나 계면 열저항이 큰 조건에서는 높은 충진율에서도 입자 접촉망의 열전달 기여도가 제한되었다. 이러한 결과는 고충진 TIM의 열전달 성능을 평가하고 설계할 때 충진율뿐만 아니라 입자 접촉망의 연결성과 계면 조건을 함께 고려해야 함을 보여준다.

[복합1-3 | 09:00]

MOF 기반 Gd_2O_3 코팅 cBN 강화 Al 복합재료의 열확산 및 열중성자 차폐 특성: 조은서(한국재료연구원, 부산대학교), 이지윤(한국재료연구원, 부경대학교), 강민우, 김민수, 김정환, 이상복(한국재료연구원), 김양도(부산대학교), 조승찬*(한국재료연구원)

Keywords: 금속 복합 소재, 열전도도, 열중성자 차폐, 방전 플라즈마 소결

사용후핵연료(Spent Nuclear Fuel, SNF)의 저장 및 운반용 소재는 열중성자 차폐 성능과 동시에 붕괴열을 효과적으로 방출할 수 있는 열관리 특성이 요구된다. 현재 상용화된 B_4C/Al 복합재료는 우수한 중성자 흡수능을 확보할 수 있으나, B_4C 함량 증가에 따른 열전도도 저하의 한계를 가진다. 이러한 문제를 개선하기 위해, 높은 열전도도(1300 W/m·K)와 중성자 흡수 특성을 가지는 입방정 질화붕소(cBN)를 강화재로 적용하였으며, cBN의 상대적으로 낮은 중성자 흡수능을 보완하기 위해 높은 열중성자 흡수 단면적을 가지는 Gd_2O_3를 cBN 표면에 Metal-Organic Framework(MOF) 적용하였다. MOF를 통해 40μm cBN 표면에 Gd 전구체를 형성한 후, 열처리를 통해 Gd_2O_3 층으로 전환하였다. 15 vol.% cBN/Al 및 15vol.% cBN@Gd_2O_3/Al 복합재료를 방전 플라즈마 소결(SPS) 공정으로 제조하였다. 열확산계수 측정 결과, 15vol.% cBN/Al 복합재료는 15vol.% B_4C/Al 복합재료 대비 약 47.3% 향상되었다. Gd_2O_3가 코팅된 cBN@Gd_2O_3/Al 복합재료의 열확산계수는 비코팅 cBN/Al 대비 약 9.5% 감소하였으나, B_4C/Al 대비 약 33.3% 높은 열확산 특성을 유지하였다. 열중성자 차폐 시험 결과, 15vol.% cBN/Al 대비 15vol.% cBN@Gd_2O_3/Al 복합재료의 차폐 성능이 향상되었음을 확인하였다. 따라서 향후 코팅층의 두께 및 함량 제어를 통해 중성자 흡수 성능을 추가적으로 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

[복합2-1 | 09:20]

Al 함침된 Ti6Al4V 격자 구조체의 미세조직, 기계적 특성 및 열적 특성: 최은비, 박소연(인하대학교), 김세훈(한국자동차연구원), 이기안*(인하대학교)

Keywords: Infiltration, TiAl6V4 lattice structure, Al-TiAl6V4 bimetal, Mechanical property, Thermal conductivity

Al 및 그 합금은 낮은 밀도와 우수한 열전도도를 바탕으로 방열 및 열교환 부품에 널리 활용되고 있으나, 상대적으로 낮은 기계적 강도로 인해 높은 하중 지지 능력이 요구되는 구조재로의 적용에는 한계가 있다. 반면 TiAl6V4 합금은 높은 비강도와 우수한 기계적 특성을 나타내므로, 두 소재들의 장점을 결합할 경우 경량성과 열전달 성능을 유지하면서 구조적 건전성을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 TiAl6V4 격자 구조체 내부에 Al을 함침하여 Al 기지 기반 TiAl6V4 격자 강화형 bimetal 합금을 제조하고, 후열처리에 따른 계면 미세조직과 기계적 및 열적 특성 변화를 조사하였다. 미세조직 관찰 결과, 600 ºC에서 2시간 열처리한 시편에서는 Al 기지와 TiAl6V4 격자구조체의 계면을 따라 Al_3Ti 반응층이 비교적 균일하게 형성되었으며, 이에 따라 계면 결합력이 향상되어 열처리 전 대비 압축 특성이 개선되었다. 열전도도는 Al과 TiAl6V4 bulk에서 각각 267.846 및 6.70 W/m·K로 측정되었으며, Al 함침 후 bimetal 소재는 225.460 W/m·K의 높은 열전도도를 나타냈다. 이는 순수 Al 열전도도의 약 84% 수준이며, 혼합 법칙으로 계산된 예측값인 214.528 W/m·K보다 약 5.1% 높은 값이다. 이러한 결과는 TiAl6V4 격자 구조체를 통한 기계적 보강에도 불구하고 Al 기지의 우수한 열전달 특성이 효과적으로 유지됨을 보여준다. 본 연구 결과를 통하여 TiAl6V4 격자 구조와 Al 기지를 결합한 bimetal 설계 및 적절한 후열처리를 통해 계면 건전성과 기계적 특성을 향상시키면서도 높은 열전도 특성을 확보할 수 있었으며, 기계적 하중 지지와 열전달 기능이 동시에 요구되는 구조체에 적용 가능한 신소재 설계 전략을 제시할 수 있었다.

[복합2-2 | 09:35]

입방정 질화붕소 강화 마그네슘 기지 금속복합소재 제조 및 특성 평가: 이태호, 김종민, 정다운, 박현재(한국재료연구원, 부산대학교), 조승찬, 이상복, 이상관(한국재료연구원), 김양도(부산대학교), 김정환*(한국재료연구원)

Keywords: 마그네슘, 입방정 질화붕소, 금속복합소재, 강도, 열전도도

입자 강화 금속복합재료는 금속 기지의 경량성 및 가공성과 세라믹 강화재의 우수한 기계적·열적 특성을 조합할 수 있어 고기능 경량 소재로 주목받고 있다. 특히 입방정 질화붕소(cBN)는 높은 경도, 우수한 열전도도 및 낮은 열팽창 특성을 가지므로 Mg 기지 금속복합재료의 기계적·열적 특성을 향상시키기 위한 강화재로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 cBN 입자 크기와 Mg 기지재의 조성이 cBN 입자 강화 Mg 기지 금속복합재료의 미세조직 및 기계적·열적 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 서로 다른 크기의 cBN 입자를 사용하여 pure Mg 및 Mg–6Zn 합금을 각각 기지재로 하는 cBN/Mg 복합재료를 주조법으로 제조하였으며, 미세조직과 cBN/Mg 계면을 분석하고 밀도, 기계적 특성 및 열적 특성을 평가하였다. 먼저 pure Mg 기지 복합재료에서는 cBN 입자 크기에 따른 입자 분포 및 계면 특성의 변화를 관찰하고, 이에 따른 기계적 특성과 열전도 및 열팽창 거동의 변화를 비교하였다. 이를 통해 cBN 입자 크기 변화에 따른 계면 면적과 강화재의 분포가 하중 전달 및 열전달 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 기지재의 영향을 확인하기 위해 동일한 cBN 강화 조건에서 pure Mg와 Mg–6Zn 합금 기지 복합재료의 미세조직 및 물성을 비교하였다. Mg–6Zn 기지 복합재료에서는 Zn 첨가에 따른 기지조직 변화와 함께 열처리를 실시하였으며, 열처리 후 증가한 석출물의 분포 및 양과 복합재료의 기계적·열적 특성 변화 사이의 상관관계를 평가하였다. 이러한 결과를 바탕으로 cBN 입자 크기에 의한 강화 및 열전달 효과와 Mg 기지의 합금화 및 석출 거동에 의한 기지 강화 효과를 종합적으로 비교하였다. 본 연구는 cBN 입자 크기, Mg 기지 조성 및 열처리 조건이 cBN/Mg 금속복합재료의 미세조직과 기계적·열적 특성을 결정하는 주요 인자임을 제시하며, 요구 특성에 따른 Mg 기지 cBN 복합재료의 미세조직 및 공정 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

[복합2-3 | 09:50]

Effect of TiCu precursor composition ratio on bending behavior of bicontinuous Mg–Ti composites fabricated by liquid metal dealloying: Su Rin Cho(Kyungpook National Univ.), Soo-Hyun Joo(Dankook Univ.), Sung Hyuk Park*(Kyungpook National Univ.)

Keywords: Mg–Ti composite, Liquid metal dealloying, Precursor composition, Microstructure, Bending behavior, Fracture behavior

Liquid metal dealloying (LMD) is a process in which selected elements of a multicomponent precursor alloy are selectively dissolved into a liquid metal, while the remaining elements reorganize to form a three-dimensional interconnected structure. Unlike conventional metal matrix composites containing discontinuously dispersed particles, LMD-processed composites exhibit a matrix–matrix architecture in which both phases are continuously interconnected. Accordingly, their deformation and fracture behaviors may differ from those of monolithic or particle-reinforced materials. However, the mechanical properties of LMD-processed Mg–Ti composites have mainly been evaluated by hardness and compression tests, while their bending behavior remains insufficiently understood. During bending, tensile and compressive deformation occur simultaneously across the specimen thickness, producing continuous stress and strain gradients separated by a neutral axis. In bicontinuous Mg–Ti composites, differences in the elastic and plastic behavior of the Mg and Ti phases can produce non-uniform local deformation, which may influence crack initiation and propagation. In this study, Mg–Ti composites were fabricated by LMD using Ti30Cu70, Ti40Cu60, and Ti50Cu50 (at.%) precursors to investigate the effects of precursor composition on microstructure, bending deformation, and fracture behavior. Precursor composition was selected as a key variable affecting ligament morphology and phase fraction. The resulting composites were characterized by SEM, EDS, XRD, and EBSD. Vickers hardness tests were conducted to evaluate hardness, and bending behavior was assessed using a universal testing machine.

[복합2-4 | 10:05]

Effect of Al content in Mg alloy melts on mechanical and corrosion properties of Mg–Ti composites fabricated by liquid metal dealloying: YoHan Lee, Park Bo Hyun, Cho Su Rin, Sung Hyuk Park*(Kyungpook Univ.)

Keywords: Liquid metal dealloying, Mg–Ti composites, Commercial Mg melts, Intermetallic compounds, Mechanical properties, Corrosion properties

Liquid metal dealloying (LMD) is an effective processing approach for fabricating three-dimensional bicontinuous Mg–Ti composites. These composites are typically produced by immersing Ti–Cu precursor alloys in molten Mg, where Cu is selectively dissolved into the Mg melt and the remaining Ti phase reorganizes into an interconnected network infiltrated by Mg. Since the composition of the molten dealloying medium directly affects dissolution behavior, interfacial reactions, and phase formation, it is a critical processing parameter for controlling the mechanical and corrosion properties of LMD-derived composites. Commercial AZ-series Mg alloys, such as AZ31, AZ61, and AZ91, contain different Al contents and are widely used owing to their good castability, balanced mechanical properties, and cost-effectiveness. However, their applicability as dealloying melts for producing Mg–Ti bicontinuous composites has not been systematically investigated. In this study, Mg–Ti composites were fabricated via LMD using pure Mg, AZ31, AZ61, and AZ91 melts to clarify the effect of nominal Al content in Mg-based melts. The phase constitution, bicontinuous morphology, and local microstructural characteristics of the resulting composites were examined using SEM, EDS, XRD, and EBSD, while their mechanical behavior was evaluated by hardness and compression tests and their corrosion properties was assessed by immersion corrosion tests. The results confirm that Mg–Ti bicontinuous structures are formed under all processing conditions, whereas the formation of Ti–Al-based intermetallic compounds and the resulting mechanical response vary depending on the melt composition. These findings demonstrate that Al-containing commercial Mg alloy melts can effectively modify phase formation during LMD and provide a practical strategy for tailoring the mechanical and corrosion properties of Mg–Ti bicontinuous composites.

[복합3-1 | 10:25] Canceled

In-situ 저압 산화에 의한 Cu-Ti/Cu-TiO_2 복합재의 Scale 저감 효과: 윤호균, 황지인(한국재료연구원), 문하영(한국재료연구원, 과학기술연합대학원대학교), 최은애, 한승전*(한국재료연구원)

Keywords: Cu-Ti alloy, Internal oxidation, ODS copper alloy, Cu_4Ti, TiO_2

Cu-Ti/Cu-TiO_2 복합재는 In-situ 내부산화를 통해 Cu–Ti 와 Cu-TiO_2의 Core-layer 구조로 제조된다. 그러나 장시간 대기 산화 과정에서 과도한 scale이 형성되는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 scale의 저감을 목적으로 1/5000 atm의 저압 분위기에서 Cu–Ti 합금의 in-situ 내부산화를 실시하고, 이에 따른 Cu–Ti/Cu-TiO_2 복합재의 미세조직과 기계적·전기적 특성을 분석하였다. 대기 분위기에서 3시간 산화한 경우, 시편 전체가 scale화 되는 반면, 저압 분위기에서는 동일한 산화시간에서 scale의 면적이 3.23%에 불과하였다. 또한 저압 분위기에서 산화된 복합재는 산화 시간의 증가에 따라 전기전도도가 증가하였으며, 최대 646 MPa의 인장강도를 나타냈다. 이러한 결과는 저압 산화가 Cu–Ti/Cu-TiO_2 복합재의 scale 형성을 효과적으로 제어하면서 우수한 기계적 특성과 전기전도도를 확보할 수 있는 공정임을 시사한다.

[복합3-2 | 10:40]

Ni–C 합금의 미세조직 변화에 따른 인장 변형 거동: 한희주(영남대학교 신소재공학과), 신현빈, 박노근*(영남대학교 신소재공학부)

Keywords: Ni–C 이원계 합금, Graphite stringer, 열처리, 상온 인장 거동, 극저온 인장 거동, 디지털 영상 상관법(DIC)

다상 금속재료에서는 제2상의 형상과 분포가 기지의 국부 변형 및 전체 기계적 거동에 영향을 미친다. 특히 연성 Ni 기지와 graphite가 공존하는 Ni–C 합금에서는 가공 및 열처리에 의해 형성되는 graphite stringer의 morphology가 변형 거동에 영향을 미치는 미세조직적 변수로 작용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 열처리에 따른 graphite stringer의 형상 변화와 상온 및 극저온 국부 변형 거동의 관계를 분석하였다. 유도용해 및 주조로 제조한 Ni–C 합금을 85% 냉간압연한 후 650 ºC, 850 ºC 및 1000 ºC에서 4시간 열처리하고 수냉하였다. 미세조직은 OM, SEM 및 EBSD로 분석하였으며, 298 K에서 1×10^{-3} s^{-1}의 변형률 속도로 인장시험을 수행하고 DIC를 이용하여 국부 변형 거동을 분석하였다. 열처리 온도가 증가함에 따라 평균 결정립 크기는 약 13 μm에서 52 μm로 증가한 반면, graphite stringer의 평균 aspect ratio는 감소하면서 길게 연신된 형태에서 상대적으로 짧고 두꺼운 형태로 변화하였다. 결정립 조대화에도 불구하고 298 K와 77 K 모두에서 열처리 온도가 증가함에 따라 강도와 연신율이 함께 증가하였다. 298 K에서는 1000 ºC 열처리재에서 반복적인 응력 변동과 함께 국부 변형 밴드의 형성 및 전파가 관찰된 반면, 650 ºC 열처리재에서는 상대적으로 균일한 변형률 분포가 나타났다. 반면 77 K에서는 이러한 반복적인 응력 변동이 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 Ni–C 합금의 기계적 거동이 결정립 크기만으로 설명되기 어려우며, 열처리에 따른 graphite stringer의 형상 변화와 시험 온도에 따른 국부 변형 특성을 함께 고려할 필요가 있음을 시사한다.

[복합3-3 | 10:55]

TiC/Fe 복합재료의 코어-림 특성 및 압축·인장 거동에 미치는 Mo 함량의 영향: 박현재, 이태호, 정다운(한국재료연구원 융복합재료연구본부, 부산대학교 재료공학부), 차승주(한국재료연구원 융복합재료연구본부, 동의대학교 신소재공학부), 임유진, 조승찬, 이상복, 이상관(한국재료연구원 융복합재료연구본부), 김양도(부산대학교 재료공학부), 김정환*(한국재료연구원 융복합재료연구본부)

Keywords: TiC/Fe 금속복합재료, 코어-림 구조, 몰리브덴, 기계적 특성, 계면 특성

철강소재는 금형, 가이드 롤, 공작기계 부품 등 고하중 및 고마모 환경에 노출되는 핵심 부품에 적용되며 다양한 산업 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 산업 기술의 고도화에 따라 요구 물성이 지속적으로 향상되면서, 합금 설계 및 열처리 기반 강화 기술만으로는 단일 철강 소재의 성능 향상에 한계가 존재한다. 이에 따라 높은 경도와 탄성계수, 우수한 고온 안정성을 갖는 TiC를 강화재로 활용한 TiC/Fe 금속복합재료가 대체 소재로 주목받고 있다. 이러한 복합재료의 최종 물성은 강화재의 분산과 치밀화뿐만 아니라 강화재/기지 계면에서 형성되는 반응상 및 결함에 의해 크게 영향을 받으므로, 공정 설계와 계면 제어가 중요하다. TiC/Fe 금속복합재료의 액상 공정에서는 TiC의 용해–재석출과 합금 원소의 재분배가 발생하며, 이에 따라 용해되지 않은 TiC입자 주위에 (Ti, M)C 림 형태의 코어–림 구조가 발달할 수 있다. 특히 Mo는 Fe 기지에 고용되기보다 TiC 림 영역에 우선적으로 분배되어 (Ti, Mo)C 형태의 림을 형성하는 것이 열역학적으로 유리한 것으로 알려져 있다. 따라서 Mo 첨가는 코어–림 구조의 형성과 특성에 영향을 미쳐 복합재료의 기계적 거동을 변화시키는 주요 인자로 작용할 수 있다 하지만 이들 간의 상관관계를 체계적으로 고찰한 연구는 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 액상 소결 공정을 이용하여 Mo 함량이 0-4 at.%인 50 vol.% TiC/Fe 금속복합재료를 제조하고, Mo 첨가에 따른 (Ti, Mo)C 코어–림 구조의 형성과 기계적 특성 변화를 평가하였다. 특히 거시적 기계적 특성 평가와 함께 나노압입시험 및 TEM/FFT 분석을 통해 (Ti, Mo)C 림의 국부 기계적 특성과 림/Fe 계면 구조를 분석하고, 이들이 압축 및 인장 조건하에서 기계적 거동에 미치는 영향을 고찰하였다. 그 결과, Mo 첨가에 따라 (Ti, Mo)C 림의 국부 변형 저항성과 림/Fe 계면 특성이 모두 변화하였으며, 압축 조건에서는 림의 국부 변형 저항성이 높은 3 at.% Mo에서 가장 우수한 압축 특성이, 인장 조건에서는 보다 유리한 림/Fe 계면 특성을 나타낸 2 at.% Mo에서 가장 우수한 인장 특성이 나타났다. 이러한 결과는 Mo 첨가에 따른 (Ti, Mo)C 림의 기계적 특성과 계면 특성 변화가 복합재료의 기계적 거동에 함께 영향을 미치며, 두 요인의 상대적인 영향이 압축과 인장 조건에 따라 달라짐을 보여준다. 이를 통해 TiC/Fe 복합재료에서 (Ti, Mo)C 코어–림 형성에 따른 림의 국부 기계적 특성과 계면 구조 변화가 기계적 거동에 미치는 영향을 규명하고, 하중 조건을 고려한 Mo 조성 및 계면 설계 방향을 제시하고자 한다. 본 연구는 과학기술정보통신부 나노·소재기술개발사업 (RS-2026-25540346)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

[복합4-1 | 11:15]

Fast and Selective Isoprene Detection with Indium Oxide Hollow Hemispheres: Impact of Polystyrene Template Size and Gold Nanoparticle Decoration on Gas Sensing Properties: Junho Hwang(연세대학교), Young-Seok Shim*(한국기술교육대학교), Wooyoung Lee*(연세대학교)

Keywords: In_2O_3, Polystyrene, Nanostructure, Catalysts, Gas sensor

In this study, we investigate the influence of polystyrene template size and the role of Au catalyst on the gas sensing properties of In_2O_3 hollow hemispheres, mainly focusing on isoprene detection. Our results demonstrate the significance of template size and catalyst in enhancing the selectivity and response time of the gas sensor. Sacrificial methods using polystyrene (PS) templates are widely utilized in various research fields, particularly for fabricating gas sensors. These methods' numerous processing advantages, such as uniform particle size distribution, ease of manipulation, and potential for functionalization, enable the fabrication of intricate nanostructures with precise control over geometry and surface-area-to-volume ratio. Nevertheless, no previous study has investigated the fundamental correlation between the size of the PS particles used as templates and the performance of the resulting functional gas sensor. In this study, we fabricated indium oxide (In_2O_3) hollow hemispheres (HHs) using PS templates of sizes ranging from 200 to 3000 nm to investigate the impact of template size on gas sensor performance. Notably, compared to In_2O_3 thin films, In_2O_3 HH-based sensors prepared using a 3000 nm PS template exhibited a significantly larger surface area, especially when formed as a monolayer. They also demonstrated an approximately 132-fold enhancement in gas response to ethanol (C_2H_5OH). By decorating the In_2O_3 HHs with gold (Au) nanoparticles, the detection of isoprene (C_5H_8) at 350 ºC among various volatile organic compounds was significantly enhanced,

with a response increased by a factor of 31.7, achieving a response of 483 and a theoretical detection limit as low as 743 parts per trillion (ppt). Furthermore, the highly porous structure with Au decoration exhibited an extremely short response time of less than 2 seconds. These unprecedented results provide critical insights into conventional sensor technologies and pave the way for potential health monitoring and bioelectronics applications.

[복합4-2 | 11:30]

Coupled magneto-mechanical response of laminate composites comprising a layer of Ni-Mn-Ga microparticles: Dong Keun Han(Pohang Accelerator Laboratory), Wan-Ting Chiu, Masaki Tahara(Institute of Tokyo Science), Volodymyr Chernenko*(Institute of Tokyo Science, University of Basque Country), Senentxu Lanceros-Mendez(University of Basque Country), Hosoda Hideki*(Institute of Tokyo Science)

Keywords: Ferromagnetic shape memory alloy, Ni-Mn-Ga particles laminate composite, Magnetostrain, Output stress, Twin variant reorientation

Ni-Mn-Ga ferromagnetic shape memory alloys, which exhibit giant magnetic-field-induced strain, high work output, and fast response, are promising candidates for emerging actuator and sensor technologies in automotive, aerospace, and robotic applications. Their magnetic-to-mechanical energy conversion capability is governed by the coupled magneto-mechanical response under simultaneous application of magnetic field and mechanical stress. In this study, we developed laminated composites consisting of single-crystalline Ni-Mn-Ga microparticles embedded between Cu foils and separated by thin silicone-rubber layers. This simple and robust architecture enabled systematic investigation of the simultaneous effects of magnetic field and opposing compressive stress on the MFIS and force generated by the particle layer, driving the out-of-plane magnetomechanical response of the laminate. Self-consistent parameters describing magnetic-field- and stress-induced martensitic variant reorientation were determined through comprehensive analysis of magnetization curves under constant opposing stresses, complemented by residual-strain measurements using X-ray micro-computed tomography, and compressive stress-strain responses under a transverse magnetic field. The magnetic-to-mechanical energy conversion coefficient was determined to be $C\_me = (2.3 \pm 0.13)$ MPa/T^2, while the maximum magnetostress generated by the microparticle layer was approximately 2.3 MPa, in good agreement with values reported for bulk Ni-Mn-Ga single crystals. Compared with bulk single crystals, the microparticle-based laminate offers greater design flexibility, reduced material requirements, and improved scalability, providing a promising platform for advanced miniature magnetomechanical actuators and sensors.

[복합4-3 | 11:45]

조성적·구조적 이종 특성을 갖는 비선형 복합소재 설계를 위한 단층촬영 이미지 기반 디지털 트윈: 유시원, 이강택*, 류호진*(한국과학기술원)

Keywords: 비선형 복합소재, 조성적·구조적 이종 특성, 단층촬영 이미지, 디지털 트윈

셀룰러(cellular), 오세틱(auxetic), 형상변형(shape-morphing), 상호침투형(interpenetrating), 오리가미(origami) 및 키리가미(kirigami), 그리고 키랄(chiral) 및 비키랄(achiral) 구조를 포함하는 인공 메타구조(metamaterials)는 다양한 규모에서 공간적으로 다양한 기능적 요구를 충족하기 위해 이종성(heterogeneous) 특성을 채택하고 있습니다. 그러나 기존의 대부분의 인공 구조(artificial architectures)는 여전히 선형적인(linear) 재료 거동에 국한되어 있으며, 정사각형이나 벌집형과 같은 규칙적인 격자 및 단위 셀 구성을 통해 구현되는 단일상(single-phase) 시스템에 크게 의존합니다. 복잡하고 불규칙적인 기하학적 구조 뿐만 아니라, 서로 다른 특성을 가진 조성적으로 복잡한 재료들이 협력적으로 작용하는 비선형(non-linear) 복합재료(multi-phase)에 대한 포괄적인 이해는, 조성(composition)과 구조(structure) 간의 상호 연관된 복잡성 때문에 자연계에 널리 존재함에도 불구하고 거의 연구되지 않았습니다. 실제로 이러한 미세구조적 매개변수는 인공적으로 설계된 메타구조에서 오랫동안 간과되거나 평면적인 설계로 대체되었습니다. 더욱이, 대규모로 형태화된 조성 시스템을 매개변수화할 수 있는 보편적인 분석도구도 부족합니다. 본 연구에서는 이방성(anisotropy) 테트리스 블록의 퍼즐 모티프를 사용하여 다양한 규모에 걸쳐 구조적, 조성적 이종 특성을 맞춤화 합니다. 복합소재 테트리스 블록은 서로 다른 기하학적 외형 구조와 내부 섬유 방향 제어를 통해 구조적 및 조성적 이방성을 갖도록 설계되고 제조되었습니다. 미세구조 매개변수 분석도구로써, 단층촬영 이미지 기반 디지털 트윈(digital twin) 시뮬레이션 방법이 도입되었습니다. 이미지 디지털화 과정을 통해 개별 블록의 조성적 특성이 데이터화 되어 이방성에 기반한 조립 관계가 도출되었고, 각각 고유한 이방성을 지닌 7개의 복합소재 테트리스 블록은 체계적인 조립과정을 통해 기능적 구성을 갖는 구조적 및 조성적으로 이종적 시스템을 형성했습니다.

학생분과 심포지엄
Room 1층 104호, 10월 29일

[학생심포1-1 | 13:30] 초청강연

신소재공학자와 벤처: 장세윤((주)마이다스에이치앤)

Ag 플레이크 기반 금속–고분자 컴포짓 잉크는 저온 경화 공정으로 TPU·실리콘 등 연성 기판에 대면적 스크린 프린팅이 가능하다. 금속 코팅 도전입자를 적용한 스트레처블 ACF는 저온·저압 압착만으로 선택적 전기 접속을 구현해, 신축 회로와 칩·FPCB 간 실장 문제를 해결한다. 두 소재를 결합해 열성형 공정 대응성과 반복 신축 피로 환경에서의 전기적 신뢰성을 확보했으며, 기존 전자 제조 라인을 그대로 활용할 수 있다. 웨어러블 및 의료용 압력·촉각 센서, 로봇 E-Skin, 차량용 IME로 적용을 넓히며, 소재 라이선스 기반 사업 모델로 시장 진입을 추진하고 있다.

[학생심포1-2 | 14:00] 초청강연

연구실을 나선 뒤 비로소 보이는 것들: 정은진*(한국산업기술기획평가원)

Keywords: 공학연구, 산업현장, 실용화, 진로

공학 연구는 새로운 지식과 원리를 발견하는 것에서 시작하지만, 그 결과가 실제 산업 현장에서 활용되기 위해서는 또 다른 과정이 필요하다. 연구실에서 얻은 성과를 현실의 기술로 연결하기 위해서는 기술적 완성도뿐만 아니라 현장의 요구를 이해하고, 예상하지 못한 문제를 해결하며, 다양한 사람들과 협력하는 능력이 중요하다. 실용화를 목표로 하는 전문연구기관에서의 경험은 이러한 과정을 직접 배우는 시간이었다. 실험실에서는 잘 작동하던 기술이 실제 공정에서는 다른 문제를 보이기도 하고, 학문적으로 의미 있는 결과가 반드시 산업적으로 활용 가능한 기술이 되는 것도 아니다. 이 과정에서 연구의 성능뿐만 아니라 경제성, 공정 안정성, 재현성 등을 함께 고려해야 했으며, 기업과의 소통과 협업을 통해 문제를 정의하고 해결하는 방법을 배울 수 있었다. 본 발표에서는 연구실의 성과를 산업 현장의 기술로 연결하는 과정에서 경험한 시행착오와 해결 사례를 소개하고, 연구기관에 취업한 이후 조직에 적응하며 배운 팀워크와 소통의 중요성을 함께 이야기하고자 한다. 또한 기술적 전문성뿐만 아니라 자신의 연구를 설명하고, 다른 사람과 협력하며, 함께 문제를 해결하는 역량이 공학인에게 왜 중요한지를 실제 경험을 통해 공유하고자 한다. 결국 공학인으로 성장한다는 것은 연구를 잘 수행하는 것을 넘어, 연구를 현실의 문제와 연결하고 사람들과 함께 해결책을 만들어 가는 과정이라고 생각한다. 본 발표가 연구기관이나 산업 현장으로 진출하고자 하는 대학원생들에게 자신의 연구와 진로를 조금 더 넓은 시각에서 바라보는 계기가 되기를 기대한다.

[학생심포2-1 | 15:00] 초청강연

AI기반 소재 디자인: 이동화(포항공과대학교)

최근 컴퓨터 기술의 발전을 바탕으로 효율적인 컴퓨팅 방법론들의 개발은 컴퓨터를 이용하여 재료의 거동을 이해하고 예측할 수 있도록 함으로써 재료 연구에 혁신을 가져왔다. 이러한 컴퓨터를 활용한 전산재료과학 연구는 이론적 모델을 기반으로 재료 시스템을 시뮬레이션하고, 열역학 및 운동 변수들의 변화에 따른 재료 거동의 변화를 예측한다. 하지만, 이러한 전산재료과학 기반 연구들은 재료의 처리에 필요한 모든 변수를 포함하는 것이 어렵기 때문에, 인공지능(AI)을 기반으로 이러한 한계를 극복하기 위한 다양한 시도가 이루어지고 있다. AI는 데이터에 숨겨진 다차원 비선형 관계를 찾아내는 기술로, 다양한 공정 변수와 재료 성능 간의 상관관계를 파악할 수 있어 전산재료과학의 한계를 극복할 수 있는 핵심기술로써 각광을 받고 있다. 특히 많은 연구자들이 전산재료과학에 다양한 AI 기법들을 접목하여 재료의 복잡한 공정(Processing)-구조(Structure)-물성(Property)-성능(Performance)로 이루어진 PSPP 상관관계를 파악하여 재료 연구를 가속화하고자 노력하고 있다. 본 발표에서는 AI 기반 소재 개발에 대한 개념과 최근 우리 연구실에서 진행하고 있는 AI를 활용해 소재 연구를 가속화하기 위한 다양한 연구 사례들을 소개한다.

[학생심포2-2 | 15:30] 초청강연

재료연구는 무엇을 남기는가?: 한승전*(한국재료연구원)

Keywords: 재료, 연구, 질문, 발견, 즐거움, 사람과의 인연

재료는 인류의 삶과 문명을 만들어 온 가장 기본적인 요소 중 하나이다. 인류가 사용해 온 도구와 기계에서부터 오늘날의 반도체, 자동차, 에너지 및 정보통신 기술에 이르기까지 거의 모든 기술의 발전에는 새로운 재료의 발견과 기존 재료의 성능 향상이 함께해 왔다. 따라서 재료를 연구한다는 것은 물질의 성질을 이해하고, 그 원리를 이용하여 인간에게 필요한 특성을 만들어 가는 과정이라고 할 수 있다. 그런데, 실제 재료는 교과서에서 보는 것처럼 완벽하게 균일하지 않다. 같은 성분의 재료에서도 위치에 따라 구조와 특성이 다르며, 제조와 가공, 열처리 과정에 따라 전혀 다른 모습을 나타내기도 한다. 연구 과정에서도 처음 예상했던 것과 다른 결과를 만나는 경우가 많다. 이러한 결과를 단순한 실패로 생각하지 않고 자세히 관찰하면서 '왜 이런 현상이 나타났을까?'라는 질문을 던지는 것이 새로운 발견의 출발점이 된다. 재료연구의 재미도 바로 여기에 있다. 이미 알려진 이론을 배우고 확인하는 것도 중요하지만, 예상하지 못한 현상을 발견하고 그 이유를 찾아가는 과정에서 연구는 더욱 흥미로워진다. 때로는 기존의 상식과 다른 결과가 새로운 연구의 실마리가 되고, 오랫동안 당연하게 생각했던 현상을 다른 관점에서 바라보게 하기도 한다. 본 발표에서는 물질과 재료를 바라보는 기본적인 관점에서 출발하여, 연구 과정에서 경험한 여러 발견과 시행착오를 통해 재료연구의 의미와 재미를 학생들과 함께 생각해 보고자 한다. 그리고 이러한 과정에서 얻는 발견의 즐거움과 감동은 새로운 사람과의 토론과 협력으로 이어진다. 결국 재료연구가 남기는 것은 연구결과만이 아니라 새로운 질문과 발견의 즐거움, 그리고 그 과정에서 만들어지는 사람과의 인연일 것이다.

가공(소성가공)
Room 1층 102호, 10월 29일

[소성1-1 | 08:30]
Superplasticity in Aluminum and Magnesium Alloys: A Literature Census of Processing Windows and Thermodynamics-Informed Machine Learning: Woo Jin Kim*, Hee-Tae Jeong, Junoh Jung(Hongik Univ.)
Keywords: Metal, Superplasticity, Microstructure, Grain, Machine learning

Superplasticity in aluminum (Al) and magnesium (Mg) alloys has been investigated extensively, yet a unified quantitative understanding of the strain-rate–temperature domains in which superplastic deformation occurs and the metallurgical factors governing the robustness of these domains remains incomplete. In the present study, a comprehensive literature census was used to construct unified strain-rate–temperature maps based on a common elongation-to-failure criterion and to quantify the breadth, continuity, and extension of superplastic processing windows toward lower temperatures and higher strain rates. Al alloys showed limited accessibility to low-temperature superplasticity but developed broad high-strain-rate processing windows following sufficient thermal activation, whereas Mg alloys more readily exhibited superplasticity at lower temperatures but generally required higher homologous temperatures to sustain superplastic deformation at high strain rates. Five recurring process-window phenotypes were identified and interpreted using a dual-gate framework. The first gate describes access to a grain-boundary-sliding-compatible deformation regime through the reduction of threshold stress and activation of accommodation mechanisms, whereas the second describes retention of the fine-grained boundary network against deformation-induced grain growth. Building on this framework, machine-learning and physically interpretable models were developed for Mg alloys to relate deformation conditions, grain size, alloy chemistry, thermodynamic phase stability, flow stress, and elongation-to-failure, while establishing a transferable modeling basis for Al alloys. Thermodynamic descriptors based on the solidus-onset temperature, effective solvus temperature, and equilibrium secondary-phase fraction captured alloy-dependent differences in phase stability, grain-boundary retention, and deformation response. The analysis showed that the thermal position relative to the effective solvus strongly influenced flow stress, whereas elongation-to-failure was governed primarily by flow stress, together with specimen gauge length, grain size, testing temperature, and their interactions. This integrated framework therefore provides a quantitative basis for identifying shared and alloy-specific design principles for robust superplastic processing in Al and Mg alloys.

[소성1-2 | 08:45]
Delta process가 적용된 Alloy 718의 열간 변형 거동 분석 및 Processing Map 개발: 정설빈, 박형권, 박기태, 송상우, 강용준*(한국재료연구원)
Keywords: Alloy 718, Delta Process, Processing Map, Dynamic Recrystallization

Alloy 718은 Ni-Fe-Cr 기반의 석출경화형 초내열합금으로, 우수한 고온강도, 크리프 저항성 및 내식성으로 인해 항공우주 엔진용 디스크와 케이싱 등의 고온 부품에 널리 사용되고 있다. 실제 부품 제조 과정에서 Alloy 718은 단조를 포함한 여러 단계의 열간가공 공정을 거치며, 이 과정에서 결정립 크기 및 석출상이 크게 변화한다. 특히 δ상은 결정립계 이동을 억제하고 열간변형 중 동적재결정(dynamic recrystallization, DRX) 거동에 영향을 미치는 주요 석출상으로 알려져 있다. 본 연구에서는 Delta Process가 적용된 Alloy 718을 대상으로 Gleeble을 이용한 등온 압축시험을 수행하여 변형온도와 변형률 속도에 따른 고온 변형 거동을 평가하고 processing map을 구축하였으며, 미세조직 분석을 통해 δ상과 DRX 거동의 상관관계를 규명하고자 하였다. 실험 결과, DRX 거동은 변형온도와 변형률 속도에 따라 상이하게 나타났으며, 저온 영역에서는 높은 변형률 속도에서, 고온 영역에서는 낮은 변형률 속도에서 DRX 분율이 증가하였다. 열간변형 과정에서 δ상의 분절 및 부분적인 용해가 관찰되었으며, 특히 δ상 주변에서는 국부적인 변형 집중과 전위 축적이 나타나고 미세 재결정립이 우선적으로 형성되는 경향을 보였다.

[소성1-3 | 09:00]
Inconel 718 건식 밀링에서 공구마모가 표면건전성에 미치는 영향: 이택*, 허재영, 윤일채(대구기계부품연구원)
Keywords: Inconel 718, 공구마모, 백색층, EBSD-KAM, 동적재결정, 표면건전성

Inconel 718은 항공·발전 분야의 핵심 소재이나, 낮은 열전도율(11.4 W/m·K)과 높은 가공경화율로 인해 대표적인 난삭재로 분류된다. 절삭 시 열-기계적 부하가 표면 근방에 집중되면서 가공면 직하에 백색층(white layer)이 형성되며, 이 층과 그 하부의 소성변형층은 피로균열의 우선 발생 지점으로 작용하여 부품의 장기 신뢰성을 좌우한다. 그러나 기존 연구는 공구수명·표면조도 등 기하학적 지표에 집중되어 왔고, 백색층을 다룬 연구들도 선삭·브로칭 등 연속절삭이나 단일 패스 실험이 중심이어서 다중패스 밀링에서 공구가 점진적으로 마모될 때의 누적 효과는 충분히 규명되지 않았다. 본 연구는 건식 다중 패스 밀링에서 누적 플랭크마모(VB)에 따른 표면하 소성변형층의 변화를 정량적으로 추적 및 분석하고자 하였다. 표준 열처리한 Inconel 718(41.7–41.8 HRC)을 AlTiCrN 코팅 초경 엔드밀(Ø10, 4날)로 건식 측면밀링(Vc 60 m/min, fz 0.07 mm/tooth, ap 5 mm, ae 0.3 mm)하였다. 패스를 누적하며 VB 0, 26, 30, 37 μm의 네 조건을 확보하였고, 이는 절삭날 국부파손 직전의 실사용 공구수명 영역에 해당한다. 절삭날 형상은 3D 광학 프로파일로미터로 실측하였으며, 가공면 직하 조직은 EBSD-KAM으로 분석하였다. 소성변형층 깊이는 미변형 모재의 평균 KAM에 표준편차를 더한 값을 기준선으로 정의하였다. 병행하여 2D 밀링 유한요소해석을 수행하되, 각 마모 조건을 실측 에지반경으로 대표시키고 Johnson-Cook 상수를 실험 KAM 프로파일에 역보정하였다. 마모는 연삭·응착 기구가 지배적이었으며, 에지반경은

3.21 μm에서 12.49 μm로 3배 이상 증가하여 VB와 강한 선형 상관을 보였다(r_e = 0.248·VB + 3.08, R = 0.995). 해석 결과 Fy의 증가율(+72 %)이 Fx(+30 %)의 2배를 상회하여, 플랭크 접촉 영역 확대에 의한 압착(plowing)이 지배적임을 확인하였다. 가공 영역 평균온도는 567 ℃에서 607 ℃로 상승하였다. 백색층은 VB 30 μm까지 검출되지 않다가 37 μm에서 두께 약 40 nm의 국부·불연속 층으로 관찰되었다. 소성변형층 깊이는 VB 30 μm까지 26.78→29.40 μm로 완만히 증가하다가 37 μm에서 33.39 μm로 급증하였다(신품 대비 +24.7 %). 해석과 실험의 평균 오차는 12.12 %, 점별 상관은 R = 0.74, ρ = 0.81이었다. VB 37 μm 조건의 표면하에서는 0.2–1 μm의 미세립이 낮은 KAM(<0.5 °)과 함께 관찰되어 부분 동적재결정이 확인되었다. 평균온도가 재결정 온도(950–1100 ℃)에 미치지 못함에도 부분 재결정이 발현된 것은, 고변형률 조건의 변형에너지 축적과 소성일에 의한 국부 단열승온(추정 1050–1200 ℃)이 공간적으로 중첩되었기 때문으로 해석된다. 본 결과는 공구수명 관리 기준 설정과 표면 건전성 예측에 정량적 근거를 제공한다. 본 연구는 산업통상자원부 디지털융합 제조공정혁신 정밀기계가공산업 육성사업(P0020962, 한국산업기술진흥원)의 지원으로 수행되었음.

[소성2-1 | 09:25]

알루미늄 합금 인발 공정에서 단면 감소율이 잔류응력과 미세조직에 미치는 영향: 김현웅, 신다슬, 양우석*, 이광석*(한국재료연구원)

Keywords: Al 6061 alloy, Cold drawing, Reduction in area, Residual stress, Finite element analysis, Microstructure

알루미늄 6061(Al 6061) 합금은 우수한 비강도와 내식성을 바탕으로 자동차 및 기계 부품에 널리 적용되고 있으며, 인발 공정을 통해 치수 정밀도와 기계적 특성을 향상시킬 수 있다. 그러나 인발 과정에서 소재의 불균일한 소성변형과 다이와의 접촉에 의해 잔류응력이 발생하며, 특히 표면의 인장 잔류응력은 제품의 기계적 특성과 건전성에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 알루미늄 6061 합금의 냉간 인발 공정에서 공정조건에 따른 잔류응력 분포를 유한요소해석을 통해 분석하고, 단면 감소율에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화를 평가하였다. 원소재의 일축 인장시험으로 기계적 물성을 확보하고 Swift 모델을 구성방정식으로 적용하였으며, 다이각 11–14 ° 및 단면 감소율 5–26% 조건에서 인발 공정을 해석하였다. 해석 결과, 인발 후 축방향 및 원주방향 모두 소재 중심부에서는 압축 잔류응력이, 표면부에서는 인장 잔류응력이 형성되었다. 다이각이 증가함에 따라 잔류응력이 증가하는 경향을 보였으나, 단면 감소율이 잔류응력 분포에 상대적으로 더 큰 영향을 미쳤으며, 단면 감소율 증가에 따라 축방향 표면 인장 잔류응력이 감소하고 중심부와 표면부의 잔류응력 편차가 완화되는 것을 확인하였다. 또한 단면 감소율 5, 18 및 26% 조건의 인발 후 열처리재를 대상으로 EBSD 분석을 수행한 결과, 단면 감소율이 증가함에 따라 소성변형량 증가와 함께 결정립 미세화가 촉진되었으며 저경계각 입계의 분율이 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 미세조직 변화와 함께 항복강도 및 인장강도도 증가하였다. 따라서 Al 6061 합금의 인발 공정에서 단면 감소율은 잔류응력과 미세조직 및 기계적 특성을 동시에 제어하는 주요 공정변수이며, 적절한 단면 감소율의 설정이 인발재의 품질 향상에 중요한 것으로 판단된다.

[소성2-2 | 09:40]

가공지도를 활용한 CP-Ti/탄소강 클래드 판재의 열간 압연 접합: 양수미, 김민직(한국재료연구원), 김기혁, 성준호(동국제강), 양우석*, 신다슬*(한국재료연구원)

Keywords: CP-Ti, Ti/Steel clad plate, hot roll bonding, processing map

티타늄/탄소강 클래드 판재는 티타늄의 우수한 내식성과 탄소강의 높은 강도 및 경제성을 동시에 활용할 수 있는 구조용 소재이다. 그러나 열간 접합 과정에서 두 소재 간 변형 거동의 차이와 취성 계면 반응상의 형성으로 인해 안정적인 접합이 어렵다. 본 연구에서는 CP-Ti/탄소강 클래드 판재의 열간 압연 접합 조건을 설계하고, 인서트 금속이 계면 구조와 접합 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 가공지도를 활용하였다. CP-Ti와 탄소강에 대해 등온 압축시험을 수행하고, 동적 재료 모델(dynamic materials model, DMM)에 기반한 가공지도를 구축하여 안정적인 열간 가공 영역을 분석하였다. 두 소재의 안정 변형 영역을 비교하여 동시 변형이 가능한 공정 범위를 도출하고, 이를 바탕으로 압연 접합 조건을 설정하였다. 온도 조건에 따른 압연 접합 결과, 최적 공정 범위에서 안정적인 접합이 이루어졌으며, 저온에서는 심한 형상 변형이 발생하고 고온에서는 계면 분리가 나타났다. 최적 접합 조건에서 인서트가 없는 경우와 Fe-Cr-Ni Alloy Steel 및 Low Carbon Steel(LCS) 인서트를 적용한 경우를 비교하였다. 계면 전단시험 결과, 인서트 금속을 적용한 경우 접합 성능이 향상되었으며, LCS 인서트에서 가장 우수한 결과를 나타냈다. 미세조직 분석을 통해 인서트 금속이 계면 반응, 탄소 분포 및 Fe–Ti계 반응상 형성에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 특히 LCS 인서트는 비교적 균일한 접합 계면을 형성하였으며, 조사된 조건 중 가장 우수한 접합 특성을 나타냈다. 본 연구 결과는 Ti/탄소강 클래드 판재의 열간 압연 접합에서 변형 적합성과 계면 반응 제어를 함께 고려하는 것이 중요함을 보여주며, 본 공정 조건에서는 LCS 인서트가 가장 효과적인 것으로 확인되었다.

[소성2-3 | 09:55]

초음파 나노표면개질 공정으로 유도된 잔류응력의 크기 및 영향 깊이가 겉보기 항복강도 감소에 미치는 영향: 최언준(한국재료연구원), 신재우, 조재현(케이에스피), 윤은유*, 홍종화*(한국재료연구원)

Keywords: Surface Severe Plastic Deformation (SSPD), Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification (UNSM), Residual Stress, Nimonic 80A

표면 강소성 (Surface Severe Plastic Deformation, SSPD) 공정 중 하나인 초음파 나노표면개질 (Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, UNSM) 공정은 표면층에 나노결정립 형성과 잔류 응력을 유도하여 표면 경도 및 피로 수명을 향상시킨다. 초음파 나노표면개질 공정은 일반적으로 기계적 특성 향상에 기여하지만, 일부 연구에서는 표면 강소성 공정 후 항복 강도가 감소하는 것으로 보고되었으며, 이는 표면의 압축 잔류 응력과 내부의 인장 잔류 응력 간의 상호작용 때문으로 추정된다. 본 연구에서는

정적 하중을 공정 변수로 하여 NIMONIC 80A 합금에 초음파 나노표면개질 공정을 적용하고, 하중변화에 따른 미세 조직 및 잔류응력의 변화가 항복 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 서로 다른 하중 조건에서 초음파 나노표면개질 공정을 적용한 후, 형성된 잔류응력의 크기와 영향 깊이를 정량적으로 평가하였다. 또한 인장 시험을 통해 초음파 나노표면개질 공정에 따른 항복 거동의 변화를 분석하고, 잔류 응력의 크기와 영향 깊이를 고려한 해석 및 수치 모델을 이용하여 잔류 응력 크기와 겉보기 항복 거동 간의 상관관계를 고찰하고자 하였다.

[소성2-4 | 10:10]

열처리에 따른 미세조직 제어를 통한 1GPa급 0.25C-1.5Mn-1.5Si 강의 냉간 다단 단조성 평가 : 안민호(한국재료연구원, 경북대학교), 이영선(한국재료연구원), 박성혁(경북대학교), 우영윤*(한국재료연구원)

Keywords: 냉간 다단 단조, 단조성, 열처리, 미세조직, 다상조직강

냉간 다단 단조는 상온에서 소재를 연속적으로 성형하여 복잡한 형상의 부품을 제조하는 공정으로 높은 생산성과 우수한 치수 정밀도로 인해 자동차용 구조부품 생산에 널리 적용되고 있다. 최근 자동차 부품의 경량화 및 고강도화 요구에 따라 냉간 단조용 소재에도 높은 강도와 우수한 연성이 동시에 요구되고 있으며, 이에 따라 변태유기소성(TRIP) 효과를 적용하여 고강도·고연신 특성을 동시에 구현할 수 있는 다상 조직강이 주목받고 있다. 그러나 냉간 다단 단조에서는 압축과 전단 변형이 복합적으로 작용하여, 인장 특성만으로는 실제 냉간 단조성을 평가하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 0.25C-1.5Si-1.5Mn 강을 대상으로, 이상역 어닐링 후 400 ℃에서 등온 유지한 2단 열처리재와 단상역 어닐링 및 360 ℃에서 등온 유지 후 500 ℃ 템퍼링한 3단 열처리재의 인장 특성과 냉간 단조성을 비교하였다. 2단 열처리재는 페라이트 기지와 조대한 블록형 다상조직으로, 3단 열처리재는 베이나이트와 템퍼드 마르텐사이트 기반의 미세한 침상 조직으로 구성되었다. 두 조건 모두 약 1 GPa의 인장강도와 약 20 %의 연신율로 유사한 인장 특성을 보였으나, 냉간 다단 단조 공정 적용 시 2단 열처리재에서는 전단 균열이 발생한 반면 3단 열처리재는 균열 없이 성형되어 우수한 단조성을 나타내었다. 열처리 조건에 따른 전단 균열 발생 여부와 미세조직 간의 상관관계를 규명하기 위하여 OM, SEM, EBSD 및 XRD를 이용한 다각적인 미세조직 분석을 수행하였다

차세대 디스플레이 소재▪소자 융합 기술 심포지엄
Room 1층 102호, 10월 29일

[차세대디플1-1 | 13:30] 초청강연

메타렌즈의 기술적 이슈: 문제현*(한국전자통신연구원)

Keywords: 메타렌즈, 디스플레이

메타렌즈는 입상광을 국소적으로 제어하는, 파장보다 작은 크기의 '메타-아톰(meta-atoms)'이 어레이 형태로 조밀하게 배열된 평면 광학 구조체이다. 디스플레이 분야에서 메타렌즈(metalens)가 갖는 주된 장점은 부피가 큰 기존 광학 부품을 초박형, 경량, 고정밀 평면 렌즈로 대체 가능성이다. 디스플레이(특히 AR/VR 헤드셋, 스마트폰, 웨어러블 기기)기기에 메타렌즈를 적용하면 다시점, 저색수차 등의 특성을 갖는 고품위를 디스플레이를 구현할 수 있다. 본 발표에서는 디스플레이용 메타렌즈에 관련된 설계 및 집적화 기술적 이슈에 대하여 논하고자 한다. 사사) 메타버스 구현을 위한 웨어러블 기기용 반도체 및 디스플레이의 특성평가 국제표준 개발 (국가표준기술력향상-20025884)

[차세대디플1-2 | 13:55] 초청강연

Silver Telluride Quantum Dots for Next-Generation SWIR Photodetectors: From Surface Chemistry to Device Operation: Min-Jae Choi*(성균관대학교)

Keywords: Colloidal quantum dots, Ag2Te, SWIR, Photodetectors

Colloidal quantum dots (CQDs) represent a highly promising class of semiconductor materials for optoelectronic devices, offering adjustable bandgaps, facile solution-based fabrication, and robust environmental stability. While traditional heavy-metal-based (e.g., Pb, Hg) CQDs have shown potential in the shortwave infrared (SWIR) spectrum, the demand for eco-friendly, lead-free alternatives is increasingly critical for the commercialization of next-generation infrared technologies such as optical communications, LiDAR, and biological imaging. In this presentation, we introduce colloidal silver telluride (Ag_2Te) CQDs as a highly promising lead-free platform specifically tailored for 1, 550 nm SWIR photodetectors. Focusing on the critical nexus between material design and device performance, we detail a systematic approach transitioning from fundamental surface chemistry to device operation. We first discuss synthesis strategies to achieve uniform size distribution, followed by an in-depth examination of rational surface engineering and ligand exchange methodologies. By effectively passivating surface defects and dangling bonds, these surface modifications fundamentally improve charge carrier transport while significantly suppressing dark current and enhancing environmental stability. Ultimately, these findings underscore the transformative potential of tailored Ag_2Te CQDs in realizing high-performance, eco-friendly SWIR optoelectronics.

[차세대디플1-3 | 14:20] 초청강연

차세대 OLED 디스플레이용 다기능성 봉지막: 수동적 배리어를 넘어 능동적 기능층으로: 정소영*, 김, 김현준(한국공학대학교)

Keywords: OLED, 봉지막, TFE, 플렉서블 디스플레이, 웨어러블 디스플레이, 스트레쳐블 디스플레이

최근 디스플레이 기술은 단순히 정보 표시만 하는 인간-전자기기의 인터페이스 장치를 넘어, 바이오·헬스케어, 광치료, 패션, 자동차 등 다양한 분야에서 새로운 기능적 가치를 제공하는 융합형 플랫폼으로 빠르게 확장되고 있다. 또한, 이러한 새로운 기능을 전자섬유(e-textile) 및 전자피부(e-skin)와 같은 형태로 구현함으로써, 시공간의 제약 없이 인체와 밀접하게 상호작용할수 있는 차세대 일체밀착형 전자프랫폼으로의 발전하고 있다. 이에 따라 유기발광다이오드(OLED)는 기존의 정형화된 사용 환경을 벗어나 다양한 기계적 변형과 외부 환경에 동시에 노출되고 있으며, 이를 안정적으로 구현하기 위한 새로운 봉지막 기술이 요구되고 있다. e-textile 및 e-skin과 같은 웨어러블 플랫폼을 위해 반복적인 인장 변형에 대응할 수 있는 기계적 신축성이 필요하며, 자외선(UV), 고습, 강우 및 고온과 같은 가혹한 실외 환경에 대한 높은 화학적 안정성이 요구된다. 또한 인체와 직접 접촉하여 기능하기 때문에 OLED 구동열로 인한 피부 화상을 최소화할 수 있는 효과적인 열 관리 기능 또한 중요하다. 따라서 차세대 디스플레이의 실사용 환경을 고려할 때, 기존의 단순 수분 차단 기능을 넘어 다양한 요구 특성을 동시에 구현할 수 있는 다기능성 박막 봉지 기술의 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 차세대 OLED 디스플레이에 요구되는 핵심 신기능을 구현하기 위해 신축성, 내수성 및 방열성을 갖는 다기능 봉지막 기술을 제안한다. 먼저, 신축성 봉지막은 기존의 유기층과 무기층이 개별적으로 적층된 다층 구조에서 벗어나 유무기 성분이 단일 구조 내에서 상호 혼합된 유–무기 혼합상(organic–inorganic intermixed phase)을 형성함으로써 구현하였다. 이러한 구조는 유기 성분의 변형 수용 능력과 무기 성분의 수분 차단 특성을 동시에 확보할 수 있도록 설계되었으며, 1.65%의 인장 변형이 가해진 이후에도 수분투과율(WVTR)이 안정적으로 유지됨을 확인하였다. 내수성 봉지막은 고밀도의 가교점을 갖는 소수성 단량체를 기상 중합하여 형성하였다. 고밀도 가교 네트워크와 소수성 화학 구조를 통해 수분 침투를 효과적으로 억제하였으며, 7일간의 수중 침지 이후에도 WVTR의 유의미한 열화 없이 안정적인 수분 차단 성능을 유지하였다. 또한 방열 봉지막은 Kirchhoff의 열복사 법칙에 기반하여 원적외선 영역에서 높은 흡수 특성을 갖는 유기 소재를 개발함으로써 구현하였다. 열복사 관점에서 높은 적외선 흡수율은 높은 방사율과 연계될 수 있으며, 이를 이용하여 OLED 구동 시 발생하는 열을 외부로 효과적으로 방출할 수 있도록 하였다. 개발된 열 방출형 봉지막은 8–15 μm 파장 범위에서 약 65%의 평균 열 방사율을 나타냈다. 이와 함께, 본 연구에서는 봉지막이 단순한 보호층을 넘어 추가적인 소자 기능을 수행할 수 있도록 기능을 확장한 다양한 봉지 기술을 소개한다. 대표적으로 별도의 전극을

추가로 형성하지 않고 봉지막 자체가 전극 기능을 동시에 수행하는 전극 통합형 봉지막과, 인체 피부에 유해할 수 있는 자외선 파장을 선택적으로 차단할 수 있는 UV 차단형 봉지막을 포함한다. 이러한 결과는 차세대 OLED 봉지막이 수분과 산소를 차단하는 수동적 보호층에서 벗어나, 기계적 변형 대응, 외부 환경 안정성, 열 관리 및 추가적인 광·전기적 기능을 동시에 수행하는 능동적 다기능 박막으로 발전할 수 있음을 보여준다. 본 연구에서 제안하는 다기능 봉지막 설계 전략은 향후 차세대 융복합 프리폼 디스플레이의 실용화를 위한 핵심 기반 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[차세대디플1-4 | 14:45] 초청강연

Doping Strategies for Intelligent Optoelectronics: Keehoon Kang*(Seoul National University)

Keywords: Doping, Perovskite, Sensing

Doping has been one of the most essential methods to control charge carrier concentration in semiconductors. Excess generation of charge carriers is a key route for controlling electrical properties of semiconducting materials which has played pivotal roles in making breakthroughs in microelectronic and optoelectronic devices. In metal halide perovskite (MHP), which have revolutionized the field of solar cells and light-emitting diodes due to their favorable optoelectrical properties, extensive electrical doping via conventional substitutional doping still remains challenging due to their structural stability limited by tolerance factor and compensation of intentionally introduced defects by mobile halide ions. In this talk, I will introduce our recent works in understanding the fundamentals of doping in MHPs, in addition to the novel doping techniques that we have developed to achieve dopant incorporation into the bulk crystal for functionalising perovskites, in addition to tailoring their electrical properties. Our doping methods developed will open up a controllable route towards revolutionising intelligent optoelectronic and electronic devices.

[차세대디플2-1 | 15:20] 초청강연

Direct Integration of Low-Ligand-Density $CsPbBr_3$ Perovskite Nanocrystals into Light-Emitting Diodes via S_N2-Mediated Heat-Up Synthesis: Younghoon Kim*(국민대학교)

Keywords: perovskite nanocrystal, surface chemistry, heat-up synthesis, light-emitting diode

Colloidal perovskite nanocrystals (PNCs) are attractive emissive materials for light-emitting diodes (LEDs), but conventional hot-injection (HI) synthesis yields nanocrystals capped with insulating long-chain ligands that impede charge transport and require post-synthetic ligand exchange, while also suffering from severe batch-to-batch non-uniformity upon scale-up. Here we present an S_N2-mediated, non-injection heat-up synthesis in which halides are decoupled from the Cs and Pb precursors via nucleophilic substitution of alkyl bromide. This approach enables precise temporal separation of nucleation and growth, affording monodisperse $CsPbBr_3$ nanocrystals (HU-PNCs) that retain a narrow emission linewidth and high photoluminescence quantum yield (PLQY) even at gram-scale production. Oleate is consumed as a nucleophile during synthesis, leaving the nanocrystal surface stabilized predominantly by oleylammonium and Br^- with reduced ligand density. This OAM/Br^- surface binds more strongly and suppresses OAM deprotonation compared with the conventional OAM/oleate system, resulting in fewer surface defects, higher thin-film PLQY, and improved charge carrier mobility. Owing to this inherently conductive surface chemistry, HU-PNCs were incorporated directly into LEDs without any ligand-exchange step, achieving a maximum external quantum efficiency of 11.4% and luminance of 314 cd m^{-2}, substantially outperforming HI-PNC-based devices (2.7%, 59 cd m^{-2}). These results establish precursor-level surface engineering as a route to scalable, ligand-exchange-free perovskite LEDs.

[차세대디플2-2 | 15:45] 초청강연

Inverse Design of a Chiral Nanopatterned Electrode for Circular-Polarization-Sensitive Organic Photodetectors by Genetic Algorithm: Jewoong Lee, Kyung Ryoul Park, In-Suk Choi*, Changsoon Kim*(서울대학교)

Keywords: Circularly polarized light, Organic photodetector, Chiral plasmonic nanocavity, Genetic algorithm, Inverse design

Chiral photodetectors, which generate differential photocurrents according to the helicity of incident circularly polarized light, have emerged as a key element of polarization-resolved optical systems. We previously reported a circular-polarization-sensitive organic photodetector based on a chiral plasmonic nanocavity, in which the chiroptical response is governed by the cavity geometry. However, identifying a nanopattern that yields a strong chiral response at a specified wavelength is not straightforward, as the design space is large and the optical response is sensitive to subtle geometric variations. Here, the chiral nanopattern of the top electrode is inversely designed, employing a genetic algorithm that maximizes the dissymmetry factor (g) at a target wavelength of 600 nm over a binary-encoded, fourfold rotationally symmetric design space. The optimization yields non-intuitive patterns, the best of which is predicted to attain $g = 1.32$ at an external quantum efficiency of $\eta = 16.7$ %, exceeding the values accessible through parametric tuning of a conventional windmill motif. This pattern is experimentally realized by electron-beam lithography together with vacuum deposition of a small-molecule multilayer, which accurately defines the metal features while positioning the photoactive layer within the helicity-dependent field distribution. The fabricated device exhibits $g = 0.67$ and $\eta = 8$ % at 560 nm, and simulations reproducing the fabricated morphology retain the helicity-dependent field distributions of the idealized flat-layer device used in the optimization. The proposed approach constitutes a practical design route for chiral optoelectronic devices, including circularly polarized light-emitting diodes.

[차세대디플2-3 | 16:10] 초청강연

Direct Optical Lithography of Perovskite Nanocrystals for Next-Generation Display Applications: Himchan Cho*(Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))

Keywords: metal halide perovskites, patterning, high-resolution, nanocrystals, surface ligands

High-resolution microdisplays for augmented and virtual reality (AR/VR) require sub-micrometer pixel patterning together with highly efficient color conversion. Conventional quantum-dot color-conversion layers often require thick films due to their limited absorption coefficients, which restricts pixel resolution and leads to optical crosstalk. Halide perovskite nanocrystals (PeNCs) offer attractive alternatives because of their intrinsically high absorption coefficients, narrow emission bandwidths, and excellent color purity, enabling efficient color conversion in ultrathin layers. In this talk, I present recent progress in engineering perovskite nanocrystals for high-resolution color-conversion display technologies. We first discuss the design principles of surface chemistry and ligand environments that enable robust and photo-patternable PeNC films. We then introduce direct optical lithography strategies that utilize ligand chemistry, including photocatalytic thiol–ene crosslinking and ligand-exchange processes, enabling nondestructive patterning of PeNCs with micrometer-scale resolution while preserving photoluminescence quantum yield. Furthermore, I present our recent results on perovskite-based color-conversion layers, focusing on strategies to achieve efficient blue-light absorption and high color-conversion efficiency at reduced layer thickness. Finally, I briefly discuss the extension of these direct optical lithography strategies toward intrinsically stretchable perovskite display platforms, highlighting their potential for mechanically deformable optoelectronic applications. These results highlight the potential of surface-engineered perovskite nanocrystals as a key materials platform for next-generation ultrahigh-resolution AR/VR displays and emerging stretchable display technologies.

[차세대디플2-4 | 16:35] 초청강연

Interfacial Modification of Perovskites for High-Performance and Multifunctional Light-Emitting Devices: Myoung Hoon Song*(Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

Keywords: Perovskite, Light-emitting diode, circularly polarized emission

Halide perovskites have attracted significant attention for light-emitting diode applications owing to their outstanding optical and electrical properties. In particular, molecular additives have been widely employed to reduce crystal size and suppress grain-boundary defects, thereby improving the efficiency of perovskite light-emitting diodes (PeLEDs). Furthermore, circularly polarized light-emitting diodes (CP-LEDs) based on quasi-two-dimensional halide perovskites incorporating chiral additives have recently emerged as promising candidates for spin-optoelectronic applications. Here, we present two complementary ligand or additive-engineering strategies that simultaneously enhance defect suppression and optical anisotropy in halide perovskite nanomaterials and realize circularly polarized emission from PeLEDs. First, a ligand-directed orientation control strategy is introduced to regulate the self-assembly of $CsPbBr_3$ nanoplatelets (NPLs) and their TDM alignment, which establish molecular-level design principles that bridge multisite defect passivation and dipole alignment engineering, providing a comprehensive strategy for high-efficiency, polarization-controlled perovskite light-emitting devices. Second, a circularly polarized perovskite emission s achieved by incorporating R-/S methylbenzylammonium iodide (MBAI) and R-/S-1, 1′-binaphthyl-2, 2′-diyl hydrogen phosphate (BHP) to enhance chiral lattice distortion. This work represents the first demonstration of circularly polarized electroluminescence from thermally evaporated perovskite spin-LEDs, establishing a scalable platform for high-efficiency spin optoelectronics and the practical integration of CP-PeLED technologies.

WISET 여대학원생 공학연구팀제 결과발표대회
Room 1층 107호, 10월 29일

[WISET1-1 | 10:05]
Correlation of Structure and Performance of Anthracite-Derived Carbon Anodes for Sodium-Ion Batteries: GYOO RIN KIM, Hyun Kyung Kim*, Jeong Ho Lee, Si On Jeong, Tae Hun Kim(Kangwon National University)
Keywords: Sodium-ion batteries, Anthracite, Multiscale carbon structure

Correlation of Structure and Performance of Anthracite-Derived Carbon Anodes for Sodium-Ion Batteries Gyoo-Rin Kim, Jeong-Ho Lee, Si-On Jeong, Tae-Hun Kim and Hyun-Kyung Kim* Laboratory of applied electrochemistry Department of Material Science and Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea (casey333@kangwon.ac.kr) The energy and environmental issues arising from fossil fuel consumption emphasize the urgent need for clean and sustainable energy storage technologies. To address the discontinuity and instability of renewable resources such as wind and solar power, efficient and reliable energy storage systems are indispensable.[1] Among various candidates, sodium-ion batteries (SIBs) have emerged as promising alternatives to lithium-ion batteries owing to the abundance and low cost of sodium resources. However, their electrochemical performance is highly dependent on anode materials, and graphite is unsuitable for SIBs due to its narrow interlayer spacing and limited defect density, which restrict efficient Na^+ intercalation. Herein, anthracite-derived SIB anode materials with distinct structural characteristics were prepared through different treatment routes to investigate the relationship between multiscale carbon structures and Na^+ storage behavior. Variations in surface chemistry, structural disorder and defects, carbon-layer stacking, and open and closed pore structures were correlated with electrochemical properties, including initial Coulombic efficiency (ICE), first-cycle irreversible capacity, slope and plateau capacities, cycling stability, and rate capability. This analysis provides insights into the structure–performance relationship of anthracite-derived SIB anode materials. References 1 Wu, Chun, et al. "Hard carbon for sodium-ion batteries: progress, strategies and future perspective." Chemical science 15.17 (2024): 6244-6268.

[WISET1-2 | 10:20]
탄소중립을 위한 폐질산염 활용 전기화학적 암모니아 생산 고엔트로피 촉매 개발: 임효정(성균관대학교), 최진욱(한국에너지공과대학교), 심욱*(성균관대학교, (주)닐사이언스)
Keywords: 탄소중립, 폐질산염, 전기화학적 암모니아 생산, 고엔트로피 촉매 개발

암모니아(NH_3)는 비료 및 화학원료뿐만 아니라 탄소를 포함하지 않는 에너지 저장·운반 매체로서 중요성이 증가하고 있다. 그러나 기존 Haber-Bosch 공정은 고온·고압 조건과 화석연료 기반 수소 생산에 의존하기 때문에 높은 에너지 소비와 이산화탄소 배출을 수반한다. 이에 따라 재생에너지와 연계하여 상온·상압에서 구동할 수 있는 전기화학적 암모니아 생산 기술이 탄소중립형 대안으로 주목받고 있다. 특히 산업 폐수에 포함된 질산염(NO_3^-)을 질소원으로 활용하는 전기화학적 질산염 환원 반응(nitrate reduction reaction, NO_3RR)은 오염물질 제거와 고부가가치 암모니아 생산을 동시에 달성할 수 있는 자원순환형 접근법이다. 본 연구에서는 NO_3RR의 활성 및 암모니아 선택성을 향상시키기 위해 저가 비귀금속인 Al, Fe, Co, Ni 및 Cu로 구성된 FCC 기반 AlFeCoNiCu 고엔트로피 합금(high-entropy alloy, HEA) 촉매를 개발하였다. 다성분 원소로 구성된 고엔트로피 촉매는 고엔트로피 효과, 격자 왜곡 및 다양한 국소 원자 배열을 기반으로 촉매의 전자구조와 흡착 특성을 조절할 수 있어 다단계 반응인 NO_3RR에 유리한 활성점을 제공할 수 있다. 합성된 촉매의 결정구조와 조성은 X-ray diffraction(XRD), electron microscopy 및 elemental analysis를 이용하여 분석하였으며, 전기화학적 질산염 환원 성능은 선형 주사 전압전류법과 정전위 전해를 이용하여 평가하였다. AlFeCoNiCu 고엔트로피 촉매는 1 M KOH와 0.1 M $NaNO_3$ 전해질에서 -0.6 V vs. RHE의 전위에서 9.88 mg h^{-1} cm^{-2} 이상의 암모니아 생성속도와 90.2%의 Faradaic efficiency를 나타냈다. 이러한 결과는 다성분 비귀금속 조합을 통한 활성점 및 반응 환경 조절이 경쟁적인 수소 발생 반응을 억제하면서 질산염의 선택적인 암모니아 전환을 촉진할 수 있음을 보여준다. 본 연구는 산업 폐수 내 폐질산염을 단순 제거 대상이 아닌 암모니아 생산을 위한 질소 자원으로 활용하고, 저비용 고엔트로피 촉매를 적용함으로써 폐수 자원화와 탄소중립형 암모니아 생산을 동시에 달성할 수 있는 가능성을 제시한다.

WISET1-3 | 10:35]
Single-Step Picosecond Laser Patterning of Titanium for Controlled Surface Topography and TiO_2 Phase to Enhance Fibronectin Adsorption: Sueun Choi, Seon-Hwa Kim, Seongyeop Kim, Hanbyeol Son, Juwon Cha, Hyejeong Yang, Hyo-Ryoung Lim*(Pukyong National University)
Keywords: Picosecond laser processing, Fibronectin adsorption, Soft tissue attachment, TiO_2 crystalline phase, Surface topography

Soft tissue attachment to dental implant abutments is critical for establishing a biological seal that prevents bacterial infiltration into the peri-implant space. Insufficient early protein adsorption increases the risk of peri-implant disease and potential implant failure. This study presents a picosecond laser surface patterning method to enhance the adsorption of fibronectin (FN), a key extracellular matrix protein that mediates soft tissue integration, on titanium dental implant disks. By systematically tuning the laser processing parameters, we varied the laser power between two levels of 3.0 W and 6.3 W and the scan speed from 10 to 90 mm/s, thereby modulating both the

surface topography and TiO_2 crystalline phase. This interplay between laser fluence and scan speed governed the local thermal input, controlling pattern depth, and surface roughness, and oxide phase transformation. Among the conditions tested, the slowest scan speed produced a rutile-dominant phase with the greatest pattern depth and surface roughness at both power levels. This condition minimized carbonaceous contamination and preserved a high-energy surface, yielding the highest fibronectin adsorption. This single-step process eliminates the need for chemical or thermal post-treatments while simultaneously controlling surface topography and crystalline phase, offering an effective pretreatment strategy for enhancing dental implant integration.

WISET1-4 | 10:50]

Surface Modification of Porous Ceramic Filters with Fluoroalkylsilane for Fouling-Resistant Marine Exhaust Gas Monitoring:

Minyeong Cheon, Su-Chul Yang*, Hyeonju Ko, Jiseung Shin, Yunhee Noh(동아대학교)

Keywords: Porous ceramic filter, Fluoroalkylsilane (FAS), Hydrophobic surface, Fouling resistance, Continuous emission monitoring system (CEMS)

Continuous monitoring of ship exhaust requires ceramic filters that can operate stably under harsh conditions containing soot, moisture, salts, and elevated temperatures. During long-term operation, the accumulation of these contaminants on porous ceramic filters can obstruct gas-flow pathways, increase pressure drop, and deteriorate filtration performance. To mitigate these limitations, porous ceramic filters were surface-functionalized with fluoroalkylsilane (FAS) to reduce surface wettability and suppress contaminant adhesion without significantly hindering gas transport. The chemical modification and surface morphology of the filters were examined by Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and scanning electron microscopy (SEM). Changes in water repellency and moisture penetration were assessed through water contact angle and water uptake measurements, while soot deposition tests were conducted to evaluate resistance to particulate fouling. Pressure drop was also measured to determine whether the surface treatment affected gas-flow characteristics. This study aims to provide a simple surface-modification strategy for improving the fouling resistance and operational stability of porous ceramic filters used in marine exhaust gas monitoring systems. This work was supported by Korea Foundation for Women In Science, Engineering and Technology (WISET) grant, funded by the Ministry of Science and ICT(MSIT) under the Team Research Program for female engineering students (WISET-2026-152). This research was supported by the ANCHOR Program through the BUSAN ANCHOR CENTER, funded by the Ministry of Education and Busan Metropolitan City, Republic of Korea (2026-ANCHOR-02-003).

New Horizon Int. : East Asia Symposium on Semiconductor Reliability

Room 1층 107호, 10월 29일

[EASSR1-1 | 13:40] Invited Talk

Thermal Characterization of In-depth Hotspots for Advanced Semiconductor Packaging: Sunmi Shin(National University of Singapore)

Keywords:

As semiconductor packaging evolves toward highly integrated 2.5D and 3D architectures, increasing power density creates strong demands for more effective cooling and thermal management. However, designing appropriate cooling solutions requires detailed information on where heat is generated, how it propagates through multilayer structures, and where localized thermal bottlenecks occur. In this talk, I will present thermal characterization approaches for detecting and analyzing in-depth hotspots in advanced semiconductor packages. By using modulated thermal excitation and spatially resolved temperature measurements, subsurface heat sources and thermal anomalies can be identified through their characteristic thermal responses. Such measurements can provide critical information for evaluating cooling needs, locating buried defects, and guiding thermal management and reliability strategies for next-generation semiconductor devices. Bio. Sunmi Shin joined NUS as an assistant professor in 2019. Prior to joining NUS, she received her Ph.D. in Materials Science and Engineering from UC San Diego in 2019. Her research focuses on fundamental nanoscale heat transport and advanced thermal management for next-generation electronic and semiconductor systems. Her group develops novel thermal metrology techniques for probing heat transport, hotspots, and thermal defects across micro- and nanoscale structures, while also exploring active thermal management through on-chip thermoelectric cooling. She was selected as a Nanoscale Emerging Investigator by the Royal Society of Chemistry (RSC) in 2024 and is also the recipient of several awards, including the Global Young Investigator Award from the American Ceramic Society (ACerS) in 2022, MIT Technology Review Innovators Under 35 Asia Pacific in 2021, and the Chancellor's Dissertation Medal from UC San Diego in 2020.

EASSR1-2 | 14:00] Invited Talk

3D Architected Metal-Ceramic Nanocomposite via Proximity-Field Nanopatterning: Seung Min Jane Han(KAIST)

Keywords:

An inch-scale metal/ceramic/metal (MCM) nanocomposite reinforced by ceramic nanoarchitectures that can overcome the strength prediction of the conventional composites will be presented. Proximity-field nanopatterning (PnP), which shows simultaneous enhancement of the large production area and high spatial resolution, enables inch-scale production of the nanocomposite in a single fabrication step. 3D Ni/Al2O3/Ni nanocomposite system with a BCT unit cell building block was fabricated and tested to reveal significantly higher compressive strength (1.78 GPa), ~30 % increase compared to that calculated by upper bounds of conventional rule of mixture (1.36 GPa). Such high strength of the 3D MCM nanocomposite is attributed to the extrinsic size effect of ceramic thin-shell, where the thinner ceramic layer has higher fracture strength eventually leading to brittle-to-ductile transition of the ceramic layer. By combining the size-induced strengthening of ceramics into the conventional strengthening law of the composite, a new model is proposed to predict the strengthening effect in Ni/Al2O3/Ni nanoarchitected composite.

[EASSR1-3 | 14:20] Invited Talk

Electrically-driven Microstructural Degradation and Restoration in Interconnects: An Electromigration Reliability and Metallurgy Perspective: Chien-Lung Liang, Hsin-Yu Peng, Shih-Yu Huang, Hao-Yu Chen, Hsuan-Cheng Huang, Pao-Hsuan Yang, Su-Chen Liao, Yi-Chen Keng, Jia-Zhen Wei, Meng-Chun Chiu(National Taiwan University of Science and Technology)

Keywords: Interconnect, Electromigration, Electrical Annealing, Microstructure, Electron Backscatter Diffraction (EBSD)

As advanced packaging scales down, rising current densities trigger intense electron-lattice interactions, governing interconnect reliability. From a physical metallurgy perspective, this presentation examines how high-density currents induce microstructural degradation and, conversely, drive microstructural restoration. First, we address electromigration-induced degradation in fine-pitch Cu redistribution lines (RDLs) and micro-vias, analyzing mass transport pathways, vacancy aggregation, and geometric failure mechanisms in 2.5D/3D architectures. To resolve these interface dynamics, electron backscatter diffraction (EBSD) is utilized to track grain orientation evolution and intermetallic compound (IMC) growth kinetics in solder interconnects, elucidating how crystallographic texture affects microstructural deterioration. Transitioning from damage to recovery, the second part explores electrical annealing as a tool for microstructural restoration. We demonstrate that current-driven athermal effects and electron-dislocation interactions significantly accelerate defect annihilation, recrystallization, and grain growth in pure Cu, Ni, and Ag systems more efficiently than conventional heat treatment. By bridging electromigration reliability and electrical annealing, this study provides insights into both reliability assessment and current-assisted processing for future packaging technologies. [Brief Biography] Dr. Chien-Lung Liang received his Ph.D. degree in Materials Science and Engineering from National Cheng Kung University in 2019. Following a 3.5-year

postdoctoral experience, he joined the Department of Materials Science and Engineering at National Taiwan University of Science and Technology (Taiwan Tech) as an assistant professor in 2022. His research interests focus on the microstructural characterization of a variety of metallic materials, including bulk materials and thin films. In the field of electronic packaging, he specializes in interfacial reactions in solder joints, electromigration in Cu interconnects, and failure analysis, with expertise in using EBSD for microstructural characterization.

[EASSR1-4 | 14:40] Invited Talk

Micro-DIC-Based High-Resolution Local Deformation Measurement for Reliability Assessment of Advanced Semiconductor Packages: Jong-hyoung Kim*(Pukyong National University)

Keywords: Digital Image Correlation (DIC), Deformation mapping, Residual stress, Reliability assessment, Semiconductor packaging

As the integration density of semiconductor devices continues to increase, advanced packaging technologies such as 3D integrated circuits (3D ICs) and high-bandwidth memory (HBM) increasingly incorporate complex geometries, heterogeneous materials, and multiple interfaces. In such architectures, localized stresses and deformation can arise from various factors, including mismatches in thermal expansion coefficients, deposition processes, and thermal loading during device operation. These localized mechanical fields can lead to failures such as cracking and interfacial delamination, ultimately compromising the structural integrity and reliability of semiconductor packages. Therefore, understanding local deformation and stress distributions with high spatial resolution is essential for the reliability assessment of next-generation semiconductor devices. Conventional deformation and stress measurement techniques have limitations in characterizing patterned 3D structures and ultra-thin films at the micro- and nanoscale. In particular, conventional point-wise measurements cannot fully capture spatially heterogeneous deformation, while techniques such as wafer curvature, X-ray diffraction (XRD), and Raman spectroscopy may be limited by spatial resolution, material properties, or specimen geometry. Digital image correlation (DIC), in contrast, enables non-contact, full-field measurement of displacement and strain distributions and therefore provides a promising approach for characterizing localized mechanical behavior in complex semiconductor structures. However, its application to micro- and nanoscale structures requires highly refined surface patterns and imaging conditions to achieve sufficient spatial resolution and displacement sensitivity. In this study, a micro-DIC-based high-resolution deformation measurement technique is developed for the characterization of localized mechanical behavior in semiconductor structures. Fine-scale DIC patterns are formed on the specimen surface to enable precise tracking of local displacement fields. The measurement performance of the proposed approach is evaluated in terms of displacement sensitivity and spatial resolution. As an application of the developed technique, focused ion beam (FIB) milling is combined with DIC to measure local stress-relaxation deformation, from which the residual stress distribution can be quantitatively evaluated based on elastic analysis. This presentation will introduce the principles and experimental procedures of the micro-DIC technique and demonstrate its capability for high-resolution local deformation measurement. The proposed approach provides full-field characterization of localized mechanical behavior that is difficult to assess using conventional techniques and is expected to contribute to reliability assessment and structural integrity evaluation of advanced semiconductor packages.

[EASSR2-1 | 15:20] Invited Talk

Defect-Driven Plasticity/Fracture in Microelectronics under Thermal Cycles: Ill Ryu(Seoul National University)

Keywords: Crystalline Defect, Dislocation dynamics, Crystal Plasticity Finite Element Model, Nanomechanics, Reliability analysis

A multiscale defect dynamics model has been developed to investigate size-dependent plasticity by coupling conventional continuum crystal plasticity finite element (CPFEM) with a defect dynamic modeling. While the detailed defect microstructure and short-range interaction is handled by DD framework, the long-range elastic interactions with image stress field are calculated by CPFEM (using commercial package (ABAQUS) with user-subroutine), accounting for complex boundary conditions. Our unified defect dynamics model could provide a unique opportunity to investigate detailed interactions between crystalline defects such as dislocation nucleation at a crack tip, dislocation interaction with grain boundary. The proposed model could also account for complex multi-physical phenomena, which would play an important role in obtaining a fundamental understanding of deformation mechanism at small scale. In this talk, reliability analysis using nanomechanical modeling will be discussed in Microelectronics under thermal cycles. The developed model will shed light on fundamental investigation of “defect-controlled” mechanical behaviors in crystalline materials, such as plasticity and damage and fracture.

[EASSR2-2 | 15:40] Invited Talk

Reliability Analysis of GaN HEMT Packages Using Power Cycling and Transient Thermal Impedance Measurement: Chun-Hao Chen*, Tzu-Ting Huang(National Yang Ming Chiao Tung University), Hong-Ruei Wu(National Taiwan Ocean University), You-Chen Weng, Chih-Yi Yang, Chun-En Lin, Thi Min Anh Dao(National Yang Ming Chiao Tung University)

Keywords: GaN HEMT, Power Cycling, Transient Thermal Impedance, Power semiconductor devices

This study investigates the package-level reliability of a D-mode GaN HEMT in a Dual Flat No-Lead (DFN) 5×6 package using power cycling tests and transient thermal impedance measurement. Power cycling tests were performed under junction temperature swings of 90–120 K, using increases in thermal resistance (Rth) and drain-source voltage (VDS) as failure criteria. The results show that

thermal resistance degradation generally occurred earlier than electrical degradation, indicating that deterioration of the thermal path is the dominant failure indicator for this package. Transient thermal impedance measurement revealed a junction-to-case thermal resistance of 1.506 K/W and a heat propagation time of 0.029 s from junction to case, providing a quantitative basis for evaluating heat dissipation and thermal path degradation during reliability testing. Coffin–Manson fitting further showed that the DFN 5×6 package is highly sensitive to junction temperature swing, suggesting that thermal fluctuation plays a critical role in accelerating package fatigue. Failure analysis confirmed that fatigue cracking at the edge of the die attach layer was the primary failure mechanism, which directly contributed to the observed increase in thermal resistance. These results demonstrate that transient thermal impedance measurement is an effective approach for monitoring thermal path degradation and evaluating the reliability of GaN HEMT power packages. [Brief Biography] Dr. Chun-Hao Chen received his Ph.D. in Materials Science and Engineering from National Taiwan University. He subsequently worked as a postdoctoral researcher at Fraunhofer IZM in Berlin, Germany. He is currently an Assistant Professor at the International College of Semiconductor Technology, National Yang Ming Chiao Tung University (NYCU), where his research focuses on advanced semiconductor packaging, heterogeneous integration, and interconnection technologies for SiC and GaN power devices.

[EASSR2-3 | 16:00] Invited Talk

Mechanical Optimization of Intermetallic Compounds for Improving Solder Joint Reliability: Jenn-Ming Song(National Chung Hsing University)

Keywords: Intermetallic compounds, Nanoindentation, Mechanical properties, Plastic ability, Reliability, Semiconductor Packaging

Nanoindentation serves as a crucial technique for characterizing the mechanical properties of intermetallic compounds (IMCs), particularly those formed at solder joint interfaces that dictate the mechanical stability and reliability of electronic packaging. This article reviews nanoindentation-based insights into the mechanical properties of various IMCs, focusing on the effects of crystal orientation, structure, and alloying on hardness, Young's modulus, plasticity, and creep resistance. Furthermore, the use of the Young's modulus-to-hardness ratio to evaluate toughness, creep behavior, and joint reliability is discussed. Ultimately, this report offers fresh insights into alloy and substrate material design aimed at enhancing interconnect durability.

[EASSR2-4 | 16:20] Invited Talk

Synergistic Metallization for Reliable Advanced Packages: Hanwool Yeon(Gwangju Institute of Science and Technology)

Advanced packaging (AVP)–the heterogeneous integration of disaggregated chips in a compact form–has become an indispensable technology in the artificial intelligence (Ai) era. AVP provides short and dense interconnections between Ai processors and memory devices, enabling fast and energy-efficient Ai computation. However, aggressive scaling of chip-to-chip distances and interconnect pitches poses severe reliability challenges, including (1) electromagnetic interference (EMI), (2) poor heat dissipation, and (3) copper (Cu) contamination in integrated systems. To address these issues, innovations in packaging materials and integration processes are urgently required. In this talk, I will present our group's efforts to develop highly reliable AVP technologies by establishing novel metallization strategies that create synergistic effects at heterogeneous metal–material interfaces. First, for EMI mitigation, we have demonstrated conformal, ultrathin shields based on metal–MXene heterogeneous stacking, achieving unprecedentedly high performance while enabling compact chip passivation [1]. Second, for organic interposers, we have developed Cu metallization technologies incorporating silane coupling agents (SCAs) to enhance reliability under thermal, mechanical, and electrical stresses. I will discuss the underlying mechanisms of these strategies, collectively referred to as SMART metallization. References: G. Kang, G. Kwon, J. Jeon, Y.-C. Joo and H. Yeon, Nature 647, 356 (2025)

제26회 소재부품 안전 및 신뢰성 심포지엄
Room 1층 108호, 10월 29일

[신뢰성1-1 | 09:00]

9-12 Cr 페라이트계 내열강에서 Co, Cu 합금원소가 초기 미세조직 및 고온 크립수명에 미치는 영향: 박봉천(한국재료연구원), 김성대(부경대학교), 장재훈(동아대학교), 박이호*(한국재료연구원)

Keywords: F/M heat-resistant steels, creep life, Tepered martensite, Co, Cu

Ferritic/Martensitic 9-12Cr 내열강은 고온에서의 우수한 내산화성, 높은 열전도도, 낮은 열팽창계수 그리고 뛰어난 Creep strength로 인해 복합화력발전소의 스팀 터빈 소재로 주목받고 있다. 스팀 터빈의 효율성을 향상시키기 위해서는 더 높은 온도와 압력에 사용될 수 있어야 한다. 이를 위해 가혹한 조건에서도 안정적으로 미세구조을 유지하고 변형에 대한 저항성이 우수한 소재가 요구된다. 따라서 화학 조성, 열처리와 같은 제조 공정의 최적화를 통해 안정적인 미세조직을 확보하는 것이 중요하다. Co는 9-12 Cr 페라이트계 내열강에서 A_1 및 A_3 영역을 낮추지 않으면서 A_4 영역을 상승시켜 δ-페라이트 형성을 억제하는 대표적인 오스테나이트 안정화 원소이며, $M_{23}C_6$의 성장 거동을 억제하여 안정적인 미세조직 유지에 기여한다. 그러나 Co는 높은 비용으로 인해 함량 최적화가 필요하며, 이에 따라 고온 물성을 유지하면서도 경제성을 확보하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 배경에서 Co와 함께 오스테나이트 안정화 원소로 알려진 Cu가 Co 저감분을 대체할 원소로 주목받고 있다. Cu는 페라이트/마르텐사이트 기지에 대한 고용도가 낮아 템퍼링 중 Cu-rich 석출물을 형성하며 석출강화에 기여하는 것으로 보고되어 있다. 그러나 Cu는 Cu-rich 석출물의 강화 효과는 입자의 크기, 분포, 수밀도 및 열적 안정성에 크게 의존하며, Co 함량 감소에 따른 기지 및 주요 석출상의 안정성 저하를 충분히 보상하지 못할 가능성도 있다. 따라서 Co 저감분을 Cu로 대체하는 합금 설계의 타당성을 평가하기 위해서는 Cu-rich 석출물뿐만 아니라 마르텐사이트 하부조직, 전위밀도, M_2C_6 및 Laves상의 분포 변화와 고온 인장 및 크립 거동을 종합적으로 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 630 ºC급으로 개발된 10.2Cr-Mo-W-V-Co-C-Nb계 합금을 기준으로 Co, Cu 함량을 달리한 H-Co, M-Co, L-CoCu 세 합금을 제조하여 650 ºC/145 MPa 조건에서 크립 시험을 수행하였다. 그 결과M-Co 합금이 세 합금 중 가장 우수한 크립 수명을 타나냈으며, Cu가 첨가된 L-CoCu 합금은 가장 낮은 크립 수명을 보였다. 합금별 키릅 수명의 차이는 prior austenite grain(PAG) 크기에 비례하지 않았으며 마르텐사이트 하부 조직, 전위밀도, 석출상 분포 등 미세조직적 특성이 보다 밀접한 상관관계를 나타내었다. 세 합금 간 초기 미세조직의 특성 및 고온 물성 차이를 확인하였으며, 이를 바탕으로 초기 미세조직 특성이 650 ºC 크립 거동에 미치는 영향을 논의하였다.

[신뢰성1-2 | 09:15]

HRSG Economizer Header-to-Tube 용접부 HAZ의 Oxygen Tubercle 하부 산화 및 균열 전파 거동: 박이호*, 박봉천(한국재료연구원), 장재훈(동아대학교)

Keywords: HRSG HHP Economizer, Header-to-Tube 용접부, 열영향부(HAZ), Oxygen Tubercle, 균열 전파

HRSG 고압 절탄기 header-to-tube 용접부에서 발생한 조기 누설의 손상기구를 규명하기 위해 SA178-D 튜브/SA106-C 헤더 용접 조인트의 손상재와 비교재를 대상으로 Micro-CT, SEM/EDS, EBSD-KAM 및 FIB/TEM 분석을 수행하였다. Micro-CT 및 단면 관찰 결과, 실제 누설 위치는 튜브 측 HAZ 영역으로 확인되었다. 손상재와 비교재의 내표면에서는 oxygen tubercle이 공통적으로 관찰되었으며, tubercle 하부에서 Fe-O계 산화물이 기지 내부 방향으로 성장하는 양상이 확인되었다. 비교재에서는 산화물 성장과 함께 micro-crack이 관찰되어 손상재 major crack의 선행 손상 단계로 해석되었다. 손상재 leak point에서는 기지 내부로 깊게 성장한 Fe-O계 산화물과 주 균열이 함께 관찰되었고, TEM 분석에서는 산소가 grain boundary 및 산화물/기지 계면을 따라 침투하며 산화물이 성장하는 거동이 확인되었다. EBSD-KAM 분석 결과, 손상재 HAZ는 비교재보다 높은 KAM 값을 보여 국부 방위차와 변형 집중이 큰 영역임을 나타냈다. 반면 일부 용접 형상 불연속은 비교재에서도 확인되어 지배 원인보다는 부차적 인자로 판단된다. 따라서 본 누설은 oxygen tubercle 하부 국부 산화/부식이 HAZ의 미세조직적 취약성과 결합하여 micro-crack 형성 및 crack propagation을 거쳐 최종 leak path로 발전한 복합 손상으로 판단된다.

[신뢰성1-3 | 09:30]

발전소용 Gear Shaft 손상 원인 분석: 양원존*, 박이호, 하영수(한국재료연구원)

Keywords: Failure Analysis, Gear Shaft, Tear-Out, Quenching and Tempering

본 연구는 발전소용 Gear Shaft 가공(표면 연마) 과정 중 발생한 표면 뜯김(tear-out) 현상 관련하여 분석/평가등을 통하여 향후 재발 방지를 위한 대책을 마련하기 위하여 수행되었다. 해당 부품은 단조 및 담금질·뜨임(Q/T) 열처리 후 가공된 제품으로, 최종 표면 연마 과정에서 국부적인 뜯김 손상이 발생하였다. 손상 원인 분석을 위해 화학성분 분석, 기계적 특성 평가, 미세조직 관찰 및 주사전자현미경(SEM)을 통한 파단면 분석을 수행하였다. 소재의 화학 조성은 소재 Spec. 만족하였으나 항복강도, 인장강도, 경도 및 샤피 충격에너지는 매우 낮게 평가되어 해당 Spec.을 만족하지 못하였다. 미세조직 관찰 결과, 정상적인 Q/T 조직 대신 펄라이트(Pearlite)와 베이나이트(Bainite)가 혼재된 불균일 조직이 관찰되었으며, 이는 제조 과정 중 정상적인 Q/T 열처리가 이루어지지 않았음을 의미한다. 결론적으로 Gear Shaft의 연마 중 표면 뜯김 현상은 적절한 열처리(Q/T)가 적용되지 않음으로써 충분한 강도 및 충격인성을 확보하지 못한 상황에서 연마시 발생하는 연마열 및 응력에 의해 발생한 것으로 판단되며 향후 뜯김 발생 방지를 위해서는 해당 열처리 조건에서 충분한 강도및 충격인성이 확보될 수 있도록 철저한 공정관리가 필요할 것으로 판단된다.

[신뢰성2-1 | 09:55]

다중 센서 기반의 Hole-saw 수명 및 내구성 평가 기술 개발: 오동현*, 박기웅*, 박근혁*, 함종오*(한국화학융합시험연구원)

Keywords: Bi-metal hole saw, Acoustic emission, Tool wear, Tool life, Multi-sensor

바이메탈 홀쏘(Bi-metal hole saw)는 저탄소강 모재와 고속도강(HSS) 톱날부가 접합된 절삭공구로, 우수한 절삭성 및 내마모성을 바탕으로 금속·건설·기계 등 다양한 산업 분야에 사용되고 있다. 홀쏘는 반복적인 타공 과정에서 톱날부의 마모 및 파손이 발생하며, 이에 따라 절삭 하중과 타공 시간이 증가하므로 제품의 수명 및 내구성을 객관적으로 평가할 수 있는 기술이 필요하다. 기존의 홀쏘 수명평가는 피가공물을 반복 타공하여 누적된 타공 횟수를 기준으로 수명을 단순 판단하는 방식이 주로 활용되고 있어, 절삭 과정에서 발생하는 홀쏘의 상태 변화를 연속적으로 파악하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 반복 타공에 따른 홀쏘의 수명 및 내구성을 정량적으로 평가하기 위해 만능재료시험기(Universal Testing Machine)의 로드셀과 음향방출(Acoustic Emission, AE) 등 다중 센서를 활용하였다.반복 타공 과정에서 발생하는 절삭 하중, 타공 시간 및 AE 신호의 변화를 연속적으로 계측하고, 타공 횟수 증가에 따른 각 신호의 변화와 홀쏘 톱날부의 마모·파손 거동 간 상관관계를 분석하고자 하였다. 이를 통해 반복 타공 시험조건, 톱날부 검사방법, 수명 판정 기준 등 홀쏘의 수명 및 내구성 평가를 위한 시험방법 및 절차를 제안하고자 한다. 이 연구는 2025년 정부(중소벤처기업부)의 재원으로 중소기업기술정보진흥원의 지원을 받아 수행한 연구개발 내용입니다. (과제번호 : RS-2025-02308643, 열간 성형 및 동시용접 기술을 적용한 바이메탈 홀쏘 스마트 제조기술 개발)

[신뢰성2-2 | 10:10]

이차전지 코팅 공정 폐열 회수를 위한 Wave Type 열교환기의 신뢰성 평가: 박용진((재)한국화학융합시험연구원), 김종남((주)런텍), 전민우, 김민호*((재)한국화학융합시험연구원)

Keywords: 열교환기

이차전지 제조 공정 중 코팅·건조 단계에서는 고온의 폐열이 대량으로 발생하며, 이를 효율적으로 회수 및 재활용하는 기술은 공정 에너지 절감과 생산 효율 향상 측면에서 중요한 과제로 부상하고 있다. 그러나 기존 Plate Type 열교환기는 구조적 취약성으로 인해 폐열 회수 효율이 낮고 유지보수 비용이 증가하는 문제가 지속적으로 제기되어 왔다. 특히 벤딩부 누기, 실리콘 실링 열화, 제한적인 전열면적 등은 장비 신뢰성을 저해하는 주요 요인으로 확인되었다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 브레이징 공법과 이중 벤딩(Double Bending) 공법을 적용한 새로운 Wave Type 열교환기 전열판 구조를 설계하고, 소재 최적화, 내식성 향상 및 기밀성 개선을 위한 공정기술을 구축하였다. 이를 기반으로 제작된 시제품에 대해 총 다섯 가지 핵심 항목(기밀성, 압력손실, 온도 편차(Hot/Cold), 열량, 치수 정밀도)을 중심으로 신뢰성 평가를 수행하였다. 신뢰성 평가 결과를 바탕으로 개발된 Wave Type 열교환기는 기존 Plate Type 대비 구조적 신뢰성과 열교환 성능이 향상되었으며, 이차전지 코팅 공정에서의 폐열 회수 효율을 실질적으로 개선할 수 있는 기술적 대안을 제시했다. 본 연구 결과는 향후 양산 적용 및 장기 신뢰성 평가를 통해 산업 현장에서의 활용 가능성을 더욱 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

[신뢰성2-3 | 10:25]

압력용기용 알루미늄 노즐부의 손상 원인 분석: 박기덕, 오동현, 함종오*(한국화학융합시험연구원)

Keywords: 알루미늄, 압력용기, 노즐부, 응력집중, EBSD

본 연구에서는 압력용기용 알루미늄 노즐부에서 발생한 손상 원인을 규명하기 위해 손상시료와 정상시료를 대상으로 외관 관찰, SEM/EDS 분석, 미세조직 관찰 및 EBSD 분석을 수행하였다. 압력용기 노즐부는 용기 본체와 체결부가 연결되는 구조적 불연속 영역으로, 운전 중 내부 압력 및 체결 하중에 의해 국부적인 응력집중이 발생할 수 있는 부위이다. 손상시료의 파면부 SEM 분석 결과, 피로파괴 양상이 관찰되었으며, 단면 분석에서는 초기 균열이 표면 아노다이징층을 관통한 후 기지 금속 내부로 입내파괴 형태로 전파된 것으로 확인되었다. EDS 분석을 통해 손상부 주변의 산화물, 오염원 및 국부 성분 변화 여부를 검토하였다. EBSD 분석 결과, 손상시료에서는 정상시료 대비 비교적 미세한 등축 결정립이 관찰되어 결정립 조대화를 직접적인 손상 원인으로 보기는 어려웠다. 또한 KAM 분석에서 손상시료의 표면 인접 영역을 중심으로 높은 국부 방위차가 확인되었으며, 이는 표면부 주변에 소성변형 및 변형 축적이 집중되었음을 시사한다. 따라서 본 손상은 결정립 조대화에 따른 재질 열화보다는 노즐부 형상 불연속에 의한 응력집중, 반복 압력 하중 및 표면부 국부 변형 축적에 의해 초기 균열이 발생하고, 이후 피로균열로 성장하면서 발생한 것으로 추정된다.

[신뢰성2-4 | 10:40]

Comparison of Hydrogen Embrittlement Behavior in API 5L X65 Seamless Steel Pipe Charged by High-Pressure Gaseous Hydrogen and Electrochemical Hydrogen Charging: Jong-Oh HAM*, , Jong-Hoon Moon, Ki-Duck Park, Dong-hyun Oh (한국화학융합시험연구원)

Keywords: Hydrogen embrittlement, API 5L X65, Seamless steel pipe, High-pressure hydrogen, Electrochemical hydrogen charging, Thermal desorption analysis

Hydrogen embrittlement (HE) remains one of the major concerns for the safe application of steel pipelines in hydrogen transportation systems. Although electrochemical hydrogen charging has been widely employed to evaluate hydrogen embrittlement susceptibility, the difference between electrochemical charging and high-pressure gaseous hydrogen charging has not been fully clarified for seamless pipeline steels. In this study, the hydrogen embrittlement behavior of API 5L X65 seamless steel pipe was comparatively investigated after electrochemical hydrogen charging and exposure to high-pressure gaseous hydrogen (13 and 20 MPa). Slow strain rate tensile tests

(SSRT) were conducted to evaluate the relative notch tensile strength (RNTS), while hydrogen thermal desorption analysis (TDA), electron backscatter diffraction (EBSD), and scanning electron microscopy (SEM) were employed to characterize hydrogen trapping behavior, microstructural evolution, and fracture morphology. The electrochemically charged specimens exhibited localized hydrogen accumulation near the surface, resulting in quasi-cleavage fracture only within the surface region, whereas the central region maintained ductile fracture characteristics. In contrast, high-pressure hydrogen charging produced a more uniform hydrogen distribution throughout the specimen, leading to extensive quasi-cleavage fracture across the entire cross-section and a significant reduction in RNTS. TDA revealed that electrochemical charging mainly generated diffusible hydrogen trapped at grain boundaries, whereas high-pressure hydrogen promoted hydrogen trapping at lattice defects including dislocations and vacancies. EBSD analysis demonstrated that crack propagation preferentially occurred along regions with high local strain and high kernel average misorientation (KAM). These results demonstrate that hydrogen distribution and trapping characteristics strongly depend on the charging method and directly influence fracture initiation and propagation mechanisms. The findings provide useful insight into the evaluation of hydrogen compatibility for seamless pipeline steels intended for high-pressure hydrogen transportation.

[신뢰성3-1 | 11:05]

STS재질의 fitting 균열 원인분석: 박용하*, 김규석(미르이엔지(주))

Keywords: 응력부식균열, 변형유기 마르텐사이트, 입계균열, 원인분석

선박 및 산업 플랜트에 사용되는 스테인리스 스틸 배관은 내식성이 우수하여 각종 유체 이송 라인에 널리 적용되고 있으나, 사용 환경에 따라 표면 결함 및 부식이 발생하여 유체 누설 및 설비 정지로 이어지는 사례가 보고되고 있다. 본 연구에서는 사용 중 표면 품질 이상이 발생한 SUS 304 배관의 손상 원인을 표면 및 단면 분석을 통해 규명하고, 유사 사례 재발 방지를 위한 제안을 하는 것이 목적이다. 결함이 다수 포함된 시험편을 선정하여 육안검사, 광학 및 주사전자현미경 관찰, 성분분석과 단면 미세조직 분석을 실시하였다. 배관 외부 표면에서는 10 mm 이상 연결된 균열이, 내부 표면에서는 다량의 부식이 관찰되었으며, 단면에서는 외부 표면에서 개시된 균열이 뿌리줄기 형상으로 입계를 따라 내부 표면까지 전파된 것을 확인하였다. 특히 표면부에서는 약 50μm 크기의 변형유기 마르텐사이트가 관찰되었고, 균열 내부에서는 Na와 Cl이 검출되었다. 감수성 재질과 Na, Cl을 포함한 부식 환경, 잔류응력 및 배관 변형에 의한 인장응력이 복합 작용하여 외부 표면에 pit가 형성되고, 이로부터 개시된 응력부식균열(SCC)이 내부로 전파되면서 배관 내면의 부식이 발생된 것으로 판단하였다.

[신뢰성3-2 | 11:20]

회전반경 및 상대재 재질 변화가 ta-C 박막의 마찰·마모 거동 및 계면 파괴 기전에 미치는 영향: 조병일(인하대학교, 한국화학융합시험연구원), 함종오*, 오동현, 심진용(한국화학융합시험연구원)

Keywords: 볼온디스크 마찰시험, 시험 표준화, DLC코팅(ta-C), 접촉 반복 빈도

다이아몬드상 탄소(Diamond-Like Carbon, DLC) 코팅은 극간의 고경도와 저마찰 특성으로 널리 활용되고 있으나, ASTM G99 및 ISO 18535 등 현행 국제표준은 상대재 재질 및 유효 회전반경(rpm)에 대한 명확한 구속 가이드라인이 부재하여 시험 기관 간 데이터 재현성 산포가 지속적으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 FCVA(Filtered Cathodic Vacuum Arc) 공정으로 SKD61 금형강 기판 상에 증착된 고경도(45 GPa) 비수소계 사면체 비정질 탄소(ta-C, 0.5um) 코팅을 대상으로, 표준화 시험 조건 확립을 위한 다각적 트라이볼로지 평가를 수행하였다.동일한 미끄럼 선속도(0.1 m/s) 조건 하에서 회전반경(2~7.5 mm)을 가변하여 회전속도(127~477.5 rpm)를 독립 제어하고, 5종의 상대재 볼(SUJ2, STS440C, SiC, Al_2O_3, Si_3N_4)을 적용하여 0.5N 부터 100N까지의 광범위한 하중 영역에서 마찰·마모 거동을 정량화하였다. 실험 결과, 동일 선속도 하에서도 회전반경이 감소할수록 단위 시간당 접촉 반복 빈도(Pass Frequency) 증가에 따른 열적 이완 시간(Thermal relaxation time) 부족으로 국부 플래시 온도(T_f) 축적 및 마찰유도 흑연화($sp^3 \rightarrow sp^2$)가 촉진되어 마모 단면적이 급격히 가속화됨을 확인하였다. 또한, 상대재별 Hertz 접촉 응력 해석 결과, 탄성계수가 높은 세라믹 볼(Al_2O_3, SiC)은 50 N 이상(초기면압 >2.0 GPa)에서 기판 효과에 기인한 급격한 층상 박리(Delamination)를 유발하였다. 반면, 스틸 볼(SUJ2, STS440C) 체계는 계면 응력 완화 및 안정적인 탄소 이착막(Tribofilm) 형성을 통해 범용 노말 하중 영역(10~30 N)에서도 코팅 고유의 안정적인 저마찰(CoF < 0.2) 특성을 유지하였다. 본 결과는 DLC 코팅의 표준 시험 규격 제정 시 단순 선속도 및 하중뿐만 아니라, 회전반경(rpm)과 표준 상대재(스틸 계열)의 최적 변역 설정이 필수적임을 시사한다.

재료강도
Room 1층 108호, 10월 29일

[재료강도1-1 | 13:30]
Micromechanical Behaviour of Fine-structured Bainitic Steel: Kwangsik Kwak*(Kyushu Sangyo Univ.), Tsuyoshi Mayama, Yoji Mine(Kumamoto Univ.), Kazuki Takashima(Kumamoto Prefectural College of Technology)
Keywords: Bainitic steel, Microtensile testing, Crystal plasticity analysis, Phase transformation, Plastic anisotropy

The mechanical properties of a single-packet structure in fine-structured bainitic steel were evaluated by microtensile testing, and the underlying deformation mechanisms were further investigated through crystal plasticity (CP) analysis. The microstructure consisted of bainitic ferrite and retained austenite, which obeyed the Nishiyama–Wassermann crystallographic orientation relationship. The resolved shear stress (RSS) at the onset of yielding was 504 MPa for the I-type specimen, whose habit plane was inclined at 45 ° to the loading direction (LD). In contrast, the RSS for the P-type specimen, whose habit plane was parallel to the LD, was 688 MPa, indicating that the yielding behaviour of the single-packet structure strongly depended on the orientation of the habit plane. The deformation-induced martensite variants exhibited high kernel average misorientation (KAM) values owing to the introduction of a high density of dislocations, while their crystallographic orientations were similar to those of the adjacent bainite variants. CP analysis incorporating deformation-induced martensitic transformation successfully reproduced the experimentally obtained stress–strain responses, demonstrating the validity of the proposed modelling approach. Application of the model to a polycrystalline microstructure revealed that multiaxial stress distributions promoted martensitic transformation, resulting in enhanced work hardening. When a high strength was assumed for the retained austenite, the overall strength increased owing to strengthening of the bainitic matrix; however, work hardening was limited because martensitic transformation was suppressed. In contrast, when a lower strength was assumed for the retained austenite, the yield strength decreased slightly, whereas martensitic transformation was more readily activated. Consequently, work hardening became more pronounced, leading to an increase in tensile strength. These findings suggest that incorporating relatively low-strength retained austenite into a high-strength bainitic matrix is an effective strategy for optimizing the balance between strength and ductility.

[재료강도1-2 | 13:45]
Influence of Paint Baking on Mechanical Properties of 2000 MPa Grade Hot Stamping Steel: Byung-Gil Yoo*, Jeewoosoo Kim, Jae Wook Kang, Seok Min Hwang(Hyundai Steel R&D Center)
Keywords: Martensitic ultra-high-strength steel, martensitic hot stamping steel, homogeneous microstructure, Nanoindetnation size effect

Advanced hot stamping steels with strengths exceeding 2.0 GPa are increasingly being adopted for automotive lightweighting and enhanced crashworthiness. However, maintaining adequate bendability and resistance to hydrogen embrittlement remains a critical challenge. In this study, the effects of hot stamping and subsequent paint-baking simulation on the microstructure and mechanical properties of a 2000 MPa-grade hot-stamping steel were investigated. The paint-baking process resulted in noticeable changes in yield ratio (YR), V-bending performance, and hydrogen embrittlement resistance. These improvements were analyzed in relation to martensite stabilization, residual stress relaxation, and local deformation behavior. Nanoindentation and detailed microstructural characterization were employed to elucidate the underlying mechanisms. Based on the findings obtained from the 2000 MPa-grade steel, further investigation is planned for a 2200 MPa-grade hot-stamping steel to evaluate the applicability of the proposed mechanisms and to compare the effects of paint baking on microstructural stability, formability, and hydrogen embrittlement resistance in ultra-high-strength martensitic steels.

[재료강도1-3 | 14:00]
고질소 오스테나이트계 스테인리스강의 고온 변형 중 동적 재결정 거동 분석: 문승현, 문준오*(국립창원대학교), 정재석(두산에너빌리티)
Keywords: HNSS, Dynamic Recrystallization (DRX), Small Modular Reactor (SMR), Hot Deformation, Grain Size

최근 소형모듈원자로(SMR)는 대형 원자로 대비 향상된 안정성과 낮은 건설 비용, 짧은 건설 기간 등의 장점으로 탈탄소화 원자로의 새로운 유형으로서 큰 주목을 받고 있다. SMR의 핵심 부품인 압력 용기는 극한 환경 조건에 노출되므로 압력 용기용 구조재료는 우수한 기계적 특성과 내식성을 요구한다. 이러한 측면에서 고질소 오스테나이트계 스테인리스강(HNSS)은 최근 SMR 압력용기의 후보 재료로 고려되고 있다. 그러나 HNSS는 질화물의 조대한 석출로 인해 기존 오스테나이트계 스테인리스강에 비해 고온 변형 시 열간 가공성이 열위하다. 본 연구에서는 고온 변형 중 HNSS의 동적 재결정(DRX) 거동을 분석하였다. 이를 위해 질소 및 구리 함량이 다른 3종의 HNSS와 단조비를 달리한 2종의 HNSS에 대해 다양한 변형률 및 온도 조건에서 Gleeble 고온 압축 시험을 수행하였다. 고온 압축 시험에서 얻어진 유동 곡선 분석을 통해 HNSS의 DRX 거동을 분석하였으며, 열간 변형 후 광학 현미경(OM), 주사전자현미경(SEM) 및 전자후방산란회절(EBSD)을 활용하여 변형률과 온도에 따른 미세조직의 변화 및 동적 재결정 거동을 집중적으로 분석하였다. 해당 연구를 통해 질소 함량 증가에 따른 델타 페라이트 형성 억제를 바탕으로 고온 변형 시 열간 가공성을 개선시키고, 단조비가 다른 합금의 동적 재결정 거동 분석을 통해 열간 성형성과 결정립 크기 변화의 상관관계를 분석하여 SMR 압력용기용 HNSS 제조 공정의 단조 조건을 최적화 하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[재료강도1-4 | 14:15]

Enhancing Cryogenic Fracture Toughness Through Alloy and Microstructure Control in Ni Steels: Won hyo Yoo*, Sang Bae Jung, Jeong Kwan Kim, Seong Jun Byun, Hun Chul Kang(Hyundai Steel R&D Center)

Keywords: LCO_2 carrier, Fracture toughness, Cryogenic properties, Alloy design, Brittle crack propagation, Heat-affected zone (HAZ)

As global efforts toward carbon neutrality accelerate, carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies have become increasingly important for reducing greenhouse gas emissions from industrial sectors. Among various approaches, the transportation and storage of liquefied carbon dioxide (LCO_2) have emerged as key components of large-scale carbon management systems. Consequently, the demand for reliable cargo tanks and structural materials capable of operating under low-temperature conditions has significantly increased. Nickel-containing steels are considered promising candidates for LCO_2 storage tanks due to their excellent combination of strength and low-temperature toughness. However, ensuring structural integrity under cryogenic service conditions requires a comprehensive understanding of the metallurgical factors governing fracture behavior. In particular, fracture toughness is a critical property for preventing crack initiation and propagation in welded structures exposed to low temperatures. This study investigates the influence of alloying elements and microstructural characteristics on the fracture toughness of high-strength 1.5 wt.% Ni steels designed for LCO_2 carrier applications. Experimental steels with a yield strength exceeding 500 MPa were fabricated using vacuum induction melting, followed by controlled thermomechanical processing. Fracture performance was evaluated through fracture mechanics testing together with impact toughness characterization. The results revealed that increasing Cu content led to a deterioration in low-temperature toughness, accompanied by reductions in fracture toughness, upper shelf energy (USE), and energy transition temperature (ETT), while the ductile-to-brittle transition temperature (DBTT) shifted toward higher temperatures. Furthermore, refinement of packet and block structures in the heat-affected zone (HAZ) was found to significantly enhance resistance to brittle crack propagation. These findings provide valuable insights into alloy design and microstructural optimization strategies for improving the cryogenic performance of steels intended for next-generation LCO_2 transportation and storage systems.

[재료강도2-1 | 14:40]

Data-Driven Acoustic Emission Monitoring of Deformation and Damage in Metallic Materials: Jong-Hyeok Kwon, Dae-Seo Kwon, Dong-Kyu Kim*(Konkuk Univ.)

Keywords: Metallic materials, Ductile fracture detection, Damage evolution, Acoustic emission, Machine learning

This study presents a data-driven acoustic emission (AE) framework for interpreting and monitoring deformation and damage evolution in metallic materials. Complex AE waveforms generated by material deformation are transformed into physically interpretable indicators of material-state changes. Waveform and time–frequency analyses are integrated with machine learning and complementary characterization to distinguish deformation stages, identify damage initiation, and track progression toward failure. The framework is applied to fracture assessment, micromechanical damage analysis, and manufacturing-process monitoring across different material systems and loading conditions. The results demonstrate that AE can move beyond conventional event detection by linking microscopic damage processes to macroscopic mechanical degradation. The proposed approach provides a basis for earlier damage detection, objective assessment of failure evolution, and reliability-oriented monitoring of metallic materials and manufacturing processes.

[재료강도2-2 | 14:55]

BCC 단일상 Cr-Mn 희박 합금의 고용 강화 및 연화에 따른 연신율 변화 거동 연구: 박준서, 강태혁, 이찬희(한국과학기술원), 이준호(한국재료연구원), 백하성(인천대학교), 최벽파*(한국과학기술원)

Keywords: BCC, 내화금속, 연성-취성 천이, 고용 연화, 활성화 인자, 원자탐침현미경, 전자후방산란회절, 광학현미경

체심 입방 (body-centered cubic, BCC) 결정 구조를 가지는 내화 금속은 기존 철강이나 Ni계 초내열합금 대비 높은 녹는점과 우수한 기계적 물성으로 인해 차세대 고온 재료로서 주목받고 있다. 그 중 Cr은 가격이 비교적 저렴하고 매장량도 풍부하며, 금속 기지상과 산화물 간의 부착성이 우수하여 비교적 고온에서도 내산화성을 유지하는 것으로 알려져 있으나, 연성-취성 천이 온도가 높아 그 활용이 제한적이다. 본 연구에서는 BCC 단일상을 가지는 Cr-Mn 희박 합금에 대한 압축 시험 결과 용질 원소인 Mn의 함량 증가에 따라 강도가 일관적으로 증가하지 않고 감소하는 고용 연화 현상을 관찰하였으며, 상온에서의 연신율은 증가하는 것을 확인하였다. 고용 연화 현상의 원인을 규명하기 위하여 원자탐침현미경(Atom Probe)을 통해 각 고용 원소들의 분포를 분석하였으며, 온도와 변형률 속도의 변화를 동반하는 변형 시험을 통해 유효 유동응력, 가공경화율 및 소성 변형의 활성화 인자들을 비교하였다. 또한 연신율 증대의 원인을 규명하기 위하여 변형 전후 전자후방산란회절법(Electron Backscatter Diffraction, EBSD)과 미분간섭현미경(Differential Interference Contrast Microscope)을 활용하여 표면에 생성되는 슬립 흔적을 분석하여 변형 초기 단계에서 활성화되는 슬립면과 교차슬립(cross-slip) 빈도를 비교하였으며, 이를 바탕으로 전위의 집적과 취성 파괴, 가공 경화율의 관계를 고찰하고 조성 간 강도와 연신율의 차이가 발생하는 원인을 논의하였다.

[재료강도2-3 | 15:10]

LT-FH32 강재의 냉간가공 및 시효에 따른 저온 특성 변화: 남현지, 조동필, 김주수, 이동우, 신학수, 정동희*(삼성중공업)

Keywords: 냉간가공, 변형시효, 충격인성, 연성-취성천이온도, LT-FH32

환경 규제 강화에 따라 액화천연가스(Liquefied Natural Gas), 액화암모니아(Liquefied Ammonia) 등 친환경 연료 운반선에 대한

수요가 증가하고 있으며, 이에 따라 저온 환경에서 사용되는 선체 구조용 강재의 안전성 확보가 중요한 과제로 대두되고 있다. 특히 암모니아 운반선의 화물창 및 선체 구조물은 저온 환경에 노출되므로, 사용 강재는 충분한 저온 충격인성을 확보하도록 요구된다.한편, 암모니아 운반선용 강재는 건조 공정 중 곡면 성형, 벤딩 등을 거치면서 국부적으로 냉간가공(cold working)이 발생할 수 있다. 일반적으로 냉간가공에 따른 변형시효(strain aging)는 전위와 탄소, 질소 원자 간 상호작용(Cottrell 분위기 형성)을 통해 강도를 상승시키는 반면, 충격인성 저하 및 연성-취성천이온도(ductile-brittle transition temperature, DBTT) 상승을 동반한다. 이는 저온 환경에서 운용되는 선박 구조물의 안전성과 직결되는 문제로, 냉간가공 수준에 따라 강재의 시효 거동과 저온 충격인성이 어떻게 변화하는지를 정량적으로 파악할 필요가 있다.본 연구는 저온용 강재의 냉간가공과 시효 거동에 따른 인장 특성 및 저온 충격인성 변화를 확인하고자 하였다. 이를 위해 LT-FH32(두께 12, 18, 20, 30 mm) 강재에 냉간가공을 모사한 pre-strain(0%~9%)을 부여하였으며, 각 pre-strain 조건에서 250 ºC, 1 h의 시효처리 유무에 따라 인장 및 충격 시험편을 제작하였다. 인장시험으로 강도와 연신율 변화를 확인하고, -196 ºC ~ 상온 구간의 충격시험으로 조건별 DBTT를 도출하였다. 실험 결과, pre-strain 증가에 따라 모든 두께 조건에서 항복강도 및 인장강도는 상승하고 연신율은 감소하였고, 항복비가 증가하여 파단 여유가 크게 감소하였으며, 시효처리를 실시한 경우에도 동일한 결과를 나타내었다. 충격인성은 두께 및 시효 유무와 관계없이 pre-strain 증가할수록 DBTT는 증가하는 경향을 나타내었으며, 동일 pre-strain 조건에서 시효처리 유무에 따른 특성을 비교한 결과 시효처리를 실시한 강재의 DBTT 상승폭이 대체로 크게 나타나, 냉간가공 자체보다 시효 과정이 충격인성 저하에 더 크게 기여하는 경향을 보였다. 본 연구 결과는 저온용 강재의 냉간가공 수준에 따른 충격 인성 변화 및 시효 영향을 이해하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

[재료강도2-4 | 15:25]

열처리 조건이 STS304 주름관의 피로거동에 미치는 영향: 박재현, 김한종, 이유나, 박성훈, 강남현, 최윤석*(부산대학교)

Keywords: 304 스테인리스강, 주름관, 열처리, 회전굽힘 피로시험, 파면 분석

304 스테인리스강은 우수한 내식성, 가공성 및 용접성을 바탕으로 열교환기 부품을 비롯한 다양한 산업 분야에 널리 사용되고 있다. 그러나 열교환기에 사용되는 경우 구리나 알루미늄에 비해 열전도도가 상대적으로 낮아 열전달 성능이 제한될 수 있다. 이를 보완하기 위해 관 표면에 주름 형상을 도입하여 열교환 면적을 증가시키며, 동시에 진동 완화와 충격 흡수 측면에서도 이점을 가지는 방안이 사용되고 있다. 하지만 이러한 형상은 국부적인 응력 집중을 유발하여 반복 하중 조건에서 피로 파괴로 이어질 수 있으며, 파손에 따른 부식성 유체의 누출은 주변 부품의 부식과 시스템 고장을 초래할 수 있다. 이와 같이 응력 집중을 유발하는 형상을 가지는 부품의 피로 특성은 형상 최적화를 통한 응력 집중 완화, 또는 열처리를 통한 미세조직 제어로 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 열처리 조건과 부가 하중에 따른 STS304 주름관의 회전굽힘 피로수명을 분석하였다. 열처리는 1000–1100 ºC의 온도 범위에서 연속 어닐링을 수행하였으며, 유지시간을 달리하였다. 피로수명은 부가 하중에 따라 상이한 경향을 나타냈다. 고하중 조건에서는 열처리 전 주름관이 가장 높은 피로수명을 보였으며, 열처리 후 수명이 크게 감소하였다. 반면, 저하중 조건에서는 열처리 시간이 증가할수록 피로수명이 증가하였다. 이러한 피로거동의 차이의 원인을 분석하기 위해 피로시험 전 EBSD 분석과 비커스 경도 측정을 수행하였으며, 피로시험 후 파면을 분석하였다. 이를 바탕으로 열처리 조건과 부가 하중이 STS304 주름관의 피로 거동에 미치는 영향을 고찰하였다.

[재료강도3-1 | 15:50]

원자로압력용기용 SA508 저합금강 전자빔용접부의 기계적특성에 미치는 입열량 영향 평가: 현세미, 안동현, 권준엽, 김민철*(한국원자력연구원)

Keywords: 혁신형 SMR, SA508 저합금강, 원자로압력용기, 전자빔용접, 냉각속도

혁신형 소형모듈형원자로(Small Modular Reactor, SMR)는 원자로, 증기발생기, 가압기 등의 주요 기기를 하나의 용기에 집약한 일체형 구조를 가지고 있어, 기존 대형 원전에 비해 원자로압력용기(Reactor Pressure Vessel, RPV)의 두께가 증가하는 특징을 가진다. 이에 따라 기존 서브머지드 아크 용접(Submerged Arc Welding, SAW) 공정을 적용할 경우 수십 회 이상의 다층용접이 필요하며, 전체 제작 기간이 증가하게 된다. 혁신형 SMR 부품의 공장 제작 및 부지 운송을 위해서는 RPV와 같은 대형 기기의 경량화가 요구되며, 기존 상용 RPV 소재보다 강도와 인성이 우수한 SA508 Gr.4N 저합금강의 적용을 고려할 수 있다. 또한 제작기간의 단축을 위해 다층용접 방식의 SAW 공정 대신 전자빔용접(Electron Beam Welding, EBW)공정의 적용이 고려되고 있다. EBW는 입열량이 낮아 냉각속도가 빠르며, 이로 인해 용접부 내 저온변태상의 분율이 기존 SAW 공정 대비 크게 증가한다. 이때 용접부에 형성되는 미세조직은 합금 성분계에 따라 차이가 나타난다. 본 연구에서는 SA508 Gr.3 및 SA508 Gr.4N 저합금강에 EBW를 적용하고 동일한 조건의 PWHT를 수행한 후 용접부를 비교, 평가하였다. 또한 냉각속도 변화에 따른 미세조직 및 기계적특성 변화를 확인하기 위해 용접 전류를 조절하였다. FEM 해석을 통해 입열량에 따른 위치별 냉각속도 및 상분율 변화를 확인하였으며, 이를 실제 관찰된 용접부의 미세조직과 비교하였다. OM, SEM을 활용하여 미세조직을 분석하였으며, 상온에서의 용접부 인장특성과 충격천이특성을 평가하였다. 이를 통해 SA508 Gr.3 저합금강과 Gr.4N 저합금강의 합금원소와 입열량 차이에 따른 전자빔용접부의 미세조직 및 기계적특성과의 상관관계를 고찰하였다.

[재료강도3-2 | 16:05]

고강도 원자로압력용기강 후판 전자빔용접부의 Pre-PWHT 조건에 따른 미세조직 및 충격인성 변화: 배소영(고려대학교, 한국원자력연구원), 현세미, 김민철*, 홍석민(한국원자력연구원), 김홍덕(한국과학기술원), 손석수(고려대학교)

Keywords: SA508 Gr.3 저합금강, 전자빔용접, Pre-PWHT, M-A constituents

최근 소형모듈원자로(SMR, Small Modular Reactor) 개발에 따라 원자로 압력용기의 경량화와 제작 시간 단축이 요구되고 있다. 이에 기존 SA508 Gr.3 Cl.1 대비 높은 항복 강도를 갖는 SA508 Gr.3 Cl.2 저합금강이 차세대 원자로 압력용기 소재로 고려되고

있으며, 제작 시간 단축을 위한 용접기술로 전자빔용접(EBW, Electron Beam Welding)이 주목받고 있다. 현재 원자로 압력용기 제작에는 주로 SAW(Submerged Arc Welding) 및 SMAW 공정이 적용되고 있다. 이러한 기존 용접공정은 다중 패스를 사용하여 오랜 시간이 소요되는 반면, 전자빔용접은 단일 패스로 기존 용접에 비해 80% 이상 용접시간을 단축할 수 있다. 그러나 전자빔용접의 빠른 냉각속도로 인해 용접부에 마르텐사이트 및 하부 베이나이트와 같은 저온 변태 상이 형성되며, 이 과정에서 일부 오스테나이트가 미 변태 상태로 잔류하면서 M-A(Martensite-Austenite) constituents를 형성할 수 있다. 용접부 잔류응력 완화를 위해 일반적으로 용접후열처리(PWHT, Post Weld Heat Treatment)가 적용된다. 그러나 기존 PWHT 적용 후에도 모재 수준의 충격인성을 확보하는데 한계가 있는 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 기존 PWHT 이전에 저온 열처리인 Pre-PWHT 적용하여 용접부 미세조직 및 석출물 거동을 제어하고 기계적 특성을 향상시키고자 하였다. 실제 약 250 mm 두께의 대형 전자빔용접 시편을 제작하고, 기존 문헌을 바탕으로 Pre-PWHT 온도를 300–500 ºC로 설정하였다. 또한 PWHT 유지시간에 따른 영향을 평가하기 위해 유지시간을 5, 10, 25 시간으로 설정하였다. SEM을 통해 M-A constituents의 분해 및 석출물 거동을 관찰하고, XRD를 통해 잔류 오스테나이트(Retained Austenite, RA) 분율을 정량 분석하였다. 또한 상온 인장시험과 -100-100 ºC 범위에서 충격천이특성을 평가하였다. 이를 통해 Pre-PWHT 조건에 따른 미세조직 변화와 기계적 특성의 상관관계를 규명하고 최적의 후열처리 조건을 도출하고자 하였다.

[재료강도3-3 | 16:20]

Positive γ/γ′ Lattice Misfit 제어에 따른 L-PBF 적층 Modified IN738LC 합금의 잔류응력 거동과 균열 저항 특성 분석: 이아름, 김태경(국립창원대학교), 김명세(주식회사 아우라테크), 김형섭(한국원자력연구원), 홍현욱*(국립창원대학교)

Keywords: Ni-based superalloys, Addictive Manufacturing, Positive lattice misfit, Strain-Aging Cracking, Tensile strength, Creep resistance

Ni기 초내열합금은 항공우주 및 가스터빈용 고온 부품 소재로서 극한의 온도·압력 환경에서 우수한 내열성과 장기적인 구조적 안정성을 제공한다. 최근 복잡 형상의 일체형 제조와 소재 활용 효율 측면에서 Laser Powder Bed Fusion(L-PBF)을 비롯한 적층제조 기술이 초내열합금 부품 제조에 적극 도입되고 있다. 그러나 빠른 용융·응고 사이클과 높은 열구배로 인해 기존 주조 공정과는 본질적으로 다른 열이력이 형성되며, 특히 높은 γ′ 분율을 갖는 초내열합금의 경우 균열 민감도가 크게 증가하여 적층제조 적용에 핵심적인 기술적 장벽으로 작용한다. Negative γ/γ′ misfit 특성은 적층 중 누적되는 잔류응력과 γ′ 석출 시 유발되는 응력의 중첩으로 적층 및 후열처리 중 Strain-Aging Cracking(SAC) 민감도를 증가시키는 주요 원인 인자이다. 본 연구는 γ 기지에 압축 잔류응력을 유도하는 positive misfit을 핵심 설계 인자로 도입하여 기존 잔류응력과 석출 유발 응력을 완화하는 L-PBF 맞춤형 합금 설계 전략을 제시하였으며, IN738LC를 기반으로 positive misfit 조성을 갖는 개발합금을 설계하였다. 개발합금은 L-PBF 공정에서도 우수한 적층 건전성을 확보하였으며, IN738LC와 유사한 bimodal γ′ 조직과 분율을 유지하였다. 상온 HRXRD 기반 lattice misfit 정량평가 결과, IN738LC(δ=+0.02%) 대비 개발합금(δ=+0.31%)의 유의미한 향상을 나타내었으며, 실제 고온 작동 환경에서의 misfit 안정성을 검증하기 위해 in-situ HRXRD 분석을 수행하였다. 개발합금의 misfit은 700 ºC까지 +0.29% 이상으로 안정적으로 유지되었으며, 800–900 ºC 범위에서도 +0.15% 이상의 positive misfit이 보존됨을 확인하였다. 설계 전략에 따른 SAC 저감 효과 평가를 위해 as-built 시편에 direct aging 열처리를 적용한 결과, 개발합금은 γ′ 석출 시 GND 밀도가 감소하여, IN738LC와는 상반된 거동이 관찰되었다. 나아가 개발합금의 최대 균열 밀도는 IN738LC(2.87%) 대비 0.14%로 현저히 감소하였으며, 이는 positive misfit 기반 matrix 내 압축 잔류응력 유도가 Ni기 초내열합금의 L-PBF 적층 맞춤형 합금 설계에 있어 유효한 전략임을 입증한다.

[재료강도4-1 | 16:45]

주조 Mn-Cu 합금의 부식 피로 거동에 미치는 미세편석과 염화물 노출의 영향: 박준영, 목승민, 이준민(경상국립대학교), 김대경(한화오션), 김상식, 강성규*(경상국립대학교)

Keywords: Mn-Cu alloy, Corrosion fatigue, Microsegregation, Crack propagation

망간-구리(Mn-Cu) 합금은 우수한 감쇠 특성을 갖는 소재로서 해양 및 진동에 민감한 응용 분야에서 유망하며, 이러한 환경에서는 장기적인 신뢰성 확보를 위해 부식피로 저항성이 매우 중요하다. 그러나 염화물 노출과 반복 하중이 동시에 작용하는 조건에서의 부식피로 거동은 아직 충분히 규명되지 않았으며, 특히 뚜렷한 조성 불균질성을 갖는 대형 주조 합금에 대해서는 관련 연구가 부족하다. 본 연구에서는 사형주조 Mn-Cu 합금의 부식피로 거동을 3.5 wt.% NaCl 용액에서 조사하였으며, 사전 부식에 의해 형성된 손상과 피로시험 중 지속적인 염화물 노출의 영향을 구분하여 평가하였다. 고주기 피로시험은 대기 중, 사전 부식 후 대기 중, 그리고 사전 부식 후 3.5 wt.% NaCl 용액 중의 세 조건에서 수행하였다. 사전 부식은 주조 과정에서 발생한 미세편석으로 형성된 Mn-rich 수지상 영역의 선택적 용해를 유발하였다. 이후의 피로시험에서는 피로 저항성이 대기 중, 사전 부식 후 대기 중, 사전 부식 후 NaCl 용액 중 시험 조건의 순서로 단계적으로 감소하였다. 이러한 경향은 기존에 형성된 부식 손상과 지속적인 염화물 노출이 모두 피로 성능 저하에 기여함을 나타낸다. 파단이 발생한 피로 시편의 단면 분석 결과, 대기 중에서는 피로 균열이 주로 결정립계를 따라 전파된 반면, 염화물 노출 조건에서는 수지상 영역을 통과하는 입내 균열 전파가 촉진된 것으로 나타났다. 이러한 결과는 선택적인 Mn 용해와 반복 하중이 복합적으로 작용하여 균열 개시를 가속하고 균열 전파 경로를 변화시킴을 시사한다. 본 연구는 주조 유래 미세편석이 주조 Mn-Cu 합금의 부식 환경에서 균열 개시 및 전파 거동에 중요한 영향을 미친다는 것을 보여준다.

[재료강도4-2 | 17:00]

3.5wt.% NaCl 용액에서 Mn-Cu 합금의 응력 부식 균열 거동에 미치는 미세조직의 영향 연구 : 목승민, 박준영, 이준민(경상국립대학교), 김대경(한화오션), 김상식, 강성규*(경상국립대학교)

Keywords: Mn-Cu alloy, Stress Corrosion Cracking (SCC), Galvanic corrosion

Mn-Cu 합금은 우수한 내식성, 내캐비테이션 특성 및 높은 감쇠능으로 선박용 구조 소재로 널리 적용되어 왔으나, 해수 상시 침지 환경에서 반복 응력과 부식이 복합적으로 작용하는 Stress Corrosion Cracking(SCC)에 대한 저항성이 소재 신뢰성 확보의 핵심 요소이다. 특히 Mn-Cu 합금은 응고 과정에서 형성되는 덴드라이트 조직 내 Mn 편석으로 인해 국부적 전위차가 발생할 수 있어, 해수 환경에서 갈바닉 부식에 기인한 SCC 발생 가능성이 제기됨에도 이에 대한 체계적 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 기준재와 개발합금을 대상으로 3.5wt% NaCl 용액 내 SCC 거동 및 균열 메커니즘을 규명하고, 미세조직 차이에 따른 SCC 저항성을 비교 분석하였다. SEM, EDS, EBSD 분석 결과 기준재는 Mn 함량이 높은 덴드라이트 조직이 미세조직 전반에 넓게 포진되어 있음을 확인하였으며, 동전위 분극시험을 통해 전기화학적 부식 특성을 규명하였다. AIR 및 OCP 조건에서 SSRT를 수행한 결과, 연신율이 AIR 19.2%에서 OCP 4.4%로 현저히 감소하여 높은 SCC 민감도를 정량적으로 확인하였다. 파면 관찰 결과 AIR 조건에서는 전형적인 입계균열·입계파괴가, OCP 조건에서는 입내균열이 지배적으로 나타났다. 이 입내균열은 표면 Mn 편석 덴드라이트에서 표준환원전위 차이에 의한 갈바닉 부식으로 공식이 형성된 지점에서 개시되어 인장 방향에 수직하게 입내를 관통하며 성장하였으며, 해수 노출이 적은 반대쪽 파단면에서는 다시 입계파괴가 관찰되어 해수 노출 정도가 균열 개시 위치 및 전파 거동을 결정짓는 핵심 인자임을 확인하였다. 덴드라이트 조직이 관찰되지 않는 개발합금을 동일한 조건으로 시험한 결과, 기준재와는 다른 양상의 SCC 거동 및 균열 메커니즘 경향이 관찰되었으며, 이는 덴드라이트 미세조직의 형성 여부가 Mn-Cu 합금의 SCC 개시 및 전파 메커니즘에 영향을 미치는 인자로 작용할 수 있음을 시사한다.

[재료강도4-3 | 17:15]

마이크로필라 압축시험을 통한 APS Y_2O_3 코팅의 변형 및 파괴거동: 백인섭(경상국립대학교), 김준하, 유연우(한국재료연구원), 강성규*(경상국립대학교)

Keywords: Y_2O_3 코팅, 대기 플라즈마 용사, 마이크로필라 압축시험, 기공률, 파괴 거동

Y_2O_3 코팅은 우수한 플라즈마 내식성과 화학적 안정성으로 인해 플라즈마 식각 장비의 보호 소재로 널리 사용되고 있다. 그러나 대기 플라즈마 용사(atmospheric plasma spraying, APS)로 제조된 코팅은 기공, splat 경계 및 미세균열을 포함하는 불균일한 미세조직을 가지며, 이러한 결함은 코팅의 기계적 신뢰성과 파괴거동에 큰 영향을 미칠 수 있다. 기존의 시뮬레이션 연구에서는 기공률이 유효 탄성계수에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되었으나, 두께가 얇은 APS 코팅층의 기계적 특성을 실험적으로 직접 평가하는 데에는 여전히 어려움이 있다. Vickers 경도시험과 nanoindentation과 같은 기존 평가법은 기판의 영향이나 제한적인 측정 부피로 인해 실제 미세조직 결함을 포함한 코팅층의 기계적 거동을 충분히 반영하기 어렵다. 이에 따라 micropillar compression은 실제 미세조직 결함을 포함하는 국부 기계적 거동을 평가할 수 있는 효과적인 방법으로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 소결 Y_2O_3와 APS Y_2O_3 코팅 시편을 대상으로 micropillar compression 시험을 수행하였다. 단면 SEM 이미지를 이용하여 기공률, 기공 크기 및 기공 분포를 정량적으로 분석하였으며, EBSD 분석을 통해 결정방위와 KAM 값을 평가하였다. FIB를 이용하여 제작한 micropillar를 in situ 조건에서 압축하고, 응력-변형률 거동, 탄성계수, 압축강도 및 파괴 형상을 분석하였다. 탄성계수와 압축강도는 기공 구조와 밀접한 상관관계를 나타냈다. 치밀한 시편은 상대적으로 우수한 기계적 특성을 보인 반면, 기공이 많은 영역에서는 균열이 더 이른 단계에서 발생하고 하중 지지능력이 감소하였다. APS micropillar는 압축하중을 받는 동안 초기 탄성변형 이후 축 방향 균열이 형성되었으며, 이후 입계파괴가 발생하였다. 이러한 파괴거동은 압축하중이 가해질 때 기공 주변에 형성되는 국부적인 인장응력장으로 인해 균열이 시작되고, 균열이 결정립계를 따라 전파되기 때문인 것으로 해석된다. 본 연구 결과는 micropillar compression 시험이 APS Y_2O_3 코팅의 국부적인 기계적 신뢰성을 평가하고, 시뮬레이션에서 예측된 기공률 의존적 기계적 거동을 실험적으로 검증하는 데 효과적인 방법임을 보여준다.

EML 우수논문 특별 심포지엄
Room 2층 202호, 10월 29일

[EML1-1 | 08:55] 초청강연

Covalently bonded metal-organic chalcogenides as a novel active material for high color-purity blue light-emitting diodes and photodetectors: Young-Hoon Kim*(Hanyang University)

Conventional blue-emitting materials often struggle to simultaneously achieve narrow emission linewidth, chemical stability, and compatibility with thin-film device fabrication. These limitations are especially pronounced in solution-processed systems, where uncontrolled nucleation frequently leads to rough and non-uniform films. Here, we present a vapor-phase strategy to synthesize uniform, covalently bonded organic-inorganic hybrid AgSePh thin films. By sequentially depositing metallic Ag and diphenyldiselenide (Ph_2Se_2) in the vapor phase and inducing amine-assisted crystallization, we obtain high-quality films that preserve the intrinsic deep-blue emission characteristics of AgSePh. The resulting films exhibit a peak emission at 466 nm with a narrow full width at half maximum (FWHM) of 16.6 nm, satisfying the high color-purity requirements for advanced display technologies. Using these films, we demonstrate the first AgSePh-based blue light-emitting diodes, confirming stable and intrinsic electroluminescence (EL) from this material. Moreover, we for the first time demonstrate AgSePh-based diode-type photodetectors exhibiting efficient photoresponse, achieving a detectivity of 3.58×10^{11} Jones at 450 nm and passive-matrix image sensors comprising of 100 photodetector pixels based on a large-area (81 cm^2) AgSePh thin film. This work provides a practical route for integrating insoluble metal-organic chalcogenide (MOC) active material into thin-film devices and highlights their potential as a robust platform for next-generation optoelectronics.

[EML1-2 | 09:20] 초청강연

Recent Advances and Basics in Reversible Metal Electrodeposition-based Smart Windows: Cheon Woo Moon(Soonchunhyang University)

Keywords: Metal Electrodeposition, Redox, Electrolyte Physics, Molecular Dynamics, Smart Window

As global warming accelerates due to the energy consumption from the technological advances of humanity, consequently, global energy consumption is steadily increasing. That leads to thermal and optical controllability in the indoor space (e.g., housing, mobility, etc.). To relieve this problem, additional means of regulating light and heat flow into the interior spaces are required. By means of that, smart windows are recently considered as key technology, as it has the potential to dynamically control heat and light flow toward the interior space. Nevertheless, the technological developments in this field are not mature enough to be generalized elsewhere. One of the major challenges is the lack of technologies capable of achieving versatile and precise control under diverse environmental conditions. Among the various candidate active materials, metals, due to their high imaginary part of the refractive index (k) and the plasmonic resonance through visible (VIS) to near-infrared (NIR) light region, when nanostructured, are recently considered as a strong candidate for light-blocking active layer in the smart window. Because its layer could be reversibly forming/tinting at the surface of electrode. Although this research field has been actively investigated in countries such as China and the United States, relatively limited research attention has been devoted to this area in South Korea. In this presentation, the basics to recent technological developments in this field will be delivered. I hope this presentation will help stimulate further interest and research in this community.

[EML1-3 | 09:45] 초청강연

Metastability in Halide Perovskites for Energy-Efficient Devices: Jinhyun Kim(Kyung Hee University)

Halide perovskites have emerged as versatile semiconducting materials owing to their tunable electronic properties, strong light–matter interactions, defect tolerance, and facile processability. At the same time, their soft and dynamically responsive ionic lattices exhibit intrinsic metastability under external stimuli such as light, electric fields, and thermal stress. Ion migration can couple with defect redistribution, lattice distortion, and electronic processes, continuously reshaping the structural and energetic landscape of the material. Understanding these coupled ionic, structural, and electronic dynamics is therefore essential for controlling the stability and functionality of halide perovskites. In this presentation, we discuss our efforts to understand and regulate metastability by controlling the chemical, structural, and energetic environments that govern ionic dynamics in halide perovskites. Compositional and chemical regulation alters local bonding, lattice energetics, crystallization, and phase stability, while precursor and solution-state chemistry provides control over the initial chemical environment from which the perovskite framework evolves. At the structural level, dimensional organization and material architecture can redirect ion-migration pathways and produce markedly different halide-redistribution behaviors even in chemically similar systems. Molecular and interfacial interactions further modify defect energetics, lattice strain, structural connectivity, and interfacial energy alignment, thereby coupling the redistribution of mobile ions with changes in carrier populations and local energetic states. Rather than treating these parameters as independent stabilization strategies, our studies reveal how their collective regulation can steer the material toward different metastable states and suppress unfavorable phase segregation. Importantly, this dynamic ionic–energetic landscape can also be exploited rather than exclusively stabilized. In wide-

bandgap photovoltaic materials, constraining unfavorable ion redistribution and the associated energetic reorganization is essential for preserving compositional and electronic homogeneity. In a different regime, however, allowing ions to move within a controlled energetic landscape enables reversible redistribution among distinct material states. Electrically driven ionic rearrangement can modify the local electronic environment and retain information from previous stimuli, while subsequent ionic relaxation gradually erases this state, giving rise to electrical memory and decay characteristics. In this way, the same metastable ionic nature that limits the stability of mixed-halide photovoltaics can be transformed into a functional degree of freedom when its redistribution pathways and energetic landscape are deliberately regulated. This perspective provides a materials-centered framework for connecting the stabilization and functional utilization of halide perovskites toward energy-efficient devices.

[EML2-1 | 10:20] 초청강연

Advanced Catalytic Materials For Efficient Hydrogen Carrier Production and System Integration: Uk Sim*(Sungkyunkwan University)

Ammonia is an essential chemical feedstock and a promising carbon-free hydrogen carrier. However, conventional ammonia production remains highly energy-intensive, while its sustainable utilization requires efficient catalytic oxidation. Electrochemical nitrogen-cycle reactions offer opportunities to integrate renewable electricity, pollutant remediation, chemical production, and energy conversion under mild conditions. We developed a series of advanced electrocatalyst design strategies for electrochemical ammonia production from nitrate and subsequent ammonia utilization. These strategies include heterostructure construction, cationic and anionic composition engineering, morphology-controlled binder-free electrodes, multimetallic alloys, and high-entropy materials. Electrochemical analysis, in situ spectroscopy, theoretical investigation, and flow-cell or zero-gap evaluation were combined to establish relationships among catalyst structure, interfacial kinetics, selectivity, and device performance. Cation and morphology engineering of binder-free $NiCoO_2$ electrodes enhanced active-site accessibility and nitrate transport, enabling highly selective nitrate-to-ammonia conversion. Dual-anion MoSSe catalysts demonstrated that phase and anion control can regulate intermediate adsorption and enable bifunctional operation in zero-gap systems. Quaternary CoNiCuRu catalysts provided complementary functions for nitrate activation and hydrogenation, achieving high ammonia selectivity and energy efficiency in both half-cell and scaled flow-cell configurations. High-entropy catalysts further expanded the diversity of local coordination environments for efficient ammonia oxidation. These studies demonstrate that catalytic performance cannot be optimized solely by selecting an active element. Coordinated control of composition, defects, morphology, interfaces, and reaction systems is required to achieve efficient and durable ammonia production and utilization. This integrated materials-to-device approach provides a framework for sustainable ammonia-based energy technologies.

[EML2-2 | 10:45] 초청강연

Vapor Phase Inversion of CNT Film-Based Thick Electrodes for High-Energy-Density Lithium-Ion Batteries: Jae Ho Kim*(Pusan National University)

Achieving high energy density in lithium-ion batteries requires both minimizing inactive components and enabling high-loading electrodes. Here, a lightweight and flexible carbon nanotube film (CNTF) was employed as a foil-free current collector to replace conventional Al and Cu foils, reducing current-collector weight while also lowering electrode resistance and improving rate capability. However, conventional thermal drying of thick electrodes can induce severe microstructural heterogeneity through solvent-driven redistribution of the binder and conductive additives, leading to non-uniform conductive networks, increased interfacial resistance, and crack formation at high loadings. To overcome these limitations, we developed a CNTF-based vapor phase inversion (VPI) process in which ethanol vapor penetrates the wet electrode through the porous CNTF and induces PVDF phase inversion via non-solvent exchange with NMP. This process rapidly immobilizes the initially dispersed active material–binder–conductive additive network, thereby suppressing drying-induced migration and re-aggregation of MWCNTs. Consequently, CNTF@VPI electrodes exhibited more uniform conductive network formation and maintained crack-free structures even at areal loadings exceeding 50 mg cm^{-2}. In addition, pouch-cell performance was further demonstrated using high-loading electrodes with an areal loading of 30 mg cm^{-2}. These results demonstrate that CNTF@VPI offers an integrated strategy for simultaneously reducing inactive current-collector mass and stabilizing the microstructure of high-loading thick electrodes.

[EML2-3 | 11:10] 초청강연

Porous Structures of Metals and Metal Oxides by Controlled Nucleation and Growth in High-Pressure Evaporation: Mechanism and Applications: Sangwoo Ryu*(Kyonggi University)

Thermal evaporation is a powerful physical vapor deposition technique for creating highly dense films through heterogeneous nucleation and growth on substrate surfaces. The process leverages the long mean free path in a high-vacuum environment, allowing adatoms to adhere to the substrate without collisions and to maintain surface mobility. In this presentation, we introduce a new method, high-pressure thermal evaporation (HPT-Evap), for forming highly porous metal and metal-oxide structures that reverses conventional high-vacuum thermal evaporation. At relatively high pressures, such as a few Torr, frequent collisions among evaporated atoms promote homogeneous nucleation and growth, leading to cluster formation. These clusters have limited surface diffusion upon reaching the

substrate, resulting in porous microstructures with various morphologies, depending mostly on the pressure. We have demonstrated applications of these nanostructures, such as surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS), electrochemical conversion of CO_2 and NO, and chemical sensors. In this presentation, the enhanced performance as SERS substrates to recognize allergens in food and as semiconductor gas sensors to detect reducing gases. When utilized as electrochemical catalysts for the reduction of CO_2 and NO, HPT-Evap-induced porous structures showed quite high effectiveness and stability relative to the amount. At the end, we will introduce the most recent results in making porous structures of transition metals such as Ni, Co, and Ti with high melting point, which was considered difficult to apply this new HPT-Evap method.

[EML2-4 | 11:35] 초청강연

Surface Engineering of Perovskite Oxides for Alkaline Oxygen Electrocatalysis: WooChul Jung*(Seoul National University)

Perovskite oxides are promising electrocatalysts because their composition and surface chemistry can be widely tailored. In this talk, fluorine-modified (La, Sr)(Co, Fe)O3 is first presented as a bifunctional oxygen electrocatalyst. Fluorine incorporation modified the lattice and surface oxygen species, improving both oxygen evolution and reduction reactions as well as zinc-air battery performance. The talk then focuses on dynamic surface reconstruction of perovskite oxides during alkaline oxygen evolution. Studies using strained LaNiO3 thin films and plasma-treated LaCoO3 demonstrate that lattice strain, anion incorporation, and surface defects can regulate reconstruction and catalytic activity. These results highlight surface reconstruction as an important design factor for oxide electrocatalysts used in alkaline water electrolysis and metal-air batteries.

학회상 수상기념 강연
Room 2층 202호, 10월 29일

[AW1-1 | 13:50] 현대제철 학술상 수상기념강연
Three Interfaces in Metals: From Precipitates to Oxides: Seung Zeon Han*(Korea Institute of Materials Science)
Keywords: Interface, alloy matrix, precipitates, metal oxide, stable bonding

Interfaces are ubiquitous in metallic materials and play a crucial role in determining their microstructure and properties. Depending on their nature and stability, interfaces can either enhance material performance or become preferential sites for degradation and failure. In precipitation-strengthened alloys, second-phase particles form and evolve during thermomechanical treatments such as aging. During the early stages of precipitation, newly formed particles often exhibit specific crystallographic relationships with the matrix. The characteristics of the interfaces between these particles and the matrix strongly influence their morphology, size, and spatial distribution. Since a fine and uniform distribution of strengthening particles is generally desirable for achieving high strength, understanding and controlling these interfaces is essential for optimizing alloy performance. Interfaces associated with larger second phases and grain boundaries also have a significant influence on microstructural evolution and mechanical behavior. Their morphology, stability, and response to deformation can differ considerably from those of fine precipitates, demonstrating that different types of interfaces can play fundamentally different roles in metallic materials. The concept of interface control can be further extended to interfaces between metals and surface reaction products. By appropriately controlling processing conditions, highly stable interfaces can be established even between chemically and structurally dissimilar phases. Such interfaces can maintain strong bonding and resist cracking or delamination under severe deformation. In this lecture, three representative examples of interfaces in metallic materials are presented to demonstrate how their formation, structure, and stability influence microstructural evolution and material properties. These results highlight interface control as a powerful approach for the design and development of advanced metallic materials.

[AW1-2 | 14:15] 세이해암학술상 수상기념강연
열역학: Textbook으로부터 산업 DX적용까지: 정인호(서울대학교)

열역학은 공학자들이 대학교에서 배우는 가장 기본적인 학문 중 하나이다. 학교 전공교제에서는 추상적인 개념의 열역학 법칙들부터 시작해서 간단한 상평형의 개념과 상태도의 연관성을 배울 수 있다. 실제 재료 합성 및 설계와 복잡한 산업 공정을 이해하고 문제를 해결하기 위해서 열역학 반응의 중요성을 인지하지만 이를 적용하기 위해서는 다원계 복잡 시스템에 대한 열역학 데이터를 찾을 수 없고 또한 계산이 복잡하여 열역학적 접근을 시도하기 힘든 경우가 많다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 최근 가장 많이 사용되는 방법이 CALPHAD열역학 데이터베이스에 기반한 전산 열역학 계산이다. 1960년대 부터 시작된 CALPHAD 전산 열역학은 책에서 배운 간단한 열역학 개념을 복잡계로 확장하고 손으로 계산하기 힘든 복잡계의 열역학 반응, 상변화, 그리고 상태도를 컴퓨터의 도움을 받아서 쉽게 계산해내는 기술이다. CALPHAD 열역학 데이터 베이스 (DB)는 수십년간 컴퓨터의 발전화 함께 빠르게 발전하여 왔으며, 특히 금속, 산화물 및 다양한 비금속계 물질에 대한 광범위한 DB는 산업에 적용할수 있을 정도의 복잡 성분계에서 정확도를 확보할수 있게 되었다. 최근 소재 AI의 이슈와 함께 CALPHAD DB의 중요도가 더 높아지고 있다. 미지의 물질계에서 상평형을 계산하고 이를 재료의 물성과 연관지으면서 새로운 소재를 설계하고자 하는 관점에서 CALPHAD DB는 기초적인 자료가 될 수 있다. 또한 복잡계의 열역학적 상평형 계산과 확산 및 반응속도론을 결합하게 되면 시간에 따른 고상 및 액상에서 상변화를 예측할수 있게 되는데, 이를 이용하여 재료 공정 설계를 하는 방향의 연구도 지속되어오고 있다. 본 발표에서는 지난 20여년간 본 연구실에서 진행해 오고 있는 다양한 소재의 열역학 DB개발 및 속도론적인 상변화를 예측하는 모델의 개발에 대한 연구내용을 설명하고, 이러한 연구 결과들이 실제 산업의 Digital Transformation (DX)에 어떻게 적용되고 있는지에 대해서 소개하고자 한다.

[AW2-1 | 14:50] 동국송원학술상 수상기념강연
금속 내 수소의 확산과 수소분리막: 수소투과에서 수소취성까지: 서진유(한국과학기술연구원)

수소는 매우 작은 원소로, 완전히 치밀한 금속 내부에도 용해되어 확산할 수 있다. 따라서 금속은 다른 기체에 대해서는 장벽으로 작용하면서도 수소는 선택적으로 투과시킬 수 있으며, 이러한 특성을 이용한 것이 금속 수소분리막이다. 대표적인 수소분리막 소재인 Pd는 우수한 수소투과 특성과 안정성을 가지지만 높은 가격 때문에 Pd 사용을 최소화하거나 대체할 수 있는 새로운 소재의 개발이 필요하다. 수소분리막 소재를 이해하고 설계하기 위해서는 수소투과도뿐 아니라 이를 결정하는 수소확산계수와 수소용해도를 함께 평가하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 기체 수소를 이용한 time-lag 측정 장치를 구축하여 이들 특성을 동시에 평가하였다. 이를 비정질 금속에 적용한 결과, 비정질 합금은 Pd와 유사한 수준의 수소투과도를 나타내지만, Pd보다 높은 수소용해도와 낮은 수소확산계수를 갖는다는 것을 확인하였다. 최근에는 이 방법을 V 및 V계 합금으로 확장하여 수소투과와 수소취성의 관계를 연구하고 있다. 특히 흥미롭게도 Pd계 합금에서는 time-lag과 PCT 방법으로 구한 수소용해도가 서로 잘 일치하는 반면, V계 합금에서는 두 값 사이에 큰 차이가 나타난다. 이는 금속 내부에 존재하는 수소 중 실제 확산과 투과에 참여하는 수소와 그렇지 않은 수소를 구분할 필요가 있음을 시사한다. 본 발표에서는 이러한 관점에서 금속 내부의 수소 확산과 수소분리막의 투과 특성, 그리고 이와 연결된 수소취성 거동에 대한 최근 연구결과를 소개하고자 한다.

[AW2-2 | 15:15] 송천학술상 수상기념강연

미래 산업의 핵심 플랫폼, 마그네슘 합금: 만년 유망주에서 미래 산업의 주연으로: 김영민*(한국재료연구원, 과학기술연합대학원대학교)

마그네슘(Mg) 합금은 우수한 경량성에도 불구하고 난연성, 내식성, 성형성 부족이라는 기술적 한계와 알루미늄(Al) 대비 높은 가격 변동성으로 인해 실제 산업 적용에 제약이 따랐다. 이로 인해 마그네슘은 탁월한 잠재력에도 불구하고 오랫동안 산업의 '만년 유망주'에 머물러 있었다. 하지만 최근 한국재료연구원을 중심으로 난연성, 내식성, 성형성을 동시에 극복한 세계 최고 수준의 다중특성 고내식 마그네슘 합금이 개발되며 새로운 전기를 맞았다. Al과 대등한 소재 특성 및 공정 안정성을 확보함은 물론, 최근에는 가격마저 Al의 80% 수준으로 안정화되면서 자동차, 로봇 등 첨단 분야의 적용 시도가 크게 증가하고 있다. 더 나아가, 마그네슘 합금은 단순한 구조재를 뛰어넘어 미래 산업의 다양한 기능을 구현하는 '플랫폼 소재'로 진화하고 있다. 생분해성과 고에너지 밀도 특성을 활용하여 스텐트, 임플란트 등 의료기기 적용을 위한 정밀 가공기술 및 합금설계 연구가 괄목할 만한 성과를 거두며 임상 단계에 진입하였다. 특히 에너지 분야에서 마그네슘 기반 금속 소재는 이차전지 음극재와 고용량 고체 수소저장합금으로서 독보적인 위치를 점하고 있으며, 이는 마그네슘이 진정한 산업의 주연으로 발돋움할 결정적 기회를 제공하고 있다. 기존 상용 수소저장합금(AB/AB2계) 대비 월등한 경량화 효과를 지녀 모빌리티(트럭, 지게차 등) 적용에 유리하며, 대용량·장주기 수소 에너지 저장 장치(ESS)로서의 잠재력이 매우 높다. 수소 흡·방출 과정에서 요구되는 열에너지 문제가 단점으로 지적되기도 하나, 이는 시스템적 열효율 극대화 및 폐열 연계 설계 등과 결합할 경우 오히려 수소 경제의 게임체인저로 작용할 수 있다. 향후 수소, 바이오, 수송 등 다방면에서 마그네슘 소재의 수요가 급증함에 따라, 글로벌 마그네슘 공급망 확보의 중요성은 더욱 부각될 것이다. 본 강연에서는 마그네슘 합금의 한계 돌파 과정을 되짚어보고, 다가올 수요 폭발에 대비하기 위한 기술적 과제와 정부 차원의 전략적 지원 필요성을 제언함으로써 마그네슘이 미래 산업을 이끄는 '핵심 플랫폼'으로 자리매김하기 위한 비전을 공유하고자 한다.

[AW2-3 | 15:40] International Scholar Award Lecture

Fungi-based Biomaterials and Bioinspiration: Steven E. Naleway*(University of Utah)

There has been a recent explosion of interest in fungi and fungi-based materials for a variety of applications including environmentally-friendly structural and packaging materials, textile and leather alternatives, biomedical materials, and next-generation filtration media, to name a few. Despite this economic potential, and the incredible wealth of research into the biomechanics of other biological tissues originating from the animal and plant kingdoms, the biomechanics of the materials from Kingdom Fungi has been largely unstudied. This is surprising as fungi are found thriving in all biomes. This presentation will discuss our novel research into the biomechanics of a variety of fungi as well as their application towards bioinspired designs and next-generation biomaterials.

고온재료
Room 2층 204호, 10월 29일

[고온1-1 | 09:00]
결정립 구조와 γ′ 분포 제어를 통한 L-DED IN738LC 합금의 고온 크리프 저항성 향상: 안동혁, 윤대원, 정희원, 유영수, 서성문, 이형수*(한국재료연구원)
Keywords: Additive manufacturing, IN738LC superalloy, Heat treatment, Recrystallization, γ′ precipitate distribution, Creep anisotropy

Directed Energy Deposition(DED)은 금속 소재를 국부적으로 용융·적층하여 복잡 형상의 부품을 제조하거나 손상된 부품을 보수할 수 있는 적층 제조 기술이다. 그러나 DED 공정으로 제조된 Ni기 초내열합금은 빠른 응고속도와 반복적인 열이력으로 인해 기존 주조재와는 상이한 결정립 구조 및 석출 거동을 나타낸다. 따라서 주조재의 미세조직을 기준으로 최적화된 기존 열처리 공정을 DED 소재에 그대로 적용할 경우, DED 고유의 미세조직 특성을 효과적으로 제어하지 못해 고온 크리프 특성이 저하될 수 있다. 이에 본 연구에서는 L-DED로 제조된 IN738LC 합금의 고온 크리프 저항성을 향상시키기 위해 재결정, 결정립 성장 및 γ′ 석출 거동을 제어할 수 있는 열처리 조건을 설계하였다. 고온 용체화 처리를 통해 부분 재결정과 결정립 조대화를 유도하였으며, 이후 시효 조건을 달리하여 monomodal 및 bimodal γ′ 분포를 형성하였다. 열처리 조건에 따른 크리프 특성을 평가하기 위해 850 ºC, 200 MPa 조건에서 크리프 시험을 수행하였다. 그 결과, 새롭게 설계된 열처리 조건에서 기존 열처리 조건 대비 크리프 파단 수명이 향상되었으며, 특히 LS1A 조건에서 가장 낮은 2차 크리프 속도가 나타났다. 이러한 크리프 특성 향상은 결정립 조대화, Σ3 CSL 입계 분율 증가 및 monomodal γ′ 분포에 따른 전위 활주 억제와 γ′ 전단 지연이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 이상의 결과를 통해 L-DED IN738LC 합금에서 결정립 구조와 γ′ 석출 거동을 효과적으로 제어하는 열처리 설계가 고온 크리프 저항성 향상에 유효함을 확인하였다.

[고온1-2 | 09:15]
Haynes 282 초합금 Laser 용접부의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 용접후열처리 효과 : 백재영(동아대학교 금속공학과), 양희평(동아대학교 금속공학과, 포항공과대학교 친환경 소재 대학원), 조덕현, 이학성, 전종배*(동아대학교 금속공학과)
Keywords: 레이저 용접, 후열처리 (PWHT), 시효처리, 미세조직, 기계적 특성

초임계 CO_2 발전용 터빈과 차세대 항공우주 추진 시스템 등 극한 환경용 고온 부품의 수요가 증가함에 따라, 700 ºC 이상에서의 안정적 강도 유지와 산화·부식 내구성 확보를 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Haynes 282는 γ′ 석출 강화형 Ni 기반 초내열합금으로, 우수한 고온 강도와 내산화성을 동시에 만족하여 이러한 요구에 대응 가능한 소재로 주목받고 있다. 고온 부품 제작에 필수적인 용접 공정은 용접부에서 미세조직 불균일이 발생하고, 이에 따른 기계적 물성 저하가 유발될 수 있다. 레이저 용접은 좁은 열영향부, 고속·정밀 용접, 자동화 적합성 등의 장점을 통해 이러한 문제를 줄일 수 있어 Haynes 282의 산업 적용 확대를 위한 적합한 공정으로 판단된다. 하지만 레이저 용접을 적용하더라도 용접부에는 세포상·수지상 조직 형성, 탄화물의 불균일 분포, γ′상 석출 저하 등 미세조직적 불균일이 잔존할 수 있다. 따라서 용접후열처리(Post-Weld Heat Treatment, PWHT)를 통해 용접부 미세조직의 안정화 및 균일화를 확보하는 동시에, γ′상의 석출을 유도해 석출 강화 효과를 향상시키는 것이 중요하다. 본 연구에서는 Haynes 282(HY282) 레이저 용접부를 대상으로 PWHT 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화를 체계적으로 분석하였다. 500 W, 5 mm/s 조건에서 레이저 용접을 수행하여 건전한 용접부를 제작하였으며, 용체화 열처리 적용 여부를 시작으로 다양한 시효 온도를 단계적으로 적용한 후열처리 조건을 설계하여 각 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화를 세밀하게 비교·분석하였다. 또한 SEM 및 EDS 분석을 통해 수지상 간 화학 조성 편석과 탄화물 및 석출물의 분포를 평가하였고, EBSD 분석을 이용하여 결정립 크기, 형상 및 분포 변화를 정량적으로 분석함으로써 열처리에 따른 미세조직 안정화 거동을 확인하였다. 이를 바탕으로 각 열처리 단계가 미세조직 변화와 γ′ 석출 거동에 미치는 영향을 비교하고, 최적의 PWHT 조건을 도출하여 Haynes 282 레이저 용접부의 기계적 특성 향상에 미치는 후열처리 효과를 종합적으로 평가하고자 하였다.

[고온1-3 | 09:30]
Effect of HfC Addition on Room- and Elevated-Temperature Tensile Properties of Additively Manufactured Inconel 625: Yunhui Kim, Hojin Ryu*(KAIST)
Keywords: Inconel 625, Additive Manufacturing, HfC, Metal Matrix Composite, Elevated-Temperature Tensile Properties, Microstructural Stability

Inconel 625 (IN625) is a Ni-based superalloy widely used for high-temperature structural applications owing to its excellent mechanical properties and environmental resistance. However, the microstructural instability and reduction in strength at elevated temperatures remain important considerations for extending the applicability of additively manufactured IN625 under severe thermal conditions. In this study, HfC particles were introduced into IN625 to investigate their influence on microstructural evolution and tensile behavior at both room and elevated temperatures. IN625 and IN625–HfC specimens were fabricated using laser-based additive manufacturing, and their microstructures, phase constitution, and mechanical properties were systematically compared. Particular attention was given to the distribution and stability of carbide phases, solidification-induced microstructural features, and their relationships with temperature-dependent deformation behavior. Tensile tests conducted at room and elevated temperatures were used to

evaluate changes in yield strength, ultimate tensile strength, elongation, and deformation characteristics resulting from HfC addition. Microstructural and fractographic analyses were further employed to identify the strengthening and damage mechanisms governing tensile behavior. The comparative investigation provides insight into the role of HfC in controlling the microstructure and mechanical response of additively manufactured IN625. The results are expected to clarify how stable carbide-containing microstructures influence strength retention and deformation behavior at elevated temperatures and to provide a basis for designing particle-modified Ni-based superalloys for high-temperature additive manufacturing applications.

[고온1-4 | 09:45]

레이저 용융 니켈기 초합금의 ZrB_2 접종에 따른 결정립 미세화 및 등축화 거동 : 조덕현, 양희평, 박민서(동아대학교), 정중은*(한국재료연구원), 전종배*(동아대학교)

Keywords: 니켈기 초합금, 레이저 용융, 나노 접종 분말, 등축화, 미세화

레이저 기반 적층제조 (Laser additive manufacturing, LAM)는 니켈기 초합금 대형 부품의 제조 및 보수에 유리하지만, 고입열과 방향성 응고로 인해 조대한 주상정 결정립과 강한 집합조직이 형성될 수 있다. 본 연구에서는 동일한 ZrB_2 나노 접종재에 대한 니켈기 초합금 모재 조성의 결정립 미세화 및 주상정-등축정 천이 반응 차이를 규명하고자 하였다. Udimet 720 Li, Haynes 282, Inconel 718 및 Hastelloy X의 네 종류 니켈기 초합금을 모재로 선정하고, 평균 입도 500 nm ZrB_2를 기판에 형성한 홈에 국부적으로 첨가하는 groove-fiiling inoculant method를 적용하였다. 모든 모재는 레이저 출력 1200 W, 주사 속도 5 mm/s 및 빔 크기 0.5 mm의 동일 조건에서 실험을 진행하였으며, 미접종 및 ZrB_2 접종 영역의 결정립 크기, 등축정 분율, 고경각 입계 분율을 electron backscatter diffraction (EBSD)으로 정량화하였다. 미접종 조건에서는 네 합금 모두 주상정 성장이 우세하고 강한 집합조직을 나타냈으나, ZrB_2 첨가 후에는 전반적으로 결정립 크기가 감소하고 등축정 분율과 고경각 입계 분율이 증가하는 동시에 뚜렷한 결정립 미세화 효과가 확인되었다. 그러나 동일한 ZrB_2를 적용하였음에도 결정립 미세화 및 등축화 정도는 모재에 따라 차이를 나타냈으며, 이는 각 초합금의 조성 및 응고 특성 차이에 따라 ZrB_2 접종 효과가 상이하게 발현된 결과로 판단된다. 본 연구는 동일한 ZrB_2 접종 조건에 대한 여러 니켈기 초합금의 미세조직 반응을 직접 비교함으로써, 레이저 용융 공정에서 접종 기반 결정립 제어를 위한 기초적인 실험적 지침을 제시하고자 한다.

[고온1-5 | 10:00]

APT Characterization of Zr Partitioning Behavior and Its Implications in a Hf-free 247 Grade Superalloy Fabricated by EBM: Tae Gyeong Kim, A Reum Lee, Hyun Uk Hong*(Changwon National University), Won Suk Ko, Hye Ji Jo(Korea University), Bong Ho Lee(DGIST), Byoung Soo Lee, Hae Jin Lee(Korea Institute of Industrial Technology)

Keywords: Superalloy, Alloy Design, APT, Creep

Additive manufacturing of nickel-based superalloys is a key technology for maximizing the temperature capability of turbine components through the realization of complex internal cooling channels. However, high γ′ fraction alloys such as CM247LC have seen limited application owing to their severe hot cracking susceptibility and their high content of costly rare metal elements. In this study, a low-cost 247 grade superalloy for additive manufacturing, designated CW247, was designed through a multi-scale alloy design approach based on thermodynamic and first-principles calculations, in which Hf and Ta were reduced while Ti and Nb were utilized. CW247 fabricated by electron beam melting exhibited a substantially reduced crack density, whereas microcracks remained in the as-built condition due to constitutional liquation originating from Nb enrichment at MC carbide interfaces. In addition, atom probe tomography revealed that Zr, which had been added as a grain boundary strengthener, remained in solid solution within the γ matrix in the as-built condition and was not detected at the grain boundaries, indicating that Zr does not fulfill its intended grain boundary strengthening role in the as-fabricated alloy. Based on these observations, CW247-D was designed by adjusting the carbide forming elements Nb, C, and Zr and by adding a small amount of B as an effective grain boundary strengthening element. Under identical processing conditions, liquation cracking was effectively suppressed and a relative density above 99.9 % was achieved over a wide processing window. Notably, the creep life was improved by approximately 37 times at 815 °C/448 MPa and by approximately 380 times at 982 °C/179 MPa, reaching a level comparable to that of the cast counterpart. These results demonstrate that the control of minor grain boundary elements, guided by direct atomic-scale evidence of their actual partitioning behavior, is an effective design strategy for simultaneously securing crack resistance and creep performance in high γ′ fraction superalloys for additive manufacturing.

[고온2-1 | 10:25]

CM247LC 초내열합금에서 수지상간 편석에 의한 Incipient melting 발생 및 재응고 다상조직 형성 : 여준기, 이형수, 윤대원, 정희원, 유영수, 서성문*(한국재료연구원)

Keywords: CM247LC, Segregation, Solution heat treatment, γ/γ′ eutectic, Incipient Melting, Multiphase microstructure

니켈기 초내열합금은 우수한 고온 기계적 특성과 내산화성을 바탕으로 항공기 엔진 및 발전용 가스터빈의 고온 부품에 널리 적용되고 있다. 그러나 주조용 초내열합금은 상대적으로 느린 냉각속도와 높은 합금원소 함량으로 인해 응고 과정에서 수지상간 편석이 쉽게 발생하며, 이러한 편석은 후속 용체화 열처리 중 국부적인 incipient melting (IM)을 유발할 수 있다. IM은 주조용 초내열합금의 용체화 열처리 과정에서 발생하는 대표적인 미세조직적 결함 중 하나로 알려져 있으나, 그 발생은 단순히 용체화 열처리 온도만으로 결정되는 것이 아니라 응고 중 형성된 수지상간 미세조직, 잔류 액상 내 국부 조성 변화 및 합금원소의 편석 거동에 의해

복합적으로 영향을 받을 수 있다. 본 연구에서는 CM247LC 합금을 기반으로 Zr, B 및 Hf 함량을 변화시킨 합금을 제조하고, 용체화 열처리 중 발생하는 IM의 형성 거동과 미세조직 발달 특성을 조사하였다. 주조 상태에서 형성된 γ/γ′ 공정조직 분율과 용체화 열처리 후 IM 분율을 정량화하였으며, DSC 분석을 통해 합금원소 첨가에 따른 액상선, 고상선 및 비평형 응고구간 변화를 평가하였다. 또한 SEM, EPMA 및 TEM 분석을 통해 IM 영역의 미세조직적 특징과 주요 원소 분포를 분석하였다. Zr, B 및 Hf 첨가는 수지상간 영역에서 γ/γ′ 공정조직의 형성을 촉진하였으며, 이는 용체화 열처리 중 IM 발생 민감도 증가와 밀접하게 관련되었다. IM 영역은 γ/γ′ 공정조직 및 편석상이 집중된 수지상간 영역을 중심으로 형성되었고, 국부 재용융 및 재응고 과정에서 원소 재분배를 동반한 불균일한 다상 미세조직으로 발달하였다. 본 연구는 주조용 니켈기 초내열합금에서 IM 발생 원인을 이해하기 위한 미세조직적 근거를 제시하며, 일반적으로 열처리 중 발생하는 미세조직적 결함으로 간주되는 IM이 기공을 포함하고 기존 주조조직과 구별되는 재응고 다상조직으로 구성됨을 규명하였다.

[고온2-2 | 10:40]

고내식·고청정 Ni-Cr-Mo-W계 하스텔로이 C22 합금의 입계부식 저항성 향상을 위한 열역학 기반 스크리닝 활용 성분계 최적화: 김종훈, 이상현(국립창원대학교 소재융합시스템공학과), 김덕령(세아창원특수강), 홍현욱*(국립창원대학교 소재융합시스템공학과)

Keywords: Hastelloy C-22, intergranular corrosion, μ phase, TCP phase, alloy design

고내식·고청정 Ni-Cr-Mo-W계 하스텔로이 합금(C-22) 은 반도체 및 에너지 산업의 극한 부식 환경에서 핵심 소재로 요구된다. 그러나 고합금화(Mo, W 첨가)에 따른 응고 편석 및 입계 TCP 상 형성은 미세조직 안정성과 내식 성능 저하를 유발할 수 있어, 제조 공정과 연계된 성분 최적화 전략이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 Mo+W 함량 15% 이상의 고내식·고청정 Ni-Cr-Mo-W계 소재 개발을 목표로, 초도품 C-22의 미세조직/특성 분석과 열역학·속도론 기반 성분계 개량 및 후보 조성 스크리닝을 수행하였다. 초도품 미세조직 관찰 결과, C-22 합금에서 Mo/Si-rich TCP 상이 입계 주변에 존재하였으며 평균 결정립 크기는 C-22가 36.9 μm 로 확인되었다. 부식 특성은 ASTM G28(method B) 침지 시험으로 평가하였으며, C-22의 부식 속도는 뮤상 분포 정도에 따라 7.5~40mpy 수준을 나타내었으며, 부식 후 미세조직 분석에서는 μ-phase가 존재하는 입계를 따라 국부 부식이 진행되었고, STEM line-scan 결과 μ-phase 주변에 Mo-depletion 영역이 형성됨을 확인하여, 입계 TCP 상이 내식성 저하의 핵심 인자임을 도출하였다. 이상의 결과를 기반으로 응고 편석 및 입계 TCP 상 억제를 목적으로 성분 설계 전략을 수립하였다. 후보 조성은 부식 지수(PREN/APF/Ep) 기반 스크리닝과 Thermo-Calc(Scheil/평형) 계산을 통한 TCP/탄화물 예측, Fleischer 모델 기반 고용강화 기여 평가를 단계적으로 적용하여 최종 후보 성분계를 도출하고자 하였다. 본 연구는 입계 TCP 상–편석–부식 거동의 연계를 정량적으로 제시하고, 제조 공정을 고려한 성분 최적화 프레임을 구축함으로써 고내식·고청정 Ni-Cr-Mo-W계 소재의 성분계 최적화에 기여할 것으로 기대된다.

[고온2-3 | 10:55]

고 Cr합금의 미세조직과 고온 압축 특성 및 고온 산화 거동: 강민재, 황원구(인하대학교 신소재공학과), 이현범(포스코), 이기안*(인하대학교 신소재공학과)

Keywords: High-Cr alloy, Heat treatment, Microstructure, High-temperature compression, Oxidation behavior

본 연구에서는 고 Cr 합금을 대상으로, 초기 시편과 서로 다른 온도에서 열처리된 시편의 미세조직, 고온 압축 특성 및 산화 거동을 비교 분석하였다. 시편의 초기 및 열처리 후 미세조직은 SEM-EDS, XRD, EBSD 및 EPMA를 이용하여 분석하였으며, 고온 물성 평가를 위해 1000-1350 ºC 범위에서 고온 압축 시험을 수행하였다. 또한 1350 ºC, 100 h, air 분위기에서 장시간 고온 노출 시험을 진행한 후 무게 변화, 산화층 형상 및 원소 분포를 분석하였다. 미세조직 분석 결과, 고 Cr 합금은 BCC Cr-rich matrix를 기반으로 하며, 열처리 조건에 따라 Fe_2W 및 Cr-rich 2차상의 분율과 분포가 변화하였다. 고온 압축 시험 결과, Fe2W/Cr-rich 2차상이 비교적 뚜렷하게 분포한 조건에서 1000 ºC 압축강도가 상대적으로 높게 나타난 반면 1200 ºC 이상에서는 고온 연화가 지배적으로 작용하면서 열처리 조건에 따른 압축강도 차이가 감소하였다. 장시간 고온 노출 후에는 Cr_2O_3 기반 산화층과 $FeCr_2O_4$ spinel oxide가 주로 형성되었으며, 국부적으로 SiO2가 관찰되었다. 또한 열처리 조건에 따라 산화층 두께, 계면 균열, 내부 산화 및 산화막 박리 정도가 다르게 나타났다. 특히 Fe_2W의 존재는 합금 원소의 외향 확산과 산화막/기지 계면 안정성에 영향을 미쳐 무게 감소 및 산화층 박리 거동과 밀접한 관련을 보였다. 상기 결과들을 바탕으로 고 Cr 합금의 고온 압축 변형 기구 및 고온 산화 기구를 규명하고 그 향상 방안에 대하여 고찰하였다.

[고온2-4 | 11:10]

열차폐코팅의 손상 기반 복합 부하 피로수명 모델링: 이상림, 최윤석*(부산대학교), 명상원, 김훈희(두산에너빌리티(주))

Keywords: 열차폐코팅, 열생성산화물, 누적손상, 복합 하중, 피로수명 모델링

가스터빈 엔진은 항공기 추진과 발전 분야의 핵심 동력원으로서 고온 운전이 필수적이며, 내부 부품 보호와 효율 향상을 위해 낮은 열전도도를 갖는 세라믹 열차폐코팅(Thermal Barrier Coating, TBC)이 적용된다. 그러나 운전 중 열성장산화물(Thermally Grown Oxide, TGO)이 성장하면서 계면 열응력이 증가하고, 이에 따라 균열과 코팅 박리가 발생한다. 기존 수명예측 연구는 주로 단일 열하중을 대상으로 하여, 실제 운전 중 변화하는 열하중과 누적 열이력에 따른 박리수명 변화를 충분히 반영하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 TGO 성장, 계면 열응력 및 손상 축적을 연계한 복합부하 수명예측 모델을 구축하고자 한다. 먼저 등온 열화시험에서 측정된 TGO 두께를 기반으로 온도별 산화 성장모델을 구축하고, 이를 열사이클의 온도이력에 적용하여 열피로 과정에서의 누적 TGO 두께를 예측하였다. 다음으로 유한요소해석을 통해 TGO 성장과 열하중 조건에 따른 열응력을 도출하고, 이를 손상모델과 연계하여 단일부하 조건의 수명 선도를 구축하였다. 최종적으로 누적 손상상태와 하중 전환에 따라 손상 증가율이 변화하는 비선형 손상모델로 확장하여, 하중 순서에 따른 박리수명 차이와 실제 운전 조건에서의 손상도를 평가하고자 한다.

[고온2-5 | 11:25]

Mo 저감 및 Nb/Ta 첨가 Haynes 282 기반 Ni-based superalloy의 고온압축 거동과 구성방정식 해석: 허성준, 박재형(영남대학교 신소재공학과), 정원석, 박노근*(영남대학교 신소재공학부)

Keywords: Ni-based superalloy, Hot compression, High-temperature flow behavior, Constitutive equation, Hot deformation activation energy

본 연구에서는 Haynes 282를 기반으로 Mo 함량을 저감하고 Nb와 Ta를 첨가한 Ni-based superalloy의 고온압축 거동과 변형저항 특성을 분석하였다. 고온압축시험은 900–1200 ºC 및 0.01–1.0 s^{-1}의 변형률속도 조건에서 수행하였으며, 진응력–진변형률 곡선과 최대유동응력을 이용하여 유동거동을 평가하였다. 또한 최대유동응력을 기반으로 Arrhenius형 구성방정식과 Zener–Hollomon 관계를 도출하여 온도 및 변형률속도 의존성을 정량적으로 해석하였다. 모든 시험조건에서 초기 가공경화 이후 유동연화가 나타났으며, 최대유동응력은 변형온도가 증가할수록 감소하고 변형률속도가 증가할수록 증가하였다. 특히 900–1000 ºC에서는 높은 변형저항과 제한적인 유동연화가 나타난 반면, 1100–1200 ºC에서는 유동응력이 크게 감소하고 연화거동이 뚜렷하게 나타났다. 도출된 Arrhenius형 구성방정식은 시험조건 범위에서 양호한 선형 상관관계를 나타냈다. 겉보기 활성화에너지는 전체 온도범위에서 696.2 kJ/mol이었으며, 900–1000 ºC에서는 943.4 kJ/mol, 1100–1200 ºC에서는 359.4 kJ/mol로 산출되어 온도영역에 따른 뚜렷한 차이를 보였다. 이는 γ′ 석출상의 열적 안정성 및 용해 거동 변화에 따른 전위 이동과 동적 연화 거동의 차이에 기인한 것으로 해석하였다. 본 연구결과는 Mo 저감 및 Nb/Ta 첨가 Haynes 282 기반 합금의 고온 변형거동을 이해하고 열간가공 조건을 설정하기 위한 기초자료를 제공한다.

[고온2-6 | 11:40]

Thermodynamic Assessment of the Ni-Se System: Gyeongrok Oh, Chan Jeong, In-Ho Jung*(서울대학교)

Keywords: Ni superalloy, CALPHAD, FACTsage

Nickel-based alloys are widely used in gas turbines and other high-temperature components because their fcc Ni matrix can be strengthened by multiple alloying additions while retaining environmental resistance. Selenium (Se) is one of impurities which should be managed in the production of Ni super alloy. To find the best process condition to reduce Se in liquid Ni alloy and understand its refining limit, accurate thermodynamic data of Se in liquid Ni alloy is essential. In the present study, thermodynamic assessment of the Ni-Se system was carried out to satisfy this need. The Ni-Se system contains a broad non-stoichiometric $Ni_{1-x}Se$ (NiSe) phase with a hexagonal NiAs-type structure, and several stoichiometric compounds, and liquid phase. All the phase diagram, calorimetric data and isopiestic gas-solid-liquid equilibrium data in literature were collected and evaluated together for the thermodynamic assessment. Liquid phase was described using the Modified Quasichemical Model and $Ni_{1-x}Se$ (NiSe) solid solution was described using the Compound Energy Formalism. All the reliable experimental data were used to optimize the model parameters for the Gibbs energies of solid and liquid phases. The resultant thermodynamic database was used to evaluate the refining limit of Se in liquid Ni for the application to Ni super alloy production.

[고온3-1 | 13:30]

Orientation-Dependent Interstitial Diffusion and Stress-Mitigating Suboxide Formation in Nb Alloy: Muhammad Akmal, Sheng Yu, Yunhui Kim, Ho Jin Ryu*(Department of Nuclear and Quantum Engineering, KAIST)

Keywords: Nb alloys, orientation-dependent oxidation, Interstitial ordering

Refractory Nb alloys suffer severe high-temperature oxidation due to the large Pilling–Bedworth ratio of terminal Nb2O5 scales. During early-stage exposure at 750 ºC in air, spark plasma sintered (SPS) Nb521 activates a subsurface strain-buffering mechanism prior to bulk oxide growth. Oxygen ingress is governed by stress-induced diffusion, where resolved shear stresses selectively drive oxygen interstitials along principal <100> directions dictated by grain-scale Schmid factors. This orientation-dependent segregation forms oxygen-rich (~20 at.%) BCT NbxO suboxide bands via topotaxial, Bain-like distortions. Simultaneously, the adjacent matrix (~5 at.% O) undergoes spinodal decomposition, as confirmed by STEM domain modulations and HRTEM-FFT satellite reflections. In-situ HT-XRD captures transient splitting of the primary (110) BCC reflection. This stress-guided ordering and spinodal network act as a ‘‘pseudo-TRIP’’ strain buffer, absorbing mismatch stresses to suppress microcracking, promote adherent scale growth, and explain the orientation-dependent oxidation behavior.

[고온3-2 | 13:45]

열처리를 통한 미세조직 제어가 Mo-Nb-Ti-Cr 내열 다원소 합금의 고온 산화 거동에 미치는 영향: 신승환, 이강진(공주대학교 신소재공학과, 첨단 분말 소재 부품 센터), 이찬호(Department of Materials Science and Engineering, The University of Auburn, Auburn, AL, USA), 송기안*(공주대학교 신소재공학과, 첨단 분말 소재 부품 센터)

Keywords: Refractory Multi-Principal Element Alloys, Oxidation Resistance, Oxide Layer, Outward diffusion of cation, Inward diffusion of oxygen

내열 다원소 합금(Refractory Multi-Principal Element Alloys, RMPEAs)은 W, Mo, Nb, Ta과 같은 내화성 원소들로 구성되어 단상의 BCC 구조를 안정적으로 형성하고, 이로 인한 우수한 고온 기계적 특성 및 열적 안정성을 동시에 제공하는 차세대 고온 구조용 소재로서 주목받고 있다. 하지만 기존 RMPEAs는 고온환경에서 WO_3, MoO_3, Nb_2O_5, Ta_2O_5등의 내화성 산화물들로 인해 제

한적인 산화 거동을 나타내며, 구조용 재료로서 고온 환경에서 장기간 사용 수명의 한계를 지닌다. 최근, RMPEAs의 산화 저항성을 개선하기 위해 Cr함량 조절을 통해 산화과정에서 형성된 Cr_2O_3를 내화성 산화물인 Nb_2O_5와 반응시켜 산화스케일 내 조밀한 $CrNbO_4$ 및 (Cr, Nb, Ti)O_2와 같은 복합산화물로 이루어진 보호 산화층을 형성하여 산화저항성을 향상시킬 수 있다는 연구가 보고되었다. 또한, 보호 산화물의 유효성은 형성 원소 첨가량에만 의존하지 않으며, 보호 산화물 층을 연속적이고 치밀하게 형성될 수 있는 확산 조건이 함께 확보되어야 한다. 특히 합금의 주조과정에서 발생하는 조성적 편석은 산화과정에서 제한적인 양이온 확산에만 의존하게 되어 결국 균일하지 않은 산화층 형성을 유발한다. 따라서, 본 연구에서는, MoNbTiCr 합금의 미세조직적 균질성을 확보한 후 합금의 산화 거동을 비교하기 위해 주조 상태 및 열처리 후 두 합금의 산화거동 메커니즘 비교를 진행하였다. 합금의 산화 저항성 평가는 1000 ºC의 대기중 분위기에서 진행하였으며, 산화 후 중량 변화를 측정하여 평가하였다. 그리고 산화 시험 시간에 따른 합금들의 산화거동을 이해하기 위해 SEM을 통해 산화층 내 형성된 산화물들의 형태학적 특징을 분석하고 XRD를 통한 격자상수 분석을 통해 산화물의 상 분석을 진행하였다. This work was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT), and Ministry of Trade, Industry and Energy ((P0018009). This work was supported by Korea Planning & Evaluation of Industrial Technology (KEIT) funded by Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE, Korea) (RS-2024-00436523)

[고온3-3 | 14:00]

ZrH_2-Assisted Microstructural Modification and Ductility Enhancement of Nb521 Alloy by Spark Plasma Sintering: Sheng Yu, Cheol Hyeon Lee, Ho Jin Ryu*(KAIST)

Keywords: Nb alloy, Spark plasma sintering (SPS), ZrH_2, Microstructural modification, Strength–ductility balance

Niobium-based refractory alloys are promising candidates for high-temperature aerospace applications because of their high melting points, relatively low density, and excellent high-temperature strength. Among them, Nb521 (Nb–5W–2Mo–1Zr, wt.%) offers a favorable balance between high-temperature performance and cost-effectiveness. However, its room-temperature mechanical performance is strongly affected by interstitial impurities and the spatial distribution of secondary phases. In this study, spark plasma sintering (SPS) was employed as a rapid alloy-screening platform to investigate the densification, microstructural evolution, and mechanical behavior of Nb521, with particular emphasis on ZrH_2-assisted microstructural modification. The SPS processing conditions were first optimized to establish a reproducible Nb521 baseline. Relative densities above 97% were achieved, and the specimen sintered at 1600 ºC exhibited the best strength–ductility balance, with a relative density of 97.5%, yield strength of 490 ± 15 MPa, ultimate tensile strength of 635 ± 25 MPa, and elongation of 5.7 ± 1.5%, comparable to values reported for SLM-fabricated Nb521 alloys. To mitigate oxygen uptake from the residual atmosphere during SPS, ZrH_2 was introduced as a potential oxygen-scavenging additive. Fine ZrH_2 particles were subsequently attached to the surfaces of spherical Nb521 powders using the Surface Modification and Reinforcement Transplantation (SMART) strategy, enabling controlled spatial distribution of the additive at the powder scale. After SPS consolidation, ZrH_2 decomposed and ZrO_2 particles and Zr-rich secondary phases preferentially formed along the prior particle boundaries. With increasing ZrH_2 content, the Zr-rich regions gradually developed into a more continuous and interconnected network. Tensile testing showed a progressive reduction in strength accompanied by improved ductility. SEM of fracture revealed dimpled features within Zr-rich regions, whereas cleavage-dominated fracture was more frequently observed in the Nb-rich matrix, indicating that the Zr-rich boundary phase provides greater local strain-accommodation capability. A second SPS-assisted deformation step was applied to the alloy containing 2 wt.% ZrH_2 to clarify the role of network connectivity. The deformation disrupted the originally continuous Zr-rich network and fragmented it into isolated regions. Despite the more dispersed distribution of the secondary phases, the alloy exhibited a pronounced loss of tensile ductility and predominantly transgranular cleavage fracture. This result demonstrates that the connectivity of the Zr-rich phase, rather than its presence alone, is a critical factor governing macroscopic plastic deformation. A continuous Zr-rich network can provide interconnected strain-accommodation pathways along prior particle boundaries, whereas disruption of this network promotes strain localization and cleavage-dominated failure. Although ZrH_2 was initially introduced as a potential oxygen-scavenging additive, the measured total oxygen content increased with increasing ZrH_2 addition, and no corresponding softening of the Nb matrix was observed. Therefore, the improved ductility cannot be attributed to bulk deoxidation under the present SPS conditions. Instead, the dominant effect of ZrH_2 is associated with microstructural reconstruction and the formation of a connected Zr-rich boundary network. These findings highlight the importance of secondary-phase morphology and connectivity in controlling the strength–ductility balance of Nb521 alloys. The combination of SMART-based powder-surface modification and solid-state SPS enables deliberate control over secondary-phase morphology and connectivity, providing a viable strategy for optimizing the microstructural architecture and mechanical response of Nb521 alloys.

[고온3-4 | 14:15]

Effect of Si addition on high-temperature mechanical properties and oxidation behavior of Nb-based superalloy (Nb521): Chan Hee Lee, 최벽파*(KAIST), 진민수(Max Planck Institute)

Keywords: Nb-based superalloy, Nb-Si eutectic, Ultra-high temperature properties

Niobium (Nb)-based superalloys have attracted significant attention as potential nest-generation candidates to conventional Nickel (Ni)-based superalloys, owing to their high melting points and superior ultra-high temperature creep properties. Recently, research has

increasingly focused on silicide-strengthened Nb alloys through the addition of Silicon (Si), as these systems exhibit excellent strength and creep resistance at ultra-high temperatures ranging from 1300 ºC to 1700 ºC. However, the limited high-temperature oxidation resistance of Nb-based alloys has hindered their widespread study and practical application compared to Ni-based superalloys. Furthermore, there is a lack of fundamental research on the critical Si concentration required to effectively manifest the superior properties characteristic of conventional Nb-Si alloy systems. To address this issue, the present study investigates the effect of varying Si content on the high-temperature mechanical properties and oxidation behavior of the Nb521 alloy, one of the representative Nb-based superalloys.

[고온3-5 | 14:30]

$L2_1$-FCC 헤테로 미세구조 설계를 통한 $L1_2$ 강화 고엔트로피 합금의 중간온도취성 극복: 김은찬, 박효진*, 하수빈, 이시우, 김형섭* (포항공과대학교)

Keywords: $L1_2$ 강화 고엔트로피 합금, 기계적 물성, 헤테로 구조

FCC 기반 $L1_2$ 강화 고엔트로피 합금은 기존 Ni기 초합금을 대체할 차세대 고온 구조 재료로 활발히 연구되고 있다. 그러나, 600~800 ºC에서 입계 파단에 의해 연신율이 급격히 감소하는 중간온도취성(Intermediate Temperature Embrittlement)이 나타나 실제 적용에 한계가 있다. 본 연구에서는 고온에서 안정한 헤테로 구조를 형성하는 새로운 공정 전략을 제시하며, 이를 통해 중간온도취성을 억제해 우수한 고온 강도-연성 조합을 달성하였다. 주조 상태에서 interdendritic $L2_1$ phase가 있는 $L1_2$ 강화 고엔트로피 합금을 1100 ºC에서 열간 압연하여 미세 $L2_1$ 결정립과 조대 FCC 결정립이 동시에 존재하는 헤테로 구조를 얻었다. 이후 1100 ºC에서 어닐링, 800 ºC에서 시효하여 FCC 기지 내 $L1_2$ 석출 강화 효과를 극대화하였다. $L2_1$ 미세립은 고온 인장 중 FCC 결정립계를 따라 균열이 전파되는 것을 막아 중간온도취성을 억제한다. 결과적으로, 700 ºC에서 항복강도 965 MPa, 인장강도 1142 MPa, 연신율 19.8%라는 우수한 강도-연성 조합을 달성하였다. 이러한 결과는 열간 압연을 통한 interdendritic $L2_1$ phase의 미세화와 헤테로 구조 형성이 $L1_2$ 강화 합금의 중간온도취성을 극복하고 우수한 고온 기계적 특성을 확보하기 위한 새로운 미세조직 설계 전략으로 활용될 수 있음을 보여준다.

[고온3-6 | 14:45]

Ni기 초내열합금에서의 Mo 첨가가 γ′ 형상 및 γ/γ′ 격자 불일치 에 미치는 영향: 김종훈, 이재훈(국립창원대학교 소재융합시스템공학과), 윤대원(한국재료연구원 항공우주재료연구센터), 최윤석(부산대학교), 홍현욱*(국립창원대학교 소재융합시스템공학과)

Keywords: Ni-based superalloy, γ′ (gamma-prime), Mo content, γ/γ′ lattice misfit, morphological evolution, coarsening behavior

니켈기 초내열합금은 우수한 고온 강도와 크리프 저항성으로 인해 항공 및 발전용 가스터빈의 핵심 구조재로 널리 사용된다. 니켈기 초내열합금에서 γ′ 상의 석출은 주요 강화 기구로 작용하며, 고온 강도, 크리프 특성, 미세조직 안정성에 영향을 미친다. 특히 γ/γ′ 계면의 격자 불일치(lattice misfit)와 γ′ 석출물의 조대화 거동은 γ′ 형상 및 이에 따른 고온 기계적 특성에 중요한 영향을 미친다. 이에 본 연구에서는 니켈기 초내열합금의 AI 데이터 허브 구축을 위한 미세조직 정량 분석 과정에서 관찰된 concave 형태 γ′ 석출물의 발현 원인과 진화 거동을 규명하고자 하였다. 본 연구에서는 몰리브덴(Mo) 함량 변화에 따른 γ′ 석출물의 형상 진화를 조사하였다. 미세조직 분석 결과, Mo 무첨가(0 wt%) 합금에서는 전형적인 구형(spherical) γ′ 석출물이 형성된 반면, Mo 함량이 9 wt%로 증가함에 따라 오목한(concave) 형상의 γ′ 석출물이 관찰되었다. 각 합금에 대하여 고분해능 X선 회절(HR-XRD) 및 고해상도 투과전자현미경(HR-TEM)을 이용해 γ 기지와 γ′ 석출물 간 격자 불일치(δ)를 정량적으로 측정하였으며, Mo 첨가에 따른 δ 변화와 γ′ 형상 간의 상관관계를 분석하였다. 또한 시효(aging) 시간 및 열처리 조건 변화에 따른 γ′ 석출물의 크기·형상 변화를 분석하여, γ′ 석출물의 형상 진화 및 조대화 거동에 대해 고찰하고자 하였다.

이차전지 원료소재
Room 2층 205호, 10월 29일

[이차전지1-1 | 08:30] 초청강연

핵심광물의 글로벌 산업 동향, 밸류체인 핵심 이슈 및 주요국 공급망 정책: 박재범*(포스코경영연구원)

Keywords: 핵심광물, 리튬, 니켈, 희토류, 이차전지 원료, 공급망, 경제안보

리튬, 니켈, 희토류 등의 핵심광물은 첨단산업의 경쟁력을 좌우하는 전략 자원이다. 특히 향후 10년간 리튬 수요는 3배 이상, 희토류 수요는 약 80% 증가할 것으로 전망되는 가운데, 일부 밸류체인에서는 특정국에 대한 의존도가 매우 높은 상황이다. 이에 주요국은 핵심광물의 자원 확보부터 제련, 분리·정제에 이르는 전 밸류체인의 경쟁력을 강화하기 위한 지원 정책을 모색 또는 강화하고 있다. 본 발표에서는 최근 글로벌 산업·정책의 주요 화두로 부상하고 있는 핵심광물, 특히 리튬, 니켈과 희토류를 중심으로 글로벌 산업 동향과 밸류체인의 핵심 이슈를 살펴보고, 주요국 핵심광물 공급망 정책의 특징과 향후 전망을 논의하고자 한다.

[이차전지1-2 | 08:55]

슬래그 이온구조 기반 니켈 건식제련 물성 연구: FeNi 용융환원에서 Ni matte까지: 최준성, 박진균, 김종호, 서민석(포스코홀딩스), 민동준*(연세대학교)

Keywords: 니켈, 슬래그 구조, 양쪽성 원소, NMR 분석

이차전지 및 스테인리스 수요의 급증으로 saprolite와 같은 저품위 laterite 광석을 활용한 니켈 생산의 중요성이 커지고 있다. 산업적으로 laterite는 전기로 용융환원을 거쳐 ferronickel로 회수되며, 환원도를 낮춘 저탄소 조업이나 황화 처리를 통한 nickel matte 제조 등 목적 산물에 따라 다양한 건식제련 경로가 적용된다. 이들 경로는 환원 조건과 산물이 서로 다르지만, 니켈의 회수율과 슬래그 손실을 지배하는 공통 인자가 용융 슬래그와 용융 금속·매트의 물리화학적 특성이라는 점에서 동일하다. 특히 광석에 수반되는 Al_2O_3와 같은 성분은 슬래그의 이온구조를 변화시켜 니켈 거동에 직접적인 영향을 미치므로, 조성 중심의 접근을 넘어선 구조적 이해가 요구된다. 본 연구에서는 $CaO–MgO–Al_2O_3–SiO_2$ 슬래그의 니켈 용해도에 대한 염기도와 음이온 종의 역할을 관찰하였다. 염기성 산화물(MO, M = Ca, Mg)과 음이온(AlO_4^{5-}, SiO_4^{4-})의 함량을 변화시켜 전하 보상 효과를 확인하였으며, 1873 K에서 퀜칭한 슬래그의 알루미늄 배위수는 ^{27}Al 500 MHz solid-state NMR 스펙트럼을 PeakFit™ 4.0으로 deconvolution하여 분석하였다. 용융 슬래그 중 니켈은 Ni^{2+}와 NiO_2^{2-}의 두 가지 용해 메커니즘을 나타내었다. 염기도가 증가함에 따라 니켈 용해도는 최소점을 갖는 U자 곡선을 보였으나, Al_2O_3가 증가하면 AlO_4^{5-}와 NiO_2^{2-} 사이의 반발력이 작용하여 높은 Al_2O_3/SiO_2 영역에서는 반대의 경향이 나타났다. 이는 니켈 거동이 조성 자체보다 음이온 비율에 따른 이온구조 변화에 지배됨을 의미한다. 나아가 본 발표에서는 이러한 이온구조 관점을 ferronickel 정련과 nickel matte 제조로 확장한다. 저환원 조건에서의 FeNi 정련은 슬래그의 산소분압과 구조적 상태가 니켈 분배와 불순물 거동을 결정하며, 황화에 의한 matte 제조에서는 슬래그–매트 계면 물성과 상 분리 거동이 회수율을 좌우한다. 이처럼 서로 다른 산물을 목표로 하는 공정들이 모두 용융체의 이온구조와 물성이라는 공통 축으로 설명될 수 있음을 슬래그 구조 분석과 열역학 모델을 통해 논의하고자 한다.

[이차전지1-3 | 09:10]

Effects of Process Parameters on the Selective Reduction Behavior of Saprolite Nickel Ore in the Oheyama Process: Heeju Kim, Jeonghwan Kim, Seungyeon Lee, Il Sohn*(Yonsei University)

Keywords: Saprolite, Nickel laterite, Oheyama process, Selective reduction, Sulfide additive, Ferronickel

With the increasing demand for nickel in battery cathode materials and stainless steel, the need for nickel production has continued to grow. Nickel has traditionally been produced mainly from nickel sulfide ores, however, as high-grade nickel sulfide ores become depleted, lateritic nickel ores have attracted increasing attention as an alternative resource for nickel production. Saprolite, a type of laterite ore, generally contains a higher Ni content than limonite and can be reduced through pyrometallurgical processes. In this study, the Oheyama process developed by Nippon Yakin was simulated using a horizontal resistance furnace, and the effects of carbon content, additive type and amount, and process temperature on the selective reduction behavior of Ni in saprolite ore were investigated. To investigate the reduction behavior and phase evolution of the samples, TGA, XRD, and SEM analyses were conducted. The results showed that the reduction degree tended to increase with increasing carbon content, while the addition of additives further enhanced the reduction and promoted the agglomeration of metallic particles. In particular, sulfur-containing additives promoted the selective reduction of Ni through the formation of FeS. This study investigated the effects of carbon content, additive type and amount, and process temperature on the reduction of saprolite ore in the Oheyama process, and provides fundamental information for process optimization to enhance the selective reduction of Ni and the agglomeration of metallic particles.

[이차전지2-1 | 09:30]

Preferential Recovery Method for Lithium From NCM and LFP Black Powder via Pressure Oxidative Leaching: Joon Sung CHOI(포스코홀딩스), Eun Jin Jung*(포항산업과학연구원)

Keywords: Lithium-ion battery recycling, Hydrometallurgy, Pressure oxidative leaching, Circular economy

The unprecedented demand for lithium-ion batteries has necessitated the development of sustainable recycling technologies for critical raw material recovery and environmental protection. This comprehensive investigation presents a novel preferential lithium recovery methodology from NCM (LiNiMnCoO2) and LFP (LiFePO4) black powder utilizing pressure oxidative leaching technology in autoclave systems. The study systematically evaluated four distinct black powder materials with varying impurity profiles: low-carbon NCM black powder (LC NCM BP), low-aluminum NCM black powder (LA NCM BP), high-carbon NCM black powder (HC NCM BP), low-aluminum LFP black powder (LA LFP BP), and high-aluminum LFP black powder (HA LFP BP). The innovative pressure oxidative leaching process demonstrated exceptional selectivity for lithium extraction through controlled pH elevation and oxygen injection, simultaneously precipitating transition metals as reusable hydroxides and oxides. Optimal processing conditions for NCM materials at 200 °C and 20 bar total pressure achieved outstanding lithium recovery rates of 96.9% for LC NCM BP, 91.3% for LA NCM BP, and 83.6% for HC NCM BP, with complete separation of Ni, Co, and Mn as precipitated hydroxides suitable for direct battery manufacturing. LFP materials processed at 100 °C and 5 bar demonstrated excellent performance with lithium recovery rates of 95.9% for LA LFP BP and 74.1% for HA LFP BP, while retaining iron and phosphorus components as battery-grade FePO4 in solid residues. Comprehensive thermodynamic modeling using FactSage software successfully validated experimental observations, revealing critical insights into aluminum impurity effects on lithium recovery efficiency through LiAlO2 co-precipitation mechanisms. The developed technology offers transformative advantages including substantial downstream processing simplification, elimination of complex multi-stage solvent extraction requirements, direct recovery of battery-grade precursor materials from solid residues, and enhanced economic viability for industrial implementation.

[이차전지2-2 | 09:45]

스포듀민 하소 공정 중 정광 내 맥석이 스포듀민 상변태 거동과 클링커 및 융착물 형성 거동에 미치는 영향: 박성환(한양대학교), 김현수(포스코 미래기술연구원), 박주현*(한양대학교)

Keywords: 스포듀민, 로터리 킬른, 맥석, 스포듀민 상변태, 클링커, 융착물

스포듀민(spodumene) 광석으로부터 리튬을 추출하는 공정에서 α-스포듀민을 β-스포듀민으로 전환하는 하소 공정은 후속 공정에서의 리튬 침출 효율을 결정하는 핵심 단계이다. 그러나 하소 중 정광 내 맥석의 영향으로 클링커 및 융착물이 형성되어 공정 효율이 저하될 수 있다. 특히 스포듀민 정광은 산지에 따라 함유된 맥석의 종류와 함량이 상이하므로, 정광의 광물학적 특성이 스포듀민 상변태 및 고온 융착 거동에 미치는 영향을 이해할 필요가 있다. 본 연구에서는 산지가 서로 다른 스포듀민 정광을 대상으로, 정광 내 맥석의 종류 및 함량에 따른 스포듀민 상변태와 클링커 및 융착물 형성 거동의 차이를 비교하였다. 각 스포듀민 정광을 펠릿으로 제조한 후 대기 분위기의 수직관상로에서 열처리하였다. 스포듀민 상변태 거동을 평가하기 위해 900–1100 ℃ 범위에서 50 ℃ 간격으로, 클링커와 융착물 형성 거동을 평가하기 위해 1100–1300 ℃ 범위에서 100 ℃ 간격으로 각각 30분간 열처리하였다. 열처리 후 시료의 결정상 변화와 미세조직 분석을 위해 XRD와 SEM 분석을 활용하였다. 정광 내 운모 함량이 높은 시료의 경우 1000 ℃에서 α-스포듀민의 95% 이상이 γ- 또는 β-스포듀민으로 전환된 반면, 상대적으로 운모 함량이 낮은 정광에서는 동일 온도에서도 미반응 α-스포듀민이 잔존하였다. 한편, 미세조직 분석 결과 운모 함량이 높은 정광에서는 1000 ℃ 부근부터 운모의 분해와 함께 형성된 유리상이 스포듀민 입자 사이에 분포하면서 입자 간 응집이 발생하였으며, 이러한 현상은 열처리 온도가 증가함에 따라 더욱 뚜렷하게 나타났다. 따라서 스포듀민 정광 내 맥석의 종류와 함량은 α-스포듀민의 상변태와 고온 융착물 형성에 큰 영향을 미치며, 안정적인 하소 조업을 위해서는 스포듀민 정광의 광물학적 특성을 고려한 공정 조건 최적화가 필요하다.

[이차전지2-3 | 10:00]

H2S 첨가 및 임펠러 교반을 통한 니켈 카보닐화 반응 촉진: 전상현, 김영재*(인하대학교)

Keywords: 니켈 카보닐화, 몬드 프로세스, 임펠러 교반, H2S

니켈 카보닐화 반응은 금속 니켈을 일산화탄소(CO)와 반응시켜 휘발성 니켈 카보닐(Ni(CO)4)을 형성하는 반응으로, 니켈의 선택적 분리 및 고순도 정련에 활용될 수 있다. 그러나 카보닐화 반응은 니켈의 표면 상태에 크게 영향을 받으며, 특히 펠렛과 같이 비표면적이 작은 원료에서는 높은 전환율을 얻기 위해 장시간의 반응이 요구된다. 또한 선행 연구에서 가장 높은 전환율을 나타낸 70 bar, 443 K 조건에서는 생성된 Ni(CO)4가 액상으로 존재할 수 있으며, 액상 니켈 카보닐이 금속 표면에 잔류할 경우 CO와의 접촉을 저해할 가능성이 있다. 따라서 니켈 카보닐화 반응의 효율을 향상시키기 위해서는 니켈 표면의 활성화와 반응기 내 물질전달 개선을 병행할 필요가 있다. 본 연구에서는 니켈 카보닐화 반응의 촉진을 위하여 H2S 첨가와 임펠러 교반의 영향을 조사하였다. CO중 H2S 분율을 변화시키며 카보닐화 반응성을 비교하여 반응 촉진에 유효한 첨가 범위를 평가하였으며, 임펠러 회전속도에 따른 전환율 개선을 확인하였다. 또한 H2S에 의한 니켈 카보닐화 촉진 기구를 고찰하였다.

[이차전지3-1 | 10:25]

POSCO Holdings Black Alloy 기반 Li 선침출을 통한 Ni 용매추출 생략형 리사이클링 습식 공정 개발: 박준용*, 허세권, 송시정, 박상혁, 이상혜, 조용민, 한상우, 김완이*(포스코홀딩스)

Keywords: 폐리튬이온전지, Black Alloy, Li 선침출, 습식 제련

폐리튬이온전지(LiB) 리사이클링의 기존 습식 공정은 침출액 내 Li과 Ni·Co·Mn이 함께 용해되어 존재하므로, 유가금속 회수와 Li 분리를 위한 용매추출(solvent extraction) 공정이 필수적으로 요구되었다. 그러나 이는 다량의 폐수 발생과 설비 투자비·운전비 상승의 주요 원인으로 지적되어 왔으며, 특히 NCM계 배터리는 Ni 함량이 높아 전체 용매추출 부하 중 Ni 추출이 차지하는 비중

이 다른 유가금속에 비해 월등히 크다. 따라서 Ni 용매추출 공정의 생략은 공정 단순화와 원가 절감 측면에서 큰 경제적 이점을 기대할 수 있으나, 이를 위해서는 Ni stream으로의 Li 유입을 원천적으로 차단하는 Li 선침출 기술 확보가 선결 과제이다. 본 연구에서는 NCM622 폐배터리를 전처리·파쇄한 후 환원 열처리를 적용하여 Black Alloy를 제조하였다. 제조된 Black Alloy는 Ni, Co, Mn, Cu가 합금상으로 존재하는 반면 Li은 합금상에 고용되지 않고 산화물 형태로 잔존하며, 이러한 상(相) 분리 거동을 활용하여 98% 이상의 Li 침출율을 확보함과 동시에 Ni stream으로의 Li 유입을 효과적으로 억제할 수 있었다. 본 연구팀은 이러한 특성을 기반으로 Ni 용매추출 공정이 생략된 신규 습식 공정을 개발 중이며, 본 공정은 Li 회수율 향상과 원가 경쟁력 확보를 동시에 달성할 수 있는 실용적 대안으로 판단된다.

[이차전지3-2 | 10:40]

용매추출 믹서-세틀러 공정 내 이온 교환 및 추출 반응 수치해석 모델링: 김나영(국립부경대학교 융합소재공학부 금속공학전공), 김병준, 송시정, 한상우, 김완이(포스코홀딩스 미래기술연구원), 조성묵*(국립부경대학교 융합소재공학부 금속공학전공)

Keywords: 리튬이온 배터리, 리사이클링, 습식정제, 용매추출, 이온교환, 수치해석

믹서-세틀러 공정은 리튬이온 배터리 리사이클링을 위한 대표적인 습식정제 용매추출 공정으로 수상인 침출액 내 유가금속 이온을 유기상인 추출제로 선택적 분리 및 회수한다. 믹서-세틀러의 믹서 영역에서는 임펠러 회전에 의해 수상과 유기상을 혼합하여 액적 상태로 분산시켜, 보다 넓은 계면에서의 이온 교환 반응을 통해서 유가 금속 추출 현상을 발생시킨다. 이후 세틀러 영역에서는 수상과 유기상의 밀도 차이에 의해 상 분리 현상이 진행되며, 이를 통해서 유기상으로 추출된 유가 금속 이온을 회수한다. 본 연구에서는 용매추출 믹서-세틀러 내 이온교환 및 추출 반응을 정량적으로 해석하기 위해서 수상-유기상-공기상을 고려한 다상유동 모델과 상간 계면에서의 이온 교환 반응 모델을 커플링하여 계산을 하였고, 이를 통해서 믹서-세틀러 공정 내 이온 농도 분포 및 이에 대한 시계열 변화를 분석함으로써 공정내 유가 금속 추출 거동을 정량적으로 고찰하였다.

[이차전지3-3 | 10:55]

EoL LIB 황산 침출액 중 유가금속 일괄 전해 회수를 위한 공정 연구: 하류, 신한균, 강영조*(동아대학교), 류지훈(에바싸이클)

Keywords: 리튬이온배터리, 폐배터리 재활용, 유가금속 회수, 황산침출, 전해환원

전기 자동차 시장의 폭발적인 성장으로 리튬 이온 배터리 (LIB) 의 생산량이 크게 증가하면서 공정 스크랩이나 End-of-Life (EoL) 배터리에서 유가금속을 효과적으로 회수하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 폐 LIB의 황산 침출 후 침출액 내 Ni, Co, Mn 등 유가금속을 용매추출을 통해 분리할 수 있는데, 각 원소에 적합한 용매가 개별적으로 사용해야하므로 공정 단계가 복잡하고 다량의 폐수가 발생한다. 이에 본 연구는 황산 침출액 내 유가금속을 전해환원 방식으로 회수하고자 하였다. 특히 전해환원 과정에서 형성되는 금속 증착물이 다양한 형태로 회수될 수 있는데, 이러한 물리적 형태 차이는 음극판으로부터의 탈착 공정을 단순화할 수 있을 뿐만 아니라 후속 황산 재용해 공정에서의 금속 용해 효율과 선택적 분리 가능성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 공정 조건에 따라 증착물의 구조적 특성과 물리적 형태를 제어하고, 이를 통해 합금 회수 효율과 재용해 효율을 동시에 극대화할 수 있는 공정을 최적화하고자 하였다.

[이차전지4-1 | 11:15]

폐배터리 유래 폐흑연의 고순도화를 위한 재생에 대한 연구: 김기현, 류철희, 안낙균, 박경수*(고등기술연구원 융합소재연구센터)

Keywords: 폐흑연, 알칼리 배소, 열적 활성화, 리튬이온전지 재활용, 흑연 구조 재생

습식제련 침출 잔사로부터 회수된 폐흑연(spent graphite)은 Al_2O_3, SiO_2, WO_3 및 ZrO_2와 같은 난용성 산화물 불순물을 다량 함유하고 있으며, 이는 전기화학적 충·방전 과정에서 심각한 결함을 유발한다. 그럼에도 불구하고 폐흑연은 리튬이온전지(LIB) 재활용 공정에서 가장 충분히 연구되지 않은 원소재 중 하나로 남아있다. 기존 재생 기술은 강한 불소계 처리, 고온 흑연화 또는 장시간의 산 처리에 의존하고 있어, 이처럼 오염도가 높은 폐흑연을 대상으로 불소를 사용하지 않으면서 흑연화 온도 이하에서 수행 가능한 단순화된 재생 공정에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 알칼리 배소와 단계적 침출, 그리고 이후 고온 열화학적 활성화로 구성된 2단계 재생 전략을 제안하였다. 배소 공정에서는 고상에서 액상으로의 플럭스 전이가 발생하여 Al_2O_3와 SiO_2가 각각 수용성 $NaAlO_2$와 Na_2SiO_3로 전환되는 반응이 촉진되었다. 고온 열처리 단계는 두 가지 기능이 동시에 발현하였다. 첫째, 흑연 내부에 포획되어 있던 난용성 불순물의 열유도 이동을 촉진하여 이들을 표면에서 접근 가능한 위치로 이동시켰다. 이후 이러한 불순물들은 산에 용해 가능한 다원소 화합물로 소결되었다. 둘째, 격자 공공(vacancy)의 치유와 산소 함유 작용기의 제거가 동시에 진행되면서 흑연 결정구조가 회복되었다. 최적 조건에서 제조된 시료는 회분 함량 0.08 wt%, Al 및 Si 농도 각각 2.7 ppm과 8.9 ppm을 달성하였으며, W 제거율은 95% 이상이었다. 구조 분석 결과, d_{002}는 3.3534 Å로 나타나 천연 흑연의 이론적 층간거리인 3.354 Å에 매우 근접하였으며, I_D/I_G 비는 0.22로 감소하였다. 또한 X선 광전자 분광법(XPS) 분석에서는 π–π^* 위성 피크의 회복이 확인되었다. 이러한 결과는 배소와 열화학적 활성화를 통한 폐기물 유래 흑연의 열적 전환이, 산업 폐기물로부터 자원을 회수하고 이를 배터리급 음극재로 재제조(remanufacturing)하기 위한 효과적인 경로가 될 수 있음을 보여준다.

[이차전지4-2 | 11:30]

Designing SiO_x/Graphite Composite Anodes for High Performance and Stability through Electrochemo-Mechanical Modeling: YEJIN KANG, Seungsoo Jang, Hyunjin Kim, Sunghyun Park, Kang Taek Lee*(KAIST)

Keywords: 3D multiphysics simulation, Composite anode, Lithium-ion battery

SiO_x/graphite composite anodes offer a promising pathway toward high-energy-density lithium-ion batteries, yet their performance is

governed by a complex interplay between SiO_x content and electrode porosity. Increasing the SiO_x fraction can enhance capacity but simultaneously intensifies volume expansion, transport limitations, and mechanical stress, while increasing porosity improves ionic transport and provides additional space for expansion at the expense of active-material loading. Here, we establish a 3D microstructure-resolved digital twin framework to systematically elucidate the coupled effects of these two key design parameters on the electrochemical and mechanical behavior of SiO_x/graphite composite anodes. Our analysis reveals that neither higher SiO_x content nor greater porosity monotonically improves electrode performance. Instead, the optimal SiO_x content shifts with electrode porosity, reflecting competing contributions from active-material utilization, ion-transport heterogeneity, volumetric expansion, and stress accumulation. This interplay gives rise to distinct composition–porosity combinations that balance electrochemical performance and mechanical stability. We further examine the role of separator mechanical properties in mitigating interfacial stress for the optimized electrode configuration. These findings establish a mechanistic composition–microstructure–performance relationship and provide rational design principles for optimizing SiO_x/graphite composite anodes beyond conventional single-parameter optimization.

[이차전지4-3 | 11:45]

단일 Li_2CO_3 용융염 전해를 이용한 폐 이차전지로부터의 친환경 리튬 분리 회수: 고의준(한국생산기술연구원 국가희소금속센터, 고려대학교), 권남훈(한국생산기술연구원 국가희소금속센터), 오승주(고려대학교), 박경태, 신재홍*(한국생산기술연구원 국가희소금속센터)

Keywords: 이차전지, 리튬이온베터리, 건식재활용, 용융염전해

본 연구에서는 폐 이차전지 양극재로부터 리튬을 선택적으로 선 분리·회수하기 위해 고온 Li_2CO_3 단일상 용융염 전해(Molten Carbonate Electrolysis, MCE) 공정을 진행하였다. 기존 습식제련 기반 폐 이차전지 재활용 공정은 리튬이 최종 단계에서 회수됨에 따라 다단계 공정이 요구되며, 산성 폐수 및 부산물 발생에 따른 환경적·경제적 문제가 존재한다. 이에 본 연구에서는 물과 산 침출 공정을 사용하지 않고 폐 NCM 양극재로부터 리튬을 우선적으로 Li_2CO_3 전해질에 농축·분리하는 직접 용융염 전해 공정을 적용하였으며, 전기화학적 및 열역학적 분석을 통해 반응 거동과 환원 메커니즘을 고찰하였다. 용융염 전해 공정은 폐 NCM 분말을 펠릿 형태로 제조한 후 Ar 분위기에서 500 ºC로 소결하여 음극으로 사용하였으며, 99.9% 순도의 Li_2CO_3를 전해질로 적용하였다. 전해질의 고온 분해를 억제하기 위해 CO_2 분위기를 1 atm으로 유지하였다. Cyclic Voltammetry(CV), Chronoamperometry 및 Tafel 분석을 통해 NCM 구성 금속의 단계별 환원 거동과 적정 전위 범위를 평가하였으며, X-ray Diffraction(XRD), Field Emission Scanning Electron Microscopy(FE-SEM) 및 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy(ICP-OES) 분석을 통해 전해 전·후 생성물의 결정상 및 조성 변화를 분석하였다. 전기화학적 분석 결과 Ni 및 Co 산화물이 우선 환원되었으며, Mn계 복합산화물은 상대적으로 높은 전위에서 단계적으로 환원되었다. -2.5 V 조건에서 NCM 내 리튬 함량이 약 97% 감소하여 약 96%의 리튬 회수효율을 확보하였으며, 회수된 Li_2CO_3는 약 99.9%의 순도를 나타내었다. 반면 -3.5 V에서는 Mn의 완전 환원과 Li 전착이 진행되었으나 전해질 분해가 발생하였다. 이를 통해 Li_2CO_3 단일상 용융염 전해 공정의 고순도 리튬 선 분리·회수 가능성을 확인하였다.

비철금속
Room 2층 205호, 10월 29일

[비철1-1 | 13:30]

황화리튬 제조를 위한 황산리튬의 수소환원 반응 거동 및 반응속도론적 연구: 이소영, 유장욱, 최범모(서울대학교), 이상민(포스코홀딩스), 강정신*(서울대학교)

Keywords: Kinetics, Lithium sulfate, Lithium sulfide, Hydrogen reduction, Autocatalysis, Nucleation and growth

황산리튬 (Li_2SO_4)의 수소 (H_2) 환원은 황화물계 고체전해질의 핵심 원료인 황화리튬 (Li_2S)을 제조하기 위한 친환경적 공정으로 주목받고 있다. 본 연구에서는 Li_2SO_4의 H_2 환원에 의한 Li_2S 생성 과정에서 나타나는 반응 및 상변화 거동을 규명하고, 이에 따른 반응속도 특성을 해석하고자 하였다. 이를 위해 1023 – 1123 K에서 10 % H_2 – Ar 혼합가스를 사용하여 Li_2SO_4의 H_2 환원을 수행하였으며, 반응의 진행에 따른 상변화 거동과 전환율 – 시간 곡선을 조사하였다. 반응이 진행됨에 따라 미반응 Li_2SO_4와 생성된 Li_2S의 조성 변화에 수반하여 용융이 관찰되었다. 또한 반응 온도가 증가함에 따라 반응 속도가 증가하였고, 전환율 – 시간 곡선의 형태는 온도에 따라 상이하게 나타났다. 전환율 – 시간 곡선을 자가촉매 반응속도식과 핵생성 및 성장 반응속도식을 이용하여 해석한 결과 1073 – 1123 K에서는 Li_2S 생성 및 축적에 따라 반응속도가 증가하는 자가촉매적 거동이 나타난 반면 1023 K에서는 이러한 반응 가속이 뚜렷하게 관찰되지 않았다. 또한 1073 K와 1123 K에서 Li_2SO_4에 Li_2S를 초기에 첨가한 경우 반응속도가 크게 증가하여 생성된 Li_2S가 이후의 환원반응을 촉진하는 자가촉매적 거동을 뒷받침하였다. 한편, 1023 K에서는 핵생성과 성장 모델이 주된 반응 메커니즘으로 작용하였으며, 미세조직 관찰로부터 핵생성과 성장 거동을 확인하였다. 이러한 결과는 Li_2SO_4의 H_2 환원 반응에 의한 Li_2S 생성반응의 온도 의존적 거동을 이해하는데 기여할 것으로 기대된다.

[비철1-2 | 13:45]

Saponification-Controlled Sequential Solvent Extraction for Nickel Purification and Recovery from NCM Leaching Solutions: Burhan Febrinawarta(Korea National Institute of Rare Metals, Korea Institute of Industrial Technology, Convergence Manufacturing System Engineering, KITECH School, University of Science and Technology), Myungsuk Kim(Korea National Institute of Rare Metals, Korea Institute of Industrial Technology, Department of Materials Science and Engineering, Korea University), Kyoung-Tae Park, Jae Hong Shin*(Korea National Institute of Rare Metals, Korea Institute of Industrial Technology, Convergence Manufacturing System Engineering, KITECH School, University of Science and Technology)

Keywords: Nickel recovery, NCM leaching solution, solvent extraction, saponification, sequential extraction

Nickel is a key component of battery cathode materials, and its efficient recovery from multicomponent leaching solutions is essential for sustainable battery recycling. Solvent extraction is widely used for the separation and recovery of metals; however, selective nickel recovery from complex solutions requires careful control of extraction conditions. For acidic extractants such as Cyanex 272, extraction behavior is strongly influenced by extractant concentration, saponification degree, equilibrium pH, and organic-to-aqueous (O/A) phase ratio. Controlling these parameters is therefore essential to promote impurity removal while minimizing nickel co-extraction. This study develops a sequential solvent extraction process for nickel recovery from a simulated NCM leaching solution containing nickel, cobalt, and manganese. Cyanex 272 was first evaluated at different extractant concentrations to determine a suitable operating concentration, followed by an investigation of saponification degree to regulate its extraction strength and identify conditions for selective impurity removal. The organic-to-aqueous phase ratio was subsequently optimized to improve cobalt and manganese extraction while retaining nickel in the aqueous phase. The resulting nickel-rich raffinate was then subjected to a second Cyanex 272 extraction stage under controlled saponification conditions to further reduce the remaining impurities while minimizing Ni loss. The purified nickel-rich raffinate was then subjected to a third extraction stage using Versatic Acid 10 for nickel recovery, followed by sulfuric acid stripping of the loaded organic phase to produce a nickel-rich aqueous solution. The results demonstrate that controlling saponification provides an effective means of regulating the extraction strength of Cyanex 272, enabling sequential removal of cobalt and manganese while limiting nickel loss. The subsequent Versatic Acid 10 extraction and sulfuric acid stripping provide a route for recovering nickel from the purified raffinate. Overall, the proposed sequential solvent extraction process provides a practical approach for controlled nickel purification and recovery from NCM-related leaching solutions.

[비철1-3 | 14:00]

Selective Separation of Zirconium from Hafnium Using a Synergistic Cyanex 272–TBP Solvent Extraction System : Haroon Kamal, Jae Hong Shin(Korea Institute of Industrial Technology, University of Science and Technology), Dong-Hyun Kim(Korea Institute of Industrial Technology), Kyoung-Tae Park*(Korea Institute of Industrial Technology, University of Science and Technology)

Keywords: Solvent Extraction, Cyanex-272, Tributyl phosphate, Zirconium, Hafnium

The selective separation of zirconium (Zr) from hafnium (Hf) remains one of the most challenging processes in hydrometallurgy due to the nearly identical physical and chemical properties and closely related ionic characteristics of these two elements. Zirconium and

Hafnium commonly occur together in nature in the form of Zircon ($ZrSiO_4$) and baddeleyite (ZrO_2), with hafnium typically ranging from 0.5 to 3 wt.%. They are broadly used in the chemical, aerospace, advanced materials, military, and nuclear industries for their superior mechanical strength, outstanding corrosion resistance, favorable physicochemical properties, and high melting points. The production of nuclear grade zirconium requires the efficient removal of hafnium, because Zr based alloys are broadly utilized as fuel cladding and structural materials in water cooled nuclear reactors. On the other hand, Hafnium possesses a thermal neutron absorption cross section approximately 600 to 640 times greater than that of zirconium which can adversely affect reactor performance. Due to their remarkably similar physicochemical properties and chemical behavior the separation of zirconium from hafnium is very difficult. Therefore, in this study, a synergistic solvent extraction system composed of Cyanex 272, and tributyl phosphate (TBP) diluted in kerosene is being investigated for the selective extraction and separation of zirconium from nitric acid media. Zirconyl chloride octahydrate is being used as the feed material for preparing the aqueous phase, and batch solvent extraction experiments are being conducted. The research focuses on systematically evaluating the influence of important operational parameters, including contact time, nitric acid concentration, Cyanex-272 concentration, and TBP concentration, to determine the optimum extraction conditions for efficient zirconium separation. The synergistic interaction between Cyanex-272, which acts as an acidic cation-exchange extractant, and TBP, functioning as a neutral solvating agent, is being examined to understand its role in enhancing the extraction behavior and stabilization of zirconium nitrato complexes in the organic phase. In summary, the optimal extraction conditions identified in this work are discussed in relation to their influence on zirconium extraction, zirconium and hafnium separation, and the achievement of high selectivity toward zirconium under moderate nitric acid conditions. Furthermore, the application of a synergistic extractant system offers a promising alternative to conventional zirconium purification routes by potentially reducing process complexity while maintaining high selectivity. The results provide a basis for the development of an efficient and practical solvent extraction process for zirconium purification.

[비철1-4 | 14:15]

사이클론 전해 시스템 연계 LFP 순환 침출을 통한 리튬 고농축 및 분리 공정 최적화: 이현준(과학기술연합대학원대학교, 한국지질자원연구원), 최영중, 이현주(한국지질자원연구원), 한승훈, 김수경*(과학기술연합대학원대학교, 한국지질자원연구원)

Keywords: LFP 배터리, 사이클론전해, 순환공정, 리튬 추출, 분리정제

전 세계적인 전기자동차 및 에너지저장장치(ESS) 시장의 확대에 따라 폐 리튬인산철(LFP) 배터리의 재활용 및 유가금속 회수 기술의 중요성이 급증하고 있다. 기존의 LFP 습식 제련 공정은 침출액 내 리튬(Li)의 농도가 상대적으로 낮아 후속 침전 및 회수 단계에서 다량의 화학 약품 소비와 폐수 발생을 야기하는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하고자 사이클론 전해 시스템과 침출액의 다단 순환 침출(Recirculation Leaching) 공정을 연계하여, 침출액 내 리튬의 고농축 및 철(Fe) 등 불순물의 선택적 분리·정제 공정을 최적화하였다. LFP 양극재 분말을 대상으로 초기 침출을 수행한 후, 얻어진 침출액을 2차 및 3차 침출 공정에 재사용하는 순환 침출을 적용하여 리튬 농도 농축이 가능하였다. 이 과정에서 순환 횟수가 증가함에 따라 침출액 내 함께 축적되는 불순물 성분을 제어하기 위해 고속 유체 순환과 음극 표면 전류 밀도 극대화가 가능한 사이클론 전해조를 연계하였다. 사이클론 전해 시스템의 인가 전압 및 전위 제어를 통해 침출액 내 유가금속 및 불순물의 전기화학적 회수·분리 거동을 평가하였으며, 공정 조건 최적화를 통해 리튬의 손실을 최소화하면서 불순물 선택적 제어 효과 증진이 가능함을 확인하였다. 본 연구 결과는 LFP 침출 공정의 용매 사용량과 폐수 발생을 크게 줄임과 동시에, 사이클론 전해 기술을 활용한 고순도·고농축 리튬 회수 공정의 산업적 적용 가능성을 제시한다.

[비철2-1 | 14:35]

Cu–Ni–Si-Co 합금의 시효 거동에 미치는 Pre-aging 효과: 황지인, 정일석, 최은애*, 한승전*(한국재료연구원)

Keywords: Cu-Ni-Si alloys, Aging behavior, Pre-aging, Precipitation hardening

본 연구에서는 고강도와 고전도성이 동시에 요구되는 리드 프레임 및 커넥터용 Cu–Ni–Si-Co 합금의 시효 거동에 미치는 pre-aging 효과를 조사하였다. Cu–Ni–Si계 합금에서 Co 첨가는 Ni_2Si 내 Ni 원자를 치환하여 $(Ni, Co)_2Si$ 석출상을 안정화하고 석출물의 조대화를 억제함으로써 강도 향상에 기여한다. 그러나, Co 첨가에 따라 Cu 기지와 석출물 사이의 계면에너지 및 석출 활성화 에너지가 증가하여 석출 반응이 지연될 수 있다. 이에 본 연구에서는 느린 석출 반응을 보완하기 위해 고온 단시간 pre-aging을 도입하고, 이후 압연 및 후속 시효에 따른 경도와 전기전도도의 변화를 분석하였다. 단일 시효 공정에서는 500 ºC 이하의 온도에서 경도와 전기전도도의 증가 속도가 느렸으며, 시효 시간을 증가시켜도 물성 향상 폭이 크지 않았다. 반면, 고온 단시간 pre-aging을 적용한 경우, 짧은 열처리 시간에도 뚜렷한 경도 증가가 나타났다. 이후 압연 및 후속 시효를 적용함에 따라 단일 시효 공정과 상이한 경화 거동을 나타냈으며, 이는 pre-aging과 가공 공정의 조합 및 순서가 후속 시효 거동에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

[비철2-2 | 14:50]

Mn첨가가 Cu-Ni-Si 합금의 불연속 석출물 형성에 미치는 영향: 정현우, 신지용(한국재료연구원, 부산대학교), 정일석, 최은애(한국재료연구원), 권세훈(부산대학교), 한승전*(한국재료연구원)

Keywords: Cu–Ni–Si 합금, 불연속 석출물, 연속 석출물, Ni_2Si, 내연화성

Cu–Ni–Si 합금은 시효 과정에서 결정립 내부에 형성되는 미세한 Ni_2Si 석출물에 의해 높은 강도를 확보할 수 있다. 그러나 시효

시간이 증가함에 따라 결정립계에서 불연속 석출물(discontinuous precipitate, DP)이 생성 및 성장한다. 이러한 DP의 성장은 결정립 내부의 연속 석출물(continuous precipitate, CP)에 필요한 용질 원소를 소모해 강도 저하를 유발한다. 본 연구에서는 결정립계에 형성된 DP를 억제하고, 장시간 시효에 따른 기계적 특성 저하를 완화하고자 하였다. 따라서 Cu–5Ni–1.17Si 합금에 Mn을 첨가하고, Mn 함량에 따른 석출 거동과 기계적 특성의 변화를 분석하였다. 합금은 980 ºC에서 8시간 용체화 처리하고, 500 ºC에서 다양한 시간 동안 시효처리하였다. 미세조직 분석 결과, Mn 함량이 증가함에 따라 결정립계에서 DP의 생성 및 성장이 억제되었고, 장시간 시효에서도 DP의 성장이 제한되었다. 이러한 석출 거동의 변화로 Mn 첨가 합금은 높은 강도를 나타냈을 뿐만 아니라, 장시간 시효 후에도 강도 감소가 완화되는 특성을 보였다. 이는 Mn 첨가를 통한 불연속 석출 거동의 제어가 Cu–Ni–Si 합금의 강도와 내연화성을 동시에 향상시키는 데 효과적임을 보여준다.

[비철2-3 | 15:05]

통전 처리에 따른 Cu-Ni-Si 합금의 연속 석출 거동 가속화 분석: 정의화(경상국립대학교), 김규낙(경상국립대학교, 한국재료연구원), 김가은(경상국립대학교), 최동인(서울대학교), 안지혁(한국재료연구원), 한흥남(서울대학교), 강성규*(경상국립대학교)

Keywords: Cu-Ni-Si 합금, 통전처리, 연속 석출, 시효, 석출강화, 석출 속도론

통전처리(Electric Current Treatment, ECT)는 확산, 석출, 상변태 속도론을 가속함으로써 금속 및 합금의 미세조직을 제어할 수 있는 효과적인 방법으로 주목받고 있다. 그러나 전류에 의한 석출 가속 현상이 다수 보고되었음에도 불구하고, 전류 인가가 유발하는 활성화 에너지 감소량은 아직 정량적으로 규명되지 않았다. 본 연구에서는 Cu–4.5Ni–0.95Si (wt%) 합금의 연속 석출(continuous precipitation, CP) 거동에 ECT가 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 전류 고유의 효과를 줄 발열(Joule heating)에 의한 온도 효과와 분리하기 위하여, 시편의 단면 형상을 조절하여 전류밀도를 85–90 A/mm^{2}로 일정하게 유지하면서 정상상태 온도를 각각 500, 525, 550 ºC로 독립적으로 제어하였다. 석출 분율은 전기전도도 측정을 통해 정량화하였으며, Johnson–Mehl–Avrami–Kolmogorov(JMAK) 모델을 이용하여 해석하였다. 이어 Arrhenius 분석을 통해 연속 석출에 대한 겉보기 활성화 에너지를 산출하였다. 그 결과, ECT 조건에서 연속 석출의 겉보기 활성화 에너지는 51.8 ± 13.4 kJ/mol로 나타났으며, 이는 통상적인 열처리 대비 약 50% 감소한 값이다. 이처럼 낮아진 속도론적 장벽은 연속 석출 속도의 뚜렷한 가속을 유발하였고, 동일한 열적 조건에서 Cu 기지로부터의 용질 고갈을 더욱 빠르게 진행시켰다. 본 연구는 전류가 Cu–Ni–Si 합금의 연속 석출을 지배하는 활성화 에너지를 유의하게 낮춘다는 정량적 증거를 제시한다. 나아가 전류 가속 석출 거동을 평가하기 위한 분석 틀을 확립하고, 석출강화 구리 합금의 미세조직 제어 수단으로서 ECT의 활용 가능성을 입증하였다.

[비철2-4 | 15:20]

조성 및 시효 조건에 따른 Cu-Ni-Si 합금의 불연속 석출 거동: 장정아(경상국립대학교), 김규낙(경상국립대학교, 한국재료연구원), 안지혁(한국재료연구원), 강성규*(경상국립대학교)

Keywords: Cu-Ni-Si 합금, 불연속 석출, 석출 동역학, 활성화 에너지

Cu-Ni-Si 합금은 고강도·고전도 구리 합금으로 널리 사용되며, 시효 과정에서 δ-Ni_2Si 석출물이 연속 석출(continuous precipitation, CP) 및 불연속 석출(discontinuous precipitation, DP) 두 경로를 통해 형성된다. 그러나 합금 조성이 DP의 석출 속도와 성장 메커니즘에 미치는 영향은 아직 충분히 이해되지 않았다. 본 연구에서는 서로 다른 용질 함량을 갖는 두 Cu-Ni-Si 합금, Cu-4.5Ni-0.95Si(C45NS)와 Cu-6.0Ni-1.26Si(C60NS)의 시효 온도와 시간에 따른 DP 거동을 체계적으로 조사하였다. 시편을 용체화 처리한 후 773, 798, 823 K의 세 온도에서 시효하였으며, 이에 따른 미세조직, 경도 및 전기전도도의 변화를 평가하였다. 나아가 Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov(JMAK) 모델과 Arrhenius 분석을 통해 DP 성장 동역학을 정량적으로 분석하였다. 두 합금은 조성에 따라 뚜렷하게 상이한 DP 동역학을 보여 Avrami 지수와 활성화 에너지가 합금 조성에 따라 크게 달라졌다. 이러한 차이는 DP의 동역학과 활성화 에너지가 조성에 의존적으로 변화하며, DP를 지배하는 우세 확산 메커니즘 역시 조성에 따라 달라짐을 시사한다. 이러한 조성 의존적 DP 거동은 Cu-Ni-Si 합금에서 강도와 전기전도도의 균형을 달성하기 위한 시효 조건을 설계하는 데 중요한 기초 자료를 제공한다.

[비철3-1 | 15:40]

저압 산화 및 오일 코팅을 이용한 구리의 내식성 향상: 최문수, 신지용, 최은애, 한승전*(한국재료연구원)

Keywords: Copper, Corrosion resistance, Copper oxide layer, Interface

본 연구는 구리의 내식성 향상을 위해 저기압 하에서 인탈산동 C1220을 산화시켜 표면에 치밀한 산화층을 형성시켰다. 이렇게 형성된 산화층은 지방산과 결합을 잘한다고 알려져 있다. 산화 처리된 C1220에 지방산이 포함된 기름을 각각 도포한 후 가열처리를 실시하였으며, 오일 코팅이 산화된 C1220의 내식성에 미치는 영향을 평가하였다. 980 ºC에서 저압 산화를 수행한 결과, 대기압 산화와는 달리 모든 시편의 구리 기판 표면에서 약 10 μm 크기의 입자로 구성된 Cu_2O 산화막이 성장하였다. 카놀라유, 라드유, 실리콘 오일을 도포하고 150 ºC에서 열처리를 수행한 결과, 시편 표면의 색상 변화가 관찰되었다. 또한 염수분무시험을 통해 내식성을 확인하였다. 이러한 결과는 저압 산화를 통해 조대한 Cu_2O 결정립으로 구성된 치밀한 산화층이 형성되며, 해당 산화층이 구리 기판과 우수한 계면 결합성을 갖는 것을 보여준다. 또한 오일 코팅 후 나타난 표면 색의 변화는 기판과 오일 성분 사이의 화학적 상호작용이 발생했을 가능성을 시사한다. 또한, 염수분무 실험을 통해 산화층의 내식성에 미치는 오일의 영향에 대해 탐구하였다.

[비철3-2 | 15:55]

In-situ 대기 산화를 통한 Cu-Ti/Cu-TiO2 복합재의 제조 및 특성: 문하영(한국재료연구원, 과학기술연합대학원대학교), 황지인, 정현우, 한승전*(한국재료연구원), 최은애*(한국재료연구원, 과학기술연합대학원대학교)

Keywords: Cu–Ti alloy, internal oxidation, oxide-dispersion strengthening, core-layer composite, electrical conductivity

기존의 산화물 분산 강화(Oxide-Dispersion-Strengthened, ODS) 구리 합금은 주로 분말 야금법을 통해 제조되어 공정이 복잡하고 산화물 입자의 응집 현상이 발생하기 쉽다는 한계가 있었다. 본 연구에서는 분말 야금을 대체한 새로운 접근법으로, 냉간 인발된 Cu–Ti 합금을 비롯하여 여기에 미량의 Fe 또는 Cr이 첨가된 합금 와이어 대기 중에서 벌크 내부 산화(internal oxidation)시켜 Cu–Ti/Cu–TiO_2 core-layer 복합재를 제조하였다. 미세조직 분석 결과, 내부 산화 공정을 통해 산화되지 않은 Cu–Ti 합금 코어와 TiO_2가 분산된 외곽의 ODS 층이 뚜렷한 동심원 형태의 core–layer 구조를 이루는 것이 확인되었다. ODS 층 내부에는 결정립계를 따라 서브마이크론 크기의 Ti-rich 산화물과 결정립 내부에 나노 크기의 rutile TiO_2 입자가 분포하였다. 산화 시간이 증가함에 따라 ODS 층의 면적 분율이 증가하여 복합재 전체의 전기 전도도가 향상되었다. 한편, 내부의 코어 영역은 우수한 기계적 강도를 유지하였다. 미량의 Fe 및 Cr 첨가는 코어 영역의 경도와 인장 강도를 추가로 향상시켰고, 특히 Cu–Ti–Cr 합금에서 1 시간 산화한 경우 600 MPa의 인장 강도를 나타내었다.

[비철3-3 | 16:10]

사용후핵연료 처분용기용 무산소동 용접부의 부식 거동 및 표면막 특성: 고신범(한국재료연구원, 국립부경대학교), 이윤주, 김정민, 송상우(한국재료연구원), 노상훈(국립부경대학교), 김승현*(한국재료연구원)

Keywords: Oxygen-free copper, Deep gelogical disposal, Canister, Corrosion, Electrochemistry, Friction stir welding, Electron beam welding, Sulfide film

사용후핵연료 심층처분용 구리 처분용기는 장기간에 걸친 부식 건전성이 요구되며, 무산소동은 우수한 내식성과 열적 안정성으로 인해 처분용기 외피 후보 소재로 고려되고 있다. 처분 환경은 폐쇄 후 산소가 점차 소모되어 무산소 상태로 전이될 수 있으며, 지하수에 존재하는 황화물과 염화물은 구리의 계면 반응 및 부식생성물 형성에 영향을 줄 수 있다. 또한 처분용기 밀봉에 적용되는 마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)과 전자빔용접(Electron Beam Welding, EBW)은 서로 다른 열적·기계적 이력으로 인해 상이한 용접 미세조직을 형성하므로, 이에 따른 부식 거동과 표면막 형성 특성을 비교할 필요가 있다. 본 연구에서는 두께 12 mm의 ASTM C10100 무산소동에 FSW와 EBW를 적용하고, 모재(BM), FSW 교반부(FSW-SZ) 및 EBW 용융부(EBW-FZ)의 미세조직과 부식 거동을 비교하였다. 미세조직은 광학현미경과 전자후방산란회절법으로 분석하였다. 전기화학 시험은 산소 농도 20 ppm 미만으로 유지되는 Ar 분위기의 글러브박스에서 pH 약 8.2의 붕산염 완충용액을 사용하여 수행하였다. 기준 용액은 5×10^{-5} M Na_2S + 0.1 M NaCl로 설정하였으며, 황화물 또는 염화물 농도를 변화시키면서 개방회로전위, 전기화학 임피던스 분광법 및 동전위 분극 시험을 수행하였다. 또한 기준 용액에서 70 ºC로 4주 및 8주간 침지한 시편에 대해 SEM/EDS와 XPS 분석을 수행하여 표면막의 형태와 화학적 조성 변화를 평가하였다. 미세조직 분석 결과, FSW-SZ에서는 동적 재결정에 의한 미세립 조직이 형성된 반면, EBW-FZ에서는 용융·응고 과정에 따른 조대하고 불균질한 결정립 조직이 관찰되었다. 시편별 전기화학적 응답과 상대적 부식 저항은 용액 조성에 따라 달라졌으며, 특정 용접부가 모든 조건에서 일관되게 우수한 내식성을 나타내지는 않았다. 특히 황화물 공급이 제한된 조건에서는 용접 미세조직에 따른 전기화학적 차이가 비교적 뚜렷하게 나타났으나, 황화물 농도가 증가하면 Cu–S계 표면막과 용액 환경의 영향이 상대적으로 우세해지면서 시편 간 차이가 감소하는 경향을 보였다. 일부 조건에서 관찰된 저주파 확산 응답은 황화물 공급과 Cu(I)계 화학종의 이동이 계면 반응에 관여함을 시사하였다. 장기 침지 후에는 Cu_2S를 포함하는 Cu–S계 표면막이 형성되었으며, 침지 시간이 증가함에 따라 BM, FSW-SZ 및 EBW-FZ 표면막의 화학 상태가 점차 유사해졌다. 따라서 용접 유도 미세조직은 초기 부식 반응과 표면막 형성 경로에 영향을 미치지만, 침지 시간이 증가할수록 황화물·염화물 용액 조성과 물질 전달이 장기 표면 상태를 지배하는 것으로 판단된다.

[비철4-1 | 16:25]

STS304 첨가 6:4 황동의 극저온 냉각 조건에 따른 절삭가공 특성: 노홍렬*, 이시연, 박노진(원진금속(주)), 박은수, 이지은(서울대학교)

Keywords: 무연황동, 6:4 황동, STS304, 극저온 냉각, 절삭가공, 칩 분절

Pb계 쾌삭황동은 우수한 절삭성을 가지나, 납 사용 규제 강화와 인체 유해성 문제로 이를 대체할 수 있는 무연 쾌삭황동 소재 및 가공기술 개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 Pb의 의도적 첨가 없이 절삭성을 확보하기 위하여 6:4 황동에 STS304를 3 wt.% 첨가한 무연황동을 제조하고, 극저온 냉각 조건이 절삭가공 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 개발합금은 고주파 용해 및 연속주조 후 열간압출과 단조공정을 적용하여 제조하였다. 절삭가공 시 발생하는 연속형 칩을 제어하기 위하여 일반 습식가공, 극저온 직접분사, 극저온 내부 분사, MQL 단독 및 극저온 간접분사+MQL 조건에서 평균 칩 길이와 내부 가공면의 표면조도(Ra)를 비교하였다. 비교재인 Pb 함유 쾌삭황동의 습식가공에서는 평균 칩 길이가 7.7 mm인 반면, STS304 첨가 무연황동의 일반 습식가공에서는 14.8 mm로 증가하였다. 극저온 직접분사와 내부 분사 조건에서는 평균 칩 길이가 각각 10.4 mm와 9.8 mm로 감소하였으며, MQL 단독 및 극저온 간접분사+MQL 조건에서는 각각 13.6 mm와 13.8 mm를 나타냈다. 표면조도는 일반 습식가공에서 Ra 0.37 μm였으며, 극저온 직접분사 조건에서 Ra 0.14 μm로 가장 낮았다. 극저온 내부 분사, MQL 단독 및 극저온 간접분사+MQL 조건에서는 각각 Ra 0.30, 0.40 및 0.35 μm를 나타냈다. 극저온 내부 분사 조건에서 칩 분절 효과가 가장 크게 나타났으며, 직접분사 조건에서는 가장 낮은 표면조도를 나타냈다. 반면 MQL 단독 및 극저온 간접분사+MQL 조건에서는 칩 분절 및 표면조도 개선 효과가 제한적으로 나타났다. 최적 공정을 적용하여 제작한 배관용 부품은 Pb 용출량 0.001 mg/L 이하, 인장강도 428 MPa 및 경도 108 HV를 나타냈으며, 수압 및 누설시험을 통과하였다.

이상의 결과로부터 극저온 냉각매체의 공급 방식에 따라 STS304 첨가 6:4 황동의 절삭특성이 달라지며, 직접분사와 내부 분사가 무연화에 따른 절삭성 저하를 완화하는 데 효과적임을 확인하였다. 또한 수도배관 부품용 무연황동 소재 및 가공공정으로의 적용 가능성을 확인하였다.

[비철4-2 | 16:40]

Overcoming the strength and ductility trade-off in Ni-based alloy through tailoring of bimodal grain structures, hierarchical twins and coherent nanoprecipitates: Yijie Ban, Shi Woo Lee, HyoungSeop Kim*(Graduate Institute of Ferrous & Eco Materials Technology, Pohang University of Science & Technology, Pohang, 37673, South Korea)

Keywords: Ni superalloy, Nanoprecipitates, microstructure

The longstanding strength-ductility trade-off has posed a significant challenge in materials science, limiting the potential applications of numerous structural materials. It is crucial to improve performance by adjusting microstructures to activate a synergistic effect of multiple strengthening/deformation mechanisms. In this study, we introduce a novel strategy to develop a multi-scale heterogeneous structure in a Ni-based alloy through cryogenic rapid deformation, characterized by a bimodal grain distribution with small grains containing high-density hierarchical twins (third-order), oversized grains devoid of twins. The combination of microstructural heterogeneity and deliberate twin distribution enables the alloy to exhibit specific strengthening and deformation mechanisms in different regions, enhancing the matrix and effectively distributing the stress and strain. Simultaneously, nanoscale $L1_2$ precipitates with an extremely low lattice mismatch distributed across all grains, reducing the accumulation of elastic strain caused by dislocation movement and thereby preventing crack initiation at interfaces. The unique hindrance and accommodation of dislocations by this structure significantly enhance strength without sacrificing ductility, achieving a yield strength as high as 1498.6 MPa and a uniform elongation of 18 %. During tensile deformation, small grains with twins and oversized grains exhibit different abilities to absorb and constrain dislocations. Hierarchical twins facilitate interactions with dislocations in multiple directions. Various deformation mechanisms, including a high density of tiny stacking faults, Lomer-Cottrell locks, and short twins, are activated, particularly in the oversized grains, which promote increased dislocation multiplication and accumulation, contributing to the high strain hardening ability and excellent ductility.

[비철4-3 | 16:55]

Mo 함유 산업 폐기물의 용융환원 및 페로몰리브덴 제조를 위한 $CaO-Al_2O_3-MgO$계 슬래그 조성 최적화 연구: 배성욱(한국생산기술연구원 국가희소금속센터, 한양대학교 재료화학공학과), 박주현(한양대학교 재료화학공학과), 신재홍*(한국생산기술연구원 국가희소금속센터)

Keywords: 건식제련, 반도체/디스플레이 산업 폐기물, 유효 점도, 침강 거동, 몰리브덴 재활용

반도체·디스플레이 산업의 Mo 박막 식각 폐액 중화 공정에서 발생하는 침전물은 대부분 매립되고 있어 고부가가치 자원화 기술이 요구된다. 본 연구에서는 실제 중화 침전물을 원료로 용융환원을 통해 페로몰리브덴을 제조하고, 효율적인 Mo 회수를 위한 최적 슬래그 조성을 도출하고자 하였다. 원료 내 Mo는 $CaMoO_4$ 상으로 존재하며, 열역학 계산으로 설계한 $CaO-Al_2O_3-MgO$계 슬래그를 적용하여 고주파 유도로에서 1600 ºC Ar 분위기, 1시간 조건으로 탄소열환원 및 메탈-슬래그 분리 실험을 수행하였다. 고상 분율을 고려한 유효 점도 계산으로 CaO/Al_2O_3 비 (이하 C/A)에 따른 Mo 액적의 침강 거동을 예측하였으며, 0.52, 0.46, 0.40의 C/A 비교 실험 결과 0.52에서 반응 개시 5분 이내에 Mo가 금속상으로 이동하여 금속상 Mo 60.95 wt%의 Fe-60Mo 합금과 슬래그 잔류 Mo 1.24 wt%를 달성하였다. 탄소열환원과 Fe 교환반응($MoO_2 + 2Fe \rightarrow Mo + 2FeO$)이 동시에 진행됨을 확인하였고, C/A 증가 시 FeO 활동도 계수 감소로 평형이 FeO 생성 방향으로 이동하여 Fe 손실이 증가함을 규명하였다. 본 연구는 슬래그의 유효 점도와 FeO 활동도 계수가 각각 Mo 회수와 Fe 손실을 결정하는 핵심 인자임을 계산과 실험을 통해 밝혔으며, 이를 바탕으로 Mo 함유 폐기물의 용융환원 공정에 적용할 수 있는 슬래그 조성 설계 기준을 제공하였다.

[비철4-4 | 17:10]

Effect of Aluminum content on the Interfacial Reaction between Ni-xAl Alloy Melt and MgO Refractory: Oxygen Transfer and $MgAl_2O_4$ layer Formation: Seung-Ho Lee, Hyun-Jae Kim(Pohang University of Science and Technology), Yoon Seok Ko(Agency for Defense Development), Youn-Bae Kang*(Pohang University of Science and Technology)

Keywords: Nickel-based superalloy, Refractory, Vacuum, Levitation melting, Interfacial reaction

Nickel-based superalloys, which exhibit excellent mechanical properties and corrosion resistance, are widely used in the aerospace, energy and marine industries where materials are required to withstand extreme environments. Melt cleanliness under ultra-low oxygen content of nickel-based superalloys is essential for ensuring the mechanical properties of nickel-based superalloys. However, interfacial reactions between the molten alloy and refractories can directly contribute to oxygen pickup, the formation of non-metallic inclusions and compositional changes. In particular, MgO refractory is known to have limited applicability because it reacts with dissolved Al to form oxide inclusions and causes physical erosion. Several studies have suggested that the $MgAl_2O_4$ layer formed by the reaction between dissolved Al and MgO may suppress further oxygen transfer. However, the Al content required for this protective behavior has not yet been clarified. In this study, semi-levitation experiments between Ni-xAl (x = 0, 1, 3, and 6 wt%) alloys and MgO refractory were conducted using an electromagnetic levitation melting furnace. The oxygen content in the melt and the interfacial reaction layer

were evaluated as functions of reaction time and vacuum level. For pure nickel, the oxygen content increased with time. In contrast, the Al-containing alloys showed an initial increase followed by a plateau. An $MgAl_2O_4$ layer formed between the melt and MgO interface, suggesting that it suppresses further oxygen transfer. This study aims to elucidate the critical Al content required for the $MgAl_2O_4$ interfacial layer to suppress oxygen transfer effectively, thereby exploring the applicability of MgO refractories in the refining process of Nickel-based superalloys.

타이타늄 기술 및 산업 동향 심포지엄
Room 2층 206/8호, 10월 29일

[타이타늄동향1-1 | 09:00] 초청강연

우주항공용 타이타늄 국산화 실적과 국내 소재시장 활성화를 위한 제언: 정유인*(한국항공우주산업)

Keywords: 타이타늄 합금, 국산 소재, 소재 국산화

타이타늄은 우주항공산업의 대표적인 소재이며, 특히 특수목적 고성능 비행체 개발에는 빠질 수 없는 필수적인 소재이다. 국내 항공산업은 KT-1 개발 이후 고정익 계열의 TA-50, KF-21, 회전익 계열의 KUH, LAH 항공기의 개발 및 양산으로 연계되어 비약적인 발전을 해왔으나, 해당 항공기에 적용되는 소재의 국내 기술수준은 여전히 연구개발 수준에 머물렀으며, 이에 따라 모든 소재는 해외 수입에 의존할 수 밖에 없었다. 그러나 2020년 코로나로 인한 항공 소재 공급망 붕괴로 인해서 더 이상 해외 시장에 의존할 수 없는 상황에 이르렀으며, 이에 국내 항공기 체계 업체와 소재 업체를 중심으로 소재 국산화를 추진하였고 많은 시행착오를 겪으면서 2026년 비로서 국내 개발 항공기의 양산에 적용할 수 있게 되었다. 본 연구에서는 국내 항공용 타이타늄 합금의 개발 사례를 고찰하고 국내 개발 소재의 항공기 국제공동개발 적용을 통한 국내 소재 시장 활성화 제언을 하고자 한다.

[타이타늄동향1-3 | 09:25] 초청강연

Mg-H 융합탈산공정 기반 Off-grade 타이타늄의 리싸이클링 분말 제조 기술 및 이를 활용한 타이타늄 부품 개발 : 박지환(㈜엠티아이지)

Keywords: 타이타늄 리싸이클링 공정, Mg-H 융합탈산공정, 타이타늄 분말사출성형공정, 타이타늄 부품

타이타늄은 높은 강도를 가지는 경량원소로 뛰어난 내부식성, 높은 생체적합성 등의 특성으로 우주-항공, 플랜트, 의료 산업 등에 주로 사용되고 있는 핵심 소재로 최근 IT 기기 외장소재, 로봇 및 정밀기계 등의 영역으로 확장하고 있다. 이러한 타이타늄은 소재 제조 및 가공공정에서 많은 스크랩이 발생하며 타이타늄의 높은 산화특성으로 인해 재사용하기 위해서 탈산공정 등의 리싸이클링 공정이 필요하다. 타이타늄의 탈산 공정은 현재 칼슘과 희토류를 활용하기 때문에 탈산공정비용이 높은 단점이 있어, 낮은 비용으로 타이타늄을 탈산 할 수 있는 공정이 필요한 실정이다. Off-grade 타이타늄의 산소를 제거하기 위하여 열역학적 분석을 통한 Mg-H 융합탈산공정을 활용하여 Off-grade 타이타늄 내의 산소 농도를 1.3 wt%에서 0.15 wt% 이하로 낮출 수 있는 탈산공정을 확립하였으며, 1회 100 kg 이상의 Off-grade 타이타늄의 탈산공정을 수행할 수 있는 Pilot 급 타이타늄 탈산장치를 구축하였다. Mg-H 융합탈산공정을 통해 탈산되는 타이타늄 분말의 부가가치화를 높이기 위하여 분말사출성형공정과 RF 플라즈마 구형화공정을 활용하여 의료용 부품, IT용 외장소재, 타이타늄 망치, 생활용품 등의 타이타늄 부품과 적층제조용 분말을 활용한 적층구조체 부품등을 개발하여 Off-grade 타이타늄 소재의 업사이클링 구조를 구축하여 타이타늄을 재활용할 수 있는 기반을 마련하였다.

[타이타늄동향1-4 | 09:50] 초청강연

미세조직 이미지와 층상 간격 정보 학습을 통한 CNN 기반 Ti-6Al-4V 합금의 기계적 물성 예측: 박노근*, 허성준, 안효주, 박재형, 조진우, 하준영(영남대학교)

미세조직과 기계적 특성 간의 관계를 규명하는 것은 재료 성능의 향상과 공정 조건의 최적화를 위해 중요하다. 그러나 기존의 기계적 특성 평가는 실제 시편을 이용한 반복적인 시험이 필요하므로 상당한 시간과 노력이 소요되며, 대규모 데이터를 확보하는 데에도 한계가 있다. 본 연구에서는 서로 다른 단조 조건으로 제조된 Ti-6Al-4V 시편의 광학현미경 미세조직 이미지를 기반으로 경도 예측 모델을 구축하였다. 입력 데이터로는 200배, 500배 및 1000배에서 획득한 다중 배율 미세조직 이미지와 층상 간격 정보를 활용하였다. 층상 간격을 일관된 기준으로 측정하기 위해 층상 간격 자동 측정 프로그램을 개발하였으며, 이를 통해 각 이미지에 대응하는 층상 간격을 산출하였다. 모델 학습에는 미세조직 이미지와 층상 간격을 입력값으로 사용하고, 각 시편에서 측정한 경도값을 해당 시편 이미지의 목표 라벨로 부여하였다. 이를 바탕으로 이미지에서 추출된 특징과 층상 간격 정보를 함께 학습하는 합성곱 신경망(CNN) 기반의 예측 모델을 구성하였다. 모델의 성능은 학습에 사용되지 않은 독립 시편의 경도를 예측하는 방식으로 평가하였으며, 배율 조건에 따른 예측 결과의 변화도 함께 분석하였다. 그 결과, 독립 시편에서도 실험값에 근접한 경도 예측 결과를 얻었으며, 서로 다른 배율의 이미지에서도 비교적 일관된 예측 경향이 확인되었다. 또한 SmoothGrad 기반의 시각화 결과, 층상 조직이 뚜렷하게 나타나는 영역에서 높은 중요도가 확인되었으며, 모델이 이러한 미세조직적 특징을 경도 예측에 활용하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제안한 접근법은 산업 현장에서 비교적 쉽게 확보할 수 있는 광학현미경 미세조직 이미지와 층상 간격 정보를 활용하여 반복적인 경도시험을 보완하고, Ti-6Al-4V 합금의 경도를 효율적으로 평가하기 위한 보조 수단으로 활용될 수 있다. 향후 다양한 제조 조건과 재료에 대한 데이터가 축적된다면, 현장 적용성이 높은 기계적 물성 예측 및 재료 성능 평가 기술로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

[타이타늄동향2-1 | 10:25] 초청강연

항공 가스터빈 엔진 단조품의 타이타늄 합금 적용 및 개발 현황 : 오승철*, 구지호, , 권혁준, 최성규, 손인수(한화에어로스페이스)

항공 가스터빈 엔진은 팬, 압축기, 연소기 및 터빈으로 구성되며, 각 부위의 작동 온도, 하중 조건, 요구 수명 및 손상 허용성에 따라 최적의 소재와 제조 공정이 결정된다. 이 중 상대적으로 저온 영역인 팬 및 압축기 구간은 높은 비강도와 비강성, 우수한 피로 및 손상 허용 특성이 요구됨에 따라 Ti-6Al-4V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 등의 타이타늄 합금이 핵심 소재로 적용되고 있다. 특히 블레이드, 디스크, 샤프트와 같은 주요 회전체 부품은 고품질 단조 및 열처리 공정을 통한 미세조직 제어와 기계적 특성 확보가 필

수적이다. 항공엔진용 타이타늄 회전체 단조품은 일반 산업용 제품 대비 높은 수준의 소재 청정도, 미세조직 균일성 및 비파괴검사 신뢰성이 요구된다. 운용 중 발생하는 반복적인 원심하중, 진동 및 열·기계적 복합 하중을 견디기 위해서는 잉곳 제조 단계의 개재물 제어부터 단조 공정의 변형 및 열이력 관리, 열처리를 통한 조직 최적화, 그리고 최종 초음파 탐상의 신뢰성 확보에 이르는 전 공정의 체계적인 품질관리가 부품의 수명과 신뢰성에 직결된다. 따라서 개별 공정의 최적화를 넘어 잉곳-빌렛-단조-열처리-검사로 이어지는 전 공정의 연계적 소재·공정·품질관리 기술 확보가 핵심이다. 본 발표에서는 항공 가스터빈 엔진의 구조적 특성과 설계 요구조건을 검토하고, 타이타늄 합금의 적용 현황과 재료적 특성을 고찰한다. 또한 용해, 단조, 열처리 공정에서 발생하는 주요 기술적 이슈를 분석하고, 이를 바탕으로 국내 항공엔진 타이타늄 합금 소재부품 개발을 위한 발전 방향을 제언하고자 한다.

[타이타늄동향2-2 | 10:50] 초청강연

스크랩 기반 Ti-6Al-4V 합금 봉재 제조를 위한 열간압연 공정 개발: 이초롱, 유연정, 이승욱, 장원영((주)동아특수금속)
Keywords: Titanium scrap, Ti-6Al-4V, Recycling, Hot rolling

타이타늄 합금은 우수한 비강도와 내식성으로 항공, 우주 및 방산 등 고부가가치 산업에 널리 적용되고 있으며, Ti-6Al-4V 합금의 사용 증가에 따라 제조 및 가공 과정에서 발생하는 스크랩의 고부가가치 재자원화에 대한 중요성이 증가하고 있다. 본 연구에서는 Ti-6Al-4V 가공 스크랩을 활용하여 국산화 잉곳을 제조하고, 단조 및 열간압연을 통해 봉재를 제조함으로써 스크랩 기반 Ti-6Al-4V 합금의 봉재 제조 국산화와 열간압연에 따른 미세조직 변화를 분석하였다. 다양한 형상의 Ti-6Al-4V 가공 스크랩을 선별 및 전처리한 후 PAM-ISM 연속 공정 원료로 활용하고, 직경 230 mm, 길이 약 2,000 mm의 잉곳을 제조하였다. 제조된 잉곳은 다양한 직경으로 단조하여 단조 가공성을 검토하였으며, 이 중 직경 60mm 단조 봉재를 이용하여 열간 왕복 및 연속압연을 수행하여 최종 직경 16 mm rod를 제조하였다. 열간압연 과정에서는 압연 온도 및 패스 조건에 따른 소재의 가공 거동과 형상 변화를 평가하였으며, 압연 후 위치별 미세조직 분석을 통해 조직의 변화와 균일성을 비교하였다. 미세조직 분석 결과 930 ℃ 및 950 ℃ 열간압연재 모두에서 라멜라 조직이 관찰되었다. 특히 930 ℃ 압연재에서는 단면 edge 영역에서 등축정 조직이 관찰된 반면, center 영역에서는 라멜라 조직이 나타나 단면 위치에 따른 미세조직 차이가 확인되었다. 이러한 조직적 차이는 열간압연 과정에서 소재 단면의 온도 및 변형 이력 차이에 기인한 것으로 판단되며, 균일한 봉재 제조를 위해서는 압연 온도뿐만 아니라 단면 위치별 변형, 온도 제어 등이 중요함을 확인하였다. 이를 통해 스크랩 기반 Ti-6Al-4V 합금의 고부가가치 봉재화를 위한 열간압연 공정 적용 가능성을 검토하였으며, 향후 공정 안정화 및 미세조직 제어를 위한 기초 공정자료로 활용하고자 한다.

[타이타늄동향2-3 | 11:15] 초청강연

국내 대용량 상업용 전자빔용해로(EBCHM) 인프라 구축과 첨단 타이타늄 합금의 정련기술 개발 방향: 최국선(㈜킴텍)
Keywords: 전자빔 냉심 용해(EBCHM), 첨단 티타늄 합금, 서멀 캐소드(Thermal Cathode), 콜드하스 정련, 6-Gun 빔 제어, Al 증발 억제, 진공야금

전자빔 용해(Electron Beam Melting, EBM) 기술은 초고진공 환경과 고밀도 전자 집속 열원을 활용하여 고융점·고반응성 금속 내 가스 불순물과 미세 개재물을 제어하는 극한 진공야금 공정이다. 국내 전자빔 용해·정련 기술은 1993년 한국지질자원연구원에 독일 Von Ardenne사의 100kW급 파일럿 설비(EMO-100K)가 도입되면서 태동하였다. 이후 18년간 탄탈룸, 니오븀, 텅스텐, 몰리브덴, 타이타늄 등 고융점 희유금속 정련(drip melting) 연구가 축적되며 국내 진공 전자빔 야금의 학술적·기술적 토대를 마련하였다. 그러나 당시 인프라는 단일 EB gun 기반의 기초 원천 연구에 국한되어, 우주·항공용 첨단 타이타늄 합금 정련의 핵심인 수냉 동 도가니 기반 콜드하스 용해·정련(EBCHM) 기술을 실증하기에는 물리적 한계가 존재하였다. 이후 한국생산기술연구원 및 ㈜에이치브이엠을 중심으로 국산 전자빔 용해로 개발 및 상업적 정련 공정 연구가 이어졌으나, 본격적인 양산 단계 진입에는 한계가 있었다. 반면 2026년 한국재료연구원에 2기의 EB gun을 탑재한 준양산급 ALD사 전자빔 용해·정련로가 구축됨에 따라, 우주항공 규격에 부합하는 콜드하스 정련(LDI/HDI 결함 제어) 메커니즘 실증이 가능한 공공 R&D 인프라가 확보되었다. 이에 더하여 최근 국내 주요 대기업을 중심으로 대용량 다중 전자총(6-Gun급) 기반 초대형 상업용 EBCHM 설비 도입이 본격화되면서, 국내 특수 야금 산업은 연구실 단위를 넘어 대규모 양산 인프라로의 대전환기를 맞이하고 있다. 본 발표에서는 100kW급 EMO-100K를 통해 18년간 축적된 EB melting/refining 및 연속 주조 실전 조업 경험을 바탕으로, 향후 전개될 대용량 EBCHM의 상업적 가치와 핵심 기술 요소를 고찰한다. 나아가 3년 내 도래할 첨단 타이타늄 합금의 상업적 대량 양산 시대를 대비하여, 6-Gun 빔 분할 출력 프로토콜, 대형 잉곳 탕면 응고 편석 방지, 그리고 초기 시행착오를 최소화하기 위한 산·학·연 선제적 협력 R&D의 필요성을 제언하고자 한다.

[타이타늄동향3-1 | 13:30] 초청강연

국내 타이타늄 산업에서의 선순환 생태계 구축: 장대건, 임종섭, 유종영, 김지은, 김경민, 이장호, 최재영, 최윤영, 송영석*(세아창원특수강)
Keywords: 타이타늄, 스크랩, Recycling, 생태계, 전자빔용해

국내 타이타늄 산업은 산업용 열교환기용 판재 등을 중심으로 양적 성장을 지속하고 있으며, 질적으로도 항공·방산·반도체·의료 등 첨단 핵심 산업의 필수 소재로 자리매김하고 있다. 그러나 원자재인 타이타늄 스폰지는 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 특히 우주·항공·방산용 스폰지 및 잉곳은 미국, 일본, 유럽 등에서 전략물자로 지정되어 있어 원활한 수입에 어려움이 크다. 반면, 국내에서 발생하는 타이타늄 스크랩은 스폰지를 대체할 수 있는 귀중한 자원임에도 불구하고, 국내 재활용 생태계가 부재하여 대부분 저가로 해외에 수출되거나 단가가 낮은 철강 첨가제 수준으로 소모되는 '자원 유출' 문제에 직면해 있다. 아울러 스크랩의 자원화는 탄소 배출 저감 및 에너지 절감 등 ESG 경영 측면에서도 매우 중요한 과제이다. 현재 국내의 타이타늄 스크랩 재활용은 주로 진공아크재용해(VAR) 설비를 이용해 제한적으로 이루어지고 있으나, 스크랩의 형상 및 성분 측면에서 제약이 많아 실제 재활용률 향상에는 한계가 있다. 따라서 국내 타이타늄 산업의 경쟁력을 확보하기 위해서는 스크랩을 체계적으로 자원화할 수 있는 프로세스 구축

이 필수적이다. 이를 위해서는 첫째, 스크랩의 수거, 선별, 전처리를 거쳐 재용해 가능한 상태로 공급하는 자원화 전문 기업 및 전처리 설비의 확충이 필요하다. 둘째, 전처리된 스크랩을 원활히 활용할 수 있는 용해 설비가 구축되어야 한다. 최근 일부 기업을 중심으로 플라즈마용해(PAM) 및 전자빔용해(EB) 설비가 도입되고 있으나 아직 그 규모는 미흡한 수준이다. 특히, 스크랩 활용 시 품질 및 성분 관리에 문제가 없도록 전 공정이 유기적으로 연결된 체계를 갖추는 것이 핵심이다. 현재 개별 기업 차원에서의 노력이 일부 이루어지고 있으나 전체 프로세스의 체계화는 부족한 상황이다. 이를 위해 정부 차원의 정책적 지원과 함께 국내 발생 스크랩의 무분별한 해외 유출을 방지하기 위한 제도적 보완이 요구된다. 결론적으로, 양산급 용해 설비의 조속한 구축과 함께 생태계 내 각 역할을 담당하는 기업 간의 유기적인 협력이 최우선 과제이며, 이를 기반으로 국내 타이타늄 산업의 글로벌 경쟁력을 한층 더 강화할 수 있을 것이다.

[타이타늄동향3-2 | 13:55] 초청강연

전자빔 수냉 도가니 용해(EBCHM)용 타이타늄 스크랩 전처리 기술 및 사업 현황: 박용준(㈜프락시스)

Keywords: 타이타늄 스크랩, 전처리 기술, EBCHM, 침입형 불순물 제어, 프락시스 (PLAXYS)

본 발표는 ㈜프락시스(PLAXYS)의 실제 상용 사업 운용 현황을 바탕으로, 전자빔 수냉 도가니 용해(EBCHM)에 최적화된 타이타늄 스크랩 전처리 상용화 기술 및 자원순환 산업 동향을 소개한다. 소모전극 제작이 필수적인 기존 진공 아크 재용해(VAR) 공정과 달리, EBCHM은 극고진공(≤ 10^{-4} Torr) 환경 하에서 칩 및 벌크 형태 스크랩의 직접 장입이 가능하다. 다만 실제 상용 가동 시 진공 파괴 및 산화 결함을 방지하기 위해 표면 가공유, 수분 및 침입형 불순물(O, N, C, H)에 대한 철저한 전처리 통제가 필수적이다. 프락시스는 반도체 타겟, 터닝, 벌크 스크랩을 대상으로 복합 알칼리 초음파 탈지(TSPP/NaOH), 산세 피막 제거, 200 ºC 진공 챔버 건조 공정을 포함한 양산 전처리 인프라를 구축하여 탄소 함량을 300 ppm 이하(≤ 0.02 wt%)로 제어하고 표면 수분을 완벽히 제거하고 있다. 또한 XRF, LIBS 및 LECO ON836 가스 분석기를 통한 실시간 성분 측정으로 EBCHM 용해 시 발생하는 합금 원소 휘발 손실을 사전에 보정(Over-alloying)한 고순도 원료를 공급한다. 이러한 검증된 전처리 원료 공급 체계는 수입 버진 스폰지 타이타늄을 효과적으로 대체하고, 에너지 및 CO_2 배출량을 95% 절감하며, 국내 항공우주·특수합금 산업의 자원순환 공급망을 실질적으로 강화하고 있다.

[타이타늄동향3-3 | 14:20] 초청강연

타이타늄계 중성자흡수 구조재 개발: 천영범, 강지훈, 박선영, 정승문, 강석훈(한국원자력연구원)

Keywords:

중성자흡수재는 사용후핵연료 저장시설의 안전성과 제조 경제성에 큰 영향을 주는 핵심 소재로서, 임계제어능, 기계적 강도, 제작성, 용접성 등이 요구된다. 기존 알루미늄-보론탄화물계 중성자흡수재는 강도 및 인성과 같은 구조적 성능의 결여되어 있어 별도의 구조 지지체와 함께 부품화되어 사용후핵연료 저장시설에 설치된다. 이러한 제작 효율성 문제를 개선하기 위해서는 임계제어능과 구조성능을 겸비한 중성자흡수 구조재의 개발이 필요하다. 구조성능을 겸비한 중성자흡수 구조재 개발에 핵심적으로 요구되는 사안은 취성을 유발하는 중성자 독 함유 화합물의 형성을 최소화시킬 수 있는 합금설계와 공정설계를 도출해야 한다는 것이다. 본 연구에서는 타이타늄과 다양한 중성자 독이 첨가된 신합금을 설계 및 제조하여 기계적특성과 중성자흡수능을 평가하였고, 이를 통해 최적의 구조성능을 갖는 중성자흡수 구조재 합금조성을 도출하였다. 개발된 중성자흡수 구조재 신합금을 대상으로 대용량 소재 제조, 용접특성을 연구 및 물성자료 구축이 진행되었으며, 이로부터 얻은 자료와 모델링을 통해 사고시 안전성을 유지할 수 있음을 확인하였다.

[타이타늄동향4-1 | 14:55]

클래드 후판 국산화 및 기술개발 현황: 성준호*, 김기혁, 임환석(동국제강), 박철호(조선대학교), 신다슬(재료연구원), 김형준(연세대학교), 윤용백((주)티엔아이)

Keywords: 클래드 후판, 내부식

에너지 및 석유화학 산업의 부식 환경 심화에 따라 고강도 모재와 우수한 내식성 합금을 접합한 클래드 후판의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 클래드 후판은 단일합금 판재 대비 고가 합금의 사용량을 크게 줄여 원가 절감을 실현함과 동시에, 구조적 강도와 내식성을 동시에 만족시키는 대표적인 고부가가치 소재이다. 그러나 다품종 소량 생산 구조, 고난도의 압연 접합 기술, 높은 시장 진입장벽 및 특수 소재 조달의 한계로 인해 오랫동안 전량 수입재에 의존해 왔다. 동국제강은 국내 후판 전문 압연 밀(Re-rolling Mill)의 축적된 압연 기술을 바탕으로 스테인리스계 및 니켈합금 계열의 클래드 후판을 성공적으로 개발 및 상용화하였다. 또한 극한 부식 환경 및 차세대 친환경 플랜트 시장을 선점하기 위해 최고 난이도의 티타늄 클래드 후판 제조 기술 개발을 본격 추진하고 있다. 본 발표에서는 롤압연 클래드 후판의 국산화 상용화 현황과 티타늄 클래드 후판 기술 개발 성과를 공유하고, 향후 고부가 특수 클래드 강판의 시장 확대를 위한 전략을 소개하고자 한다.

[타이타늄동향4-2 | 15:10] 초청강연

항공용 온간단조 성형공법을 이용한 항공용 Ti64합금 체결부품의 제조공정에 관한 연구: 최정묵, 곽희만(진합)

Keywords: Ti64합금, 온간성형공법, Ti합금 제조공정, NAS규격, 특성평가

Ti합금 체결부품 시장은 지속적인 증가추세에 있어 온간성형공법 등과 같은 저비용 정밀생산기술을 통해 제품 품질을 극대화하는 동시에 획기적으로 생산단가를 줄일 수 있는 제조공정 개발이 절실한 실정이다. 본 연구에서는 항공용 TI합금 체결부품에 대해 기계가공 최소화, 금형 수명 및 치수정밀도 극대화 등의 장점을 가지는 온간 성형공법을 적용함으로써, 제조공정 최적화 기술개발 및 NAS(National Aerospace Standard) 요구도 검증을 목표로 진행하였다. 항공용 Ti합금 체결부품은 단조, 세척, 열처리, 전조, 가공

등 모든 공정별 규격에 준하여 제작되며, 특히 나사부의 정밀도가 상당히 높아 제품의 품질을 만족하는 것이 매우 까다롭다. 따라서 , 제품별 단조 및 전조의 온도, 생산 조건 등을 DB화 하여 일관된 공정을 통해 제품을 제작 후 제작된 제품은 NAS규격 요구사항 평가 항목인 치수정밀도, 나사산형상, 야금학적 특성, 기계적특성(인장/전단/피로) 등을 평가하여 평가결과 규격에 만족하였다. 본 연구를 바탕으로 Ti합금 체결부품의 국산화 및 확장을 추진 중에 있다.

[타이타늄동향4-3 | 15:35] 조청강연

산화방지제 적용 타이타늄 합금의 예비형상 최적화를 통한 항공기 엔진 부품 형단조 공정 개발 : 정상우(삼미금속㈜ 기술연구소), 조재현(㈜케이에스피 기술연구소), 윤은유(한국재료연구원)

타이타늄 합금은 높은 비강도와 우수한 내열성으로 인해 항공기 엔진 부품의 핵심 소재로 널리 활용되고 있다. 그러나 열간 단조 공정 시 고온에서 대기 중의 산소와 반응하여 표면에 취약한 산화층(Alpha-case)을 형성하기 쉬우며, 가공 온도 범위가 좁아 성형 중 미성형이나 결함이 발생할 확률이 높다. 본 연구에서는 고부가가치 소재의 회수율을 극대화하고 공정 신뢰성을 확보하기 위해, 산화방지제를 적용한 타이타늄 합금의 예비형상 최적화 및 형단조 공정 개발을 수행하였다.

항공엔진 구조물용 고강도 경량/내열 소재▪부품 심포지엄

Room 2층 209/11호, 10월 29일

[항공엔진 1-1 | 09:30] 초청강연

항공 단조산업 경쟁력 강화 전략(안) -수요·인증·공급망을 연계한 생태계 중심 지원 방향-: 김은영(우주항공청)

항공용 대형 단조품은 항공기 구조물과 엔진 등에 적용되는 필수 부품으로, 대형 프레스 등 고가의 생산설비와 엄격한 품질관리 및 인증·승인 절차가 요구된다. 또한 원소재 확보에서 단조, 열처리·가공 등 후공정, 시험평가, 고객사 승인 및 납품에 이르기까지 장기간에 걸친 공급망 구축이 필요하다는 특성이 있다. 이러한 산업적 특성으로 인해 항공 단조 분야의 경쟁력은 개별 기업의 설비 보유 여부뿐만 아니라 소재·제조·시험평가·인증·수요가 유기적으로 연계되는 산업 생태계 전반의 역량에 의해 좌우된다. 본 연구는 이러한 관점에서 국내외 항공 단조산업의 여건과 주요국의 정책 동향 및 지원제도를 살펴보고, 국내 항공 단조산업의 경쟁력 확보를 위한 주요 과제를 도출함으로써 향후 정부의 역할과 정책지원 방향을 검토하고자 한다. 국내외 산업 및 정책 동향을 검토한 결과, 항공 단조 분야에는 높은 초기 투자비와 함께 장기간의 인증·승인 절차, 제한적인 초기 수요, 원소재 공급망 확보, 공정기술 및 전문인력 축적 등 개별 기업의 투자만으로 대응하기 어려운 과제가 복합적으로 존재하는 것으로 나타났다. 특히 국내 산업계에서는 ① 중장기 수요의 불확실성, ② 인증 및 고객사 자격승인에 따른 시장진입 장벽, ③ 원소재 공급망의 취약성, ④ 공정기술 및 설비운영 전문인력의 부족, ⑤ 글로벌 공급망 변화에 대응한 공급 안정성 확보 등이 주요 과제로 제기되고 있다. 이는 항공 단조산업의 경쟁력 확보를 위해 단순한 생산설비 확충보다는 수요와 공급, 기술개발, 시험평가·인증 및 시장진입을 연계하는 종합적인 접근이 필요함을 시사한다. 이에 본 연구는 정부의 역할을 개별 기업의 상업적 투자 또는 생산설비 투자를 대체하는 데 두기보다는, 민간이 독자적으로 해결하기 어려운 공통·기반 영역을 보완하고 민간의 자발적인 투자가 기술 역량 확보와 시장진입으로 연결될 수 있는 환경을 조성하는 데 중점을 두어 검토한다. 궁극적으로 항공 단조산업의 경쟁력 확보를 위해서는 특정 설비의 보유 자체보다 국내 기업이 글로벌 항공산업이 요구하는 품질·납기·인증 요건을 충족하고 지속적인 공급관계를 형성할 수 있는 산업 생태계의 역량을 구축하는 것이 중요하다. 본 연구에서 제시하는 정책방향은 향후 품목별 수요와 기술적 필요성, 민간투자 동향 및 산업계 의견 등을 종합적으로 검토하는 정책기획 과정에서 보다 구체화될 수 있다.

[항공엔진 1-3 | 09:50] 초청강연

민간 항공 엔진인증 제도 및 정책 동향: 최용훈(항공안전기술원)

최근 국내 군수 분야를 중심으로 항공기 체계 개발이 확대되고 있으나 엔진 수입에 따른 항공기 수출 제한 등 어려움이 발생하고 있으며, 이에 항공기용 엔진의 독자개발 및 인증 역량 확보가 국가 항공산업 경쟁력의 핵심 요소로 부각되고 있다. 그러나 소재를 포함한 항공기용 엔진의 완전한 기술 자립에는 많은 시간과 비용이 소요되며 무엇보다 엔진을 인증하기 위한 제도와 경험이 부족한 실정이다. 군수 분야에서는 항공엔진에 대한 인증제도가 없어 최근 제도 마련을 위한 정책용역을 수행한 바 있으며, 민간 분야에서는 「항공안전법」에 근거한 국제적 수준의 항공 엔진 인증 기준(KAS Part33)과 절차를 보유하고 있으나, 국내 개발 엔진에 대한 형식증명을 직접 수행한 경험이 전무하다. 군수 분야에서 개발되는 항공 엔진은 동일 형상 또는 일부 설계변경을 통해 민간 엔진으로의 전환 및 활용이 가능하다. 또한 민간 수요만으로 별도의 항공 엔진 개발 및 인증을 지원과 투자를 기대하기 어려운 것이 사실이다. 이러한 점을 고려할 때 최근의 군수 분야 항공 엔진 개발을 국가적인 차원의 엔진 개발 및 인증 역량을 확보할 수 있는 절호에 기회로 활용해야 한다. 특히 민.군 감항당국간 제도, 기술, 인프라 등 인증 분야에서 구체적인 상호 협력 방안을 마련하고 이행함으로써 국내 항공엔진 산업의 기술 자립은 물론 향후 글로벌 시장 진출을 가속화 시킬 수 있을 것으로 판단된다. 이에 민간 항공 엔진인증 제도 현황과 정책 동향을 소개하고 이를 통해 국가적인 항공 엔진인증 역량 강화를 위한 방안을 모색하고자 한다.

[항공엔진 1-4 | 10:10]

항공엔진 구조물용 고강도 소재부품 기술개발 추진 현황 및 전략: 송덕용*, 우한별, 김규리(한화에어로스페이스(주))

Keywords: 항공 가스터빈엔진, 고강도, 경량소재, 내열소재, 엔지니어링 승인

항공용 가스터빈 엔진의 핵심 소재·부품은 엔진의 구조 건전성과 신뢰성을 좌우하는 핵심 기술로서, 소재 자체의 고강도·고내열 특성뿐만 아니라 주단조 공정, 품질관리 및 엔지니어링 승인에 이르는 전주기 기술 확보가 필수적이다. 국내 항공엔진 소재·부품 기술 수준은 선진국 대비 약 40% 수준에 머물러 있으며, 최근 주요국의 수출규제 및 공급망 불확실성 확대로 핵심 소재의 자립화와 독자적인 소재·부품 개발 역량 확보가 시급하다. 본 연구에서는 항공용 가스터빈 엔진 정지부 주요 구조물에 적용되는 고강도 소재 및 부품의 국산화를 목표로, 산학연 컨소시엄을 구성하여 소재 개발부터 부품 적용 및 인증 기반 구축까지의 전주기 기술개발을 수행한다. 주요 개발대상은 경량 프레임용 C355 및 Al7050, 하우징 구조용 17-4PH 스테인리스강, 연소기 모듈용 Inconel 625 및 터빈 노즐용 Mar-M-247 등 소재 5종과 핵심 부품 4종 개발을 목표로 한다. 이를 위해 잉곳 및 빌렛 제조, 주단조 성형, 열처리 및 후공정 기술을 개발하고, 소재 및 부품의 기계적·물리적·고온 특성 평가와 품질 균일성 검증을 통해 엔진 적용성을 확보하고자 한다. 또한 축적된 소재·공정·특성 데이터를 기반으로 엔지니어링 승인 및 감항인증에 활용 가능한 수준의 소재 데이터베이스를 구축한다. 본 연구개발을 통해 항공엔진 핵심 소재·부품의 국산화 기반을 확보하고, 소재 설계부터 제조·평가·인증에 이르는 독자적인 기술개발 체계를 구축함으로써 국내 항공엔진 산업의 공급망 자립도 및 기술경쟁력 향상에 기여하고자 한다.

[항공엔진2-1 | 10:40]

항공기 가스터빈엔진용 C355 Master Alloy 공정 개발: 백용현, 장창범*(세아항공방산소재)

Keywords: 금속, 알루미늄, 주조, C355

본 연구는 항공기 가스터빈엔진 INLET부 경량 구조부품(Frame 및 Case 등) 국산화를 위해 “고청정 C355 알루미늄 합금(Master Alloy인 Round billet) 제조 기술개발 1차년도 연구로, AMS 규격 만족을 위한 원소재 제조공정 설계 및 표준공정 확립 연구를 수행하였다. 항공기 가스터빈엔진에 적용되는 C355 합금은 AMS 4215 규격을 기반으로 화학성분 범위(Si: 4.5–5.5 wt%, Cu: 1.0–1.5 wt%, Mg: 0.4–0.6 wt%)를 가지고 있으며, 용융금속 정련을 통해 용탕 내 비금속개재물 및 수소가스 함량을 제어하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 AMS 4215 기준으로 화학성분 분석을 수행함과 더불어, 용탕 정련, 탈가스 처리(H2 제거), 필터링 및 모합금 형태의 빌렛 주조 기술을 확보하였다. 또한, 향후 후공정(사형주조)의 최적 품질을 유지하기 위해 용해부터 주조 공정에 걸친 표준공정절차(SOP)를 체계화하였다. 본 연구를 통해 확립된 C355 원소재 표준공정 체계는 향후 실물 용해 및 시제품 제작 시 AMS 규격을 충족하는 고품질 항공용 주조품 확보의 핵심 기반으로 활용될 예정이다.

[항공엔진2-2 | 10:55]

항공엔진 부품 제작을 위한 형상링 제조 기술 및 적용 사례: 김진용, 주병돈*, 이인환, 김주희, 강호성((주)태상)

Keywords: 항공기엔진, 알루미늄, 형상 링, 링단조,

항공엔진 산업의 성장에 따라 핵심 부품의 수요가 증가하고 있으나, 항공엔진용 형단조 및 형상 링 단조품은 여전히 해외 의존도가 높아 공급 안정성과 비용 측면에서 한계가 존재한다. 특히 Al, Ti, Ni 기반 합금이 적용되는 항공엔진 부품은 경량화, 고강도 및 내열 특성이 요구되며, 이를 만족하기 위해 소재 특성에 적합한 단조 공정 설계 및 최적화 기술이 중요하다. 본 연구에서는 항공엔진 부품 제작을 위한 형상 링 제조 기술을 소개하고, 자유단조 및 예비성형을 통한 소재 형상 제어와 맨드렐 및 롤을 이용한 형상 링 성형 과정에서의 주요 공정 요소를 설명하였다. 또한 Near Net Shape 성형을 통한 소재 회수율 향상 및 가공량 최소화에 따른 생산성 및 원가 경쟁력 향상 가능성을 살펴보고, 소재 특성과 제품 형상을 고려한 가열, 성형 및 열처리 공정의 주요 고려사항을 정리하였다. 아울러 항공엔진의 Case, Frame 등 주요 구조 부품에 적용되는 링 단조 공정의 특성을 소개하고, 향후 Al7050 등 항공용 알루미늄 합금을 적용한 형상 링 단조품 개발을 위한 기술적 방향과 활용 가능성을 제시하고자 한다.

[항공엔진2-3 | 11:10]

Al7050 단조재의 항공 산업분야 적용 사례와 물성 메커니즘: 김은성(포항공과대학교 신소재공학과, 포항공과대학교 친환경소재대학원), 김은찬, 김형섭*(포항공과대학교 친환경소재대학원)

Keywords: Al7050, 단조재, 항공분야 구조재료, 파괴인성, 응력 부식 균열

항공 구조물의 경량화와 신뢰성 확보를 위해서는 높은 비강도뿐만 아니라 파괴인성, 피로저항성 및 내환경성을 균형 있게 갖춘 소재가 요구된다. Al7050은 Zn-Mg-Cu를 주 강화원소로 하고 Zr을 첨가한 석출경화형 고강도 알루미늄 합금으로, 두꺼운 단면에서도 우수한 강도와 손상허용성을 확보할 수 있어 고하중 항공 구조부품용 후판과 단조재로 활용되고 있다. 단조 공정은 내부 건전성과 부품 형상을 따르는 금속 유동선을 형성하는 데 유리하지만, 부위별 변형량 및 열이력 차이에 따라 결정립 구조, 재결정 분율, 집합조직과 잔류응력의 불균일성을 유발할 수 있다. Al7050의 높은 강도는 시효 과정에서 형성되는 미세한 석출물에 의한 전위 이동 억제에 주로 기인한다. 한편 입계 석출물의 연속성, 석출물 결핍대, 조대한 금속간화합물 및 잔류응력은 파괴인성, 피로와 응력부식균열 특성을 지배한다. 항공용 단조재에 적용되는 T74/T7452 계열 열처리는 최대 강도보다 강도, 인성, 피로 및 내환경성의 균형을 확보하기 위한 미세조직 제어 전략이다. 본 발표에서는 Al7050 단조재의 항공 산업 적용 사례와 제조공정을 소개하고, 단조 유동선, 재결정, 석출조직 및 잔류응력이 주요 기계적 특성에 미치는 영향을 고찰한다. 또한 항공기 및 항공엔진 주변의 고하중 경량 구조물 적용을 위한 위치·방향별 물성평가와 공정–미세조직–물성 연계 평가의 중요성을 논의한다.

[항공엔진2-4 | 11:25]

항공용 C355 주조합금의 기초 특성 및 미세조직 제어 기술: 조용희*(전남대학교)

Keywords: 알루미늄 주조재, 냉각속도, 개량화

본 연구에서는 항공용 C355 알루미늄 주조합금의 기초 물성 확보와 미세조직 제어 기술 확립을 목적으로 상용 유사 합금의 주조 및 열처리 관련 문헌을 조사하고, 열역학 계산을 통해 응고 과정에서의 주요 생성상과 합금원소의 영향을 분석하였다. 또한 화학성분, 용탕 내 수소 함량 및 주조재의 기포·결함 분석을 기반으로 소재 청정도를 평가하는 방법에 대해 고찰하고, 미세조직 분석과 기초 물성 평가를 통해 C355 합금의 미세조직–특성 간 상관관계를 검토하였다. 특히 TiB_2, Sr 및 Mn 첨가에 따른 결정립 미세화, 공정 Si 개질 및 Fe계 금속간화합물 제어 효과를 분석하였으며, T6 열처리 조건에 따른 미세조직 및 특성 변화를 평가하여 향후 항공용 C355 주조합금의 조성·주조·열처리 공정 최적화를 위한 기초자료를 확보하고자 하였다.

[항공엔진2-5 | 11:40]

항공소재개발을 위한 통계분석 사례 및 활용을 위한 품질예측 제언: 전민우*, 박용진, 김민호(한국화학융합시험연구원)

Keywords: 항공엔진 소재, MMPDS, 설계허용치, 감항인증, K-MIDAS, 통계분석

항공엔진용 소재의 감항인증을 위해서는 MMPDS 지침에 따른 통계적 설계허용치(A/B-Basis) 확보가 필수적이나, 이를 위한 대규모 시험(1, 000개 이상)은 개발 기간과 비용 부담을 초래한다. 본 연구에서는 항공엔진 소재 개발 효율화를 위해 MMPDS 기반의 통계적 설계허용치 산출 절차를 정립하고, 초기 소규모 데이터(10~30개) 활용 방안을 제안한다. 숙련도 프로그램과 K-MIDAS 분석

인프라를 적용하여 초기 인장시험 데이터의 산포 및 분포 특성을 사전 분석하였으며, 본시험 이전 단계에서 소재 물성의 산포 예측과 유효성 평가가 가능한 것으로 확인되었다. 본 기법은 항공엔진용 소재 개발 시 시행착오와 비용을 줄이고 국산 소재의 감항적합성 평가 효율성을 향상시킬 것으로 기대된다.

[항공엔진3-1 | 13:30]

항공용 17-4PH 스테인리스강 봉재의 주·단조 공정: 이승익*, 권혁곤, 구영애, 이상민, 이동현((주)케이.피.씨)

Keywords: 항공, AMS, 17-4PH, VIM, VAR, Round Bar

높은 신뢰성의 항공용 17-4PH소재에 대한 자립화 기술 개발은 지속적인 이슈 사항으로 다루어지고 있다. 본 과제에서는 석출경화형 스테인리스강인 17-4PH(AISI 630) 봉재(round bar)의 국내 제조 자립화를 목표로, 고품질 주조, 열간 단조, 열처리 공정을 개발하고자 한다. 주조 단계에서는 진공 유도 용해(VIM), 진공 아크 재용해(VAR) 기술을 통해 가스 불순물과 비금속 개재물을 극소화한다. 열간 단조 공정에서는 성형 해석 결과를 기반으로 결정립 제어, 최적의 단조 온도 및 공정 설계를 수립한다. 용체화 처리 및 시효 열처리 조건을 진행한 최종 제품에 대한 공정 및 품질 데이터베이스를 구축하여 항공 규격(AMS) 기준을 충족하는 17-4PH 소재를 개발하고자 한다.

[항공엔진3-2 | 13:45]

유한요소해석 기반 17-4PH 강 다단 열간단조의 공정-미세조직-물성 연계 예측 기술 동향: 조서연, 구진모, 유제현, 이인복, 이명규*(서울대학교)

Keywords: 17-4PH, 열간단조, 유한요소해석, 열-기계 이력, 미세조직-물성 예측

17-4PH 석출경화형 스테인리스강은 높은 강도와 내식성을 지니며, 시효조건에 따라 강도-인성 조합을 조절할 수 있어 항공우주 및 에너지 분야의 고신뢰성 단조부품에 널리 적용되고 있다. 이들 부품의 최종 성능은 열간단조 중의 불균일한 열-기계 이력과 이에 따른 미세조직 변화, 그리고 후속 열처리에 따른 석출거동의 복합적인 영향을 받는다. 특히 다단 열간단조에서는 패스별 변형조건과 패스 간 유지·냉각에 따라 열-기계 이력이 누적되므로, 유동응력 예측을 넘어 공정-미세조직-물성 간 연계 해석이 요구된다. 본 발표에서는 17-4PH 강의 열간변형 및 단조 공정에 관한 기존 연구를 바탕으로, 유한요소해석을 활용한 열-기계 이력 예측과 이를 미세조직 및 최종 물성 예측으로 확장하기 위한 연구동향을 폭넓게 고찰한다. 구체적으로는 고온 유동거동 및 구성방정식, 열-기계 연성 유한요소해석 기법, 재결정 및 결정립 성장 모델링, 그리고 17-4PH 강의 상변태와 석출경화 거동을 고려한 미세조직-물성 예측에 관한 연구를 소개한다. 기존 연구는 유동응력 또는 단일 공정변수 예측에 집중되어, 실제 다단 단조공정의 국부 열-기계 이력을 열처리 후 기계적 특성까지 정량적으로 연계한 사례는 상대적으로 제한적이다. 본 발표에서는 이러한 연구동향과 한계를 종합하고 공정 해석, 미세조직 모델 및 데이터 기반 예측기법을 통합하는 접근 방향을 모색하고자 한다.

[항공엔진3-3 | 14:00]

17-4PH 강의 물성평가 및 성형공정 해석 연구동향: 이상곤*(한국생산기술연구원), 전지환(한국생산기술연구원, 부산대학교), 황선광(한국생산기술연구원), 윤재현(한국생산기술연구원, 영남대학교), 이성윤, 이인규(한국생산기술연구원), 권혁준, 송덕용(한화에어로스페이스)

Keywords: 17-4PH, 물성평가, 성형공정 해석

17-4PH 소재는 항공엔진용 정지부 구조물 소재부품 제조에 적용되는 대표적인 소재이다. 일반적으로 VIM-VAR 이중 진공 용해 공정으로 17-4PH 잉곳을 제조한 후 자유단조공정을 통해 항공부품 제조를 위해 환봉 형태의 빌렛을 제조한다. 제조된 빌렛은 단조 혹은 기계가공을 통해 항공부품으로 제조된다. 17-4PH 소재가 적용된 항공부품 제조를 위해서는 소재의 물성평가와 성형해석을 통한 공정 분석 및 설계가 매우 중요하다. 본 연구에서는 개발 예정인 17-4PH 소재를 적용한 항공엔진용 부품 제조를 위한 사전 연구로서 소재의 물성평가 및 성형공정 해석에 관한 연구 동향을 분석하였다.

[항공엔진3-4 | 14:15]

항공엔진 하우징 구조용 17-4PH 석출경화형 스테인리스강의 소재 물성 데이터 베이스 구축 전략 : 이정훈*, 강태훈, 이창희, 배동화, 정수진, 이영광, 오재호, 이일육, 양현욱, 김재우((재)포항산업과학연구원), 손석수(고려대학교)

Keywords: 17-4PH STS, MMPDS, 물성시험, 피로시험, 크리프 시험

항공엔진 하우징과 같은 주요 구조부품의 신뢰성 확보를 위해서는 소재 규격에서 제시하는 최소 요구 물성뿐만 아니라, 실제 설계에 적용 가능한 통계 기반의 소재물성 데이터 확보가 필수적이다. 특히 항공우주 분야에서 활용되는 MMPDS(Metallic Materials Properties Development and Standardization)는 다양한 제조 이력과 제품 형상, 시험 조건으로부터 확보된 물성 데이터를 통계적으로 분석하여 설계 허용값(design allowable)을 제시하는 대표적인 소재 데이터 체계이다. 본 연구에서는 항공엔진 하우징 구조용 소재로 적용되는 17-4 석출경화형 스테인리스강을 대상으로 MMPDS의 소재물성 데이터 구축 개념을 기반으로 한 체계적인 데이터베이스 구축 전략을 제안하고자 한다. 이를 위해 소재의 용해 및 제조 로트, 제품 형상, 시편 채취 방향 및 석출경화 열처리 조건 등 물성 변동에 영향을 미치는 주요 인자를 구분하여 시험 매트릭스를 구성하고, 상온 및 고온 인장특성을 중심으로 탄성계수, 항복강도, 인장강도 및 연신율 등의 기본 기계적 물성을 확보한다. 또한 항공 구조재의 손상허용설계에 활용할 수 있도록 피로특성 및 파괴인성 등 내구·손상 관련 물성 데이터를 단계적으로 구축하고, 시험 데이터의 분산성과 로트 간 변동성을 분석하여 통계적 신뢰성을 평가할 예정이다. 확보된 데이터는 MMPDS의 통계 기반 소재 허용값 개념을 참고하여 데이터의 유효성 검증, 이상치 평가 및 통계적 하한값 산출이 가능한 형태로 표준화함으로써 향후 A-basis 및 B-basis 수준의 설계 허용값 도출을 위한 기반 데이터로 활용하고자 한다. 본 연구를 통해 국내 항공엔진 구조부품용 17-4PH 스테인리스강에 대한 소재–공정–물성 연계 데이터 체계를 확립하고, 향후 국산 항공용 금속소재의 설계 적용 및 소재 인증을 지원할 수 있는 소재물성 데이터베이스 구축 기반을 마련하고자 한다.

[항공엔진3-5 | 14:30]

MMPDS 기반 항공엔진 구조부품용 17-4PH 재료허용치 산출을 위한 통계적 방법론: 김영순*(경상국립대학교)

Keywords: 재료허용치, MMPDS, 17-4PH 스테인리스강, A-basis/B-basis, 항공엔진 구조부품

항공엔진 구조부품 설계에는 소재 물성의 산포를 반영한 통계 기반 재료허용치가 요구되며, 그 산출 절차는 MMPDS(Metallic Materials Properties Development and Standardization) 핸드북에 규정되어 감항인증 시 구조건전성 입증의 근거로 활용된다. 그러나 국내 개발 소재는 규격이 요구하는 조성과 기계적 성질을 만족하더라도 설계에 적용할 재료허용치가 확보되지 않아 부품 적용에 제약이 따른다. 본 연구에서는 항공엔진 하우징 구조용 17-4PH 석출경화형 스테인리스강을 대상으로 MMPDS 기반 재료허용치 산출을 위한 통계적 방법론을 제시한다. 재료허용치는 동일한 시험 데이터에 대해서도 적용 기준에 따라 값이 달라진다. A-basis와 B-basis, S-basis는 서로 다른 생존확률(population coverage)과 신뢰수준(confidence)에 대응하며, 요구되는 표본 수와 로트 구성 조건 또한 상이하다. 이에 본 연구에서는 기준별 산출 개념과 입력요건(표본 수, 분포 가정, 로트 구성, 데이터 이력)을 표준 템플릿으로 정의하고, 동일 데이터에 대해 기준별 허용치를 병렬 산출하여 그 차이를 정량화한다. 이를 통해 기준 선택이 설계 보수성과 필요 시험 수량에 미치는 영향을 제시하고, 감항인증 자료 제출 시 요구 수준과의 정합성을 함께 검토한다. 산출 절차는 모집단 정의, 이상치 검정, 분포 적합도 평가, 로트 통합성 검정, 산출법 결정의 순서로 구성하며, 산출법은 Direct, Regression, Reduced Ratio로 구분하여 적용 조건을 정의한다. 한편 산출 절차의 타당성은 실측 데이터만으로 확인하기 어렵다. 실측 데이터는 모집단의 참값을 알 수 없어 결과의 정오를 판단할 기준이 없기 때문이다. 이에 모집단 특성이 알려진 시뮬레이션 데이터를 이용해 절차를 검증하는 방안을 다룬다. 제품형태와 시험 방향, Heat 구조를 반영해 데이터를 구성하고 산출 결과를 참값과 대조하여 정합성을 확인하며, Heat 구조를 층화한 경우와 통합한 경우를 비교해 로트 구조가 산출 결과에 미치는 영향을 검토한다. 정립된 절차는 향후 확보되는 시험 데이터에 즉시 적용할 수 있고 데이터베이스 시험계획의 적정성 검토와 필요 시험 수량 산정의 근거로 활용될 수 있으며, 발표에서는 기준별 산출 비교 사례와 검증 결과를 함께 제시한다.

[항공엔진4-1 | 14:55]

항공엔진용 고청정 Master Ingot 제조기술 개발 현황: 박규민*((주)한스코)

Keywords: 항공엔진용 부품, Ni계 초내열합금, Master Ingot, 고청정 모합금, 진공유도용해(VIM)

항공엔진은 크게 압축기, 연소실, 터빈으로 구성되며, 이러한 엔진에 사용되는 Ni계 초내열합금이 적용된 주조품은 고온·고압·고속 환경에서 장시간 운용되므로, 원소재인 Master Ingot의 청정도와 조성 정밀도가 정밀주조품의 품질에 직접적인 영향을 미친다. 그러나 현재 국내 항공용 Master Ingot의 경우, 제조 기술이 개발 단계이며 인프라 부족으로 대부분 해외 수입에 의존하고 있어, 핵심 소재의 국산화가 시급한 상황이다. 본 발표에서는 그동안 고청정 Master Ingot 제조를 통해 축적해 온 원자재 관리, VIM 용해/정련 및 잉곳 품질평가 기술을 소개하고, 항공엔진용 Mar-M-247 고청정 Master Ingot 제조에 도입·적용하는 개발 방향을 제시하고자 한다. 이를 통해 항공용 품질 수준의 청정도와 성분 균일성을 확보하여, 후속 정밀주조 부품 개발로 이어지는 안정적인 소재 공급 기반을 마련하고자 한다. 본 발표에서 이러한 자체 기술의 항공용 적용 전략과 추진 방향을 소개하고, 국산화 실현을 위한 향후 방향에 대해 제시하고자 한다

[항공엔진4-2 | 15:10] 초청강연

High-Temperature Damage Mechanisms and Evaluation Techniques for Nickel-Based Superalloys : Ha-Seong Baek, Tea-Sung Jun*(Incheon National University)

Keywords: Ni-based superalloy, creep, low-cycle fatigue, creep-fatigue

Nickel-based superalloys are widely used in critical high-temperature components such as gas turbine blades and disks, where elevated temperatures, cyclic loading, long-term hold loading, and oxidizing environments interact in complex ways. Consequently, component life is largely determined not by single creep or fatigue, but by localized damage resulting from low-cycle fatigue (LCF), creep-fatigue interactions, and the interaction between the microstructure and the environment. Based on recent research results, this presentation reviews the major high-temperature damage mechanisms of Ni-based superalloys and the development trends of evaluation technologies to elucidate them. The γ/γ′ or γ/γ″ microstructure, precipitate size and shape, grain boundaries, carbides, and manufacturing defects govern deformation, crack initiation, and propagation. Furthermore, with increasing temperature, the major deformation mechanisms shift from γ′ shearing and planar slip to cross-slip, Orowan bypass, and thermally activated dislocation climb. Furthermore, prolonged exposure to elevated temperatures combined with cyclic and sustained loading promotes γ′ coarsening and rafting, stress relaxation, creep cavity formation, dislocation network evolution, and localized deformation redistribution. In polycrystalline and powder metallurgy alloys, the effects of grain-boundary oxidation and cavitation intensify with increasing dwell time, potentially resulting in a transition from transgranular to intergranular cracking and an accelerated rate of fatigue crack growth. On the other hand, under some high-temperature creep-fatigue conditions, cyclic life and mechanical response have been reported to saturate with increasing dwell time, demonstrating the limitations of evaluating damage based solely on simple cycle life. Evaluation technologies are expanding beyond conventional strain-controlled fatigue and creep-fatigue tests and fractography to include the quantification of local damage such as KAM, IQ, and GND using SEM, TEM, EBSD, and TKD, as well as the measurement of crack-tip deformation using high-temperature in-situ SEM and digital image correlation (DIC). Multiscale life prediction is also being developed by combining crystal plasticity finite element (CPFE) analysis with grain-boundary cavity models. This approach is evolving to directly link macroscopic life with microstructural damage and to incorporate time-dependent deformation and environmental effects into life assessment.

[항공엔진4-3 | 15:35] 조청강연

항공엔진용 IN625 및 Mar-M-247 주조재의 표면층 미세조직과 주조 두께 영향 분석: 선행연구 고찰 및 시험 방법론: 전종배(동아대학교), 양희평(동아대학교, 포항공과대학교), 조중욱(포항공과대학교)

Keywords: IN625, Mar-M-247, 정밀주조, 표면층 미세조직, 주조 두께

항공 가스터빈 엔진의 연소기 및 터빈노즐과 같은 고온 구조부품은 고온의 연소가스, 반복적인 열이력 및 기계적 하중에 노출되므로 우수한 고온강도와 내산화성이 요구된다. IN625와 Mar-M-247은 이러한 요구조건을 만족하는 대표적인 Ni기 초내열합금이지만, 실제 주조부품에서는 표면층의 미세조직과 부위별 두께 차이에 의해 기계적 특성과 장기 신뢰성이 달라질 수 있다. 주조 및 후속 기계가공 과정에서 형성된 표면 잔류변형은 고온 노출 중 재결정층 유발할 수 있으며, 새롭게 형성된 결정립계는 산소와 합금원소의 확산경로로 작용하여 Intergranular attack (IGA), 합금원소 고갈 및 석출상 변화를 촉진할 수 있다. 특히 IN625에서는 Cr 고갈과 δ-Ni3Nb 및 탄화물의 재분포가 보고되었으며, γ' 석출강화형 Mar-M-247에서는 Al의 산화물 형성에 따른 γ'-depleted zone이 형성되어 표면부의 국부 강도와 고온 손상저항이 저하될 가능성이 있다. 또한 주조품의 두께는 응고 중 냉각속도와 국부 응고시간을 변화시키며, 이에 따라 결정립 크기, 이차수지상 간격, 미세편석, 탄화물 및 기공의 크기와 분포가 달라질 수 있다. 본 연구에서는 IN625 및 Mar-M-247과 유사 Ni기 초내열합금에 관한 선행연구를 바탕으로 표면층 미세조직과 주조 두께가 기계적 특성에 미치는 영향을 정리하고, 향후 시험을 위한 평가 방법론을 수립하였다. 표면층은 SEM/EDS 및 EBSD 분석을 통해 산화층과 입계 산화 깊이, 재결정층 깊이, 결정립 특성 및 원소 고갈 영역을 정량화하며, 두께별로 결정립 크기, 이차수지상 간격, 기공, 탄화물 및 주요 합금원소의 분포를 비교하고자 한다. 기계적 특성은 IN625의 상온 인장시험과 Mar-M-247의 고온 응력파단시험을 통해 평가하며, 표면층 및 두께에 따른 미세조직 변수와 기계적 특성 간의 상관관계를 규명하기 위한 시험체계를 제시하고자 한다.

[항공엔진4-4 | 16:00]

항공엔진 구조물용 정밀주조 Mar-M-247, IN625 소재 특성평가 및 DB 구축: 정중은*(한국재료연구원), 심영래(한국재료연구원, 동아대학교), 김인수, 도정현, 윤대원, 이상원, 최백규, 정인용(한국재료연구원)

Keywords: 항공엔진, 초내열합금, 진공정밀주조, Mar-M-247, IN625

본 연구에서는 국산 Mar-M-247 및 IN625 잉곳과 이를 활용한 항공엔진 정밀주조 부품 개발을 위해 두 합금의 소재·주조 특성을 조사하고, 설계 및 수명평가에 활용 가능한 재료특성 DB를 구축하고자 한다. Mar-M-247은 Al, Ti, Ta 등에 의해 형성되는 높은 체적분율의 γ′ 석출상과 W, Co, Cr 등의 고용강화 효과를 이용하는 주조용 Ni기 초내열합금으로, 우수한 고온 강도와 크리프 저항성 및 내산화성을 바탕으로 가스터빈 블레이드와 노즐 등 고온부 정밀주조 부품에 적용되어 왔다. IN625는 Ni-Cr-Mo-Nb계 고용강화형 초내열합금으로 내식·내산화성, 용접성이 우수하여 판재, 봉재, 관재 등 단련재 형태로 널리 사용된다. 그러나 항공엔진 연소기 케이스와 같이 박육·곡면·리브 등의 복잡 형상을 갖는 부품은 성형, 기계가공 및 용접 공정이 복잡하므로, 형상 일체화와 접합부 감소 등 공정 단순화를 위해 정밀주조 기술의 적용 가치가 크다. 또한 단련재 중심으로 축적된 IN625 물성자료는 응고편석, 탄화물 및 Nb/Mo 농축상, 주조결함과 결정립 조직의 영향을 받는 정밀주조재에 직접 적용하기 어려워 주조재 고유의 물성 검증이 필요하다. 먼저 외산 Mar-M-247 잉곳 별주 시편을 기준으로 상온 및 고온 환경에서 물리적 특성과 인장, 크리프 파단·변형, 저주기·고주기 피로, 열기계피로(TMF), 반복산화 특성을 확보하고, 이후 동일한 평가체계를 국산 MM247 잉곳에 적용하여 외산 소재 대비 성능 수준과 재현성을 비교·검증할 계획이다. 이러한 DB 구축에 따라 주조공정과 미세조직에 따른 특성 변화를 정량적으로 파악할 수 있으며, 국산 잉곳과 부품의 성능 검증, 설계 신뢰성 확보 및 항공엔진 고온부품 소재·제조기술 자립화를 위한 산업적 기반으로 활용될 것으로 기대된다.

[항공엔진4-5 | 16:15]

항공 가스터빈 엔진용 구조물 고강도 소재부품 사업의 기술사업화를 위한 특허 전략: 김성곤*, 손지영*(한국항공우주기술연구조합(KATRA))

Keywords: IP-R&D, 특허 전략, 지적 재산권, 특허 빅데이터

항공 가스터빈 엔진용 구조물 고강도 소재부품은 고도의 소재·공정기술과 장기간의 신뢰성 검증이 요구되는 대표적인 기술집약형 분야이다. 국내 기업의 기술경쟁력 확보와 글로벌 공급망 진입을 위해서는 연구개발 단계에서부터 특허 및 사업화를 연계한 체계적인 지원전략 마련이 필요하다. 그러나 다수의 국내 소재부품 개발기업은 연구개발 역량에 비해 자체적인 특허 분석과 글로벌 시장·기술 정보 확보에 한계가 있어, 전문기관과의 연계를 통한 특허 분석 및 사업화 지원체계 구축이 필요하다. 본 발표에서는 「항공 가스터빈 엔진용 구조물 고강도 소재부품 개발사업」을 대상으로 연구개발 단계부터 사업화 단계까지 연계되는 특허 기반 연구개발 지원체계를 제시한다. 특히 국내외 기술·시장 동향 및 특허 분석, 핵심 기술 및 경쟁사 특허 포트폴리오 분석 등을 통해 기업별 기술개발 방향과 지식재산 확보 전략을 도출하여, 국내 소재부품 개발기업의 글로벌 공급망 진입 및 기술사업화 촉진하는 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

제7회 수소경제 구현을 위한 수소 운송 및 저장 소재 심포지엄
Room 3층 컨퍼런스, 10월 29일

[수소경제1-1 | 08:30] 초청강연

미래 조선해양 산업을 위한 액체수소 저장기술 및 연구개발 동향 : 이제명(부산대학교 수소선박기술센터 , 부산대학교 조선해양공학과)

Keywords: Liquid Hydrogen, Cryogenic Storage, Hydrogen Embrittlement, Mechanical Properties, Hydrogen Ship

탄소중립 실현과 해운산업의 온실가스 감축 요구가 강화됨에 따라 수소는 미래 조선해양 산업의 주요 친환경 에너지원으로 주목받고 있다. 특히 액체수소는 기체수소에 비해 높은 체적 에너지 밀도를 가지므로 대용량 저장 및 장거리 운송에 유리하며, 향후 수소 추진선박, 액체수소 운반선 및 해상 수소 공급망 구축을 위한 핵심 에너지 매체로 활용될 것으로 기대된다. 그러나 액체수소는 약 20 K의 극저온 환경에서 저장 및 취급되어야 하므로 극저온 환경에서의 소재 물성 변화와 수소취성, 저장탱크의 열침입 및 증발가스 발생, 단열시스템의 장기 신뢰성, 그리고 극저온 기자재의 성능 및 안전성 확보 등 다양한 기술적 과제에 대한 종합적인 검토가 요구된다. 본 발표에서는 미래 조선해양 산업에서의 액체수소 활용 전망과 함께 액체수소 저장시스템 구현을 위해 요구되는 주요 핵심기술 및 관련 연구개발 동향을 살펴보고, 수소선박기술센터에서 수행 중인 연구 사례를 소개한다. 주요 내용으로는 극저온 및 수소 환경에서 사용되는 금속 소재의 기계적 특성과 수소취성 평가, 저장탱크의 열적 성능 및 증발가스 특성 평가 등을 다룬다. 또한 액체수소 저장·공급시스템에 적용되는 센서, 배관 등 주요 극저온 기자재에 대한 성능 및 신뢰성 검증과 실제 액체수소 환경을 고려한 시험평가 기술 개발 사례를 소개한다. 본 발표를 통해 조선해양 분야에서 요구되는 액체수소 저장기술의 주요 기술적 과제를 살펴보고, 향후 액체수소 기반 조선해양 시스템의 실증 및 상용화를 위한 연구개발 방향을 제시하고자 한다.

[수소경제1-2 | 08:50] 초청강연

수소 가스 환경에서 API 강재 파이프라인의 반복 가압 내구성에 관한 실험적 연구: 박재영*, 백운봉, 오선근, 배경오(한국표준과학연구원)

Keywords: 파이프라인, 수소취성, 반복 내구성

수소 운송에 사용되는 파이프라인은 수명 기간 동안 반복적인 가압과 감압을 겪게 됩니다. 이러한 반복 하중은 시간이 지남에 따라 피로 파괴로 이어질 수 있습니다. 따라서 고압 수소 파이프라인에 주로 사용되는 API 강재와 같은 소재의 피로 균열 성장 거동을 정확히 평가하는 것은 수소 운송 시스템의 안전성과 신뢰성을 확보하는 데 필수적입니다. 일반적으로 재료의 피로 균열 성장 속도는 실험실 시편을 통해 측정되며, 그 결과로 얻은 균열 성장 데이터를 수치 해석에 적용하여 수명을 예측합니다. 이후 실제 파이프라인을 대상으로 반복 가압 및 감압 시험을 수행하여 해석 결과를 검증합니다. 본 연구에서는 실물 크기의 파이프라인 시편에 인공 결함을 도입하고, 반복적인 수소 가스 가압 및 감압 시험을 수행하여 수치 해석 예측 결과와 비교 및 평가하였습니다. 이를 위해 파이프라인 외부에서 결함 크기 및 균열 진전 거동 등의 파라미터를 측정할 수 있는 모니터링 시스템을 설계하였습니다. 또한, 시험 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 압력 범위와 수소 농도를 포함한 실제 사용 환경을 충실히 재현할 수 있도록 실험 장비를 세심하게 설계하였습니다. 본 연구의 결과는 고압 수소 파이프라인의 피로 수명 예측 모델 및 건전성 평가 방법론 개발에 중요한 기술적 지침을 제공할 것으로 기대됩니다.

[수소경제1-3 | 09:10] 초청강연

수소화물의 능동적 제어: 공간적 형성 유도와 전기화학적 제거: 김경식*(국립금오공과대학교), C.C. Tasan(MIT)

수소화물은 금속 내 수소의 중요한 존재 형태로, 재료의 기계적·기능적 특성에 큰 영향을 미친다. 수소화물의 형성은 재료의 취화와 성능 저하를 유발할 수 있는 반면, 수소를 안정적으로 저장하고 방출하기 위한 수단으로 활용될 수도 있다. 따라서 수소화물을 단순히 억제하거나 제거하는 것을 넘어, 그 형성과 분해를 목적에 따라 능동적으로 제어하는 접근이 중요하다. 본 연구에서는 α+β 타이타늄 합금을 모델 소재로 활용하여, 수소화물의 형성 위치를 제어하고 이미 형성된 수소화물을 제거하는 두 가지 능동적 제어 전략을 제시한다. 먼저, 간단한 국부 표면 처리를 통해 금속 내부의 수소 이동을 유도하고 수소화물의 형성 위치를 공간적으로 제어할 수 있음을 보였다. 이를 통해 수소화물의 분포를 조절하고, 이에 따른 기계적 거동의 변화를 분석하였다. 또한 합금 내에 이미 형성된 수소화물을 상온에서 전기화학적으로 분해하고 내부 수소를 추출함으로써, 별도의 고온 열처리 없이 미세조직과 기계적 특성을 회복할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 수소화물을 단순히 형성되거나 제거되는 상이 아니라, 형성 위치를 선택적으로 유도하고 필요에 따라 분해·제거할 수 있는 능동적 제어 대상으로 다룰 수 있음을 보여준다. 본 발표에서는 수소화물의 공간적 형성 제어와 전기화학적 제거의 주요 기구를 소개하고, 이를 바탕으로 금속 내 수소 및 수소화물 거동을 제어하기 위한 새로운 가능성을 논의한다.

[수소경제1-4 | 09:30] 초청강연

수소저장합금에서 수소에너지 시스템으로: 고체수소 저장기술의 실증과 사업화: 방일호*((주)성원기업)

Keywords: 수소저장합금, 금속수소화물, 고체수소 저장, 수소저장시스템, 열관리, 동해 실증, 수전해, 연료전지, 수소에너지시스템, 사업화

탄소중립과 수소경제로의 전환이 가속화됨에 따라 수소의 생산뿐만 아니라 안전하고 효율적인 저장 및 공급 기술의 중요성이 더욱 높아지고 있다. 특히 수소저장합금을 이용한 고체수소 저장기술은 금속수소화물의 가역적인 수소 흡·방출 특성을 활용하여 비교적 낮은 압력에서 수소를 저장할 수 있으며, 저장 과정의 안전성과 장기간 운용 가능성을 기반으로 분산형 에너지시스템, 발전, 조선·해양 등 다양한 산업 분야로의 적용 가능성이 검토되고 있다. 고체수소 저장기술을 실제 산업 규모로 확대하기 위해서는 저장합금 자체의

수소저장 특성뿐만 아니라 대용량 저장합금의 활성화, 수소 흡·방출 과정에서 발생하는 열의 효과적인 관리, 저장용기 내부의 온도 균일화, 수소 공급압력 및 유량 제어, 반복 운전에 따른 성능 안정성 등 시스템 차원의 기술 확보가 필요하다. 특히 저장용량이 증가할수록 합금층 내부의 열전달 및 물질전달 특성이 전체 시스템의 충·방전 성능을 결정하는 주요 요소가 되므로, 저장용기와 내부 열교환 구조 및 제어시스템을 통합적으로 설계하는 것이 중요하다. 본 발표에서는 수소저장합금의 기본적인 수소 흡·방출 특성에서 출발하여 이를 대용량 고체수소 저장시스템으로 확장하기 위한 저장용기, 열관리 및 자동제어 기술의 개발 방향을 소개한다. 또한 동해 지역에서 추진되고 있는 수소 생산·저장·활용 전주기 실증 환경을 기반으로 고체수소 저장시스템의 현장 적용과 운전방안을 살펴보고, 수전해를 통해 생산된 수소의 저장과 연료전지 공급을 연계하는 과정에서 고체수소 저장시스템이 수행할 수 있는 에너지 버퍼 및 안정적 수소공급 기능에 대해 논의한다. 아울러 실증을 통해 확보되는 운전 경험과 기술적 과제를 바탕으로 고체수소 저장기술의 산업적 활용 가능성을 검토한다. 특히 재생에너지 연계 수소에너지시스템을 비롯하여 발전용 수소저장, 조선·해양 분야, 분산형 에너지저장 및 비상전원 등 대용량·장시간 수소저장이 요구되는 분야를 중심으로 기존 수소저장 방식과 차별화할 수 있는 적용 영역을 제시하고자 한다. 이를 통해 수소저장합금이라는 소재 기술이 저장용기와 열관리·제어기술을 거쳐 실제 수소에너지 시스템으로 확장되는 과정을 살펴보고, 고체수소 저장기술의 실증 성과와 향후 대용량화 및 사업화를 위한 기술적·산업적 방향을 제시한다.

[수소경제1-5 | 09:50] 조청강연

PEM 수소에너지 시스템용 금속 분리판의 환경 인자에 따른 전기화학적 부식 거동 및 전도성 내식 코팅의 영향: 김혜진*(한국공학대학교)

Keywords: PEM 수소에너지 시스템, 금속 분리판, 전기화학적 부식, 전도성 내식 코팅, 부동태 피막, XPS

PEM 수소에너지 시스템에서 금속 분리판은 우수한 전기전도성, 기계적 건전성 및 내식성이 동시에 요구되는 핵심 구성요소이며, 특히 산성 및 고전위의 운전 환경에서는 금속 표면의 부식과 부동태 피막의 안정성이 장기 내구성과 시스템 성능에 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 PEM 금속 분리판 후보 소재인 SUS316, SUS470 및 CP-Ti를 대상으로 환경 인자 변화에 따른 전기화학적 부식 거동을 비교하고, Au 및 C 기반 전도성 내식 코팅의 적용 효과를 분석하였다. 다양한 PEM 모사 환경에서 개방회로전위 측정, 동전위 분극시험 및 전기화학 임피던스 분광법(EIS)을 수행하여 소재별 부식전위, 부식전류밀도, 부동태 거동 및 계면 저항 특성을 평가하였다. 또한 전기화학적 부식 시험 전·후 시편에 대해 X-ray photoelectron spectroscopy(XPS) 분석을 실시하여 표면에 형성되는 산화물 및 수산화물의 화학적 상태와 조성 변화를 분석하고, 환경 조건 및 표면 코팅이 부동태 피막의 형성 및 안정성에 미치는 영향을 고찰하였다. 이를 통해 SUS316, SUS470 및 CP-Ti의 소재별 전기화학적 부식 특성과 표면 피막 거동을 비교하고, 전도성 내식 코팅의 종류 및 환경 인자에 따른 계면 반응과 표면 변화의 상관관계를 체계적으로 분석하고자 하였다. 본 연구는 PEM 수소에너지 시스템용 금속 분리판의 소재 선정과 표면 코팅 설계를 위한 기초적인 전기화학적 및 표면분석 자료를 제공하는 것을 목적으로 한다.

수소재료
Room 3층 컨퍼런스, 10월 29일

[수소1-1 | 10:30]
Predicting plateau slope in metal hydrides from first-principles: hydrogen energy and charge distributions in $TiMn_2$-based alloys: Jae Hur(Korea univ.), Ryun-Ho Kwak(Korea Institute of Industrial Technology), Seo-Hui Park(Korea univ.), Tae-Wook Na(Korea Institute of Industrial Technology), Guanglong Xu(Nanjing Tech University), Hyung-Ki Park*(Korea Institute of Industrial Technology), Won-Seok Ko*(Korea univ.)
Keywords: Hydrogen storage alloys, C14 Laves phase, Ti-Mn-based alloys, Hydrogen solution energy, Plateau slope, Density functional theory

Plateau slope of the pressure–composition–temperature (PCT) curve critically determines the effective hydrogen storage capacity of metal hydrides, yet a practical first-principles methodology for its prediction has not been established. Here we demonstrate that the standard deviations of hydrogen solution energies and hydrogen Bader charges, both evaluated from the fully hydrogenated state, serve as first-principles descriptors for plateau slope behavior in $TiMn_2$-based C14 Laves phase hydrides. Site-specific solution energies are obtained by individually removing hydrogen atoms from chemically disordered supercells; this removal-based approach maps onto the desorption PCT process through the van't Hoff relation under para-equilibrium conditions, where a frozen metal sublattice creates energetically heterogeneous subsystems whose sequential hydrogen release manifests as a sloped plateau. The methodology is validated against both literature data for $Ti_{0.94}Zr_{0.06}(Mn, X)_2$ quaternary alloys (X = Ni, Co, Al, Cr, V) and new PCT measurements of off-stoichiometric Ti-Mn binary alloys, confirming that wider energy distributions consistently correspond to steeper plateaus. The Bader charge descriptor captures the same compositional trends as the energy descriptor with no additional DFT calculations beyond the hydride relaxation already required for enthalpy evaluation, providing an efficient screening tool for alloy design. These results extend first-principles prediction of PCT characteristics from plateau pressure to plateau slope.

[수소1-2 | 10:45]
AB2계 수소저장합금의 수소화에 따른 부피 팽창 비교 분석: 강규병, 백민아(한국생산기술연구원, 고려대학교), 최병철, 하태준(한국생산기술연구원), 김동회*(고려대학교), 나태욱*(한국생산기술연구원)
Keywords: 수소저장합금, Laves phase, 수소화, 부피 팽창, lattice parameter

수소저장합금은 특정 온도와 압력에서 수소를 흡수 및 방출할 수 있는 소재로, 높은 부피저장밀도와 저압에서 저장이 가능하다는 장점으로 수소 저장 및 압축 시스템에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중 AB2계 수소저장합금은 C14 Laves상을 기반으로 우수한 수소 흡방출 특성을 가지며, 수소 저장 및 금속 수소화물 기반 비기계식 수소 압축 시스템의 소재로 활용될 수 있다. 수소저장합금은 수소를 흡수하는 과정에서 금속 격자 내부로 수소 원자가 침입함에 따라 격자상수 및 단위격자의 부피가 증가하며, 수소 방출 과정에서는 금속 격자 사이에 있는 수소 원자가 빠져나와 다시 수축하는 거동을 나타낸다. 이러한 반복적인 부피 변화는 합금의 미분화와 더불어 실제 수소 저장 용기 및 금속수소화물 반응기의 소재 충진량과 내부 공간 설계에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 수소저장합금을 이용한 시스템을 제작함에 따라 수소화에 따른 결정구조 수준의 부피 변화와 실제 대용량 소재에서 발생하는 부피 변화의 관계를 이해하는 것이 중요하다. 일반적으로 수소저장합금의 수소화에 따른 변화는 XRD를 통해 분석할 수 있으며, 수소 흡수에 달느 격자 상수의 변화를 이용하여 결정학적 부피 변화를 확인할 수 있다. 그러나 XRD를 통해 확인되는 단위격자 수준의 부피 변화가 실제 반응기에 충진된 벌크 상태의 수소저장합금에서 나타나는 거시적인 부피 변화와 동일하게 나타나는지에 대해 추가적인 분석이 필요하다. 본 연구에서는 AB2계 수소저장합금의 수소화에 따른 부피 팽창 거동을 분석하기 위해 in-situ XRD와 직접 제작한 부피 측정 장비를 이용하여 비교 분석하였다. in-situ XRD 분석을 통해 수소 압력 변화에 따른 결정구조 및 격자상부 변화를 관찰하고, 이를 바탕으로 수소화에 따른 결정학적 부피 변화를 분석하였다. 또한, 제작한 부피 측정 장비를 이용하여 일정량의 수소저장합금에 수소를 흡수시켰을 때 발생하는 부피 변화를 측정하였다. 이를 통해 결정학적 부피 팽창과 벌크 상태의 부피 팽창 특성 변화를 분석하고자 하였다.

[수소1-3 | 11:00]
ISM(Induction Skull Melting) 공정으로 제조된 $TiFe_{0.78}Mn_{0.2}Cr_{0.02}$ 수소저장합금 잉곳의 냉각속도에 따른 비평형 미세조직 및 상분율 거동: 선현덕(한국생산기술연구원, 고려대학교), 진시원(한국과학기술연구원, 서울대학교), 심재혁*(한국과학기술연구원), 이준호*(고려대학교), 하태준*(한국생산기술연구원)
Keywords: 수소, 수소저장합금, 미세조직, 상분율, TiFe

수소 저장 합금은 기체 저장 방식에 비해 체적 및 중량 밀도가 우수하고 안전성이 높아 상업적 활용 가능성이 매우 크고, 결정구조 및 조성에 따라 AB계, AB2계, AB5계, BCC계로 분류되며 이 중 AB계 TiFe 합금은 상온·상압에서 수소 흡방출이 용이하고 원소재 가격이 저렴하여 유망한 수소저장합금으로 주목받고 있으나, 표면 산화막에 의한 활성화의 부재로 인해 상용화의 한계가 있다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위해 Fe 를 Mn과 Cr로 치환하여 C14 Laves 상을 형성하여 활성화를 용이하게 하는 방법을 사용하였으며, $TiFe_{0.78}Mn_{0.2}Cr_{0.02}$ 조성을 대상으로 ISM(Induction Skull Melting) 공정을 이용해 약 15 kg 규모의 잉곳을 제조하였다.

일반적으로 Thermo-Calc와 같은 평형 상태도 계산은 최종 상분율을 예측하는 데 활용되지만, 실제 대형 잉곳 주조 시에는 부위별 냉각속도 차이에 의해 비평형 응고 거동이 나타나며 이는 평형 예측과 상이한 결과를 초래할 수 있다. 본 연구에서는 ISM 잉곳 내 서로 다른 냉각 환경을 가진 세 부위(turndish, bottom, center)를 대상으로 XRD, SEM-EDS, EBSD 분석을 통해 응고 속도가 조성 편차, 미세조직 발달, 특히 BCC B2 및 C14 Laves 상분율 형성에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

[수소1-4 | 11:15]

Co 및 Cu 치환에 따른 $TiFe_{0.7}Mn_{0.2}M_{0.1}$ (M = Co, Cu) 합금의 수소저장특성 연구: 곽륜호(한국생산기술연구원, 고려대학교), 고원석(고려대학교), 남윤수(한국생산기술연구원), 손석수*(고려대학교), 박형기*(한국생산기술연구원)

Keywords: 수소저장합금, Pressure-Composition-Temperature, 상분리, 평탄압

최근 지구온난화로 인한 기후 변화 위기에 대응하고 탄소중립 실현을 위해 친환경 에너지인 수소 기술이 주목받고 있다. 특히 수소의 효율적이고 안전한 저장 기술 확보는 핵심 과제이다. 기존의 고압 가스나 액화 수소와 같은 물리적 저장 방식은 높은 압력과 저장 한계를 지닌다. 반면 수소저장합금은 금속 수소화물 형태로 수소를 저장하여 높은 안전성과 우수한 체적 밀도를 제공한다. 또한 장기적으로 반영구적 저장이 가능하여 차세대 수소 저장 소재로 활발히 연구되고 있다. 본 연구에서는 가격이 저렴하며 상온 영역에서 우수한 수소 저장 특성을 갖는 합금인 TiFe 기반 합금에 Co, Cu 첨가에 따른 미세조직 및 수소저장특성 변화에 대해 분석하고자 하였다. $TiFe_{0.7}Mn_{0.2}M_{0.1}$ (M = Co, Cu) 합금을 VAR을 통해 제조하였으며, EPMA (Electron Probe Microanalysis) 분석을 통해 치환 원소에 따른 미세조직을 정성 및 정량적으로 비교 분석하였다. 또한 XRD를 분석하고 패턴을 인덱싱하여 각 상에 대한 격자 상수 및 반가폭을 도출하였다. 각 합금들의 Pressure-Composition-Temperature를 측정하고 미세조직적 차이와 연관 지어 치환원소인 Co, Cu 가 수소저장특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 추가적으로 실제 조성을 반영한 DFT (Density Functional Theory) 계산을 수행하여 수소화물 형성 엔탈피 변화와 격자상수를 도출하였으며, 열역학적 계산을 통해 예측한 방출 평탄압을 실측 평탄압과 비교하였다.

[수소1-5 | 11:30]

AB_2계 수소저장합금의 톨루엔 수소화 촉매 거동: 톨루엔 침지 산화 방지 효과: 이재용(한국과학기술연구원, 성균관대학교), 진시원(한국과학기술연구원, 서울대학교), 심재혁*(한국과학기술연구원), 김윤석(성균관대학교), 박은수(서울대학교)

Keywords: AB_2 수소저장합금, 액상유기수소운반체, 톨루엔

액상유기수소운반체(Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC) 기술은 우수한 수소 저장 밀도와 더불어 기존 액체 연료 인프라를 그대로 활용할 수 있다는 점에서 수소 저장 및 운송 전략으로 각광받고 있다. 본 연구에서는 Ti-Zr-Cr-Mn-V-Fe계 AB_2 수소저장합금을 톨루엔 수소화 반응의 촉매제로 적용함과 동시에, 합금 표면의 산화를 억제하기 위한 톨루엔 침지의 유효성을 검토하였다. 본 연구를 통해 톨루엔과 AB_2계 수소저장합금을 반응기에 장입하여 실온 및 120 ℃에서 수소화 반응을 수행하였으며, 반응 생성물의 가스 크로마토그래피(Gas Chromatography, GC) 및 핵자기공명분석(Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, NMR) 분석을 통해 톨루엔이 메틸사이클로헥세인으로 전환된 것을 규명하고 촉매로서의 효과를 확인하였다. 한편, 활성화된 AB_2계 수소저장합금은 대기 노출 시 급격한 산화 반응을 일으키는 문제가 있다. 톨루엔 침지 처리를 통해 대기 및 고순도 산소 분위기에서 합금 표면의 산화층 형성을 효과적으로 저해할 수 있음을 확인하였다. 압력-조성-온도(Pressure-Composition-Temperature, PCT) 반복 특성 분석 결과, 수소 저장 성능이 안정적으로 유지되었다. 상기 결과들을 통해 톨루엔 침지가 산화에 미치는 영향과 본 수소저장합금의 LOHC 수소화 촉매로서 활용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

[수소2-1 | 13:30]

열처리 방법 및 온도에 따른 SA350강의 수소 취성 회복 특성 비교 : 이진규(부산대학교 기계공학부), 이진모, 이채훈((주)태웅), 이태경*(부산대학교 기계공학부)

Keywords: 수소취성, 저탄소강, EPT(Electropulsing treatment)

전 세계적으로 과학기술이 발전하면서 그에 따라 다양한 에너지가 개발되고 연구되고 있다. 최근 재생 에너지의 발전 비중이 증가하고 있지만 원자력 에너지 발전량은 여전히 높은 비율을 차지하고 있다. 원자력 에너지의 중요성이 커지며 발전 후 생성되는 핵폐기물에 관한 문제가 주목받고 있다. 핵폐기물을 저장하는 방법은 크게 수중 저장과 건식 저장이 있다. 핵폐기물 건식 저장 방법을 사용할 때 유의할 점은 냉각된 이후 저온 환경에서 기계적 성질을 유지하는 게 중요하다. 이러한 환경에서 주로 사용되는 SA350LF3가 있다. 하지만 SA350은 BCC 격자구조로 수소 취성에 취약한 모습을 보인다. 열처리를 통한 수소 취성 회복 방법으로 위와 같은 단점을 보완할 수 있다. 이번 연구는 수소를 24시간 동안 장입한 시편에 electro pulsing treatment(EPT) 과 furnace heat treatment(FHT) 방법을 이용해 동일한 시간(20 min) 동안 온도(200 ℃, 300 ℃)를 변인으로 하여 열처리한다. 열처리 이후 인장시험을 통한 연신율 회복률, TDS를 통한 장입 수소량 비교, SEM을 통한 파면 분석, EBSD를 통한 재결정 정도 등을 바탕으로 수소 취성 회복 특성을 비교할 수 있다. 연구를 통해 EPT와 FHT중 동일 시간, 온도 조건에서 EPT가 높은 효율을 보여주었다. 동시에 열처리 온도가 높아질수록 더 높은 수소 취성 회복률을 관측할 수 있었다.

[수소2-2 | 13:45]

국내 수소취성 평가 시험조건에 따른 API 탄소강의 수소취화 민감도 평가: 윤희수*, 장광후, 정재환(한국가스안전공사 가스안전연구원)

Keywords: 수소취성, 수소환경, 금속재료

수소에너지의 대규모 활용이 본격화됨에 따라 생산된 수소를 저장·운송하기 위한 인프라의 중요성이 증대되고 있다. 특히 수소 배관망은 수소 생산설비, 저장시설, 충전소 및 산업 수요처에 수소를 지속적으로 공급하기 위한 핵심 인프라이다. API 강재는 우수한

기계적 특성과 기존 가스 배관망에서의 풍부한 운용 경험을 바탕으로 수소 배관망의 주요 후보 소재로 고려되고 있으나, 수소 취화에 따른 연성 저하를 고려한 소재 적합성 평가가 요구된다. 수소 환경에서 소재 적합성을 신뢰성 있게 평가하기 위해서는 적절한 시험 기준의 적용이 중요하다. 수소 환경 소재 적합성 평가를 위한 국제 시험 기준으로 CHMC1 및 ASTM G 142 등이 제시되어 있으며, 국내에서는 내수소취성 성능 평가는 KGS AC111에 규정되어있다. 그러나 국내외 시험 기준에는 시험속도 조건에 차이가 있으며, 시험속도는 수소의 침투 및 확산과 전위의 이동 및 상호작용에 영향을 미쳐 수소 취화 민감도를 결정하는 주요시험 변수로 작용할 수 있다. 따라서 시험속도에 따른 수소 취화 거동을 체계적으로 규명하는 것은 시험 기준 간 평가 결과의 상관성을 이해하고 API 강재의 수소 환경 소재 적합성을 신뢰성 있게 평가하기 위해 중요하다. 본 연구에서는 API 탄소강을 대상으로 동일한 수소 환경에서 시험속도를 변화시켜 인장시험을 수행하고, 시험속도에 따른 기계적 특성 및 수소 취화 민감도의 변화를 비교·평가하고자 하였다. ※ 본 연구는 과학기술정보통신부 나노 및 소재기술개발사업 “고압 수소 배관용 원천소재 국산화를 위한 소재 설계, 제조 및 평가 기술개발”(과제번호: RS-2024004450 38)의 지원으로 진행됨.

[수소2-3 | 14:00]

고압수소 수송용 API X70급 강재의 수소취성 저항성에 대한 첨가원소의 영향: 유상현*, 김태응, 유용재(현대제철), 김태욱, 강지현(영남대학교), 나광수(현대제철)

Keywords: 금속, API, 수소취성

본 연구는 고압수소 환경에 적용 가능한 API X70급 용접강관용 철강소재 개발을 목표로 수행되었다. 고압수소 수송용 강재는 수소취성 저항성이 우수하다고 알려진 다각형 페라이트 또는 침상형 페라이트를 기지 조직으로 형성시키고 결정립 미세화, 석출경화 등을 통해 수소취성 저항성과 요구강도를 확보하는 방향으로 설계하였다. 이에 따라 Nb, Ti, V 단독 첨가계와 Nb-Ti 및 Nb-V 복합 첨가계로 합금원소가 기계적 물성과 수소취성 저항성에 미치는 영향을 비교, 분석하였다. 시험편은 진공용해로 제조한 잉곳을 열간압연 모사 설비를 사용하여 14 mm 두께로 제작하였다. 합금 성분계 변화에 따른 기계적 물성과 미세조직을 확인하였고, 석출물이 수소의 투과 및 확산 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해 수소투과도 시험을 수행하였다. 또한 전기화학적 수소주입 후 저속인장시험(Slow strain rate test, SSRT)을 실시하여 상대노치인장강도(Relative notched tensile strength, RNTS) 측정으로 수소취성 저항성을 평가하였다. 이러한 시험평가 결과를 바탕으로 합금원소의 종류에 따른 석출물 및 페라이트 조직 변화가 기계적 물성 및 수소 확산 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 통해 펄라이트 형성을 최소화한 페라이트 기반의 API X70급 강재에서 요구 강도와 수소취성 저항성을 함께 확보하기 위한 설계 방향을 제시하고자 한다.

[수소2-4 | 14:15]

전기저항용접된 API X70 파이프라인강의 후열처리 조건에 따른 In-situ 내수소취성 분석: 서재완(한국공학대학교), 곽진섭, 고의석(생산기술연구소, 현대스틸파이프), 이승준*(한국공학대학교)

Keywords: 수소취성, Polygonal ferrite, Pearlite, Thermal Desoption Analysis, silver decoration

본 연구에서는 전기저항용접 (Electro Resistance Welding, ERW)된 X70급 파이프라인강의 후열처리 조건 온도에 따른 용접부 미세조직 및 내수소취성에 대해 분석하였다. 모재부, 용접 열영향부, 용접부 시편을 이용하였다. 상온에서 지속적인 수소 유입 조건을 모사한 In-situ 노치 인장시험을 수행하여, 전류밀도에 따른 상대 노치 인장강도(Relative Notch Tensile Strength, RNTS)에 대해 위치별로 비교 분석하였다. 이를 통해, 후열처리 조건에 기인한 미세조직 차이가 수소취성 저항성에 미치는 상관관계를 규명하고, 동일 강종 내에서도 열처리 이력에 따라 내수소취성 거동이 달라지는 원인을 밝히고자 하였다.

[수소2-5 | 14:30]

가스 파이프라인 강재의 수소취화 방지용 인히비터 파우더 적용 및 메커니즘 분석: 신좌영, 최동현, 권세영, 박성균, 강남현*(부산대학교)

Keywords: Pipeline steels, API 5L X70, immersion, Hydrogen permeation, Slow strain-rate tensile test(SSRT), FT-IR, XPS

전 세계적인 에너지 전환 기조에 따라 탄소중립을 실현하기 위한 핵심 에너지원으로 수소가 각광받고 있다. 이에 따라 수소의 대규모 저장 및 운송 인프라 구축이 학계와 산업계의 최우선 과제로 대두되고 있다. 특히 기존에 구축된 천연가스 파이프라인망을 활용하여 수소를 혼합 운송하거나 수소 생산 플랜트의 파이프라인을 설계할 때 가장 심각한 기술적 장벽으로 작용하는 현상이 수소취화(Hydrogen embrittlement)이다. API 5L X70 등급과 같은 고강도 파이프라인 강재는 우수한 기계적 강도와 인성을 지니고 있어 가스 수송에 널리 사용되지만 높은 항복 강도를 가진 강재일수록 대표적인 수소취화 현상인 수소 유기 균열(Hydrogen Induced Cracking, HIC) 등에 극도로 취약하다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 수소의 확산 경로를 복잡하게 하여 강재 내부 확산을 완화하는 합금 설계, 코팅과 같은 기술들이 개발되어 왔으며, 그 중 인히비터(inhibitor) 연구는 비교적 간단하고 경제적으로 적용할 수 있다는 장점이 있어 수소 유입 차단에 효과적인 전략으로 제시되는 추세이다. 본 연구에서는 인히비터를 실제 파이프라인에 사용되는 강재에 침지 방식을 통해 적용하여 효과적으로 수소취화를 완화하였는지를 수소 투과(Hydrogen permeation) 시험과 SSRT(Slow strain-rate tensile test)를 통해 평가하며, FT-IR과 XPS와 같은 표면 분석을 통해 어떻게 결합되었는지를 제시한다. 이를 통해 수소취화로 인한 물성 저하 억제의 방법론적 제시 및 수소 연료 활용 산업의 안전성과 운영 효율 향상에 기여하고자 한다.

[수소2-6 | 14:45]

Sn 첨가에 따른 2 GPa급 마르텐사이트강의 수소취성 거동 변화: 남정훈, 한정훈, 성민영, 노이준(고려대학교), 백주현(고려대학교, 한국과학기술연구원), 이창욱, 오욱진(현대자동차), 유병길(현대제철), 김세호, 손석수*(고려대학교)

Keywords: 마르텐사이트강, 수소 취성, tramp element, grain boundary decohesion

자동차 차체의 경량화와 충돌 안전성 향상을 위해 2 GPa급 초고강도 마르텐사이트강의 적용이 확대되고 있다. 그러나 높은 전위 밀도와 미세한 마르텐사이트 하부조직을 갖는 초고강도강은 수소 유입에 따른 기계적 특성 저하에 민감하다는 한계가 있다. 동시에 철강 제조 공정에서 스크랩 사용량이 증가함에 따라 Cu, Ni 및 Sn과 같은 tramp element의 잔류 함량이 증가할 가능성이 높아지고 있으며, 이들 원소가 초고강도강의 취성 거동에 미치는 영향에 대한 관심도 증가하고 있다. 특히 Sn은 강의 기계적 특성과 취성 거동에 부정적인 영향을 미칠 수 있는 원소로 알려져 있으나, 초고강도 마르텐사이트강에서 Sn 첨가에 따른 수소취성 민감도 변화와 그 원인에 대해서는 충분한 이해가 이루어지지 않았다. 이에 본 연구에서는 인장강도 2 GPa급 마르텐사이트강을 대상으로 Sn 첨가 여부에 따른 수소취성 거동을 비교하였다. 수소 주입 후 인장시험을 수행하여 기계적 특성 및 수소취성 민감도의 변화를 평가하였으며, Thermal Desorption Analysis (TDA)와 수소 투과 실험을 통해 수소 고용 및 확산 거동을 분석하였다. 또한 파단면 SEM 분석과 EBSD 기반의 미세조직 및 균열 전파 거동 분석을 수행하여 Sn 첨가에 따른 수소 유기 파괴 거동의 변화를 고찰하였다. 이를 바탕으로 Sn 첨가가 초고강도 마르텐사이트강의 수소 거동과 수소취성 저항성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

[수소2-7 | 15:00]

High-Temperature Hydrogen Degradation of 304H, Incoloy 800H, and Hastelloy X at 650°C: Junyeong Jo, Hwasung Yeom*(POSTECH)

Keywords: High-temperature hydrogen degradation, Hydrogen assisted crack, Mechanical test

The growing utilization of hydrogen in high-temperature energy systems has raised increasing concerns regarding hydrogen-induced degradation of structural alloys, highlighting the need to clarify the underlying damage mechanisms under relevant service conditions. At elevated temperatures, conventional hydrogen trapping at dislocations and interfaces becomes less effective due to enhanced detrapping, while chemical interactions between hydrogen and carbon-containing microstructural constituents may become increasingly important. 304H stainless steel, Incoloy 800H, and Hastelloy X can all contain carbide precipitates that contribute to their high-temperature mechanical performance, although the roles of carbon and carbides in strengthening and deformation differ among the alloys. Since both carbide-bound carbon and solute carbon may potentially interact with hydrogen, these alloy-dependent characteristics may lead to different degradation responses in high-temperature hydrogen environments. In this study, 304H, Incoloy 800H, and Hastelloy X will be exposed to hydrogen at 650 ºC, followed by high-temperature tensile testing at 650 ºC to evaluate changes in their mechanical behavior. U-bend specimens will also be exposed under the same conditions to investigate stress-assisted hydrogen degradation and cracking susceptibility. Comparative analysis of the three alloys aims to elucidate the roles of carbon and carbide-related microstructural features in governing hydrogen-induced degradation at elevated temperatures.

[수소3-1 | 15:25]

SUS304 오스테나이트계 강의 ECCI를 통한 수소에 의한 취성 거동 확인 및 EPT를 통한 물성 회복: 윤재원, 이성호, 이태경*(부산대학교)

Keywords: 스테인리스304, 수소취성, EPT

SUS304 오스테나이트계 스테인리스강은 가격 대비 우수한 내식성과 기계적 성질을 바탕으로 최근 수소 인프라의 핵심 소재로 주목받고 있으나, 고압 및 장시간 수소 노출 조건에서 수소 취성에 의한 갑작스러운 파손 위험이 제기되고 있다. 이러한 문제는 수소 에너지 시스템 전반의 신뢰성과 안전성을 심각하게 저해하기에, 시급히 해결해야 할 요소로 꼽힌다. 본 연구는 음극 전해 장입 방식을 이용하여 가공된 SUS304 강재의 인장시편에 수소를 침투시켜 그에 따른 수소와 EPT의 효과를 분석하였다. 0.1N NaOH + 3g/L Ammonium thiocyanate 수용액 내에서 전류밀도 -50A/m^2의 조건에서 수소장입을 진행하였으며, 높은 수소 확산 계수를 확보하기 위해 온도 80 ºC 의 고온에서 실험을 진행하였다, 이후 scanning electron microscope 촬영을 통해 수소 영향층이 발생함을 확인하고, 인장 실험을 진행하여 기존 시편에 비해 취성이 크게 강화됨을 확인하였다. 수소로 인해 저하된 소재의 물성을 회복시키기 위해 electropulsing treatment(EPT)를 적용하였다. Furnace heat treatment와 달리, EPT는 금속에 직접 전류를 가함으로써 줄 가열 효과(Joule heating effect)를 활용한 효율적이고 빠른 열처리가 가능하다. EPT 처리 후 인장시험을 수행한 결과, 수소에 의해 발생한 취성이 상당부분 회복되는 거동을 확인하였다. 이후 electron channeling contrast imaging(ECCI)을 통해 물성 회복을 미세조직 단위에서의 변화를 통해 확인하였다. 이를 통해 EPT의 내부 수소의 이탈과 미세조직 안정화의 효과를 확인하여, EPT를 활용하여 기존의 열처리 방식 대비 단시간 내에 소재 물성 회복 가능성을 제시하였다.

[수소3-2 | 15:40]

FCEV 부품용 Mo-free 오스테나이트계 스테인리스강 개발: 황재윤, 김종천*(현대자동차), 남기정(세아창원특수강)

Keywords: 스테인리스, 원가절감, 내수소취성

고압 기체수소용 부품, 특히 매니폴드(manifold)에 적용하기 위한 무몰리브덴(Mo-free) 오스테나이트계 스테인리스강의 개발은 비용 절감과 자원 절약에 기여하기 위해 수행되었다. 연료전지전기차(FCEV) 시장이 성장하기 위해서는 원가 경쟁력 향상이 중요하다. 본 연구에서는 내구성과 수소취화 저항성을 유지하면서 비용을 줄이기 위해, 몰리브덴을 제거한 새로운 오스테나이트계 스테인리스강 매니폴드를 개발하였다. 몰리브덴은 고온 및 부식 환경에서 효과적인 원소이지만, 수소 가스 분위기에서는 그 효과가 제한적이며 소재 비용을 증가시킨다. 이에 따라 몰리브덴을 사용하지 않는 새로운 합금 설계를 제안하고, 고압 기체수소 환경에서 기계적 특성을 평가하였다. 또한 소재 적합성은 재료 호환성을 보장하기 위해 ISO 및 SAE 표준을 기준으로 판단하였다. 실험 결과, 새롭게 개발된 합금은 기존 316L 스테인리스강과 비교할 만한 수준의 수소취화 적합성을 보였으며, 동시에 비용 효율성도 향상되었다. 마지막으로 이 신소재는 FCEV 매니폴드에 성공적으로 적용되어 양산에 이르렀다.

[수소3-3 | 15:55]
고온, 고압 수소 환경에서 오스테나이트계 스테인리스 강의 크리프 거동 연구: 임광혁, 유정민, 김두현(한국과학기술연구원), 송전영(두산에너빌리티), 서진유*(한국과학기술연구원)
Keywords: 크리프, 수소, 스테인리스 강
전 세계적인 온실가스 감축 요구에 따라 발전 및 항공 분야의 가스터빈 연료로 수소의 사용이 가속화되고 있다. 그러나 수소는 스테인리스강을 비롯한 구조 재료에 심각한 손상 및 취화(embrittlement)를 유발한다. 따라서 구조물의 신뢰성 및 건전성을 확보하기 위해서는 수소 취화 메커니즘을 규명하고 재료적 한계를 극복하기 위한 연구가 필수적이다. 기존의 수소 취성 메커니즘 연구는 주로 상온에서의 현상에 집중되어 왔다. 이는 고온 환경의 경우 금속 격자 내부에서 수소 원자의 빠른 확산으로 인해 전통적인 취성 손상이 완화된다고 일반적으로 알려져 있기 때문이다. 그러나 본 연구는 발전 설비의 대표적인 구조 재료인 오스테나이트계 스테인리스강이 일정 하중이 가해지는 고온 및 고압 수소 환경에서 심각하게 열화됨을 입증한다. 미세조직 분석을 통해 이러한 극한 조건 하에서 오스테나이트계 스테인리스강에 작용하는 구체적인 크리프 손상 메커니즘을 규명하였다. 본 연구는 향후 수소 활용 분야에 사용되는 금속 구조 재료의 기존 한계를 극복하기 위한 새로운 방향성을 제시한다.

[수소3-4 | 16:10]
적층제조된 스테인리스 304L 강의 수소취성에 미치는 미세조직 및 집합조직 거동: 손광태, 윤성준, 김영균, 나영상*(한국재료연구원 극한재료연구소)
Keywords: 스테인리스강, 적층제조, 수소취성, 집합조직
레이저 분말 베드 융합(laser powder bed fusion, LPBF)은 공정조건에 따라 결정립 크기와 형태뿐만 아니라 결정학적 집합조직을 선택적으로 제어할 수 있다. 그러나 이러한 미세조직 인자들이 준안정 오스테나이트계 스테인리스강의 수소취성에 미치는 복합적인 영향은 아직 명확히 규명되지 않았다. 본 연구에서는 LPBF로 제조한 304L 스테인리스강에서 서로 구별되는 세 가지 미세조직, 즉 (i) 상대적으로 미세한 결정립과 약한 무작위 집합조직, (ii) 조대한 결정립과 <110>//BD α-fiber 집합조직, 그리고 (iii) 조대한 결정립과 발달한 Goss 집합조직({011}<100>)의 수소취성 거동을 비교하였다. 동일한 조건에서 수소를 주입한 후 인장시험을 수행하였으며, 미충전 시편 대비 수소 충전 시편의 파단연신율 유지율을 수소취성지수(hydrogen embrittlement index, HEI)로 정의하였다. 미세한 무작위 결정립 조직은 상대적으로 낮은 HEI를 나타낸 반면, <110>//BD α-섬유집합조직과 Goss 집합조직을 갖는 조대한 결정립 시편에서는 상대적으로 높은 HEI가 측정되었다. 이를 규명하기 위해 EBSD와 ECCI로 변형 적합성, 전단대 연결성 및 변형유기 마르텐사이트를 분석하였다.

[수소3-5 | 16:25]
316계 스테인리스 강의 인발 변형에 따른 미세조직 및 격자특성 변화와 수소 트랩거동 간 상관관계 규명: 남지민(부산대학교 재료공학과), 성백석(디에스휴먼자원기술서비스), 강남현*(부산대학교 재료공학과)
Keywords: Austenitic stainless steel, Hydrogen trapping behavior, Deformation-induced microsturcutre, Thermal desorption spectroscopy, Neutron diffraction
오스테나이트계 스테인리스강은 우수한 수소취화 저항성을 바탕으로 수소 경제와 관련된 다양한 분야에서 핵심 구조재료로 주목받고 있다. 재료 내 수소의 확산 및 트랩거동은 수소취화 저항성을 결정하는 주요 인자이므로, 이에 대한 이해가 중요하다. 최근 FCC계 금속의 수소 확산 및 트랩 거동에 관한 연구가 활발히 수행되고 있으나, 대부분 변형 전 초기 미세조직을 중심으로 이루어져 왔으며, 변형에 의해 형성된 미세조직이 수소 확산 및 트랩 거동에 미치는 영향에 대한 연구는 상대적으로 부족하다. 특히 구조재료는 장기간 사용 중 지속적인 변형과 미세조직 변화를 경험할 수 있으므로, 변형 축적에 따른 수소 거동의 변화를 규명할 필요가 있다. 본 연구에서는 인발 공정을 통해 변형조직을 형성한 STS 316계열 와이어와 어닐링 처리된 와이어를 비교하여, 오스테나이트계 스테인리스강의 변형 미세조직에 따른 수소 트랩 거동을 규명하였다. 열탈착분광법(thermal desorption spectroscopy, TDS)을 이용하여 미세조직 변화에 따른 수소 트랩 특성을 분석하였다. 또한 침입형 원소 함량이 서로 다른 STS 316L, 316 및 316N의 중성자 회절 결과를 활용하여, 격자 특성의 변화와 수소 트랩 거동 간의 상관관계를 함께 검토하였다. 이를 통해 변형에 의해 형성되는 미세조직과 침입형 원소에 따른 격자 특성이 수소의 확산 및 트랩 거동에 미치는 영향을 종합적으로 이해하고, 오스테나이트계 스테인리스강의 수소취화 거동을 해석하기 위한 미세조직학적 기반을 제시하고자 하였다.

[수소3-6 | 16:40]
고온 암모니아 장기간 노출에 의한 스테인리스강 304의 미세조직 및 기계적 물성 변화: 조준영, 염화성*(포항공과대학교)
Keywords: 암모니아, 스테인리스, 질화, TEM, DIC
탄소 중립의 중요성이 대두됨에 따라 친환경 수소 캐리어인 암모니아가 육상 및 해상 가스터빈용 연료로 각광받고 있어, 고온 암모니아가 가스터빈 소재에 미치는 영향을 파악할 필요가 있다. 특히 암모니아 가스터빈의 연료 주입 노즐은 스테인리스강 304로 제작되며, 약 400~450 ºC의 고온 암모니아에 지속적으로 노출된다. 이에 본 연구에서는 435 ºC의 암모니아 분위기에 스테인리스강 304 시편을 20/45/80/125시간 노출시킨 후 XRD 및 SEM-EDS을 통해 질화층의 결정구조 및 미세조직을 관찰하였다. 또한 80시간 노출 시편에 대한 TEM 분석을 실시하였으며, 기계적 물성 분석을 위해 ASTM E8/E8M 규격의 인장시편을 125시간 노출시킨 후 DIC 인장시험을 실시하였다.

[수소3-7 | 16:55]

철계 중엔트로피 합금 필러 적용을 통한 액화수소 저장용 STS316L GTAW 용접부의 수소취성 억제: 최정현, 남지민(부산대학교), 지창욱(한국생산기술연구원), 이승건, 나영상(한국재료연구원)

Keywords: Stainless steel, High entropy alloy, Gas tungsten arc welding, Hydrogen embrittlement

수소 에너지 수요 증가에 따라 극저온 수소 저장·운송 인프라용 구조 재료의 중요성이 커지고 있다. 오스테나이트계 스테인리스강(STS316L)은 우수한 극저온 인성과 낮은 수소 확산도로 모재 자체의 수소취성 민감도는 낮으나, 용접 시 FA 응고 모드로 인해 형성되는 조대하고 연속적인 columnar δ-페라이트로 인해 용접부의 수소취성 민감도가 크게 증가하는 문제가 존재한다. δ-페라이트는 빠른 수소 이동 경로로 작용할 뿐만 아니라 기지 조직과의 탄소성 거동 불일치로 계면 응력 집중을 유발하여 저온 및 수소 환경에서 조기 파괴를 야기한다. 본 연구에서는 용접부 내 δ-페라이트 형성을 억제하고 모재 수준의 우수한 수소취성 저항성을 확보하기 위해 철계 중엔트로피 합금(Fe60Cr10Co15Ni15)을 용접 필러와이어로 적용하였다. 진공유도용해 및 캘리버 압연·인발 공정을 통해 제작된 1.5 mm 직경의 필러와이어를 이용하여 1.5 mm 두께의 STS316L 모재에 GTAW 맞대기 용접을 수행하였다. 용접부의 미세조직을 분석하고, 전기화학적 수소 주입 전·후의 Transverse 인장 특성을 상온, -100 ºC, -196 ºC 환경에서 평가하였다. 분석 결과, Fe60Cr10Co15Ni15 용접재료 적용 시 δ-페라이트 형성이 효과적으로 억제되어 건전한 오스테나이트 기지 조직이 확보되었다. 인장 시험 결과, 수소 주입 후에도 상온 및 극저온(-100 ºC, -196 ºC) 전 온도 구간에서 연신율 및 강도 저하가 거의 관찰되지 않아 우수한 수소취성 억제 효과를 확인하였다.

생체재료
Room 1층 101호, 10월 30일

[생체1-1 | 09:00]
바이오전자소자를 위한 오일 나노캡슐 기반 생분해성 수분 차단막: 배가현, 이금비*(경북대학교)
Keywords: 봉지막, 오일 캡슐, 분해성, 에멀전, 바이오전자소자
생체적합성 전자 소자는 체내에서 생체 신호를 모니터링하거나 치료 기능을 수행하는 차세대 의료 플랫폼으로 주목받고 있다. 특히 일정 기간 작동 후 분해되는 일시적 이식형 전자 소자는 추가적인 제거 수술의 부담을 줄일 수 있다. 그러나 이식한 소자의 조기 분해 및 오작동을 방지하기 위해서는, 소자의 성능 안정성과 수분 및 생체액에 대한 방수성을 동시에 만족하는 캡슐화 소재 및 기술 개발이 필수적이다. 대표적 방수 소재인 금속 산화물은 기계적 유연성이 낮고, 단일 고분자는 수분과 산소 투과를 완전히 차단하기 어려워 방수 성능에 한계가 있다. 본 연구에서는 광경화성 오일 나노캡슐(500 nm)을 설계하고, 이를 생분해성 유연 고분자 매트릭스 내부에 도입하는 전략을 통해 우수한 방수성과 유연성을 동시에 갖춘 봉지막 플랫폼을 제안한다. 자외선(365 nm) 조사로 액체 오일 나노캡슐을 고체화한 후, 다양한 고분자 매트릭스에 첨가하여 복합 방수 필름을 제작한다. 고분자 내부에 분산된 오일 나노캡슐은 수분의 직접적인 확산을 방해하고 이동 경로의 굴곡도(tortuosity)를 증가시켜 수분 침투를 지연시킨다. 또한, 봉지막 소자의 기능 수행이 완료된 후 점진적으로 분해되어 별도의 제거 과정 없이 일시적으로 사용되는 이식형 전자 소자에 적용 가능한 장점을 제시한다. 따라서 제안한 캡슐화 기술은 이식형 전자 소자의 장기 수명 확보와 성능 안정성 향상에 기여할 것으로 기대한다.

[생체1-2 | 09:15]
Microfluidic Fabrication of Mechanically Tunable ECM Microgels for High-Throughput Cancer-on-a-Chip Models: Jihyeon Song, Donggyu Kim , Junmin Lee*(POSTECH)
Keywords: Microfluidic platform, Cancer-on-a-chip, Tumor microenvironment (TME), Extracellular matrix (ECM)
Reconstructing the tumor microenvironment (TME) in vitro remains challenging because tumor progression is regulated by complex interactions among extracellular matrix (ECM) mechanics, cellular composition, and spatial organization. Here, we developed a high-throughput cancer-on-a-chip platform based on microfluidic-fabricated ECM microgels that enables the construction of miniaturized and mechanically tunable three-dimensional tumor models. Uniform ECM microgels were generated through droplet-based microfluidics using two immiscible phases in a T-junction configuration. By regulating the microfluidic flow conditions and polymer composition, the size, morphology, and mechanical properties of the microgels could be precisely controlled. This approach enabled reproducible and scalable fabrication of highly uniform ECM microgels while supporting high-density cellular encapsulation and maintaining structural stability during culture. The tunable material properties of the microgels further allowed the cellular microenvironment to be engineered under defined mechanical conditions. As a representative application, a brain tumor microenvironment was reconstructed using a layered microgel architecture consisting of cancer spheroids surrounded by stromal cells within an ECM-based matrix. Mechanical characterization demonstrated that the engineered microgels could reproduce mechanical properties relevant to brain tumor tissue. In addition, the layered architecture enabled controlled organization of different cellular components, providing a platform to investigate how stromal cells and ECM properties regulate tumor behavior within a three-dimensional microenvironment. Overall, this platform integrates microfluidic fabrication, mechanically tunable ECM microgels, and spatially controlled multicellular organization to establish a scalable and biomimetic cancer model. The modular nature of the system may further enable adaptation to different tumor types by adjusting ECM composition, mechanical properties, and cellular components. Future studies will evaluate its applicability to anticancer drug screening, including the analysis of drug penetration and therapeutic responses, and extend the platform toward more complex tumor microenvironments incorporating vascular and immune components.

[생체1-3 | 09:30]
생체 이식형 단방향 팽윤 기반 하이드로젤 pH 센서: 오동현, 이금비*(경북대학교)
Keywords: pH 센서, 하이드로겔, 단방향 팽윤, 생체분해성, 생체이식형
생체 내 pH 변화 감지 센서는 질병의 조기 진단, 수술 후 회복 상태 확인, 국소 염증 및 종양성 변화 모니터링에 중요한 역할을 한다. 특히 종양 조직은 정상 조직보다 약 0.6–1.5 pH 단위 낮은 산성 미세환경을 형성하므로, 정밀한 pH 모니터링이 필요하다. 그러나 기존 pH 센서는 감지 범위가 주로 pH 4–8로 제한되고, 측정 및 분석 과정에 시간과 비용이 요구되어 임상 적용에 한계를 가진다. 본 연구는 단방향 팽윤 특성을 지닌 천연 다당류인 사크란(sacran)에 주목하고, 이를 pH 감응성과 기계적 안정성이 우수한 하이드로젤과 복합화하여 이식형 pH 센서를 제안한다. 본 센서는 pH 1–8의 넓은 범위에서 pH 증가에 따라 팽윤하며, 단방향 팽윤을 통해 pH 변화에 따른 부피 변화를 1차원 변위로 단순화하여 측정한다. 이러한 거동은 신호 해석을 간소화하고 반복 측정에서 발생하는 변동을 줄여 센서의 측정 정밀도를 향상시킨다. 이를 통해 본 센서는 생체 환경의 pH 변화를 정밀하게 모니터링하며, 향후 생체 이식형 진단 및 치료 모니터링용 pH 센서로 활용 가능성을 제시한다.

[생체1-4 | 09:45]

3D Bioprinting of Bioceramic/ECM Scaffolds with Tunable Porosity and Interfacial Integration for Biomimetic Osteochondral Regeneration: Siwi Setya Utami, Hui-suk Yun*(University of Science and Technology (UST), Korea Institute of Materials Science (KIMS))

Keywords: 3D Bioprinting, bioceramics, osteochondral regeneration

Reconstructing complex osteochondral defects requires multiphasic scaffolds that accurately replicate native structural and porosity gradients. However, tuning hydrogel porosity remains challenging due to the need for harsh chemicals, complex processing, or poor printability, while high-content bioceramics for subchondral bone typically suffer from severe mechanical mismatch and interfacial delamination. To address these challenges, this study presents a novel, chemical-free syringe gas foaming strategy directly integrated into 3D bioprinting—representing the first effort to utilize syringe gas foaming for bioprinting applications while seamlessly unifying a high-content bioceramic bone layer with a gas-foamed extracellular matrix (ECM) cartilage bioink. The cartilage bioink was gas-foamed using a dual-syringe mechanism by tuning physical parameters to achieve controlled micro-bubble entrapping. Meanwhile, a high-content bioceramic bone bioink was extrusion-printed with tailored infill geometries. Multiphasic constructs were sequentially printed, light-crosslinked, and conditioned to induce an in situ self-setting transformation of the ceramic phase into micro-crystalline hydroxyapatite structures. Syringe gas foaming provided precise, reproducible control over hydrogel microporosity and overall pore volume without compromising long-term structural integrity in culture. Rheological optimization ensured high shape fidelity during printing while preserving post-printing cell viability. Crucially, interfacial mechanical testing demonstrated robust, seamless bonding between the distinct ceramic and hydrogel layers without delamination. This high interfacial integrity was driven by a synergistic combination of polymer photo-crosslinking and micro-crystalline mechanical anchoring at the interface. Overall, this integrated syringe gas foaming and bioprinting platform offers a simple, versatile strategy for fabricating multiphasic osteochondral constructs with layer-specific porosity, superior cell survival, and strong interfacial attachment. Future work will evaluate long-term zonal stem cell differentiation and tissue maturation within the multiphasic scaffold.

[생체1-5 | 10:00] [Canceled]

Adaptive Metastructures Controlled by Machine Learning-Based Motion Prediction via Photodetector Arrays: Gyuri Shin, Yoonseok Park*(Kyung Hee Univ.)

[생체2-1 | 10:25]

지속적인 광 신호 확보를 위한 미세구조 생분해성 반사체: 이수형, 박세계, 이동윤, 이금비*(경북대학교)

Keywords: 모니터링, 광경화, 생분해성, 생체적합성, 고분자

장기간 질병 상태를 관리하려면 반복적인 치료와 함께 체내 변화를 지속적으로 확인할 수 있는 모니터링 기술이 필요하다. 광학 기술은 빛을 이용해 생체 정보를 비침습적으로 획득할 수 있다는 장점을 가지지만, 생체조직은 빛을 산란하고 흡수하여 검출기에 도달하는 광 신호의 세기를 감소시킨다. 이러한 신호 감쇄는 체내 광학 측정의 정확도와 신뢰성을 제한한다. 본 연구는 체내에서 일어나는 광 신호 감쇄를 보완하기 위해 빛을 다시 검출 방향으로 유도하는 생분해성 생체 반사체를 제안한다. 이 반사체는 생체 적합성을 갖는 고분자 조합으로 구성하며, 이식 후 장기간 구조를 유지하면서 최종적으로 분해할 수 있도록 설계한다. 광경화성 고분자를 미세 프리즘 패턴의 몰드에 성형하여 반사 구조를 형성하고, 이 구조는 입사광을 전방 산란한 뒤 원래의 광학 경로 방향으로 유도한다. 이를 통해 반사체는 400–1000 nm의 넓은 파장 영역에서 50% 이상의 반사율을 확보한다. 분해 환경에서도 미세 프리즘 구조는 30일 이상 형태를 유지하며 반사 기능을 지속한다. 또한 생체 내/외 조건에서 반사체를 적용하면 검출기로 도달하는 광량이 증가하고, 광검출기는 반사체를 적용하지 않은 경우와 구분되는 광전류 신호를 출력한다. 본 연구는 구조 유지와 생분해 특성을 동시에 갖는 미세구조 반사체를 통해 이식형 광학 시스템의 신호 활용도를 높일 수 있음을 보여준다. 나아가 이 반사체는 다양한 광학 센서와 결합하여 생물학적 정보를 비침습적으로 추적하는 장기 모니터링 플랫폼으로 활용할 수 있다.

[생체2-2 | 10:40]

Laser-Engraved Pseudo-3D Topological Biomaterial Interfaces Regulate Mechanotransductive Maturation of Smooth Muscle Cells: Yeji Lee, Junmin Lee*(POSTECH)

Keywords: mechanotransduction, smooth muscle cell, topology

Smooth muscle tissues possess highly organized cellular architectures, characterized by unidirectional, bidirectional, and curved alignments that are closely associated with their contractile function and tissue maturation. Accordingly, the development of biomaterial interfaces capable of reproducing native topological microenvironments and converting these structural features into cellular mechanotransductive signals is important for functional muscle tissue engineering. Nevertheless, how engineered topological architectures modulate mechanotransductive signaling and subsequent smooth muscle cell maturation remains insufficiently understood. In this study, we developed laser-engraved pseudo-3D topological biomaterial interfaces to examine the effects of defined microarchitectural cues on smooth muscle cell mechanotransduction and maturation. Substrates incorporating line, cross, and curved

topologies were fabricated to represent characteristic cellular arrangements observed in native smooth muscle tissues. Through systematic control of topological geometry and cell seeding density, we evaluated the combined effects of biomaterial-derived structural cues and cell-cell interactions on mechanosensitive signaling and the development of a contractile phenotype. Among the evaluated geometries, cross-patterned topologies induced prominent mechanotransductive responses in smooth muscle cells under high-density culture conditions, in which sufficient cell-cell interactions were established. Notably, cells cultured on cross-patterned substrates exhibited increased YAP-associated mechanotransduction relative to those cultured on flat substrates. This topology-driven mechanosensing was accompanied by elevated expression of contractile maturation markers, including calponin and α-smooth muscle actin, suggesting progression toward a more mature contractile phenotype. Furthermore, inhibition experiments indicated that YAP-mediated mechanotransduction may contribute more specifically to calponin-associated maturation rather than exclusively controlling α-smooth muscle actin expression. In vivo implantation of cell-loaded patterned constructs additionally demonstrated the potential relevance of topological biomaterial cues in enhancing YAP and calponin expression at the tissue level. Collectively, these results demonstrate that pseudo-3D topological biomaterial interfaces can function as programmable mechanobiological cues to regulate smooth muscle cell fate and maturation. This work presents a material-based strategy for engineering functional muscle tissues and emphasizes the importance of integrating microscale architecture, cell-cell interactions, and mechanotransductive signaling for multiscale tissue and organ engineering.

[생체2-3 | 10:55]

생체 인터페이스 전자소자를 위한 균열 기반 변형 센서의 푸아송비·강성 제어: 강승민(서울대학교/Seoul National University), 이재환(서울대학교/Seoul National University, MIT), 이우진, 강승균*(서울대학교/Seoul National University)

Keywords: 생체 인터페이스 전자소자, 균열 기반 변형률 센서, 포아송비, 유효 강성, 기계적 물성 불일치, 천공, 어세틱 패턴

생체 조직에서 발생하는 극미세한 기계적 변화를 정밀하게 감지하는 기술은 질환의 조기 진단 및 정밀 헬스케어 모니터링에 필수적이다. 그러나 기존 상용 변형 센서는 대상 조직과의 모듈러스 미스매치로 인해 조직에서 발생하는 변형을 온전히 전달받지 못하며, 또한 생체 조직 수준의 극미세 변형에 요구되는 민감도에는 도달하지 못한다는 한계를 지녔다. 이러한 문제를 해결하기 위해 거미의 감각기관에서 영감을 받은, 금속의 단절과 접촉에 따른 급격한 저항 변화를 이용하는 균열 기반 변형 센서가 제안되었다. 균열 기반 변형 센서는 기존 상용 센서 대비 200배 이상 민감함을 보였지만, 변형이 극히 작은 구간(0.5 % 미만)에서는 균열이 충분히 열리지 않아 민감도가 둔화되는 한계를 보였으며, 기존 상용 센서 대비 유연성이 개선되었음에도, 생체 조직 수준의 모듈러스에는 미치지 못해 기판의 모듈러스를 한층 더 낮출 필요가 있었다. 본 연구에서는 균열의 초기 민감도를 좌우하는 요인인 인장 시 발생하는 푸아송 수축을 해결하기 위해, 오제틱(auxetic) 구조체를 도입하여 음의 푸아송비를 구현하였다. 이를 통해 인장 시 센서 영역에서 수축이 아닌 팽창 거동을 유도하여, 균열이 극초기 변형 단계부터 재접촉 없이 안정적으로 열리도록 하였다. 여기에 더해, 센서 자체의 유효 강성을 대폭 낮추기 위해 균열 주변에 규칙적인 천공(perforation) 구조를 도입하였다. 천공은 단면적 감소를 통해 유효 강성을 크게 저감시킴과 동시에, 변형장을 센서가 위치한 영역으로 집중시키는 역할을 한다. 오제틱 구조에 의한 균열 개방 안정성과 천공에 의한 유효 강성 저감 및 변형 집중이 결합되어, 두 메커니즘 사이에 뚜렷한 시너지 효과가 발생하였다. 그 결과, 기존 크랙센서 대비 극저변형률 구간에서 0.1 % 변형에서 760배, 0.5 % 변형에서 200도의 민감도 향상을 가지는 균열 기반 변형 센서를 구현하였으며, 푸아송 비 컨트롤과 구조 기반의 강성 저감 및 변형 집중 전략이 생체 인터페이스에 요구되는 강성 매칭과 변형 감지 민감도를 동시에 향상시킬 수 있는 접근임을 제시한다.

[생체2-4 | 11:10]

생분해성 시트르산계 고분자/Fe_3O_4 복합재 기반 자성 진동 액추에이터의 제작 및 구동 특성: 김승윤, 이금비*(경북대학교)

Keywords: 시트르산계 생분해성 고분자, Fe_3O_4, 자성 복합재료, 자기 구동, 진동 액추에이터

생체 조직에 전달되는 미세한 기계적 자극은 세포의 증식과 분화 및 조직 재형성을 유도할 수 있어 골유착 촉진을 비롯한 다양한 생체의료 분야에 활용할 수 있다. 그러나 기존의 생체이식형 진동 액추에이터는 배터리, 배선 또는 강성 부품을 필요로 하므로 장기간 이식 시 추가적인 제거 수술과 주변 조직의 손상을 유발할 수 있다. 본 연구에서는 외부 자기장을 이용하여 무선으로 구동할 수 있는 생분해성 시트르산계 고분자/Fe_3O_4 복합재 기반 진동 액추에이터를 제작하고 자기적 특성과 진동 구동 특성을 평가한다. 고분자 소재로는 poly(1, 8-octanediol-co-citric acid)(POC)와 poly(octamethylene maleate (anhydride) citrate)(POMaC)를 사용하며, 무촉매 용융 축합 중합을 통해 각각의 전중합체를 합성한다. Fourier transform infrared spectroscopy 분석 결과, 약 1750, 1200 및 1100 cm^{-1}에서 에스터 결합에 해당하는 특성 피크가 나타나 전중합체의 합성을 확인할 수 있다. POC 전중합체와 Fe_3O_4 입자를 서로 다른 질량비로 혼합 후 열가교해 자성 복합 필름을 제조하고, 이를 POMaC 탄성 프레임과 결합해 액추에이터를 제작한다. Vibrating sample magnetometer 분석 결과, POC/Fe_3O_4 복합 필름은 잔류자화와 보자력이 거의 없는 S자형 자화 곡선을 나타내며, Fe_3O_4 함량이 증가함에 따라 POC와 Fe_3O_4의 질량비가 1:2인 복합 필름은 약 50 emu/g의 포화자화를 나타낸다. 제작한 액추에이터에 18 mm 떨어진 전자석을 이용하여 20 Hz의 교번 자기장을 인가하고, 슬로모션 영상에서 복합 필름의 위치 변화를 추적하기 위해 Python과 OpenCV를 이용해 영상의 픽셀 및 프레임 정보를 실제 변위와 시간으로 변환한 결과, 액추에이터 또한 인가한 자기장과 동일한 20 Hz의 주기적 진동과 약 200 μm의 진폭을 나타낸다. 이러한 결과는 시트르산계 생분해성 고분자와 Fe_3O_4 입자의 복합화를 통해 자기 응답성과 진동 구동 성능을 갖는 생체이식형 액추에이터를 구현할 수 있음을 제시한다.

[생체2-5 | 11:25]

Improving Ceramic–Hydrogel Integration for Osteochondral Constructs: Jueun Kim, Aram Sung(KIMS), Yeong-Jin Choi, Hui-suk Yun*(KIMS, UST)

Keywords: Ceramic–hydrogel interface, Osterochondral construct, Biomaterials

Osteochondral tissue engineering requires the integration of mechanically stable bone-regenerative scaffolds with cell-supportive hydrogel matrices for cartilage regeneration. However, the dissimilar physicochemical characteristics of ceramic and hydrogel phases often result in weak interfacial bonding, which can lead to hydrogel delamination and loss of structural integrity under wet culture conditions. In this study, gelatin-assisted apatite formation was investigated as a surface modification strategy to enhance ceramic–hydrogel integration in calcium-deficient hydroxyapatite (CDHA) scaffolds. CDHA scaffolds were treated with simulated body fluid (SBF) containing gelatin, and the effects of SBF concentration, gelatin content, and treatment time on apatite formation were systematically evaluated by morphological, compositional, and phase analyses. Based on the surface characterization results, cell-laden hydrogels were incorporated into the modified ceramic scaffolds to fabricate integrated osteochondral constructs. Human mesenchymal stem cells (hMSCs) were used to assess cellular behavior at the ceramic–hydrogel interface, while SaOS-2 osteoblast-like cells were used to evaluate osteogenic activity in growth medium without additional osteogenic supplements. Treatment with 0.25 wt.% gelatin/SBF maintained hydrogel attachment during wet culture and resulted in pronounced hMSC spreading along the ceramic–hydrogel interface after 7 days. In addition, the modified constructs exhibited higher alkaline phosphatase activity and baseline-corrected calcium deposition than pure CDHA and SBF-only controls over 3 weeks. These results demonstrate that gelatin-assisted apatite formation can provide a biologically favorable and structurally stable interfacial region between ceramic scaffolds and hydrogels. This approach offers a simple surface modification strategy for improving the integration of multiphasic osteochondral constructs.

[생체3-1 | 13:30] 초청강연

Diagnostics as Molecular Information Control: Overlooked Material Degrees of Freedom for Reliable Molecular Readouts: Youngeun Kim*(서울대학교)

Keywords: Molecular diagnostics, nucleic acid amplification, liquid metal interfaces, DNA chirality

Biological samples contain rich molecular information, but that information is often fragile, dilute, transient, or difficult to interpret in practical diagnostic settings. In many cases, diagnostic failure does not arise from the absence of a recognition element, but from the loss, corruption, degradation, or poor readability of molecular information as it moves from sample to decision. Our laboratory approaches diagnostics as a problem of molecular information control: how can we recover target information from complex samples, amplify it without amplifying errors, stabilize it in biological environments, and read it in simple formats? In this talk, I will discuss several material strategies that address different failure points in diagnostic workflows. First, reconfigurable liquid-metal interfaces are used to capture, protect, release, and recover nucleic acids from complex samples through pH-responsive interfacial switching. Second, exonuclease-programmed DNA amplification is used to improve the fidelity of isothermal amplification by selectively converting correctly amplified products into readable single-stranded outputs while suppressing nonspecific products. Third, chirality-patterned DNA architectures provide a stereochemical design handle for controlling nuclease recognition and biological stability without relying solely on conventional backbone modifications. Finally, paper-based readout formats illustrate how amplified molecular information can be translated into accessible diagnostic signals. Together, these examples suggest that future diagnostics will require more than increasingly sensitive probes. They will require materials that actively manage the fate of molecular information. By identifying overlooked material degrees of freedom—interfacial dynamics, enzymatic processing, molecular chirality, and simple readout interfaces—we aim to build diagnostic systems that remain reliable as they move from controlled assays toward real biological and clinical contexts.

[생체3-2 | 13:55] 초청강연

Effect of extrusion ratio on biodegradation behavior of Mg–Zn–Mn–Sr alloy microtubes for biodegradable vascular stents: Jae-Yeon Kim*, Joung Sik Suh, Minseo Lee, Geonho Hwang, Ha Sik Kim, Sang Eun Lee(KIMS)

Keywords: Mg alloy, Biodegradation, Stents, Microtube

This study systematically investigated the effect of the extrusion ratio on the biodegradation behavior of Mg-Zn-Mn-Sr (ZMJ100) alloy microtubes in terms of the microstructure and texture. The fabrication of ultra precise ZMJ100 microtubes was successfully achieved through a two-step direct extrusion. As the extrusion ratio increased, the grain refinement and texture weakening played a pivotal role in determining the mechanical and biodegradation behavior. The enhancement of tensile strength was ascribed to grain boundary strengthening due to the higher extrusion ratio, notwithstanding weaker basal texture and higher activation of basal slip. The findings indicated a direct correlation between the biodegradation rate and the inverse square root of grain size, as well as the activation amount of basal slip. An increase in the extrusion ratio led to grain refinement and concurrent texture weakening, accelerating selective grain boundary corrosion and micro-galvanic corrosion between differently oriented grains. It is imperative to meticulously regulate both the grain size and basal texture by calibrating the process parameters, such as the extrusion ratio, to ensure optimal service performance of Mg alloy for bioresorbable stent scaffolds.

[생체3-3 | 14:20]

Magnetically Navigable Neuro-Stethoscope for Minimally Invasive Epilepsy Mitigation: Yoo Jeongmin(Kyung Hee University), Sang Hoon Park(Yonsei University), Hyounggeun Yoon, Eunee Lee(Yonsei University College of Medicine), Ki Jun Yu(Yonsei University), Yoonseok Park*(Kyung Hee University)

Keywords: Minimally invasive electrocorticography, Magnetic polymer composite, Magnetically actuated neural interface, Seizure localization, Navigated ECoG sensor;

Over recent decades, intracranial implants for the diagnosis and treatment of brain diseases have been developed. However, conventional implantable device platforms still rely on large craniotomies, invasive probes, and bulky sensors, which limit the range of obtainable biological information. In response, this study proposes a sensor array an “Neuro-Stethoscope” that enables minimally invasive surgery and easy deployment on the cortical surface through magnetic field control. This system allows rapid and straightforward attachment to the cortical surface even in fluidic environments, facilitating efficient delivery to target regions. To achieve this, a custom-designed polyimide film embedded with multiple electrodes for signal recording and electrical stimulation, along with micro magnetic powder (NdFeB: 5 μm, Magnequench), was developed. The film was based on a mesh structure with elastic restoring force to allow device expansion and was imparted with a magnetization pattern of 1.5 T to enable precise control under fluidic conditions. Furthermore, magnetic particles were coated with Polyvinylpyrrolidone (PVP) to enhance biocompatibility, resulting in a film suitable for long-term implantation. This configuration allows precise delivery of electronic devices to target sites, while flexible materials and magnetic control make the system adaptable to diverse cortical geometries. It also demonstrates the capability for selective measurements on various cortical surfaces using a single sensor. This minimally invasive, magnetically controlled sensor array system minimizes incision size during electrode insertion and enables rapid delivery and attachment of electronic devices. The custom magnetic particle film facilitates this approach, reducing the time required for secure attachment of implantable electronics and offering the potential for easy implantation of various devices. Moreover, this “Neuro-Stethoscope” concept can be extended to the development of brain–computer interface (BCI) components based on magnetic particle films, contributing to fundamental neuroscience research.

[생체3-4 | 14:35]

시한성 바이오전자소자를 위한 유연 접착 생분해성 전도성 잉크: 박소연, 강이현, 이금비*(경북대학교)

Keywords: 분해성, 전도성 잉크, 유연, 접착, 바이오전자소자

시한성 바이오전자소자는 사용 후 환경 또는 생체 내에서 분해되어 별도의 제거 과정과 전자 폐기물을 줄일 수 있는 차세대 전자 기술로 주목받고 있다. 이러한 소자의 핵심 구성요소인 전극으로써 생분해성 전도성 잉크는 전기전도성, 생체적합성 및 생분해성을 요구한다. 그러나 기존의 생분해성 전도성 잉크는 높은 전기전도도(약 6.4 kS/m)를 보이지만, 기계적 변형이나 외력에 의해 기판에서 쉽게 박리되어 전기적 연결 기능을 상실하는 한계가 있다. 본 연구는 기존 생분해성 전도성 잉크의 한계를 개선하기 위해 전기전도성, 유연성, 생분해성 및 계면 접착성을 동시에 고려한 다기능 전도성 잉크를 제안한다. 잉크는 생분해성 고분자인 폴리카프로락톤을 매트릭스로, 텅스텐 나노 입자(500 nm)를 전도성 필러로 도입하여 입자간 접촉에 기반한 전도성 네트워크를 형성한다. 또한 자연 유래 폴리페놀 화합물인 탄닌산을 추가하여 탄닌산의 다수의 수산기(-OH)가 잉크과 기판 접착 사이 접착을 보완한다. 제작한 전도성 잉크는 약 2 kS/m의 전기전도도를 나타내며, 반복 굽힘(곡률반경 7.5 mm, 1000번) 후에도 전기적 연결을 유지한다. 또한 탄닌산 첨가를 통해 키토산 필름, 마그네슘 포일 등 다양한 기판에서 향상된 접착 특성을 나타낸다. 본 잉크로 제작한 전자소자(예, 줄히터, 터치 센서, 온도 센서 등)는 안정적으로 작동하며, 향후 자연 및 생체 환경에서 바이오전자소자의 전극 소재로써 활용 가능성을 보여준다

[생체4-1 | 15:00] 초청강연

Engineering Magnetic Mesocrystal–MXene Heterointerfaces for Image-Guided Redox Cancer Therapy: Min Jun Ko(Kumoh National Institute of Technology, Northwestern Univ.), Seongchan Kim, Jun-Hyeok Han, Sanghee Lee, Minji Ahn(Northwestern Univ.), Hong En Fu, Young Jun Jang, Yoo Sang Jeon(Korea Univ.), Weiguo Li(University of Illinois at Chicago), Young Keun Kim(Korea Univ.), Dong-Hyun Kim*(Northwestern Univ.)

Keywords: Fenton reaction, magnetic nanoparticles, MXene, nanozymes, photo-responsive MRI, reactive oxygen species

Multifunctional platforms capable of sustaining regenerative redox catalysis while providing imaging feedback offer a promising strategy for image-guided oxidative cancer therapy. In this presentation, I will discuss conformally wrapped Fe_3O_4-$Ti_3C_2T_x$ MXene core-shell hybrid nanoparticles (FTHNPs), in which ultrathin MXene nanosheets effectively encapsulate crystallographically aligned magnetic mesocrystals to form an electronically coupled heterostructure. Controlled electrostatic and geometrical co-assembly of polyacrylate coated Fe_3O_4 mesocrystals with polyethyleneimine modified MXene enables conformal wrapping with maximized interfacial contact and suppressed edge-associated wrinkling. The engineered heterointerface facilitates directional electron transfer, supporting sustained near-infrared (NIR)-activated redox cycling and amplified reactive oxygen species (ROS) generation. Concurrently, the Fe_3O_4 core provides T_2-weighted magnetic resonance imaging (MRI) contrast for noninvasive spatiotemporal monitoring of nanoparticle localization and catalytic activation. NIR irradiation of FTHNPs induces potent oxidative cytotoxicity across both 2D monolayer and 3D spheroid prostate cancer models. Redox activation is accompanied by measurable modulation of T_2 contrast,

permitting MRI-based tracking of catalytic activity. In vivo periodic NIR-triggered treatment achieves significant tumor growth suppression under concurrent MRI surveillance. These findings establish an interfacial electron-transfer–engineered MXene-magnetic heterostructure as a platform for MRI-guided, persistent redox catalytic cancer nanomedicine.

[생체4-2 | 15:25] 초청강연

Magnetically Actuated Functional Materials for Intelligent Systems: Yoonseok Park*(Kyung Hee University)

Magnetic actuation technology enables precise, wireless control, offering significant potential for diverse applications. This lecture introduces research on developing functional composite materials embedded with magnetic nanoparticles to realize programmable and responsive actuation systems. By engineering magnetic composites with specific magnetization patterns, we achieve controlled deformation and motion under external magnetic fields. These materials can be applied beyond robotic systems to programmable intelligent materials, flexible sensors, and actuators. Notably, precise fluid regulation using magnetic fields has been explored for applications such as artificial heart valve systems, demonstrating potential for biomedical fluidic control. Additionally, shape-morphing magnetic structures enable complex motion, facilitating multi-degree-of-freedom robotic systems and reconfigurable metamaterials. This research presents a novel approach to designing and optimizing magnetically actuated systems, paving the way for advancements in next-generation medical devices, soft robotics, and smart material applications.

[생체4-3 | 15:50]

3D-printed Biodegradable Stent with Tantalum/Sirolimus to Inhibit In-Stent Restenosis in a porcine popliteal artery: Dong-Sung Won(Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine), Jong Hwa Seo(Hanyang University), Hyun Lee(Korea Institute of Industrial Technology), Hyun-Do Jung(Hanyang University), Jung-Hoon Park*(Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine)

Keywords: Bioresorbable scaffold, Tantalum, Sirolimus, 3D printing, In-stent restenosis, Peripheral arterial diseases

Bioresorbable scaffolds (BRS) were recently demonstrated to effectively prevent in-stent restenosis (ISR) in the treatment of peripheral artery disease (PAD). However, current BRS failure is regarding to insufficient surface modification and scaffold design. This study aims to investigate the efficacy and safety of a 3D-printed BRS based on biofunctional silica–polycaprolactone (PCL) nanocomposites and Janus surface nanoengineering with tantalum (Ta)/sirolimus (SRL). Polycaprolactone (PCL) composites with sol–gel-derived silica (fPCL) to improve mechanical properties were fabricated via 3D printing and the specification of the stent was 3 mm in diameter and 10 mm in length. Janus nanoengineering was achieved by Ta plasma immersion ion implantation (S-PIII): the luminal surface, enriched with nano-Ta, enhancing hemocompatibility, whereas the abluminal SRL/PLLA layer containing nano-Ta suppresses vascular smooth muscle cell migration and enhances re-endothelialization while minimizing initial burst release. Comprehensive in vitro evaluation showed improved hemocompatibility and cytocompatibility in Janus@fPCL group. Furthermore, the ISR-related variables were significantly lower in Janus@fPCL group in porcine peripheral artery (all $p < 0.001$). The Janus-engineered BRS was effective and safe to inhibit ISR, resulting in prolonged stent patency in the porcine peripheral artery. This 3D-printed Janus-engineered BRS represents a promising platform for next-generation in clinical application for PAD treatments.

[생체4-4 | 16:05]

탄닌산 기반 수소결합 네트워크를 이용한 팽윤 억제형 피부 밀착 전극의 발한 환경 생체신호 모니터링: 오성민, 박진우*(연세대학교)

Keywords: 팽윤 억제형 전극, 생체전위 모니터링, 발한 피부, 피부 밀착형 생체전자소자

운동 중 발생하는 땀과 반복적인 신체 움직임은 전극–피부 계면의 접촉면적과 접착 상태를 변화시켜 심전도(ECG) 및 근전도(EMG) 신호의 안정적인 측정을 방해한다. 특히 친수성 고분자 기반 건식 전극은 수분을 흡수하면 고분자 사슬이 팽창해 두께, 면적, 부피가 증가하고, 이로 인해 피부 미세구조를 따라 형성된 conformal contact가 손상될 수 있다. 이러한 계면 변화는 전극–피부 임피던스의 시간적 변동과 양측 전극 간 임피던스 불균형을 증가시키고, 결과적으로 베이스라인 잡음과 신호 왜곡을 유발할 수 있다. 본 연구에서는 발한 환경에서도 치수 안정성과 피부 밀착성을 유지하는 탄닌산(tannic acid, TA) 강화 폴리우레탄(PU)/PEDOT:PSS 기반 팽윤 억제형 피부 밀착 전극(TPP)을 개발하였다. PEDOT:PSS는 생체전위 전달을 위한 전기전도성을 제공하고 PU는 피부의 인장과 굽힘을 수용할 수 있는 기계적 순응성과 신축성을 부여한다. TA의 페놀성 수산기는 PU의 우레탄 카보닐 및 PSS의 설포네이트기와 다중 수소결합을 형성하여 전극 내부에 물리적 가교망을 구축한다. 이 가교망은 수분이 유입되어도 고분자 사슬의 이동과 과도한 팽창을 제한함으로써 전극의 치수 변형을 억제하고 수분 노출에 따른 전도 경로의 변형과 전기적 특성 변화를 완화한다. 푸리에 변환 적외선 분광법(FTIR) 분석에서 우레탄 C=O 피크는 1705.0에서 1695.3 cm^{-1}로 이동하였고, 설포네이트 관련 피크도 1093.6에서 1082.0 cm^{-1}로 이동하여 TA와 PU/PEDOT:PSS 사이의 수소결합 상호작용을 뒷받침하였다. 또한 에탄올을 이용한 계면 젖음성 향상은 TPP 전극이 피부의 미세한 주름과 굴곡을 따라 밀착되도록 하였으며, 에탄올 증발 후 형성된 기계적 인터라킹은 전극–피부 접촉을 안정화하였다. 인산완충식염수(PBS)에 침지 후 TPP 전극의 두께, 면적 및 부피 팽윤률은 각각 16.0 ± 4.1%, 10.0 ± 1.3% 및 17.6 ± 3.8%이었으며, TA가 포함되지 않은 PU/PEDOT:PSS 전극의 부피 팽윤률인 126.7 ± 8.7%보다 현저히 낮았다. 피부 모사체의 단면 주사전자현미경(SEM) 관찰 결과, TPP 전극은 습윤한 조건에서도 계면 간극 없이 피부 모사체의 굴곡을 따라 밀착된 반면 PU/PEDOT:PSS 전극에서는 팽윤에 의한 계면 분리가 관찰되었다. TPP 전극은 TA 기반 네트워크에 의해 영률(Young's Modulus)이 20.3 MPa로 증가했음에도 278%의 파단 변형률을 유지하여 피부 움직임을 수용할 수 있는 변형성을 나타냈

다. PBS 침지 후 면저항 변화율은 29.2 ± 3.0%로 PU/PEDOT:PSS 전극의 65.2 ± 5.0%보다 낮아 습윤한 환경에서 PU/PEDOT:PSS 전극보다 향상된 전기적 안정성을 확인하였다. 0–50% 변형을 200회 반복한 후 TPP 전극의 상대저항 변화율($\Delta R/R_0$)은 약 0.28로 안정화되어 반복적인 피부 변형에서도 전도 경로가 유지됨을 확인하였다. 또한 습윤한 피부 조건에서 TPP 전극의 좌우 임피던스 불균형(impedance imbalance)은 1 및 10 Hz에서 약 3%로, 상용 Ag/AgCl 젤 전극의 약 27%보다 크게 낮았다. 이는 TPP 전극이 양측 피부에서 보다 균일하고 안정적인 전기적 접촉을 형성하였음을 의미한다. 운동으로 발한을 유도한 후 TPP 전극은 안정적인 ECG 파형과 EMG envelope 신호를 기록하였으며, ECG 및 EMG 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)는 각각 27.5 및 31.8 dB였다. 이는 동일한 발한 조건에서 측정된 PU/PEDOT:PSS 전극과 상용 Ag/AgCl 젤 전극의 SNR보다 높은 값이었다. 이러한 결과는 발한 환경에서 신뢰성 있는 생체신호를 측정하기위해 전극의 팽윤과 치수 변형을 억제하여 발한 중에도 균일하고 안정적인 피부 밀착 계면을 유지하는 것이 중요함을 보여준다.

생체4-5 | 16:20]

Rare-earth-free magnesium-zinc alloy with controlled biodegradation and biocompatibility for novel biodegradable metallic stent: Yubeen Park(Asan Institute for Life Sciences, Asan Medical center), Yerin Ha, Seung Jin Eo(Asan Institute for Life Sciences, Asan Medical center, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine), Yu-Chan Kim(Korea Institute of Science and Technology (KIST)), Joung Sik Suh(Korea Institute of Materials Science), Hwa-Chul Jung(CG MedTech Co., Ltd.), Jung-Hoon Park*(Asan Institute for Life Sciences, Asan Medical center, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine)
Keywords: Biodegradable stent, Magnesium alloy, Rare-earth-free, Magnesium-zinc alloy, Biocompatibility, Vascular stent

Biodegradable magnesium (Mg) alloy stents are promising alternatives to permanent metallic implants; however, the clinically used WE43 alloy contains rare-earth (RE) elements, whose long-term biocompatibility requires further investigation. This study aimed to assess the biocompatibility, biodegradation behavior, technical feasibility, and safety of two RE-free Mg–Zinc (Zn)-based alloys, MZ01 (Mg–1Zn–0.1Ca) and ZM115 (Mg–1Zn–1.5Mn–0.5Sr), using a mouse subcutaneous model and a rabbit iliac artery stent model, with WE43 as a reference control. All stents were successfully fabricated with consistent geometries and adequate surface integrity, and in vitro assessment confirmed acceptable endothelial cytocompatibility and hemocompatibility for all alloys. In the mouse subcutaneous model, all Mg microtubes exhibited time-dependent biodegradation with a typical foreign body response; MZ01 showed smaller, more rapidly resolving gas cavities and a significantly lower microcrack area fraction at Day 56 than WE43 and ZM115. In the rabbit iliac artery model, stent placement was technically successful in all cases, with sustained luminal patency and no thrombotic complications throughout the 56-day follow-up. MZ01 demonstrated significantly lower neointimal thickness at Days 14, 28, and 56, reduced perivascular apoptosis, superior early endothelialization, and lower inflammatory cell infiltration at Days 28 and 56 compared with WE43. A preliminary porcine coronary artery implantation of MZ01 further confirmed technical feasibility and sustained patency over 56 days. These findings indicate that RE-free Mg–Zn alloys, particularly MZ01, provide biodegradation and biocompatibility profiles comparable to or more favorable than WE43, representing a promising material platform for next-generation biodegradable cardiovascular stents.

수소재료
Room 1층 105/6호, 10월 30일

[수소4-1 | 09:00]
변형 중 수소 재분포에 미치는 미세조직의 영향 분석: 결정소성 기반 해석: 강찬*, 강병진*, 박진홍*(서울과학기술대학교)
Keywords: 수소취성, 결정소성, 수소 재분배, 미세조직, 대표체적요소

초록 수소취성은 재료 내부의 전체 수소량뿐만 아니라, 변형 과정에서의 수소 확산과 국부적으로 얼마나 농축되는지에 크게 영향을 받는다. 특히 변형에 따라 응력과 전위밀도가 불균일하게 발달하므로, 수소의 이동과 축적 양상도 결정립 크기, 구성 상, 개재물과 같은 미세조직 특성에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 전위밀도 기반 결정소성 모델과 수소 확산 모델을 연계하여, 이러한 미세조직 인자들이 변형 중 수소 재분포에 미치는 영향을 분석하였다. 평균 결정립 크기가 30 및 60 μm인 단상 다결정 조직, 마르텐사이트–오스테나이트(MA) 및 마르텐사이트–페라이트(MF) 이상조직, 그리고 서로 다른 형상의 개재물을 포함한 대표체적요소를 구성하고 동일한 변형 및 수소 조건을 적용하였다. 해석 결과, 결정립이 미세해질수록 수소농도 분포의 불균일성도 커졌으나, 증가한 결정립계 네트워크에 수소가 분산되고 전위밀도 증가가 억제되면서 단위 결정립계 길이당 수소 축적량은 감소하였다. 또한 이상조직에서는 주변상이 오스테나이트인지 페라이트인지에 따라 수소 플럭스의 크기와 방향이 달라졌으며, 이에 따라 마르텐사이트 내부로의 수소 유입과 축적 거동에도 차이가 나타났다. 개재물 주변에서는 응력과 수소가 국부적으로 집중되었고, 그 위치와 크기는 개재물 형상뿐만 아니라 인접 결정립의 방위에도 영향을 받았다. 이러한 결과를 통해 결정립 크기, 상 조합 및 개재물 형상과 같은 미세조직 인자가 변형 중 수소의 이동 경로와 국부 농축 거동에 서로 다른 영향을 미치는 것을 확인하였다.

[수소4-2 | 09:15]
수소 친화도 조절을 통한 마르텐사이트계 중엔트로피 합금에서의 수소 확산 억제 연구: 송상윤, 허재, 박규민(고려대학교), 이건직(한국과학기술연구원), 양대철, 한정훈, 남정훈(고려대학교), 도현석, 이병주, Alireza Zargaran(포항공과대학교), Aparna Saksena(Max Planck Institute for Sustainable Materials), Baptiste Gault(Max Planck Institute for Sustainable Materials, Univ Rouen Normandie), 김세호*, 고원석*, 손석수*(고려대학교)
Keywords: 중엔트로피 합금, 수소취성, Cryo-APT, DFT 계산

고강도 마르텐사이트계 합금은 BCC 결정로 인해 수소 확산이 매우 빠르며 이로 인해 수소취성에 매우 취약하다. 따라서, 이러한 마르텐사이트계 합금에서는 수소 침투를 억제하는 것이 수소취성 저항성 향상을 위해 필수적이다. 본 연구에서는 마르텐사이트계 중엔트로피 합금에서 잔류 FCC 상의 수소 친화도를 높여 수소 확산을 억제하는 전략을 소개한다. 수소 친화도가 높은 바나듐과 낮은 니켈을 사용하여 상분율이 비슷한 두가지 $Cr_{10}Fe_{51}Co_{30}Ni_9$ 및 $Cr_{10}Fe_{50}Co_{30}V_{10}$ 중엔트로피 합금을 설계하였다. 비슷한 미세조직을 가짐에도 불구하고 V 함유 합금은 Ni 함유 합금보다 약 80배 높은 유효 수소 고용도와 약 25배 낮은 유효 수소 확산도를 나타냈다. Cryo-atom probe tomography 분석 결과 V 함유 합금의 잔류 FCC 상에서는 뚜렷한 중수소 고용이 관찰된 반면, Ni 함유 합금에서는 중수소 농도가 검출 한계 이하로 나타났다. Density functional theory 계산을 통해 바나듐이 수소로의 전하이동을 촉진시켜서 잔류 FCC 상의 수소 고용 에너지를 낮춘다는 것을 보여주었다. 그 결과, 장시간 수소 주입 후에도 V 함유 합금에서는 수소 유입과 수소 유기 취성 파괴가 표면 인근 영역에 국한되었다. 이러한 결과는 국부적인 화학적 친화도가 수소의 용해와 확산을 제어하기 위한 독립적인 합금 설계 인자로 활용될 수 있음을 제시한다.

[수소4-3 | 09:30]
확산접합된 오스테나이트계 합금의 결정립계 석출물이 수소취성에 미치는 영향: 최동현(부산대학교), 김현준, 손영훈(동화엔텍), Levi Tegg(The University of Sydney), 강남현*(부산대학교)
Keywords: 스태인리스, 수소취성, 확산접합, 석출물

최근 탄소중립 실현을 위한 친환경 에너지인 수소 에너지에 대한 관심이 증가하고 있으며, 수소 에너지 인프라 구축을 위해 다양한 산업에서 연구가 진행되고 있다. 특히, 수소충전소에서 작동하는 열교환기의 핵심 제조 기술은 확산접합이 주목받고 있다. 확산접합은 복잡한 내부 유로를 가지는 구조물을 기계적 성형없이 일체화할 수 있고, 모재에 준하는 우수한 접합 강도를 확보할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 확산접합 공정은 장시간 고온 노출 및 냉각 과정에서 탄화물, 붕화물, sigma상 등 입계 석출물을 형성될 수 있다. 석출물에 따른 기계적 물성 거동에 대한 연구는 활발히 진행되었지만, 석출상이 수소취성에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구는 오스테나이트계 합금인 SS 304, 316L의 확산접합부를 제작하고, 전기화학적으로 수소를 강재 내부로 장입하였다. 두 합금의 결정립계 석출상 규명 및 분율을 정량화였으며, 이후 저속변형인장시험을 통해 수소취성민감성을 평가하였다. 이후 SEM, EBSD, TEM 분석을 활용하여 미세조직, 변형거동, 수소유기균열을 분석하였으며, 석출물과 수소취성과의 상관관계에 대해 분석하였다.

[수소4-4 | 09:45]
API X70 원주 용접부의 잔류응력 조건에 따른 수소 확산 거동 및 임계 잔류응력 규명: 김성환*, 손정현, 서상원, 김병준, 문형순(한국생산기술연구원 동남기술실용화본부)
Keywords: 수소취성, 원주용접, 고압수소, 단면수축율

고압수소 수송 파이프라인은 30년 이상의 장기 운전 과정에서 고압·고온 수소 환경과 운전 응력에 지속적으로 노출된다. 특히

API 5L X70 파이프의 원주용접부 열영향부(HAZ)에는 용접 특성상 상당한 수준의 잔류응력이 존재하며, 서비스 환경 중 잔류응력이 집중된 HAZ 영역으로의 수소 확산 촉진 및 수소취성 감수성 증가가 우려된다. 본 연구에서는 구경 20인치 API 5L X70 파이프에 FCAW(Flux-Cored Arc Welding) 원주용접을 수행한 후, 노치가 HAZ에 위치하도록 노치 라운드(Notch-round) 인장 시편을 제작하였다. 수소 환경 가속 노출 평가를 위해 오토클레이브를 이용해 150 ºC 및 100 bar의 고온·고압 수소 분위기로 유지한 상태에서, 시편 노치부에 항복강도 이하의 일정한 하중(Static Load)을 부과하였다. 이를 통해 장기 수소 노출에 따른 원주용접부 및 HAZ의 수소 확산 거동과 기계적 특성 변화를 조사하였다. 실험 결과, 동일 조건의 API 5L X70 모재에서는 균열이 관찰되지 않은 반면, HAZ 영역에서는 인가된 하중(응력) 크기에 비례하여 노치 단면에서 수소응력균열(Stress-Induced Cracking)의 개수 및 길이가 증가하였다. 또한 in situ SSRT에서 단면수축률(RA)이 유의미하게 감소함을 확인하였다. 특히, 모재 항복강도의 약 70% 수준인 350 MPa 이상의 하중이 작용할 때 응력유기균열의 성장이 급격히 가속화되는 임계 응력 조건이 존재하는 것을 규명하였다. 이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 RS-2024-00444679)

[수소4-5 | 10:00]

TiB 강화가 타이타늄 기지 복합재의 수소 트래핑 및 수소취성거동에 미치는 영향 : 정현(충남대학교), Qiang Li(Nanyang Technological University), Zhao Yakai(A*STAR), Upadrasta Ramamurty(Nanyang Technological University), 이근형, 이수열, 이동현*(충남대학교)

Keywords: α-Ti, Ti alloys, Hydrogen embrittlement, TiB

타이타늄(Ti)과 그 합금은 높은 비강도, 우수한 내식성 및 내산화성을 바탕으로 항공우주, 해양, 원자력 및 화학 산업 등 다양한 분야에서 널리 사용되고 있으며, 최근에는 액화수소 저장 및 운송용 구조재로도 주목받고 있다. 그러나 Ti는 수소와 접촉할 경우 δ-hydride가 형성될 수 있으며, 이는 국부적인 변형 집중과 취성 균열의 개시를 유발하여 기계적 특성과 피로 저항성을 저하시킬 수 있다. 최근에는 보론(B) 첨가를 통해 순수 Ti의 결정립을 미세화하고, 입계 및 입내에 분포하는 TiB 입자를 이용하여 강도와 피로 파괴 저항성을 향상시키는 연구가 보고되고 있다. 그러나 이러한 미세조직 변화, 특히 TiB 입자의 형성과 분포가 Ti의 수소취성 거동에 미치는 영향은 아직 충분히 규명되지 않았다. 본 연구에서는 Ti와 AlB_2 분말을 볼밀링한 후 Ti–TiB 합금을 제조하고, 보론 함량에 따른 TiB 입자의 분율 및 입계·입내 분포 변화를 체계적으로 분석하였다. 또한 수소 장입 전후 인장시험을 통해 수소취성 거동을 평가하고, 극저온 인장시험을 통해 TiB 분율에 따른 기계적 거동 변화를 조사하였다. 파단 후 시편의 파단면 및 수소 유기 균열을 SEM과 EBSD를 이용하여 분석함으로써 TiB 분율에 따른 균열 개시 및 전파 거동의 변화를 비교하였다. 마지막으로 Ag decoration을 이용하여 수소 trap site를 시각화하고, TiB 형성에 따른 수소 분포 및 trap site의 변화를 분석하였다. 이를 바탕으로 TiB 입자의 분율과 분포가 α-Ti의 수소취성 및 균열 전파 거동에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

[수소4-6 | 10:15]

상용 순수 티타늄(CP-Ti) 박판의 수소취성 및 내식성 평가: 심이준, 김혜진*(한국공학대학교)

Keywords: 티타늄, 수소화물, 수소취성, 내식성

육방정계(HCP) 구조를 갖는 알파 상 순수 티타늄(CP-Ti)은 상온에서 수소 고용도가 매우 낮기 때문에, 산성 또는 음극 전위 환경에 노출될 경우 유입된 수소가 내부 결함에 집적되거나 티타늄 수소화물(TiH) 상을 용이하게 형성하는 것으로 알려져 있다. 특히 박판의 경우 부피 대비 표면적의 비율이 높아 수소 유입 특성과 이에 따른 국소 변형 거동, 표면 피막 열화에 의한 재료 건전성 저하에 민감하다. 본 연구에서는 수소 응용 환경용 소재 적용성을 평가하고자 CP-Ti 박판(미도금재 0.07 mm, 도금재 0.09 mm)을 대상으로 전기화학적 수소 주입에 따른 수소화물 형성, 미세조직 변화 및 수소취성, 내식성을 종합적으로 평가하였다. 수소 주입은 미도금재 시편을 중심으로 3전극 전기화학 셀(-0.9 V vs Eref Ag/AgCl, 0.5 M H_2SO_4 수용액, 80 ºC, 1시간)을 사용하여 수행되었다. 수소 주입 전후의 미세조직 변화 및 TiH 상의 형성은 X-선 회절 분석(XRD)을 통해 확인하였으며, 열 탈착 분광법(TDS)을 활용하여 박판 내 수소량 정량 분석 및 탈착 거동을 분석하였다. 또한 주사전자현미경(SEM) 및 후방산란전자회절(EBSD) 분석을 통해 수소 주입에 따른 국부적 미세조직 변형 거동과 연성-취성 파단면 형태의 변화를 관찰하였다. 내식성 평가는 동전위 분극(PD) 시험을 통해 수소 주입이 CP-Ti 박판의 표면 피막 안정성 및 전기화학적 부식 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

고엔트로피합금
Room 1층 103호, 10월 30일

[고엔1-1 | 08:30]
탄소 첨가에 따른 $L1_2$ 석출강화 철계 다성분계 합금의 석출 거동, 기계적 물성 및 변형 기구: 윤주희, 김진섭, 김진경*(한양대학교)
Keywords: 다성분계 합금, $L1_2$ 석출물, 탄소 첨가

$L1_2$ 석출 강화 다성분계 합금은 우수한 강도-연신율 조합으로 주목받고 있다. 본 연구는 코발트를 포함하지 않은 철계 $L1_2$ 석출 강화 합금에서 탄소 첨가가 석출 거동, 기계적 물성 및 변형기구에 미치는 영향을 조사하였다. 아크멜팅으로 제조한 탄소첨가 합금은 열간압연, 균질화, 냉간압연 및 재결정화 열처리 이후 600 ℃에서 시효 열처리를 수행하였으며, 탄소미첨가 합금에도 동일한 공정을 적용하였다. 탄소첨가 합금에서는 TiC와 함께 600 ℃ 시효 열처리 후 $L1_2$를 포함한 다양한 석출물이 형성되었으며 $L1_2$ 석출물의 분율은 탄소미첨가 합금에 비해 크게 증가하였다. 이로 인해, 강도와 가공경화율이 향상되었으며 연신율은 감소하였다. 또한, TEM을 통해 $L1_2$, Cr-rich BCC를 포함한 다양한 석출물과 전위의 상호작용 및 stacking fault 형성을 관찰하였으며, 탄소 미첨가 합금과의 비교를 통해 탄소 첨가에 따른 석출 거동의 변화와 이에 따른 변형 기구의 차이를 규명하였다.

[고엔1-2 | 08:45]
Direct Aging을 통한 $L1_2$ ordering 제어에 따른 FeCoNiV 고엔트로피 합금의 우수한 극저온 기계적 특성: 하수빈, 이시우, 김재훈, 고태영, 김래언(포항공과대학교), 이재혁(단국대학교), Ban Yijie*, 김형섭*(포항공과대학교)
Keywords: High-entropy alloy, Cryogenic properties, Strengthening mechanisms, Hot rolling, Direct aging

최근 항공우주 및 미래 에너지 산업의 확대와 함께 극저온 환경에서 적용 가능한 금속 구조재료에 대한 수요가 증가하고 있다. 이러한 극한조건에서 안정적으로 작동하기 위해 서는 우수한 강도–연성 조합이 요구되며, 이에 대한 전략으로 최근에는 극저온 조건에서 전위 이동 제어와 계면 정합성을 동시에 확보할 수 있는 $L1_2$ 석출강화 전략이 큰 주목을 받고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 FeCoNiV 등원자 중엔트로피 합금에 열간압연과 direct aging 공정을 적용하여 압연 과정에서 도입된 높은 전위밀도 및 그에 따른 $L1_2$ ordering 제어를 통해 기계적 특성을 향상시키고자 하였다. Solution treatment 처리 후 aging을 진행한 시편은 낮은 전위밀도와 조대한 anti-phase domains을 나타낸 반면, direct aging을 진행한 시편은 초기 높은 전위밀도로 인한 전위 구조와 전위 주변에서 우선적으로 형성된 nanometer-scale의 구형 $L1_2$-ordered domains이 확인되었다. 이러한 미세조직적 차이는 변형시에 전위 이동을 효과적으로 억제하여 극저온에서 solution treatment 처리 후 aging을 진행한 시편 대비 항복강도가 약 2배 향상되었으며, 인장 강도와 가공경화 거동 또한 향상되었다. 특히 우수한 가공경화로 인해 극저온 조건에서 인장 강도 약 1.8 GPa와 연신율 35%를 달성하며, 기존의 강도–연성 trade-off를 효과적으로 극복하였다. 본 연구는 direct aging을 통한 전위 구조와 $L1_2$ ordering의 동시 제어가 극저온 기계적 특성을 향상시키는 효과적인 미세조직 설계 전략임을 제시한다.

[고엔1-3 | 09:00]
화학적 기지 조성 제어 및 $L1_2$ 석출강화를 통한 중엔트로피 합금의 초저온 강도–연성 향상: 이하훈(고려대학교), Wei Zhang(Central South University), 성민영, 남승진, 정두효(고려대학교), 백주현(고려대학교, 한국과학기술연구원), 서진유(한국과학기술연구원), 장태진, 이준호, 김영균(한국재료연구원), Yong Zhang(Central South University), 나영상(한국재료연구원), 김세호(고려대학교), Zhiming Li*(Central South University), 손석수*(고려대학교)
Keywords: 초저온, 헤테로구조, 불연속 나노석출물, 적층결함, 기계적 물성

초고강도와 충분한 가공경화능을 동시에 확보하는 것은 초저온에서 사용되는 구조용 합금 설계의 핵심 과제이다. 특히 석출강화 합금에서는 항복강도를 높이는 석출물이 초저온 연성을 유지하는 데 중요한 TRIP 및 TWIP 기반 소성변형을 제한할 수 있기 때문에, 강도와 연성의 동시 향상은 더욱 어려워진다. 본 연구에서는 석출강화 중엔트로피 합금에서 화학적으로 조절된 헤테로구조 미세조직을 도입하여 극저온 변형 거동을 새롭게 설계하고자 하였다. 열역학 계산을 기반으로, 본 합금은 높은 분율의 정합 $L1_2$ 석출물을 형성하면서도 취성을 가지는 sigma 상의 형성을 억제하고, 원소 분배 이후 기지 조성을 planar-fault 기반 변형에 유리한 방향으로 조절하도록 합금 조성을 설계하였다. 냉간 압연 후 직접 시효 열처리 공정을 적용하여 미세결정립 (fine grain, FG)와 초미세결정립 (ultra-fine grain, UFG)로 구성된 헤테로구조와 함께 모재와 정합인 불연속 $L1_2$ 나노석출물을 동시에 구현하였다. 그 결과, 4.2 K에서 항복강도 약 2.2 GPa, 인장강도 약 2.5 GPa, 연신율 20%에 근접하는 물성을 확보하였으며, 이는 초극저온 영역의 석출강화형 medium-/high-entropy 합금 중에서도 매우 우수한 강도-연성 조합에 해당한다. 이러한 우수한 기계적 특성은 화학적으로 조절된 기지와 초저온에서 억제된 전위의 동적 회복에 의해 planar fault가 활발히 축적되고, 미세결정립과 초미세결정립 사이의 변형 재분배 및 후방 응력 강화효과에 기반한 결과로 해석된다. 본 연구는 석출을 통한 기지 조성 제어가 초고강도와 연성을 동시에 갖는 초저온 구조용 합금 설계에 효과적인 전략이 될 수 있음을 보여준다.

[고엔1-4 | 09:15]
Effect of Aging-Treatments on the Microstructure and Mechanical Properties of a Multi-Component NiCoFeCrAlTiNbMoWRe High-Entropy Alloy: Rehman Izaz Ur(Inha University), Won-Sang Shin(Sungkyunkwan University), Seung-Joo Lee, Jin-Won Kim, Jwa-Hyeon Kim, Min Kang, Kim Yoobeen(Inha University), Dieter Isheim(Northwestern University), Taeho Lee, Soo Yeol

Lee(Chungnam National University), David N. Seidman*(Northwestern University), Yoon-Jun Kim*(Inha University)
Keywords: High-entropy alloys, Mechanical properties, Nano-scale precipitates, Unidirectional solidification

This study investigates the effects of heat treatment on the microstructures and mechanical properties of the multi-component NiCoFeCrAlTiNbMoWRe high-entropy alloy. An alloy with nominal composition of$Ni_{47}(FeCoCr)_{34.2}(AlTi)_{15}(MoW)_{1.4}Nb_{1.2}Re_{1.2}$(at. %) was prepared by vacuum induction melting followed by unidirectional solidification. The resulting samples were then heat treated at 650 ºC, 750 ºC, and 850 ºC for 5, 10, and 20 h. Optical and scanning electron microscopy revealed a dendritic microstructure with distinct grain boundaries and dispersed precipitates. With aging temperature and time, the precipitates became coarser and more densely distributed throughout the microstructure. The 0.2% offset yield strength of the samples aged at 650 ºC increased continuously with increasing aging time. In contrast, the yield strength of the samples aged at 750 ºC and 850 ºC initially increased and subsequently decreased with increasing aging time, which was associated with changes in precipitate size and distribution. The ductility decreased with increasing aging temperature from 650 ºC to 850 ºC, with fracture strains ranging from 1.1% to 5.8%, depending on the heat-treatment conditions. Among all the investigated conditions, the samples aged at 650 ºC for 5 h and 10 h and the sample aged at 750 ºC for 5 h exhibited the most favorable combination of high strength and good ductility.

[고엔1-5 | 09:30]
방향성 응고를 통한 과공정 NiCoCrAl 중엔트로피 합금의 연신율 향상: 여인혁(한국과학기술원), 곽호재(포항 가속기연구소), 한승민*(한국과학기술원)
Keywords: 과공정 중엔트로피 합금, 연신율 향상
취성 B2상 초정(primary crystal)을 포함하는 과공정(hypereutectic) 조성의 중/고엔트로피 합금은 높은 강도에도 불구하고 조기 파단에 의해 낮은 연신율을 보이는 경우가 많다. 본 연구에서는 취성 B2 초정 수지상(Dendrite)을 갖는 과공정 NiCoCrAl 중엔트로피 합금에서 수지상의 미세조직에 따라 인장강도의 손실없이 연신율을 크게 향상시킬 수 있음을 관찰하였다. 방향성 응고와 in-situ 싱크로트론 X선 이미징을 결합하여, 온도구배와 초정 수지상 성장 방향 사이의 오배향각에 따른 2차 및 3차 수지상 가지의 발달을 직접 관찰하였다. 오배향각이 약 0 º로 정렬된 경우에 2차 수지상 가지의 성장이 억제되어 공정 조직 내부에 서로 고립된 수지상이 형성되었으며, 이는 상경계 균열 전파에 불리한 미세조직이었다. 반면, 약 30 º의 오배향각을 갖는 경우, 길게 성장한 수지상 가지가 용이한 상경계 균열의 합체 경로를 제공함으로써 조기 파단을 촉진하였다.

[고엔1-6 | 09:45]
초음파 나노결정 표면 개질 기법을 통한 Co-Cr-Fe-Ni-Mo 고엔트로피 합금의 표면 미세구조 및 극저온 기계적 거동 변화: 임현빈(국립공주대학교), 이재홍(포항공과대학교), 김영균, 나영상(한국재료연구원), 김형섭(포항공과대학교), 문종언*(국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터)
Keywords: 초극저온 구조용 소재, 초음파 나노결정 표면 개질, 표면 구배층, 변형 유기 상변태
초극저온 구조용 소재는 수소 에너지, 극지 항로, 우주항공 산업에서 필수적으로 요구된다. 그러나 기존 구조용 소재는 초극저온에서 변형 불안정성과 연성-취성 전이 거동을 동반하여, 고강도와 우수한 연성을 동시에 달성하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 Co-Cr-Fe-Ni-Mo 고엔트로피 합금에 초음파 나노결정 표면 개질(UNSM) 기법을 적용하고, 초기 미세조직과 4.2 K 초극저온 인장 변형에 따른 미세조직 및 기계적 특성의 변화를 분석하였다. SEM 및 XRD 분석 결과, UNSM 처리로 형성된 표면 구배층과 높은 압축 잔류 응력은 4.2 K에서 합금의 강도를 향상시켰으며, 변형 과정 중 활성화된 변형 유기 상변태는 지속적인 가공경화를 유도하여 우수한 연성을 유지하는 데 기여하였다. 이러한 결과는 UNSM 기법은 초극저온 구조용 소재의 고강도 및 우수한 연성 균형을 확보하는 유용한 표면 처리 기술이 될 수 있음을 시사한다.

[고엔2-1 | 10:10]
CrMnFeCoNi 소결 합금의 미세조직과 기계적 특성간 상관관계 규명: 장성혁, 박성현, 정재길*(전북대학교)
Keywords: High-entropy alloy, Mechanical milling, Spark plasma sintering, Transmission electron microscopy, Strengthening mechanism
고엔트로피 합금(High-entropy alloy, HEA)은 5가지 이상의 주요 원소를 기반으로 설계되는 합금으로, 우수한 기계적 특성과 미세조직 안정성으로 인해 구조용 소재로 활발히 연구되고 있다. 대표적인 FCC계 HEA인 CrMnFeCoNi 합금은 우수한 연성과 파괴저항성을 나타내지만, 상온 항복강도 향상을 위해 미세조직 제어가 요구된다. 기계적 밀링과 방전 플라즈마 소결(Spark plasma sintering, SPS)은 결정립 미세화와 미세 이차상 분산을 유도할 수 있는 효과적인 분말 야금 공정이다. 밀링 중 공정제어제는 분말의 냉간 용접과 파쇄 거동뿐만 아니라 탄소 및 산소 유입으로 인해 탄화물/산화물의 형성에도 영향을 줄 수 있다. 또한 탄소나노튜브(Carbon nanotube, CNT)는 분말 미세화와 Cr 탄화물 형성에 영향을 줄 수 있으며, Y_2O_3는 결정립 성장 억제와 산화물 분산강화에 기여할 수 있다. 따라서 PCA, CNT 및 Y_2O_3의 조합에 따른 분말 거동과 소결 후 미세조직 변화를 체계적으로 이해할 필요가 있다. 본 연구에서는 PCA, CNT 및 Y_2O_3 첨가 조합이 CrMnFeCoNi 소결 합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하였다. PCA 첨가(P), PCA+CNT 첨가(PC), PCA+Y_2O_3 첨가 (PY) 및 PCA를 사용하지 않은 CNT+Y_2O_3 합금(YC)을 기계적 밀링한 후 SPS를 통해 제조하였다. X-선 회절분석법(X-ray diffraction, XRD)을 이용하여 상 구성과 결정구조 변화를 분석하였고, 라만 분광법(Raman spectroscopy)를 통해 CNT 첨가에 따른 탄소계 물질의 구조적 변화를 조사하였다. 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM) 및 후방산란전자회절법(Electron backscatter diffraction, EBSD)를 이용하여 FCC 결정립과 이차상 분포를 분석하였으며, 투과전자현미경(Transmission electron microscope, TEM)을 통해 탄화물과 산화물의 결정 구조, 크기

및 분포를 조사하였다. 또한 원자 단층 현미경(atom probe tomography, APT)을 이용하여 나노 크기 산화물의 조성과 분포를 분석하였다. 기계적 특성은 비커스 경도 시험 및 압축시험을 통해 평가하였으며, 첨가제 조합에 따른 결정립 크기, 전위 및 나노 이차상과 기계적 특성 간의 상관관계를 고찰하였다.

[고엔2-2 | 10:25]

탄소 보조 정적 변형시효를 이용한 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금의 극저온 강도-연성 향상: 최주미, 김래언, 구본우, 박효진, 고태영, 한규미, 김은찬, 오상호, 이병주(포항공과대학교), 이성보(서울대학교), 김형섭*(포항공과대학교)

Keywords: 고엔트로피합금, 정적 변형시효, 코트렐 분위기, 극저온 변형, 변형쌍정

CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금은 우수한 극저온 물성을 나타내지만, 상대적으로 낮은 항복강도로 인해 극저온 구조재 적용에는 한계가 있다. 본 연구에서는 탄소 보조 정적 변형시효(static strain aging, SSA)를 이용하여 극저온에서 항복강도를 향상시키면서도 우수한 균일연신율을 유지할 수 있는 새로운 강화 전략을 제안하였다. 0.5 at% C가 첨가된 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금에 5% 사전 변형을 부여한 후 473 K에서 저온 시효를 실시하여 탄소-전위 상호작용을 유도하였으며, 이후 298 K 및 77 K에서 인장시험을 수행하였다. 실험 결과, 탄소가 첨가되지 않은 합금에서는 SSA에 의한 추가 강화 효과가 거의 없는 반면, 탄소 첨가 합금에서는 추가 강화량이 상온에서 17 MPa, 극저온에서 71 MPa로 약 4배 증가하였다. 특히 극저온에서 항복강도는 약 991 MPa, 균일연신율은 약 43%를 나타내어 우수한 강도-연성 조합을 달성하였다. 분석을 통해 탄소 첨가 시편에서 전위 주변의 국부 격자 변형장이 증가하여 강화된 탄소-전위 상호작용을 확인하였으며, 극저온 변형 중 활발한 변형쌍정 형성으로 높은 가공경화능이 유지됨을 확인하였다. 결과적으로, 탄소 보조 정적 변형시효는 탄소-전위 고정에 의한 초기 강도 향상과 변형쌍정에 의한 지속적인 가공경화를 통해 우수한 강도-연성 균형을 구현하였으며, FCC 고엔트로피 합금의 극저온 구조재 적용을 위한 간단하고도 효과적인 강화 전략으로 활용될 수 있음을 제시한다.

[고엔2-3 | 10:40]

Al-Zr계 내화 고엔트로피 합금의 상분리 기반 입계 산화 거동 연구: 윤교식(아주대학교), 이한성(아주대학교, Yale University), 안병민*(아주대학교)

Keywords: refractory high-entropy alloy, boundary, phase separation, selective oxidation, powder metallurgy

Nb와 같은 고융점 원소 기반의 내화 고엔트로피 합금(Refractory high-entropy alloys, RHEAs)은 고온에서도 높은 기계적 강도와 구조적 안정성을 확보할 수 있는 차세대 구조재료이다. 최근에는 RHEAs의 경량화와 더불어 내화 원소의 산화로 인한 기지 비보호성 산화층 형성을 억제하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이때 Al, Zr과 같이 높은 전자 친화도를 가지는 원소의 첨가를 통해 표면에 선택적 산화를 유도할 수 있다. 하지만 분말 공정 기반의 합금은 비교적 작은 결정립계를 가져 산화 거동에서 입계에 의한 산소, 원소 확산 또한 고려해야 한다. 또한 산화 거동 중 준안정 미세조직의 상분리를 고려한 열역학적 해석이 요구된다. 이에 본 연구에서는 분말 공정으로 제조된 미세결정립 RHEAs에서 발생하는 준안정상의 분리와 입계를 통한 산소 및 원소의 확산·재분배 거동을 분석하였다. 이를 바탕으로 미세조직 및 상 안정성의 변화가 선택적 산화, 산화층 형성 및 입계 산화 거동에 미치는 영향을 규명하여 RHEAs에서의 미세조직과 고온 산화 거동간의 상관관계를 밝히고자 하였다. 본 연구에서는 기계적 합금화를 통해 $Al_{0.75}VCrZrNb_x$ (x=0.25-1, 0.25 step) RHEAs 분말을 제조하였다. 방전 플라즈마 소결을 통해 분말을 치밀화한 후 균질화 열처리를 수행하였다. 열처리된 N_2 99.99% 분위기, 900 ºC에서 24시간 산화시켰다. RHEAs의 산화에 따른 상 및 미세조직 변화는 X선 회절분석(X-ray diffractometion, XRD), 주사전자현미경-에너지 분광 분석기(Scanning electron microscope-energy dispersive spectroscopy, SEM-EDS), 투과전자현미경(transmission electron microscope, TEM)을 통해 분석하였으며, 고온 산화 거동은 동시열분석기(Simultaneous thermal analyzer, STA)를 통해 분석하였다. 열처리된 RHEAs의 상 및 미세조직 분석 결과, 낮은 Nb 첨가량에서는 상호 고용도 차이로 인해 BCC 기지상과 함께 VCr-rich BCC 상이 분리되었다. Nb 첨가량이 증가함에 따라 VCr-rich BCC 상은 기지상으로 고용되었지만 포화된 Nb와 Zr의 석출이 심화되었다. 합금의 산화 중에는 낮은 Nb 첨가량에서는 확산 의존적인 산화 거동으로 낮은 질량 증가를 보였지만, 높은 Nb 첨가량에서는 두 단계 산화거동과 함께 큰 질량 증가량을 보였다. 산화 후 단면에서는 Nb 첨가량이 증가할수록 Zr의 외부 확산이 심화되어 기지 내 Zr이 결핍되는 경향과 산화층의 박리가 발생하였다. 또한 초기 산화층의 박리 후 생긴 2차 산화층에서는 추가적인 박리는 발생하지 않았다. 이는 높은 Nb 첨가량에서의 표면 반응이 지배적인 산화거동에서 확산 제한적인 비이상적 산화거동으로의 전환과도 일치한다. 낮은 Nb 첨가량에서는 입자 경계에 Zr 또는 Al이 산화되었으며 주변부에는 분리된 VCr-rich phase가 잔류하였다. 이는 VCr-rich phase에서 분리된 Al이 입계에서 산화되어 원소의 확산을 억제할 수 있었던 것으로 판단된다. 하지만 높은 Nb 첨가량에서는 입계를 통한 Zr의 외부 확산이 ZrO_2를 조대화시켰으며 응력이 집중되어 박리가 발생함을 확인하였다. 본 연구에서 입계에서의 원소 재분배와 상분리가 입계 산화 및 산화층의 열화와 밀접하게 관련됨을 확인하였다. 이는 초기 상 구성이 특정 원소의 선택적 산화 유도에 큰 영향을 미침을 시사한다. 본 연구를 통해 분말 공정을 기반으로 제조된 내화 고엔트로피 합금의 입계 산화 거동 개선에 유용한 기초 데이터를 제공할 수 있을 것이다.

[고엔2-4 | 10:55]

Effect of Composition on Phase Stability and Shape Recovery of CoCrNi Medium-Entropy Alloys: Ana Paula Nolasco Aguilera, Hwi Yun Jeong, Jinsurang Lim, Je In Lee*(Pusan National University)

Keywords: phase stability, martensitic transformation, shape memory effect, strain recovery

Shape memory effect (SME) in metastable alloys is closely related to the reversibility of stress-induced martensitic transformation and the competition between the transformation and slip deformation. Although CoCrNi medium-entropy alloy has been extensively investigated over the years for its exceptional mechanical properties, its SME and the composition effect remain unreported and

insufficiently understood. In the present work, the relationship between composition, phase stability, martensitic transformation and shape recovery was investigated across the CoCrNi ternary system. Non-equiatomic CoCrNi alloys were prepared varying the Cr, Co and Ni contents in steps of 5at.% and characterized by x-ray diffraction and differential scanning calorimetry to evaluate the FCC/HCP phase stability and transformation behavior. Shape recovery was first evaluated through compression deformation at room temperature followed by thermomechanical analysis, identifying an optimal compositional window at intermediate Ni and Cr contents where the highest shape recovery ratio was found to be around 50%. Tensile deformation and subsequent recovery heating were performed on compositions within and near the optimal window to further examine their mechanical response and shape recovery. The consistency between tensile recovery strain and compression recovery strain further confirms the existence of an optimal compositional window for reversible stress-induced martensitic transformation in the CoCrNi ternary system. Overall, the results indicate that appropriate FCC phase stability at room temperature is critical for achieving reversible stress-induced martensitic transformation and enhanced shape recovery in CoCrNi alloys.

[고엔2-5 | 11:10]

조합 방식을 이용한 Ni-Co-Cr 조성 구배 박막의 기계적 특성 평가: 이금미, 박세민, 김대호, 한승민*(한국과학기술원)

Keywords: 중엔트로피합금, 박막, 코스퍼터링, 미세구조, 기계적 특성, 나노인덴테이션

NiCoCr 중엔트로피 합금은 우수한 저온 강도와 연성으로 인해 극한환경용 구조재료로 많은 관심을 받고 있다. 그러나 상온에서의 항복강도가 상대적으로 낮다는 한계가 있어, 기계적 특성을 향상시키기 위한 비등원자비 조성 설계에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 연구에서는 Ni, Co 및 Cr 타깃의 코스퍼터링을 이용하여 각 원소의 조성이 17–57 at.% 범위에서 연속적으로 변화하는 Ni-Co-Cr 조성 구배 박막을 제작하였다. 제작된 박막의 상 및 미세조직을 분석한 결과, FCC 단상 영역과 HCP상 및 σ상이 공존하는 다상 영역이 확인되었다. 조성 변화에 따른 기계적 특성을 효율적으로 평가하고 기판의 영향을 최소화하기 위해 나노인덴테이션 시험을 수행하였으며, 이를 통해 조성에 따른 경도 및 탄성계수 분포를 분석하였다. FCC 단상 영역에서는 $Ni_{20}Co_{40}Cr_{40}$ 조성에서 최대 7.45 GPa의 경도가 나타났으며, 이는 Co–Cr 원소 간의 비선형 상호작용에 의한 강화 효과가 전위 이동을 억제한 결과로 판단된다. 한편, HCP상과 σ상이 공존하는 다상 영역에서는 $Ni_{20}Co_{25}Cr_{55}$ 조성에서 최대 9.11 GPa의 경도가 측정되었다. 본 연구를 통해 조성 구배 박막과 고속 나노인덴테이션을 결합한 조합 방식이 기존의 등원자비 NiCoCr 합금에서 벗어나 우수한 기계적 특성을 갖는 비등원자비 조성을 효율적으로 탐색하는 데 유용함을 확인하였다. 또한 Ni-Co-Cr 합금의 조성–미세조직–기계적 특성 간 상관관계를 제시함으로써, 향후 우수한 기계적 특성을 갖는 벌크 합금의 유망 조성을 선별하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[고엔2-6 | 11:25]

조합적 적층제조와 해석 가능한 머신러닝을 활용한 준안정 FeCoCrNiMo 합금의 가속 설계: 이재홍(포항공과대학교), 김희연(KT R&D 센터), 김형섭 *(포항공과대학교)

Keywords: 머신러닝, 조합적 적층제조, 가속 합금 설계, 준안정 합금

쌍정유기소성(TWIP) 또는 변태유기소성(TRIP)을 활용하는 준안정 합금은 우수한 기계적 특성을 제공할 수 있지만, 원하는 준안정성을 구현하기 위해 방대한 조성 공간에서 적절한 조성을 찾는 것은 기존의 시행착오 방식으로는 매우 어렵다. 이러한 문제는 특히 신뢰할 수 있는 열역학 데이터베이스가 구축되지 않은 신규 합금계에서 더욱 두드러진다. 본 연구에서는 해석 가능한 머신러닝(ML)과 조합적 적층제조(CAM)를 결합한 준안정 합금 설계 전략을 제안한다. 조합적 적층제조를 통해 넓은 조성 범위를 신속하게 탐색하고, 이로부터 자체적으로 구축한 데이터셋을 이용해 학습한 머신러닝 모델로부터 γ/γ+α′ 상경계를 나타내는 해석적 방정식을 도출하였으며, 이를 기반으로 준안정 합금을 설계하였다. 조합적 적층제조로 제조한 52개의 FeCoCrNiMo 합금을 이용하여, 열역학적 입력 없이 조성 정보만으로 단상 γ 합금과 α′상을 포함하는 합금을 구분하는 서포트 벡터 분류기(SVC)를 구축하였다. 이후 기호 회귀(Symbolic Regression)를 통해 이 분류기를 상경계 방정식으로 단순화하였으며, Co와 Ni가 상경계를 지배하는 핵심 변수임을 확인하였다. 도출된 방정식을 바탕으로 상경계에 더욱 근접한 조성을 갖는 합금을 설계하였고, 해당 합금은 향상된 변형경화 거동을 나타내었다. 고속 실험과 해석 가능한 머신러닝을 통합함으로써, 본 연구는 신합금계에서 준안정 합금 설계를 가속화할 수 있는 범용적이고 데이터 효율적인 새로운 패러다임을 제시한다.

[고엔3-1 | 13:30]

Cr 함량 제어를 통한 3.5 wt % NaCl 용액 내 $Al_{0.5}CoCr_{(1-X)}Fe_{(1+X)}NiTi_{0.1}$ 고엔트로피 합금의 부식 특성 변화 연구: 최순원(공주대학교 신소재공학과, 첨단 분말 소재 부품 센터), 박강현(한국재료연구원 극한재료연구소), 이정민, 문종언, 송기안*(공주대학교 신소재공학과, 첨단 분말 소재 부품 센터)

Keywords: Keywordss : high-entropy alloys, precipitation, passive films, corrosion resistance

다양한 산업 분야에 사용되는 구조용 소재는 우수한 기계적 특성과 함께 높은 내식성이 요구된다. 일반적으로 Ag, Au, Pt와 같은 귀금속은 우수한 내식성을 나타내지만, 낮은 기계적 강도와 높은 비용으로 인해 구조용 소재로의 활용에는 한계가 있다. 최근 고엔트로피 합금은 높은 조성 설계 자유도를 바탕으로 기계적 특성과 내식성을 동시에 확보할 수 있는 잠재력을 지녀 차세대 구조용 소재로 주목받고 있다. 대표적으로 CoCrFeNi계 고엔트로피 합금은 Cr_2O_3 기반 부동태 피막 형성을 통해 우수한 내식성을 나타낼 수 있다. 그러나 단상 FCC 구조에서는 효과적인 강화 기구가 부족하여 상대적으로 낮은 항복강도를 보이는 한계가 있다. 이를 개선하기 위해 석출강화 전략이 도입되고 있으나, 석출상은 기지와 다른 화학 조성 및 전기화학적 특성을 가지므로 부동태 피막의 불

연속성과 미세 갈바닉 부식을 유발하여 내식성을 저하시킬 수 있다. 따라서 석출강화형 CoCrFeNi계 고엔트로피 합금의 내식성을 효과적으로 향상시키기 위해서는 Cr 함량에 따른 기지의 부동태화 능력과 석출상에 의한 국부 부식 거동을 동시에 고려할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 $L2_1$석출상으로 강화되어 극한 환경에서 우수한 기계적 물성을 나타내는 $Al_{0.5}CoCrFeNiTi_{0.1}$ 합금을 대상으로 내식성을 평가하며, Cr 함량 및 열처리 공정 제어를 통해 부식 특성의 변화를 관찰하고자 한다. 구체적으로 상 구조와 미세조직 분석은 X선 회절분석(XRD), 주사전자현미경(SEM) 및 에너지분산형 분광분석(EDS)을 통해 분석하였으며, 부식특성과 표면 산화막 특성은 전기화학 계측기(potentiostat) 과 광전자 분석기(XPS) 및 부식 후 표면 관찰을 통해 평가하였다. 이를 통해 Cr 함량에 따른 부동태 피막의 형성 능력과 $L2_1$ 석출상에 의한 국부 부식 거동의 상관관계를 규명하고, 석출강화형 고엔트로피 합금의 내식성 향상을 위한 미세조직 설계 방향을 제시하고자 한다. This work was partly supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT), and Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE, korea)(P0022331), This work was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT), and Ministry of Trade, Industry and Energy ((P0018009).

[고엔3-2 | 13:45]

준정적 변형 시 변형률 분산 능력이 우수한 내화 고엔트로피 합금의 동적 변형 거동 분석: 노시언, 김재권, 김지호, 김현수, 김윤호, 박은수*(서울대학교)

Keywords: 내화 고엔트로피 합금, 고변형률 속도 변형, 칼날–나사 혼합 전위, 변형률 국부화

항공우주 및 방위 산업에서 고속 충돌 위협이 증가함에 따라, 극한 변형률 속도에서도 기계적 건전성을 유지할 수 있는 소재의 개발이 요구되고 있다. 체심입방(BCC) 구조의 내화 고엔트로피 합금(RHEA)은 높은 강도와 우수한 열적 안정성을 갖지만, 쌍정과 같은 변형 수용 기구의 활성화가 제한적이어서 변형 국부화와 단열 전단 밴드(adiabatic shear band, ASB)의 형성이 촉진될 수 있다. 본 연구에서는 준정적 하중 조건에서 소성 변형을 분산시키는 칼날전위와 나사전위의 복합 활동이 동적 충돌 조건에서도 지속되는지를 평가하였다. Combustion light-gas gun 실험을 통해 다양한 변형률 속도 조건에서 미세조직 변화, 변형 국부화 및 ASB 형성 거동을 분석하였다. 관찰 결과, 이러한 전위 활동은 소성 변형을 재분배하고 국부적인 변형 축적을 감소시켜 ASB의 발생을 지연시킬 가능성이 있는 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 전위에 의한 변형 재분배가 동적 손상 허용성을 향상시키고 내충격성 BCC RHEA를 설계하기 위한 효과적인 전략이 될 수 있음을 보여준다.

[고엔3-3 | 14:00]

Ti-Zr-Hf-Ta-Mo 준안정 내열 고엔트로피 합금의 상안정성 변화에 따른 기계적 거동 분석: 허민아, 정윤종, 이강진(공주대학교 신소재공학과, 첨단 분말 소재 부품 센터), 이찬호(The University of Auburn), 송기안*(공주대학교 신소재공학과, 첨단 분말 소재 부품 센터)

Keywords: Metastable Refractory High-Entropy Alloys, Phase Transformation, Microstructure, Mechanical Properties

준안정 내열 고엔트로피 합금은 상 안정도를 조절하여 변형 중 상변태 및 변형쌍정을 활성화하고, 이를 통해 높은 가공경화능을 확보할 수 있는 합금 설계 전략이다. 이러한 준안정 합금 설계는 우수한 고온 특성을 갖는 단상 BCC 내열 고엔트로피 합금이 상온에서 제한적인 소성변형을 나타내는 한계를 극복하기 위한 방안으로 주목받고 있다. 그러나 TiZrHf 기반 준안정 내열 고엔트로피 합금에 관한 연구는 주로 Nb 및 Ta와 같은 BCC 안정화 원소를 중심으로 이루어져 왔으며, Mo 첨가에 따른 상 안정성 변화와 변형거동에 대한 연구는 제한적이다. 따라서, BCC 안정화 효과 가 큰 Mo를 첨가한 $Ti_{30}Zr_{30}Hf_{30}Ta_9Mo_1$ 및 $Ti_{30}Zr_{30}Hf_{30}Ta_8Mo_2$ 합금을 대상으로, 상 안정성 차이가 기계적 거동과 변형기구에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고자 하였다. 본 연구에서는, X-선 회절(XRD), 후방 산란 전자회절(EBSD), 상온 기계적 시험 및 중성자 회절 (Neutron Diffraction)을 이용하여 변형에 따른 미세조직 변화, 상변태 거동 및 결정학적 변형 특성을 분석하였다. 특히 $Ti_{30}Zr_{30}Hf_{30}Ta_9Mo_1$ 및 $Ti_{30}Zr_{30}Hf_{30}Ta_8Mo_2$ 합금의 변형거동을 비교하여, 소량의 Mo 첨가에 따른 상 안정성 변화가 가공경화 거동과 기계적 특성에 미치는 영향을 규명하였다. This work was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT), and Ministry of Trade, Industry and Energy ((P0018009). This work was supported by the Commercializations Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) grant funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT), Republic of Korea (RS-2026-25534590).

[고엔3-4 | 14:15]

열간 압연된 $Fe_{66}(CoNi)_{29}Cr_5$ 철계 중엔트로피 합금의 Lüders 밴드에 의한 TRIP/TWIP의 공간적 분할: 한규미, 이정완, 하수빈(포항공과대학교), 나영상(한국재료연구원), 김정기(경상국립대학교), 김형섭*(포항공과대학교)

Keywords: Dual-phase microstructure, Lüders elongation, Deformation twinning, Ferrous medium-entropy alloy, TWIP/TRIP

극저온에서 우수한 강도–연성 균형을 갖는 철계 중엔트로피 합금을 설계하기 위해서는 준안정 이중상 미세조직에서 변형 국부화가 변형 메커니즘을 어떻게 재분배하는지에 대한 이해가 필수적이다. 본 연구에서는 열간 압연된 $Fe_{66}(CoNi)_{29}Cr_5$ 철계 중엔트로피 합금을 대상으로, 77 K에서의 중단 인장시험과 EBSD 및 ECCI 분석을 통해 극저온 변형 거동을 규명하였다. 열간 압연된 시편은 초기 상태에서 BCC 상분율 19.1%를 갖는 FCC/BCC 이중상 미세조직과 높은 전위 밀도, 그리고 FCC 상 내 기존 변형쌍정을 나타내었다. Lüders 연신 구간에서는 Lüders 밴드의 전파에 의해 FCC→BCC 마르텐사이트 변태가 현저히 가속화되었으며, Lüders 연신 종료 시점에서 BCC 상분율은 약 74.3%까지 증가하였다. 반면, 잔류 FCC 영역에서는 변형 후 쌍정 간격이 감소하여 TWIP 거동이 지속적으로 활성화됨을 확인하였다. 이러한 Lüders 밴드에 의해 재분배된 소성변형과 열간 압연 과정에서 형성된 높은 전위 밀도는 77 K에서 약 1280 MPa의 높은 항복강도와 우수한 인장 연성을 동시에 구현하였다. 본 연구는 열간 압연에 의해 형성된 준안정 미세조직, Lüders 밴드 전파, 상변태 및 극저온 변형 거동 사이의 공정–미세조직–특성 상관관계를 규명하였으며, 극저온 환경에서 우수한 강도와 연성의 균형을 갖는 Fe-rich 철계 중엔트로피 합금 설계를 위한 유용한 설계 지침을 제시한다.

[고엔3-5 | 14:30]
고융점 원소 함유 CoCrFeNi계 혼합 산화물의 수소 환원 및 고엔트로피 합금 분말 제조에 대한 연구: 김민종, 이강현(한양대학교), 임태협(난양공과대학교), 이선영*(한양대학교)
Keywords: 고엔트로피 합금, 수소 환원, 산화물 전구체, 고융점 원소
고엔트로피 합금은 다원소 조성 설계를 통해 우수한 기계적 특성과 화학적 특성을 구현할 수 있어 다양한 분야에서 활발히 연구되고 있다. 최근에는 금속 산화물을 전구체로 활용하여 합금 분말을 제조하는 산화물 전구체 기반 공정이 연구되고 있으며, 이는 고온에서의 용융 공정을 거치지 않고 다성분 합금을 제조할 수 있다는 점에서 기존 용융 기반 합금 제조 공정의 대안으로 활용될 가능성이 있다. 이러한 산화물 기반 공정을 이용한 고엔트로피 합금의 조성 설계 범위를 확대하기 위해서는 고융점 원소를 포함한 혼합 산화물계의 환원 및 합금화 가능성을 규명할 필요가 있다. 본 연구에서는 산화물 기반 고엔트로피 합금의 조성 설계 범위를 확대하기 위해 CoCrFeNi계에 고융점 원소인 Mo와 W를 각각 도입하고, 수소 환원 공정을 적용한 CoCrFeNiMo와 CoCrFeNiW 조성의 고엔트로피 합금 분말 제조 가능성을 검토하였다. 각 조성의 산화물 혼합 분말은 전구체의 균질화와, 환원 후 합금화를 용이하게 하고자 기계적 밀링하였다. X선 회절 분석을 통해 밀링 공정에 따른 전구체의 상 변화를 분석하고, 초기 산화물의 회절 피크 변화를 바탕으로 Mo와 W를 포함하는 복합 산화물상의 형성 가능성을 검토하였다. 또한, 원소 분포 분석을 통해 밀링이 진행됨에 따른 조성 균질화 거동을 평가하였다. 이후 밀링된 혼합 산화물에 대해 수소 분위기에서 열중량 분석을 수행하여 밀링 시간과 고융점 원소의 종류에 따른 환원 거동을 비교하였다. 이와 함께 수소 환원 전후의 상 변화를 비교하여 Mo와 W가 각각 포함된 혼합 산화물의 환원과 이에 따른 합금상 형성 여부를 평가하였다. 이를 바탕으로 고융점 원소를 포함하는 혼합 산화물의 수소 환원을 통한 고엔트로피 합금 분말 제조 가능성을 평가하고, 산화물 기반 공정을 활용한 고엔트로피 합금의 조성 확장 가능성을 검토하고자 한다.

[고엔3-6 | 14:45]
준안정 내열 고엔트로피 합금의 BCC 안정화 원소에 따른 변형메커니즘 전이: 정윤종, 이강진, 허민아(국립공주대학교), 이찬호*(Auburn University), 송기안*(국립공주대학교)
Keywords: Refractory High-Entropy Alloys, Deformation mechanisms, Mechanical properties
내열 고엔트로피 합금은 상온 및 고온에서 우수한 강도와 뛰어난 고온 연화 저항성을 나타내어 차세대 고온 구조재료로서 높은 잠재력을 지닌다. 그러나 대부분의 내열 고엔트로피 합금은 BCC 구조에 기인한 제한적인 변형 메커니즘으로 인해 낮은 상온 연성을 가지게 되는 것으로 보고된다. 이러한 한계를 극복하기 위해 최근에는 준안정 합금 설계를 통해 변형유기상변태 및 변형쌍정과 같은 추가적인 변형기구를 활성화함으로써 연성을 향상시키는 전략이 주목받고 있다. 이러한 준안정 내열 고엔트로피 합금에서 변형 중 발생하는 변형유기상변태와 변형쌍정 거동에 대한 연구가 일부 보고되어 왔으나, 대부분 BCC 상의 안정도 수준에 따른 거동 분석에 집중되어 있다. 반면, BCC 안정화 원소의 종류에 따른 상 안정도 및 변형기구의 차이를 체계적으로 비교한 연구는 상당히 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 TiZrHfNbx 및 TiZrHfTax 합금계에서 Nb 및 Ta 첨가량에 따른 기계적 거동과 변형 메커니즘을 비교 분석하였다. Nb와 Ta 함량 변화에 따라 기계적 특성과 변형 거동에 뚜렷한 차이가 나타났으며, 이는 변형유기상변태, 변형쌍정 및 전위 기반 변형거동의 차이에 기인하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 준안정 내열 고엔트로피 합금에서 변형 메커니즘이 단순한 BCC 상 안정도뿐만 아니라 BCC 안정화 원소의 종류에 따라서도 크게 달라질 수 있음을 보여준다

[고엔4-1 | 15:10] [Canceled]
우수한 고온-극저온 물성을 지닌 계층적 헤테로 구조의 Fe-rich 중엔트로피 합금: 김래언*, 김형섭*(POSTECH)

[고엔4-2 | 15:25]
격자 왜곡 제어를 통한 BCC 내열 고엔트로피합금의 Edge–Screw 전위 거동 규명: 이강진, 정윤종(공주대학교), 이찬호(Auburn University), 송기안*(공주대학교)
Keywords: 내열 고엔트로피 합금, 전위 거동, 격자 왜곡
금속재료의 기계적 물성은 변형 과정에서 나타나는 전위의 생성 및 이동 거동과 밀접하게 연관되어 있다. BCC 금속에서는 높은 Peierls barrier로 인해 screw 전위의 이동이 상대적으로 제한되므로 screw 전위가 소성변형을 지배하는 것으로 알려져 있다. 다양한 크기의 내열 원소가 고농도로 구성된 BCC 내열 고엔트로피합금(Refractory High-Entropy Alloys, RHEAs)에서는 구성 원소 간 원자 크기에 의해 극심한 격자 왜곡이 형성되며, 이는 기존 BCC 금속과는 다른 전위 거동을 유발할 수 있다. 최근 이론적 모델링 및 원자 단위 시뮬레이션 연구에서는 RHEAs의 격자 왜곡이 edge 전위의 이동 저항을 크게 증가시켜, edge 전위 역시 screw 전위와 함께 합금의 강도 및 변형 거동에 중요한 역할을 할 수 있음이 보고되고 있다. 이러한 결과는 격자 왜곡이 기계적 물성에 미치는 영향을 단순히 격자 왜곡의 크기만으로 설명하기 어렵고, 격자 왜곡에 의해 변화하는 전위 이동 특성을 함께 고려해야 함을 시사한다. 실제로 일부 RHEAs에서는 격자 왜곡의 증가와 기계적 강도 사이에 명확한 상관 관계가 나타나지 않는 것으로 보고되고 있다. 따라서 RHEAs의 기계적 거동을 이해하기 위해서는 격자 왜곡의 정도뿐만 아니라 이에 따른 edge 및 screw 전위의 거동 변화를 함께 분석할 필요가 있다 본 연구에서는 내열 고엔트로피 합금에서 격자 왜곡과 Edge-Screw 전위 거동이 합금의 기계적 물성 및 변형 거동에 미치는 영향을 이해하기 위해, 격자 왜곡을 제어하여 체계적으로 BCC 단상의 내열 고엔트로피합금을 설계하였다. SEM, 중성자 회절 시험을 통해 미세조직을 분석하고 압축 시험을 통해 기계적 물성 평가를 실시하였으며, In-situ 중성자 회절 시험 및 LSR (Local Slip Resistance) 시뮬레이션을 통해 합금의 전위 거동에 대하여 분석하였다.

[고엔4-3 | 15:40]

Thermodynamic assessment of the Ni–Co–Zr and Ti–Co–Zr ternary systems: Chan Jeong, In-Ho Jung*(Seoul Univ.)

Keywords: Ni–Co–Zr system, Ti–Co–Zr system, High- and medium-entropy alloys, CALPHAD

Ni–Co–Zr and Ti–Co–Zr are important ternary subsystems for developing a thermodynamic database for Fe–Ni–Ti-based high- and medium-entropy alloys, because Co and Zr strongly influence the formation and stability of intermetallic phases. However, available thermodynamic descriptions remain limited, and binary extrapolation alone may not consistently reproduce the reported ternary solubilities and phase equilibria. In this study, available phase-equilibrium and thermochemical data are critically evaluated, and both systems are assessed using the CALPHAD method. In Ti–Co–Zr, the Co(Ti, Zr) and Co_2(Ti, Zr) solution phases are modeled based on their crystal structures and binary counterparts. In Ni–Co–Zr, the continuous Zr_2(Co, Ni) solid solution and the structurally distinct ZrCo- and ZrNi-based phases are described consistently. Based on these phase characteristics, the thermodynamic models and parameters of the relevant phases are revised to reproduce the reported phase equilibria. The resulting descriptions will provide a consistent basis for multicomponent phase-stability calculations and alloy design.

[고엔4-4 | 15:55]

FeCoCrNiMoC계 중엔트로피합금의 온도 의존적 다단계 상변태와 변형 거동: 정희재, 이재흥, 하수빈, 안성열(포항공과대학교), Stefanus Harjo, Takuro Kawasaki, Wu Gong(J-PARC 연구소), 김형섭*(포항공과대학교)

Keywords: 중엔트로피합금, 변형유기상변태, 초극저온, 가공경화

본 연구에서는 FeCoCrNiMoC계 중엔트로피합금의 상온, 극저온(77 K) 및 초극저온(4.2 K) 환경에서의 변형 거동을 조사하고, 온도에 따른 변형유기상변태 거동을 규명하였다. In-situ synchrotron XRD를 통해 극저온 변형 중 FCC → HCP → BCC로 이어지는 순차적인 변형유기상변태를 확인하였으며, 이러한 다단계 상변태는 변형 과정에서 지속적인 가공경화를 유도하는 주요 기구로 작용하였다. 반면, 초극저온 환경에서는 FCC 상의 안정성이 더욱 감소하여 변형유기상변태가 조기에 활성화되었고, 이에 따라 변형이 충분히 분산되지 못한 채 국부적인 변형 집중과 조기 파단이 발생하였다. 이러한 결과는 FeCoCrNiMoC계 중엔트로피합금에서 온도에 따른 상 안정성과 다단계 변형유기상변태가 극저온 기계적 거동을 결정하는 핵심 인자로 작용함을 보여준다.

역학측정
Room 1층 104호, 10월 30일

[역학1-1 | 08:00]

초고감도 양방향 변형 측정을 위한 균열 기반 센서의 잔류변형 제어: 강승민(서울대학교/Seoul National University), 이재환(서울대학교/Seoul National University, MIT), 강승균*(서울대학교/Seoul National University)

Keywords: 균열 기반 크랙센서, 점탄성, 양방향 측정, 초미세 변형, 유연소자

역학 측정 기술은 점점 더 미세한 변형까지 높은 민감도로 검출하는 방향으로 발전해 왔다. 그러나 금속 게이지(GF≈2)나 실리콘 게이지(GF≈50)와 같은 기존 상용 변형 센서는 게이지팩터가 낮아 미세한 변형에 충분히 민감하게 반응하지 못할 뿐 아니라, 유연하지 않은 소재로 인해 곡면이나 복잡한 형상의 표면에 밀착시키기 어렵다는 한계도 지녔다. 이러한 문제를 해결하기 위해 금속 박막의 단절과 접촉에 따른 급격한 저항 변화를 이용하는 균열 기반 변형 센서가 제안되었다. 균열 기반 변형 센서는 기존 상용 센서 대비 수백 배 이상 높은 민감도를 구현할 수 있었지만, 변형이 극히 작은 구간(약 0.5% 미만)에서는 균열이 충분히 열리지 않아 게이지팩터가 급감하는 한계를 보였다. 또한 균열이 인장 방향의 변형에 반응하도록 설계되어 있어, 압축 방향의 변형이 가해질 경우 균열이 더 닫힐 수 없고 금속만 압축되어 압축 변형에 대해서는 뚜렷한 신호를 얻기 어려웠다. 본 연구에서는 균열의 초기 민감도를 좌우하는 요인인 '변형이 없는 상태에서 균열이 닫혀 있다는 점'을 해결하기 위해, 센서 제작 단계에서 일정한 인장 변형을 가한 뒤 이를 해제하는 사전인장(pre-strain) 전략을 도입하였다. 열가소성 기판의 점탄성 거동의 특성을 이용해 잔류변형을 유도하여, 외력이 가해지지 않은 상태에서도 균열이 미리 일정 부분 열려 있도록 하였다. 사전인장에 의한 균열의 초기 개방과 압축 방향 변형 전달이 결합되어, 인장과 압축 양방향에서 모두 뚜렷한 감도 향상 효과가 발생하였다. 그 결과, 0.5% 미만의 낮은 변형률 구간 초기부터 높은 민감도를 보였으며, 기존 균열 기반 변형률 센서 대비해서 압축 변형도 뚜렷하게 구분하여 계측할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 본 연구는 사전인장을 통한 잔류변형 제어를 통해 균열을 미리 열어두는 전략이 인장과 압축 변형 모두를 높은 민감도로 계측하는 데 효과적임을 제시한며, 점탄성 특성을 지닌 기판을 사용하는 변형센서 대부분에 일반적으로 적용되어 민감도를 향상시키고, 인장과 압축 모두 감지할 수 있는 특성을 부여할 수 있는 전략을 제시한다.

[역학1-2 | 08:15]

사용후핵연료 처분용기용 NiCuAl 합금의 석출물 크기에 따른 국부부식 저항성 및 기계적 특성 평가: 정회연, 양선영(UNIST), 우정현(한국원자력연구원), 전한솔(계명대학교), 김주영*(UNIST)

Keywords: NiCuAl 합금, 석출물 크기, 국부부식 저항성, 기계적 특성

전 세계적으로 사용후핵연료 처분시설이 포화에 임박하고 있으나, 장기 저장시설은 아직 확보되지 않아 영구 처분시설의 필요성이 대두되고 있다. 영구 처분시설로는 심지층 처분 (Deep Geological Repository, DGR)이 제안되고 있으며, 자연방벽과 공학적 방벽을 결합한 다중방벽처분시스템(Multi-barrier disposal system) 방식을 적용한다. 이 중 공학적 방벽의 핵심인 처분용기는 심지층 환경에서 형성되는 호기성 및 혐기성 환경에 대한 우수한 내식성과 구조적 안정성을 동시에 확보할 수 있도록 설계되어야 한다. 현재까지는 외부 구리층과 내부 주철층으로 구성된 이중층 구조가 제안되어 왔으나, 본 연구에서는 공정 단순화와 소재 활용 효율 향상을 위해 단일층 구조로 적용 가능한 새로운 처분용기 소재를 개발하고자 하였다. 기존에 제시된 무산소동보다 우수한 내식성을 갖는 NiCu 합금에 Al을 첨가하여 석출물을 형성함으로써 내식성과 강도를 동시에 향상시킬 수 있는 NiCuAl 합금을 제안하였다. 그러나 석출물과 기지 사이의 갈바닉 전위차로 인해 국부부식이 발생할 수 있으며, 일반적으로 석출물크기가 증가할수록 강도는 향상되는 반면 국부부식 저항성은 감소하는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 석출물 크기에 따른 국부부식 저항성과 기계적 특성을 평가하기 위해 Potentiodynamic Polarization 시험과 나노인덴테이션 시험을 수행하였다. 이를 통해 국부부식전위와 경도를 평가하고, 두 특성을 동시에 향상시킬 수 있는 최적의 석출물 크기를 도출하고 그에 따른 메커니즘을 분석하고자 하였다.전 세계적으로 사용후핵연료 처분시설이 포화에 임박하고 있으나, 장기 저장시설은 아직 확보되지 않아 영구 처분시설의 필요성이 대두되고 있다. 영구 처분시설로는 심지층 처분 (Deep Geological Repository, DGR)이 제안되고 있으며, 자연방벽과 공학적 방벽을 결합한 다중방벽처분시스템(Multi-barrier disposal system) 방식을 적용한다. 이 중 공학적 방벽의 핵심인 처분용기는 심지층 환경에서 형성되는 호기성 및 혐기성 환경에 대한 우수한 내식성과 구조적 안정성을 동시에 확보할 수 있도록 설계되어야 한다. 현재까지는 외부 구리층과 내부 주철층으로 구성된 이중층 구조가 제안되어 왔으나, 본 연구에서는 공정 단순화와 소재 활용 효율 향상을 위해 단일층 구조로 적용 가능한 새로운 처분용기 소재를 개발하고자 하였다. 기존에 제시된 무산소동보다 우수한 내식성을 갖는 NiCu 합금에 Al을 첨가하여 석출물을 형성함으로써 내식성과 강도를 동시에 향상시킬 수 있는 NiCuAl 합금을 제안하였다. 그러나 석출물과 기지 사이의 갈바닉 전위차로 인해 국부부식이 발생할 수 있으며, 일반적으로 석출물크기가 증가할수록 강도는 향상되는 반면 국부부식 저항성은 감소하는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 석출물 크기에 따른 국부부식 저항성과 기계적 특성을 평가하기 위해 Potentiodynamic Polarization 시험과 나노인덴테이션 시험을 수행하였다. 이를 통해 국부부식전위와 경도를 평가하고, 두 특성을 동시에 향상시킬 수 있는 최적의 석출물 크기를 도출하고 그에 따른 메커니즘을 분석하고자 하였다.

[역학1-3 | 08:30]

인공신경망(ANN) 기반 압입 기판효과 보정을 통한 박막 고유 기계적 물성 평가: 조현욱, 김광희, 장서현(국립부경대학교 재료공학과), 김임덕, 강승균(서울대학교 재료공학부), 권오민, 채승현(SK 하이닉스), 김종형*(국립부경대학교 재료공학과)

Keywords: Thin film, Nanoindentation, Elastic modulus, Yield strength, Substrate effect, ANN, FEA

고집적화된 반도체 소자는 이종 소재 기반의 복잡한 구조로 이루어짐에 따라 다양한 신뢰성 문제를 야기한다. 특히 소재 간 열팽창계수(CTE) 차이는 소자 구동 시 위치별 열변형의 차이를 유발하며, 이는 복잡한 열응력 분포로 이어진다. 이러한 응력상태는 소재의 균열, 박리를 야기할 수 있으므로 이에 대한 분석과 제어가 필요하다. 응력 분석에는 유한요소해석(FEA)이 널리 활용된다. FEA는 구동 조건에 따른 위치별 변형률을 산출하고, 변형률에 대응하는 응력의 수준을 결정하는 핵심 물성인 탄성계수를 적용하여 이를 응력장으로 환산함으로써 소자의 거동을 예측한다. 따라서 정확한 FEA 결과를 얻기 위해서는 박막과 같은 구성 소재의 신뢰성 높은 기계적 물성치 확보가 필수적이다. 전통적으로 인장시험은 매크로 스케일에서 표준화된 방법으로 항복강도와 탄성계수를 정량적으로 제공하지만, 나노미터 수준 초박막에서는 시편 제작의 물리적 한계와 시험의 복잡성으로 부적합하다. 이에 나노압입시험이 간편성 덕분에 대안으로 자리 잡았으며, 박막의 탄성계수와 경도와 같은 국부적 기계적 특성 평가에 널리 활용된다. 나노압입시험으로 탄성계수와 경도를 평가할 때 통상적으로 박막 두께의 10% 수준 압입 깊이를 권장하나, 박막 두께가 극도로 얇아짐에 따라 얕은 압입에서는 장비의 noise floor, 환경, 미세구조 등 다양한 요인으로 측정 불확도가 증가한다. 이러한 문제를 회피하기 위해 상대적으로 깊은 압입을 수행하면 하중-변위 곡선에 기판 물성이 영향을 미쳐 기판 효과(substrate effect)가 발생하므로, 박막 고유 물성 추출을 위한 기판 효과 보정이 필수적이다. 본 연구에서는 ANN 기반으로 단일 각진 압입자 압입 데이터만을 이용해 박막-기판 시스템에서 기판 효과를 보정하는 모델을 개발하였다. 일반적으로 벌크 시스템에서 각진 압입자로는 기하학적 자기유사성으로 인해 소성 거동을 도출할 수 없다. 그러나 제안된 모델은 기존에 권장되던 박막 두께의 10% 이하 압입 조건을 넘어, 박막 두께 대비 25-50% 수준의 상대적으로 깊은 압입에서도 기판의 물성 정보를 바탕으로 탄성계수 뿐만 아니라 항복강도까지 추정할 수 있도록 설계되었다. 해당 모델은 다양한 기계적 대비를 갖는 여러 박막-기판 조합에 대해 실험적으로 그 유효성을 검증하였다. 또한 ANN 기반 접근법의 특성상 학습 데이터 구성에 따라 범용성을 유연하게 넓힐 수 있으며, 전이학습을 통해 다른 압입자 형상으로의 확장도 용이하다는 장점을 갖는다. 이러한 점에서 본 연구는 초박막 기계적 물성 평가를 위한 범용적 압입 기판효과 보정 프레임워크를 제시한다

[역학1-4 | 08:45] 초청강연

Tailoring Dislocation Nucleation in Defect-Scarce Au Nanowires via Surface and Interface Engineering: Insights from In Situ Tensile Testing and Coherent X-ray Diffraction: Jungho Shin*(Kangwon National University)

Keywords: dislocation nucleation, Au nanowires, surface diffusion, atomic layer deposition coatings

Single-crystalline metallic nanowires grown by physical vapor deposition are essentially free of pre-existing dislocations, so plasticity requires nucleation of new dislocations at the free surface—a thermally activated, inherently stochastic process. This talk examines whether the resulting scatter and mean strength can be controlled through near-surface engineering in <110>-oriented, defect-scarce Au nanowires. The primary results, from in situ tensile tests on Au nanowires coated with atomic-layer-deposited Al_2O_3 (3 nm, 10 nm), show yield strength shifting higher and, for the thicker coating, narrowing substantially relative to uncoated wires (1.10 ± 0.39 GPa versus 1.50 ± 0.31 GPa). Transition-state-theory fits to strength distributions across 91–295 K yield activation energies and volumes an order of magnitude below predictions for homogeneous nucleation, but comparable to computed Au {111} surface self-diffusion barriers—consistent with surface diffusion as the rate-limiting step, suppressible by an adherent coating without loss of ductility.

[역학2-1 | 09:20]

표면 상태가 중엔트로피 합금의 나노압입시험 결과에 미치는 영향 : 최재혁, Zhe Gao, 장재일*(한양대학교)

Keywords: 나노압입시험, 중엔트로피합금, 표면상태

나노압입시험은 재료 표면의 국부적인 변형 거동을 평가하기 때문에, 시험편 표면 상태의 영향을 크게 받을 수 있으며, 따라서 신뢰성 있는 나노역학 특성 평가를 위해서는 시험편 준비 방법에 따른 표면 상태의 영향을 이해하는 것이 중요하다. 이를 위하여 본 연구에서는, 최근 많이 연구되고 있는 중엔트로피 합금들에 기계적 연마, 진동연마 및 전해연마를 적용하여 서로 다른 표면 상태를 형성하고, 다양한 형상의 압입자를 이용하여 체계적인 나노압입시험을 수행하였다. 또한 원자힘현미경을 이용하여 표면 거칠기를 분석하였고, 이 결과들을 종합하여 표면 상태가 나노압입시험 결과에 미치는 영향을 체계적으로 정리하였다.

[역학2-2 | 09:35]

Sub-nm 변위 측정을 위한 BCP 기반 고정밀 DIC 나노 패턴 개발 및 성능 평가: 장서현(국립부경대학교), 강은빈(울산과학기술원), 박운익, 김종형*(국립부경대학교)

Keywords: 블록 공중합체(BCP), 디지털 이미지 상관법(DIC), 나노 패턴, 서브 나노미터 변위, 나노스케일 변형

반도체 소자의 집적도가 증가함에 따라 3D IC 및 고대역폭 메모리(HBM)와 같이 복잡한 구조와 다중 계면을 갖는 첨단 패키징 기술이 도입되고 있다. 이러한 미세 구조에서는 증착 및 열공정, 재료 간 열팽창 계수(CTE) 차이 등에 의해 국부적인 응력과 변형이 발생하며, 이는 균열(Crack) 및 계면 박리(Delamination)와 같은 기계적 결함으로 이어져 소자의 구조적 안정성과 신뢰성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 미세화된 반도체 구조의 기계적 거동을 이해하기 위해서는 미소 영역에서 발생하는 변위와 변형을 높은

공간분해능으로 정량화할 수 있는 측정 기술이 요구된다. 디지털 이미지 상관법(Digital Image Correlation, DIC)은 변형 전후의 표면 이미지를 비교하여 변위 및 변형률장을 비접촉 방식으로 측정할 수 있는 기법이다. 특히 측정 영역이 마이크로·나노 스케일로 감소함에 따라 DIC의 측정 성능은 표면 패턴의 크기, 분포, 대비 및 균일성에 크게 영향을 받으며, 미세한 변위를 안정적으로 추적할 수 있는 고품질 나노 패턴의 형성이 중요하다. 기존 E-beam lithography 기반 패턴은 정밀한 패턴 형성이 가능하지만 공정 비용과 대면적 적용에 한계가 있으며, 시편의 미세 구조를 직접 이용하는 intrinsic pattern은 재료와 표면 상태에 따라 패턴 품질 및 재현성이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 sub-nm 수준의 미세 변위 측정을 위한 DIC 패턴 형성 방법으로 블록 공중합체(Block Copolymer, BCP)의 자기 조립 특성을 활용한 나노 패턴을 개발하였다. BCP의 자기 조립을 통해 수십 nm 크기의 미세 패턴을 형성하고, 공정 조건에 따른 패턴의 크기, 분포, 균일성 및 이미지 대비 특성을 분석하였다. 또한 형성된 BCP 나노 패턴을 이용하여 미세 변위 조건에서 DIC 분석을 수행하고, 패턴 특성에 따른 변위 추적 성능과 측정 안정성을 정량적으로 평가하였다. 이를 통해 small-scale DIC에 적합한 BCP 나노 패턴의 형성 조건을 도출하고, 최적화된 패턴을 이용하여 sub-nm 영역에서의 미세 변위 측정 가능성을 평가하였다. 제안된 BCP 기반 나노 패턴은 비교적 간단한 공정을 통해 미세하고 균일한 패턴을 형성할 수 있으며, 향후 반도체 소자 및 미세 구조물에서 발생하는 국부 변형을 높은 공간분해능으로 측정하기 위한 DIC 기반 기계적 거동 평가에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[역학2-3 | 09:50]

계장화 압입시험 기반 차세대 소재개발: 미세조직·국부물성·소재성능을 연결하는 멀티스케일 접근: 홍정화, 오은지((주)프론틱스), 권동일*(서울대학교)

Keywords: 계장화 압입시험, 국부 기계적 물성, 미세조직, 멀티스케일 평가, 소재개발

첨단소재의 개발은 조성뿐 아니라 제조공정, 열처리 및 미세조직의 제어를 통해 요구 성능을 구현하는 과정이다. 그러나 기존의 기계적 시험은 일정 크기의 표준시편과 평균적인 물성평가에 의존하기 때문에, 소재 내부의 불균질성이나 개별 미세조직의 특성이 최종 성능에 미치는 영향을 개발 단계에서 직접 확인하는 데 한계가 있다. 계장화 압입시험(Instrumented Indentation Testing, IIT)은 미소 영역에서 얻어지는 하중–깊이 데이터를 기반으로 국부적인 기계적 특성을 정량화함으로써 이러한 간극을 보완할 수 있다. 특히 측정 영역을 나노·마이크로 스케일의 미세조직에서 벌크 소재와 실제 부품까지 확장할 수 있어, 공정–미세조직–국부물성–거시적 성능 사이의 관계를 실험적으로 추적할 수 있다는 점에서 소재개발 도구로서 새로운 가능성을 갖는다. 본 발표에서는 IIT가 기존의 완성된 소재에 대한 물성시험을 넘어 소재개발 과정에 직접 참여하는 평가기술로 확장되는 사례를 소개한다. SMR용 원전소재에서는 제조공정에 따른 국부 물성 및 불균질성 평가, 항공 터빈 블레이드에서는 미세조직과 고온 사용환경에 따른 재료상태 분석, 배터리에서는 박막 소재와 미세 접합부의 국부 특성 평가, 반도체 웨이퍼에서는 미세 영역의 기계적 특성 분석 가능성을 살펴본다. 이러한 접근은 소량의 개발 소재와 제한된 영역에서도 정량적인 물성 데이터를 확보하고, 이를 공정조건 및 미세조직과 연계함으로써 소재개발의 시행착오를 줄이는 데 활용될 수 있다. 나아가 IIT는 '완성된 소재를 시험하는 기술'에서 '소재를 이해하고 개발 방향을 결정하는 기술'로 역할을 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

[역학2-4 | 10:05] 초청강연

나노 및 마이크로 크기의 다공성 금속의 기계적 물성 평가 및 분석: 전한솔*(계명대학교)

Keywords: 다공성 금속, 나노포러스 금, 격자구조 금속, 역학측정

다공성 금 (nanoporous gold, NPG)은 뼈대를 이루고 있는 금 리가먼트 (Au ligaments)와 기공 (pores)으로 이루어진 나노 크기의 이중 연속 구조 (bi-continuous structure)로써 높은 비표면적 특성과 생체 적합성, 화학안정성으로 인해 촉매, 센서, 엑추에이터와 같은 분야에서 각광받고 있다. 최근 다공성 금의 리가먼트 구조에 또 다른 다공성 구조가 형성되어 계층구조를 이루는 다공성 구조인, 계층구조 다공성 금 (hierarchical nanoporous gold, HNPG)이 개발되어 기존의 NPG에 비해 더 높은 비표면적 특성과 낮은 상대밀도 특성을 보인다. 이로 인해 더 가볍지만 더 빠른 표면에서의 반응성을 보인다는 장점이 있어 구조재료 및 기능재료용 다공성 재료에 대한 차세대 재료로 각광받고 있다. 한편, 격자구조로 이루어진 다공성 금속은 높은 경량성으로 인해 경량화가 필요한 우주항공, 드론, 모빌리티 분야에 적용되어오고 있다. 나노다공성 금과 격자구조 다공성 금속의 실사용을 위해서는 신뢰성 확보를 위한 기계적 물성 분석이 필요한 점에 착안하여, 본 연구에서는 나노다공성 금에 대한 기계적 물성 평가 및 분석과 벌크스케일의 격자구조 다공성 금속의 기계적 물성 평가 및 분석 방법에 대한 논의를 하고자 한다.

[역학3-1 | 10:40] 초청강연

압입 데이터를 활용한 딥러닝 기반 금속재료 기계적 거동 예측: 정경재*(성균관대학교), 박민우, 한흥남*(서울대학교)

Keywords: 압입시험, 딥러닝, 유한요 소해석, 인장물성, 잔류응력

금속재료의 기계적 거동에 대한 정량적 이해와 신뢰성 있는 평가는 구조적 안전성 확보와 제조 공정의 최적화를 위해 필수적이며, 재료의 인장 거동, 잔류응력, 국부 변형 특성은 실제 공정 및 사용 환경에서의 성능을 결정짓는 핵심 물성으로 작용한다. 압입 시험은 이러한 역학적 특성을 정량적으로 평가할 수 있는 대표적인 측정 기법으로서, 미세조직 변화에 따른 기계적 응답을 효율적으로 분석할 수 있다는 장점을 가진다. 그러나 압입으로부터 얻어지는 하중–변위 곡선과 국부 응답을 거시적 기계적 거동과 직접적으로 연결하는 데에는 여전히 해석적 한계가 존재한다. 최근에는 수치해석을 통해 확보된 고해상도 역학 정보와 데이터 기반 학습 기법을 결합함으로써, 복잡한 재료 거동을 효율적으로 해석하고 예측하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 연구에서는 압입 시험으로부터 획득된 기계적 응답과 해석 기반 데이터를 활용하여 딥러닝 모델을 구축하고, 이를 통해 금속재료의 주요 기계적 특성을 비파괴적이며 계산 효율적으로 예측하는 접근법을 소개한다. 특히 국부 압입 응답과 거시적 기계적 거동 간의 상관관계를 데이터 기반으로

학습함으로써 기존의 실험 중심 평가가 가지는 한계를 보완하고, 복잡한 비선형 변형 거동을 효과적으로 예측할 수 있는 가능성을 논의한다. 이를 통해 역학 측정, 해석, 그리고 딥러닝 기반 모델링이 상호 보완적으로 결합될 때 금속재료의 기계적 거동 평가 및 설계 방식이 어떻게 확장될 수 있는지를 조망하고, 향후 데이터 기반 소재 설계 및 지능형 제조 환경에서 압입 기반 기계적 특성 평가가 가지는 역할과 발전 방향을 제시하고자 한다.

[역학3-2 | 11:05]

냉간 압연된 TiHfNb계 내화 중엔트로피 합금의 V 및 Zr 첨가에 따른 고용 강화 및 소성 변형 기구 규명: 박태연, 최인철*(국립금오공과대학교)

Keywords: 중엔트로피합금, 나노압입시험, 압연, 기계적물성, 미세조직, 고용체강화

내화 중엔트로피 합금(RMEAs)은 우수한 고온 강도와 높은 비강도로 인해 극한 환경용 차세대 구조 재료로 큰 주목을 받고 있다. 본 연구에서는 진공 아크 용해(VAM) 공정을 통해 TiHfNb, TiHfNbZr, TiHfNbV 및 TiHfNbVZr 합금을 제조하고, V 및 Zr 원소 첨가가 고용 강화와 소성 변형 기구에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. CALPHAD 열역학 계산 및 균질화 처리 후 급랭을 통해, 주조(as-cast) 및 균질화 상태의 모든 조성에서 완전한 단상 체심입방(BCC) 구조가 형성됨을 확인하였다. 상온 인장 시험 결과, 균질화된 시편 중 V를 함유한 합금은 항복강도(YS)와 인장강도(UTS) 모두 1 GPa을 상회하는 우수한 기계적 특성을 나타냈다. 라부쉬(Labusch) 고용 강화 모델 기반의 분석을 통해, Zr은 주로 원자 크기 불일치(δ_r)로 인해 강도를 향상시키는 반면, V는 원자 크기 불일치와 전단탄성계수 불일치(δG)의 복합적인 시너지 효과로 강도를 상승시킴을 입증하였다. 냉간 압연에 따른 소성 변형 기구를 분석한 결과, 모든 합금의 초기 변형은 주로 {110} Slip Trace를 따르는 전위 슬립으로 관찰되었으며, 변형률이 증가함에 따라 kink band 구조로 발달하는 것이 관찰되었다. 또한, 조성 변화와 상의 열역학적 안정성에 따라 각 합금별로 차별화된 변형 기구가 활성화되었다. 압연과정 후, TiHfNb 및 TiHfNbZr 합금에서는 HCP 상이 형성되 며 TRIP이 발생한 반면, 5원계 TiHfNbVZr 합금에서는 쌍정이 형성되며 TWIP 메커니즘이 작용하였다. 결과적으로 냉간 압연 시 미세조직 발달과 함께 기계적 강도의 급격한 향상이 이루어졌으며, 특히 TiHfNbVZr 합금은 고용 강화, TWIP 및 kink band 형성의 복합적인 기여를 통해 90% 압연 후, UTS 1.8 Gpa을 초과하는 초고강도를 달성하였다.

[역학3-3 | 11:20]

도메인 지식을 반영한 소량 데이터 기계학습을 활용한 계장화 압입시험 기반 인장 응력–변형률 곡선 예측: 이현준*((주)프론틱스), 강성우(한국과학기술연구원), 권동일(서울대학교)

Keywords: 계장화 압입시험, 응력–변형률 곡선, 머신러닝, 소량 데이터, 압입 특성인자

재료의 기계적 특성 평가는 전통적으로 인장시험에 의존해 왔으나 시편 가공과 파괴가 불가피하며, 이를 보완하는 비파괴 기법으로 계장화 압입시험이 널리 활용되고 있다. 압입 하중–깊이 곡선에는 소재의 소성 거동이 담겨 있어 이로부터 인장 응력–변형률 곡선을 예측하려는 시도가 이어져 왔다. 하지만, 학습에 필요한 인장 곡선은 파괴시험으로만 확보되므로 확보 가능한 일관성 있는 소재 데이터가 수십 종 규모를 넘기 어렵다. 이러한 소량 데이터 조건에서는 대규모 학습을 전제한 심층 신경망을 그대로 적용하기 어려워, 빅데이터 인공지능 모델을 활용한 예측이 제한된다. 본 연구에서는 압입 물리지식을 활용하여 소량의 압입시험 데이터로부터 인장 응력–변형률 곡선을 효과적으로 예측하는 기계 학습 모델을 개발하였다. 소재마다 응력–변형률 곡선의 변형률 범위가 달라 직접 학습하기 어려운 문제를 해결하기 위해, 변형률 축을 정규화한 곡선 형상 예측 모델과 최대 변형률 예측 모델을 각각 학습하고, 두 결과를 결합하여 전체 응력–변형률 곡선을 복원하였다. 각 모델의 입력과 출력은 압입 물리지식에 기반하여 설계하였다. 입력은 하중–깊이 곡선과 가공경화, 에너지, 강성 등 압입 거동에서 추출한 특성인자로 구성하였다. 두 입력이 서로 다른 오차 특성을 보인다는 점을 활용하여 이들을 결합함으로써 단일 입력을 사용할 때보다 높은 예측 성능을 얻었다. 금속 31종을 대상으로 특정 소재의 모든 시편을 학습 에서 제외하는 소재 단위 교차검증을 수행한 결과, 물리지식에 기반한 표현 설계가 모델의 복잡도를 높이는 것보다 예측 성능을 더욱 일관되게 향상시켰다. 또한 곡선 형상과 변형률 범위의 예측에 적합한 모델 구성이 서로 다르게 나타났다. 이는 소량 데이터 조건에서는 모델의 복잡성보다 문제에 적합한 물리 기반 표현 설계가 중요하며, 이러한 접근이 비파괴 물성 평가에 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준다. 따라서, 본 연구는 대량 데이터 확보가 어려운 재료 분야에서 도메인 지식을 활용한 소량 데이터 기계학습 전략이 효과적인 해법이 될 수 있음을 제시한다.

[역학3-4 | 11:35]

나노다공성 금의 변형률 속도에 따른 시간의존적 기계적 특성 및 전위 거동 변화: 김영훈, 홍석원(UNIST), 전한솔(계명대학교), 김주영*(UNIST)

Keywords: 나노다공성 금(nanoporous gold), 나노역학(nanomechanics), 크기 효과(size effect), 변형률 속도 민감도(strain rate sensitivity), 전위(dislocation)

나노다공성 금은 나노 크기의 리가먼트(ligament)와 기공(pore)이 상호 연결된 복연속성(bicontinuous) 개방형 셀(open-cell) 구조를 가지며, 벌크 금에 비해 낮은 상대밀도와 높은 비표면적을 나타낸다. 이러한 구조적 특성으로 인해 촉매, 센서 및 기능성 구조재료 등 다양한 분야에서 활용 가능성이 주목받고 있다. 그러나 낮은 상대밀도와 불균일한 다공성 구조로 인해 깁슨–애쉬비(Gibson–Ashby) 관계에 따라 강도와 탄성계수가 감소하고, 국부적인 응력 집중과 불균일 변형이 발생할 수 있다. 따라서 나노다공성 금의 실질적인 활용을 위해서는 기계적 물성과 변형 메커니즘에 대한 분석이 필요하다. 기존 연구에 따르면 나노다공성 금의 기계적 물성은 리가먼트 크기, 상대밀도 및 표면 상태 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 한편 금속재료는 가공 및 실사용 과정에서 다양한 변형 속도에 노출되며, 변형률 속도에 따라 강도와 유동 응력이 달라지는 변형률 속도 효과(strain rate effect)를 나타낸다. 이러한 변화의 정도는 변형률 속도 민감도(strain rate sensitivity)를 통해 정량적으로 비교할 수 있다. 변형률 속도 민감도는 전위의 핵생성, 이동 및 증식과 같은 열활성화 변형 과정과 밀접하게 관련되므로, 이를 분석하면 변형률 속도에 따른 기계적 물성 변화와 지

배적인 변형 메커니즘을 고찰할 수 있다. 본 연구에서는 나노다공성 금의 기계적 물성을 결정하는 주요 구조 인자인 리가먼트 크기에 따라 강도, 유동 응력 및 변형률 속도 민감도가 어떻게 변화하는지 분석하였다. 나노다공성 금은 금–은 모합금의 선택적 디얼로잉(dealloying)을 통해 제작하였으며, 후속 열처리를 통해 리가먼트 크기를 제어하였다. 이후 만능재료시험기를 이용하여 서로 다른 변형률 속도에서 압축시험을 수행하고, 각 리가먼트 크기에서의 강도와 유동 응력을 측정하여 변형률 속도 민감도를 산출하였다. 이를 바탕으로 리가먼트 크기에 따른 변형률 속도 민감도를 비교하고, 나노다공성 금의 소성변형을 지배하는 전위 거동과 변형 메커니즘을 고찰하였다.

[역학4-1 | 13:30] 초청강연

Fe-Mn-Co-Cr계 준안정 고엔트로피합금의 수소취성 거동에 미치는 마르텐사이트 변태의 영향 분석: 이동현*, 정지윤, 정현, 최정훈, 이수열(충남대학교), 박태연, 최인철(금오공과대학교)

Keywords: 고엔트로피합금, 수소취성, 마르텐사이트, 수소확산, 나노압입시험

본 연구에서는 $Fe_{50}Mn_{30}Co_{10}Cr_{10}$ 준안정 고엔트로피 합금에서 변형 유기 ε-마르텐사이트가 수소취성 거동에 미치는 영향을 체계적으로 조사하였다. 사전변형량 증가에 따라 ε-마르텐사이트 분율이 증가하였으며, 이와 함께 수소취성 저항성이 향상되고 주된 파괴 모드가 입계(intergranular, IG)에서 입내(transgranular, TG) 파괴로 전이되었다. TDS, 나노압입 기반 수소 트랩/확산 분석 결과, ε상은 γ상에 비해 높은 수소 수용 능력과 낮은 수소 확산도를 나타냈다. 또한 Ag decoration 분석을 통해 변형 중 수소가 ε-마르텐사이트 및 γ/ε 계면에 우선적으로 집중됨을 확인하였다. 이러한 결과는 ε-마르텐사이트가 단순한 수소 포획상(hydrogen sink)을 넘어 수소 완충상(hydrogen-buffering phase)으로 작용함을 보여준다. 즉, ε-마르텐사이트는 이동 전위에 의해 운반되는 수소를 수용하여 취약한 γ–γ 결정립계로의 수소 집중을 억제하고, 이에 따라 IG 균열을 억제하면서 국부적인 TG 균열을 유도한다. 본 연구는 안정적이고 연성인 ε-마르텐사이트의 제어가 수소 분포와 파괴 경로를 조절함으로써 고엔트로피 합금의 수소취성 저항성을 향상시키는 효과적인 미세조직 설계 전략임을 제시한다. 아울러, ε-마르텐사이트의 고유한 수소 트랩 및 확산 거동을 평가하기 위해 활용한 다양한 분석 방법에 대해 소개하고자 한다.

[역학4-2 | 13:55]

측정 불확도를 고려한 데이터 증강과 전이학습 기반 압입–인장 물성 역해석: 박시현(국립부경대학교), 김임덕(서울대학교), 최재영(국립부경대학교), 강승균(서울대학교), 이류경, 김종형*(국립부경대학교)

Keywords: 금속, 압입시험, 인장시험, 역학물성 평가, 머신러닝, FEA, 데이터 증강, 전이학습, 측정 불확도

재료의 기계적 물성은 구조물의 설계와 신뢰성 평가를 위한 핵심 정보로, 일반적으로 인장시험을 통해 평가된다. 그러나 실제 구조물이나 용접부, 열영향부 및 미소 영역에서는 표준 인장시편의 채취가 어렵고, 위치에 따른 국부적인 물성 변화를 평가하는 데에도 한계가 있다. 이에 시편의 손상을 최소화하면서 국부 기계적 거동을 평가할 수 있는 계장화 압입시험이 대안으로 활용되고 있으며, 최근에는 압입 하중–변위 응답으로부터 인장 물성을 추정하기 위해 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)과 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN)을 결합한 역해석 연구가 활발히 수행되고 있다. FEA 기반 ANN은 다양한 재료 조건에서 압입 응답과 인장 물성 사이의 복잡한 비선형 관계를 학습할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 대부분의 모델은 이상적인 해석 데이터에 기반하여 학습되는 반면, 실제 압입시험에서는 장비 및 시험 조건에 따른 측정 불확도와 시험 간 산포가 발생한다. 또한 수치해석에서 완전히 고려하기 어려운 다양한 요인으로 인해 해석과 실험 응답 사이에는 차이가 존재한다. 따라서 해석 데이터에서 높은 예측 성능을 확보하더라도 실제 시험에서는 예측 정확도와 안정성이 저하될 수 있으며, 압입 기반 물성 평가의 실제 적용을 위해서는 이러한 측정 불확도와 해석–실험 간 차이를 함께 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 실제 압입시험에서의 인장 물성 예측 신뢰성을 향상시키기 위해 측정 불확도를 고려한 데이터 증강과 전이학습을 결합한 ANN 기반 역해석 방법을 제안하였다. 다양한 인장 물성 조건에 대한 구형 압입 FEA 데이터를 구축하고, 실제 시험에서 관찰되는 압입 응답의 변동성을 반영한 데이터 증강을 통해 측정 불확도에 강건한 사전학습 모델을 구축하였다. 이후 실제 압입시험 데이터를 활용한 전이학습을 적용하여 해석과 실험 사이의 차이를 보정하고, 실제 시험 조건에 대한 모델의 예측 성능을 향상시키고자 하였다. 다양한 강종 및 열처리 조건에 제안된 방법을 적용한 결과, 측정 불확도를 고려한 데이터 증강을 통해 실험 데이터의 변동에 대한 예측 안정성이 향상되었으며, 전이학습을 통해 실제 압입시험에서의 인장 물성 예측 정확도를 추가적으로 개선할 수 있음을 확인하였다. 제안된 방법은 해석 데이터와 실제 시험 사이의 차이를 효과적으로 완화함으로써 압입 기반 인장 물성 역추정의 신뢰성을 향상시킬 수 있으며, 향후 인장시험의 적용이 제한되는 용접부 및 국부 물성 구배 영역의 비파괴적 기계적 물성 평가에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[역학4-3 | 14:10]

Mo, W 및 Mo-W 박막의 조성과 미세구조에 따른 생분해 환경 내 전기적 안정성과 용해 거동: 이찬영, 조지현, 김주영*(UNIST)

Keywords: 몰리브데늄, 텅스텐, 스퍼터링, 생분해, 전기적 안정성, 용해 거동

최근 일정 기간 동안 기능을 수행한 후 자연적으로 분해되는 생분해성 전자소자에 대한 관심이 증가하고 있다. 이 소자에서 전극 및 배선으로 사용되는 금속 박막은 작동 기간 동안 전기적 기능을 안정적으로 유지해야 하므로, 생분해 환경에서의 용해속도와 이에 따른 전기저항 변화를 정확히 이해하는 것이 중요하다. 금속 박막의 용해 거동은 재료 고유의 화학적 특성뿐만 아니라 조성, 결정구조, 결정립 크기, 결정립계, 표면 거칠기, 기공 및 잔류응력과 같은 미세구조적 요인의 영향을 받을 수 있다. 또한 동일한 소재에서도 증착 및 후열처리 조건에 따라 서로 다른 미세구조가 형성될 수 있으며, 이는 전해액의 침투 경로와 국부적인 산화 및 용해 반응에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 스퍼터링 공정을 이용하여 Mo, W 및 Mo–W 박막을 제작하고, 증착 직후 및 열처리 후

시편을 통해 소재 조성과 미세구조 변화가 생분해 환경에서의 전기적 안정성과 용해 거동에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 박막의 조성, 결정구조, 표면 및 단면 미세구조, 표면 거칠기와 전기적 특성을 분석하고, 생분해 환경에서 시간에 따른 전기저항 및 표면 형상의 변화를 측정하여 용해 진행 과정과 전기적 기능 저하 사이의 상관관계를 평가하고자 한다. 또한 정적 환경에서의 분석을 기반으로 향후 동적 용해 환경에서 나타나는 거동을 비교함으로써, 소재 조성, 미세구조 및 외부 환경에 따른 금속 박막의 용해 메커니즘을 체계적으로 규명하고자 한다

인공지능재료과학
Room 1층 102호, 10월 30일

[인공1-1 | 08:00]
Charge-aware knowledge distillation of machine learning interatomic potentials: Jinuk Moon, Jeong Woo Han*(Seoul National Univ.)
Keywords: Machine learning interatomic potential, Knowledge distillation, Charge equilibration, Large-scale MD

Machine learning interatomic potentials (MLIPs) enable atomistic simulations with near first-principles accuracy at a fraction of the quantum-mechanical cost. Yet even state-of-the-art foundation MLIPs remain too expensive for the large-scale, long-time simulations that realistic materials problems demand. Knowledge distillation addresses this gap by compressing foundation models into lightweight student potentials that predict energies and forces at greatly reduced cost. Most current MLIP distillation frameworks, however, transfer only mechanical information such as energies and forces, with recent extensions to Hessians. Atomistic phenomena are also governed by electronic degrees of freedom. In particular, per-atom charge underpins oxidation states, charge transfer, and electrostatic response, yet a framework for distilling such per-atom properties alongside energies and forces has been absent. Here we introduce charge-aware distillation. Using a charge-equilibrated TensorNet (QET) foundation potential as the teacher, we train a lightweight neural moment-tensor potential with a dedicated charge head that jointly learns energies, forces, and a convention-defined per-atom charge field under a total-charge constraint. The student reproduces teacher charges to 1.4–5.7 milli-e across ionic crystals, a transition-metal oxide, a covalent semiconductor, and a solid electrolyte, while retaining energy and force fidelity at essentially no extra inference cost. For complex systems where the teacher itself fails to reproduce DFT charges, the framework supports fine-tuning the teacher on a handful of DFT frames before distillation, which we demonstrate on an oxide catalyst electrode and water interface. Exported as an analytic-force LAMMPS pair style, the student scales linearly and holds 50–67 million atoms on a single CPU node, far beyond the teacher's roughly 9, 700-atom GPU ceiling. In a 17, 836-atom molten NaCl-$CaCl_2$ simulation, the student resolves per-atom charges along ionic-transport trajectories with $r > 0.998$ against teacher labels. Charge-aware distillation thus brings the electronic channel of foundation potentials to production scale, enabling charge-resolved simulations of batteries, electrocatalysts, and ionic materials.

[인공1-2 | 08:15]
Active Learning Study of d^0-Cation Heterogeneity in $BaCoO_{3-\delta}$ Air Electrodes in Protonic Ceramic Electrochemical Cells: Hyeonggeun Kim, Joonyong Heo, Dongyeon Kim, Seeun Oh(KAIST), Min Young Ha(Kyung Hee University), Kang Taek Lee*(KAIST)
Keywords: Active learning, d^0-cation, Air electrode, Protonic ceramic electrochemical cell

Substituting two different d^0 cations onto the cobalt sublattice of $BaCoO_{3-\delta}$ makes the host chemically heterogeneous, and that heterogeneity is expected to influence both whether a cubic product forms and how actively the resulting electrode catalyzes oxygen reactions. Its role, however, is difficult to isolate from single-substituent trends, so we examined it through an active learning loop. Each cycle proposed a small batch of chemistries by balancing predicted merit against model uncertainty; the proposals were prepared, characterized by diffraction, and, when cubic, assembled into symmetrical cells for impedance measurement, and every outcome then updated two probabilistic models, one describing phase formation and another describing temperature-dependent resistance. Successive iterations sharpened both models and, more importantly, made the influence of B-site heterogeneity visible: the degree of chemical dissimilarity among substituting cations correlated systematically with cubic retention and with measured electrode activity. This study therefore identifies cation heterogeneity as a meaningful design handle for perovskite air electrodes and shows that uncertainty-guided experimentation can uncover such relationships at a cost well below exhaustive screening.

[인공1-3 | 08:30]
나노압입시험 기반 인장특성 및 응력-변형률 거동 예측: 천세호, 주성환, 김지훈, 이태경*(부산대학교)
Keywords: 나노인덴테이션, 인장시험, PINN, 기계학습

재료의 강도와 연성은 주로 인장시험을 통해 평가되지만, 표준 시편의 제작이 어렵거나 시험 가능한 영역이 제한될 경우에는 인장시험을 실시하기에 제약이 있다. 나노압입시험은 미소 영역에서 국부적인 기계적 응답을 측정할 수 있어, 표준 인장 시험의 적용이 어려운 경우에 이를 대체할 수 있는 방법으로 평가된다. 그러나 나노압입시험은 압자 하부에서 복잡한 다축응력상태가 형성되므로, 측정된 압입 응답으로부터 인장거동을 직접적으로 도출하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 나노압입시험으로부터 인장 거동을 예측하는 physics-informed neural network 기반 모델을 구축하였다. 총 65개 시편에 대해 인장시험과 나노압입시험을 수행하였으며, 나노압입시험에서 얻어진 기계적 응답을 모델의 입력으로 사용하였다. 학습 과정에는 물리적 제약조건을 반영하여 인장거동의 특성이 예측에 반영되도록 하였다. 이를 통해 제한된 양의 학습 데이터에서 발생할 수 있는 비물리적인 인장곡선 거동의 예측을 억제하고, 실제 재료의 탄성 및 소성변형 특성이 예측 결과에 반영되도록 하였다. 또한 일반적인 데이터 기반 학습 결과와 비교하여 물리적 제약조건이 인장곡선의 예측 성능에 미치는 영향도 함께 분석하였다.

[인공1-4 | 08:45]
Toward Novel Synthesis Routes: A Cross-Domain Knowledge Graph with Hierarchical Category Nodes: MUGEUN SON, Joonhee Kang*(Pusan National Univ.)
Keywords: knowledge graph, Retrieval-Augmented Generation (RAG), synthesis

Artificial Intelligence (AI), and Machine Learning (ML) in particular, has opened a new chapter in materials science. Protein structures can now be predicted with AlphaFold, and stable, unique, and novel (S.U.N) materials have been identified through GNoME and MatterGen. These achievements, however, have largely addressed the question of "what to synthesize", leaving "how to synthesize" as an open challenge. Here, we incorporate synthesis process concepts drawn from multiple domains into a knowledge graph, emphasizing the central role played by "category nodes" in representing synthesis processes efficiently. The schema is organized into hierarchical layers, so that retrieval can be narrowed and data merged easily. Since every process branches out from category nodes that act as hubs, the knowledge graph is able to link domains that would otherwise remain separate. We therefore anticipate that this schema will open a path toward novel synthesis routes, by drawing on synthesis methods developed in other domains and by combining techniques such as generative AI, Retrieval-Augmented Generation (RAG), and large language models (LLMs).

[인공1-5 | 09:00] 초청강연
금속 소재 인공지능: 딥러닝에서 에이전틱 AI까지: 이호원*, 정재면, 오세혁(한국재료연구원, 과학기술연합대학원대학교), 김호혁, 배성준(한국재료연구원), 이치헌(한국재료연구원, 과학기술연합대학원대학교), 쩐민띠엔(한국재료연구원), 판황쿵, 주무영, 우엔홍하이남(한국재료연구원, 과학기술연합대학원대학교)
Keywords: 금속, 인공지능, 딥러닝, 생성모델, 합성 데이터, 에이전틱 AI, 파운데이션 모델, 자율실험실

신소재 개발은 조성–공정–미세조직–물성으로 이어지는 방대한 비선형 설계 공간으로 인해 통상 10~20년이 소요되며, 특정 합금계·공정에 특화된 소형 AI 모델로는 범용적 소재 설계에 한계가 있다. 본 발표에서는 한국재료연구원의 금속소재 인공지능 연구를 딥러닝에서 에이전틱 AI까지 조망한다. 자기지도학습 기반 미세조직 분석, 디퓨전 모델 기반 EBSD 패턴 복원 등 분석·측정 AI, 해석 증강 데이터와 멀티모달 입력 기반 물성 예측 및 미세조직 설계, 생성모델 기반 합성 데이터 증강, 공정–미세조직–물성 연계 AI 시뮬레이터 기술을 소개한다. 나아가 LLM 다중 에이전트가 CALPHAD 등 계산 도구와 결합하여 합금 설계를 자율 수행하는 AlloyAgent를 제시하고, 기존 최적화 기법 대비 우수한 합금 발굴 성능을 보인 결과를 공유한다. 마지막으로 자율실험실과 멀티모달 파운데이션 모델을 결합한 금속소재 조성·공정 자동설계 거대 AI 개발 전략을 논의한다.

[인공2-1 | 09:35] 초청강연
From Literature to AI-Ready Materials Knowledge for Inverse Design: Joonhee Kang*(부산대학교)
Keywords: Materials Informatics, Literature Mining, AI Agents, Knowledge Graph, Reasoning

The discovery and design of advanced materials increasingly depend on the ability to transform rapidly expanding scientific literature and data into structured, machine-actionable knowledge. However, critical information on materials composition, structure, synthesis and processing conditions, properties, and performance remains fragmented across unstructured literature and diverse data sources, limiting its systematic utilization. Here, we present an integrated framework that connects scientific literature acquisition with structured data construction, knowledge graph development, and knowledge-driven materials inverse design. Materials-related information is extracted and refined from the literature to establish a structured data framework that connects composition, structure, processing, properties, and performance, while AI agents are employed to accelerate selected stages of information acquisition and analysis. The accumulated data are subsequently integrated into a materials knowledge graph that represents diverse scientific entities and their multilayered relationships. Building on this knowledge foundation, we develop multiple reasoning approaches, including graph exploration, relational reasoning, path-based inference, and generative approaches, to identify candidate materials and uncover new design pathways that satisfy target performance requirements. The proposed framework enables newly generated literature and data to be continuously incorporated into an evolving knowledge structure, creating a closed-loop research environment in which accumulated knowledge can be directly leveraged for materials design. Applicable across diverse materials domains, including energy, semiconductor, and aerospace technologies, this generalizable data- and knowledge-driven framework provides a pathway for accelerating the transformation of scientific literature into actionable design knowledge and advancing the discovery and inverse design of next-generation materials.

[인공2-2 | 10:00]
Cascade-Censored Active Learning for Periodic Shell Metamaterial Discovery: HOANG CUONG PHAN, HO WON LEE*(University of Science and Technology, Korea Institute of Materials Science), CHIHUN LEE(Korea Institute of Materials Science)
Keywords: Active learning, Periodic-shell metamaterials, Failure traces, Additive manufacturing, Materials discovery

Scientific design workflows often stop at the first failed certification check, producing structured partial traces that contain more information than a binary outcome. We present Cascade-Censored Active Learning for periodic shells (CCAL-Shell), a framework for testing whether early-exit traces improve learning and acquisition in additive-manufacturing-aware metamaterial design. A matched experiment first compares trace-supervised and binary-supervised design-input-only predictors of successful numerical quality-control

(QC) certification. Coarsening-aware deployment-targeted acquisition (CADTA) then chooses between certifying a new candidate and legally continuing a cached, continuation-eligible ordinary failure according to their predicted effects on future QC prediction risk under cost, support, and hard-failure constraints. Finally, after the upstream procedures are frozen, an independent transport study tests whether the resulting strategy increases the probability of finding solver-verified shells satisfying registered elastic-performance criteria within fixed computational budgets. CCAL-Shell thus tests whether censored failure traces provide reusable supervision and purchasable evidence for more efficient computational materials discovery.

[인공2-3 | 10:15]

다이캐스팅 결함 검사를 위한 결함 파라미터 분포 추정 기반 3차원 결함 생성 및 이상 탐지 성능 평가: 변영훈(한국생산기술연구원, UST), 윤준석, 이정훈, 김동응, 김문조(한국생산기술연구원), 윤종필*(한국생산기술연구원, UST)

Keywords: 3차원 이상 탐지, 3차원 결함 생성, 데이터 합성, 다이캐스팅

3차원 스캔 데이터를 이용한 결함 탐지는 2차원 이미지 데이터로 탐지하기 어려운 문제를 해결할 수 있는 방법 중 하나다. 그 중 다이캐스팅 결함 검사는 제품 표면의 이미지 뿐만 아니라 3차원 포인트 클라우드 등의 정보를 활용하여 정밀한 결함 탐지가 가능하다. 결함 탐지 딥러닝 모델 학습을 위한 실제 3차원 스캔 데이터를 수집하기 위한 비용이 과도하여 최근에는 생성 모델을 이용하여 합성 결함 데이터를 만들고 이를 결함 탐지 모델 학습에 이용하는 연구가 주목 받고 있다. 기존 결함 생성 모델들은 결함의 다양성을 높이기 위한 시도를 이어오고 있으나 결함의 파라미터를 여전히 직접 설계해야 하며 실제 결함의 특성이 아닌 설계자의 선택으로 파라미터가 구성된다. 본 연구에서는 실제 결함의 파라미터 공간상 분포를 미리 학습된 결함 생성 모델에 prior로 활용하여 실제 결함의 통계를 따르는 결함을 생성하도록 유도하는 결함 생성 방법을 제안한다. 이를 검증하기 위해 실제 결함 데이터로 구성된 결함 탐지 데이터셋에서 AUROC를 활용하여 동일한 생성 모델 및 탐지 모델에서 제안하는 방법을 적용했을 때의 성능 차이를 비교한다. 사사: 본 연구는 산업통상자원부 자동차산업기술개발 사업(RS-2024-00410959)의 지원을 받아 수행된 연구임.

[인공2-4 | 10:30]

Inverse Design of Ionic Melts for Continuous Casting through Knowledge-Augmented Large Language Model: Seungyeon Lee, Il Sohn*(Yonsei University)

Keywords: Ionic melts, Large Language Model, Property prediction, Inverse design

Ionic melts are widely used in high-temperature metallurgical processes for various functions, including refining, heat-transfer control and even lubrication in casting process. Their structural flexibility in the liquid state allows a wide variety of components to be incorporated over broad compositional ranges. Consequently, their thermophysical properties can be sensitively tailored through subtle compositional adjustments. However, this compositional diversity creates a vast design space that is difficult to explore efficiently using conventional trial-and-error approaches. In this study, an artificial intelligence (AI)-driven framework was developed for the prediction and inverse design of ionic melts applied to continuous casting. Machine-learning models for viscosity, liquidus temperature, and crystallization temperature were integrated with multi-objective optimization to identify compositions satisfying multiple property requirements. However, mold fluxes require specific properties that vary with process conditions and steel grades. Due to these requirements, which are not always available as predefined numerical criteria but distributed across heterogeneous domain knowledge, their interpretation and integration remain challenging. Therefore, a domain-knowledge-enhanced large language model (LLM) was introduced to interpret relevant knowledge and determine application-specific design objectives and constraints, while a knowledge graph and Retrieval Augmented Generation (RAG) were incorporated to reinforce relationships among compositions, properties, process conditions, and design requirements. The proposed framework enables automated, knowledge-guided exploration of ionic melt compositions while improving the efficiency, consistency, and logical coherence of AI-assisted materials design.

[인공2-5 | 10:45]

Large Language Model assisted Design of Superalloys via Olson-Flow Block Diagrams: Hyungi Min(Seoul National University), Heechan Jung, Dongsoo Kang(Hanwha Aerospace), Eun Soo Park*(Seoul National University)

Keywords: LLM, 머신러닝, Ni초합금

The development of Ni-based superalloys under extreme conditions necessitates simultaneous control of multiple microstructural and performance attributes. Although machine learning offers accelerated exploration, its impact is limited by poorly defined or heuristic descriptors, leading to inefficient sampling and suboptimal discovery. To overcome this, we employ large language models to systematically construct Olson-Flow Block Diagrams, capturing critical causal relationships in PSPP From scientific literature, the LLM-derived OFBD extracts physically meaningful features—such as lattice misfit, γ′ volume fraction, solvus temperature, and creep resistance—and structurally encodes them into the design space. These features then serve as robust inputs for downstream ML models, enabling more targeted and interpretable alloy screening. Our results show that LLM-assisted OFBD facilitates clear feature establishment and enhances ML model efficiency, reducing compositional search space while improving performance prediction accuracy. We discuss implications for inverse design, high-temperature alloy development, and AI-augmented materials engineering.

[인공3-1 | 13:30]

Knowledge Graph-Enhanced LLM Reasoning for p-Type Semiconductior Research: Bokyeong Kim, Joonhee Kang*(부산대학교)

Keywords: Knowledge Graph, Large Language Model, Graph RAG, p-type Transistor

The growing demand for highly integrated and energy-efficient electronics has increased interest in monolithic three-dimensional (M3D) integration. High-performance p-type transistors are essential for complementary M3D circuits, yet their development remains challenging because device performance depends on coupled factors including material composition, fabrication processes, device structures, and measurement conditions. Efficiently analyzing these heterogeneous experimental variables therefore requires a systematic, AI-assisted approach. In this work, we develop a Knowledge Graph (KG)-based Retrieval-Augmented Generation (Graph RAG) framework to support material selection and fabrication process optimization for p-type transistors. Experimental information is structured into a process-aware KG that connects semiconductor materials, fabrication steps and parameters, device architectures, measurement conditions, and electrical performance. Relevant experimental evidence is then retrieved from the KG and provided to a large language model (LLM), enabling reasoning and recommendations grounded in structured scientific knowledge. This framework converts fragmented literature data into an interconnected knowledge base that supports traceable and context-aware scientific reasoning. By combining structured experimental knowledge with LLM capabilities, the proposed approach provides a foundation for AI-assisted exploration of materials and fabrication strategies for next-generation p-type transistors.

[인공3-2 | 13:45]

물리제약 의존 사후확률추론을 통한 압입시험 재료의 응력-변형률 곡선 역산: 고태영, 하수빈, 이정아, 김형섭*(포항공과대학교)

Keywords: 압입, 머신러닝, 확률추론

본 연구에서는 물리적 제약이 결합된 사후확률추론 모델과 유한요소해석(FEM)을 통합하여, 나노인덴테이션 데이터로부터 Kocks–Mecking–Estrin(KME) 모델의 구성 파라미터를 직접 추출하는 새로운 프레임워크 물리제약 사후확률추론법(PI-NPE)을 제안한다. KME 모델을 적용한 FEM 시뮬레이션을 통해 다양한 하중–변위 곡선의 합성 데이터셋을 체계적으로 생성하고, 이를 기반으로 신경망을 학습하여 인덴테이션 응답으로부터 가공경화 및 소성 유동을 지배하는 6개의 구성 파라미터를 역추정할 수 있도록 하였다. 고차원 KME 파라미터 공간을 FEM으로 샘플링하는 과정에서 발생하는 높은 계산 비용을 줄이기 위해 Latin Hypercube Sampling과 민감도 분석을 적용하였다. 이를 통해 최소한의 FEM 시뮬레이션만으로도 KME 파라미터 공간을 효율적으로 탐색하고 충분히 포괄할 수 있도록 하였다. 제안된 프레임워크는 금속 재료에 대한 실험적 나노인덴테이션 및 인장시험 결과를 이용하여 검증하였으며, AI를 통해 재구성한 응력–변형률 곡선과 실험에서 측정한 응력–변형률 곡선 사이에 높은 일치도를 확인하였다. 또한 학습된 모델은 다양한 변형 거동에 대해서도 응력–변형률 곡선을 높은 정확도로 복원하는 성능을 나타냈다. 본 PI-NPE 프레임워크는 기존의 반복적 피팅 방법을 대체할 수 있는 빠르고 확장 가능한 접근법을 제공할 뿐만 아니라, 인덴테이션 기반 재료 특성화를 위한 데이터 기반 디지털 트윈 구축의 가능성을 제시한다. 특히 기존의 반복적 피팅 방법과 비교하여 계산 효율성, 자동화 및 물리적 메커니즘에 대한 해석 가능성 측면에서 상당한 이점을 제공한다. 본 연구는 물리적 지식이 반영된 머신러닝이 재료 역특성화의 한계를 극복할 수 있음을 보여주며, 비파괴적 기계적 물성 추출과 디지털 트윈 기술의 통합을 위한 확장 가능하고 해석 가능하며 실험적으로 검증된 접근법을 제시한다.

[인공3-3 | 14:00]

XGBoost와 통계적 분석을 활용한 공정 데이터 기반 과립 입도 영향 인자 도출 및 해석: 박재형(영남대학교 신소재공학과), 신민찬(영남대학교 신소재공학부), 박노근*(영남대학교 신소재공학과, 영남대학교 신소재공학부)

Keywords: mold powder, 과립 입도, 공정 데이터, 공정 인자, XGBoost, 통계적 분석

연속주조 공정에서 mold powder는 주형과 응고 셸 사이의 윤활, 용강의 열방사 및 재산화 방지, 비금속 개재물 흡수, 열전달 조절 등의 중요한 역할을 한다. Mold powder는 취급성과 공급 안정성을 높이고 분진 발생을 억제하기 위해 과립 형태로 제조되며, 과립 입도는 mold powder의 유동성, 주형 내 공급 및 용융 거동에 영향을 미치는 주요 품질 특성이다. 따라서 균일한 품질의 mold powder를 생산하기 위해서는 과립 입도 변동과 관련된 주요 제조공정 인자를 파악하고 관리할 필요가 있다. 본 연구에서는 장기간 축적된 mold powder 제조공정 데이터를 활용하여 과립 입도 변동과 관련된 주요 공정 인자를 도출하였다. 분석 데이터는 제품 정보, 제조공정 조건 및 과립 입도 정보로 구성하였으며, 전체 데이터와 제품별 데이터를 구분하여 입도분포, 공정조건의 운전범위 및 생산 시점에 따른 변화를 검토하였다. 이를 바탕으로 제품 간 입도 수준 차이와 동일 제품 내 생산 LOT별 변동을 구분하였다. 이후 통계적 분석을 통해 개별 공정 인자와 과립 입도 간의 관계 및 공정 인자 간 상관구조를 검토하고, XGBoost를 적용하여 비선형 관계와 변수 간 상호작용을 고려한 후보 공정 인자를 도출하였다. 또한 반복 분석을 통해 공정 인자 중요도와 순위의 안정성을 평가하였다. 이러한 분석을 통해 인공지능 모델이 제시한 변수 중요도에만 의존하지 않고, 통계적 관계와 분석 결과의 안정성, 각 인자의 제조공정 내 물리적 역할 및 재료공학적 의미를 종합적으로 고려하여 후보 공정 인자를 도출하고 해석하였다. 이를 통해 과립 입도 관리 시 우선적으로 검토해야 할 공정 인자를 제시하고, 향후 공정조건 제어와 과립 품질 안정화를 위한 데이터 기반의 기초자료를 마련하고자 한다.

[인공3-4 | 14:15]

Soft-target segmentation 기반 확률맵을 활용한 철강 OM 미세조직의 상분율 및 결정립도 정량화: 이종혁*, 이강원, 이학현, 노기정, 곽민호, 이희웅(현대제철)

Keywords: 철강, 딥러닝, 미세조직, semantic segmentation, 광학현미경

철강 optical microscopy(OM) 이미지는 산업 현장에서 폭넓게 활용되지만, 복잡한 다상 조직에서는 구성조직(constituent) 간

의 모호한 천이와 불완전한 결정립계로 인해 일관된 정량 분석이 어렵다. 본 연구에서는 이러한 모호한 영역의 불확실성을 반영하기 위해 soft-target segmentation과 class-probability map 기반 결정립 재구성을 결합한 미세조직 정량화 방법을 제안하였다. 명확하거나 불확실한 미세조직 constituent 및 결정립계 영역을 표현하기 위한 8-label annotation protocol을 구성하고, 이를 4-class hard target과 soft-target distribution으로 변환하였다. U-Net과 UNet++를 대상으로 hard target 기반 categorical cross-entropy(CE), soft target 기반 Kullback–Leibler divergence(KLD) 및 두 목적함수의 결합 조건을 3개의 train–validation split에서 비교하였다. UNet++는 U-Net보다 일관되게 높은 성능을 보였으며, KLD가 포함된 모든 학습 조건은 두 모델과 모든 데이터 분할에서 CE-only learning보다 segmentation 성능을 향상시켰다. 이는 annotation 과정에서 확인된 미세조직의 불확실성을 model supervision에 반영하는 것이 복잡한 철강 OM 이미지의 segmentation에 유효함을 보여준다. 학습된 segmentation model에서 생성된 discrete mask와 class-probability map은 probability-guided grain reconstruction에 함께 사용되었다. 확률맵에 남아 있는 결정립계 정보를 watershed 초기화 및 영역 병합에 활용하여 개별 결정립을 재구성하여 미세조직 constituent별 면적분율과 ASTM E112 기반 결정립도 지표를 산출하였다. 구축된 고정 분석 파이프라인은 별도의 추가 조정 없이 634건의 산업 데이터에 적용되었다. 모델에서 산출한 결정립도 지표는 기존 입도시험값과 높은 상관관계를 나타냈다. 각각의 결정립 크기 항과 항복강도의 관계를 비교한 결과, 모델 기반 결정립 항이 기존 입도시험값 항보다 높은 Hall–Petch-type 연관성을 보였다. 또한 constituent별 면적분율과 결정립 크기를 함께 반영한 경우 항복강도 변화와의 연관성이 더욱 향상되었다. 본 연구 결과는 철강 OM 이미지로부터 상분율과 결정립도 지표를 동시에 산출하고, 이를 산업 규모의 미세조직–물성 연계 분석에 활용할 수 있는 가능성을 보여준다.

[인공3-5 | 14:30]

2D Nanofluidic Bimodal Synapses for Trajectory-Memory Encoding and Physical Reservoir Computing: Suhee Jang, Dar Yeop Jeong, Won Il Park*(한양대학교)

Keywords: 2D heterostructures, Nanofluidic ion channels, Physical reservoir computing, Event-memory bifurcation, Spatiotemporal processing, Artificial synapses

Biological neural circuits process spatiotemporal information efficiently by coordinating fast event transmission with slow memory formation. Here, we report a 2D nanofluidic bimodal synapse (2D-NBS) that physically bifurcates raw analog inputs into a fast event component and a slowly decaying memory component within a single ionic-transport architecture. The device couples an electrode/electric-double-layer (EDL) interface with a cation-selective 2D nanofluidic ion channel (2D-NIC) formed by a WS_2- or Al_2O_3-on-multilayer graphene heterostructure. By tuning ionic diffusion resistance and effective EDL capacitance, the relaxation time constant is controlled from the sub-millisecond regime to over 7 ms, enabling trajectory-history-preserving representations without external spike generation or preprocessing. Using 2D-NBS-generated representations, CNN-based recognition accuracy increases from 86.8% to 90.3% for the Weizmann action dataset and from 90.4% to 95.0% for the LSA64 sign-language dataset. In multivariate urban $PM_{2.5}$ forecasting, the 2D-NBS functions as a physical reservoir, reaching an MSE of 3.33×10^{-4} with ~162× lower energy per step than a 1, 941-parameter vanilla LSTM of comparable accuracy. These results identify the 2D-NBS as a physics-driven, sensor-side feature-transform primitive and a compact multi-timescale physical reservoir platform for low-power edge intelligence.

[인공3-6 | 14:45]

An LLM-based Multi-agent Framework for Interpretable Alloy Design and Discovery: Hoang Hai Nam Nguyen, Ho Won Lee*(Korea Institute of Materials Science, University of Science and Technology)

Keywords: multi-agent system, large language model, bayesian optimization, alloy design, light-weight metal alloy

We present AlloyAgents, a multi-agent LLM framework for closed-loop discovery of high-modulus cast aluminum alloys. The central idea of AlloyAgents is that LLM agents interpret heterogeneous materials-science evidence, including CALPHAD thermodynamics, X-ray diffraction (XRD), microstructure descriptors, and a learned surrogate model, and decide the next experiment on the basis of those interpretations. Three Gemma-4-based LLM agents are each assigned a distinct skill. The Principal Investigator (PI) selects, each round, the priority hypothesis to be tested from a shared Hypothesis Board; the DoE Designer synthesizes the four-channel evidence provided by a deterministic Characterization Lead and proposes falsifiable alloy-process candidates together with predicted values; and the Reviewer compares the measured results against the predictions, updates the evidence for each hypothesis, and proposes new hypotheses when patterns emerge. The system begins from a small set of seed hypotheses, and during the campaign the LLM discovers new hypotheses on its own and adds them to the board, while a rule engine within the same node transitions hypotheses to settled or refuted status according to the accumulated evidence, thereby ensuring a falsifiability audit trail. In an active-learning study over 817 alloy-process candidates in the Al-Si-Ni-Cu-Mg-Fe system, AlloyAgents identified 50 alloys with elastic modulus exceeding the 100 GPa design target (compared with approximately 70 GPa for pure aluminum), using substantially fewer evaluations than Bayesian-optimization, uncertainty and search baselines. The closed-loop evaluation in this work was conducted as a retrospective benchmark based on dataset lookup; the same workflows are to be applied to an automated casting and characterization platform (a self-driving lab) to perform prospective synthesis validation.

[인공4-1 | 15:05]

Position-Selective MoS_2 Photoresponse Dynamics for In-Sensor Encoding of Motion History: Hyeonsu Park, Hyuncheol Yun, Yelim Kim, Won Il Park*(한양대학교)

Keywords: transition metal dichalcogenides, MoS_2 photodetectors, photoconductive effect, photothermoelectric effect, time-resolved photoresponse, neuromorphic vision

We report a position-selective dual-mode photoresponse in multilayer MoS_2 photodetectors and demonstrate its application to in-sensor motion-history encoding. Under a weak source-drain bias, localized illumination near the metal-MoS_2 contacts produces a fast photothermoelectric (PTE)-dominant response with negligible temporal persistence, whereas illumination on the MoS_2 channel generates a photoconductive (PC)-dominant response with a pronounced persistent tail arising from trap-mediated carrier dynamics. This spatially distinct fast-slow response provides an intrinsic mechanism for temporal information encoding within a single photodetector. By exploiting the temporal contrast between the PTE and PC responses, differential signals were generated to encode recent illumination history directly in the analog domain without additional memory elements. For moving objects, the persistent PC response forms a decaying spatial trail that represents the recent motion trajectory. A leaky-integrator-based analytical model further shows that the effective trail length is governed by the photoresponse decay time and object velocity. Using experimentally measured transient responses as lookup tables, dynamic image sequences were converted into motion-trajectory maps. System-level validation using the Weizmann human action dataset achieved 91.5% classification accuracy with a lightweight convolutional neural network. These results demonstrate a simple strategy for hardware-level temporal feature encoding in MoS_2 photodetectors toward in-sensor motion processing and neuromorphic vision.

[인공4-2 | 15:20]

Mesh-based Graph Neural Networks for Predicting Mechanical Response and Evolution of Deformation Heterogeneity: Minh Tien Tran(Korea Institute of Materials Science), Moo Yeong Joo(Korea Institute of Materials Science, University of Science and Technology), Seong-Hoon Kang(Korea Institute of Materials Science), Dong-Kyu Kim(Konkuk University), Ho Won Lee*(Korea Institute of Materials Science, University of Science and Technology)

Keywords: Graph neural network, Mesh-based surrogate, Crystal plasticity, Microstructure, Mechanical properties, Deformation heterogeneity

In this work, a dual-representation interpolation mesh-based graph neural network (DIM-GNN) is developed to predict the mechanical response and deformation heterogeneity of ultra-thin steel sheets. The proposed model incorporates finite element mesh connectivity and integration point information to simultaneously predict macroscopic engineering stress–strain curves and full-field evolutions of von Mises stress and equivalent plastic strain during deformation. The model accurately captures stress–strain response and evolution of deformation heterogeneity, including stress heterogeneity, plastic strain accumulation, and strain localization patterns during deformation. Compared to the node-level GNN baseline, DIM-GNN better predicts the local deformation heterogeneity, highlighting the effectiveness of the dual-representation approach. Once trained, the model significantly reduces prediction time by approximately 2.7 orders of magnitude, enabling rapid evaluation of hardening parameter effect on the onset of plastic instability. These findings demonstrate the potential of DIM-GNN as efficient full-field surrogate models for plasticity prediction and microstructure-informed material evaluation.

[인공4-3 | 15:35]

DFT and Machine Learning-Driven Computational Design of Multicomponent $TiMn_2$-Based C14 Laves Phase Hydrogen Storage Alloys: Seo-Hui Park, Won-Seok Ko*(Korea Univ.)

Keywords: Hydrogen storage alloy, $TiMn_2$-based Laves phase, Density functional theory(DFT), Gaussian process regression(GPR), Multicomponent alloy design

As the transition toward a hydrogen economy accelerates, metal hydride-based hydrogen storage alloys (HSAs) have attracted attention as a practical route for room-temperature hydrogen storage owing to their safety, volumetric efficiency, and favorable reversibility compared with physical storage methods such as compression or liquefaction. Among these, $TiMn_2$-based C14 Laves phase alloys offer high hydrogen storage capacity and excellent cycling stability, yet binary compositions alone cannot satisfy the plateau pressure requirements needed for practical room-temperature operation. Multicomponent alloying provides an effective route to tune plateau pressure by partially substituting the A- and B-site elements, but it also generates a combinatorially vast compositional space that is intractable to explore through conventional experimental or first-principles computational approaches alone, motivating the need for a more scalable design strategy. Here, we present a computational design pipeline that couples density functional theory (DFT) calculations with Gaussian process regression (GPR)-based machine learning to efficiently screen this vast compositional space. A GPR model was trained on DFT-calculated thermodynamic and structural properties, and its predictive reliability was assessed through cross-validation before being applied to unexplored compositions. Candidate compositions were then narrowed through a sequential filtering strategy that jointly addresses three design criteria—economic feasibility, thermodynamic targets, and phase stability: raw material cost was constrained to exclude commercially unviable compositions, hydride formation enthalpy was targeted to match a practical room-

temperature desorption plateau pressure, prediction uncertainty was used to remove compositions lying outside the model's reliable domain, and Thermo-Calc-based phase stability analysis was used to eliminate compositions outside the single-phase C14 stability field. Applying this pipeline to a multicomponent Ti–Mn-based compositional space reduced the initially vast candidate pool to a small set of high-confidence alloys that jointly satisfy cost competitiveness, favorable hydrogen release behavior, and phase stability. This work demonstrates that a DFT–machine learning design strategy can not only accelerate the compositional optimization of multicomponent hydrogen storage alloys but also extend to other metallic materials design problems governed by similarly complex, multi-constraint compositional spaces.

[인공4-4 | 15:50]

Explore-to-Refine (E2R) Reinforcement Learning for Multi-Property Inverse Design of Crystal Structures: Application to Photocatalysts: Kiwon yang, Joo-Hyoung Lee*(Gwangju Institute of Science and Technology (GIST))

Keywords: Reinforcement learning, Generative model, Inverse design, Photocatalyst, Water splitting, First-principles calculation

Generative models for crystal structures are typically trained by maximum likelihood and thus tend to reproduce the property distribution of their training data. When multiple target properties must be satisfied simultaneously, however, the region meeting all criteria occupies a small fraction of this distribution, making conditioning alone insufficient to concentrate generation in the desired region. Reinforcement learning (RL) can redirect the generative distribution toward such targets, but conventional single-target RL faces an inherent trade-off: maximizing reward narrows the policy distribution, while constraining the policy to remain close to its pretrained reference limits exploration. As optimization proceeds, this competition can lead to policy collapse and loss of generative diversity. Here, we address this limitation by decoupling exploration from refinement through an Explore-to-Refine (E2R) strategy. In the exploration stage, a critic-free policy-optimization agent guided by a neural reward shaper searches under-sampled, target-rich regions of the pretrained distribution without requiring the explored policy itself to remain suitable for generation. In the refinement stage, Self-Imitation Learning transfers only high-reward trajectories to the original pretrained policy, allowing it to acquire target-property knowledge without inheriting the collapsed distribution of the explored policy. We further find that the learned stability predictors are inappropriate as direct reward signals because energy above the convex hull depends on competing-phase landscape rather than on an isolated structure. Theremodynamic stability is therefore imposed as a post hoc filter using a machine-learning interatomic potential. We evaluate E2R for the inverse design of solar water-splitting photocatalysts, requiring band gap, optical absorption and thermodynamic accessibility to be satisfied simultaneously. Among unique quaternary oxides, E2R achieves an 16.5% success rate for the joint band-gap and optical-absorption criteria, compared with 9.9% for the pretrained baseline and 10.0% for a diffusion-based model under the same elemental constraints. E2R also preserves baseline-level structural uniqueness while increasing novelty. First-principles calculations validate four previously unseen quaternary oxides, $LiMn_2VO_6$, $LiMn_2MoO_6$, $Ca_2Mn_3MoO_8$ and $Li_3MnV_2O_6$, all of which are absent from the training distribution and satisfy the target criteria. These results demonstrate that E2R enables effective multi-property inverse design without sacrificing generative diversity.

[인공4-5 | 16:05]

High-Throughput Evaluation and Generative Exploration Beyond Existing Databases for Ternary Octahedral Inorganic Photovoltaics: Wonzee Jung(Dongguk University, Korea Institute of Energy Research), Seyeon Lee(Chungbuk National University), Chiwon Choi(Chungnam National University), Kihwan Kim(Korea Institute of Energy Research), Jaemin Shin(Chungbuk National University), Kanghoon Yim*(Korea Institute of Energy Research)

Keywords: Photovoltaic, high-throughput screening, foundation models, and Bespoke model

Thin-film solar cells remain an attractive photovoltaic platform because they consume far less absorber material and accommodate device form factors—lightweight, flexible, and semi-transparent—that wafer-based technologies cannot. Many absorber compounds have been proposed for this purpose, yet relatively few sustain competitive device performance or long-term stability. One central obstacle is the control of defects, which can act as Shockley-Read-Hall (SRH) nonradiative recombination centers. Computational screening workflows have accordingly begun to estimate photovoltaic efficiency limits with intrinsic-defect-related SRH recombination taken into account.[1–3] Explicit defect calculations, however, are computationally expensive and do not directly yield the diffusion properties that experiments actually probe. In addition, SRH recombination by itself may miss transport bottlenecks when carrier localization is pronounced, as illustrated by NaBiS2, in which strong absorption and slow recombination coexist with ultrafast carrier localization[4]. Carrier diffusion is therefore both difficult to predict accurately and indispensable for judging whether a candidate absorber is worth pursuing. To circumvent this difficulty, we recast the photovoltaic potential of a candidate absorber as an explicit function of its carrier diffusion properties. We construct an efficient high-throughput screening framework in which density functional theory (DFT)-derived optical absorption, band gaps, and radiative recombination losses are coupled to diffusion-length-dependent carrier-collection probabilities. Applying this framework to ternary octahedral inorganic compounds compiled in existing materials databases, we rank their absorber potential across a range of assumed carrier diffusion lengths. Experimentally reported diffusion lengths of established thin-film absorbers then serve as empirical reference scales, which we interpret in terms of effective masses, elemental composition, and octahedral structural features. Guided by a targeted DFT-derived dataset and the structure–property trends

extracted from database screening, we next move beyond the space of currently known compounds. A structural generative foundation model, a machine-learned interatomic potential, and a target-specific band-gap prediction model trained on our own dataset are combined to generate unexplored ternary inorganic structures, pre-screen their thermodynamic stability, and prioritize those meeting key photovoltaic requirements. This integrated workflow links quantitative photovoltaic evaluation to foundation-model-assisted materials exploration and yields heuristic guidelines for identifying thin-film absorber candidates that existing materials databases do not contain.
[1] Kim, S. et al. Upper limit to the photovoltaic efficiency of imperfect crystals from first principles. Energy & Environmental Science 13, 1481-1491 (2020). [2] Dahliah, D. et al. High-throughput computational search for high carrier lifetime, defect-tolerant solar absorbers. Energy & Environmental Science 14, 5057-5073 (2021). [3] Yuan, Z. et al. Discovery of the Zintl-phosphide BaCd2P2 as a long carrier lifetime and stable solar absorber. Joule 8, 1412-1429 (2024). [4] Huang, YT. et al. Strong absorption and ultrafast localisation in NaBiS2 nanocrystals with slow charge-carrier recombination. Nat Commun 13, 4960 (2022).

[인공4-6 | 16:20]

Multivariate time-series anomaly detection for early battery thermal runaway warning: a transformer-based autoencoder integrating temperature, voltage, and hydrogen sensing: Yeonhong Kim, Jaesun Lee, Wooyoung Lee*(연세대학교)

Keywords: 리튬이온 배터리, 배터리 열폭주, 다변량 시계열 데이터 이상치 탐지, Transformer, Autoencoder, 조기감지, 머신러닝, 딥러닝

Thermal runaway (TR) in lithium-ion batteries (LIBs) remains the most severe safety hazard in electric vehicles and energy storage systems, where early detection is critical for preventing fire and propagation. Temperature-based anomaly detection has shown promise, but temperature alone captures TR precursors only after substantial internal degradation, and its most diagnostic feature, the rate of temperature rise, is sensitive to sensor sampling resolution, limiting reliable early warning under realistic operating conditions. Here we present a transformer-based autoencoder for multivariate time-series anomaly detection that extends reconstruction-based monitoring beyond temperature to jointly model temperature, voltage, and hydrogen (H_2) gas evolution as coupled signals on a shared temporal axis. Trained exclusively on normal cycling data across multiple chemistries, cell formats, and operating conditions, the model learns the multivariate electro-thermal-gas dynamics of healthy operation and identifies deviations through elevated reconstruction error, without requiring labeled fault data. Self-attention contextualizes each sensor stream against the others across time, so that damage-induced decorrelation among the modalities, rather than any single-channel threshold, drives detection. By incorporating H_2 evolution, an early and mechanism-specific precursor released before appreciable temperature rise, the framework detects incipient failures that are thermally silent, while voltage adds sensitivity to electrochemical abuse pathways. We show that multimodal fusion improves early-stage detection of low-severity and slowly developing faults relative to a temperature-only baseline, extends detection lead time prior to critical thresholds, and maintains a low false-positive rate during benign operation. The parallelizable architecture sustains low inference latency for real-time deployment, establishing a scalable sensor-fusion pathway toward next-generation battery management systems capable of graded, early, and mechanism-aware thermal runaway warning.

마그네슘
Room 1층 107호, 10월 30일

[마그네슘1-1 | 09:00]
이상구조 Mg-Li 합금의 압출 및 열처리에 따른 기계적 특성 연구(I): 이성*(하나에이엠티), 류한식(에이에스이티), 이기혁, 이화인, 정인식(하나에이엠티), 이광희(한화시스템), 김홍물(하나에이엠티)
Keywords: Mg-Li alloy, BCC structure, Extrusion, Heat treatment, Density 1.5g/cc

Mg 합금은 경량, 고비강도, 우수한 감쇠능, 전자파 차폐성, 주조성 및 재활용성을 갖는 대표적인 초경량 금속 구조재이다. 그러나 상용 Mg 합금(AZ31, AZ80 등)은 육방조밀구조(HCP)에 기인한 제한적인 슬립계로 상온 변형능이 낮아, 압연 시 약 7% 이상의 변형에서 크랙이 발생하는 등 2차 가공이 어렵고 대부분 다이캐스팅으로 제조되고 있다. 이를 개선하기 위한 Mg-Li 합금은 Li 첨가에 따라 BCC 구조의 β-Li상이 형성되어 가소성이 크게 향상되며, Al 합금 대비 최대 44%, 상용 Mg 합금 대비 10~15% 이상의 추가 경량화가 가능하다. 그러나 낮은 절대강도는 구조재 적용을 위한 주요 한계로 남아 있다. 본 연구에서는 이러한 강도 문제를 극복하기 위해 Mg-Li 합금의 압출 및 후열처리 공정을 적용하고, 이에 따른 미세조직 변화와 절대강도 향상 가능성을 분석하였다.

[마그네슘1-2 | 09:15]
전위밀도 기반 VPSC 모델을 이용한 냉간 압연 Mg–Li 이상 합금의 집합조직 및 상별 변형 거동 예측: 서위걸, 쿠샬툴(국립순천대학교), 김동익, 한지수(한국과학기술연구원), 최시훈*(국립순천대학교)
Keywords: Mg–Li alloy, Cold rolling, Texture evolution, Dislocation density, VPSC, Nanoindentation

Mg–Li 합금은 낮은 밀도와 우수한 가공성을 동시에 갖는 초경량 구조재료로서 전자기기 및 수송기기 분야에 적용 가능성이 높다. 특히 LZ91 합금은 Mg-rich α상과 Li-rich β상으로 구성된 이상 조직을 가지며, 두 상의 결정구조와 기계적 특성 및 변형기구의 차이로 인해 냉간 압연 중 상별 변형 분배와 집합조직 발달이 복합적으로 나타난다. 따라서 압연 변형에 따른 집합조직 변화를 정량적으로 예측하기 위해서는 각 상의 변형기구뿐만 아니라 변형 경화와 동적 회복에 따른 연화 거동을 함께 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 기존 점소성 자기일관(viscoplastic self-consistent, VPSC) 모델에 각 변형계에서의 전위 생성 및 소멸을 추적하는 전위밀도 기반 경화 법칙과 동적 회복 항을 도입하여, 냉간 압연 LZ91 합금의 압하율에 따른 집합조직 및 상별 변형 거동을 예측하였다. 모델 검증을 위해 압연 전 초기 미세조직을 SEM과 EBSD를 이용하여 분석하고, 20, 40, 60 및 80% 압하율에서 α상과 β상의 미세조직 및 집합조직 변화를 EBSD로 정량적으로 평가하였다. 또한 각 압하율에서 나노압입시험을 수행하고 역해석 알고리즘을 적용하여 상별 응력–변형률 응답을 도출함으로써, 압연 변형에 따른 α상과 β상의 경화 및 연화 거동을 평가하였다. 이와 같이 실험적으로 측정한 상별 미세조직, 집합조직 및 기계적 응답을 전위밀도 기반 VPSC 해석과 연계함으로써, 냉간 압연 과정에서 나타나는 α/β상의 상이한 변형 거동과 집합조직 발달을 해석할 수 있는 모델링 프레임워크를 구축하였다. 본 연구는 전위밀도 진화를 고려한 결정소성 모델을 통해 Mg–Li 이상 합금의 압연 집합조직과 상별 변형 거동을 연계하여 이해하고, 향후 초경량 Mg–Li 합금의 공정 및 미세조직 최적화를 위한 기초 모델로 활용하는 것을 목적으로 한다.

[마그네슘1-3 | 09:30]
Al 및 Zn 첨가와 Annealing 온도 제어에 따른 Dual-phase Mg-Li계 합금의 집합조직 변화와 강도-연성 균형 향상: 이준호(한국재료연구원:KIMS, 고려대학교), 서병찬(한국재료연구원:KIMS), 손석수*(고려대학교), 김영민*(한국재료연구원:KIMS, 고려대학교)
Keywords: Keywordss: Mg–Li alloy, Dual-phase, Annealing, Texture, Strain localization

이중상(Dual-phase) Mg-Li계 합금은 조밀육방구조(HCP)의 Mg-rich α상과 체심입방구조(BCC)의 Li-rich β상이 공존하여, 가공 및 열처리에 따른 미세조직과 집합조직의 진화가 기계적 특성에 복합적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 Al과 Zn가 단독 또는 복합 첨가된 Mg-Li계 합금을 압연 후 150 ℃ 및 250 ℃에서 소둔 처리하여, 합금 원소 및 재결정 온도에 따른 상별 집합조직과 인장 변형거동의 변화를 규명하였다. 미세조직과 상별 결정방위는 전자후방산란회절(EBSD), X선 회절(XRD) 및 실시간 싱크로트론 X선 회절(In-situ Synchrotron X-ray diffraction)을 활용하여 다각적으로 분석하였다. 또한 압연 방향(RD) 인장시험을 통해 강도(항복강도, 인장강도)와 더불어 균일 연신(최대 하중까지의 변형) 및 불균일 연신(네킹 이후 파단까지의 변형) 구간의 거동을 심층적으로 비교하였다. 분석 결과, 250 ℃ 소둔재는 150 ℃ 소둔재 대비 항복강도(YS)가 다소 감소(191MPa → 180MPa)하였으나 인장강도(UTS)는 222MPa 수준으로 유지되었다. 특히, 균일 연신율과 파단 연신율이 모두 전반적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 고온 소둔 시 강도 저하가 억제되면서도, 네킹 발생 이전의 소성변형 수용 능력이 향상되었음을 시사한다. 본 연구는 집합조직 성분의 정량적 해석과 나노 인덴테이션(Nano indentation)을 통한 각 상의 국부 물성 평가를 병행하여, 소둔에 따른 상별 기계적 특성 변화를 교차 검증하였다. 이를 종합하여, 250 ℃ 소둔재에서 강도가 유지되면서 균일 변형능이 증가한 원인을 상별 집합조직 변화와 미시적 변형 기구(Deformation mechanism) 관점에서 고찰하고 그 결과를 본 발표에서 소개하고자 한다.

[마그네슘1-4 | 09:45]
ZX 합금의 박판 압연 거동 및 중간 열처리 조건의 영향: 김성제, 이상봉*(국립금오공과대학교)
Keywords: 마그네슘, 집합조직, ZX합금, 압연, 박판

ZX 합금은 조밀육방정(HCP) 결정구조와 강한 기저집합조직으로 인해 상온에서의 소성변형이 제한되며, 박판 압연 과정에서 가장자리

균열과 성형성 저하가 발생하기 쉽다. 본 연구에서는 Mg–Zn–Ca계 ZX 합금의 박판 제조 가능성을 향상시키기 위해 단계적 냉간압연 공정에 중간 열처리를 적용하고, 열처리 조건을 세분화하여 미세조직과 집합조직 및 기계적 특성의 변화를 분석하였다. 광학현미경과 주사전자현미경을 이용하여 압연 및 열처리에 따른 결정립 형상, 변형조직, 재결정 거동과 이차상의 분포를 관찰하였다. 또한 EBSD 분석을 통해 결정방위 분포, 기저면 집합조직 강도, 결정립 내 방위차 및 국부 변형 정도를 평가하였으며, RD 방향 인장시험을 통해 강도와 연신율의 변화를 비교하였다. 중간 열처리는 압연 중 축적된 변형을 완화하고 재결정을 유도하여 기저집합조직의 강도와 분포를 변화시켰으며, 이후 추가 압연 과정에서 미세조직과 집합조직이 다시 발달하는 거동을 나타냈다. 특히 세분화된 열처리 조건에 따라 재결정 정도와 잔류 변형량이 달라졌으며, 이는 후속 압연 안정성과 기계적 특성에 영향을 미쳤다. 본 연구를 통해 ZX 합금 박판의 단계적 압연에서 중간 열처리 조건이 조직 및 특성 제어에 미치는 영향을 규명하고, 안정적인 박판 제조를 위한 공정 설계 방향을 제시하고자 한다.

[마그네슘1-5 | 10:00]

Effect of Cooling Rate on Microstructural Evolution and Hydrogen Storage Properties of Mg-Ni Alloys: Do-Hyeon Kim(Korea Institute of Materials Science, Kyungpook National Univ.), Ye-Rin Jang(Korea Institute of Materials Science, Changwon National Univ.), Tae-Yeol Choi(Korea Institute of Materials Science, Pusan National Univ.), Young Min Kim(Korea Institute of Materials Science), Sung Hyuk Park*(Kyungpook National Univ.), Byeong-Chan Suh*(Korea Institute of Materials Science)

Keywords: Magnesium alloys, Hydrogen storage alloys, Pressure-Composition-Temperature, Hydrogen absorption, Hydrogen desorption

The increasing penetration of renewable energy has led to frequent mismatches between energy supply and demand, highlighting the need for long-term energy storage technologies. Hydrogen has attracted considerable attention as a potential energy carrier for large-scale energy storage, and metal hydride-based hydrogen storage systems have been extensively investigated owing to their high volumetric storage density and improved safety compared with conventional compressed gas or liquid hydrogen storage methods. Mg and Mg_2Ni phases have been considered promising hydrogen storage materials because of their relatively high gravimetric hydrogen storage capacities, compared to conventional hydrogen storage alloys. In the present study, the effect of cooling rate on the microstructural evolution and hydrogen storage properties is systematically investigated in Mg-Ni alloys consisting of a-Mg and Mg_2Ni phases, which were fabricated via stepped-mold casting at different cooling rates and subsequently machined into chips.

[마그네슘2-1 | 10:25]

Mg **합금 압출재의 CNN 기반 결정립 크기 정량화 및 예측 신뢰성 평가**: 원윤정, 김가은, 임창동*(한국재료연구원)

Keywords: 결정립 크기 정량화, 마그네슘 합금, 합성곱 신경망, 예측 신뢰

광학현미경(optical microscopy, OM) 조직사진 기반 결정립 크기 평가는 금속재료의 미세조직 정량화에 널리 활용되며, 최근에는 측정 효율성과 재현성을 높이기 위해 합성곱 신경망(convolutional neural network, CNN) 기반 이미지 분석 기법이 적용되고 있다. 그러나 CNN 모델의 예측 성능은 학습 데이터의 결정립 크기 분포, 입력 이미지의 전처리 조건, 그리고 조직사진 내 결정립계 식별 정도에 따라 달라질 수 있다. 따라서 CNN 모델을 미세조직 정량화에 적용할 때에는 예측 정확도뿐 아니라 데이터 구성 및 이미지 조건에 따른 성능 변동성을 함께 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 Mg 합금 압출재의 OM 조직사진으로부터 평균 결정립 크기를 정량화하기 위해 ImageNet 사전학습 ResNet18 기반 CNN 회귀 모델을 구축하고, 결정립 크기 분포와 이미지 조건이 예측 성능 및 신뢰성에 미치는 영향을 평가하였다. 그 결과, 중간 크기 영역에 데이터가 집중된 데이터셋보다 결정립 크기 구간이 균일하게 구성된 데이터셋에서 보다 안정적인 예측 성능이 확인되었으며, 마스크 처리, 명암 대비 향상 및 선명화 처리에 따른 성능 개선 효과는 제한적이었다. 최종 원본 이미지 기반 모델은 테스트 데이터에서 MAE 1.60 μm, RMSE 2.14 μm, R2 0.963의 성능을 나타냈으며, 50-60 μm의 조대한 결정립 구간에서 가장 높은 오차와 예측 변동성이 확인되었다. 본 연구는 CNN 기반 OM 조직사진 분석에서 결정립 크기 분포, 입력 이미지 조건 및 결정립 크기 범위에 따른 오차 특성을 함께 고려해야 함을 보여준다.

[마그네슘2-2 | 10:40]

Loading-mode-dependent deformation and strain localization behavior of rolled AZ31 Mg alloy: Won Pyo Hong(Kyungpook Univ.), Jongbin Go(Tsukuba Univ.), Sung Hyuk Park*(Kyungpook Univ.)

Keywords: Rolled AZ31 alloy, Plastic anisotropy, {10-12} extension twin, Localized deformation band, Digital image correlation

Wrought Mg alloys exhibit pronounced plastic anisotropy at room temperature owing to their hexagonal close-packed crystal structure and strong crystallographic texture. Rolled Mg sheets generally develop a strong basal texture, with the c-axes of most grains preferentially aligned along the normal direction (ND). As a result, the dominant deformation mechanisms depend strongly on the loading mode relative to the crystallographic orientation. {10–12} extension twinning is readily activated under loading conditions that induce c-axis extension, whereas slip-mediated deformation becomes more dominant under c-axis contraction. Furthermore, even under c-axis extension, the activated twin variants can differ depending on whether the deformation is imposed by tension parallel to the c-axis or compression perpendicular to the c-axis, which may give rise to distinct strain-localization behavior. In this study, uniaxial tensile and compression tests were performed along the ND and rolling direction (RD) of rolled AZ31 Mg alloy to systematically vary the loading condition relative to the basal texture. Digital image correlation (DIC) was employed to characterize the evolution of full-field strain and strain-rate distributions during deformation. The DIC results were correlated with microstructural observations to clarify the relationship between loading-mode-dependent deformation mechanisms and macroscopic deformation heterogeneity. Particular emphasis was placed on the initiation, development, and propagation of localized deformation bands under different loading conditions.

[마그네슘2-3 | 10:55]

Mg-Gd 합금 판재의 미세조직 제어에 따른 기계적 특성 및 전자기파-중성자 차폐능 향상: 김경택, 김성제, 강민혁, 이상봉*(국립금오공과대학교)

Keywords: Mg-Gd Alloy, Microstructure, Shielding effectiveness, Electromagnetic wave, Radiation shielding

정보기술의 급속한 발전과 함께 첨단 전자기기의 활용이 무인항공기 및 자율주행 등 다양한 분야에서 중요해지고 있다. 특히 고고도 유무인 비행체, 군사용 정찰위성 등은 필연적으로 중성자를 포함한 우주방사선에 상대적으로 높은 피폭량을 나타내며, 한 개의 중성자 입자로 인하여 전자장치의 파괴를 가져오는 단일사건효과(single event effect)와 같은 위험에 노출되어 있다. 따라서 다수의 첨단 전자장비와 통신장치가 탑재된 항공우주 장치를 비롯해 무인드론의 안정적인 운용을 위해서는 전자기파와 중성자 동시 차폐가 가능한 다기능 복합 차폐소재의 개발이 필수적이다. Mg합금은 구조 용 금속 중 가장 낮은 밀도를 가지며, 높은 비강도, 우수한 진동 감쇠 특성과 더불어 뛰어난 전기전도도 및 전자기파 차폐능을 갖춘 것으로 알려져 있다. Mg에 중성자 흡수능이 매우 뛰어난 Gd를 합금화 함으로써 전자기파와 중성자를 동시에 차폐할 수 있는 초경량 차폐재의 개발이 가능하며, 본 연구에서는 판재 압연에 따른 미세조직 변화와 이에 따른 판재특성에 대하여 조사하였다. 압연된 판재의 미세조직과 시효처리에 따른 2차상 형성이 Mg-Gd 합금의 기계적 특성, 전자기파 및 중성자 차폐 효과에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

[마그네슘2-4 | 11:10]

Microstructural modification and enhanced fatigue properties of extruded AZ91 alloy through combined UNSM and subsequent aging treatment: Du Hyeon Woo, Je Hyeong An, Sung Hyuk Park*(Kyungpook National Univ.)

Keywords: AZ91 alloy, Ultrasonic nanocrystalline surface modification, Age hardening, Surface microstructure, High-cycle fatigue

AZ91 magnesium alloy is a representative Mg–Al–Zn-based alloy with high specific strength and a pronounced age-hardening response associated with $Mg_{17}Al_{12}$ precipitation. However, its high-cycle fatigue (HCF) performance is strongly affected by surface-initiated fatigue cracking, making control of the near-surface microstructure and residual stress important for improving fatigue resistance. During aging, fine continuous precipitates (CPs) form within grains, whereas coarse discontinuous precipitates (DPs) develop as lamellar colonies along grain boundaries. Although $Mg_{17}Al_{12}$ precipitation contributes to strengthening, excessive DP formation can deteriorate tensile ductility. In this study, ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) followed by aging was applied to an extruded AZ91 magnesium alloy to modify the near-surface microstructure and enhance its HCF properties. Three conditions were investigated: as-extruded, UNSM, and UNSM + aged specimens. UNSM introduces microstructural refinement, high densities of dislocations and deformation twins, surface hardening, and compressive residual stress. During subsequent aging, these defects are expected to act as heterogeneous nucleation sites for CPs, thereby modifying near-surface precipitation behavior. Through comparative analyses of the microstructure, mechanical properties, and HCF behavior, this study evaluates the combined effects of UNSM-induced surface strengthening and aging-induced precipitation strengthening and clarifies their contributions to the fatigue performance of extruded AZ91 magnesium alloy.

[마그네슘2-5 | 11:25]

Interfacial Modification of Co-Extruded Pure Mg/AA6063 Clad Rods Using a Dip-Coated Mg–55Bi Interlayer: Seoung-yooun Yu, Gun Woong An, Sung Hyuk Park*(Kyungpook National University)

Keywords: Mg/Al clad rods, Mg–55Bi interlayer, Co-extrusion, Dip coating, Interfacial reactions

Mg/Al hybrid clad materials are promising for lightweight structural applications because they combine the low density of Mg with the favorable mechanical and corrosion properties of Al. However, direct contact between Mg and Al during co-extrusion can promote excessive interfacial reactions and the formation of brittle Mg–Al intermetallic compounds, thereby degrading interfacial integrity and mechanical performance. In this study, a Mg–55Bi alloy was introduced as an interlayer through a dip-coating process to modify the interface of pure Mg-core/AA6063-sleeve clad rods. Pure Mg cores were immersed in molten Mg–55Bi alloy to form a surface coating and were subsequently assembled with AA6063 sleeves to fabricate composite billets. For comparison, composite billets without the Mg–55Bi interlayer were also prepared. The coated and uncoated billets were co-extruded under identical conditions to produce Mg/Al clad rods and to isolate the effect of interlayer insertion. The fabricated clad rods were comparatively evaluated in terms of macroscopic bonding quality, interfacial layer morphology and thickness, phase constitution, elemental diffusion behavior, and defect formation. Microstructural and compositional analyses, microhardness measurements, and mechanical tests sensitive to interfacial bonding strength were employed to clarify the role of the dip-coated Mg–55Bi interlayer in controlling interfacial reactions and the resulting mechanical properties.

[마그네슘3-1 | 13:30]

Effect of T5 heat treatment on microstructure and high-cycle fatigue properties of extruded Mg–8Al–3Zn–0.2Mn–0.3Ca–0.2Y alloy: Je Hyeong An(Kyungpook National University), Joung Sik Suh(Korea Institute of Materials Science), Sung Hyuk Park*(Kyungpook National University)

Keywords: SEN magnesium alloy, Extrusion, T5 heat treatment, $Mg_{17}Al_{12}$ precipitation, High-cycle fatigue

Magnesium alloys are attractive for lightweight structural applications owing to their low density and high specific strength. However, high-Al Mg alloy extrudates often contain coarse $Mg_{17}Al_{12}$ particles and heterogeneous second-phase distributions, which can serve as

preferential sites for fatigue crack initiation. T5 heat treatment can promote the formation of fine $Mg_{17}Al_{12}$ precipitates through direct aging, potentially improving tensile and high-cycle fatigue (HCF) properties by precipitation strengthening and modification of second-phase characteristics. In this study, an extruded SEN alloy (Mg–8Al–3Zn–0.2Mn–0.3Ca–0.2Y, wt.%) was subjected to T5 heat treatment at 180 ºC to investigate the effects of aging-induced precipitation on its microstructure and mechanical properties. The resulting microstructural evolution, including grain morphology, crystallographic texture, and second-phase distribution, was systematically characterized. Room-temperature uniaxial tensile tests and stress-controlled HCF tests at a stress ratio of 0.1 were conducted along the extrusion direction. In addition, fatigue fracture surfaces and crack-initiation regions were examined to clarify the relationship between $Mg_{17}Al_{12}$ precipitation and fatigue behavior. This study is expected to provide useful insights into the design of post-extrusion aging treatment for achieving a favorable balance between tensile strength and fatigue resistance in high-Al SEN alloy extrudates.

[마그네슘3-2 | 13:45]

Al 및 Zn 함량이 Mg–Al–Zn–Mn–Ca–Y 합금 압출재의 물성에 미치는 영향: 황건호, 이민서(한국재료연구원, 고려대학교), 김재연, 서병찬, 이상은, 문병기(한국재료연구원), 김세호(고려대학교), 서종식*(한국재료연구원)

Keywords: 마그네슘 합금, 압출, 기계적 물성, 내식성

마그네슘 합금은 모빌리티 구조 부품의 경량화를 위한 유망한 소재이나, 낮은 강도와 부식 저항성으로 인해 적용에 한계가 있다. 본 연구에서는 Mg–Al–Zn–Mn–Ca–Y 합금 압출재를 대상으로 Al 및 Zn 함량 변화가 미세조직, 기계적 특성 및 내식성에 미치는 영향을 체계적으로 규명하였다. 특히 조성 변화에 따른 결정립 구조, 2차상 분포 및 집합조직 변화를 관찰하고, 물성 간의 상관관계를 고찰하였다. 이를 바탕으로 인장 특성과 내식성 간의 균형이 우수한 조성 영역을 탐색하였다. 본 연구 결과는 모빌리티 부품 적용을 위한 고강도·고내식 마그네슘 압출재의 최적 합금 및 공정 설계에 유용한 지침을 제공할 것으로 기대된다.

[마그네슘3-3 | 14:00]

Effect of Ca and Y co-addition and extrusion speed on microstructure and tensile properties of extruded AZ31 alloy plates: To Hai Ha Nguyen, Seoung Yooun , Gun Woong An, Sung Hyuk Park*(Kyungpook National Univ.)

Keywords: AZ31 alloy, Ca and Y co-addition, Plate extrusion, Extrusion speed, Microstructure, Tensile properties

The co-addition of minor amounts of Ca and Y has been reported to markedly improve the ignition and corrosion resistance of commercial AZ-series magnesium alloys and enhance the tensile properties of rod-shaped extrusions. However, these findings cannot be directly extended to plate extrusions because plate and rod extrusion involve different metal-flow characteristics and consequently develop distinct basal textures. Moreover, extrusion speed is directly related to manufacturing productivity and substantially influences dynamic recrystallization, grain structure, texture evolution, and mechanical properties. In this study, AZ31 and SEN3 (AZ31–0.5Ca–0.2Y, wt.%) alloys were directly extruded at 420 ºC with an extrusion ratio of 23:1 using ram speeds of 1 and 5 mm s^{-1}. The resulting plates were 23 mm wide and 6 mm thick. The effects of Ca–Y co-addition and extrusion speed were systematically evaluated in terms of grain size, recrystallized fraction, crystallographic texture, and tensile properties. Systematic comparisons between AZ31 and SEN3 extruded under identical conditions were conducted to distinguish the effect of Ca–Y co-addition from that of extrusion speed. The results clarify the individual and interactive effects of alloy composition and extrusion speed on the microstructural evolution and tensile behavior of extruded AZ31-based plates.

[마그네슘3-4 | 14:15]

Improved age-hardening response and mechanical properties of high-speed-extruded Mg–5Bi–3Al alloy through long-range water-cooling system: Gun Woong An, Seoung-yooun Yu(Kyungpook Univ.), Jeong Hong Ha(Korea Inst. Ind. Technol.), Sung Hyuk Park*(Kyungpook Univ.)

Keywords: Mg–Bi–Al alloy, High-speed extrusion, Water cooling, Age hardening, Precipitation strengthening

Mg–Bi-based alloys have recently emerged as promising candidates for high-speed extrusion because the formation of the thermally stable Mg_3Bi_2 phase enables crack-free extrusion even under severe processing conditions. Among these alloys, Mg–5Bi–3Al (BA53, wt.%) exhibits excellent extrudability and relatively high strength even at very high extrusion speeds. Despite these advantages, excessive heat generated during high-speed extrusion can promote the coarsening of dynamically recrystallized grains, which may deteriorate the mechanical properties of the extruded material. In addition, the thermal conditions during and after extrusion can significantly affect the dissolution and precipitation behavior of Mg_3Bi_2 particles. Therefore, controlling the post-extrusion cooling process is important for optimizing the microstructure and subsequent heat-treatment response of high-speed-extruded BA53 alloy. In this study, a long-range water-cooling system was applied immediately after the extrusion die exit to control the thermal conditions of the extruded material. The effects of the cooling system on the grain structure, secondary-phase distribution, and subsequent age-hardening behavior were systematically investigated. Annealing was also conducted to clarify the relationship between cooling-induced microstructural changes and precipitation strengthening. This study provides fundamental insights into an effective thermal-control strategy for improving the age-hardening response and mechanical properties of high-speed-extruded BA53 alloy while retaining its excellent extrudability.

나노융합소재
Room 1층 108호, 10월 30일

[나노1-1 | 08:30] 초청강연

Advanced Materials for Soft Energy Conversion Systems: Han Kim(Department of Mechanical Engineering, Tech University of Korea)

Keywords: Soft electronics, Bioinspired electronics, Energy harvesting, Printable electronics, Biointegrated sensing

Soft electronic technologies are enabling new approaches to energy harvesting, sensing, and human-machine interfaces for healthcare, wearable devices, and robotics. Unlike conventional rigid electronics, soft and compliant systems can conform to biological tissues, tolerate mechanical deformation, and support long-term operation in dynamic environments. In this talk, I will present my research on soft electronics, spanning bioinspired materials, printable energy devices, and biointegrated sensing systems. I will first introduce the emerging concept of virotronics, where viruses serve as genetically programmable nanoscale building blocks for piezoelectric, pyroelectric, and triboelectric energy harvesting. I will discuss how their highly ordered structures provide unique opportunities for sustainable and bioinspired electronic systems. Next, I will present our work on printable thermoelectric materials that enable room-temperature fabrication of flexible energy conversion devices through direct ink writing. By combining energy conversion, thermal sensing, mechanical flexibility, and repairability, these soft thermoelectric architectures offer new possibilities for wearable electronics, electronic skins, and self-powered sensing platforms. Finally, I will discuss our ongoing efforts in compliant mechanical sensing for the characterization of engineered cardiac tissues. By integrating soft strain sensing platforms with biological systems, these approaches enable quantitative monitoring of tissue contraction and mechanical function while maintaining compatibility with delicate and dynamic cellular environments. Through these examples, I will highlight how soft electronics can bridge bioinspired materials, additive manufacturing, energy harvesting, and biointerfaces to create next-generation technologies for healthcare and biomedical research.

[나노1-2 | 08:55]

Metal-based Electrochromism Application with Solvation Structure Control: 문천우*(순천향대학교)

Keywords: Solvation Structure, DMF, Metal Electrodeposition, Molecular Dynamics, Plasmonics, Smart Window

Electrochromism has received great attention due to the high relevance to the optical and/or thermal comfort of humans. As the bandgap-based applications are weak of absorption, metals could be a reasonable option due to their high optical extinction refractive index (k). In a practical application, there are property variations that are not fully understood. Currently adopted methods are mainly based on trial-and-error based methods. Herein, we designed an electrolyte based on dimethylformamide (DMF), a solvent with a melting point of −61 ^{o}C, that forms electrodeposits that are in a reflective state at room temperature (25 ^{o}C) and an absorbent state at low temperature (−30 ^{o}C) with proper solvation structure control. Fundamental corresponding optical principles are also analyzed with finite-difference time-domain (FDTD) electromagnetic simulations. Demonstration based on a model house, it is observed that an indoor temperature reduction of 5.5 ^{o}C/hour occurs in summer, and an indoor temperature increase of 11.5 ^{o}C/hour occurs in winter. This study has opened new horizons for the utilization of reversible metal electrodeposition (RME) dynamic windows through temperature-dependent optical state change in tinting with solvation structure control. To the best of our research team's knowledge, there have been no reported studies on dynamic windows that offer climate-adaptive tinting. Through this research, we can expect the commercial development of this more general-type dynamic window to be available.

[나노1-3 | 09:10]

Hidden Chemical Order in a High-Entropy Chalcogenide: Hyeuk Jin Han*(Sungshin Women's University)

Keywords: High-entropy chalcogenides, Chemical short-range order, Atomic-resolution STEM-EDS, Charge transport

Alloying typically lowers electrical conductivity by disrupting translational symmetry and introducing chemical-disorder scattering. This raises a fundamental question: what happens at the extreme limit of alloying, where many elements share a single crystal lattice? High-entropy alloys and compounds are commonly treated as random solid solutions and are therefore expected to exhibit strong disorder scattering. Yet materials assigned to the same random-alloy picture can show markedly different transport properties, suggesting that average composition and crystal symmetry are incomplete descriptors. Here, we investigate a nine-component rocksalt high-entropy chalcogenide that appears chemically random in conventional measurements. Atomic-resolution scanning transmission electron microscopy combined with time-resolved hyperspectral energy-dispersive X-ray spectroscopy instead reveals coherent chemical short-range order, including Cu-rich and Ge-rich columnar motifs. Crucially, these correlations progressively collapse under electron-beam exposure, accompanied by an increase in apparent chemical mixing. The random state recorded at the end of measurement therefore does not necessarily represent the pristine material but can be produced by the measurement itself. These findings challenge the fully random-alloy premise used to interpret transport in compositionally complex materials and identify metastable local order as a missing structural descriptor for understanding high-entropy transport.

[나노1-4 | 09:25]

Size- and Morphology-Dependent Melting-Point Depression in Chemically Recovered Spiky Au Mesoparticles: Jieun Lee, Minkyung Kwak, Jiyoung Kim, Hyungi Min, Eunsoo Park*(Seoul National University)

Keywords: Spiky Au mesoparticles, Melting-point depression, Multiscale size and morphology, Fast Differential Scanning Calorimetry

Gold particles with reduced dimensions can exhibit melting-point depression relative to bulk materials. While this behavior is well established for nanoparticles, its occurrence in mesoparticles combining microscale overall dimensions with nanoscale surface features remains insufficiently understood. In this study, high-purity Au was chemically recovered from dental gold inlay alloys to produce spiky mesoparticles with branched, high-curvature surface features. Their thermal evolution was investigated through heat-treatment-induced changes in morphology and color, differential scanning calorimetry, and electron microscopy. Despite their micrometer-scale overall size, the particles exhibited unusual thermal behavior, including an apparent melting-point depression. Scanning and transmission electron microscopy revealed numerous nanoscale tips, edges, and branch junctions, suggesting an increased fraction of low-coordination atomic sites. The coexistence of microscale particle dimensions and nanoscale surface features may reduce local cohesive stability and promote surface disordering, potentially followed by localized melting at high-curvature features. Fast differential scanning calorimetry measurements at multiple heating rates are underway to examine the heating-rate dependence of the observed thermal transition. The resulting data will be used to assess whether the transition behavior is consistent with size- and morphology-related melting-point depression and whether kinetic effects require further consideration.

[나노1-5 | 09:40] [Canceled]

이종 금속 치환을 이용한 비Ti계 MAX/MXene의 구조 안정화 및 에칭 거동: 이도연, 송재민, 김은채, 장민서, 권한중*(전북대학교)

[나노2-1 | 10:05] 초청강연

Recent Advances and Emerging Trends in Halide Perovskite-Based Resistive Switching Memory Devices: Hyojung Kim(Sejong University)

Keywords: Halide Perovskites, Resistive Switching Memory, Memristor, Ionic Migration, Neuromorphic Computing

Halide perovskites (HPs) have attracted significant attention as promising materials for next-generation resistive switching memory due to their excellent optoelectronic properties, defect tolerance, solution processability, and mobile ionic species. The migration of halide ions and vacancies under an electric field enables reversible modulation of conductive pathways and interfacial barriers, resulting in resistive switching and multilevel memory operation. Recent studies have expanded from conventional three-dimensional perovskites to two-dimensional and low-dimensional structures, lead-free compositions, and defect and interface engineering to improve stability, endurance, and switching uniformity. Furthermore, the coupled ionic–electronic dynamics of HPs enable multistate conductance modulation and synaptic plasticity, extending their applications toward artificial synapses and neuromorphic computing. This review summarizes recent advances in HP-based resistive switching memory, focusing on material compositions, device architectures, switching mechanisms, and key performance characteristics, while discussing remaining challenges and future prospects for practical nonvolatile memory and neuromorphic applications.

[나노2-2 | 10:30]

Solution-Processable Two-Dimensional VO_2 Nanosheets for Large-Area Flexible Thermochromic Smart Windows: Jin Kim*(국립한밭대학교)

Keywords: Vanadium dioxide, Two-dimensional nanosheets, Thermochromism, Flexible smart windows, Spray coating

A substantial portion of building energy consumption is associated with maintaining comfortable indoor temperatures, with considerable heat gain and loss occurring through windows. Smart windows that dynamically regulate solar transmission in response to environmental temperature offer a promising approach to reducing such energy losses. Among the thermochromic materials investigated for this purpose, vanadium dioxide (VO_2) has attracted considerable interest because of its reversible, temperature-driven phase transition. At approximately 68 ºC, VO_2 undergoes a transition from a low-temperature monoclinic phase to a high-temperature rutile phase, accompanied by a pronounced change in its near-infrared (NIR) optical properties. The monoclinic phase is relatively transparent to NIR radiation, whereas the rutile phase effectively suppresses NIR transmission. However, conventional methods for fabricating crystalline VO_2 films, including chemical vapor deposition, magnetron sputtering, and molecular beam epitaxy, generally require high-vacuum environments and elevated processing temperatures. These requirements restrict the choice of substrates and make it difficult to fabricate thermochromic coatings on flexible, curved, or geometrically complex surfaces. Here, we present a template-assisted strategy for producing highly crystalline VO_2 nanosheets with a high aspect ratio using two-dimensional V_2CT_x MXene as a precursor. Through a straightforward thermal annealing process, V_2CT_x nanosheets were directly transformed into monoclinic VO_2 nanosheets while retaining their large lateral dimensions and ultrathin thickness of less than 10 nm. The resulting VO_2 nanosheets were readily dispersed in solution and deposited over large areas by spray coating, forming continuous and densely packed thin films. The closely stacked two-

dimensional structure facilitated efficient thermally induced phase transition, reduced optical scattering, and provided excellent mechanical flexibility. Consequently, the VO_2 nanosheet films exhibited strong thermochromic performance, including an NIR switching modulation of 62.2%, a luminous transmittance (T_lum) of 45.7%, and a solar modulation ability (ΔT_sol) of 16.9%. Furthermore, flexible and large-area thermochromic smart windows were successfully demonstrated, highlighting their potential for integration onto curved and deformable surfaces. This work introduces a scalable solution-based route to high-aspect-ratio monoclinic VO_2 nanosheets and provides a practical platform for next-generation thermochromic coatings and energy-efficient smart windows.

[나노2-3 | 10:45

Rationally designed graphene channels for real-time sodium ion detection for electronic tongue: LEE CHUNGWON*(한양대학교)

Keywords: 그래핀, 이온센서, 칼릭사레인, 소듐

Continuous monitoring of taste-inducing ions and molecules in liquid solutions is critical for advancing electronic tongue (E-tongue) technology. Among the five basic tastes, real-time detection of sodium ions (Na+) with high selectivity and sensitivity is paramount, given that saltiness is a fundamental flavor component in most foods. However, conventional Na+ detection devices suffer from limited selectivity and sensitivity, lack dynamic on–off capabilities, and experience performance degradation caused by repeated use or material deterioration over time. To overcome these limitations, we developed a graphene-based channel rationally functionalized with Calix[4]arene as a selective receptor and Nafion as a molecular sieve. This functional design significantly enhances both selectivity and sensitivity while extending the operational lifespan of the sensor. Furthermore, integrating the device with a microfluidic channel enables controlled solution injection and withdrawal, facilitating dynamic on–off switching. The resulting sensor demonstrates exceptional selectivity and sensitivity toward Na+ over ten other interfering ionic and molecular species, alongside dynamic switching functionality and a long operational lifespan exceeding 220 days. The device also successfully distinguishes real beverages based on their Na+ content, as confirmed by principal component analysis (PCA). These capabilities highlight the potential of this platform for future E-tongue applications.

[나노2-4 | 11:00]

차세대 EUV 펠리클용 그래핀-탄소나노튜브 복합 멤브레인의 기계적 특성 및 수소 플라즈마 보호층에 따른 화학적 안정성: 전세훈, 우윤성*(단국대학교)

Keywords: 그래핀, 탄소나노튜브, EUV 펠리클

반도체 리소그래피 공정이 극자외선 파장대로 발전함에 따라, 고전력 환경에서 포토마스크를 오염으로부터 보호하기 위한 펠리클의 중요성이 지속적으로 커지고 있다. 기존 poly-Si 펠리클의 열적, 기계적 한계를 극복하기 위해 우수한 물성을 가진 그래핀 및 탄소나노튜브가 차세대 소재로 주목받고 있으나, 실제 EUV scanner 환경에서 발생하는 수소 이온 및 라디칼에 의한 식각 문제가 반드시 해결해야할 과제로 남아있다. 이에 본 연구에서는 그래핀의 직접 합성 또는 전사 공정을 통해 그래핀-CNT 하이브리드 박막과 멤브레인을 제작하고, AFM 나노인덴테이션과 벌지 테스트를 이용하여 기계적 특성을 교차 분석하였다. 분석 결과, 그래핀-CNT 하이브리드 구조는 단일 소재 대비 더욱 향상된 강도를 나타냈고 전사 공정을 통해 제작된 그래핀-CNT 하이브리드 멤브레인이 5.81배 증가된 압력에서 파손 없이 형태를 유지함을 확인하였다. 이후 수소 플라즈마 환경에서 발생하는 식각 손상을 억제하기 위해, 전사 공정으로 제작된 그래핀-CNT 하이브리드 박막 위에 RF 스퍼터링을 이용하여 5 nm 두께의 Mo_2C 보호층을 증착하였고 수소 라디칼 노출 전후의 구조적 결함 변화를 라만 분광법을 통해 분석했다. 분석 결과, 60분간 수소 라디칼에 노출되었을 때 보호층이 없는 그래핀-CNT 박막은 결함 밀도를 나타내는 I_D/I_G 비율이 초기 대비 8.8배 급격히 증가한 반면, Mo_2C 보호층이 적용된 그래핀-CNT 박막은I_D/I_G 비율 증가폭이 1.8배로 억제되었다. 이를 통해 Mo_2C 보호층이 적용된 하이브리드 박막은 보호층이 없는 박막보다 동일한 노출 시간에서 구조적으로 안정성을 유지하는 것을 확인하였다. 결론적으로, Mo_2C 보호층이 적용된 그래핀-CNT 하이브리드 멤브레인은 우수한 기계적 안정성과 수소 플라즈마 내성을 동시에 확보하여 차세대 EUV 펠리클 소재로서 높은 활용 가능성을 갖는다.

[나노2-5 | 11:15]

Large-area, Single-crystal Twisted Bilayer Graphene Grown on Ni(111): Yongqiang Meng, Alisher sultangaziyev(Ulsan university of science and technology (UNIST), Institute for Basic Science (IBS)), Won Kyung Seong*, Rodney S. Ruoff*(Institute for Basic Science (IBS))

Keywords: Twisted bilayer, single crystal, CVD graphene, Ni(111)

Twisted bilayer graphene has emerged as a promising platform for exploring moiré physics and twist-angle-dependent electronic phenomena. In this presentation, we report the direct growth of large-area, single-crystal twisted bilayer graphene on Ni(111). The bilayer regions form directionally aligned, elongated domains with preferred in-plane orientations and exhibit spatially uniform Raman characteristics and well-defined moiré patterns. TEM and SAED analyses reveal a nearly uniform twist angle of approximately 25 °. Interrupted-growth experiments further suggest that the twisted second layer develops concurrently with the monolayer graphene, rather than forming only after complete monolayer coverage. These findings demonstrate the potential of Ni(111) as a platform for the controlled growth of macroscopic twisted bilayer graphene domains.

[나노2-6 | 11:30]

Asymmetric Dielectric Response in Twisted Trilayer WSe_2: Byunghyun Kim(Seoul National University), Daesung Park(Seoul National University, Sogang University), Siwon Jeong(Sogang University), Chiranjit Mondal(Seoul National University), Hyun-Mi Kim(Korea Electronics Technology Institute), Hajung Jang, June Hee Shin(Sogang University), Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi(National Institute for Materials Science), Sang Mo Yang, Hyeonsik Cheong(Sogang University), Bohm Jung Yang, Hyobin Yoo*(Seoul National University)

Keywords: Moiré superlattices, Twisted trilayer TMDs, Asymmetric dielectric response, Operando TEM

Interfacial stacking is a central structural degree of freedom in van der Waals materials, determining how atomic reconstruction, symmetry breaking, and material properties emerge at layered interfaces. Twisted bilayer transition metal dichalcogenides provide a model platform in which two symmetry-related stacking domains form a moiré domain lattice and carry opposite out-of-plane polarizations. This structural degeneracy gives rise to nearly symmetric field-driven domain-wall motion and a corresponding antiferroelectric-like dielectric response. In multilayer moiré systems, however, additional interfaces can qualitatively alter this picture, creating competing low-energy stacking configurations that are not symmetry-equivalent. How these non-degenerate stacking configurations govern field-driven domain dynamics, and thereby determine the dielectric response, remains largely unexplored. Here, we use operando transmission electron microscopy to directly visualize field-driven domain dynamics in twisted trilayer WSe_2. In contrast to twisted bilayers, twisted trilayer WSe_2 exhibit a pronounced asymmetry in their dielectric response, accompanied by distinct domain-wall dynamics under an applied electric field. Atomic-resolution imaging and theoretical analysis reveal the important role of polar domain walls and competing Bernal and rhombohedral stacking orders in governing the dielectric response. Our results establish a direct connection between interfacial stackings and dielectric functionality, highlighting new opportunities for controlling emergent responses in twisted multilayer materials.

전산재료과학
Room 2층 201호, 10월 30일

[전산1-1 | 08:30] 초청강연

Symmetry-Resolved d-p Coupling Regulates Sulfur Redox Reactions in Room-Temperature Na-S Battery: Hyuk Choi(Jeonbuk National University, Nanyang Technological University), Shuzhou*(Nanyang Technological University)

Keywords: Symmetry-resolved orbital interaction, Single-Atom Catalysts, d-p orbital interaction, Sodium-Sulfur battery (SSB)

Sulfur redox reactions in room-temperature sodium-sulfur batteries proceed through complex multistep conversion pathways, strongly governed by electronic interactions between catalysts and sodium polysulfides(NaPSs). However, the role of specific orbital-directional interactions in determining both binding thermodynamics and overall reaction kinetics remains insufficiently understood. Here, we employ transition-metal single-atom catalysts (M–N_4–C, M = Mn, Fe, Co, Ni) as model systems to correlate sulfur conversion reactivity with the occupancy and accessibility of the out-of-plane z-directional d orbitals(dz = d_{z2}, d_{xz}, and d_{yz}), which regulate the d–p coupling strength. Mn–N_4-C exhibits the lowest d_z occupancy and the strongest d–p hybridization with NaPSs. Such electronic interaction leads to a more than twofold enhancement in the binding energy of NaPSs compared to Ni-N_4-C, which has the highest dz occupancy. Moreover, the activation barrier is significantly reduced from 1.36 eV on Ni-N_4-C to 0.50 eV at the rate-determining step along the reaction pathway. This study provides insight into establishing the symmetry-resolved d_z-orbital-state-dependent electronic coupling as a crucial design principle for developing high-performance catalysts for next-generation sodium–sulfur batteries.

[전산1-2 | 08:55]

Bifurcation of COOH Pathway Determines HCOOH Formation in CO2 Electroreduction on Bismuth: Hyun Dong Jung(Sogang Univ.), Seoin Back*(Korea Univ.)

Keywords: DFT, CO2RR, AIMD, Reaction Mechanism

Bismuth (Bi) is a promising electrocatalyst for the CO2 reduction reaction (CO2RR) to formic acid (HCOOH), yet its mechanism remains a subject of debate. While the pathway involving the oxygen-bound *OCHO intermediate is conventionally accepted, experimentally observed carbon-bound species have been largely overlooked. In this work, we resolve this mechanistic ambiguity by combining constant-potential ab initio molecular dynamics (AIMD) simulations with spectroscopic evidence. We reveal that the reaction on Bi is governed by the bifurcation of the *COOH pathway, which favors HCOOH formation over CO. We also identify an *H-mediated pathway as an alternative route at low potentials where *CO2 activation is suppressed. Supported by the experimental detection of *COOH, our findings suggest that this mechanism is likely a general feature across other metal surfaces, such as Ag, Cu, and In. Consequently, we bring the *COOH-mediated mechanism to the forefront of HCOOH production, highlighting the need to consider this pathway in the rational design of future HCOOH-selective electrocatalysts.

[전산1-3 | 09:10]

Many-Body Effects on the Coverage-Dependent CO Adsorption on Cu(111): Seungchang Han, Stefan Ringe*(Korea University)

Keywords: CO adsorption, CO puzzle, Random phase approximation, Multi-fidelity machine learning, Monte Carlo sampling

Carbon monoxide (CO) adsorption on copper strongly affects product selectivity in electrochemical CO_2 reduction, yet its adsorption energetics remain sensitive to the level of electronic-structure theory used. Semi-local density functional theory is commonly applied to these intermediates, but its predictions can depend on error cancellation, making the relative stability of adsorption sites and their coverage dependence uncertain. Here, we examine CO adsorption on Cu(111) using the random phase approximation (RPA) for a range of adsorption configurations and coverages. We compare the resulting energetics with those from conventional generalized-gradient approximations (GGA), with particular focus on how many-body corrections change the relative stability of adsorption sites and their occupation as CO coverage increases. Direct RPA calculations over the full configurational space are computationally demanding. We therefore use a multi-fidelity machine-learning model that combines lower- and higher-fidelity electronic-structure data to construct the coverage-dependent adsorption landscape. Monte Carlo sampling of this landscape is then used to identify thermodynamically accessible surface configurations and determine how site populations evolve with coverage. We compare these predictions with available experimental observations to assess how well the many-body-informed model describes CO-covered Cu(111). The results clarify how beyond-GGA energetics alter the coverage-dependent distribution of adsorption sites and provide a practical route for incorporating higher-level electronic-structure methods into statistical sampling of catalytic interfaces relevant to electrochemical CO_2 reduction.

[전산1-4 | 09:25]

다중 에이전트 시스템을 활용한 자연어 추론 기반 단일 원자 촉매 설계: 목동현(서강대학교), 백서인*(고려대학교)

Keywords: 단일 원자 촉매, 대규모 언어 모델, 에이전트

대규모 언어 모델(LLM)은 자연어 처리를 넘어, 기존에는 인간의 전문성이 요구되던 복잡한 과학적 문제에서도 뛰어난 능력을 보

이며 점차 활용 범위를 넓혀가고 있다. 이러한 발전은 소재 탐색 분야로도 확장되고 있으며, LLM은 기존 머신러닝에는 없던 추론 및 맥락 내 학습 (in-context learning)능력을 활용하여 새로운 소재 설계 패러다임을 제시한다. 본 연구에서는 여러 LLM이 서로 다른 전문 역할을 맡아 협력적으로 산소 환원 반응용 고성능 단원자 촉매를 탐색하는 MAESTRO (Multi Agent-based Electrocatalyst Search Through Reasoning and Optimization) 프레임워크를 제안한다. 자율적인 설계 루프 내에서 각 에이전트는 반복적으로 추론하고, 구조 변형을 제안하며, 결과를 검토하고 설계 이력을 축적한다. 이러한 반복 과정에서 이루어지는 맥락 내 학습을 통해 MAESTRO는 촉매 설계 원리를 발견했으며, 기존의 반응 중간체 간 스케일링 관계를 깨는 촉매를 성공적으로 탐색하였다. 본 결과는 다중 에이전트 LLM 프레임워크가 화학적 통찰을 도출하고 유망한 촉매를 발견하는 전략이 될 수 있음을 보여준다.

[전산1-5 | 09:40]

Motif-Based Discovery of Amorphous Solid Electrolytes with Design Principles from Void Topology and Anion Chemistry: Chihun Kim(Korea Institute of Science and Technology, Korea University), Taihoon Kim(Korea Institute of Science and Technology, Hanyang University), Hyun-Jae Lee(Korea Institute of Science and Technology), Yong-Mook Kang(Korea University), Byungju Lee*(Korea Institute of Science and Technology)

Keywords: Solid elctroylte, Amorphous, Simulation

Amorphous solid electrolytes have attracted considerable attention for all-solid-state batteries owing to their mechanical compliance, isotropic ion transport, and broad compositional tunability. However, the discovery of high-performance amorphous ion conductors remains challenging because the enormous compositional space demands extensive experimental trial-and-error, while the atomistic modeling of structurally disordered materials is computationally demanding. Here, we develop a motif-based computational framework that generates chemically realistic amorphous structures from predominant local coordination motifs statistically extracted from crystalline compounds and combines it with machine-learned interatomic potential-based molecular dynamics simulations to investigate a broad ternary Li–M–X chemical space. Screening identifies 15 promising solid electrolytes exhibiting room-temperature ionic conductivities exceeding 10^{-2} S/cm together with Young's modulus below 30 GPa. Beyond candidate discovery, we identify a normalized void-size descriptor, λ, that establishes a robust structure–transport correlation and enables rational identification of the optimal density for maximizing ionic diffusivity across diverse amorphous chemistries. Furthermore, systematic analysis reveals clear anion-dependent trends in mechanical property, ionic diffusion, and electrochemical stability, providing physically interpretable design principles for the rational discovery and optimization of next-generation amorphous solid electrolytes

[전산1-6 | 09:55]

Machine-Learned Molecular Dynamics of High-Entropy Electrolytes via Local Motif Preserving Reconstruction: UN HWAN LEE, Joonhee Kang*(부산대학교)

Keywords: Machine Learning Interatomic Potential, High Entropy Electrolyte

High-entropy electrolytes contain diverse and dynamically heterogeneous Li-ion solvation environments that are difficult to represent using conventional small periodic cells. Here, we introduce local motif preserving reconstruction (LMPR), a data-generation strategy for machine-learned interatomic potentials. Molecule-complete Li-centered environments are extracted from large-cell molecular dynamincs simulations, grouped and selected according to composition and structural similarity, and reconstructued as charge-neutral periodic cells for density functional theory labeling. Fine-tuning a MACE foundation model with the resulting dataset improves overall accuracy across molecular and electrolyte benchmarks compared with both the pretrained model and conventional small-cell fine-tuining. The resulting potential enables nanosecond-scale simulations of high-entropy electrolytes containing approximately 20, 000 atoms, providing a scalable computational framework for investigating solvation structures and ion-transport behavior at the atomic scale

[전산2-1 | 10:20] 초청강연

다중물리 해석과 데이터 기반 소재 설계를 통한 차세대 이차전지 개발: 김형준*(강원대학교)

Keywords: 이차전지, 멀티스케일 해석, 데이터 기반 소재 설계

지속 가능한 에너지 기술로의 전환과 모빌리티의 전동화가 가속화됨에 따라 고성능 이차전지는 미래 에너지 인프라의 핵심 요소로 자리 잡고 있다. 그러나 이차전지의 성능과 열화는 다양한 길이 척도에서 발생하는 복합적인 다중물리 현상에 의해 좌우되므로, 기존의 시행착오 중심 개발 방식만으로는 차세대 전지 소재를 효율적으로 개발하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 다중물리 시뮬레이션, 고속 대량 계산 및 인공지능을 통합한 계산 주도형 소재 설계 체계를 구축하여 첨단 이차전지 소재의 탐색과 최적화를 가속화하고자 한다. 먼저, 밀도범함수이론에서 유한요소해석까지 연계한 다차원 분석을 통해 양극 소재의 열화 메커니즘을 규명하였다. 분석 결과, 일차입자 내부의 이방성 구조 왜곡과 이차입자 수준의 결정학적 불정렬은 공간적으로 불균일한 응력 분포를 유발하며, 이는 기계적 손상과 용량 감소로 이어질 수 있음을 확인하였다. 이러한 기계론적 이해를 바탕으로 방사형 배향 제어를 비롯한 입자 수준의 설계 전략을 제안하여 이온 수송 특성과 구조적 내구성을 동시에 향상시키고자 하였다. 다음으로, 고속 대량 스크리닝과 설명 가능한 기계학습을 결합하여 에너지 저장 소재의 새로운 화학 조성 공간을 탐색하였다. Open Quantum Materials Database 분석을 통해 변형 에너지가 이종 음이온 화합물의 용해도와 안정성을 결정하는 주요 인자임을 규명하였다. 이를 바탕으로 국소 자유부피를 조절하여 차세대 황산화물 소재를 안정화하는 전략을 제시하였다. 마지막으로, 대규모 언어 모델 임베딩과 검색 증강 생성을 결합한

자율형 소재 분석 체계를 제안하였다. 이 접근법은 대규모 모델 학습이나 미세조정 없이도 물성을 신속하게 예측할 수 있어 계산 비용을 낮추면서 예측 정확도를 향상시킨다. 제안된 체계는 원자 수준의 이해, 중간척도 열화 분석 및 데이터 기반 소재 탐색을 유기적으로 연결함으로써 고성능 이차전지의 합리적 설계를 위한 폐쇄루프형 플랫폼을 제공한다.

[전산2-2 | 10:45]

제일원리계산 및 Graph-Based Explainable AI를 활용한 지속가능한 리튬이온전지용 유기 양극재의 구조 설계 전략: 구준형, 김현, 김창훈, 신효경, 이동화*(포항공과대학교)

Keywords: DFT, ML, AI, explainable AI, organic cathode, structure design

탄소 배출이 지구온난화에 미치는 영향이 지속적으로 증가함에 따라, 유기물로 구성된 지속가능한 리튬이온전지 양극재에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한, 유기 소재는 유연한 구조 설계가 가능하여 양극 특성을 비교적 용이하게 조절할 수 있다는 장점을 가진다. 이러한 장점을 바탕으로 광범위한 구조 공간에서 새로운 소재를 탐색하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 최근에는 물성 예측을 가속하고 새로운 소재를 제안하기 위해 다양한 machine learning (ML) 기법이 활용되고 있다. 이러한 연구들은 방대한 구조 공간에서 새로운 후보 소재를 효과적으로 screening하는 데 성공하였으나, ML 모델의 black-box 특성으로 인해 분자 구조가 물성에 미치는 영향을 해석하는 데에는 한계가 있었다. 단순한 소재 screening을 넘어, 전기화학적 성능을 조절하기 위한 구조 설계 전략을 도출하는 것은 새로운 양극 소재의 설계에 중요한 insight를 제공할 수 있다. 본 연구에서는 first-principles calculations를 통해 생성된 데이터를 explainable AI (XAI) 및 통계적 기법으로 분석함으로써 유기 양극재의 물성을 조절하기 위한 구조 설계 전략을 제안하였다. 전압(voltage), 용량(capacity), 비에너지(specific energy), 그리고 전압 감소(voltage slope)를 예측하기 위한 graph neural network (GNN) 모델을 구축하고, graph-based XAI를 이용하여 이를 분석하였다. 이후 XAI 결과에 대한 통계적 분석을 통해 각 물성에 긍정적인 영향을 미치는 motif인 positive effect motif (P-motif)와 부정적인 영향을 미치는 negative effect motif (N-motif)를 규명하고, 이를 기반으로 유기 양극재의 물성을 최적화하기 위한 구조 설계 전략을 제안하였다. 분석 결과, 도출된 motif에는 기존 연구에서 물성에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려진 구조뿐만 아니라, 본 연구를 통해 새롭게 발견된 주요 motif 또한 포함되어 있음을 확인하였다. 본 연구는 graph-based XAI 분석이 복잡한 구조-물성 관계를 이해하고 이를 구조 설계 전략으로 연결하는 데 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준다. 또한, 본 방법론은 촉매 및 redox flow battery와 같은 다른 소재 분야에도 확장 적용될 수 있으며, 아직 밝혀지지 않은 구조-물성 관계를 규명하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[전산2-3 | 11:00]

생성형 인공지능과 이중 루프 능동 학습을 활용한 전해질 첨가제 발견: 장호연(서강대학교), 백서인*(고려대학교)

Keywords: 리튬 이온 배터리, 전해질 첨가제, 생성형 AI, 능동학습

리튬 금속 전지는 차세대 에너지 저장 장치로 주목받고 있지만, 계면 불안정성과 리튬 덴드라이트 성장 문제로 인해 상용화에 어려움을 겪고 있습니다. 전해질 첨가제는 견고한 고체 전해질 계면 (SEI)을 형성하는 데 매우 효과적이지만, 밀도 범함수 이론 (DFT)에만 의존하여 방대한 화학적 공간에서 최적의 후보 물질을 찾는 것은 계산 비용이 지나치게 많이 듭니다. 본 연구에서는 이중 루프 능동 학습 (dual-loop active learning) 아키텍처를 통해 BERT 기반의 예측 모델 (predictive model)과 GPT-2 기반의 생성 에이전트를 통합한 데이터 기반 생성형 AI 프레임워크인 ASTRA (Advanced Solvation Transformer for Rational Additives)를 제안합니다. 이 프레임워크는 두 가지 루프를 통해 시너지 효과를 내며 작동합니다. 내부 루프 (inner loop)는 다목적 보상 함수의 유도에 따라 생성 최적화를 수행하며, 외부 루프 (outer loop)에서는 높은 보상을 얻은 후보 물질들을 DFT로 검증하여 예측 모델을 지속적으로 업데이트하고 개선합니다. 견고한 LiF-Li3N 복합 SEI 층 형성을 목표로 $LiPF_6$ / EC / EMC 전지 시스템에 ASTRA를 적용한 결과, 우리는 생성된 분자 공간을 목표 열역학 및 전기화학적 범위 (LUMO 및 결합 에너지, E_b)로 성공적으로 유도할 수 있었습니다. 이를 전기화학 전문가 역할을 하는 대형 언어 모델 (LLM) 에이전트 (Gemma-4)와 결합하여, 생성된 90, 000개의 분자를 체계적으로 필터링하고 유망한 첨가제 후보 3개를 선별해 냈습니다. 제일원리 기반 분자 동역학 (SG-AIMD) 시뮬레이션을 통해 확인한 결과, 이 후보 물질들은 기존의 상용 첨가제 FEC와 비교해 훨씬 더 강한 리튬 이온 친화력(-0.90 ~ -0.97 eV 범위의 E_b)과 낮은 LUMO 준위를 나타내어, 우선적인 환원과 동적으로 안정적인 용매화 환경을 가능하게 했습니다. 본 연구는 새로운 고성능 첨가제를 발굴해 냈을 뿐만 아니라, 차세대 에너지 소재의 AI 기반 탐색을 위한 확장 가능하고 합리적인 방법론을 제시합니다.

[전산2-4 | 11:15]

Active Learning-Based Fine-Tuning of Foundation MLIPs for Polymer and Polymer–Metal Interface Systems: HUIYEOL LEE, JOONHEE KNAG*(Pusan National Univ.)

Keywords: MLIP, DFT, MD

Machine learning interatomic potentials (MLIPs) combine quantum-mechanical accuracy with the efficiency of classical MD, but foundation models often lose accuracy in system-specific local environments, requiring fine-tuning. Here, we develop an iterative fine-tuning pipeline that couples MD sampling with active learning to adapt a MACE foundation model. Structures selected from MD trajectories are labeled via DFT and sequentially added to training, enabling DFT-level accuracy while efficiently reducing predictive uncertainty. The pipeline is validated on bulk polymer systems, then extended to films, surfaces, and finally polymer–metal interfaces to predict structural and dynamic behavior via MD. This work shows that active-learning-based fine-tuning effectively bridges the generality of foundation MLIPs and DFT-level, system-specific accuracy, offering a predictive atomistic framework for complex polymer–metal interface systems.

[전산2-5 | 11:30]

희소상을 포함하는 다상 알루미늄 합금의 농도장 기반 대표체적요소 생성: 박용욱, 차필령*, 김동욱, 장형욱(국민대학교)

Keywords: 통계체적요소, 대표체적요소, PFM 시뮬레이션, 잠재확산모델, 희소상

PFM 시뮬레이션은 계산 비용 때문에 전산 균질화가 요구하는 대표체적요소(RVE)보다 작은 도메인에 제한되며, 각 실현은 통계체적요소(SVE)에 머무른다. RVE 크기와 유효물성을 지배하는 부피분율 1% 수준의 희소상은 상 라벨 기반 생성에서 소실되기 쉽다. 본 연구는 AlMgCuZnSi 합금의 PFM SVE 앙상블 91장으로부터 RVE 크기의 미세조직을 합성·검증하는 파이프라인을 제시한다. 학습 표현을 연속 농도장으로 재정의해 희소상을 강한 조성 대비 신호로 보존하고, 무조건부 잠재 확산 모델과 MultiDiffusion 공동 디노이징으로 이음매 없는 5, 956 px(1.19 mm) 도메인을 합성해 U-Net으로 상 지도로 변환하였다. 생성물은 최소 RVE 크기(5, 484 px)를 상회하고, 15종 기술자 중 13개가 ±5% 이내로 일치하며 연결성·이음매 무결성·시드 간 독립성·비복제가 확인되어 통계적 대표성을 갖는 RVE로 판정되었다.

[전산2-6 | 11:45]

Charge-aware machine-learning molecular dynamics with dynamic Born effective charges for field-driven ferroelectric switching: Junsoo Lee(Korea Advanced Institute of Science and Technology), Sang Woo Park(Pohang University of Science and Technology), Ki-Ha Hong(Hanbat National University), Hyungjun Kim*(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

Keywords: Machine-learning interatomic potential, Ferroelectric material

Simulating field-driven ferroelectric switching with machine-learning molecular dynamics (ML-MD) hinges on how the external field couples to the lattice: through the per-ion force set by the Born effective-charge tensor multiplied by the external electric field. State-of-the-art ML-MD applies this force method with frozen Born effective charges at static DFT values, which decouples the charge response from the dynamics and discards the charge redistribution that accompanies bond reorganization during switching. A predictive description instead requires the charges, polarization, and Born tensors to be recomputed self-consistently as the structure evolves. We present an ML-MD framework built to meet this requirement. A MACE message-passing backbone supplies medium-range atomic descriptors to an environment-dependent charge-equilibration (QEq) model; the cell polarization is assembled from the equilibrated charges together with learned atomic dipoles, and the full Born effective-charge tensors are obtained directly by automatic differentiation. Charges and Z* are therefore evaluated at every MD step, so the field coupling itself responds to the instantaneous, environment-dependent charge state. Applied to wurtzite $Al_{1-x}Sc_xN$, the framework reproduces the established switching phenomenology — composition-dependent coercive fields, nucleation-limited (Merz-law) kinetics, and domain-wall-mediated reversal — while resolving the switching-induced charge redistribution that fixed-charge ML-MD omits. The result is a transferable, physically complete recipe for charge-aware, field-driven molecular dynamics of ferroelectrics, closing the gap between fixed-charge ML-MD and the true coupled charge–lattice dynamics of polarization switching.

[전산3-1 | 13:30] 초청강연

Layer-Stacking-Induced Symmetry Breaking and High Thermoelectric Performance in Layered A-Zn-Bi (A = Rb, Cs) Zintl Compounds: A First-Principles Study: Aadil Fayaz Wani, Nirma Kumari, SuDong Park(Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)), Byungki Ryu*(Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), UST)

Keywords: thermoelectric, ZT, prediction, DFT, Boltzmann transport, Wigner transport

In this study, we systematically investigated the electronic and thermal transport properties of layered Zintl compounds A-Zn-Bi (A = Rb, Cs) with AA and AB stacking configurations based on first-principles calculations. The electronic transport properties were evaluated by calculating electron relaxation times arising from electron-phonon scattering and incorporating them into Boltzmann transport theory. Lattice thermal transport was analyzed using the linearized phonon Boltzmann transport equation based on phonon-phonon interactions, together with the Wigner transport equation, which accounts for both particle-like and wave-like phonon transport. The electronic structures, Fermi-surface topology, and electron relaxation times derived from electron-phonon interactions were only weakly affected by the AA or AB stacking configurations, resulting in comparable electrical transport properties. In contrast, the lattice thermal conductivity showed a strong dependence on stacking order. In the AB-stacked structures, stacking-induced symmetry breaking lifted phonon-mode degeneracies and substantially increased the three-phonon scattering phase space and lattice anharmonicity. Consequently, the lattice thermal conductivity of the AB-stacked structures was reduced by approximately 50% compared with that of the AA-stacked counterparts, reaching values below 1 W/m/K above 300 K. This selective suppression of thermal transport, without a significant degradation of electrical transport, enables effective decoupling of electrical and thermal transport. Under optimized n-type doping conditions at 900 K, the maximum thermoelectric figures of merit, ZT, were predicted to be 1.95 for Cs-Zn-Bi and 1.68 for Rb-Zn-Bi, corresponding to improvements of approximately 40% and 30%, respectively, compared with the AA-stacked phases. These results demonstrate that stacking-order-controlled symmetry breaking provides an effective route to selectively enhance phonon scattering and improve thermoelectric performance, suggesting layered A-Zn-Bi Zintl compounds as promising candidates for high-temperature thermoelectric applications.

[전산3-2 | 13:55]

First-principles study on the effects of ternary alloying elements in Ti-Nb-based shape memory alloys: Hun-Min Jo, Won-Seok Ko*(Korea Univ.)

Keywords: Shape Memory Alloy, Ti-Nb alloy, Density functional theory

Ti-Nb-based shape memory alloys have attracted significant attention as Ni-free, highly biocompatible alternatives to conventional Ni-Ti alloys, the biomedical use of which is constrained by the hypersensitivity and toxicity associated with Ni leaching. In Ti-Nb binary alloys, however, the martensitic transformation temperature is extremely sensitive to composition, decreasing by approximately 43 K per 1 at% increase in Nb content, so that superelasticity at room temperature is restricted to a narrow composition window. Within this window, the critical stress for slip deformation reaches a minimum, allowing irreversible slip to precede the martensitic transformation and thereby limiting the maximum recoverable strain to approximately 3%—well below that of Ni-Ti alloys. Overcoming this intrinsic limitation while independently controlling the transformation temperature requires alloy design through the introduction of a ternary solute element. In this study, first-principles density functional theory calculations were performed on 40 ternary solute elements to systematically investigate their effects on the phase stabilities and martensitic transformation temperatures of Ti-Nb-based shape memory alloys. The site preference of each solute element was determined in both stoichiometric and off-stoichiometric compositions by systematically considering possible anti-site defect configurations, thereby reflecting conditions relevant to experimental alloy processing. Based on the identified site preferences, the martensitic transformation temperature was quantitatively predicted by combining two energy descriptors—the relative energy difference between the austenite and martensite phases (ΔE_1) and the structural distortion energy accompanying the transformation (ΔE_2)—within an anharmonicity-based prediction model. The calculated descriptors showed good linear correlation with experimentally reported transformation temperatures, confirming the predictive validity of the proposed approach. Furthermore, the physical mechanisms governing the transformation temperatures were examined, with particular attention to the role of solute elements in independently modulating the transformation temperature—previously controlled solely by the Nb content—and in stabilizing the high-temperature β phase. As a further extension, the concentration dependence of the martensitic transformation temperature is being investigated through SQS-based calculations for selected promising solute elements, with particular focus on elucidating whether Ti-Nb austenite is better described as a fully disordered or partially ordered solid solution—a distinction with direct implications for site-dependent transformation temperature control. The proposed methodology is expected to provide a first-principles theoretical foundation for the systematic screening and rational design of Ti-Nb-based shape memory alloys with properties tailored to specific biomedical applications.

[전산3-3 | 14:10]

LACOS: Simplified Cluster Expansion Modeling for Complex Multicomponent Alloy Thermodynamics: Krishnamohan Thekkepat, Seung-Cheol Lee*(국립순천대학교)

Keywords: Multicomponent Alloys, Cluster Expansion, Monte Carlo Simulation, First-Principles Thermodynamics;

Multicomponent alloys derive many of their important properties from chemical disorder, short-range ordering, and finite-temperature phase stability, but predicting these effects requires efficient exploration of vast configurational spaces while retaining a direct connection to first-principles energetics. Cluster expansion (CE) addresses this challenge by mapping density functional theory (DFT) energies onto lattice Hamiltonians that can be sampled using Monte Carlo simulations. Here, we present the Lattice Atomic Configuration Simulation (LACOS) package, an integrated framework developed to simplify and accelerate CE-based thermodynamic modeling of complex alloys. LACOS combines configuration generation, training-set construction, Hamiltonian fitting and validation, finite-temperature Monte Carlo simulations, and post-processing within a unified workflow, with support for multicomponent, multisublattice, bulk, and two-dimensional alloy systems including surfaces. Sparse-regression and compressive-sensing-based model selection are used to construct compact CE Hamiltonians from reduced DFT training sets; in representative ternary and quaternary systems, this approach reduces the required training data by at least 50% while producing sparse Hamiltonians that accelerate Monte Carlo sampling by at least three times. LACOS also includes a parallel Monte Carlo engine capable of efficiently sampling supercells containing hundreds of thousands to millions of atoms, enabling large-scale prediction of temperature-dependent chemical ordering, phase stability, precipitation tendencies, order-disorder transitions, and configurational free energies. Overall, LACOS provides a practical and computationally efficient route from first-principles energetics to finite-temperature thermodynamic modeling of complex multicomponent alloys.

[전산3-4 | 14:25]

Fe–Cu–X 삼원계에서 tramp 원소가 액체금속 침투에 미치는 영향에 관한 분자동역학 연구: 박종훈, 조혜지(고려대학교), 안혜현(인하대학교), 김동휘, 강민우, 김영재(현대자동차), 고원석*(고려대학교)

Keywords: Molecular dynamics simulation, Fe-Cu-X ternary system, Liquid metal embrittlement, Recycled steels, Tramp elements

재활용 강의 열간압연 중 발생하는 액체금속취화는, 반복적인 스크랩 재활용 과정에서 축적된 tramp 원소에 의해 유발되며, 지속가능한 철강 생산에 있어 중요한 난제로 대두되고 있다. 열간압연 시 Cu가 농축된 액상이 오스테나이트 결정립계로 침투하여 표면 열간취성을 유발할 수 있다. 실험적 연구에 따르면 Sn 및 Sb의 첨가는 심각한 결정립계 균열을 촉진하는 반면, As는 상대적으로

훨씬 적은 손상을 야기하는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 상반된 거동을 지배하는 열역학적 원리는 아직 명확히 규명되지 않았다. 기존의 원자단위 시뮬레이션은 Al–Ga와 같은 모델 시스템에서 응력 구동 침투 메커니즘에 대한 통찰을 제공해 왔으나, 산업적으로 중요한 Fe–Cu–X 다성분계에 대한 포괄적 분석은 아직 이루어지지 못했다. 본 연구에서는 Fe–Cu–X (X = Sn, Sb, As, Bi, Pb) 삼원계에 대한 원자간 포텐셜을 개발하고, 분자동역학 시뮬레이션을 활용하여 결정립계 침투를 지배하는 원자단위 메커니즘을 규명하였다. 체계적인 분석을 통해 침투 현상이 젖음 열역학에 의해 제어됨을 확인하였으며, 삼원계로의 확장 분석을 통해 Fe–X와 Cu–X 쌍의 혼합 엔탈피 차이에 의해 결정되는 세 가지 뚜렷한 침투 양상이 있음을 밝혔다. 이러한 결과는 Fe–X와 Cu–X 혼합 엔탈피의 차이에 기반한 열역학적 프레임워크를 확립하며, 이는 tramp 원소가 결정립계 침투에 미치는 영향을 예측할 수 있게 하고, 재활용 강 공정에서 산업적 제어를 위한 원소 우선순위 결정에 지침을 제공한다.

[전산4-1 | 14:50] 초청강연

차세대 고강도강 설계를 위한 인공지능 연계 결정소성 모델링: 정경재*(성균관대학교)

Keywords: 고강도강, 다상 미세조직, 인공지능, 결정소성, 유한요소해석

차세대 고강도강의 기계적 거동은 구성 상의 분율, 형상 및 공간적 분포와 각 상의 고유한 변형 특성, 그리고 상간 상호작용에 의해 복합적으로 결정되므로, 이를 정량적으로 고려할 수 있는 미세조직 기반 모델링이 요구된다. 본 연구에서는 인공지능과 결정소성 유한요소해석을 연계하여 다상 고강도강의 미세조직과 기계적 거동을 정교하게 모사하고 예측하기 위한 통합적 모델링 방법을 제안한다. 먼저 미세조직 이미지로부터 개별 상을 자동으로 분할하고 상분율, 크기, 형상 및 공간적 분포와 같은 미세조직 통계 정보를 정량화한다. 거대언어모델 기반 학습 데이터 구축과 딥러닝 이미지 분할 방법을 활용함으로써 복잡한 다상 미세조직의 상 분포를 효율적으로 식별할 수 있다. 이러한 정보를 기반으로 실제 미세조직의 통계적 특성과 결정학적 정보를 반영하는 3차원 대표체적요소를 생성하고, 다상 결정소성 유한요소 모델을 구축한다. 또한 나노압입시험을 통해 획득한 개별 상의 국부 기계적 응답과 인장시험에서 측정된 거시적 응답을 활용하여, 각 구성 상의 결정소성 파라미터를 인공지능 기반 역해석을 통해 결정한다. 이는 기존의 수동 보정이나 반복적 최적화에 의존하지 않고 실험적 기계 응답으로부터 결정소성 구성 파라미터를 효율적으로 식별하는 접근을 다상 소재로 확장하는 것이다. 궁극적으로 미세조직의 자동 정량화, 3차원 재구성, 상별 물성 식별 및 결정소성 해석을 하나의 프레임워크로 연계함으로써, 다상 고강도강의 미세조직–기계적 거동 상관관계를 정량적으로 이해하고 차세대 고강도강의 미세조직 및 기계적 성능 설계를 가속화하고자 한다.

[전산4-2 | 15:15]

Phase-Field Model을 이용한 Q&P강의 탄소 재분배 거동 및 잔류 오스테나이트 안정성 해석: 조회재, 장형욱, 김동욱, 김성균, 차필령*(국민대학교)

Keywords: Q&P steel, Phase-Field Model, SHAP analysis

Quenching & Partitioning (Q&P) 공정은 초기 quenching으로 형성된 martensite/austenite로부터 partitioning 단계에서 탄소가 martensite로부터 austenite로 재분배되며, 이 과정에서 안정화된 잔류 오스테나이트가 강도와 연성을 동시에 향상시키는 3세대 고강도강의 핵심 열처리 기술이다. 대표적 Q&P 합금계인 Fe-Mn-Si-C 시스템의 최종 미세조직은 합금 원소와 공정 변수 간의 복잡한 경쟁적 상호작용에 의해 결정되기 때문에, 잔류 오스테나이트 분율을 지배하는 물리적 기구를 체계적으로 규명하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 탄소 재분배와 계면 이동을 Phase-Field Model (PFM)을 이용하여 Q&P 공정 중 α′/γ 계면에서의 탄소 분배 거동과 계면 이동, carbide 석출 경쟁 반응을 통합적으로 모사하였다. 초기 조성, partitioning 온도 및 시간, carbide precipitation rate 등 다양한 공정·조성 변수 범위에서 1,000건 이상의 시뮬레이션 데이터셋을 구축하고, 각 조건에서의 최종 잔류 오스테나이트 분율과 austenite 내 탄소 농도 분포의 변화 양상을 정량적으로 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 초기 탄소 농도와 carbide precipitation rate가 잔류 오스테나이트 안정성을 지배하는 주요 인자로 확인되었으며, 이들 인자가 austenite 내부의 탄소 확보 경로와 경쟁 반응을 통해 미세조직 진화에 미치는 물리적 기구를 규명하였다. 또한 Mn-C 상호작용 맵을 통해 잔류 오스테나이트 분율을 최대화하는 최적 조성 영역을 도출하였다. 추가적으로 SHAP 기반 머신러닝 분석을 보조적으로 활용하여 주요 변수의 기여도를 정량적으로 검증하였다. 본 연구는 PFM 기반 통합 시뮬레이션이 Q&P강의 미세조직 설계 및 조성 최적화에 실질적으로 기여할 수 있음을 보여준다.

[전산4-3 | 15:30]

Process-to-Microstructure Scale-Bridging Finite Element Analysis for Fracture Initiation Prediction in Cold Rolling: 이학현*, Jong Hyuk Lee(Hyundai Steel)

Keywords: Finite Element Analysis, Multi-scale Modeling, Crystal Plasticity, Microstructure, Damage Model

In numerical simulation, integrating multiple simulation methods across different domains has long been a major challenge. This challenge becomes particularly significant in crack analysis, where microstructural factors such as grain morphology, phase distribution, and dislocation density strongly influence crack initiation. Although microstructure-based simulations can provide detailed insights into local deformation and damage mechanisms, applying such approaches directly to large-scale manufacturing processes remains computationally prohibitive. To address this limitation, this study aims to develop an efficient multiscale bridging framework for crack analysis. The proposed approach establishes a multiscale linkage between macro-scale process simulations and microstructure-based finite element modeling. Information obtained from macro-scale analyses and experiments is transferred to micro-scale representative volume elements as boundary and deformation conditions. The micro-scale simulations, incorporating a ductile damage criterion based

on stress triaxiality, capture localized mechanical behavior associated with the underlying microstructural features. The proposed framework enables efficient evaluation of microstructure-sensitive crack behavior without performing fully coupled large-scale simulations. Furthermore, it provides a practical methodology for investigating the fundamental mechanisms of crack formation during the cold rolling of conventional carbon steel. The developed multiscale approach is expected to contribute to the optimization of processing conditions and the prevention of crack-related defects in industrial manufacturing processes.

[전산4-4 | 15:45]

KKS-type Multi-component Phase-field Modeling of Mixed-stoichiometric phases: Dong-Uk Kim, Seong Gyoon Kim, Hyung-Uk Jang, Hwijae Cho, Pil-Ryung Cha*(Kookmin Univ.)

Keywords: Phase-Field Method, CALPHAD, Aluminum Alloys, NdFeB magnets, Solidification

In practical materials processing, intermetallic compounds frequently emerge during phase transformations. These include not only strictly stoichiometric compounds but also ‘‘mixed-stoichiometric’’ phases, where the partial summation of specific compositions remains constant. Simulating these phases within a phase-field framework requires robust compatibility with generic CALPHAD databases alongside exceptional numerical stability and efficiency. While KKS-type phase-field models are theoretically the most suitable variant for this task, mixed-stoichiometric phases introduce a fundamental conflict with the standard KKS formulation: non-uniform degrees of freedom. This non-uniformity inherently induces artificial kinetic behaviors. In this study, we propose a specific mathematical formulation to circumvent these artifacts, demonstrating the successful integration of mixed-stoichiometric phases into multi-component KKS-type phase-field models.

[전산4-5 | 16:00]

Phase-Field Modeling of Grain Restructuring in High-Burnup UO_2 Fuel: Bohyun Yoon, Kunok Chang*(경희대학교)

Keywords: 고연소도핵연료, 미세구조, 페이즈필드

At high burnup, UO_2 nuclear fuel undergoes restructuring in which the original grains subdivide into submicron subgrains, forming distinct microstructures in different radial regions of the fuel pellet. This restructuring significantly influences fuel performance, yet capturing its microstructural evolution remains challenging. In this work, we employ a mesoscale phase-field model to study grain restructuring in high-burnup UO_2. The model represents subgrain formation together with burnup-driven microstructural evolution and is used to examine how local conditions, such as fission products and burnup, influence the resulting grain structure. We investigate restructuring across different radial zones of the fuel and compare the simulated grain morphologies and size trends with experimental observations. The results demonstrate that mesoscale phase-field simulations can reproduce key characteristics of restructured high-burnup fuel and generate representative microstructures for distinct radial regions. This provides a basis for relating microstructural evolution to fuel behavior and for informing engineering-scale fuel performance analysis.

[전산4-6 | 16:15]

Nd-Fe-B 합금의 응고 미세조직 예측을 위한 2차원 및 3차원 상장 시뮬레이션 비교 연구: 장형욱, 조휘재, 김동욱, 차필령*(국민대학교)

Keywords: Nd-Fe-B 영구자석, 상장모델, CALPHAD,

Nd-Fe-B 영구자석 합금의 주요 강자성상인 T1 상은 응고 과정에서 형성되는 결정립 형상과 상 내부 조성 분포에 따라 자기적 특성이 크게 좌우된다. 본 연구에서는 CALPHAD 열역학 데이터베이스와 결합된 다중 상장 모델을 이용하여 T1 상의 응고 과정을 2차원 및 3차원으로 각각 모사하고 그 결과를 비교한다. 결정립 형상, 성장 속도, 상 내부 조성 분포를 비교함으로써, 2차원 계산이 T1 상의 응고 거동 예측에 충분한지, 혹은 확산장의 기하학적 차이에 따른 조성 불균일성을 제대로 포착하기 위해서는 3차원 계산이 필요한지를 논의하고자 한다.

집합조직 및 미세조직 제어를 통한 차세대 구조재료 설계기술
Room 2층 204호, 10월 30일

[미세1-1 | 09:00] 초청강연

H형강의 내화내진 특성 개선를 위한 미세조직 및 집합조직 설계 방안: 김동익*(한국과학기술연구원), 박준성(한국과학기술연구원, 고려대학교), 정준호(현대제철), 이준호(고려대학교)

Keywords: 내화강, 내진강, 미세조직 제어, 베이나이트, EBSD

내화강의 고온 구조 안정성을 확보하기 위해서는 구성 미세조직의 부피분율을 정밀하게 제어하는 것이 필수적이다. 그중 저온변태조직인 베이나이트는 고온에서의 강도 저하를 억제하는 데 핵심적인 역할을 한다. 본 연구는 오스테나이트화 이후 냉각속도를 변화시켜 미세조직 진화가 내화강의 고온 물성에 미치는 영향을 고찰하였다. 상분율은 전자후방산란회절(EBSD)을 이용하여 정량화하였으며, 결정립 방위편차(GOS)와 결정립 평균 화질(GAIQ)을 조합하여 결정립 단위의 결정 방위 정보로부터 저온변태상을 구분하였다. 서로 다른 냉각속도로 제조한 4종의 강재를 대상으로 미세조직 분석(SEM, EBSD, TEM), 열역학 시뮬레이션, 그리고 상온 및 고온 인장시험을 수행하였다. 그 결과, 저온변태조직 분율과 고온 항복강도 사이에 강한 상관관계가 확인되었다. 나아가 내화성능과 내진성능 간의 상충관계를 논의하고, 두 요구조건을 동시에 만족시킬 수 있는 최적 상분율을 제시하였다. 본 연구 결과는 EBSD 방위 데이터 기반의 미세조직 분석이 결정립 단위의 상 구분에 활용될 수 있음을 보이며, 이중 성능을 갖는 구조용강 설계를 위한 미세조직 설계 지침을 제공한다.

[미세1-2 | 09:25] 초청강연

금형용 공구강의 조성 및 공정 제어를 통한 미세조직과 물성: 강전연*, 김경원(한국재료연구원), 손동민(세아창원특수강), 이형국(현대자동차)

Keywords: 금형강, 미세조직, 탄화물, 열처리

근래 초고장력 강판의 활용 확대, 대규모 일체화 다이캐스팅 공정 도입 등은 금형용 공구강의 설계, 제조와 품질 관리에 많은 기술적 과제를 안겨주고 있다. 금형강은 매우 다양한 특성이 요구되며, 때로는 금형 제작과 사용 측면에서 요구하는 바가 서로 상반되는 경우도 있다. 따라서 조성, 제조 및 후처리 공정의 설계 난이도가 무척 높은 강종이다. 또한 마르텐사이트 기지에 다양한 크기 분포를 가지는 다양한 유형의 탄화물이 동시에 분산된, 매우 복잡한 미세조직을 가지기에 소재 분석의 난이도 역시 매우 높다. 본 발표에서는 냉간 및 열간 금형강 미세조직의 정밀 분석 기술과 활용 사례들을 제시하며, 신규 강종의 개발과 성공적인 적용에 이른 사례도 함께 제시한다.

[미세1-3 | 09:50] 초청강연

Microstructure and Mechanical Response of Pure Ta in Extreme Environments: HOON-HWE CHO*, Hyojoo Lee(국립한밭대)

Keywords: tantalum, mechanical properties, high temperature, friction stir joining, hydrogen

Pure tantalum (Ta) is exposed to hydrogen at 10 torr over the temperature range of 400–1000 ºC to investigate the effects of hydrogen exposure at elevated temperatures on hydrogen uptake and mechanical response. The Vickers hardness value of the hydrogen-exposed specimens reaches a maximum at 600 ºC, and thermal desorption spectroscopy (TDS) analysis confirms a correlation between temperature and hydrogen uptake. X-ray diffraction (XRD) reveals lattice expansion associated with hydrogen incorporation, while scanning Kelvin probe microscopy (SKPM) shows a decrease in surface work function associated with hydrogen dissolution. These results suggest that the observed hardening is most consistent with predominantly interstitial hydrogen together with defect-associated retained hydrogen. Tensile testing further demonstrates that specimens exposed to hydrogen at 600 ºC exhibit increased ultimate tensile strength but reduced ductility, accompanied by brittle fracture behavior, indicating the occurrence of hydrogen embrittlement.

[미세1-4 | 10:15] 초청강연

니켈기 초내열합금의 산화 거동에 영향을 미치는 미세조직의 영향 : Yoon Seok Ko(국방과학연구소), Heung Nam Han*(서울대학교), Dong-Ik Kim*(한국과학기술연구원)

Keywords: 니켈기 초내열합금, 산화거동

발전 효율 향상과 온실가스 배출 저감을 위해서는 화력발전소의 가동 온도 증가가 불가피하며, 기존 철계 합금을 대체하여 니켈기 초내열합금이 구조 재료로서 주목 받고 있다. Haynes282 합금의 경우 우수한 크리프 특성을 지녀 구조 재료로 적용될 수 있는 유력한 후보 합금 중 하나이지만, 해당 합금의 내산화성 대한 연구는 제한적으로 수행되어 왔다. 구조 재료의 내산화성이 충분히 확보되지 않을 경우, 산화 자체 또는 산화 현상으로 인해 유발되는 기계적 물성 저하 등이 시스템의 파손을 유발하는 치명적인 요인으로 작용할 수 있다. 특히 미세먼지 저감을 위한 순산소 연소(Oxy-fuel combustion) 분위기 등의 보일러 시스템에서는 이러한 문제가 심각해질 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 니켈기 초내열합금(Haynes 282)의 내산화성 확보를 위해, 미세조직이 산화거동에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 냉간 압연된 판재를 각각 다른 온도에서 어닐링하여 미세조직을 제어하였으며, 미세조직 차이에 따른 니켈기 합금의 O_2+SO_2 100ppm 분위기에서의 고온 산화거동에 미치는 영향을 분석하였다.

[미세2-1 | 10:50] 초청강연

Temperature-Dependent Dislocation Density Evolution during Rolling of FCC Metals Simulated by Dislocation Density-Based Crystal Plasticity Finite Element Analysis: Preetham Alluri, Wi-Geol Seo, Shi-Hoon Choi*(Sunchon National University)

Keywords: Crystal Plasticity Finite Element Method (CPFEM), Statistically Stored Dislocations (SSD), Geometrically Necessary Dislocations (GND), Dynamic Recovery, Texture Evolution

Building upon our previous dislocation density-based crystal plasticity framework for predicting plane-strain texture evolution in polycrystalline aluminum, the present study extends the model to investigate the temperature-dependent evolution of dislocation density during rolling of face-centered cubic (FCC) metals. The constitutive formulation incorporates statistically stored dislocations (SSDs) and geometrically necessary dislocations (GNDs) within a finite-strain crystal plasticity finite element (CPFE) framework, while introducing temperature-dependent mechanisms governing slip resistance, dislocation storage, and dynamic recovery. This extension enables a physically based description of the competition between deformation-induced dislocation accumulation and thermally activated dislocation annihilation under rolling conditions. Plane-strain compression is employed to represent the local deformation state during rolling, and the evolution of crystallographic texture, slip activity, SSD and GND densities, and intragranular heterogeneity is systematically examined as a function of deformation temperature. The analysis demonstrates that temperature modifies not only the magnitude and spatial distribution of accumulated dislocations but also their coupling with grain orientation and active slip systems. At lower temperatures, restricted recovery promotes pronounced dislocation accumulation and stronger orientation-dependent hardening, whereas increasing temperature enhances dynamic recovery and reduces the stored dislocation density. The temperature sensitivity of dislocation evolution consequently influences strain partitioning among differently oriented grains and the development of rolling texture. These results demonstrate the importance of explicitly incorporating thermally activated dislocation kinetics into crystal plasticity simulations of FCC rolling. The proposed framework provides a mechanistically consistent approach for linking processing temperature, dislocation substructure, and texture evolution, and offers a basis for predicting microstructural heterogeneity during thermomechanical processing of FCC metals.

[미세2-2 | 11:15] 초청강연

Influence of the Schmid factor and geometric compatibility on twin variant selections and twin transmissions of ZK60 alloys: Jaehyung Cho*, Murugesan Mohanraj, Geon Young Lee(Korea Institute of Materials Science (KIMS)), Shi-Hoon Choi(Sunchon National University)

Keywords: Magnesium alloys, ZK60, texture and microstructure, geometric compatibility, twin variants, twin transmission

Effects of the Schmid factor and the geometric compatibility factor on the twin variant selection and twin transmission of $\{10\bar{1}2\}$ tensile twins in ZK60 magnesium alloys at a temperature of 225 ◦C and strain rate of 1.666/s are examined. The analysis focuses on twin activation of various grains in two different sample orientations, along with the compression axis (CA) parallel to the rolling direction (RD), and the CA parallel to the normal direction (ND). Twinning behavior is more pronounced in the former, CA ∥ RD sample, where twinning led to concave stress-strain behaviors, indicating significant microstructural changes due to twin formation and growth. Over 2758 parent grains, whether a grain develops a twin at all is governed both by its size and by the Schmid factor of its best-oriented variant, which act almost independently.

[미세2-3 | 11:40] 초청강연

A cluster-based mean field polycrystal model to simulate dynamic recrystallization: Youngung Jeong*(Changwon National University)

Keywords: Recrystallization, Cube texture, Grain size distribution, Dislocation Density, Softening, Crystal plasticity

The visco-plastic self-consistent (VPSC) polycrystal model was used as the modelling platform to simulate recrystallization. While the mechanical responses of each grain were determined via the homogeneous effective medium theory, grain clusters were introduced to account for the growth competition between neighboring grains. The difference in internal energy between interacting grains was used as the driving force for grain growth, and the grain boundary migration velocity was described as a function of temperature. The initial grain size and its effects were explicitly accounted for by linking the volume fraction assigned to discrete orientation and the physical grain size. The rigor of the numerical results was ensured by determining the nucleation probability based on a Poisson distribution. An efficient numerical method was introduced to determine the crystal orientation of newly nucleated grains based on the principle of maximum release in elastic energy, together with a numerical scheme for efficiently solving the problem under arbitrary stress states. Furthermore, a sub-stepping method was introduced to efficiently solve the growth rates of grains while preserving the numerical robustness. The completed crystal-plasticity-based DRX prediction model was validated by applying it to experimental results for a copper alloy. The effects of strain rate, temperature, and initial grain size were analyzed by comparing the simulation results with those from compression tests. The model successfully captured the characteristic stress–strain response during DRX, the grain size distribution and its evolution, and the factors governing the recrystallization kinetics. In addition, the model successfully reproduced the development of Cube texture induced by dynamic recrystallization.

[미세3-1 | 13:30] 초청강연

전류에 의한 금속의 비열적 재결정 및 상변태 거동: 정경재(성균관대학교), 한흥남*(서울대학교)

Keywords: 전류 인가, 비열적 효과, 재결정 속도론, 동소 상변태

전류 인가는 기존의 열처리만으로는 설명하기 어려운 금속의 미세조직 변화를 유도할 수 있는 새로운 공정 변수로 주목받고 있다. 본 발표에서는 금속재료에서 나타나는 대표적인 전류 효과로서 비열적 재결정 촉진과 상변태 거동의 변화를 다룬다. 전류 인가는 기존 열처리에 비해 낮은 온도와 짧은 시간에서도 재결정을 현저히 촉진하며, 정량적 속도론 분석 결과 이러한 거동은 단순한 줄열만으로는 설명하기 어렵고 재결정에 필요한 유효 활성화 장벽의 감소와 관련되는 것으로 나타났다. 또한 열처리 중 발생하는 동소 상변태에 대한 전류의 영향도 고찰하였다. 실시간 회절 분석과 미세조직 분석 결과, 전류 인가에 따라 상변태 온도가 체계적으로 감소하였으며, 이러한 변화는 결정립 크기와 인가 전류밀도에 뚜렷하게 의존하였다. 유한요소해석에서는 결정립계 부근에서 전류밀도가 선택적으로 집중되는 현상이 확인되었으며, 원자 수준 계산에서는 결함 주변의 전하 불균형이 격자 진동과 진동 엔트로피를 변화시켜 상 안정성에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 전류가 결정립계와 선택적으로 상호작용함으로써 열처리 중 재결정의 속도론뿐만 아니라 상변태 및 상 안정성에도 영향을 줄 수 있음을 보여준다. 본 연구는 전류에 의한 비열적 재결정, 결정립 성장 및 상변태에 대한 새로운 이해를 제공하며, 에너지 효율적이고 선택적인 미세조직 제어를 위한 새로운 가능성을 제시한다.

[미세3-2 | 13:55] 초청강연

반도체 패키징용 마이크로 비아 충진을 위한 구리 전해도금 시 유기첨가제 조합에 따른 미세조직과 집합조직의 특성: 박현*, 오은기, 최재훈, 김정한*(동아대학교)

Keywords: 구리 전해도금, 마이크로 비아, 유기 첨가제, 미세조직, 집합조직

반도체 패키징용 재배선층 (redistribution layer)의 직경 30 μm 비아 패턴에 대한 구리 전해도금 시, 유기첨가제 조건에 따른 비아 내 구리 증착 거동과 미세조직/집합조직의 특성에 대해 연구하였다. 이를 위해 상용 억제제 (inhibitor)와 가속제 (accelerator)를 포함한 전해질 용액과 이에 기반한 바텀-업 충진 (bottom-up fill) 도금 공정을 개발하였다. 각 유기첨가제 조건의 도금 후 증착된 구리의 형상과 내부 결함을 FIB 등을 이용하여 관찰하였고, EBSD를 이용하여 도금 후 시간에 따른 미세조직과 집합조직을 분석하여 증착 형태와의 관계를 고찰하였다. 또한, 4-탐침 (4-point probe) 측정을 통해 도금 후 시간의 경과에 따른 면저항의 변화를 측정하여, 도금 후 상온에서 일어나는 미세조직의 변화를 간접적으로 확인하였다. 실험 결과, 바텀-업 도금 시 초기에는 구리 표면에 선흡착된 억제제의 영향으로 계면을 따라 서브-마이크로미터 크기의 결정립들이 형성되는 반면, 도금이 진행됨에 따라 비아 바닥에서 가속제가 선택적으로 흡착하여 바텀-업 증착이 일어나며 이로 인해 비아 내부에 나노미터 크기의 결정립이 형성되는 것으로 파악되었다. 한편, 바텀-업 도금을 통해 형성되는 비아 내부의 나노 결정립들은 상온에서 재결정 및 결정립 성장에 의해 조대한 결정립으로 대체되며, 이 때 집합조직의 발달은 미약하였다. 바텀-업 도금 시 각 유기첨가제의 전기화학적 거동을 규명하기 위해 저농도 및 고농도 억제제 조건에 대한 도금 실험과 유한요소법 기반 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과, 저농도 억제제와 두꺼운 확산층 형성 조건의 도금 시 가속제는 구리 표면에 균일하게 흡착되는 반면, 억제제는 비아 바닥에서 국부적으로 흡착되는 양이 작아 바텀-업 증착과 나노 결정립 형성이 일어남을 유추할 수 있었다.

[미세3-3 | 14:20] 초청강연

Microstructural and Texture Design Strategies for Improving the Dwell Fatigue Performance of Structural Materials for Aeroengines: Tea-Sung Jun*(Incheon National Univ.)

Keywords: Dwell fatigue, Titanium alloys, Texture, Aeroengine

Cold dwell fatigue has long been a critical issue in aero-engine industry, because it significantly affects fatigue life typically in near-alpha titanium alloys (but also in alpha-beta titanium alloys) at temperatures in the range of -40 to 200 ºC. The term ‘dwell fatigue’ describes the decrease in a component’s fatigue life time when exposed to continuous high mean stress while cruising, between the load ramping up at take-off and the load ramping down upon landing. Among the multiple factors affecting dwell fatigue, time-sensitive and rate-dependent deformation have been considered as critical factors in cold dwell fatigue. In this talk, I will be presenting the overview of dwell fatigue and the on-going experimental works on strain rate sensitivity and creep of Ti-6Al-2Sn-4r-2Mo, Ti-6Al-4V alloys and some additively manufactured Ti alloys. The presented approaches will show you new exciting mechanistic insight into important deformation mechanisms, as well as opening up further studies of new alloy design.

집합조직
Room 2층 204호, 10월 30일

[집합1-1 | 15:00]
PEG-SPS를 이용한 마이크로 비아 전해도금 구리의 상온 어닐링 시 미세조직과 집합조직의 발달: 오은기, 최재훈, 신한균, 박 현*, 김정한*(동아대학교)
Keywords: Microvia, Cu Electroplating, Organic Additives, Self-annealing, Microstructure

구리 전해도금에 사용되는 유기첨가제는 도금 속도와 패턴 충진 거동뿐만 아니라 구리의 핵생성, 결정립 성장 및 결함 형성에도 영향을 미치며, 이는 도금 후 상온에서 발생하는 self-annealing 거동과도 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서는 억제제인 polyethylene glycol(PEG)과 가속제인 bis-(3-sulfopropyl) disulfide(SPS)의 조성에 따른도금 구리의 초기 미세조직과 상온 어닐링에 따른 조직 변화에 미치는 영향을 조사하였다. 정전류 실험을 통해 PEG와 SPS 농도에 따른 구리 도금의 전기화학적 거동을 평가하고, 첨가제 조성을 변화시켜 구리 도금층을 제조하였다. 4-point probe를 이용하여 평면 도금층에 대해 시간에 따른 면저항 변화를 측정하였으며, 도금 직후와 상온 보관 후의 미세조직은 EBSD를 이용하여 결정립 크기와 형상, 결정방위 및 집합조직의 변화를 분석하였다. 면저항 측정 결과, PEG 농도와 관계없이 SPS 농도가 10 ppm 이상인 조건에서는 시간에 따른 면저항 감소가 나타나지 않은 반면, 그 외 조건에서는 면저항이 감소하는 경향이 확인되었다. 이는 SPS 농도에 따라 도금 직후 형성되는 구리의 미세조직과 상온 어닐링 거동이 달라질 수 있음을 보여준다. 이러한 결과를 EBSD 분석으로 관찰된 결정립 및 집합조직 변화와 연계하여, 유기첨가제 조성과 전해도금 구리의 시간 의존적 미세조직 변화 사이의 상관관계를 고찰하였다. 이를 통해, 비아 패턴 충진을 위한 유기첨가제 기반 전해도금 공정 후 상온 어닐링에 따른 구리 미세조직 발달의 메커니즘과 불균일성을 논의하였다.

[집합1-2 | 15:15]
다상조직을 갖는 적층제조 17-4PH 스테인리스강의 단계별 인장 변형에 따른 준안정 오스테나이트의 변형유기 마르텐사이트 변태 및 국부 변형 거동 분석: 한성희, 김대현, 김보규, 한준희, 윤수빈, 정레아, 전인정, 박유민(국립강원대학교), 김재우, 최인석(국립서울대학교), 신중호*(국립강원대학교)
Keywords: 17-4PH 스테인리스강, DIC, Nanoindentation, Selective Laser Melting, EBSD

선택적 레이저 용융(Selective Laser Melting, SLM) 공정으로 제조된 17-4PH 스테인리스강은 급속 응고 및 높은 열구배로 인해 비평형 다상 미세조직을 형성하며, 25% 이상의 오스테나이트가 잔류할 수 있다. 특히 레이저 스캔 속도와 같은 공정 변수는 형성되는 미세조직의 특성 및 상분율에 영향을 미치며, 이에 따라 최종적인 기계적 특성과 변형 거동 또한 변화한다. 본 연구에서는 레이저 스캔 속도를 300–1400 mm/s 범위에서 변화시켜 미세조직과 상분율을 제어하였으며, 이에 따라 항복강도 415–635 MPa, 인장강도 880–960 MPa 및 연신율 8.0–22.5%의 기계적 특성 변화를 확인하였다. 공정 조건에 의해 형성된 다상 미세조직과 준안정 오스테나이트의 변형 거동을 분석하기 위해 단계별 인장 시험과 미세조직 및 나노역학적 분석을 수행하였다. 단계별 인장 변형 과정에서 Digital Image Correlation(DIC)을 이용하여 국부 변형률 분포를 측정하였으며, 이후 동일 또는 대응 영역에 대해 Electron Backscatter Diffraction(EBSD) 분석과 nanoindentation을 수행하였다. EBSD 분석을 통해 국부 변형률 증가에 따른 오스테나이트 상분율과 Kernel Average Misorientation(KAM)의 변화를 분석한 결과, 변형률 증가에 따라 오스테나이트 분율은 감소하는 반면 잔류 오스테나이트의 KAM은 전반적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 공정 조건에 따라 오스테나이트 분율 감소 거동에 차이가 나타나, 준안정 오스테나이트의 변형유기 마르텐사이트 변태가 서로 다른 변형 단계에서 진행되는 것을 확인하였다. nanoindentation 분석에서는 단계별 인장 변형에 따라 잔류 오스테나이트의 경도가 증가하는 경향을 확인하였다. 이러한 결과는 변형 과정에서 일부 준안정 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하는 동시에, 잔류 오스테나이트에서는 국부 변형 축적과 변형경화가 진행됨을 시사한다. 본 연구에서는 DIC, EBSD 및 nanoindentation을 이용하여 준안정 오스테나이트의 상분율 변화, KAM 변화 및 국부 나노역학적 특성 간의 상호 연관성을 분석하였다. 이를 통해 SLM 17-4PH 스테인리스강의 단계별 인장 변형 과정에서 나타나는 준안정 오스테나이트의 변형유기 마르텐사이트 변태와 국부 변형 거동을 분석하고, 향후 적층제조 다상 스테인리스강의 강도와 연성을 동시에 제어하기 위한 미세조직 및 공정 설계의 기초자료를 제시하고자 한다.

[집합1-3 | 15:30]
이온 조사에 따른 SA508 Grade 3 Class 1 및 Class 2 원자로압력용기강의 기계적 특성 및 미세조직 변화: 김상태*, 김민철(한양대학교 원자력재료연구실)
Keywords: SA508 Grade 3, 원자로압력용기강, 이온 조사, 조사 경화, 기계적 특성, 미세조직

원자로압력용기(Reactor Pressure Vessel, RPV)강은 장기간 중성자 조사에 의해 조사결함이 축적되어 기계적 특성과 미세조직이 변화할 수 있으므로, 원자로의 장기 건전성 평가를 위해 조사 전·후 재료 특성에 대한 체계적인 평가가 필요하다. 본 연구에서는 SA508 Grade 3 Class 1 및 Class 2를 대상으로 기본 재료 특성을 평가하고, 중성자 조사를 모사하기 위한 이온 조사에 따른 기계적 특성 및 미세조직 변화를 비교하였다. 먼저 XRF를 이용하여 모재의 화학조성을 분석한 결과, 두 소재 모두 모재성적서 및 ASME 재료 규격과 정합함을 확인하였다. 또한 ASTM E23에 따라 표준 Charpy V-notch 시편의 온도별 충격시험을 수행하고 천이곡선을 분석하였다. 그 결과 T41J는 Class 1과 Class 2에서 각각 약 −34.52 ℃와 −25.65 ℃로 산출되어 Class 1이 상대적으로 우수한 저온 충격인성을 나타냈다. Ar 이온 조사 전·후 시편에 대해 300 ℃ 인장시험, 나노인덴테이션 및 미세조직 분석을 수

행하여 조사 영향을 평가하였다. Ar 이온 조사층이 표면의 수 μm 영역에 국한됨에 따라 거시적 인장 및 충격 특성에서는 조사에 따른 변화가 제한적으로 나타난 반면, 나노인덴테이션에서는 조사량 증가에 따른 명확한 경도 증가가 확인되었다. 최대 조사조건에서 Class 1과 Class 2의 경도는 비조사재 대비 각각 약 20.4%와 15.4% 증가하였다. TEM 분석에서도 조사 후 결함 클러스터 및 전위루프 등의 조사유기 결함 증가가 관찰되었으며, Class 1에서 상대적으로 높은 결함 축적이 확인되었다. 이러한 결과를 통해 SA508 Grade 3 Class 1과 Class 2의 초기 재료 특성 차이와 이온 조사에 따른 국부 기계적 특성 및 미세조직 변화를 확인하였으며, 얕은 이온 조사층의 조사 영향을 평가하기 위해서는 거시적 기계시험과 함께 나노인덴테이션과 같은 국부 기계적 시험 및 미세조직 분석을 병행하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

[집합1-4 | 15:45]

AZXW 마그네슘 합금의 급속 시효경화능과 매커니즘에 대한 연구: 이상봉*, 강민혁(국립금오공과대학교)

Keywords: 금속, 마그네슘, 집합조직, 시효경화, 급속

소성가공된 마그네슘 합금은 가공경화에 의해 높은 강도를 나타내는 반면, 연성이 저하되는 한계가 있다. 이러한 연성 저하를 개선하기 위해 열처리를 적용할 경우 연성 및 성형성은 향상될 수 있으나, 동시에 강도가 감소하는 강도–연성 상충관계가 발생할 수 있다. 따라서 마그네슘 합금에서 강도와 성형성을 동시에 확보하기 위해서는 열처리에 따른 연성 향상과 함께 강도를 회복할 수 있는 추가적인 강화 기구가 요구되며, 시효경화는 이를 위한 효과적인 방법 중 하나이다. 본 연구에서는 AZXW 마그네슘 합금의 시효경화를 이용하여 우수한 강도와 성형성을 동시에 확보하고자 하였다. AZXW 합금에서 Al을 과량 첨가할 경우 Ca 및 Y와의 이차상 형성이 촉진되어, 시효경화에 기여할 수 있는 기지 내 고용 Ca 및 Y의 농도가 감소하는 문제가 있다. 이에 본 연구에서는 Al 함량을 0.6 wt.%로 제한한 저합금 AZXW 조성을 적용하여 효과적인 시효경화 거동을 구현하고자 하였다. 해당 합금의 열처리 조건에 따른 기계적 특성은 비커스 경도시험 및 인장시험을 통해 평가하였으며, 기계적 특성 변화의 원인을 규명하기 위하여 광학현미경(OM), X선 회절분석(XRD), 주사전자현미경(SEM) 및 투과전자현미경(TEM)을 이용하여 미세조직과 상의 변화를 분석하였다.

소프트소재
Room 2층 206호/8호, 10월 30일

[소프트1-1 | 09:00]
Dynamically assembled magnetic nanoparticles in a phase transitional matrix for reconfigurable electronics: Seong-yu Choi, Jeong-Yun Sun*(서울대학교)
Keywords: Soft electronics, Magnetic nanoparticle, Phase transitional matrix

The structure of an electronic device is predetermined at its birth, necessitating new designs and fabrication processes for alternative functions. The advent of reconfigurable electronics, modifying its circuits after manufacture, has unlocked the potential for devices to perform adaptive roles as needed. However, the trade-off between the degree of freedom to reform its structure and electrical stability restricts its potential roles, diminishing the system's significance. Here, we present a reconfigurable assembly of magnetic nanoparticles in a phase transitional matrix (RAMP) system capable of seamlessly transforming their structure with robust electrical junctions. Nanoparticles form conductive percolation under a precisely patterned magnetic field. Within a phase transitional matrix, junctions between nanoparticles are tightened, enhancing electrical performance during transitions. We demonstrated in situ electrical switching and high-resolution alternating current electroluminescence display using the RAMP system. With enhanced reconfigurability and electrical reliability, we anticipate that the RAMP system will suggest a previously unexplored approach to on-demand electronics.

[소프트1-2 | 09:15]
Anisotropy-Programmed Magnetic Soft Composites Based on Cobalt Nanorods for Direction-Selective Self-Powered Force Sensor: Hyeokju Kwon, Minjeong Ha*(Gwangju Institute of Science and Technology)
Keywords: Self-powered force sensor, Magnetoelasticity, Magnetic anisotropy, Cobalt nanorods

Self-powered force sensors based on soft magnetoelastic composites have emerged as promising sensing platforms because of their high current output, fast response, and stable operation in humid environments. However, most studies on soft magnetoelastic composites have focused on isotropic NdFeB particles as magnetic fillers. Consequently, the effects of filler geometry and orientation within soft composites on force-sensing behavior remain insufficiently understood. Here, we synthesize shape-anisotropic cobalt nanorods (CoNRs), incorporate them into soft elastomer matrix and align them by applying magnetic field. The resulting magnetic composite exhibits programmed magnetic anisotropy according to the orientation of CoNRs. Under mechanical loading, deformation changes the collective orientation of the embedded nanorods, thereby altering the magnetic-field distribution and the magnetic flux coupled to a nearby coil. The resulting flux variation induces an electrical output through electromagnetic induction, enabling force detection without an external power supply. Notably, the aligned composites exhibit distinct sensing responses depending on the angle between the loading direction and the programmed anisotropy axis. These results demonstrate that directional sensitivity can be encoded directly into a soft composite through the controlled alignment of CoNRs, without requiring multiple sensing elements or complex structural designs. This approach offers a simple route toward compact, direction-selective, and self-powered force sensors.

[소프트1-3 | 09:30]
Magnetic Stimuli Responsive Soft Robotic Display System Enabled by Quantum Dot Light Emitting Diode: Jioh Yoo, Woojoong Kim, Minji Kwon, Seungjun Lee, Changhoe Lee, Chanyeong Jeon, Jonggun Jung, Cheolmin Park*(Yonsei University)
Keywords: Magnetically-gated Haptic Locomotion, Soft Actuator, AC-driven QLED, Motion-coupled Light Emission, Haptic Display, Locomotive Display

Soft robotics are extensively studied in many fields due to their unique characteristics, which allow delicate control through various driving forces. Particularly, magnetic field actuation is considered important due to its non-toxic, non-destructive, penetrative and contactless nature. Here, we report a magnetically responsive soft robotic system integrated with a flexible, alternating current-driven quantum dot light-emitting diode (AC-QLED) for an interactive display under magnetic stimuli. The magnetic soft robotic display system demonstrates interconnected characteristics of visual display and mechanical deformation/locomotion through its magnetization profile. Two main components of this device are: 1) A magnetized robotic body fabricated from hard, ferromagnetic Neodymium-Iron-Boron micropowder embedded in a compliant silicone elastomer matrix with silver nanowires on the top surface for electrical conductivity, and 2) An AC-QLED display unit constructed on a flexible, compliant substrate with a conductive electrode patterned in a parallel in-plane configuration. Each component was carefully assembled with an elastomeric spacer in between. The soft robotic display system demonstrates magnetically interactive electroluminescence through mechanical deformation, resulting from the interdependent physical interaction between the soft robotic module and the flexible electroluminescent AC-QLED display module. The hard ferromagnetic Neodymium-Iron-Boron (NdFeB) powder with a diameter of roughly a few micrometers, was mixed with a PDMS elastomer to form the responsive body. After adding the curing agent to the prepared mixture, the mixture was poured onto another PDMS buffer layer embedded with conductive silver nanowire (AgNW) and cured by heat treatment. The cured magnetic elastomer

body was tailored to the desired dimensions. The conductive soft robot body was then affixed to a glass fixture and magnetized using a vibrating sample magnetometer (VSM). The resulting magnetic soft robot showed highly responsive vertical movement as well as transitional worm-like movement driven by magnetic stimuli such as variations in field intensity and direction, while maintaining electrical conductivity on its surface due to the embedded AgNW network. The alternating current-driven quantum dot light-emitting diode was fabricated to serve as the interactive display component. A parallel in-plane electrode was prepared by sputtering ITO onto a flexible Polyethylene Naphthalate (PEN) substrate. After cleaning the substrate with acetone and IPA, the electron injection/transport layer, emissive layer, hole transport/injection layer and insulating layer were sequentially spin-coated under an N_2 atmosphere with heat treatment after each deposition. The finished AC-QLED was integrated with the magnetic soft robot and spacer through pre-polymer gluing and was connected to a power supply. The magnetic soft robotic body exhibited deformation according to the intensity and orientation of the external magnetic field, contacting the AC-QLED display unit and illuminating the device. The area of luminescence induced by the electrical field was proportional to the degree of deformation caused by the magnetic field, resulting in successful visualization of magnetic intensity/orientation and locomotion through magnetic input. Our magnetic soft robotic display system not only provides sensing information regarding magnetic stimuli but also enables locomotion of the entire sensing system. Its magnetically interactive electroluminescence without the need for complex electrical interconnection or fluidic apparatus makes it suitable for haptic feedback display applications, providing simultaneous tactile and visual feedback in response to magnetic stimuli. Moreover, the dynamic deformation of the device, enabled by the magnetically responsive soft robotic body may also be applied to dynamic environmental navigation and mapping through visual guidance.

[소프트1-4 | 09:45]

Tailored anisotropy in piezoelectric composites for signal-decoupled mechanosensing: Yubin Kim, Minjeong Ha*(광주과학기술원)

Keywords: piezoelectric, tactitle sensing, flexible electronics

Piezoelectric-based tactile sensors can be one of desirable options for an active sensing device in human-machine interfaces (HMIs) due to flexible, lightweight form-factor, inherent fast response, and low power consumption. However, piezoelectric sensors are still in lacks of signal decoupling capabilities which are decisive features for not only enriched user experiences but efficient and cost-effective operation. In this work, we present a novel method to realize tactile sensors based on piezoelectric composites with tailored anisotropy, which highly enables decoupled force sensing. In contrast to conventional piezoelectric-based composite sensors, we approached axial alignment and spatial arrangement of a piezoelectric nanowire across a composite system, resulting in morphological distinction and anisotropic properties depending on spatial axes. By incorporating the composites into various electronic devices, we evaluated that the selective stress confinement facilitates load-direction-specific recognition of mechanical stimuli and the corresponding tactile signal decoupling. Concurrently, we designed a monolithic soft robotic system based on the tailored anisotropy in the composites, which demonstrates signal-decoupled mechanosensing can be achieved upon dynamic loads during self-assembly locomotion such as compression and bending.

[소프트1-5 | 10:00]

고효율 피부 부착형 순적색 페로브스카이트 발광소자를 위한 $CsPbI_3$ 나노결정의 표면 브롬화 전략: 김윤호, 최문기*(UNIST)

Keywords: 페로브스카이트, 나노결정, 발광다이오드(LED), 웨어러블, PeLED

금속 할라이드 페로브스카이트는 높은 광발광 양자 효율, 넓은 색재현율, 밴드갭 조절 용이성 등 우수한 광학 특성을 바탕으로 차세대 디스플레이 기술의 핵심 소재로 부상하고 있다. 그러나 페로브스카이트 나노결정(PeNCs)의 본질적인 열역학적 불안정성 및 혼합 할라이드의 영역 분리 문제로 인해 안정적인 순적색 발광을 구현하는 것은 여전히 큰 과제로 남아 있다. 본 연구에서는 표면 선택적 브롬화 반응을 활용한 표면 엔지니어링 전략을 통해 $CsPbI_3$ PeNCs를 안정화하고, 이를 고성능 적색 페로브스카이트 발광다이오드(PeLED)에 적용하였다. 정밀한 리간드 교환 공정을 통해 내부의 입방정 $CsPbI_3$ 구조를 유지하면서 표면에 브롬화 층($CsPbI_3$:Br)을 성공적으로 형성하였으며, 이러한 표면 한정 개질을 통해 순적색 파장 영역에서의 나노결정의 구조적 안정성과 광학 특성을 크게 향상시켰다. 또한, 트리부틸설포늄 아이오다이드(TBSI) 표면 리간드를 도입하여 결함을 효과적으로 패시베이션함으로써 우수한 전기적 특성을 확보하였다. 그 결과, 제작된 순적색 PeLED는 19.8%의 뛰어난 외부양자효율을 달성하였다. 나아가, 본 전략의 실용적 확장성을 검증하기 위해 해당 PeNCs를 고분자 파릴렌 봉지층을 기반으로 한 초박형 피부 부착형 PeLED에 적용하였으며, 다양한 기계적 변형 조건에서도 안정적인 적색 발광을 확인함으로써 향후 웨어러블 전자소자로의 응용 가능성을 입증하였다.

[소프트2-1 | 10:25]

Wavelength-tunable tactile neuromorphic in-sensor memory display for vision-guided robotic manipulation: Woojoong Kim, Cheolmin Park*(연세대학교)

Keywords: Tactile neuromorphic display, structural color, block copolymer photonic crystal, ion-gel-gated synaptic transistor, in-sensor memory robotics

Equipping physical artificial intelligence with a sense of touch remains challenging, as conventional tactile sensor arrays require high-density pixel integration and complex array-level readout to capture spatially rich tactile information. Here we present a wavelength-

tunable tactile neuromorphic structural color display that senses, stores, and visualizes tactile stimuli within a single device, operating as an optical tactile in-sensor memory. A periodically ordered block copolymer photonic crystal serves as a color-tunable gate dielectric in an ion-gel-gated synaptic transistor with a pressure-responsive gate electrode. Tactile inputs modulate the gate electric field and drive ion redistribution and electrochemical doping, which concurrently reconfigure the channel conductance and the lamellar periodicity of the photonic crystal, yielding reversible wavelength-encoded synaptic states with long retention at a low operating power (~6 μW). Each tactile event is thus stored as a camera-readable structural color image, allowing tactile history to be retrieved by machine vision without dense sensor integration or continuous electrical readout. A gripper-integrated 4 × 4 array generates object-specific color images that serve as direct inputs for neural network-based recognition of the shape and modulus of grasped objects with ~96% accuracy, and further enable reconstruction of their surface topography at over 10^3-fold lower energy than an equivalent MEMS sensor array.

[소프트2-2 | 10:40]

이온 매개 구조 조절을 통한 전기화학 바이오센서용 하이드로겔 인터페이스의 분석물 확산 및 기계적 물성 독립 제어: 이동욱, 김수아, 서정목*, 김자영*(연세대학교)

Keywords: 하이드로겔, 이온 매개 구조 제어, 물질 전달, 기계적 특성, 전기화학 바이오센서

전기화학 바이오센서는 빠른 응답속도, 높은 감도, 소형화 용이성 및 사용자 친화적 특성을 바탕으로 다양한 생체유체 내 바이오마커를 실시간으로 모니터링할 수 있는 차세대 웨어러블 및 이식형 센싱 플랫폼으로 주목받고 있다. 그러나 실제 생체환경에서는 반복적인 변형과 기계적 자극이 지속적으로 발생하기 때문에, 센서와 생체조직 사이에서 안정적인 신호 전달을 유지할 수 있는 유연하면서도 기계적으로 강건한 인터페이스 소재가 필수적이다. 하이드로겔은 높은 함수율, 우수한 생체적합성 및 조직 유사 기계적 특성으로 인해 이상적인 소프트 인터페이스 소재로 평가되어 왔으나, 기존 하이드로겔 시스템에서는 기계적 강도를 향상시키기 위해 고분자 네트워크를 치밀화할수록 분석물의 확산이 제한되는 본질적인 상충관계가 존재하였다. 또한 전도성 고분자나 전도성 충전재를 도입하여 전기적 성능을 향상시키는 기존 전략은 하이드로겔의 유연성을 저하시킬 뿐만 아니라, 하이드로겔 자체가 갖는 분자 확산 조절 매트릭스로서의 기능을 충분히 활용하지 못했다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 이온의 종류와 처리 순서를 이용하여 하이드로겔 내부의 고분자-이온 상호작용과 미세구조를 선택적으로 조절하는 이온 매개 구조 제어 전략을 제안하였다. 이온 가교, 염석 및 이온 처리 순서에 따른 생체 광물화 현상을 통해 하이드로겔 내부 구조를 재배열 함으로써, PVA–Alginate 기반 하이드로겔 내에서 기공 구조와 네트워크의 치밀도를 독립적으로 조절할 수 있었으며, 이를 통해 기존에 강하게 결합되어 있던 매트릭스를 통한 내부 물질 전달 특성과 기계적 물성을 효과적으로 분리 제어하였다. 고다공성 구조에서는 분석물의 확산 및 전극 접근성을 증가시켜 저농도 바이오마커에 대한 높은 감도를 구현한 반면, 치밀하게 제어된 네트워크에서는 과도한 분석물 유입을 제한하여 선형 검출 범위를 확장하는 동시에 우수한 기계적 강건성과 구조적 안정성을 확보하였다. 즉, 본 연구는 하이드로겔을 단순한 보호층이나 생체적합성 코팅이 아닌, 분석물의 확산과 전기화학적 신호 전달을 능동적으로 설계할 수 있는 기능성 소프트 인터페이스 소재로 재정의한다. 특히, 화학 조성의 변경 없이 이온 처리 경로만을 조절하여 물질전달 특성과 기계적 성능을 독립적으로 설계할 수 있다는 점에서, 하나의 소재 플랫폼으로 웨어러블 전기화학 바이오센서가 요구하는 높은 분석물 유동 플럭스와 이식형 전기화학 바이오센서가 요구하는 제한된 분석물질의 확산 성능 및 높은 기계적 안정성을 각각 구현할 수 있다. 이러한 이온 매개 구조 공학 기반의 물질 전달-기계적 물성 분리 제어 전략은 다양한 생체 환경과 농도 범위에 맞추어 센서 성능을 조절할 수 있는 범용 하이드로겔 인터페이스 설계 원리를 제시하며, 차세대 웨어러블 및 이식형 전기화학 바이오센서 개발을 위한 새로운 소프트 소재 플랫폼으로 활용될 수 있다.

[소프트2-3 | 10:55]

Iontronic Tactile Neuron for Encoding of Multimodal Tactile Semantics: Hayeon Jeong(Yonsei University, Korea Institute of Science and Technology), Unhyeon Kang(Korea Institute of Science and Technology), Minseok Oh(Korea Institute of Science and Technology, Seoul National University), Suyoun Lee*(Korea Institute of Science and Technology), Cheolmin Park*(Yonsei University), Hyunjung Yi*(Korea Institute of Science and Technology)

Keywords: 이온트로닉, 촉각

Artificial tactile systems are increasingly required to perceive complex physical interactions in robotics, human–machine interfaces, and wearable electronics. In real contact scenarios, tactile information is governed by coupled physical factors—such as mechanical loading and temperature—rather than a single stimulus. Recent neuromorphic tactile devices have successfully converted sensory inputs into spike-like signals for event-driven perception. However, multimodal tactile perception is often achieved by integrating separate sensing components or by interpreting spike outputs using simplified features such as firing rate, spike count, or amplitude. A remaining challenge is to develop a tactile-neuronal device that encodes coupled multimodal inputs through a sensor while preserving the temporal structure of spike signals. Here, we present an iontronic tactile neuron for multimodal encoding spike dynamics. The device integrates an tactile sensor with an threshold-switching neuron circuit. Pressure and temperature modulate the response of the ion-gel sensor, and this response is directly converted into spike trains by the neuron circuit. Instead of using the spike output only as a simple rate or count signal, we analyze two temporal spike dynamics. These spike dynamics provide complementary information about the coupled pressure–temperature input, enabling multimodal tactile information to be represented within a single spike train. Circuit-level modeling based on experimentally measured sensor parameters captures the observed spike responses, supporting the physical link between iontronic transduction and spike dynamics. By interfacing a single iontronic sensor with a threshold-switching neuron circuit, this work

translates coupled tactile inputs into temporally structured spike representations. The proposed iontronic tactile neuron provides a compact and interpretable platform for brain-inspired multimodal tactile perception and offers a promising route toward event-driven tactile processing using spiking neural networks.

[소프트2-4 | 11:10]

전도성 코팅과 사전 압축을 적용한 폴리우레탄 스펀지 기반 저히스테리시스 유연 압저항 압력 센서: 강채영, 박진우*(연세대학교)

Keywords: 압력센서, 폴리우레탄, 카본블랙, 직물

장시간 침상 생활이나 재활 과정에서 피부와 지지면 사이에 발생하는 지속적 계면 압력은 국소 혈류를 저하시켜 욕창과 말초신경 손상을 유발할 수 있으므로, 이를 안정적으로 모니터링할 수 있는 유연 압력 센서가 요구된다. 이러한 계면 압력은 짧게는 수십 초에서 길게는 수 시간 이상 지속되며 신체 부위와 자세에 따라 넓은 범위로 변화하므로, 센서는 낮은 히스테리시스, 넓은 측정 범위, 반복 내구성 및 피부 순응성을 동시에 확보해야 한다. 그러나 기존 다공성 구조 기반 압력 센서는 반복 압축 시 고분자 골격의 점탄성 변형, 내부 마찰 및 기공 구조의 비가역적 재배열로 인해 큰 히스테리시스와 기저선 변동을 나타낸다. 본 연구에서는 카본블랙(CB)/폴리디메틸실록산(PDMS)/에틸셀룰로오스(EC) 복합체로 코팅된 폴리우레탄(PU) 스펀지와 은나노와이어(AgNW) 패턴 섬유 전극을 결합하고, 의료용 접착 필름인 테가덤(Tegaderm)으로 인캡슐레이션 함으로써 완전 유연형 압저항식 압력 센서를 개발하였다. 전도성 스펀지는 상용 폴리우레탄 스펀지를 CB/PDMS 전구체/EC가 톨루엔에 분산된 용액에 딥코팅을 통해 제작하였다. 이때 EC는 비극성 용매인 톨루엔 내에서 CB 표면의 극성 작용기와 상호작용하여 입자 재응집을 억제하고 입체적 안정화 효과를 제공하였다. EC로 인해 향상된 분산 안정성은 건조 및 경화 과정에서 CB 고농도 영역과 PDMS 고농도 영역의 불균일한 분리를 억제하여 PU 스펀지 골격에 보다 균일하고 연속적인 전도성 코팅층을 형성하였다. 이에 따라 EC가 없는 대조군과 비교하여 코팅 연속성, 인장 탄성률 및 인장 강도가 향상되었다. 코팅된 스펀지는 스페이서를 이용해 압축된 상태로 80 ºC에서 열경화하였으며, 이 과정에서 높은 기계적 히스테리시스의 원인이 되는 초기 탄성 영역과 평탄 영역의 골격 굽힘 및 붕괴를 선행시켜 이후 변형이 주로 치밀화 영역에서 발생하도록 하였다. 그 결과, 기계적 히스테리시스 비율은 64%에서 25%로 감소하였고 첫 번째와 후속 압축 주기 간 차이도 줄어 반복 하중에서의 구조적 안정성과 복원성이 향상되었다. 최적화된 80% 사전 압축 센서는 0–19 kPa, 19–56 kPa 및 56–185 kPa 구간에서 각각 0.01903, 0.00473 및 0.0015 kPa^{-1}의 감도를 나타냈으며, 최대 185 kPa의 넓은 측정 범위를 확보하였다. 또한 20, 60, 100 및 140 kPa의 반복 압력에서 재현성 있는 응답을 보였고, 100 kPa를 5–60초 동안 유지한 조건에서도 신호 크기가 안정적으로 유지되어 지속 압력 감지 가능성을 확인하였다. 또한 100 kPa 조건의 3000회 반복 압축에서도 저항 변화와 기저선이 유지됨을 확인하였다. 마지막으로 제작된 센서를 팔꿈치, 발꿈치, 견봉, 복사뼈 및 천골에 부착하여 앙와위와 측와위 전환에 따른 계면 압력을 실시간으로 측정한 결과, 각 자세에서 하중이 집중되는 신체 부위의 신호가 선택적으로 증가하고 압력 해제 후 빠르게 기저선으로 회복되었다. 또한 체중과 성별이 다른 6명의 참여자를 대상으로 한 예비 실험에서 신체 부위별 압력 차이를 구분하였으며, 발꿈치에서는 체중 증가에 따라 계면 압력이 증가하는 경향을 확인하였다. 본 연구는 간단한 딥코팅 및 사전 압축 공정을 통해 다공성 압력 센서의 히스테리시스를 완화하고, 장시간 계면 압력 모니터링에 필요한 넓은 감지 범위, 반복 내구성, 신호 안정성 및 착용성을 동시에 확보할 수 있음을 보여준다.

[소프트2-5 | 11:25]

Reconfigurable SERS Nanogaps for Conformal Molecular Sensing: Goum Min, Jinsoo Na, Yugyeong Kang, Siheon Lee(Seoul National Univ.), Byounghyun Jeon, Hanjae Kim(Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM)), Hyunjun Lee(Hanyang Univ.), Beomsoo Chun, Soojeong Yim, Jeonghun Kwak(Seoul National Univ.), Youngho Eom(Hanyang Univ.), Chang Yeol Lee*(Korea Research Institute of Bioscience & Biotechnology (KRIBB)), Soon Hyoung Hwang*(Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM)), Juhyuk Park*(Seoul National Univ.)

Keywords: nanopatterns, nanoprocessing, surface-enhanced raman scattering, molecular sensing

Flexible surface-enhanced Raman scattering (SERS) substrates enable direct molecular detection on irregular surfaces, making them promising for food safety and chemical sensing applications. However, conventional SERS substrates typically rely on fixed nanostructures, which limits conformal sensing, reusability, and reliable detection of molecules with different sizes. This study presents a reconfigurable SERS platform based on Au-coated shape-memory polymer nanopillar arrays containing silver nanoparticles for photothermal actuation. Mechanical compression and laser-induced recovery reversibly modulate the out-of-plane Au–Au nanogaps, allowing the substrate to switch between wide- and narrow-gap states while maintaining conformal contact with curved surfaces. Raman analysis demonstrated size-adaptive detection of hemoglobin on curved stainless-steel surfaces and thiram residues on fruit surfaces, together with stable performance over repeated compression–recovery and washing cycles. These results demonstrate the potential of the platform as a reusable and adaptive SERS substrate for practical food safety and forensic chemical analysis.

[소프트3-1 | 13:30]

Adhesive, Conductive Zwitterionic Hydrogel via Hofmeister Ion-Assisted Filler Integration: Dahyun Lee, Jaewon Choi(Pohang University of Science and Technology), Taehun Chung(University of Wisconsin-Madison), Youn Soo Kim*(Pohang University of Science and Technology)

Keywords: Conductive hydrogel, Hofmeister ion, Zwitterionic hydrogel, Adheisve hydrogel, Viscoelasticity, Sol-gel transition, Conductive filler

Conductive hydrogels have garnered increasing attention in bioelectronics for their combination of electrical conductivity and mechanical compliance. Traditional approaches typically incorporate conductive fillers prior to polymerization, limiting independent control over polymer synthesis and filler integration. Here, we present a Hofmeister ion-assisted strategy using a catechol-functionalized zwitterionic copolymer of sulfobetaine vinylimidazolium (SBVI) and dopamine methacrylamide (DOPA). Synthesized independently of the fillers, this copolymer allows its molecular weight to be tuned for precise control of hydrogel mechanical modulus. Conductive fillers are then integrated into the matrix through a Hofmeister ion-induced sol-gel transition under mild conditions, avoiding filler degradation, while the catechol moiety confers underwater adhesion. The resulting zwitterionic hydrogels exhibit electrochemical conductivity and tissue-like viscoelastic properties, offering strong potential for bioelectronic applications.

[소프트3-2 | 13:45]

Solvent Engineering of Thermo-Responsive Hydrogels Facilitates Strong and Large Contractile Actuations: Yong Eun Cho, Jeong-Yun Sun*(Seoul National University)

Keywords: Thermoresponsive Hydrogel, Hydrogel

Thermo-responsive hydrogels can generate the actuation force through volumetric transitions in response to temperature changes. However, their weak mechanical properties and fragile actuation performance limit robust applications. Existing approaches to enhance these properties have typically depended on additional components, leading to an unavoidable interference to the actuation performance. In this work, robust thermo-responsive hydrogels are fabricated through solvent engineering. A particular solvent, N-methylformamide, interacts affinitively with the carbonyl group of N-isopropylacrylamide monomer, solubilizes the monomer with extremely high concentration, stabilizes chain propagation during polymerization, and greatly increases chain lengths and entanglements of the resulting polymer. The synthesized hydrogels are highly elastic, strong, and tough, displaying remarkable thermo-responsive contractile actuation. The simple synthetic process can broaden its applicability in designing robust functional hydrogel applications.

[소프트3-3 | 14:00]

Development of Glassy Glycol Gels through Solvent Engineering: Soomin Jung, Jaewon Choi, Jihyeok Kwak, Youn Soo Kim*(Pohang University of Science and Technology)

Keywords: polymer, polymer gel, organogel, glycol, Tough, Glassy

Hydrogels are widely used because of their flexibility and high water content; however, the strong plasticizing effect, high vapor pressure, and narrow operating temperature range of water often lead to limited mechanical performance and poor long-term stability. To overcome these limitations, glycols with low volatility and broad liquid-state temperature ranges were employed as alternative solvents. Compared with water, glycols exhibit lower polarity and less extensive hydrogen-bonding networks, thereby reducing polymer plasticization and promoting stronger polymer–polymer interactions. Depending on the monomer composition and concentration, this reduced plasticization can induce a glassy effect and enable the formation of glassy glycol gels. However, these glassy gels can exhibit brittle mechanical behavior. Therefore, flexible monomers forming soft polymer segments were copolymerized with glassy polymer-forming monomers to enhance ductility while retaining high mechanical strength. Furthermore, solvent engineering using different glycol species enabled systematic regulation of polymer–solvent interactions and chain mobility. Consequently, the modulus, strength, elongation, toughness, and glass-transition temperature of the glycol gels could be readily controlled by varying the monomer composition, concentration, and solvent. This combined copolymerization and solvent-engineering strategy provides a simple and versatile platform for designing tough glycol gels with high mechanical performance, long-term stability, and tunable thermal properties.

[소프트3-4 | 14:15]

Alkali-resilient hydrogel interphases enable in situ catalysis and bubble shedding for durable water electrolysis: Siheon Lee(Seoul National Univ.), Yunseo Lee(Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS)), Changhyun Seong(Sungkyunkwan Univ.), Wonjin Lee, Goum Min(Seoul National Univ.), Jong Hwan Lim, Sun Hwa Park(Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS)), Younghoon Oh(Boston Univ.), Sunghak Park*(Sungkyunkwan Univ.), Ki Chang Kwon*(Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS)), Juhyuk Park*(Seoul National Univ.)

Keywords: hydrogel, water electolysis, bubble dynamics, molecular dynamics simulation

Anion-exchange membrane water electrolysis (AEMWE) enables lower-cost hydrogen production through the use of non-precious Ni electrodes under alkaline conditions. However, practical porous Ni anodes remain limited by sluggish oxygen evolution kinetics and inefficient oxygen-bubble removal. Here, we develop an alkali-resilient hydrogel that retains structural integrity after 500 h 1 M KOH at 80 ^{o}C and introduce it onto commercial Ni felt via simple spin coating to form a functional interphase. Hybrid atomistic-coarse-grained molecular dynamics simulations reveal reduced O_2 pinning at the hydrogel/Ni interphase, while high-speed imaging identifies consistent macroscopic bubble dynamics, including more frequent detachment of smaller bubbles. Electrochemical measurements and in situ spectroscopy further reveal reduced oxygen evolution losses and formation of hydrogel-confined Ni hydroxide. In single-cell AEMWE, the modified anode sustains about 2.30 V at 1.0 A cm^{-2} for 500 h. These results establish durable hydrogel interphases as scalable platforms integrating catalytic activation, gas management, and long-term alkaline operation.

[소프트3-5 | 14:30]

One-Step Gradient-Structured Janus Hydrogel Electrolyte for High-Performance Aqueous Zinc Metal Batteries: Saehyun Kim, Yubeen Lee, Sungbin Shin(Pohang University of Science and Technology), Seongwon Lee, Dong Gyu Lee(Hanyang University), Taehun Chung(University of Wisconsin-Madison), Dong-Yeob Han(University of Texas at Austin), Sangyeop Lee(Pohang University of Science and Technology), Tae Kyung Lee*(Hanyang University), Soojin Park*, Youn Soo Kim*(Pohang University of Science and Technology)

Keywords: Aqueous zinc metal batteries, Janus gel electrolytes, Hydrogels, Flexible batteries

Aqueous zinc-metal batteries (AZMBs) require electrode-specific hydration because water plays opposing roles at the cathode and Zn anode. Sufficient hydration promotes Zn^{2+}/H^{+} transport and cathode redox kinetics, whereas excessive water activity accelerates Zn corrosion, hydrogen evolution, and inactive byproduct formation. Conventional homogeneous gel polymer electrolytes (GPEs) cannot regulate these conflicting requirements. In this study, water-immiscible acrylonitrile (AN) is dissolved in aqueous electrolyte via a salt-induced strategy and combined with asymmetric substrate polymerization to fabricate a Janus GPE through one-pot synthesis. This asymmetric polymerization induces AN enrichment and gradients in pore structure and hydration, suppressing parasitic reactions at the Zn anode while maintaining favorable ion transport and redox kinetics at the cathode. Zn||NVO cells retained 83% capacity after 500 cycles, while folded pouch cells retained 92.6% after 400 cycles.

[소프트3-6 | 14:45]

Boosting Ionic Conductivity of Single-ion Conductive Polyelectrolyte Elastomers via High-dielectric Plasticizers: SangJun Ma, Jeong-Yun Sun*(Seoul National Univerisity)

Keywords: Soft Materials, Ionic Condutivity, Elastomers

Ionic conduction plays a vital role in biological systems, energy storage and ionotronic devices. Polyelectrolyte elastomers have attracted growing interest as solid-state single-ion conductors due to their inherent ion selectivity, leakage-free nature and mechanical elasticity. However, existing polyelectrolyte elastomers have relatively low ionic conductivity ($\sim 10^{-3}$ mS cm^{-1}), limiting their applicability as efficient ionic conductors. Here we present a materials design approach that boosts conductivity and preserves leakage-free operation by introducing a solid-state additive that combines two key characteristics: a high dielectric constant to increase dissociated ion density and a plasticizing effect to enhance ion mobility. Demonstrated with succinonitrile, this approach increases conductivity by over two orders of magnitude at room temperature across both polycationic and polyanionic systems, further enhancing elasticity. By elevating conductivity across diverse polyelectrolyte networks, this work demonstrates a versatile route to achieve stable and efficient ion transport for next-generation solid-state single-ion conductors.

[소프트4-1 | 15:10]

Ion-Coupled Neuromorphic Light-Emitting Devices toward Scalable Sensory Computing Arrays: Seung Jun Lee, Woojoong Kim, Jioh Yoo, Minji Kwon, Jonggun Jung , Changhoe Lee, Chanyeong Jeon, Cheolmin Park*(연세대학교)

Keywords: Synaptic Display, Neuromorphic Computing, Ion-Gated Vertical Transistor, Organic Electronics, In-sensor Computing

The integration of sensing, memory, computation, and visual output within a compact device architecture is a key requirement for next-generation sensory computing systems. Here, we present an ion-coupled neuromorphic light-emitting platform that directly converts external stimuli into temporally evolving electrical and optical states and further demonstrate its potential for scalable sensory computing arrays. As a primary platform, a tactile neuromorphic ion-gated vertical transistor display integrates pressure sensing, ion-mediated synaptic modulation, and electroluminescence within a single vertical device. Mechanical deformation of an elastomeric gate regulates ionic penetration through a nanoporous Al electrode, inducing localized n-type doping and interfacial band bending in the emissive semiconductor. This ion-electron coupling simultaneously modulates charge transport and light emission, producing electrical and optical responses with distinct relaxation dynamics. The resulting complementary temporal states enable dual-output reservoir computing, achieving 93.5% spoken-digit classification accuracy compared with 82.3% using the electrical output alone. The vertically stacked architecture also supports straightforward lateral scaling, including passive light-emitting arrays with pixel dimensions down to 0.5×0.5 mm^2. Building on this platform, ongoing work extends the concept of ion-coupled light-emitting devices toward photoresponsive architectures and addressable device arrays. These efforts aim to integrate optical sensing, temporal information processing, and light emission within individual pixels, providing a basis for spatially distributed in-sensor computing. Together, these results establish ion-coupled neuromorphic light-emitting devices as a versatile platform for integrating sensory transduction, temporal memory, computation, and visual output, while providing a pathway from individual sensory devices toward scalable multifunctional computing arrays.

[소프트4-2 | 15:25]

User-Interactive Stretchable Displays for Visual–Acoustic Encryption: LEE GWANGHEON, CHOI MOON KEE*(울산과학기술원)

Keywords: Multifunctional displays, Transfer-printing process, Stretchable displays

Multifunctional displays capable of integrating diverse functions into a single device without external circuitry are attracting

considerable attention as next-generation human-machine interfaces.However, most existing systems are limited to converting mechanical or electrical signals into visual information. Here, we present a stretchable, high-resolution, multicolor synesthetic display fabricated using a transfer-printing process. The device generates synchronized light and sound, enabling both visual and acoustic output. The transfer-printed emissive composite enhances optical performance while providing sufficient sound pressure levels. Owing to its intrinsic stretchability, the display operates reliably under both static and dynamic deformation without significant distortion of the acoustic output relative to the input waveform. We further demonstrate user-interactive visual-acoustic encryption and a multiplexed quick response (QR) code capable of connecting a single device to multiple digital domains. This work offers a new platform for multifunctional displays and shows strong potential for advanced authentication and security applications.

[소프트4-3 | 15:40]

Electrochemical Doping in Halide Perovskites for Optoelectronic In-sensor Computing: Yongjin Kim, Dohyun Kim, Jae-Hyun Lee(Seoul National University), Michael Staines, Vikram(University of Oxford), Jimmy Xu(Brown University), Saiful Islam(University of Oxford), Joon-Kyu Han, Keehoon Kang*(Seoul National University)

Keywords: Halide Perovskites, Mixed Ionic–Electronic Conductors, Electrochemical Doping, In-sensor Computing

Halide perovskites are ionic semiconductors in which electronic transport is intrinsically coupled to the formation and migration of charged defects. Although ion migration is commonly associated with instability in perovskite optoelectronics, controlled manipulation of ionic species can provide a means to regulate the electronic properties of the material after synthesis. Here, we investigate electrochemical doping as an approach to control mixed ionic–electronic conduction in halide perovskite thin films and utilize the resulting transport characteristics for optoelectronic in-sensor computing. In optoelectronic devices based on these electrochemically doped perovskite films, the spatial distribution of mobile dopants within the channel can be reversibly controlled by electrical bias, enabling programmable device characteristics. By establishing a relationship among ion insertion, mixed ionic–electronic transport, and reconfigurable optoelectronic functionality, this work provides a materials-level basis for developing systems that integrate sensing, memory, and information processing.

[소프트4-4 | 15:55]

Retention Control through Dispersant-Engineered Ion Kinetics in Unsorted Carbon Nanotube Transistors: Donghee Shin, Beomjin Jeong*(Pusan Nat. Univ.)

Keywords: CNT, Synaptic transistor, dispersant, Ion-gel

Ion-gated carbon nanotube (CNT) transistors are promising candidates for artificial synapses, but spontaneous ion redistribution after programming poses a major challenge to long-term memory retention. Addressing this issue typically requires complex ion-trapping layers or chemical modifications. Here, we present a straightforward dispersant-engineering approach to suppress ion back-diffusion and stabilize synaptic states in unsorted CNT transistors. By utilizing poly(styrene-block-4-vinylpyridine) (PS-b-P4VP) block copolymer as a dispersant, we introduce steric hindrance around the CNT channel that kinetically restricts the relaxation of TFSI– anions without sacrificing network processability. The resulting devices demonstrate highly linear and symmetric analog weight updates alongside excellent operational durability. Spectroscopic analysis confirms that the sterically constrained polymer environment maintains persistent p-type doping by physically trapping anions near the channel interface. Impedance and thermal characterizations reveal a substantial kinetic barrier against spontaneous ion relaxation compared to conventional small-molecule dispersant systems. Furthermore, the extracted synaptic characteristics enable high-accuracy MNIST handwritten-digit recognition in neural network simulations, alongside proof-of-concept Boolean logic operations. This work highlights dispersant-mediated kinetic control as a versatile, scalable strategy for building high-retention neuromorphic hardware.

[소프트4-5 | 16:10]

Heterostructured Electrocatalysts Based on Layered Transition Metal Chalcogenides for Alkaline Water Splitting: Seunghun Shin, Sun Kyung Han, Junhwi Han, Hotae Jeon, Won-Kyu Lee*(Hongik Univ.)

Keywords: Water Electrolysis, Hydrogen Evolution Reactions, Oxygen Evolution Reactions, Catalytic Materials, Transition Metal Dichalcogenides, Strain Engineering, Electrochemical Process

Layered transition metal chalcogenides (LTMCs) have been investigated as electrocatalytic materials owing to their tunable electronic structures, phase stability. However, the electrocatalytic activity of LTMCs is limited by electrochemically inert basal planes and the low density of active sites. In this study, we present a structural engineering strategy for LTMCs by combining electrochemically induced defect formation with strain engineering. Mechanically exfoliated LTMCs flakes were dry-transferred onto gold thin films deposited on thermoplastic substrates for controlled structural modification. In $MoTe_2$, electrochemical chalcogen leaching generated Te defects, which induced a localized phase transition from the 2H to the 1T` phase. The resulting defect sites served as nucleation centers for the growth of $Ni(OH)_2$, enabling the formation of a vertical chalcogenide/hydroxide heterostructure.[1] In-situ Raman spectroscopy, X-ray/ultraviolet photoelectron spectroscopy (XPS/UPS), scanning and transmission electron microscopy, and density functional theory calculations (DFT) and machine-learning-assisted atomistic simulations revealed that phase boundaries, chalcogen defects, and

heterointerfaces modulate the local electronic structure and interfacial charge distribution. While such vertical heterostructures demonstrate structural and electronic modulation through defect and interface engineering, the inevitably contained interfaces present challenges for long-term structural stability. To overcome this limitation, the study was extended to a monolithically integrated heterostructure design based on $NiTe_2$. Selective oxidation of electrochemically generated defect-rich regions produced nickel oxide domains, resulting in crystallographically continuous in-plane heterostructures.[2] Furthermore, surface buckling induced by the mismatch in Young's modulus between the gold film and the polystyrene substrate enabled nanoscale control of localized tensile and compressive strain.[2, 3] By integrating heterostructure engineering with strain modulation, a materials platform enabling systematic control of electronic structures and interfacial interactions was established. These results demonstrate that defect formation, phase-transition control, heterostructure engineering, and strain modulation serve as key design parameters for controlling the structural and electronic properties of layered transition metal chalcogenides. This work provides insights into structure–property relationships in LTMCs and establishes a general materials design framework for defect- and strain-enabled activation strategies. 1. J. Han, M. K. Nam, S. Shin, I. Cho, H. Jeon, J. Heo, J. Lee, M. K. Cho, D. J. Preston, M. C. Hersam, I. S. Kim, B. Shong, and W.-K. Lee, J. Am. Chem. Soc., 147(52), 41096-41108 (2025). 2. S. Shin, I. Cho, S. K. Han, J. Heo, J. Han, H. Jeon, J. Lee, M. K. Cho, D. J. Preston, I. S. Kim, B. Shong, and W.-K. Lee, ACS Nano, 19(51), 42796-42815 (2025). 3. H. Jeon, H. J. Kwon, J. Lee, S. K. Han, H. Kim, J. Heo, J. Han, S. Shin, J. Park, M. K. Cho, D. J. Preston, I. S. Kim, M. Kim, and W.-K. Lee, ACS Nano, 19(8), 9107-9120 (2025).

[소프트4-6 | 16:25]

Multiscale Engineering of Thermally Conductive Adhesives for Electronic Thermal Interfaces: Jinsoo Na(Seoul National University), Jaeho Seo(University of Illinois Urbana-Champaign), James Sangmin Choo, Sangjae Kim, Siheon Lee, Juhyuk Park*(Seoul National University)

Keywords: Thermally conductive adhesive, Multiscale filler, Thermal transport

Efficient thermal transport across material interfaces has become increasingly important with the continued increase in device integration and heat generation in advanced electronic systems. Thermally conductive adhesives provide both mechanical bonding and heat-transfer functions, but their performance is strongly influenced by the internal arrangement of thermally conductive fillers and defects formed within the adhesive layer. In this study, we designed a thermally conductive adhesive based on a multiscale ceramic filler architecture composed of fillers with different sizes and geometries. The heterogeneous filler system was designed to promote effective packing and connectivity of thermally conductive phases, while the matrix composition and processing conditions were controlled to reduce microstructural defects within the adhesive bondline. Rheological and microstructural analyses were used to identify compositions capable of maintaining both processability and structural integrity. The optimized adhesive exhibited enhanced thermal transport and interfacial bonding characteristics while retaining electrical insulation and shapeability. These results demonstrate that controlling filler architecture, microstructural densification, and bondline formation provides an effective materials-design strategy for high-performance thermal interfaces in electronic systems.

제15회 터빈 소재 및 내열합금 심포지엄
Room 2층 209/11호, 10월 30일

[터빈1-1 | 09:00] 초청강연

단결정 초내열합금에서 응고조직 및 결함형성 제어 및 분석 : 이재현*, 조대현(창원대학교), 도정현, 서성문(한국재료연구원), 권석환(한국로스트왁스), 안성철, 우한별, 구지호*(한화에어로스페이스)

Keywords: 초내열합금, 단결정, 프래클, 응고속도, 온도구배, 다결정

Ni기 단결정 초내열합금은 우수한 고온 강도 및 크리프 특성과 함께 고온에서 미세조직의 안정성으로 항공 및 발전용 가스터빈의 터빈 블레이드에 널리 적용되고 있다. 터빈블레이드의 고온 특성을 향상시키기 위해 결정립의 단결정화와 함께, 최근 고온합금 특히 Re, Ru등 고온 합금을 높이기도 하며, 비싼 Re, Ru을 줄이며 W 및 Ta 등 고용강화 원소를 높기도 하며, 주된 고온강화상인 감마프라임 형성원소를 높이기도 한다. 이와 같이 합금 조성이 복잡해지며, 단결정 응고시 응고조직 및 결정립 제어를 어렵게 한다. 단결정에서 결정립 결함은 다결정(equiaxed) 형성과 프래클(freckle)형성을 들 수 있다. 응고조직 및 결함 예측은 응고속도(V) 및 온도구배(G)에 따른 응고조직(평면형, 셀형, 수지상)과 프래클 맵(Map)을 이용한다. 일반적으로 프래클은 열전달, 수지상 길이, 응고속도 등이 고려된 식을 이용하며, 다결정은 응고속도에 따른 잠열의 일방향 열전달 식을 이용하여 결함 여부를 판단하게 된다. 본 연구에서는 프래클 형성시 열전달과 함께 액상의 유동을 적용하여 프래클 결함 형성 여부를 G/V 멥에 적용하였고, 다결정 형성도 잠열의 열전달과 함께 온도구배, kinetic효과를 고려하여 다결정/일방향 응고조건에 적용하여 보다 정확한 G/V멥을 제시하였다.

[터빈1-2 | 09:20] 초청강연

항공엔진 수명관리, 그리고 부품·소재 모델링: 최윤석*(부산대학교 재료공학부), 이두열(부산대학교 기계공학부)

Keywords: 항공터빈엔진, 초내열합금, 터빈 블레이드, 터빈 디스크, 수명 예측

항공엔진 수명관리 체계는 항공엔진 개발을 위한 설계·제작과 부품·소재 사이에서 전체를 통제하는 콘트롤 타워의 역할을 한다. 본 발표에서는 기존 항공엔진 수명관리 체계인 ENSIP (Turbine Engine Sturctural Integrity Program) 교본의 이론적 근간과 관련된 다양한 부품·소재의 수명 예측 및 모델링 기법에 대해 다룰 예정이다.

[터빈1-3 | 09:40] 초청강연

우수한 부식 저항성을 갖는 700 ℃급 페라이트계 내열합금 개발: 임가람, 박강현, 권현준, 서성문, 윤대원(한국재료연구원), 송기안(공주대학교), 장혜정(한국과학기술연구원), 정재길(전북대학교), 이호원(한국재료연구원)

Keywords:

최근 소형모듈원전, 수소 연료전지, 고온 수전해, 암모니아 크래킹 등 차세대 에너지 시스템에 대한 수요가 급증함에 따라 고온의 가혹한 부식 환경에서 버틸 수 있는 저비용 고성능 구조재료의 필요성이 증가하고 있다. 그러나 기존 내열합금은 성능과 비용, 내식성과 내열성 간의 상충 관계로 인해 산업 적용에 어려움이 크다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 고엔트로피 합금과 Ni기 초합금의 설계 개념을 저가의 페라이트계 합금에 적용한 신개념 합금 설계를 시도하였다. 고함량 Al과 Cr을 포함하는 조성 설계를 통해 고온 부식 환경에서 치밀한 Al2O3 보호피막 형성을 유도하였으며, Ni 및 Ti 함량 제어를 통해 정합 L21 상의 석출을 유도함으로써 고온 미세조직 안정성과 내열 특성을 확보하였다. 더 나아가 페라이트계 내열합금의 내열성과 성형성 간 trade-off를 극복하기 위한 전략도 모색하였다. 이를 통해 우수한 내열성, 내식성, 성형성을 동시에 만족하는 차세대 페라이트계 합금 개념을 제시하고자 한다.

[터빈1-4 | 10:00]

Enhanced Purification of Molybdenum Using a Low-Power Electron Beam Melting Strategy: Addisu Boshe Botto(Korea Institute of Industrial Technology, University of Science and Technology), Ui Jun Ko(Korea Institute of Industrial Technology, Korea University), Chan Gyu Kim(Korea Institute of Industrial Technology, Inha University), Chung Tae Kim(Addis Ababa Science and Technology University), Kyoung Tae Park, Jae Jin Sim*(Korea Institute of Industrial Technology)

Keywords: Electron-Beam Refining, Refractory Metals, Refining Efficiency, Preferential Vaporization

Molybdenum combines high thermal and electrical conductivity with a melting point of ~2, 896K, high-temperature strength, elastic shear modulus of 126GPa, and low thermal expansion coefficient, $5.4\times10^{-6}K^{-1}$ at 20~1, 000 ºC. This provides stability during thermal cycling, making it suitable for supporting aerospace, microelectronic, X-ray-target, and high-temperature furnace applications. Refining of refractory metals such as molybdenum is challenging because the temperatures required to volatilize impurities also increase evaporation and reactivity of the metal making it susceptible to loss and contamination, respectively. Electron beam melting (EBM) minimizes contamination potential by means of skull formation where the water chilled cupper crucible maintains a solid surface contact throughout the operation. It enables the purification of refractory metals through intense localized heating and preferential evaporation of impurities under $<10^{-6}$atm high vacuum. However, the steep thermal gradients rapidly dissipate heat and destabilize the melt pool, creating a narrow operating window between premature solidification at low beam power and excessive evaporation and

splattering at high power. This study expands the operating window by following a low power melting strategy through heat loss minimization technique that enabled stable keyhole formation. Keyholes form as a result of recoil pressure due to rapid surface evaporation at the beam focus. Its depth and associated melt-pool ripples increase with beam intensity and eventually it closes from the top near the surface, trapping vapor in a bubble. The rapid collapse of these bubbles in high vacuum supposedly produces splattering that ejects valuable metal out of the crucible. To overcome this problem and to achieve the required refining temperature at lower beam intensity, heat transfer to the water-cooled copper crucible was restricted using geometric choke points. A two-stage refining experiment was performed that increased the purity of 96.8% feedstock to 4N-grade molybdenum. Sufficient melt volume was achieved at 34kV by 250~580mA beam while maintaining a shallow, stable keyhole that suppressed splattering loss. The maximum residence time was < 30 minutes after attaining full melting. The total mass loss from the initial 250g raw material was around 41 grams, including fragmentation loss while trying to dismember the nugget from the seed for sampling after each refining. Reduced heat dissipation also slowed solidification upon cooling, producing elongated columnar grains on top of a narrow dendritic region at the ingot base. X-ray diffraction showed a dominant Mo (200) peak, indicating pronounced crystallographic consistency with directional grain growth. These results demonstrate that it was possible to enhance refining efficiency of electron beam smelting of molybdenum using a low-power electron beam strategy by controlling heat dissipation and keyhole stability.

[터빈2-1 | 10:30] 초청강연

격자불일치 제어 기반 적층 변형시효균열 저감형 Inconel 738LC variant 개발 및 상변태 강화 발현 기구: 홍현욱*, 김태경, 이아름, 김준혁(국립창원대학교), 고원석(고려대학교)

Keywords: Additive manufacturing, High γ′ fraction, Alloy design, γ/γ misfit, Creep

본 강연에서는 고분율 γ′ 석출 강화형 적층제조(AM) 맞춤형 초내열합금의 새로운 설계 패러다임을 제시하고자 한다. 우수한 가성비를 유지하면서도 적층 시 발생하는 균열 감수성을 획기적으로 낮추기 위해, 밀도함수이론(DFT) 계산과 대규모 열역학 시뮬레이션을 결합하여 Inconel 738LC를 베이스로 하는 신합금을 설계하였다. γ′ 석출 과정에서 인장 잔류 응력으로 인해 발생하는 응변 시효 균열(SAC)을 억제하기 위해, 의도적으로 양(+)의 γ/γ′ misfit을 유도하여 압축 잔류 응력을 형성하는 방식이다. 이를 위해 Inconel 738LC를 기반으로 900 ºC 고온에서도 안정적인 양의 misfit 유지하는 'AM738' 합금을 설계하였다. 특히 Ta를 첨가함으로써 부분 전위 전단에 의한 국부 상변태 강화(η/χ 변태)를 유도하여, γ′ 강화 효과를 극대화하였다. 그 결과 AM738은 레이저 분말베드 융융(L-PBF) 공정에서 균열이 전혀 없는 우수한 적층성을 보여주었으며, 고온 노출 후에도 안정적인 미세조직을 유지하였다. 결론적으로 본 강연을 통해 고분율 γ′ 석출 강화형 초내열합금의 '성분-미세조직-물성' 상관관계에 대한 학술적 통찰을 공유하고, 차세대 적층제조 맞춤형 합금 설계의 새로운 접근 방향을 논의하고자 한다.

[터빈2-2 | 10:50]

합금원소 및 열처리 조건에 따른 IN718 조형체의 크리프 특성: 정중은*(한국재료연구원), 심영래(한국재료연구원, 동아대학교), 이형수, 서성문, 김인수, 도정현, 이상원, 최백규, 정인용(한국재료연구원)

Keywords: IN718, L-PBF, Additive manufacturing, Creep

IN718 합금은 γ″ 및 γ′ 석출강화를 통해 우수한 강도와 크리프 저항성을 나타내는 대표적인 Ni기 초내열합금으로, 복잡형상 부품 제조를 위해 적층·조형 공정에도 널리 적용되고 있다. 그러나 조형체의 건전성과 고온 기계적 특성, 특히 크리프 특성은 주요 합금원소뿐만 아니라 규격 범위 내에서 변화하는 미량원소의 함량과 후속 열처리에 의해 크게 달라질 수 있다. 이에 본 연구에서는 IN718 조형체를 대상으로 Si 및 Al 함량과 용체화·시효열처리 조건이 미세조직과 크리프 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 먼저 IN718 분말 내 미량 Si 함량이 증가함에 따라 조형 과정에서 균열 민감도가 증가하는 경향을 확인하였다. 또한 Al 함량을 변화시킨 조형체의 크리프 특성을 비교한 결과, Al 함량에 따른 석출 경화능의 변화가 크리프 변형 및 파단연성에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 열처리 영향 평가에서는 용체화열처리 조건 및 시효열처리 조건을 고려하였으며, 열처리 조건에 따른 재결정 발생 여부가 크리프 특성에 가장 큰 영향을 미쳤다. 종합적으로 IN718 조형체의 크리프 특성, 특히 파단연신율 향상을 위해서는 규격 범위 내에서도 Si 함량을 가능한 낮게 관리하여 균열 민감도를 억제하고, Al 함량을 낮추어 과도한 경화를 완화하는 것이 유효하였다. 또한 용체화열처리 시 재결정을 억제하여 미세한 결정립 조직을 유지함으로써 높은 Schmid factor를 갖는 결정립의 수를 증가시키고 국부 변형 집중을 완화하여 보다 균질한 크리프 변형을 유도하는 것이 중요하였다.

[터빈2-3 | 11:10] 초청강연

적층제조를 활용한 우주발사체용 초내열합금 기반 경사기능재 제조: 정민재, 성예찬, 김범준(경상국립대학교), 서성문(한국재료연구원), 김형섭(포항공과대학교, 도호쿠대학교), 이형수, 김정기*(경상국립대학교)

Keywords: 초내열합금, 경사기능재료, 적층제조

적층제조를 활용한 우주발사체의 부품 조형 사례가 증가함에 따라 복잡 형상을 가지면서도 패스너를 최소화하는 일체화 부품 조형 역시 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 특히, 이종 소재를 활용한 일체화 부품의 조형은 전체 발사체의 패스너를 최소화할 수 있다는 메리트가 있음에도 불구하고, 이종접합 계면부에서의 미세조직 및 기계적 특성의 불확실성에 대한 리스크를 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 적층제조와 이종의 니켈합금(Ni20Cr & IN738LC)을 활용해 연속적인 조성변화가 나타난 경사기능재를 조형 후, 미세조직 및 기계적 특성 변화에 대해 검증하였다. 그 결과, Ni20Cr 분율 증가에 따른 C 희석에 따라 경사기능재 내에서 탄화물 분율의 변화가 발생함과 동시에 Al, Ti 희석이 발생하면서 열처리 후의 γ′ 분율과 크기에도 차이가 발생함을 확인하였다. 이러한 복잡한 미

세조직학적 변화는 경사기능재의 기계적 특성에 영향을 미치게 되며, 경사기능재의 열처리 이후 형성된 γ′과 탄화물은 경사기능재의 물성이 IN738LC와 유사함을 검증하였다. 본 결과를 통해 레이저 기반 적층제조를 활용해 경사기능재 내에 연속적인 조성 변화를 유도할 경우, 상 분포 및 이차상을 포함한 복합적인 미세조직 변화를 유도하므로 계면부에서의 안정성 검증을 위한 심층적인 연구가 필요함을 알 수 있다.

[터빈2-4 | 11:30] 조청강연

난용접성 터빈용 초내열합금의 적층제조를 위한 강화입자 이식 기반 분말 표면 설계 전략: 이태규*, 이민제(국립한밭대학교)

Keywords: CM247LC 초내열합금, 금속 적층제조, 분말 개질, SMART 분말, 균열 억제

가스터빈 고온부 블레이드 및 베인에 사용되는 CM247LC 등 고 γ′ 니켈기 초내열합금은 대표적인 비용접성 합금으로, 레이저 적층제조 및 보수 공정에서 응고균열이 고질적 난제로 남아 있다. 공정변수 최적화, HIP 후처리, 조성 재설계 등 기존 접근은 균열의 근원인 응고 말기 잔류 액막을 제어하지 못하거나 합금 고유의 고온 특성을 희생하는 한계가 있다. 본 발표에서는 이 문제를 분말 피드스톡 설계의 관점에서 접근한, 표면개질·강화재 이식(Surface Modification and Reinforcement Transplantation, SMART) 공정과 레이저 분말 직접에너지적층(DED)의 접목 사례를 소개한다. SMART는 밀링볼 없이 이종 입자 간 초고속 충돌만으로 모분말 표면에 강화재를 이식하는 고상 분말 개질 공정으로, 분말의 구형도와 유동도를 유지한 채 표면합금화·코팅·복합화 분말을 제조할 수 있다. 이를 DED와 결합하면 동일한 적층 조건에서 첨가물의 종류와 함량만을 체계적으로 변화시킬 수 있어, 신합금·복합재의 신속 스크리닝 플랫폼으로 기능한다. 본 연구에서는 이 플랫폼을 CM247LC에 적용하여 ZrC, TiC, HfC 개질 분말을 제조하고 적층체의 응고균열 거동과 기계적 물성을 비교하였다. 그 결과 ZrC는 첨가량에 비례하는 균열 억제 효과를 보여 as-built 상태에서 균열 면적률을 최대 92%까지 감소시켰으며, 이는 용해된 Zr이 응고 말기 잔류 액상에 농축된 뒤 2차 (Zr, Hf)C로 재석출되어 균열 전파 경로인 최종 액막을 분절하는 용해–재석출 기구에 기인함을 규명하였다. ZrC 개질 합금은 HIP나 후열처리 없이도 상온과 760 ºC 모두에서 강도와 연성의 균형 잡힌 동시 향상을 달성하였다. 이상의 결과는 분말 개질과 적층 공정의 결합이 터빈 고온부품의 적층제조 및 보수에서 응고균열 제어와 구조적 신뢰성 확보를 위한 실용적 전략이 될 수 있음을 보여주며, 본 발표에서는 SMART–DED 플랫폼의 타 합금계 확장 가능성까지 함께 논의한다.

[터빈3-1 | 13:30] 조청강연

Alloying effects in Nb-Si-based alloys: Microstructural evolution and mechanical properties: Sangwon Lee*, Jueun Kim, Bongchul Kim, Jeonghyeon Do, Joong Eun Jung, In Soo Kim, Baig Gyu Choi(Korea Institute of Materials Science)

Keywords: Nb-Si alloy, Aircraft Engines, High-temperature Materials, Microstructures, Mechanical Properties

Ni-based superalloys have long served as the cornerstone materials for high-temperature applications such as power-generation gas turbines and aircraft jet engines, owing to their creep, oxidation, and fatigue resistance above 1000 ºC. However, as operating temperatures approach ~80% of their melting point, these alloys are now confronting intrinsic limitations, and alternative high-melting-point materials are required to further raise the turbine inlet temperature. Nb–Si in situ composites, which combine a melting point over 1000 ºC higher than that of Ni with the high-temperature strength of silicides and an extremely low density, have emerged as a promising candidate. In this study, the alloying effects in seven-component Nb–Si–Ti-based alloys were investigated by systematically varying the contents of Mo, Ta, Al, and Hf. Microstructural evolution—including the constituent phases and the volume fraction, morphology, and distribution of the Nb solid solution and Nb_5Si_3 silicide—was characterized as a function of the alloying element content, and the corresponding changes in mechanical properties were evaluated. By clarifying the individual role of each alloying element, this work is intended to serve as fundamental data for the design of next-generation high-temperature structural materials beyond Ni-based superalloys.

[터빈3-2 | 13:50] 조청강연

Compositional effects of Nb and Mo on γ′/γ phase stability and creep resistance of Nimonic 80A superalloys: Shaik Mahammad Ali, Hyungsoo Lee, Dae Won Yun, Sangwon Lee, Young Soo Yoo, Seong-Moon Seo, Hi Won Jeong(Korea Institute of Materials Science)

Keywords: Ni-based superalloys, Creep deformation, Carbide precipitation, Partitioning behaviour, Dislocation interaction.

This study investigates the combined effects of minor Nb and Mo additions on the high-load creep behaviour of modified Nimonic 80A superalloys at 750 ºC under 356 MPa. The combined addition of Nb and Mo achieved the maximum creep life of 262 h, more than twice that of the base alloy (134 h), with a reduced steady-state creep rate of 0.1×10^{-3} h^{-1} compared to 1.1×10^{-3} h^{-1} in the Mo-only alloy. Atom probe tomography confirmed strong partitioning of Nb to γ′ ($k \approx 4.34–5.68$) and Mo to γ ($k \approx 0.66–0.68$), leading to a maximum solid-solution strengthening of 451 MPa, calculated using the Labusch model. The γ′ precipitate size varied from 27.8 nm to 45.9 nm, governing the transition from dislocation shearing to Orowan looping. Lattice misfit remained between -0.21% and -0.26% in heat-treated samples but increased to 0.37–0.45% after creep due to solute redistribution and coarsening. The Mo-only alloy exhibited severe dynamic recrystallization (DRX: upto 51%) and bimodal grain structure, accelerating creep damage. Conversely, the combined addition of Nb and Mo optimized the γ′ size, suppressed DRX, enhanced solid-solution strengthening of the γ matrix, and reduced strain localization, resulting in superior creep resistance.

[터빈3-3 | 14:10] 초청강연

LPBF로 제조한 IN939 동공 LCF 시편의 as-built 표면 조도가 저주기 피로 특성에 미치는 영향: 이형수*, 샤익알리, 윤대원, 정희원, 정인용, 유영수, 서성문(한국재료연구원)

Keywords: 가스터빈, 초내열합금, LPBF, LCF

가스터빈의 효율 향상을 위해서는 블레이드의 냉각 성능을 높일 수 있는 복잡한 내부 유로 설계가 요구된다. 그러나 기존 정밀주조 공정은 일부 복잡한 내부 형상의 구현에 한계가 있으며, LPBF (Laser Powder Bed Fusion) 공정은 이러한 설계 제약을 극복할 수 있는 대안으로 주목받고 있다. 한편, LPBF로 제조된 내부 유로는 기계적 후처리가 제한되므로, as-built 표면의 조도와 결함이 피로 특성에 미치는 영향을 규명하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 LPBF로 제조한 IN939 합금의 내부 유로 표면 상태와 적층 공정변수가 고온 저주기 피로(Low-Cycle Fatigue, LCF) 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 벌크 및 컨투어 공정변수의 조합을 최적화하여 상대적으로 에너지 입력이 높은 조건과 낮은 조건의 두 가지 파라미터 세트를 선정하였다. 각 파라미터를 이용하여 내부 유로가 없는 봉상 시편과 중심부에 직경 1 mm 및 2 mm의 유로를 갖는 봉상 시편을 적층하였다. 적층 후 내부 유로가 없는 시편은 solid 조건, 직경 1 mm 유로는 방전가공을 통해 2 mm로 확장하여 EDM 가공 표면을 갖는 as-machined 조건, 직경 2 mm 유로는 추가적인 내부 가공 없이 as-built 표면을 유지한 세 조건의 시편을 평가하였다. 이에 따라 solid, as-machined 및 as-built의 세 가지 표면 조건에 대하여 표면조도를 측정하고, 760 ºC 및 변형률 범위 1.2%에서 LCF 시험을 수행하였다. 파단수명은 as-built, as-machined, solid 조건 순으로 증가하였다. Solid 시편에서는 고에너지 파라미터가 저에너지 파라미터보다 높은 파단수명을 나타냈다. 반면, as-built 및 as-machined 조건에서는 고에너지 파라미터로 제조한 시편의 파단수명이 오히려 더 낮게 나타났다. 이는 LPBF IN939의 피로수명이 벌크 건전성뿐만 아니라 내부 유로의 표면 상태 및 공정변수와의 상호작용에 크게 영향을 받을 수 있음을 보여준다.

항공재료
Room 3층 컨퍼런스, 10월 30일

[항공1-1 | 09:00]
직접용융증착법으로 제조된 IN939 합금의 후열처리 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 평가: 김영우, 강호성, 성예찬, 김정기*(경상국립대학교)
Keywords: IN939, Directed Energy Deposition, Heat treatment, microstructure, Mechanical Properties
최근 에너지 수요 증가와 연료 소비 절감의 필요성이 커짐에 따라 가스터빈의 고효율화가 지속적으로 요구되고 있다. 이에 따라, 석출강화형 Ni기 초내열합금을 활용한 복잡한 냉각 유로 및 고도화된 형상 설계가 요구된다. 이를 구현하기 위해서는 높은 형상자유도 및 빠른 공정속도를 갖는 직접용융증착법(Directed Energy Deposition, DED)적용이 필요하다. 석출강화형 Ni기 초내열 합금 중 하나인 IN939합금은 우수한 고온강도 및 크리프 저항성을 기반으로 가스터빈 부품의 핵심 소재로 널리 사용되고 있다. 다만, DED 공정으로 제조된 IN939합금은 급속응고와 반복적인 열이력에 의해 원소 편석 및 비평형 미세조직이 형성될 수 있으며 이를 완화하기 위해 일반적으로 용체화 후 시효 처리(Solution Treatment + Aging, STA)가 적용된다. 그러나, 일반적으로 사용되는 용체화 처리는 공정시간과 비용을 증가시킬 뿐만 아니라, DED 공정에서 발생하는 방향성 조직을 변화시킬 수 있다. 이에 본 연구에서는 용체화 처리 생략 가능성을 검토하고자 DED로 제조된 IN939 합금에 직접시효처리(Direct Aging, DA)를 적용하고, 적층 직후(As-built, AB), STA조건과 비교분석 하였다. 각 조건에 대하여 상온 및 고온 인장시험을 수행하여 기계적 특성을 평가하였으며, γ′(Ni_3(Al, Ti)) 상 및 탄화물 등 이차상의 석출거동을 분석하였다. 이를 바탕으로 후열처리 조건에 따른 미세조직 변화와 기계적 특성 간의 상관관계를 규명함으로써 DED 공정으로 제조된 IN939 합금의 후열처리 공정 단순화 및 열처리 조건 설계 방향을 제시하고자 한다.

[항공1-2 | 09:15]
A Mitigation Strategy for Hot Cracking in LPBF-Processed IN738LC Superalloy via Atmospheric Gas Control: Hanul Jeon*, Seunghoon Lee, Jungwook Cho*(Pohang University of Science and Technology)
Keywords: Additive Manufacturing, LPBF, Ni based superalloy, IN738LC, Crack Mitigation
Nickel-based superalloy IN738LC manufactured via laser powder bed fusion (LPBF) suffers from severe hot cracking susceptibility due to high thermal stresses and micro-segregation during rapid solidification. In this study, we investigated the effects of atmospheric gas control (Ar vs. N2) under identical volumetric energy density (VED) conditions on the crack suppression and microstructural evolution of as built IN738LC. Microstructural characterization via electron microscopy (SEM/TEM), thermodynamic calculations, and mechanical property testing were performed. The results revealed a reduction in crack density under the N2 atmosphere compared to the conventional Ar atmosphere. Microstructural analysis confirmed the precipitation of in-situ nitrides in the interdendritic regions. This study demonstrates that atmospheric control provides a synergistic pathway—integrating segregation alleviation, grain refinement, and crack path deflection—for crack-free additive manufacturing of hard-to-weld superalloys.

[항공1-3 | 09:30]
High-Temperature Damage Mechanisms and Evaluation Techniques for Nickel-Based Superalloys: HaSeong Baek, Tea-Sung Jun*(Incheon National University)
Keywords: Ni-based superalloy, creep, low-cycle fatigue, creep-fatigue
Nickel-based superalloys are widely used in critical high-temperature components such as gas turbine blades and disks, where elevated temperatures, cyclic loading, long-term hold loading, and oxidizing environments interact in complex ways. Consequently, component life is largely determined not by single creep or fatigue, but by localized damage resulting from low-cycle fatigue (LCF), creep-fatigue interactions, and the interaction between the microstructure and the environment. Based on recent research results, this presentation reviews the major high-temperature damage mechanisms of Ni-based superalloys and the development trends of evaluation technologies to elucidate them. The γ/γ′ or γ/γ″ microstructure, precipitate size and shape, grain boundaries, carbides, and manufacturing defects govern deformation, crack initiation, and propagation. Furthermore, with increasing temperature, the major deformation mechanisms shift from γ′ shearing and planar slip to cross-slip, Orowan bypass, and thermally activated dislocation climb. Furthermore, prolonged exposure to elevated temperatures combined with cyclic and sustained loading promotes γ′ coarsening and rafting, stress relaxation, creep cavity formation, dislocation network evolution, and localized deformation redistribution. In polycrystalline and powder metallurgy alloys, the effects of grain-boundary oxidation and cavitation intensify with increasing dwell time, potentially resulting in a transition from transgranular to intergranular cracking and an accelerated rate of fatigue crack growth. On the other hand, under some high-temperature creep-fatigue conditions, cyclic life and mechanical response have been reported to saturate with increasing dwell time, demonstrating the limitations of evaluating damage based solely on simple cycle life. Evaluation technologies are expanding beyond conventional strain-controlled fatigue and creep-fatigue tests and fractography to include the quantification of local damage such as KAM, IQ, and GND using SEM, TEM, EBSD, and TKD, as well as the measurement of crack-tip deformation using

high-temperature in-situ SEM and digital image correlation (DIC). Multiscale life prediction is also being developed by combining crystal plasticity finite element (CPFE) analysis with grain-boundary cavity models. This approach is evolving to directly link macroscopic life with microstructural damage and to incorporate time-dependent deformation and environmental effects into life assessment.

[항공1-4 | 09:45]

열처리를 고려한 IN718 DED의 최적 적층조건 탐색: 김성원, 유진영(부산대학교), 권시은, 김정기(경상국립대학교), 이태경*(부산대학교)

Keywords: IN718, DED

IN718은 우수한 내열성, 내산화성, 내식성을 가진 니켈계 초합금으로 해양, 우주, 에너지 산업 등에 사용된다. 그러나 IN718의 낮은 가공성으로 인하여 적층 제조 기술 중 하나인 direct energy deposition(DED) 공정이 적극적으로 활용되고 있다. 이러한 장점에도 불구하고 DED 공정에서 부적절한 적층 조건이 선택될 경우 net shape 확보가 어려울 뿐만 아니라 매우 낮은 형상 정확도를 가지는 적층재가 제조될 수 있다. Net shape 또는 near net shape 구현이 AM 공정이 가지는 핵심 장점인 만큼 우수한 형상 정확도를 확보할 수 있는 공정 파라미터의 탐색은 필수적이다. 이와 더불어 IN718은 석출경화 합금으로서 추가적인 열처리를 통해 γ', γ'' 등의 석출상을 확보하는 것이 중요하며 이러한 석출상은 초기 미세조직에 영향 받는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 DED 적층 데이터를 활용하여 Gaussian process regression 모델을 구축 후 형상 정확도를 기준으로 설계 공간 내 최적 파라미터 영역을 식별하였다. 식별된 적층 조건에서 BSE와 EDS를 활용하여 primary dendrite arm spacing과 Laves 상의 분율 및 크기를 분석한 결과, as-built 재에서의 초기 조직의 차이를 확인하였으며 열처리의 효과를 평가하기 위한 추가 적층을 설계하였다. 최종적으로 3개의 국소 최적 조건을 도출하였으며 해당 조건으로 각각 6개의 시편을 적층하였다. 적층된 시편에 720 ºC에서 각각 0(as-built), 0.5, 1, 2, 4, 8시간 동안 열처리를 실시한 후, 미세조직 및 경도의 변화를 분석하였다. 결과적으로 적층조건에 따른 미세조직과 그에 따른 열처리 결과를 확인하였다.

[항공1-5 | 10:00]

직접용융증착법으로 제조된 Ni20Cr/IN738LC 경사기능재료의 조성 구배에 따른 미세조직 변화 및 기계적 특성 : 정민재, 성예찬, 김범준(경상국립대학교), 서성문(한국재료연구원), 김형섭(포항공과대학교, 도호쿠대학), 이형수*(한국재료연구원), 김정기*(경상국립대학교, 경남항공방산과학기술원)

Keywords: Functionally Graded Materials, Directed Energy Deposition, Ni-based Superalloy, Mechanical Property, Microstructure

직접용융증착법 (Directed Energy Deposition, DED)을 활용한 High-grade Ni기 초내열합금 부품의 유지 보수 연구가 활발히 수행되고 있으나, 기존 용사 기반 열차폐코팅 구조에서는 기지재와 본드코트 사이의 급격한 조성 및 물성 차이와 제한된 결합 특성으로 인해 계면 건전성을 확보하는데 한계가 존재한다. 본 연구에서는, DED를 통해 IN738LC 초내열합금과 Ni20Cr 본드코트의 경사기능재 (Functionally Graded Materials, FGM)를 제조하여 연속적인 계면에서의 미세조직 변화와 기계적 거동에 대해 분석하였다. DED 공정 중 반복적인 레이저 스캔 및 Layer 간 재용융은 인접 영역 사이의 상호 혼합을 유도하였으며, 이에 따라 FGM 내부에서는 계단식 조성 변화가 아닌 점진적인 조성 구배가 형성되었다. FGM의 하단부는 IN738LC에서 기인한 Al, Ti와 같은 γ'을 형성하는 원소가 반복적인 재용융과 인접 층 간 상호 혼합에 의해 희석되어 기존 IN738LC와는 다른 이차상 형성 거동을 보인다. 감소된 Al, Ti 함량은 γ'상의 안정성과 석출 거동에 영향을 주며 γ'의 분율 및 형상을 변화시켰다. FGM의 영역 별 경도는 전반적으로 γ'상의 분율에 따라 증가하였으며, Cr-rich $M_{23}C_6$ 탄화물이 형성된 영역에서는 추가적인 강화효과가 나타났다. 또한 열처리 전 Ni20Cr/IN738LC FGM의 기계적 특성은 기존 Ni20Cr과 IN738LC의 혼합법칙 (Rule of Mixtures) 예측 값과 유사하였지만 열처리 후 거동은 석출강화형 합금인 IN738LC의 거동과 유사하게 나타났다. 이러한 결과는 DED를 활용한 이종소재의 경사기능구조를 설계할 때 상호 혼합에 따른 조성 구배와 후 열처리 중 이차상 발달이 미세조직 변화에 큰 영향을 미치는 것을 보여준다.

[항공1-6 | 10:15]

선택적 레이저 용융 공정으로 제조된 γ-TiAl 합금의 응고 경로에 따른 라멜라 방향성 제어: 박성현*, 김채원(한국재료연구원), 타카요시 나카노(오사카대학교), 김성웅(한국재료연구원)

Keywords: γ-TiAl 합금, 선택적 레이저 용융 공정, 응고 경로, 라멜라 방향성

γ-TiAl 합금은 낮은 밀도와 우수한 고온 기계적 특성으로 인해 차세대 경량 내열 소재로 주목받고 있으며, 특히 α_2/γ 라멜라 조직의 방향성은 기계적 특성에 큰 영향을 미친다. 기존에는 방향성 응고 공정을 통해 라멜라 조직을 특정 방향으로 배열하는 방법이 활용되어 왔으나, 공정 제어가 까다롭고 복잡 형상의 부품 제조에 한계가 있다. 반면, 선택적 레이저 용융 공정은 복잡 형상의 부품 제조가 가능할 뿐만 아니라, 급속 응고 과정에서 형성되는 결정학적 집합조직과 후속 상변태를 활용하여 라멜라 방향성을 제어할 수 있는 가능성을 제공한다. 따라서 본 연구에서는 서로 다른 응고 경로를 갖는 두 종류의 γ-TiAl 합금을 선택적 레이저 용융 공정으로 제조하고, 응고 및 상변태 거동이 최종 α_2/γ 라멜라 방향성에 미치는 영향을 비교하였다. β 응고형 합금의 경우, 적층 상태에서 침상형 α_2상이 주로 형성되었으며, 하나의 prior β 결정립 내부에서 세 개의 α_2 결정학적 variant가 선택적으로 발달하였다. 이후 열처리에 의해 이들 α_2 variant는 α_2/γ 라멜라 조직으로 변태하였고, 적층 방향을 기준으로 0 º 및 ±45 º의 세 가지 우선 방향을 갖는 라멜라 조직이 형성되었다. 반면, 포정 반응을 통해 응고하는 합금에서는 적층 상태에서 서로 다른 결정학적 배향을 갖는 두 α_2 층으로 구성된 crystallographic lamellar microstructure(CLM)가 형성되었다. 열처리 후에는 이러한 CLM이 적층 방향에 대해 각각 0 º와 90 º로 배열된 bi-directional α_2/γ 라멜라 조직으로 변태하였다. 이와 같은 라멜라 방향성의 차이는 각 합금의 서로 다른 응

고 경로와 이에 수반되는 결정학적 집합조직 및 상변태 거동에 기인한다. 본 연구를 통해 γ-TiAl 합금의 응고 경로가 최종 라멜라 방향성을 결정하는 중요한 인자임을 확인하였으며, 합금 조성과 선택적 레이저 용융 공정을 함께 최적화함으로써 목적에 맞는 라멜라 방향성을 설계할 수 있는 가능성을 제시하였다.

[항공2-1 | 10:40]
Thermal Shock and Fatigue Test System for Aerospace Metallic Materials: Seok-Woo Hong, Se-Ho Kim*(Korea Univ.)
Keywords: 금속, 열피로, 산화

Despite the growing demand for reliable evaluation methods for metallic materials exposed to extreme thermal environments, standardized international protocols for flame-heating-based high-temperature resistance testing remain insufficient. This lack of standardization makes it difficult to compare material performance under realistic thermal loading conditions. Therefore, this study investigated the thermal shock and fatigue cracking behavior of aerospace metallic materials using a custom-developed flame-heating-based testing system. In this work, a thermal shock and fatigue testing apparatus was designed and developed to reproduce thermal environments similar to those encountered under actual service conditions. Initial tests were conducted using hot-stamping steel (SABC1760) and SUS304 to verify the feasibility of the developed testing system. Subsequently, commercially available Ni-based, Co-based, and Cr-based alloys with superior high-temperature resistance were evaluated to establish reference data and compare the thermal shock resistance of different alloy systems. The specimens were subjected to controlled thermal cycling with a temperature difference exceeding 800 K, and oxidation behavior was examined under repeated thermal shock and fatigue loading. After testing, the surface and cross-sectional microstructures of the specimens were analyzed using Optical Microscope (OM), Scanning Electron Microscopy/Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM/EDS), and Electron Backscatter Diffraction (EBSD). These analyses were used to examine oxidation behavior and microstructural changes caused by repeated thermal loading. Furthermore, Atom Probe Tomography (APT) analysis near oxide layers was performed to evaluate compositional differences at oxide and matrix, thereby clarifying oxidation mechanism. Based on the baseline results obtained from these commercial alloys, newly developed alloys will be evaluated under more severe thermal cycling conditions in future work. High-cycle thermal shock tests will be performed to examine their long-term durability. This approach is expected to enable a systematic understanding of how alloy composition and microstructural features affect resistance to thermal shock and fatigue. Overall, this study provides experimental data and a practical technical foundation for the qualification of high-performance metallic materials for aerospace applications.

[항공2-2 | 10:55] [Canceled]
W 함량에 따른 주조용 γ-TiAl 합금의 고온 변형거동 연구: 김채원(한국재료연구원, 국립금오공과대학교), 박성현, 김성웅*(한국재료연구원)

[항공2-3 | 11:10]
Influence of γ′ dissolution condition on the creep behavior of serrated grain boundaries in a wrought Ni-based superalloy: Jaejun Jeong*, Yeonho Choi, Seongju Kim(Pohang University of Science and Technology), Seong-Moon Seo(Korea Institute of Materials Science), In-Ho Jung (Seoul National University), Jehyun Lee (Changwon National University), Jung-Wook Cho*(Pohang University of Science and Technology)
Keywords: Ni-based superalloy, Waspaloy, Grain boundary serration, Creep

Grain boundary serration has generally been reported to improve the creep resistance of wrought Ni-based superalloys by suppressing grain boundary sliding and crack propagation. In this study, the influence of the γ′ dissolution state on grain boundary serration and creep behavior was investigated using Waspaloy. Differential scanning calorimetry (DSC) and microstructural observations revealed that solution treatment at 1050 ºC resulted in incomplete γ′ dissolution, whereas treatment at 1080 ºC achieved complete dissolution. Based on these solution conditions, serrated and non-serrated grain boundary microstructures were introduced through different cooling routes followed by standard aging treatment. Creep tests were conducted at 750 ºC under an applied stress of 550 MPa. Serrated specimens exhibited substantially higher rupture strains and underwent tertiary creep deformation prior to rupture. However, the effect of grain boundary serration on rupture life varied with the γ′ dissolution condition. The specimen subjected to serration treatment after complete γ′ dissolution showed improved creep resistance, whereas serration introduced under incomplete dissolution conditions resulted in reduced creep life. These results indicate that the creep response of serrated grain boundaries is influenced by the γ′ dissolution condition established during solution treatment.

[항공2-4 | 11:25]
Al7xxx계열 빌렛의 Direct-Chill 주조 결함 제어를 위한 데이터 기반 공정 최적화: 신윤우, 최현성*, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남(한국재료연구원)
Keywords: Al7xxx계열 알루미늄 합금, Direct-Chill 주조, 응고 결함, 편석, 머신러닝

고강도 Al7xxx계 알루미늄 합금은 높은 비강도와 우수한 기계적 특성으로 인해 항공기 구조용 부품에 널리 적용되고 있다.

특히 대형 압출재 및 단조재 제조를 위한 원소재로 사용되는 대구경 빌렛의 경우, 소재의 건전성과 균질성을 확보하기 위한 주조공정 제어가 매우 중요하다. 그러나 Al7xxx계 합금은 높은 합금원소 함량과 넓은 응고구간으로 인해 Direct-Chill(DC) 주조 과정에서 열간균열(hot tearing), 기공(porosity), 고스트 라인(ghost line) 및 편석 등의 응고 결함이 발생하기 쉽다. 이러한 결함은 응고 과정에서의 열적·기계적 거동과 밀접하게 연관되어 있으며, 주조 속도, 냉각 강도 및 열전달 조건과 같은 공정변수에 크게 영향을 받는다. 따라서 항공용 고품질 Al7xxx계 소재의 제조를 위해서는 DC 주조공정 조건과 결함 발생 거동 간의 상관관계를 체계적으로 분석하고 이를 기반으로 최적 공정조건을 도출할 필요가 있다. 본 연구에서는 항공용 Al7xxx계 대형 빌렛의 DC 주조공정에서 발생하는 응고 결함을 제어하기 위한 데이터 기반 공정 최적화 방법을 제안하였다. 연구 대상은 직경 11 inch급 Al7xxx계 DC 주조 빌렛으로 설정하였으며, 빌렛 단면 위치에 따른 국부 응고 거동과 편석 특성을 고려하여 결함 발생 가능성을 평가하였다. 주조 해석 프로그램인 THERCAST를 이용하여 다양한 주조조건에서의 온도 변화, 고상분율 분포 및 응고 결함 관련 지표를 예측하였다. 또한 주조 속도, 냉각 조건 및 열전달 조건을 주요 공정변수로 선정하고 실험계획법(Design of Experiments, DOE)을 적용하여 체계적인 주조공정 해석 데이터베이스를 구축하였다. 구축된 해석 데이터베이스를 기반으로 XGBoost 머신러닝 대리모델(surrogate model)을 학습하여 주조조건에 따른 빌렛 내부의 결함 발생 민감도를 예측하였다. 이후 베이지안 최적화(Bayesian optimization)를 적용하여 안정적인 응고 거동을 유지하면서 열간균열, 기공 및 고스트 라인의 발생 가능성을 최소화할 수 있는 주조공정 조건을 탐색하였다. 또한 SHAP(SHapley Additive exPlanations) 분석을 통해 각 공정변수가 결함 발생에 미치는 상대적 영향도를 정량적으로 평가함으로써 머신러닝 예측결과의 해석 가능성을 확보하고, 주요 공정인자와 결함 발생 거동 간의 상관관계를 분석하였다. 본 연구를 통해 공정해석, 머신러닝 및 설명가능 인공지능을 연계한 데이터 기반 DC 주조공정 최적화 방법을 제시하였다. 제안된 방법은 대구경 Al7xxx계 빌렛의 응고 건전성을 향상시키고 주조 결함을 저감하기 위한 공정조건 선정에 활용될 수 있으며, 향후 항공용 고강도 알루미늄 소재의 안정적인 제조와 후속 압출공정의 신뢰성 향상을 위한 디지털 공정설계 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[항공2-5 | 11:40]

수소 환경에서 SSRT를 이용한 항공용 적층제조 IN718 합금의 수소취성 거동 분석: 조은준, 정유인(한국항공우주산업), 김상식*(경상국립대학교)

Keywords: Additive Manufacturing, Inconel 718, Hydrogen-enhanced fracture, SSRT

항공기 엔진 디스크, 터빈 블레이드 같은 부품들은 고온, 고압, 고속 회전등 극한 환경에서 장기간 운용됨에 따라 수명 예측에 대한 요구도 및 신뢰성 평가에 대한 기준이 매우 보수적이다. IN718 합금은 고온환경용 니켈기 초합금 중 가장 널리 사용되는 합금으로서 극한 조건에서도 탁월한 고온 강도와 내산화성 및 내식성을 유지함으로써 항공기 엔진 부품의 핵심 소재로서 그 중요성을 입증해왔다. 최근 적층제조 기술이 발전함으로써 IN718합금을 기반으로 한 부품을 3D 프린팅 기법을 통해 제조하는 사례가 증가하고 있다. 적층제조 공정은 형상의 자유도와 재료 효율성이 높아 적용하기에 좋지만 빠른 응고에의한 미세조직적 불균질성과 잔류응력 및 조성의 편석등으로 인해 전통적 제조방식으로 제조된 IN718 합금과는 뚜렷한 미세조직 및 기계적 특성의 차이를 보인다. 따라서 적층제조 방식으로 제조된 IN718의 실제 운용 신뢰성을 확보하기 위해서는 극한환경에서의 손상 거동, 특히 수소취성(Hydrogen Embrittlement, HE) 및 수소 취성 기반 파단(Hydrogen-enhanced Fracture, HEF) 거동에 대한 체계적 이해가 필수적이라고 할 수 있다. 이에따라 본 연구에서는 L-PBF 방식으로 제조된 IN718 합금과 전통적인 방식으로 제조된 IN718 합금의 HEF 거동을 SSRT를 이용하여 평가하였으며 파면관찰(Fractography) 및 전자 후방산란 회절(EBSD) 분석을 통해 파괴 양상과 결정학적 특성을 분석하였다. 이는 제조공정에 따른 미세조직 차이가 수소취성 감수성에 미치는 상관관계를 규명함으로써, 적층제조 방식으로 제조된 IN718의 수소환경 신뢰성 확보 및 내취성 설계에 중요한 기초자료를 제공하고자 한다.

[항공3-1 | 13:30]

항공기 캐노피 사례를 통한 LRU 국산화 추진방향: 정대호, 김덕성, 최명호, 길성근, 정유인*(한국항공우주산업(주))

Keywords: 캐노피, 스트레치드 아크릴, 투명창, LRU

항공용 LRU는 높은 기술적 난이도와 사업성 확보의 한계 등으로 국산화에 어려움이 있으나, 안정적인 전투기 운용과 국방 자립성 및 수출경쟁력 확보를 위해 핵심 기술의 국내 확보가 중요하다. 본 발표에서는 캐노피 국산화 개발 사례를 통해 항공용 LRU 국산화의 필요성과 지속 가능한 기술 확보 및 발전 방향을 제시한다.

[항공3-2 | 13:45]

항공기 캐노피 구조 부품의 체결부 피로수명 평가: 백민재, 최현성*, 이동준, 박현일, 석무영, 권용남(한국재료연구원), 정대호(한국항공우주산업)

Keywords: PMMA aircraft canopy, Fastener joint fatigue life, Thermoforming and thermal history, Bolt-fastened hole fatigue testing, Hole-drilling residual stress measurement

항공기 캐노피는 조종사의 시야 확보와 외부 환경으로부터의 보호 기능을 동시에 수행해야 하는 투명 구조 부품이며, 운용 중 작용하는 하중은 캐노피와 동체를 연결하는 체결부에 집중되는 경우가 많다. 따라서 이러한 체결부의 피로 내구성은 캐노피 시스템의 구조적 건전성을 확보하는 데 매우 중요하다. PMMA 캐노피의 열성형 이후에는 체결용 구멍의 천공 및 볼트 체결과 같은 추가 공정이 수행되며, 이러한 공정은 체결부 주변의 국부 응력 상태를 변화시키고 복잡한 잔류응력장을 유발할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 복합적인 영향이 작용하는 캐노피 체결부에서 피로수명과 잔류응력 사이의 상관관계를 분석하였다.항공기 캐노피 구조 부품의 체결부를 실험적으로 모사하기 위해, 중앙에 직경 6 mm의 구멍을 가공한 PMMA 판재 시편을 제작하였다. 피로시험은 총 네 가지 조건에서 수행하였다. 첫째, 구멍 가공 후 상온에서 피로시험을 실시하는 조건, 둘째, 성형 공정을 모사하기 위해 열 노출 또

는 열처리 후 피로시험을 실시하는 조건, 셋째, 중앙 구멍에 볼트를 체결한 상태에서 피로시험을 실시하는 조건, 넷째, 열 노출 후 볼트를 체결한 상태에서 피로시험을 실시하는 조건이다. 이러한 시험 조건은 구멍 가공으로 인한 응력집중, 성형 온도에 대한 노출로 유발되는 내부응력 변화, 그리고 실제 체결 상태에서 발생하는 접촉 및 구속 효과가 피로수명에 미치는 영향을 체계적으로 평가하기 위해 설정하였다. 각 조건에서 구멍 주변의 잔류응력은 홀 드릴링법을 이용하여 측정하였으며, 측정된 잔류응력과 피로시험에서 관찰된 피로수명 사이의 상관관계를 정량적으로 분석하였다. 본 연구의 결과는 열 이력, 구멍 가공 및 볼트 체결이 상호 복합적으로 작용하여 PMMA 캐노피 체결부의 피로 거동을 지배하는 메커니즘을 규명하는 데 기여할 것으로 기대된다. 또한 본 연구에서 확보된 결과는 PMMA 항공기 캐노피의 체결 구조 설계 및 내구성 평가를 위한 기초 자료와 설계 지침을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

[항공3-3 | 14:00]

항공용 패스너 국산화, 표준서 너머의 기술요건: 고덕황*(한국항공우주산업)

Keywords: 항공용 패스너, 조달 사양서, 국산화 개발, 품질 보증, 기술 규격

항공우주 산업의 국산화 개발에서 패스너(Fastener)와 같은 핵심 체결 부품의 기술 자립은 공급망 안정성과 가격 경쟁력 확보를 위해 필수적이다. 일반적으로 패스너 개발 시 표준서(Standard Sheet)를 중심으로 접근하기 쉬우나, 실제 부품이 요구하는 재료적 특성, 열처리, 표면처리, 비파괴 검사 및 엄격한 품질 보증 절차의 실질적인 핵심은 조달 사양서(Procurement Spec)에 명시되어 있다. 본 발표에서는 특정 패스너를 선정하여 해당 부품의 조달 사양서를 심층 분석하였다. 이를 통해 표준서에 누락되거나 간략화된 화학조성 제한 범위, 미세조직 제어 요건, 피로 수명 및 지연 파괴 방지를 위한 공정 기술 등 국산화 개발 시 반드시 확보해야 하는 실질적인 기술 장벽을 식별하였다. 본 발표에서는 분석된 핵심 요건들을 체계적으로 공유함으로써, 항공용 패스너 국산화에 참여하고자 하는 국내 기업 및 연구자들에게 실무적인 개발 가이드라인을 제공하고자 한다.

[항공3-4 | 14:15]

레이저 피닝 및 Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification이 René 95 니켈계 초합금의 미세구조 및 잔류응력의 열적 완화에 미치는 영향: 조윤지, 최현성, 박현일, 석무영, 이동준*, 권용남(한국재료연구원)

Keywords: 레이저 피닝, ULTRASONIC NANOCRYSTALLINE SURFACE MODIFICATION, René 95, 잔류응력, 표면처리

본 연구는 분말야금 René 95 합금에서 레이저 피닝(LP)과 초음파 나노결정질 표면 개질(UNSM)이 압축 잔류응력의 미세구조 및 열적 완화 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 고온 니켈계 초합금의 표면 처리 효과는 도입된 잔류응력의 크기뿐만 아니라 열적 안정성에도 좌우되므로, 본 연구에서는 초기 변형 특성과 열 노출 중 잔류응력 완화 사이의 관계에 초점을 맞추었다. LP는 200펄스/mm^2의 펄스 밀도로 적용하였고, 그 결과 얻어진 잔류응력 상태를 UNSM으로 생성된 잔류응력 상태와 비교하였다. 잔류응력과 반치폭(FWHM)은 X선 회절과 순차적 전해연마를 이용하여 깊이에 따른 함수로 측정하였고, 처리된 표면층의 변형 특성은 전자 후방산란 회절(EBSD)을 이용하여 분석하였다. 열 노출 실험은 600~800 ºC의 넓은 온도 범위에서 설계되었으며, 노출 시간은 온도에 따라 최대 1000시간까지 연장되었다. 본 연구에서는 온도-시간 관계 분석의 초기 단계로 700 ºC에서 10시간 및 100시간 동안 잔류응력 완화 거동을 평가했습니다. 초기 측정 결과, LP 처리 시편과 UNSM 처리 시편 간에 잔류 응력 분포 및 변형 구조가 뚜렷하게 다른 것으로 나타났습니다. UNSM 처리는 표면 부근에 집중된 높은 압축 잔류 응력과 심각한 국부 격자 왜곡을 유발한 반면, LP 처리는 표면 아래에서 최대 압축 잔류 응력을 나타내고 상대적으로 더 깊은 층까지 영향을 미쳤습니다. 700 ºC에서 열 노출 후, UNSM 처리 시편은 노출 초기 단계에서 뚜렷한 잔류 응력 완화를 보였고, 이후 100시간까지 제한적인 추가 변화만 나타냈습니다. 반면, LP 처리 시편은 표면 아래의 압축 잔류 응력 층을 더 많이 유지하면서 시간에 따른 완화가 더 점진적으로 진행되는 양상을 보였습니다. 반치폭(FWHM) 및 국부적인 결정 방위차의 변화는 이러한 완화 거동의 차이가 각 표면 처리에 의해 유도된 소성 변형의 정도 및 깊이와 밀접하게 관련되어 있음을 시사했습니다. 본 연구 결과는 분말 야금 René 95 합금에서 기계적으로 유도된 잔류 응력의 열적 안정성이 초기 응력-깊이 분포 및 표면 근처 변형 정도에 크게 영향을 받는다는 것을 보여줍니다. 이러한 결과는 잔류 응력 완화 메커니즘을 이해하고 니켈계 초합금의 고온 응용 분야에 적합한 표면 처리 조건을 선택하는 데 기초 자료를 제공합니다.

[항공3-5 | 14:30]

기계발광 및 디지털 이미지 상관관계 기법을 결합한 응력 및 변형률 동시 측정 방법: 최영원, 이동준, 석무영, 박현일, 신윤우, 이승환, 김도현, 성창윤, 최현성*(한국재료연구원)

Keywords: Al7xxx, 기계 발광(Mechano-luminescence), 국부 응력 정량적 평가, 디지털 이미지 상관법

본 연구에서는 기계 발광 (Mechanoluminescence, ML) 기반 국부 응력 추정 방법을 제안하였다. 기계 발광은 재료의 변형 및 손상 거동을 비접촉식으로 시각화할 수 있는 방법으로 활용되어 왔으나, ML 발광강도는 잔광(Persistent Luminescence, PL), 코팅 조건, 영상 촬영 조건 및 변형 거동에 영향을 받기 때문에 발광 강도와 응력 간의 정량적인 관계를 구축하는 데 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 ML 측정 조건을 체계적으로 최적화하고, 디지털 이미지 상관법(Digital Image Correlation, DIC)으로 측정한 국부 변형률을 이용하여 계산한 국부 진응력(local true stress)을 정량적 기준으로 설정함으로써 ML 발광강도와 국부 응력 간의 상관관계를 분석하였다. 인장시험을 수행하여 시편의 necking 발생 및 진행에 따른 ML 발광특성과 국부 응력·변형 거동을 분석하였다. 또한 변형에 따라 시편 형상과 관심 영역(Region of Interest, ROI) 위치가 변화하는 문제를 보완하기 위해 영상 정합(image registration) 기반 추적 기법을 적용하여 변형 과정에서 동일한 물리적 영역의 ML 발광강도를 연속적으로 측정하였다. 이를 통해 necking에 따른 관심 영역의 상대적 이동 및 위치 변화가 ML 측정 결과에 미치는 영향을 최소화하였다. 실험 결과, necking 발생

이후 공학적 응력(Engineering stress)은 감소하는 반면, 국부 변형률 증가에 따라 계산된 국부 진응력은 파단 시점까지 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 국부 진응력의 증가와 함께 ML 발광강도 역시 증가하는 경향을 나타냈으며, ML 발광강도와 국부 진응력 사이에서 높은 수준의 정량적 상관관계가 확인되었다. 이러한 결과는 ML이 기존의 정성적인 변형 및 손상 시각화를 넘어 재료의 국부 응력을 정량적으로 추정할 수 있는 측정 기법으로 활용될 가능성을 보여준다. 본 연구에서 제안한 ML-DIC 결합 기반 분석 방법론은 기계 발광 정보와 국부 변형 정보를 동시에 활용하여 변형 중 재료의 국부 응력 상태를 정량적으로 평가할 수 있는 기반을 제공한다. 또한 본 방법은 향후 다양한 하중 조건 및 시편 형상으로 확장 가능하며, 연성 파괴 및 국부 변형 거동을 기반으로 하는 재료 거동 평가와 파괴 모델링에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

P1 : 학부생세션
Room 1층 전시홀, 10월 28일

[P1-1]

결정소성 기반 가상 수소 투과 시험을 통한 변형 모드별 수소 확산 거동 분석: 강병진, 강찬, 박진홍*(서울과학기술대학교)

Keywords: 수소 투과, 결정소성, 수소 확산, 변형 모드, 미세조직

고강도 금속 소재를 이용한 성형 부품은 제조 과정에서 위치에 따라 단축인장, 평면변형 및 이축인장 등 서로 다른 변형 모드를 경험하며, 이에 따라 국부적인 소성변형과 미세조직 및 응력 상태가 불균일하게 형성된다. 이러한 변형 이력은 전위와 같은 수소 포획 사이트의 발달에 영향을 미치는 한편, 부품에 잔존하거나 외부에서 작용하는 응력은 수소의 확산 및 재분포를 추가적으로 변화시킬 수 있다. 따라서 성형 부품의 수소 전달 거동을 이해하기 위해서는 변형에 의해 형성된 미세조직적 포획 효과와 현재 작용하는 응력장의 영향을 구분하여 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 결정소성 유한요소법과 수소 확산–포획 모델을 연계하여 서로 다른 변형 모드에 따른 가상 수소 투과 시험을 수행하였다. 다결정 미세조직에 단축인장, 평면변형 및 이축인장 조건을 각각 부여하여 비교 가능한 수준의 소성변형에 도달시킨 후, 두 가지 수소 투과 조건을 고려하였다. 첫 번째 조건에서는 변형 후 외부 하중을 제거한 상태에서 수소 투과를 수행하여 변형 이력에 의해 형성된 전위 기반 수소 포획 효과를 평가하였으며, 두 번째 조건에서는 해당 변형 모드의 하중 및 응력 상태를 유지한 채 수소 투과를 수행하여 포획 효과와 응력 의존 수소 이동이 동시에 작용하는 경우를 분석하였다. 결정소성 해석으로부터 얻어진 결정립별 슬립 활성도, 전위밀도 및 정수압 응력 분포를 수소 확산 해석과 연계하고, 격자 수소와 포획 수소의 시간적·공간적 변화를 계산하였다. 출구면 수소 flux와 permeation transient를 비교함으로써 변형 모드, 변형 이력 및 작용 응력이 수소 전달 거동에 미치는 영향을 분리하여 평가하였다. 본 연구는 서로 다른 성형 경로에 의해 형성된 미세조직적 수소 포획 특성과 현재 작용하는 응력장의 영향을 구분함으로써, 성형 부품에서 나타나는 수소 투과 및 재분포 거동의 기원을 미세조직 수준에서 규명하는 것을 목적으로 한다.

[P1-2]

EBSD, 나노인덴테이션 및 TEM 분석을 이용한 QP980강의 수소취성 저항성 향상 기구 규명: 김혜진*, 박규완(한국공학대학교)

Keywords: Advanced High Strength Steel(AHSS), Quenching and Partitioning(Q&P), Hydrogen Embrittlement(HE), Retained Austenite(RA), EBSD, Nanoindentation, TEM, Hydrogen Trapping

자동차 산업에서 충돌 안전성과 경량화를 동시에 만족시키기 위해 DP강(Dual Phase steel), QP강(Quenching and Partitioning steel)과 같은 첨단고강도강(Advanced High Strength Steel, AHSS)의 적용이 확대되고 있다. 그러나 이러한 고강도강은 제조, 가공 및 사용 환경 중 유입되는 수소로 인해 기계적 성능이 저하되는 수소취성(Hydrogen Embrittlement, HE)에 취약할 수 있으며, 이는 자동차 구조 부품의 예기치 못한 파손으로 이어질 수 있다. 저자들의 선행 연구에서는 1.0 GPa급 DP강과 QP강을 대상으로 전기화학적 수소 차징 후 SSRT(Slow Strain Rate Tensile) 시험 및 TDS(Thermal Desorption Spectroscopy) 분석을 수행하였으며, 그 결과 미세조직이 제어된 QP980 개선재가 DP980 및 QP980 일반재 대비 가장 낮은 연신율 감소율과 우수한 수소취성 저항성을 나타냄을 확인하였다. 본 연구에서는 이러한 저항성 향상의 미세조직학적 기원을 규명하기 위해 EBSD(Electron Backscatter Diffraction), 나노인덴테이션(Nanoindentation) 및 TEM(Transmission Electron Microscopy) 분석을 추가로 수행하였다. 먼저 EBSD 분석을 통해 각 강종의 상 분율, 잔류 오스테나이트(Retained Austenite, RA)의 분포 및 형태, 결정립 크기, 결정립계 특성 분포(LAGB/HAGB)와 KAM(Kernel Average Misorientation)을 정량화하고, 이로부터 기하학적 필요 전위(Geometrically Necessary Dislocation, GND) 밀도 분포를 비교하였다. 이를 통해 상 계면 및 결정립계가 수소 트랩 사이트와 균열 전파 경로로 작용하는 양상을 분석하였다. 또한 나노인덴테이션 시험을 통해 페라이트, 마르텐사이트, RA 등 구성상의 국부 경도 및 탄성계수를 개별적으로 측정하고, 수소 차징 전후의 변화를 비교함으로써 상 간 기계적 불균질성(mechanical heterogeneity)이 수소 유기 균열의 개시 및 전파에 미치는 영향을 평가하였다. TEM 및 STEM-EDS 분석에서는 RA의 형태(필름형/블록형)와 화학적 안정성, 마르텐사이트 내 전위 구조, 미세 탄화물의 석출 거동을 관찰하여 가역적·비가역적 수소 트랩의 종류와 밀도를 규명하였다. 본 연구는 EBSD, 나노인덴테이션 및 TEM 분석 결과를 SSRT 및 TDS 결과와 연계하여, QP980 개선재에서 관찰되는 미세하게 분산된 안정한 RA, 완화된 상 간 경도 차이 및 고밀도 미세 트랩 사이트가 확산성 수소의 국부 집적을 억제함으로써 수소취성 저항성을 향상시키는 기구를 제시하고자 한다. 이를 통해 자동차용 AHSS의 수소취성 저항성 향상을 위한 미세조직 설계 지침을 제안하고자 한다.

[P1-3]

Si 및 Cu 첨가에 따른 페라이트-펄라이트강의 미세조직과 수소취성 거동 변화: 황예나, 오재석, 최수환, 정민섭(서울과학기술대학교 신소재공학과), 고석우(세아베스틸 기술연구소), 황병철*(서울과학기술대학교 신소재공학과)

Keywords: Ferrite-pearlite steel, Hydrogen embrittlement, Slow strain-rate test (SSRT)

최근 탄소중립 정책과 수소 에너지 기술의 발전으로 수소의 생산, 저장, 운송, 활용 전 주기에 걸친 인프라가 확장되고 있으며, 이에 따라 수소 환경에서 사용되는 강재의 신뢰성 확보가 중요한 과제로 대두되고 있다. 금속 재료가 수소 환경에 노출되면 내부로 침투한 수소로 인해 강도와 연성이 저하되어 조기 파단이 발생하는 수소취성이 나타날 수 있으며, 일반적으로 강재의 강도가 높아질수록 수소취성 저항성이 저하되는 경향을 보여 강도와 내수소취성 동시 확보를 위한 합금 설계 및 제조 공정 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 한편 페라이트-펄라이트강은 우수한 가공성과 경제성을 바탕으로 파이프라인, 자동차 구조용 부품 및 체결용

부품 등 다양한 분야에 폭넓게 적용되고 있으며, 이러한 사용 환경에서 습윤 환경 노출 및 부식 반응을 통해 수소가 내부로 침투할 수 있다. 페라이트-펄라이트강은 비교적 연한 페라이트와 강도에 기여하는 펄라이트로 구성된 복합 미세조직을 가지며 수소취성 거동은 단순한 상분율 뿐만 아니라 층상간격과 같은 정량적 미세조직 특성에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 높은 강도와 우수한 내수소취성 조합을 갖는 강재를 개발하기 위해서는 이러한 미세조직 인자와 수소취성의 상관관계에 대해 체계적인 이해가 필요하다. 이에 본 연구에서는 Si 및 Cu 함량을 달리하여 서로 다른 미세조직 특성을 가진 3종의 페라이트-펄라이트강을 대상으로 미세조직을 분석하고 저속변형률시험(SSRT, slow strain-rate test)을 수행하여 강재별 수소취성을 평가한 후 미세조직적 인자가 수소취화 거동에 미치는 영향을 고찰하였다

[P1-4]

전기화학적 in situ 및 ex situ 수소 주입에 따른 템퍼드 마르텐사이트강의 수소취성 거동 비교: 홍민우, 배영훈, 최수환, 황병철*(서울과학기술대학교 신소재공학과)

Keywords: Tempered martensitic steel, Hydrogen embrittlement, Electrochemical hydrogen charging, Slow strain-rate test (SSRT)

해양구조용 고강도 볼트에는 구조적 안정성을 확보하기 위해 높은 강도와 연성의 조합을 갖는 템퍼드 마르텐사이트강이 활용되고 있다. 그러나 템퍼드 마르텐사이트강은 높은 전위밀도와 다양한 미세조직 결함이 수소 트랩 사이트로 작용하여, 잔존수소 또는 사용환경에서 유입되는 외부수소와 상호작용함으로써 강도와 연성이 저하되는 수소취성이 발생할 수 있다. 특히 해양과 같은 부식환경에서 사용되는 볼트의 체결부에는 하중과 함께 외부수소가 지속적으로 유입되어 파괴가 가속될 수 있고, 하중이 제거된 이후에도 볼트 노치부에 임계농도 이상의 수소가 집중될 경우 수소 지연파괴가 발생할 수 있다. 이러한 조기파단을 방지하기 위해서는 수소를 사전 주입하는 방식(ex situ)과 연속적으로 수소를 주입하는 방식(in situ)으로 잔존수소와 외부수소가 재료에 미치는 영향을 체계적으로 이해할 필요가 있다. 본 연구에서는 템퍼드 마르텐사이트강에 대해 수소 주입 방식을 ex situ 및 in situ로 달리하여 저속변형률시험(Slow strain-rate test, SSRT)을 수행하고 노치인장강도비 (Relative notch tensile strength, RNTS)로 내수소취성을 평가하였다. 또한 ex situ 및 in situ 시편의 파면을 비교 분석하여 수소 주입 방식에 따른 파괴 거동을 고찰하였다.

[P1-5]

L-PBF로 제조된 마레이징강의 수소취성 저항성에 reverted austenite의 영향 : 박진모, 이민호, 배재웅*(국립부경대학교), 이승연, 박정민*(한국재료연구원), 이정훈(포항산업과학연구원)

Keywords: 수소취성, L-PBF, 마레이징강, 역변태 오스테나이트

Laser powder bed fusion(L-PBF)로 제조된 마레이징강(maraging steel)은 우수한 기계적 특성을 나타내지만, 적층 과정에서 형성되는 셀 구조, martensite 기지와 미세 석출물로 인해 수소취성에 민감할 수 있다. 본 연구에서는 용체화처리 후 시효 처리 방법에 따라 L-PBF 마레이징강의 미세조직, 기계적 특성 및 수소취성 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 미세조직과 상분포는 EBSD 및 XRD 분석을 이용하여 평가하였으며, 수소 장입 전후 SSRT(slow-strain-rate-testing)을 통해 수소취성 민감도를 비교하였다. SAT 조건에서는 용체화 과정에서 적층 중 형성된 셀 구조와 미세편석이 대부분 소멸되는 반면, 입계에 소량의 역변태 오스테나이트(reverted austenite)가 형성되었다. 반면 DAT 조건에서는 잔존 셀 경계 부근을 중심으로 상대적으로 많은 역변태 오스테나이트가 관찰되었다. 수소를 장입하지 않은 상태에서 SAT와 DAT 모두 시효 석출에 의해 적층 상태보다 강도가 증가하였으나, DAT와 SAT는 각각 총 연신율 25.0% 및 11.8%로, DAT의 총 연신율이 다소 높았다. 수소장입 후 총연신율은 각각 14.2%와 2.8%로 감소하였으며, 이에 따른 수소취성 민감도는 DAT가 43.2%, SAT가 76.3%로 나타나 DAT 조건에서 상대적으로 우수한 수소취성 저항성이 확인되었다. 이러한 거동의 규명을 위해, 수소 장입 및 변형 전후 XRD 분석을 통해 역변태 오스테나이트의 상분율 변화를 평가하였다. 또한 TDS 분석을 수행하여 SAT와 DAT의 수소 함량과 탈착 거동을 비교하였다. 본 연구 결과는 SAT와 DAT의 열처리 경로에 따른 미세조직 및 오스테나이트로의 역변태 거동 차이가 L-PBF로 제조된 마레이징강의 강도 – 연성 조합과 수소취성 거동에 관련됨을 시사한다.

[P1-6]

미세조직 및 용접 열이력 정보를 활용한 고강도강 열영향부의 머신러닝 기반 경도 예측: 김보민, 전소희(국립한밭대학교), 김상훈(국방과학연구소), 김정한*(국립한밭대학교)

Keywords: 고강도강, 용접 열영향부, 경도 예측, 기계학습, 구 오스테나이트 결정립 크기

고강도 장갑강은 높은 강도와 우수한 방호 성능이 요구되나, 용접 시 발생하는 열사이클로 인해 열영향부의 미세조직과 기계적 특성이 변화한다. 특히 최고 도달 온도와 냉각조건에 따라 오스테나이트 결정립 성장과 상변태 거동이 달라져 열영향부가 경화되거나 연화될 수 있다. 이러한 경도 변화는 용접부의 건전성과 신뢰성에 직결되므로, 재료 특성, 용접 열이력 및 미세조직을 종합적으로 고려한 정량적 예측이 필요하다. 본 연구에서는 문헌 데이터를 기반으로 고강도강 용접 열영향부의 경도를 예측하는 기계학습 모델을 구축하였다. 다양한 고강도강을 대상으로 실제 용접 또는 용접 열사이클 모사 실험을 수행한 선행 연구로부터 용접균열감수성지수(Pcm), 800 ℃에서 500 ℃까지의 냉각시간(t8/5), 최고 도달 온도, 구 오스테나이트 결정립 크기(prior austenite grain size, PAGS) 및 비커스 경도 값을 수집하였다. Pcm은 화학조성과 경화능을, t8/5와 최고 도달 온도는 열영향부가 경험한 냉각조건과 열이력을, PAGS는 이후 상변태와 경도 변화에 영향을 미치는 미세조직 특성을 나타내는 변수로 선정하였다. Pcm이 직접 제시되지 않은 문헌은 화학조성으로부터 계산하였고, 표 또는 그래프로 제시된 값은 조건별로 추출하였으며, 동일 강종이라도 냉각시간이나 최고 도달 온도가 다른 경우 독립된 데이터로 구분하였다. 수집된 데이터는 단위 통일, 결측값 및 이상값 검토, 중복 조건 제거 등의 전처리를 거친 후, Pcm, t8/5, 최고 도달 온도 및 PAGS를 입력변수로, 비커스 경도를 출력변수로 설정하였다. 다양한 비선형 회귀

모델은 PyCaret 기반 automated machine-learning framework를 이용하였으며 이를 통해 입력변수와 경도 간의 비선형 관계 비교·최적화하였다. 또한, 제한된 데이터의 예측 신뢰성을 향상시키기 위하여 용접야금학적 상변태 및 경화거동을 반영한 physics-informed feature engineering을 적용하였다. 본 연구는 서로 다른 고강도강과 열사이클 조건에서 보고된 데이터를 동일한 기준으로 통합하고, 재료의 경화능, 용접 열이력 및 미세조직을 함께 고려한 경도 예측 모델을 구축하였다는 데 의의가 있다. 향후 데이터 수와 강종 범위를 확대하고 독립적인 실험 데이터로 모델을 검증하여 예측 신뢰성을 향상시키고, 최종적으로 고강도 장갑강 용접부에 적용하여 열영향부 경도 변화 예측 및 요구 성능을 만족하는 용접조건 선정에 활용하고자 한다.

[P1-7]

볼트강의 합금조성과 오스테나이트 결정립 크기에 따른 조미니 경화능 해석: 오재석, 최수환, 오동규, 황병철*(서울과학기술대학교)

Keywords: Bolt steel, Micro-alloying elements, Microstructure, Hardness, Jominy specimen

최근 대형 구조물 및 풍력발전 설비 등의 체결용 부품에는 높은 강도와 인성이 요구됨에 따라 고강도 대형 볼트강의 적용이 확대되고 있다. 볼트강에서 요구되는 고강도 특성을 만족시키기 위해서는 강재 전반에 걸쳐 균일하고 미세한 마르텐사이트 조직을 형성시키는 것이 필수적이다. 대형 볼트강에서 두께 방향으로 균일한 마르텐사이트 미세조직을 확보하기 위해서는 충분한 냉각속도 뿐만 아니라 우수한 경화능이 요구되는데, 이는 화학 조성 및 오스테나이트 결정립 특성 등의 영향을 받는다. 대표적으로 경화능에 영향을 주는 원소인 Ni과 Cr은 페라이트 변태를 지연시키고, Mo는 베이나이트 변태를 지연시켜 마르텐사이트 변태를 촉진시킨다고 알려져 있다. 또한 Nb, Ti 등 석출물을 형성하는 미량합금원소는 오스테나이트 결정립 성장을 억제함으로써 최종적으로 형성되는 마르텐사이트 조직을 미세화하고 강도와 인성을 향상시킬 수 있다. 그러나 과도한 결정립 미세화는 페라이트 및 베이나이트의 대표적인 핵생성 사이트인 결정립계의 면적을 증가시켜 경화능이 저하될 수 있으며, 결과적으로 균일한 마르텐사이트 조직 형성을 저해할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 합금원소의 첨가량을 달리한 두 종류의 볼트강을 제조한 후 Jominy end quench test를 진행하였다. 두 강재의 경화능 차이를 확인하기 위해 각 강재의 표면부와 중심부의 미세조직을 비교하여 경화능을 평가하였다. 또한, PAGS (Prior austenite grain size)를 측정하여 미량합금 원소가 결정립 크기와 경화능에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다.

[P1-8]

기가급 초고강도강 전단용 SKD11 금형의 마찰교반 표면개질: 오지윤, 이상현, 김태윤, 이제인*(부산대학교)

Keywords: 마찰교반공정, 강소성 변형, 전단금형, 미세조직, 표면개질

최근 전기차(EV) 전환과 차체 경량화 요구에 따라 기가급 초고강도강(UHSS)의 자동차 부품 적용이 확대되고 있다. 초고강도강의 성형 및 전단용 금형에는 높은 내구성이 요구되며, 현재는 우수한 경도와 내마모성을 갖는 고속도공구강이 주로 사용되고 있다. 그러나 고속도공구강은 소재비가 높아 금형 제조 원가가 증가하는 문제가 있다. 범용 냉간금형강인 SKD11은 경제적인 대안이지만, 조대한 Cr계 탄화물과 불균일한 미세조직으로 인해 국부적인 응력집중과 치핑에 취약하여 추가적인 표면개질이 요구된다. 마찰교반공정(Friction Stir Processing, FSP)은 회전 공구와 소재 간의 마찰열 및 강소성변형을 이용하여 용융 없이 미세조직을 제어하는 표면개질 기술로, 결정립 미세화와 탄화물의 파쇄·재분산을 유도하고 깊은 개질층 형성이 가능하다는 점에서 주목받고 있다. 본 연구에서는 기가급 초고강도강 전단금형 적용을 위한 SKD11의 FSP 표면개질 가능성을 검토한다. 고내열 FSP 공구 선정과 초기 공정조건 설정을 바탕으로 시편을 제작하고, 공정변수에 따른 개질층 형성 거동을 비교한다. 이와 함께 개질부 단면의 미세조직을 분석하여 결정립 미세화와 Cr계 탄화물의 크기 및 분포 변화를 평가하고, 경도와의 연관성을 검토한다. 특히 미세조직–기계적 특성 간 상관관계를 중심으로 FSP 개질부의 특성을 평가하고, 향후 공정조건 최적화를 위한 미세조직·물성 평가 전략을 수립한다.

[P1-9]

고압 비틀림 공정 중 변형량에 따른 18Ni 300 마레이징강의 석출물 생성 속도 및 기계적 특성 변화: 박종찬, 정영훈, 주수빈(경상국립대학교), 안민호(한국재료연구원), 한규미(포항공과대학교), 우영윤(한국재료연구원), 김형섭(포항공과대학교), 김정기*(경상국립대학교)

Keywords: Maraging steel, High pressure torsion, Severe plastic deformation, Precipitation hardening, Direct aging

마레이징강은 저탄소 마르텐사이트 기지 내 나노 석출 경화를 통해 초고강도를 확보할 수 있어 구조용 소재로 널리 활용되나, 피크 시효 도달까지 장시간이 소요되는 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 고압 비틀림(High pressure torsion, HPT) 공정을 적용하여 480 ºC 온도에서 직접 시효 중 변형량에 따른 석출 거동 및 기계적 특성 변화를 비교 분석하였다. 시효 전 경도는 HPT 공정 중 가공경화로 인해 AR, Small (2 turn), High (10 turn) 순으로 증가하였다. 시효 진행 시 HPT 공정으로 인해 생성된 고밀도 결함이 불균일 핵생성 자리 제공 및 파이프 확산을 촉진한다. 이로 인해 피크 시효 도달 시간이 AR의 10 h과 비교하여 Small과 High는 각각 2 h, 1 h로 크게 단축되었다. 최적 피크 조건에서 인장 강도는 AR 대비 High 조건에서 62.6% 증가한 2, 583 MPa로 초고강도를 달성하였으나, 연신율은 25%에서 0.9%로 감소함을 확인하였다. 피크 시효 이후 시효를 진행할 경우, 석출물 조대화 및 역변태 오스테나이트 분율 증가로 인한 연화가 관찰되었다. 상기 결과를 통해 HPT 공정의 변형량 제어로 마레이징 강의 시효 열처리 시간을 단축함과 동시에 2, 500 MPa급 초고강도를 확보할 수 있는 가능성을 검증하였다.

[P1-10]

분말야금공정으로 제조한 페라이트계 스테인리스 강의 미세조직과 인장특성에 미치는 PMMA 첨가의 영향: 최지원, 김주현, 조예진, 김대식, 노상훈*(국립부경대학교)

Keywords: APMT합금, 폴리메틸메타크릴레이트, 방전플라즈마소결, 고온인장강도, 분산강화

고온 에너지 변환 시스템 및 발전 설비의 운전 조건이 가혹해짐에 따라 우수한 고온 강도와 내산화성을 동시에 확보할 수 있는

내열 구조재료의 개발이 요구되고 있다. Fe–Cr–Al계 합금은 고온 환경에서 안정적인 Al_2O_3 보호산화막을 형성하여 우수한 내산화성을 나타내며, APMT 합금은 이러한 특성을 바탕으로 고온용 구조재료로 활용될 수 있다. 그러나 적용 온도 및 수명을 향상시키기 위해서는 고온에서의 전위 이동과 미세조직 변화를 효과적으로 제어할 수 있는 강화기구의 도입이 필요하다. 최근에는 고분자의 열분해 과정에서 발생하는 기체를 이용하여 금속 기지 내 미세 기공 또는 나노버블을 형성하고, 이를 분산강화 인자로 활용하려는 연구가 제안되고 있다. 본 연구에서는 Fe–22Cr–5Al–3Mo 조성의 APMT 합금에 polymethyl methacrylate(PMMA)를 첨가하고, 첨가량에 따른 소결체의 밀도 및 상온·고온 기계적 특성 변화를 평가하였다. APMT 분말에 PMMA를 0, 2 및 5 vol% 첨가하여 볼밀링한 후 spark plasma sintering(SPS)을 통해 소결체를 제조하였다. 또한 열중량분석을 통해 PMMA의 열분해 거동을 평가하였다. 그 결과, APMT와 함께 볼밀링된 PMMA는 순수 PMMA와 비교하여 높은 온도에서 열분해가 개시되었다. 아르키메데스법으로 측정한 벌크 밀도는 PMMA 첨가량 증가에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. PMMA 첨가 시편은 무첨가 시편보다 높은 경도와 인장강도를 나타냈으며, PMMA 5 vol% 첨가 시편에서 상온 및 650 ºC와 700 ºC의 고온 조건 모두 가장 우수한 강도 특성이 확인되었다. 반면, PMMA 첨가량 증가에 따라 연신율은 감소하였다. 즉, PMMA 첨가는 소결체의 치밀도 저하 경향에도 불구하고 상온 및 고온 강도 향상에 기여하였으며, 강도와 연성 간 상충관계가 동반됨을 확인하였다. 이러한 결과는 PMMA 열분해와 관련된 미세기공 또는 나노버블의 형성 가능성, 그리고 볼밀링에 따른 미세조직 변화가 기계적 특성에 복합적으로 영향을 미쳤음을 시사한다. 향후 TEM 기반의 정량 미세구조 분석을 통해 미세 기공 또는 나노버블의 형성 여부와 강화기구를 규명하고자 한다.

[P1-11]

ECCI 기법을 이용한 304 스테인리스강 변형 미세조직의 결정학적 특성 분석: 윤소연, 임현빈(국립공주대학교), 문종언*(국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터)

Keywords: 304 스테인리스강, 전자 채널링 콘트라스트 이미징, 전자후방산란회절, 변형 미세조직, 전위

본 연구에서는 주사전자현미경의 전자 채널링 콘트라스트 이미징(electron channeling contrast imaging, ECCI) 기법을 활용하여, 304 오스테나이트계 스테인리스강의 변형 거동을 분석하였다. 기존 투과전자현미경 분석은 시편 준비가 까다롭고 관찰 시야가 제한적인 단점이 있는 반면, ECCI는 벌크 상태의 시편에서도 넓은 영역에 걸친 격자 결함을 고분해능으로 관찰할 수 있다는 장점을 지닌다. 이를 확인하기 위해 304 스테인리스강 시편을 다양한 진변형률 조건에서 interrupted 인장시험을 진행한 후 체계적인 ECCI 분석을 수행하였다. 특히 결함의 명암 대비를 극대화하기 위해, 전자후방산란회절 pole figure 분석을 수행하였고, two-beam 조건으로 g 벡터를 결정한 뒤, 샘플 스테이지의 조정 조건을 도출 및 적용하였다. 분석 결과, 인장 변형률이 증가함에 따라 기지 내 고밀도의 dislocation tangle, jog, 그리고 변형 유도 슬립 밴드 및 쌍정의 형성 과정이 명확하게 관찰되었다. 이를 통해 확보된 결과는 304 스테인리스강의 가공 경화 거동과 변형 기구 천이에 대한 이해를 제공하며, tilt 각도가 최적화된 ECCI 기법이 구조 재료의 복잡한 결함 분석에 있어 기존 투과전자현미경을 대체할 정량적 대안임을 입증한다.

[P1-12]

차체 구조용 고비강도 저합금형 망간강 개발: 곽소민, 김채영, 한정호*(한양대학교)

Keywords: Alloy design, HSLA, Bulk, Specific strength

차세대 목적 기반 모빌리티(Purpose-Built Mobility, PBM) 차체 프레임의 후보 소재로 경량성이 우수한 알루미늄 합금이 주목받고 있으며, 특히 6000계 및 7000계 알루미늄 합금은 약 2.7–2.8 g/cm^{3}의 낮은 밀도와 270–540 MPa 수준의 인장 강도를 가지지만, 상대적으로 낮은 강도가 한계로 작용한다. 이에 따라 높은 강도와 우수한 가공성 및 경제성을 갖는 고강도 저합금강(High-strength low-alloy steel, HSLA)이 그 대안으로써 주목받고 있으며, HSLA는 상대적으로 높은 강도를 바탕으로 부품 두께를 감소시켜 알루미늄 합금에 준하는 수준으로 부품 단위의 경량화를 구현할 수 있으나, 현재 차체에 주로 사용되는 HSLA의 인장 강도는 약 500–900 MPa 수준으로 최근 고강도 강판에 비해 낮다는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 합금원소 첨가량을 최소화하면서 경량성과 고강도를 동시에 확보할 수 있는 차체용 고비강도 저합금형 망간강을 설계하고자 하였다. Al 첨가를 통해 합금의 밀도를 감소시키는 동시에, Ni 및 Mn 첨가량을 최소화하면서 열간압연 후 마르텐사이트 기지를 형성하도록 합금 조성을 설계하였다. 이후 열처리를 통해 오스테나이트 역변태와 기지에 정합한 나노 석출물의 형성을 유도함으로써 높은 강도와 우수한 연성을 동시에 확보하고자 하였다. 또한 열처리에 따라 형성되는 석출물 및 탄화물의 분석으로 고강도 발현 메커니즘을 규명하고, 상용 HSLA와 기계적 특성을 비교함으로써 차체 구조용 소재로의 적용 가능성을 제시하고자 하였다.

[P1-13]

극점도 이미지 기반 합성곱 신경망을 이용한 면심입방 다결정재 항복곡면 예측: 신기로, 박진홍*, 이창환(서울과학기술대학교)

Keywords: 항복곡면, 집합조직, 극점도, 합성곱 신경망, 결정소성 자기일관해석

금속재료의 소성변형을 해석하기 위해서는 다축응력 상태에서의 항복거동을 적절히 기술하는 것이 중요하며, 다결정재의 항복곡면은 소재를 구성하는 결정립의 방위 분포, 즉 집합조직에 크게 영향을 받는다. 특히 압연 판재와 같이 뚜렷한 집합조직을 갖는 소재에서는 이러한 이방성 항복거동이 재료의 거시적 소성응답과 성형거동에 중요한 영향을 미친다. 결정소성 이론은 결정립 수준의 슬립과 결정방위를 고려함으로써 집합조직으로부터 거시적 항복거동을 예측할 수 있으나, 다양한 집합조직에 대해 항복곡면을 반복적으로 산출하기 위해서는 여러 응력 경로에 대한 계산이 요구되어 상당한 계산 비용이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 계산 부담을 완화하기 위해 극점도 이미지를 입력으로 하여 면심입방 다결정재의 항복곡면을 예측하는 합성곱 신경망 기반 모델을 구축하고자 한다. 이를 위해 MTEX를 이용하여 다양한 결정방위 분포를 갖는 면심입방 다결정재의 집합조직을 생성하고, 결정소성 자기일관해석을 통해 각 집합조직에 대응하는 항복곡면 데이터를 구축하였다. {100}, {110}, {111} 극점도 이미지를 합성곱 신경망의 입력

으로 사용하고, 응력 공간의 여러 하중 방향에 대한 항복응력을 출력하여 항복곡면을 구성하도록 모델을 설계하였다. 구축된 데이터베이스를 이용하여 합성곱 신경망을 학습하고, 독립적인 집합조직에 대해 결정소성 해석으로 계산된 항복곡면과 신경망의 예측 결과를 비교함으로써 예측 성능을 평가하고자 한다. 또한 데이터 기반으로 예측된 항복곡면의 기하학적·물리적 타당성을 검토하고, 필요한 경우 이러한 특성을 학습 과정에 반영하는 방법을 함께 고려하고자 한다. 이를 통해 극점도 이미지에 포함된 집합조직 정보로부터 면심입방 다결정재의 항복곡면을 효율적으로 예측할 수 있는 데이터 기반 접근법의 적용 가능성을 평가하고자 한다.

[P1-14]

나노인덴테이션 및 유한요소역설계를 활용한 미세 영역의 국부 인장특성 평가: 권완건, 임현빈(공주대학교), 문종언*(공주대학교, 첨단분말소재부품센터(CAMP2))

Keywords: 인장특성, 유한요소해석, 나노인덴테이션, 역해석

나노인덴테이션은 미세 영역의 경도 및 탄성계수를 정량적으로 측정하는 대표적인 국부 물성 평가 기법이나, 응력-변형률 거동이나 항복강도와 같은 인장특성을 직접 평가하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 나노인덴테이션 시험에서 획득한 경도, 탄성계수 및 하중-변위 데이터를 기반으로 Abaqus 유한요소해석과 연계한 역설계 기법을 수행하여 국부 인장특성을 예측하였다. 압입시험 모사를 위한 수치해석 모델을 구축하고, 탄성계수는 실험값을 적용하였으며, 소성 영역의 재료 파라미터는 최적화 과정을 통해 실험 하중-변위 곡선과 일치하도록 보정하였다. 이를 통해 대상 영역의 응력-변형률 곡선 및 항복강도를 정밀하게 추정하였다. 본 연구에서 제안한 역해석 기반 평가 기법은 미세 영역에서도 인장특성을 효과적으로 도출할 수 있어, 향후 용접부 및 불균일 미세조직을 갖는 재료의 국부 기계적 신뢰성 평가에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

[P1-15]

파단면 및 미세조직 분석 기반 XFEM 파괴인성 손상 모델의 물리적 검증: 하재민, 신선호(국민대학교 신소재공학부), 김형욱(한국재료연구원), 성효경*(국민대학교 신소재공학부)

Keywords: 유한요소해석 (FEM), XFEM, 파괴인성, 파면분석, 응집영역모델

파괴인성은 재료의 안전 설계에 핵심인 지표이나, 이를 측정하기 위한 ASTM- E399 기반의 파괴인성 시험은 시편 제작, 피로 균열 도입, 균열진전 계측 등으로 인해 시간 및 비용 부담이 크다 이를 보완하기 위해 유한요소해석(FEM)을 활용하여 파괴인성 거동을 예측하려는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그중 XFEM 균열 성장 모델은 대표적인 접근법으로 자리잡고 있다. 노치 인장시험과 수치해석을 결합한 방법, 디지털이미지상관법(DIC) 기반 역해석 등 물리적 근거에 기반해 손상모델의 파라미터를 결정하려는 시도들이 보고되어 왔으나 이들 역시 추가적인 수치보정을 필요로 하거나 높은 실험·계산 비용을 수반하며, 실제 파괴인성 시편의 미세조직학적 파괴기구와 직접 연계된 사례는 드물다. 본 연구에서는 7xxx계 알루미늄 합금의 Zn 함량 및 열처리(T7, RRA170) 조건이 다른 시편을 대상으로, SEM 관찰을 통한 stretch zone width(SZW) 측정과 균열선단 인접 소성역의 EBSD 미세조직 분석을 통해 위 손상 파라미터를 독립적으로 도출하고 해석에 적용하여 실험 결과와 비교·검증하였다. 본 연구는 파면 및 미세조직 분석을 유한요소해석의 손상모델 파라미터 결정에 직접 연계함으로써, 기존 피팅 기반 XFEM 해석의 한계를 극복하는 다중스케일 검증 접근법을 제시한다.

[P1-16]

친환경 FCC계 고엔트로피 금속기지복합재 제조 및 특성 평가: 김중회, 박성현, 정재길*(전북대학교)

Keywords: High entropy alloy, Eco-friendly reinforcement, Metal matrix composite, Microstructure, Spark plasma sintering

농업 및 식품 산업에서 다량의 부산물이 발생하고 있으며, 이를 단순 폐기할 경우 온실가스가 발생할 수 있어 부산물의 효율적인 자원화 및 재활용에 대한 필요성이 점차 증가하고 있다. 고엔트로피 합금 (High entropy alloy, HEA)은 다섯 가지 이상의 주요 원소를 동일하거나 유사한 원자비로 혼합하여 제조하는 합금이다. 특히 등원자비의 CrMnFeCoNi 합금은 단일 FCC 고용체를 형성하는 대표적인 HEA로, 극저온에서 우수한 연성 및 충격 저항성을 나타내지만 상온에서의 상대적으로 낮은 인장 강도와 경도를 나타낸다. HEA의 상온 기계적 특성을 향상시키기 위해 금속기지복합재 (Metal matrix composite, MMC) 개념을 적용하여, Al_2O_3, TiC, SiC 등 무기 및 세라믹계 강화재를 첨가하는 연구가 활발히 수행되고 있다. 농식품 부산물 중 쌀겨는 열처리 후 높은 SiO_2 함량을 갖는 회분(Ash)을 형성하며, 커피찌꺼기는 열처리를 통해 K_2O, CaO, P_2O_5 등 다양한 무기 산화물을 함유한 회분을 얻을 수 있다. 달걀껍질은 $CaCO_3$를 주성분으로 하며, 열처리할 경우 CaO를 주성분으로 하는 칼슘계 무기 소재로 전환될 수 있다. 본 연구에서는 쌀겨, 커피찌꺼기 및 달걀껍질을 열처리하여 제조된 회분을 강화재로 사용하였으며, 열처리하지 않은 달걀껍질도 강화재로 적용하였다. 가스분무법으로 제조된 CrMnFeCoNi HEA 분말에 각각 친환경 강화재를 1 wt.% 첨가한 후 기계적 밀링을 수행하여 복합재 분말을 제조하였다. 이후 방전 플라즈마 소결 (Spark plasma sintering, SPS) 공정을 통해 벌크 시편 (Φ20 × 6 mm)을 제조하였다. X-선 회절 분석 (X-ray diffraction, XRD), 광학현미경 (Optical microscopy, OM) 및 주사전자현미경 (Scanning electron microscopy, SEM)을 통해 제조된 합금 분말 및 소결체의 미세조직을 분석하였으며, 비커스 경도 및 압축시험을 통해 기계적 특성을 평가하였다.

[P1-17]

격자 왜곡 제어를 통한 내열 고엔트로피합금의 기계적 물성 및 전위 거동 상관관계 분석: 임정현, 이강진, 허민아(공주대학교 신소재공학과, 첨단 분말 소재 부품 센터), 이찬호(Department of Materials Science and Engineering, The University of Auburn), 송기안*(공주대학교 신소재공학과, 첨단 분말 소재 부품 센터)

Keywords: 내열 고엔트로피 합금, 전위 거동, 격자 왜곡, 고용체 강화

내열 고엔트로피합금(Refractory High-Entropy Alloys, RHEAs)은 고융점 원소를 주성분으로 하여 동등하거나 유사한 원자 비율

로 혼합해 상온 및 고온에서 우수한 기계적 물성을 나타내는 차세대 내열 소재로, 주로 체심입방(BCC) 구조를 기반으로 한다. 내열 고엔트로피 합금에 주로 사용되는 원소들의 큰 원자 크기 차이는 극심한 격자 왜곡을 유발하며, 이는 전위와의 상호작용을 통해 합금의 기계적 물성에 크게 영향을 미치는 요소로 알려져 있다. 최근, 모델링 및 시뮬레이션을 통한 이론적 연구에서 RHEAs의 격자 왜곡이 Edge 전위와 강하게 상호작용하여, Edge 전위도 BCC 합금의 강도에 지대한 영향을 미친다는 결과가 보고되었다. 이는 격자 왜곡 제어를 통해 Edge 전위의 거동 중심의 변형 메커니즘에 기반한 고강도의 내열 소재 합금 설계가 가능함을 시사한다. 본 연구에서는 내열 고엔트로피합금에서 격자 왜곡과 전위 거동이 합금의 강도 및 변형 거동에 미치는 영향을 이해하기 위해, 격자 왜곡을 제어하여 BCC 단상의 내열 고엔트로피합금을 설계하였다. SEM 및 X선 회절 시험을 통해 미세조직을 분석하고 압축 시험을 통해 기계적 물성 평가를 실시하였으며, Ex-situ X-선 회절 시험 및 line-profile 모델링을 통해 합금의 전위 거동에 대하여 분석하였다. 본 연구(이 성과)는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2026-25487318)

[P1-18]

Ni 첨가에 따른 Cr-Mo-W 기반 다성분계 합금의 미세구조 및 기계적 특성 변화: 이재원, 김범선, 서요한, 윤찬규, 나현준, 이동건(국립한밭대학교 신소재공학과), 민현기(서울대학교), 윤국노*(국립한밭대학교 신소재공학과)

Keywords: 원자력 소재, x선 회절

원자력 및 고온 환경에 적용되는 구조재와 코팅 소재에는 높은 기계적 강도와 함께 가혹환경에서의 구조적 안정성이 요구된다. 본 연구에서는 고융점 원소인 Cr, Mo 및 W를 기반으로 다성분계 합금을 설계하고, Ni 첨가를 통해 결정구조와 기계적 특성을 조절하고자 하였다. Cr60Mo24W16 조성을 기반으로 Ni 함량을 변화시킨 합금을 설계하였으며, CALPHAD 열역학 계산을 이용하여 조성에 따른 상안정성을 예측한 후 아크 용해법으로 합금을 제조하였다. 제조된 합금의 결정구조와 격자 변화를 X선 회절분석을 통해 분석하고, 비커스 경도시험을 통해 기계적 특성을 평가하였다. 분석 결과, Ni 첨가 후에도 Cr-Mo-W 합금의 BCC 기반 결정구조가 전반적으로 유지되는 가운데, Ni 함량에 따라 회절 피크의 이동과 격자 수축이 관찰되었다. 반면 경도는 Ni 첨가량에 따라 단순히 증가하거나 감소하지 않고 비단조적인 변화를 나타냈으며, Ni 5 at.% 조성에서 가장 높은 경도를 보였다. 이러한 결과는 소량의 Ni 첨가가 모상의 결정구조를 크게 변화시키지 않으면서도 격자 상태와 상안정성에 영향을 주어 기계적 특성을 효과적으로 변화시킬 수 있음을 보여준다. 본 연구는 Cr-Mo-W 기반 다성분계 합금에서 조성 변화와 결정구조 및 기계적 특성 간의 상관관계를 제시하며, 향후 가혹환경용 고강도 합금의 조성 최적화를 위한 설계 지침을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

[P1-19]

사전 변형 및 단시간 열처리 공정이 FeCrNi 중엔트로피 합금의 BCC 석출과 기계적 물성에 미치는 영향: 김종훈, 문광현, 김진경*(한양대학교)

Keywords: Medium-Entropy Alloy, Precipitation Strengthening, Grain Refinement, Mechanical Properties

등원자비 FeCrNi 중엔트로피 합금의 단일 고용체 강도 한계를 극복하기 위해, 본 연구는 사전 변형 및 단시간 열처리 공정을 통한 결정립 미세화와 BCC 석출 강화를 유도하였다. 75% 냉간 압연 후 800 ℃에서 2시간 열처리한 시편에 10% 사전 인장을 가한 뒤 800 ℃에서 5분간 추가 열처리하였다. 사전 인장 및 열처리 전후 미세조직 관찰 결과, 초기 대비 FCC 기지 결정립의 현저한 미세화가 확인되었다. 또한 사전 인장으로 유도된 변형 결함 부위에서 불균일 핵생성된 BCC상의 크기·분율 변화를 정량 분석하였다. 이와 같이 제어된 미세조직은 연성 감소를 최소화하는 동시에 항복 및 인장강도의 유의미한 증가를 이끌어내어 전반적인 기계적 물성을 향상시켰다. 본 연구는 사전 변형 기반의 미세조직 제어가 중엔트로피 합금의 강도-연성 균형을 달성하기 위한 효과적인 전략임을 제시한다.

[P1-20]

Feature Engineering을 활용한 Fe-Mn-Cr-Ni 중엔트로피 합금의 인장물성 예측 모델 최적화 및 실험적 검증: 황예민, 이준석, 신필욱, 배재웅*(국립부경대학교)

Keywords: Random Forest, Feature engineering, 중엔트로피 합금, 극저온 인장물성

중엔트로피 합금(medium-entropy alloys, MEAs)은 우수한 극저온 기계적 특성을 나타내어 차세대 극저온 구조재료로 주목받고 있다. 그러나 다성분 조성과 복합적인 공정 변수로 인해 방대한 조성-공정-물성 파라미터 공간을 탐색해야 한다는 한계를 가진다. 이에 본 연구에서는 feature engineering을 기반으로 Fe-Mn-Cr-Ni 중엔트로피 합금의 상온 및 극저온 인장 물성 예측 모델의 성능을 최적화하고, 이를 실험적으로 검증하였다. 문헌 데이터를 수집하여 조성으로부터 계산되는 valence electron concentration(VEC), 원자 반경 차이(δ), 전기음성도 차이(Δχ) 등의 물리적 특성과 열처리 및 가공 조건을 포함하는 공정 변수로 feature pool을 구축하고, 5-fold cross-validation을 기반으로 예측 오차(RMSE)를 최소화하는 feature 조합을 도출함으로써 random forest(RF) 기반 예측 모델의 성능 최적화를 수행하였다. 최적화된 모델은 bootstrap sampling을 통해 각 조성 및 공정 조건에 대한 예측값의 평균(μ)과 불확실도(σ)를 산출하였으며, 이를 바탕으로 검증 대상 조건을 선정하였다. 선정된 조건에 대해 합금을 제조하고 인장시험을 수행하였으며, 예측값과 실측값을 비교하여 모델의 예측 신뢰성을 확인하였다.

[P1-21]

냉간 압하율 증가에 따른 Fe-Ni-Co-Cr-Mo계 중엔트로피 합금의 열처리 후 미세조직 발달 및 극저온 기계적 특성: 오사랑, 김태형, 이재혁(단국대학교), 김영균, 나영상(한국재료연구원), 배재웅(국립부경대학교), 김성욱(포항산업과학연구원), 김형섭(포항공과대학교), 주수현*(단국대학교)

Keywords: 중엔트로피 합금, 냉간 압하율, 미세조직 제어, 극저온 기계적 특성

우주항공 부품과 액화수소 저장·운송 설비 등 극저온 환경에서 사용되는 구조재는 높은 강도와 우수한 구조적 안정성을 동시에 요

구한다. 이러한 요구를 충족하기 위해 극저온에서 우수한 강도와 연성을 동시에 발현하는 중·고엔트로피 합금에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히, Fe-Ni-Co-Cr-Mo계 중엔트로피 합금(Medium Entropy Alloys, MEAs)은 우수한 극저온 기계적 특성과 뛰어난 강도-연성 조합을 바탕으로 차세대 극저온 구조재로 주목받고 있다. 선행연구에서는 새로운 Fe-Ni-Co-Cr-Mo계 중엔트로피 합금을 설계하여 저열팽창 특성과 우수한 극저온 기계적 특성을 동시에 확보하였으며, 비교적 낮은 냉간 압하율과 후속 열처리를 통해 재결정/미재결정 헤테로구조 내 미세 Mo-rich 석출상을 형성하였다. 그러나 냉간 압하율이 낮아 석출상의 분산이 충분하지 않았으며, 이에 따라 추가적인 강도 향상에는 한계가 있었다. 이에 본 연구에서는 냉간 압하율을 증가시켜 미세조직 변화와 극저온 기계적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 선행연구보다 높은 냉간 압하율을 적용한 후 열처리를 수행하였으며, XRD, SEM 및 EDS 분석을 통해 미세조직과 상변화를 분석하였다. 또한 상온 및 77 K에서 인장시험을 수행하여 냉간 압하율 증가에 따른 기계적 특성 변화를 평가하였다. 그 결과, 선행연구 대비 77 K에서 더욱 향상된 강도를 확보하였으며, 재결정/미재결정 헤테로구조 내 미세 Mo-rich 석출상에 의한 석출강화 메커니즘을 분석하였다.

[P1-22]

미세 Mo-rich 석출을 이용한 Fe-Ni-Co-Cr-Mo 중엔트로피 합금의 극저온 기계적 특성 향상: 양세웅, 이재혁, 김태형(단국대학교), 배재웅(부경대학교), 김형섭(포항공과대학교), 주수현*(단국대학교)

Keywords: medium-entropy alloy, precipitate, cryogenic mechanical property

최근 액화수소 저장·운송 시스템과 우주·항공 구조재 등 극저온 환경에서 사용되는 소재에 대한 관심이 증가하면서, 우수한 극저온 기계적 특성을 갖는 고엔트로피 합금(HEAs) 및 중엔트로피 합금(MEAs)이 차세대 구조재로 주목받고 있다. 특히, Fe-Ni-Co-Cr-Mo 기반 저열팽창 MEA는 77 K에서 높은 강도와 낮은 열팽창계수를 동시에 구현하여 극저온 정밀 구조재로서의 가능성을 보여주었다. 그러나 보다 극한의 사용 환경에 적용하기 위해서는 Mo 함량 증가와 조성 최적화를 통한 추가적인 강도 향상이 요구된다. 본 연구에서는 Mo 함량을 증가시키고 합금 조성을 최적화한 새로운 Fe-Ni-Co-Cr-Mo 기반 MEA를 설계하였다. 냉간 압연 후 열처리를 통해 다량의 미세 Mo-rich 석출물을 형성시켜 극저온 강도 향상을 유도하였다. 그 결과, 77 K에서 기존 합금 대비 향상된 강도를 확보하였으며, 석출물 강화 효과와 미세조직 변화가 기계적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 또한 FE-SEM, EDX, EBSD 및 XRD 분석을 통해 석출상 분포, 원소 분배 거동, 결정립 구조 및 상 변화를 종합적으로 규명하였다.

[P1-23] Canceled

Re 첨가 Ni계 고엔트로피 합금의 응고 거동 및 γ/γ′상 형성에 관한 연구: 김윤준*, 김진원, 이승주, 강민(인하대학교)

Keywords: 고엔트로피 합금, 수지상 성장 거동, 실시간 방사광 이미지, 일방향 응고, 감마-감마 프라임 상변태, 나노 석출물, 원자탐침단층촬영법, 레늄 농축 나노클러스터

Ni계 고엔트로피 합금은 우수한 고온 강도와 미세조직 안정성을 바탕으로 고온 구조재료로의 적용 가능성이 높은 초내열 합금이다. 특히 γ 기지와 $L1_2$ 구조의 γ′ 석출상으로 구성된 미세조직은 고온에서 전위의 이동을 억제하여 기계적 특성 향상에 기여한다. Re과 같은 내화원소는 낮은 확산속도를 가지며 γ 기지에 우선적으로 분배되는 경향을 가지므로 γ/γ′상의 형성 및 원소 분배 거동에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Re이 첨가된 Ni계 고엔트로피 합금의 응고 거동과 γ/γ′상의 형성 및 합금 원소의 분배 거동을 분석하고자 하였다. 본 연구에서는 nominal composition이 $Ni_{47}(FeCoCr)_{34.2}(AlTi)_{15}(MoW)_{1.4}Nb_{1.2}Re_{1.2}$ (at. %) 인 Ni계 고엔트로피 합금을 사용하였다. 응고 과정에서 나타나는 덴드라이트 성장 거동은 방사광 X선 실시간 이미징(in-situ synchrotron X-ray imaging)을 통해 관찰하였다. 이를 위해 10 × 10 × 0.25 mm^3 크기의 판상 시편을 제작하였으며, 완전 용융 상태에서 −0.5 및 −1.5 A/min의 서로 다른 조건으로 냉각하면서 덴드라이트 성장속도와 형상 변화를 비교하였다. 또한 응고속도에 따른 미세조직 변화를 확인하기 위해서는 Bridgman 방식의 일방향 응고 실험을 수행하였다. 직경 4.8 mm, 길이 110 mm의 봉상 시편을 Ar 분위기에서 1600 ºC까지 가열한 뒤 30분간 유지하여 용융시켰으며, 이후 각각 1, 3, 10, 35, 70 및 100 μm/s의 속도를 적용하여 50 mm 이동시킨 뒤 수냉하였다. 응고 조건에 따른 미세조직과 원소 분포는 광학현미경과 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy) 및 에너지 분산형 X선 분광법(Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy)을 이용하여 분석하였다. 또한 γ/γ′ 미세구조와 상별 원소 분배 거동을 분석하기 위해 투과전자현미경(Transmission Electron Microscopy)과 원자탐침단층촬영법(Atom Probe Tomography)을 이용하였다.

[P1-24]

Co 첨가에 따른 Ni-38Cr-3.8Al 합금의 미세조직 및 기계적 특성 제어: 이상현, 오지윤, 윤성민, 이제인*(부산대학교)

Keywords: 배기밸브 스핀들, 라멜라 구조, 용체화 열처리, 시효 처리

선박 엔진의 배기밸브 스핀들은 고온 고압의 부식성 배기가스 환경에 노출되는 핵심 부품으로 우수한 고온 내부식성과 높은 인장강도가 요구되며, 최근 fcc γ상과 bcc α-Cr 상으로 구성된 라멜라 구조 기반 고Cr NiCrAl 합금이 주목받고 있다. 해당 라멜라 조직 및 석출상 제어를 위해, 적층결함에너지를 감소시키고 상안정성을 변화시킬 수 있는 Co 첨가 영향에 주목할 필요가 있다. 본 연구에서는 Ni-38Cr-3.8Al 합금에서 Ni을10, 20, 30, 40 wt%의 Co로 치환하여, 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 각 합금은 진공유도용해를 통해 주조되었으며, 균질화 열처리 및 냉간 압연을 거쳐 판재로 제조되었다. 판재 시편을 1200 ºC에서 용체화 처리한 후, 700 ºC 16 h 시효 열처리를 진행하여 라멜라 석출 거동을 비교하였다. 열처리된 합금의 기계적 특성은 비커스 경도와 인장 강도를 측정하여 평가하였다. 10, 20Co합금에서는 라멜라 석출이 관찰된 반면, 30Co 이상에서는 σ상이 석출되었다. 인장 시험 결과, 라멜라 구조 합금에서 전반적인 강도 향상을 나타냈다. 특히 20Co합금의 경우, 라멜라 구조와 구형 α-Cr이 적절히 석출되어 고강도 고연신 특성을 확보할 수 있었다.

[P1-25]

내열 고엔트로피 합금의 격자 왜곡 및 전단 탄성률 변화에 따른 Edge와 Screw 전위 거동 제어 : 김동현, 이강진, 허민아(공주대학교 신소재공학과, 첨단 분말 소재 부품 센터), 이찬호(Department of Materials Science and Engineering, The University of Auburn), 송기안*(공주대학교 신소재공학과, 첨단 분말 소재 부품 센터)

Keywords: 내열고엔트로피 합금, 전위 거동, 격자왜곡, 전단탄성계수, 고용체 강화

차세대 내열 소재로 주목받는 내열 고엔트로피합금(Refractory High-Entropy Alloys, RHEAs)은 우수한 상온 및 고온 기계적 물성을 가진다. 대부분의 합금은 체심입방(BCC) 단상 구조를 지니며, 구성 원소 간 원자 크기 차이가 기계적 물성에 영향을 미친다고 보고된다. 고전적 고용 강화 이론에 따르면 합금 내 전위 이동을 위한 임계 응력에 관여하는 핵심 인자는 원자 크기 차이에 의한 격자 왜곡(Lattice distortion)과 전단 탄성률(Shear modulus)이라고 알려져 있다. 최근 RHEAs의 극심한 격자 왜곡이 국부 응력장에 민감한 Edge 전위의 슬립(Slip)을 억제하며, 기존의 Screw 전위가 변형을 주도하던 기존의 일반적인 BCC 합금의 변형 거동에서 벗어난 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는, Edge와 Screw 전위 모두가 기계적 물성에 복합적으로 기여함을 시사한다. 따라서 RHEAs의 강화 메커니즘을 명확히 이해하기 위해서는 Edge 및 Screw 전위의 거동을 각각 독립적으로 제어하는 것이 요구된다. 본 연구에서는 격자 왜곡과 전단 탄성률을 고려하여 합금계들을 체계적으로 설계하여, 두 변수가 Edge 및 Screw 전위 거동과 기계적 물성에 미치는 영향을 분석하였다. 설계된 합금의 미세조직은 주사전자현미경(SEM) 및 X선 회절(XRD)을 통해 분석하였으며, 상온 및 고온압축 시험을 통해 기계적 물성을 평가하였다. 또한, In-situ 중성자 회절 시험을 활용하여 변형 과정 중 발생하는 Edge 및 Screw 전위의 거동 변화를 정량적으로 분석하였다. 본 연구(이 성과)는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2026-25487318)

[P1-26]

사용후핵연료 처분용 Ni-Cu-Al 합금의 시효 처리 조건에 따른 석출경화 거동: 배준우*(영남대학교)

Keywords: Ni-Cu-Al 합금, 석출경화, 시효처리

사용후핵연료의 심지층 처분을 위한 처분 용기는 장기간에 걸쳐 부식 저항성과 외부 하중에 견딜 수 있는 구조적 건전성을 동시에 확보해야 한다. 현재 대표적인 처분용기는 구조적 강도를 담당하는 내부 주철 구조체와 부식 저항성을 담당하는 외부 무산소동으로 이루어진 이중 구조를 채택하고 있다. 그러나 이러한 이중 구조는 용기의 두께 증가와 복잡한 제조공정으로 인해 경제성이 저하되는 한계를 가진다. 따라서 우수한 부식 저항성과 구조적 강도를 동시에 확보할 수 있는 단일 합금 기반 처분용기 소재의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 우수한 내부식성을 지닌 Ni-Cu계 합금의 강도 향상을 위해 Al을 첨가하여 설계한 Ni-30Cu-5Al (wt%) 합금에 대해 시효 온도와 시간에 따른 미세조직의 변화와 경화 거동의 상관관계를 분석하였다. 각 온도별 석출 거동을 비교한 결과 600 ºC에서는 8시간 시효 후 최고 경도인 256 HV0.1에 도달하였다. 650 ºC 시효 조건에서는 1시간 시효처리를 통해 기지 전체에 평균 15 nm 크기의 γ’ 석출물이 균일하게 분산되며 255 HV0.1의 경도를 달성하였다. 700 ºC에서는 평균 28 nm 크기의 석출물이 형성되며 최고 경도인 210 HV0.1에 도달하기까지 1시간이 소요되었다. 한편 128시간 이상의 장시간 시효 처리 시 모든 온도에서 과시효로 인한 석출물의 조대화로 경도가 감소하는 것을 확인하였다. 합금 기지의 평균 결정립 크기는 시효처리 전후 59 μm로 거의 변화하지 않아, 시효에 따른 경도 변화는 결정립 크기 변화보다는 γ’ 석출물의 형성과 성장에 기인한 것으로 판단된다. 결론적으로 시효 처리 시간은 Ni-Cu-Al 합금의 γ’ 석출 및 경화 거동을 결정하며, 최적의 시효 조건의 선정을 통해 나노 크기 γ’ 석출물을 균일하게 형성하고 높은 경도를 확보할 수 있음을 확인하였다. 최고 경도와 피크 시효 도달 시간을 고려하였을 때 본 합금의 적정 시효 조건은 650 ºC에서 1시간으로 판단된다.

[P1-27]

Directed Energy Deposition 공정으로 제조된 Ni 계 초내열 합금의 온도 조건에 따른 마모 거동 분석: 김영태*, 김대현, 김현중, 백건우, 신민호, 홍순직(공주대학교)

Keywords: Inconel 718, Haynes 214, DED, Wear

우주발사체 추진시스템에 적용되는 금속 부품은 고온 환경에서 부품 간 접촉과 상대운동에 의해 마모가 발생할 수 있으므로, 소재의 마모 특성에 대한 이해가 필요하다. 또한 우주발사체용 금속 소재에는 우수한 기계적 특성과 고온 산화저항성이 요구되며, 이러한 소재 특성은 온도 변화에 따른 마모 거동에 영향을 미칠 수 있다. 이에 본 연구에서는 우수한 기계적 특성을 갖는 Inconel 718과 고온 내산화성을 갖는 HAYNES 214를 선정하여 온도 변화에 따른 두 합금의 마모 거동을 분석하고자 하였다. DED(Directed Energy Deposition) 공정 전 원료 분말의 입도분포, 형상 및 유동 특성을 평가한 후 두 합금을 DED 공정으로 제조하였다. 제조된 시편은 별도의 열처리 없이 as-built 상태에서 미세조직과 경도를 분석하여 기초 소재 특성을 확인하였다. 마모시험은 ball-on-flat 방식으로 상온 및 100, 200, 300, 400 ºC에서 수행하며, 시험 온도에 따른 마찰계수, 비마모율을 마모흔의 표면과 단면을 분석하여 온도에 따른 마모 거동의 변화를 확인하였다. 이러한 분석을 통해 Inconel 718과 HAYNES 214의 온도별 마모 특성과 마모기구의 차이를 확인하고, 서로 다른 특성을 갖는 Ni계 초내열합금의 온도에 따른 마모 거동을 이해하기 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

[P1-28]

Twin Boundary Tilting in FCC Cu under Tribological Loading: A Molecular Dynamics Study: DongHyun KIM, Won-Seok Ko*(Korea Univ.)

Keywords: Twin, Tribology, Copper

Friction and wear characteristics of metallic materials are critically governed by deformation mechanisms occurring at the surface and

subsurface regions. In face-centered cubic (FCC) metals, internal twins play a dual role: dislocation motion is impeded by twin boundaries (TBs) to enhance mechanical strength, while the TBs dynamically respond to applied stresses during tribological loading. Therefore, elucidating the deformation behavior of internal twins under tribological conditions at the atomic scale is of fundamental importance for understanding and tailoring the tribological properties of twinned metallic materials. In the present study, molecular dynamics (MD) simulations are performed to investigate the deformation behavior of FCC Cu containing a coherent twin boundary (CTB) under nano-scratching conditions. The degree of CTB tilting is found to increase with increasing indentation depth, while negligible tilting is observed at shallower indentations. An increase in the indenter radius is also shown to promote more pronounced CTB tilting. In the early stage of deformation, the interaction between partial dislocations and the TB, which generates twin dislocations (TDs), is identified as the primary mechanism responsible for CTB tilting. Deformation contributions beyond TD-driven CTB migration are additionally identified. The present findings provide an atomic-scale understanding of TB deformation behavior under tribological loading conditions and offer a physical basis for the design of wear-resistant materials with twinned microstructures.

[P1-29]

유기첨가제에 따른 구리 박막의 미세조직 변화 및 기계적 특성 변화에 관한 연구: 최지연, 최재훈, 신한균, 김정한*(동아대학교)

Keywords: 이차전지, 유기첨가제, 구리 전해도금, 미세조직, 고강도

최근 전기자동차(Electric Vehicle) 및 에너지저장장치(Energy Storage System) 시장의 성장에 따라 이차전지의 고에너지밀도화 필요성이 커지면서, 음극 집전체용 전해동박의 초박화가 필수적으로 요구되고 있다. 그러나 두께가 얇아질수록 충·방전 시 발생하는 기계적 응력과 활물질의 부피 변화를 견디지 못해 기계적 신뢰성이 저하될 수 있어, 전해동박의 우수한 기계적 강도를 확보하는 것이 핵심 과제로 대두되고 있다. 전해도금 공정에서 유기첨가제는 구리의 결정 성장 거동에 영향을 미친다. 이를 통해 미세조직을 제어하여 구리 박막의 기계적·전기적 특성을 향상시키고자 한다. 결정립 미세화는 Hall-Petch 관계에 따라 강도를 향상시킨다. 하지만 결정립계 밀도가 증가하면 전자의 산란 빈도가 늘어나 유효 평균자유행로가 짧아지고, 이는 전기전도도 저하로 이어진다. 또한 결정립계에서의 응력 집중과 전위 이동 제한으로 인해 연신율도 감소할 수 있다. 따라서 낮은 비저항 특성과 강도-연신율 간의 물성 균형을 고려한 공정 설계가 필요하다. 이에 따라 유기첨가제 농도 및 조합 조건을 제어한 전해도금 공정을 통해 고강도 구리 박막을 제조하고, 첨가제 변수 변화에 따른 미세조직 변화와 기계적·전기적 특성 사이의 상관관계를 분석하였다. 도금된 구리 박막은 인장시험을 통해 인장강도와 연신율 등 기계적 물성을 평가하고, 4탐침법을 이용한 비저항 측정을 통해 전기적 특성을 평가하였다. 또한 전자후방산란회절(Electron Backscatter Diffraction) 분석을 통해 결정립 크기 분포, 결정 방위, 결정립계 특성을 확인하였다. 최종적으로 Hall-Petch 관계식을 바탕으로 유기첨가제 제어에 따른 결정립 미세화가 강도에 미치는 영향을 해석하여, 우수한 기계적 강도와 높은 전기전도도를 동시에 만족하는 구리 박막 제조를 위한 최적의 도금 공정 조건을 제안한다.

[P1-30]

Si 첨가 및 상 제어에 따른 Cu-Ga-Si 합금의 광학적·기계적 특성 : 임태민, 조가은, 장성문, 김현영, 홍성환, 박혜진, 김기범*(세종대학교)

Keywords: 상 제어, 과포화 고용체, 기계적 특성, 광학적 특성

Cu 기반 합금은 합금 원소의 첨가에 따른 전자구조 변화를 통해 광학적 특성을 조절할 수 있으며, Ga는 α-Cu 내 비교적 높은 고용도를 바탕으로 광학적 특성 구현 범위의 확장과 고용강화를 동시에 기대할 수 있다. 본 연구에서는 Cu–Ga 합금의 기계적 특성을 추가로 향상시키기 위해 치환 고용에 따른 격자 왜곡을 유도할 수 있는 Si을 제3원소로 첨가하고, $Cu_{100-x-\gamma}Ga_xSi_\gamma$ (x = 3–13 at.%, y = 1, 3, 5 at.%) 합금의 조성 및 상 변화가 기계적·광학적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 상 및 미세조직 분석 결과, Si 1 at.% 합금에서는 조사된 Ga 함량 범위에서 α-Cu 단상 고용체가 유지되었다. 반면 Si 함량이 증가함에 따라 단상 안정 영역이 축소되고 α-Cu와 ζ′-Cu_3Ga로 구성된 이중상 조직이 형성되었으며, 일부 이중상 합금은 용체화 처리와 급랭을 통해 단상 과포화 고용체로 전환되었다. Ga 함량을 7 at.%로 고정하고 단상 상태의 시편을 비교한 결과, Ga7-Si1 대비 Ga7-Si5_S의 인장강도와 연신율은 각각 약 44%와 28% 증가하였다. 또한 동일 조성의 이중상 및 용체화 처리 시편을 비교한 결과, 단상화에 따라 항복강도는 감소하였으나 인장강도는 유사한 수준으로 유지되었고 연신율은 증가하여 상 구성에 따른 기계적 특성 차이가 확인되었다. 광학적 특성 분석 결과, Cu–Ga 이원계의 단상 영역에서는 Ga 함량 증가에 따라 a* 값이 감소하고 b* 값이 증가하였으며, 이중상 형성 이후 b* 값이 감소하고 용체화 처리에 따른 단상화 이후 다시 증가하는 경향을 나타냈다. Cu–Ga–Si 삼원계에서도 Ga 함량 변화에 따른 색좌표 이동이 주된 경향으로 나타났으며, Si 함량에 따른 광학적 특성 변화는 상대적으로 제한적이었다. 따라서 본 연구는 Cu–Ga–Si 삼원계 합금에서 Si 첨가와 용체화 처리를 통한 상 및 미세조직 제어를 통해 Ga 함량에 따른 광학적 특성 변화 경향을 유지하면서 기계적 강도와 연성을 조절할 수 있음을 보여주며, 기계적·광학적 특성을 함께 고려한 Cu 기반 합금 설계 가능성을 제시한다.

[P1-31]

Quantitative analysis and modeling of static grain-growth in Mg–Al–Zn alloys: Yeseul Mun, Jihun Park, Kyungmoon Kim, Hee-Tae Jeong, Woo Jin Kim*(Hongik Univ.)

Keywords: Mg-Al-Zn alloy; annealing; grain growth; second-phase particle; strengthening mechanism

Magnesium–aluminum–zinc (Mg–Al–Zn) alloys are widely used as lightweight structural materials because of their low density and high specific strength. Their mechanical performance is strongly influenced by microstructural features, particularly grain size and second-phase particles. However, the relatively low thermal-stability of Mg alloys can lead to rapid static grain-growth during exposure

to elevated temperatures, resulting in a reduction in strength. Although grain growth in Mg–Al–Zn alloys has been widely investigated, the combined effects of alloy composition, initial grain size, and the concurrent evolution of second-phase particle size and fraction remain insufficiently quantified. In the present study, Mg–xAl–1Zn alloys with x = 3, 6, and 9 wt.% are subjected to isothermal annealing under various conditions to systematically examine the effects of Al content, initial microstructure, annealing temperature, and duration time on static grain-growth. The resulting data are used to establish a generalized relationship describing static grain-growth across the Mg–Al–Zn alloy series. Therefore, the proposed framework is intended to predict microstructural evolution during thermal exposure, thereby providing a practical basis for evaluating thermal stability and selecting appropriate annealing conditions for AZ-series Mg alloys.

[P1-32]

나노-CT를 활용한 고온용 Al-Ce-(Mn) 합금의 공정조직 3차원 구조 진화 및 강화 거동 분석: 임민혁, 조우빈, 조원준, 최우솔, 한인성*(경북대학교)

Keywords: 나노-CT, Al 합금, 고온용 합금, 금속간화합물, 열처리

기존 고온용 Al 합금의 석출강화 기구는 고온 노출 시 석출상의 조대화 및 소멸로 인해 강도와 크리프 저항이 급격히 저하되는 한계가 있다. 반면, 주조 시 형성되는 Al-Ce 공정조직은 우수한 열적 안정성을 바탕으로 고온에서도 높은 체적분율과 3차원적 구조 연속성을 유지하여 차세대 고온 강화 기구로 주목받고 있다. 이에 본 연구에서는 Al-Ce 공정조직을 추가적으로 강화하기 위해, 저비용이자 재활용 스크랩에 함유된 Mn 첨가 효과에 주목하였다. 이에 본 연구에서는 포항가속기연구소 7C 빔라인의 Zernike 위상차 나노-CT를 활용하여 Al-Ce 및 Al-Ce-Mn 합금의 공정 IMC 3차원 구조를 동일 조건에서 비교 분석하였다. 특히 고온 열처리 전후 미세조직 간 연결성을 대표 지표로 삼고, 비표면적 및 상의 두께 분포를 보조 지표로 하여 구조 변화를 정량적으로 추적함으로써, Mn 첨가가 유발하는 3차원 구조 차이가 고온 환경에서 나타나는 물성 변화를 규명하고자 한다. 본 연구를 통해 확보되는 3차원 구조 정량 데이터는 Mn 첨가 Al-Ce 합금의 강화 기구를 구조적 관점에서 해석하는 근거를 제공하며, 나아가 고온용 주조 Al 합금의 조성 설계 및 열처리 조건 최적화, 그리고 Al 합금의 적용 온도 상한 확장을 통한 고온 경량화 실현의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

[P1-33]

방사광 나노-CT 기반 3차원 시간분해 관찰을 통한 Al-7Si-xCe 합금의 공정 Si 미세화·구상화 거동 분석: 최우솔, 조우빈, 조원준, 임민혁, 한인성*(경북대학교)

Keywords: Al-Si 합금, 공정 Si 구상화, Ce 첨가, 방사광 나노-CT, 3차원 미세조직 정량화, 열처리

자동차·항공 부품의 경량화 요구로 Al-Si 합금의 활용이 확대되고 있으나, 주조 직후 존재하는 침상 및 판상 형태의 공정 Si는 응력 집중을 유발하여 합금의 연성과 피로수명을 저하시킨다. 이를 극복하기 위해 열처리로 공정 Si를 구상화하여 미세조직을 제어하는 공정이 필수적이다. 공정 Si의 구상화 거동에 관한 기존 연구는 활발히 진행되어 왔으나, 대부분 열처리 전후나 각기 다른 열처리 조건에서 얻은 2차원 단면 분석에 의존해 왔다. 따라서 동일한 Si 조직의 3차원 형상 변화를 열처리 시간에 따라 직접 추적하고 정량화한 연구는 여전히 제한적이다. 본 연구에서는 Al-7Si-xCe(x = 0, 0.5, 1.5 wt%) 합금을 대상으로, 포항가속기연구소 7C 빔라인의 Zernike 위상차 나노-CT(phase-contrast nano-CT)를 활용하여 동일 시편 내 공정 Si의 형상 변화를 530 ºC 열처리 시간(0, 10, 25, 45분)에 따라 3차원적으로 연속 추적하였다. 또한, 세그멘테이션 파이프라인을 적용해 Si 및 Al_2Si_2Ce 상의 거동을 정량적으로 분석했다. 분석 결과, Ce 첨가는 초기 응고 단계에서부터 공정 Si의 형태적 미세화를 유도했으며, 이어지는 열처리 과정에서의 구상화 속도 역시 Ce 함량이 높을수록 촉진됨을 확인하였다(구상화 완료 소요시간: 1.5Ce < 0.5Ce < 0Ce). 구상화 거동은 표면 확산에 의한 분절(fragmentation)이 선행된 후 부피 확산에 의한 구상화(spheroidization)로 이어지는 양상을 보였다. 반면, Al_2Si_2Ce 상은 해당 열처리 조건(530 ºC, 45분) 동안 형태적 변화 없이 안정적으로 유지되었다. 결과적으로 본 연구는 조성 제어(Ce 첨가)에 따른 초기 응고 조직의 미세화 효과와 열처리 공정이 유발하는 구상화 거동을 방사광 나노-CT를 이용해 동일 시편·단일 정량 지표로 연속 추적했다는 점에서 기존 연구와 뚜렷한 차이를 갖는다. 이 결과는 향후 Al-Si 합금의 Ce 첨가량 및 열처리 조건 최적화와 정밀한 미세조직 제어 기반의 고성능 합금 설계에 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

[P1-34]

Role of Interstitial Oxygen in ω Suppression and TRIP/TWIP deformation mechanisms for Ti-Cr Alloys: MERDAN FARHADOV(Department of Material Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)), Yeonju Noh, Pyuck-Pa Choi*(Department of Material Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Department of Material Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

Keywords: Beta Titanium, Oxygen, Deformation mechanism, Phase transformation

The metastable ω phase significantly reduce ductility by restricting dislocation motion during plastic deformation and suppressing transformation-induced plasticity (TRIP) and twinning-induced plasticity (TWIP), mechanisms responsible for sustained work hardening [1]. In some β-titanium alloys, interstitial oxygen has been reported to suppress the formation of the ω phase. Furthermore, it reported that delayed TRIP initiation improves yield strength, and suppression of twin broadening promotes continuous twin nucleation, thereby boosting the strain hardening capability [2]. However, the effect of oxygen varies depending on the alloy system [3]. In this

study, role of small amount of oxygen interstitial on phase transformation kinetics and deformation mechanism in the Ti-Cr-xO (x= 0, 0.1, 0.25) system was investigated. The samples were fabricated by arc-melting, with oxygen level controlled via TiO2 powder additions. The changes in ω-phase formation kinetics induced by interstitial oxygen were evaluated via TEM-SAED analysis on specimens water-quenched from temperatures above the β-transus. Hardness was evaluated, and tensile properties were measured using micro-tensile testing combined with digital image correlation (DIC). Microstructural evolution before and after deformation was analyzed via EBSD to investigate the deformation mechanisms. Additionally, fractographic analysis of the fracture surface was performed to examine the fracture behavior. References [1] D. Choudhuri, Y. Zheng, T. Alam, R. Shi, M. Hendrickson, S. Banerjee, Y. Wang, S.G. Srinivasan, H. Fraser, R. Banerjee, Coupled experimental and computational investigation of omega phase evolution in a high misfit titanium-vanadium alloy, Acta Materialia 130 (2017) 215–228. [2] Y. Chong, R. Gholizadeh, B. Guo, T. Tsuru, G. Zhao, S. Yoshida, M. Mitsuhara, A. Godfrey, N. Tsuji, Oxygen interstitials make metastable β titanium alloys strong and ductile, Acta Materialia 257 (2023) 119165. [3] K. Chou, E.A. Marquis, Oxygen effects on ω and α phase transformations in a metastable β Ti–Nb alloy, Acta Materialia 181 (2019) 367–376.

[P1-35]

열처리 공정 제어에 따른 Zr-702의 미세조직 변화 및 기계적 특성 평가: 곽선영, 신승환, 이강진, 송기안*(공주대학교 신소재공학과, 첨단 분말 소재 부품 센터)

Keywords: Zirconium, β-Quenching, Widmanstatten structure, Heating rate

상업용 순수 지르코늄은 뛰어난 내식성과 낮은 열 중성자 흡수 단면적을 지니고 있어 원자력 및 항공우주 등 다양한 산업 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 대표적으로 Zr702는 고온 및 산성 환경에서 우수한 부식 저항성과 높은 연성 및 성형성을 동시에 확보할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 부식 환경 내에서 구조적 하중을 견뎌야 하는 구조재로서 적용 범위를 넓혀 활용되기에는 제한적인 기계적 특성을 나타내며, 이를 원소 첨가를 통한 고용강화 및 β퀜칭 열처리를 통한 미세조직 제어로 개선하는 방식이 제안되어왔다. 하지만 이러한 연구는 지르코늄의 강도 향상에만 집중되어 왔으며, 미세조직적 균일성 저하 및 연성 감소가 발생하는 문제가 여전히 남아있다. 따라서 본 연구에서는 β퀜칭 열처리 공정 제어를 통해 Zr702의 물성 향상과 동시에 연성 저하를 억제하는 연구를 진행하고자 하였다. 약 865 ºC 이상에서 α(HCP) 상에서 β(BCC)상으로 상변태 하는 Zr702는 상변태 온도 이상으로 가열한 후 급랭시키면 α상인 Widmanstätten 미세조직이 형성되며, 소재의 강도를 향상시킬 수 있다고 보고되었다. 그러나 연성의 저하는 필연적으로 발생하며, 이를 개선하기 위해서는 열처리 온도와 유지시간 이외의 다른 요소를 통해 결정립의 형태와 크기 제어가 요구되는 것을 본 연구에서 실험을 통해 확인하였다. 열처리 공정에서 승온 속도는 결정핵 생성 및 원자 확산에 영향을 미쳐 결정립의 크기와 반비례 관계를 가진다. 승온 속도가 빠를수록 미세한 결정립이 형성되는 반면, 속도가 느릴수록 충분한 확산 시간이 확보되어 조대한 결정립이 형성되는 경향이 있다고 알려져 있다. 구체적인 실험 방법은 β퀜칭 열처리 조건을 충족하기 위해 900 ºC 이상의 다양한 온도 범위에서 열처리를 수행하였다. 또한, 열처리 목표 온도에 도달하는 승온 속도를 조절하여 이에 따른 미세조직 및 기계적 물성 변화에 대해 분석하고자 하였다. 주사전자현미경(SEM) 및 전자 후방 산란 회절(EBSD)을 이용하여 미세조직 분석을 진행하였고, 비커스 경도시험계(HV) 및 상온 인장 시험(UTM)을 통해 기계적 특성 평가를 진행하였다. 본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다 (RS-2024-00436523)

[P1-36]

Synthesis of Spherical W-Mo Alloy Powder by Ultrasonic Spray Pyrolysis and Subsequent Hydrogen Reduction: Wonyong Kwon, Eui Seon Lee, Ji Young Kim, Sung-Tag Oh*(SEOULTECH)

Keywords: W-Mo alloy, ultrasonic spray pyrolysis, hydrogen reduction

Tungsten-molybdenum (W-Mo) alloys have attracted considerable attention as structural materials for extreme environments, including nuclear reactors, aerospace, and high-voltage/current electrical applications, owing to their high melting point, low coefficient of thermal expansion, and excellent high-temperature strength. However, due to the high melting point and ductile-brittle transition temperature (DBTT), powder metallurgy technology has been used to fabricate W-Mo alloys with uniform composition and complex shapes. In particular, to obtain fully densified W-Mo alloys, the synthesis of homogeneous alloy powders with small particle size, non-agglomeration, uniform morphology, and high purity is required. In this regard, W-Mo alloy powders have typically been fabricated via mechanical alloying methods and sol-gel techniques combined with hydrogen reduction, but these methods were susceptible to contamination, irregular shape, and elemental heterogeneity. Hence, the solution-based ultrasonic spray pyrolysis (USP) method has recently been introduced due to its significant advantages, such as a variety of precursors, excellent atomic homogeneity, easily controllable particle morphology and size, and the capability for continuous production. Thus, in this study, we aimed to synthesize homogeneous W-Mo alloy microspheres via USP combined with a subsequent hydrogen reduction. As precursors, the ammonium metatungstate hydrate and ammonium molybdate tetrahydrate were dissolved in deionized water to a target concentration of 25 mM. A 1.7 MHz ultrasonic spray generator was used to nebulize microdroplets, which were carried to the high-temperature reactor by a nitrogen carrier gas. The microdroplets were then evaporated at 200 ºC and pyrolyzed at 500 ºC continuously. The as-synthesized W-Mo-O microspheres were post-annealed at 500 ºC for 1 h in an air atmosphere to obtain a high-crystalline $W_{0.5}Mo_{0.5}O_3$ phase. Finally, the homogeneous W-Mo alloy powder was fabricated by hydrogen reduction at 750 ºC for 1 h. The morphology, phase, and hydrogen reduction behavior were analyzed by SEM, XRD, XPS, and TG-DTA. As a result, fine and

uniform size of W-Mo microspheres were successfully synthesized without any agglomeration and elemental segregation. This study suggests a promising way for synthesizing elementally homogeneous W-Mo alloy powders by USP combined with hydrogen reduction.

[P1-37]

습식환원 기반 니켈 나노분말의 $CaCl_2$ 첨가에 따른 형상 및 분산성 제어: 최시우(인하대학교 화학공학과, 한국생산기술연구원), 심재진*(한국생산기술연구원)

Keywords: 니켈 나노분말, 습식환원, 고분자 분산제, $CaCl_2$, 분산성

니켈 나노분말은 우수한 전기전도성, 내산화성 및 촉매활성으로 전자부품, 에너지 저장장치 및 촉매 시스템에 적용되는 핵심 기능성 소재이다. 특히 적층세라믹콘덴서(MLCC) 내부전극에는 100 nm 이하의 미세한 입도, 좁은 입도분포, 구형 형상 및 우수한 분산성이 요구된다. 그러나 나노크기의 금속분말은 높은 표면에너지와 입자 간 인력으로 인해 쉽게 응집되어 균일한 입도분포와 분산성을 확보하기 어렵다. 기존 PVD 및 CVD 공정은 높은 공정온도와 설비비용 등의 한계가 있어 습식환원법이 대안으로 활용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 상용 $NiCl_2$ 기반 습식환원 공정에서 환원제와 고분자 분산제 조건에 따른 입도 및 형상 변화를 확인하고, $CaCl_2$의 첨가가 니켈 나노분말의 응집 및 분산 특성에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위해 하이드라진 농도를 0.8, 1.2 및 1.6M로 조절하고 PVA와 분자량이 서로 다른 PVP(29k, 55k)를 적용하여 환원 및 분산 조건에 따른 입자 성장과 형상 변화를 비교하였다. 이후 PVA 기반 합성조건에서 $CaCl_2$를 환원반응 단계에 첨가하는 조건과, 합성·세척·건조 후 회수된 니켈 분말을 DI water에 재분산한 뒤 첨가하는 조건으로 구분하여 $CaCl_2$ 투입 시점에 따른 영향을 비교하였다. 제조된 분말은 XRD, FE-SEM, TEM 및 DLS 등의 분석기법을 이용하여 결정상, 입자 형상 및 분산 거동을 분석하였다. 분석 결과, 기본 습식환원 공정에서는 단일 FCC Ni상이 형성되었으며 환원제와 PVA/PVP 조건에 따라 입자의 성장 및 형상이 변화하였고, PVA 조건에서 약 100 nm 수준의 구형에 가까운 입자가 형성되었다. $CaCl_2$를 환원단계에 첨가한 경우에는 입자의 성장 및 형상과 함께 응집 거동이 변화하는 반면, 합성 후 처리한 경우에는 1차 입자의 형상을 비교적 유지하면서 DLS에서 확인되는 응집체 크기가 감소하여 재분산성이 향상되는 경향을 나타냈다. 이를 통해 $CaCl_2$의 첨가 시점이 니켈 나노분말의 형상과 응집 및 재분산 거동에 영향을 미치는 주요 공정 인자로 작용하며, 습식환원 공정에서 입자의 형상과 분산성을 함께 제어하기 위한 공정조건으로 활용할 수 있음을 확인하였다.

[P1-38]

금속 적층제조에서 Ti:B 비율 및 TiB_2 형성 방식에 따른 Al6061 합금의 미세조직 변화: 이태규*, 신주원, 이원희(국립한밭대학교), 김윤희(한국과학기술원)

Keywords: Al6061, SMART process, TiB_2, Ti:B ratio, Directed Energy Deposition

경량합금인 Al6061은 낮은 밀도와 높은 비강도, 우수한 가공성을 바탕으로 항공 구조재를 비롯한 다양한 경량 부품에 활용되고 있다. 그러나 Al6061은 금속 적층제조 과정에서 응고 균열이 발생하기 쉬우며, Al의 높은 레이저 반사율과 열전도성으로 인해 안정적인 용융풀 형성 및 열 제어에도 어려움이 있다. 특히 급속한 용융 및 응고 과정에서 주상정 성장이 촉진되면 응고 균열 민감성이 증가할 수 있어, 미세한 등축정 형성을 유도하는 응고 조직 제어가 요구된다. TiB_2는 α-Al의 이종 핵생성을 촉진하는 대표적인 세라믹 접종제이며, 잉여 Ti가 존재할 경우 TiB_2의 핵생성 효능이 향상되는 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 주조 공정에서 널리 연구되어 온 Ti 조성비를 기반으로, Directed Energy Deposition(DED)의 급속 용융 및 응고 환경에서 Ti와 B의 반응 및 TiB_2 형성 거동을 탐색하고자 하였다. 이를 위해 Al6061을 기지 분말로 사용하여 Ti 및 B 분말을 첨가한 조건과 상용 TiB_2를 직접 첨가한 조건을 구성하였으며, Surface Modification And Reinforcement Transplantation(SMART) 공정을 이용하여 복합 분말을 제조하였다. Ti 및 B 첨가 조건에서는 원소 간 반응을 통한 TiB_2 형성을 유도하였으며, Ti 조성비 변화에 따른 TiB_2 형성 및 잔류 Ti의 거동을 상용 TiB_2 직접 첨가 조건과 비교하였다. 제조된 복합 분말을 이용하여 DED 적층을 수행하고, 적층 시편의 미세조직 및 상온 물성을 분석하였다. 이를 통해 Ti 조성비와 TiB_2 형성 방식이 DED의 급속 용융 및 응고 환경에서 TiB_2 형성과 미세조직 변화에 미치는 영향을 확인하고, TiB_2 강화 Al6061 복합재 제조를 위한 DED 공정의 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

[P1-39]

HIP 처리를 통한 단결정 니켈기 초합금의 미세조직 변화와 고온 기계적 특성 분석: 김동진, 조대현(국립창원대학교), 구지호(한화에어로스페이스), 이재현*(국립창원대학교)

Keywords: 초내열합금, HIP 공정, 단결정, 크리프

본 연구에서는Modified PWA1483(0.6 wt% Hf 첨가) 단결정 니켈기 초합금을 대상으로, HIP(Hot Isostatic Pressing) 공정이 미세조직 변화 및 고온 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 일반적으로 단결정 초내열합금은 낮은 기공률과 재결정 유발 가능성으로 인해 HIP 공정 적용이 제한적인 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 소재의 고온 물성을 극대화하기 위해 초고속 냉각속도(660 K/min)가 수반되는 HIP 공정을 도입하였다. 또한 HIP 처리 온도 및 유지 시간을 기존 용체화(Solution) 열처리 조건과 동일하게 제어함으로써 HIP 공정의 용체화 처리 대체 가능성을 함께 검토하였다. 미세조직 및 물성 평가 결과, 'HIP + 용체화 + 시효' 처리를 순차적으로 적용한 조건에서 가장 우수한 고온 기계적 특성이 확보됨을 확인하였다. 이러한 물성 향상은 고속 냉각 HIP 공정에 의한 내부 결함 제어와 더불어, 후속 열처리 과정에서 강화상인 γ' (Gamma prime) 상의 크기·형태 최적화 및 탄화물 형상의 개선이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다.

[P1-40]
LPBF Ti-6Al-4V 미니어처 인장시편의 격자 구조에 따른 인장 거동 및 미세조직 분석: 송영준, 김영훈, 신선호, 성효경*(국민대학교)
Keywords: 미니어처 인장시편, 격자구조, Ti-6Al-4V, LPBF, 미세조직-물성 상관관계

최근 인공지능(AI) 기반 소재 설계 및 데이터 기반 신소재 개발이 가속화됨에 따라, 대량의 신뢰 성 있는 기계적 물성 데이터를 확보하는 것이 핵심 과제로 대두되고 있다. 그러나 표준 규격 인장 시편을 이용한 시험은 다량의 소재와 긴 시험 시간을 요구하여 빅데이터 구축에 한계가 있으며, 이를 완화하기 위해 시편을 소형화한 미니어처 인장시험법이 제안되었다. 다만, 미니어처 시편 역시 하나의 시편에서 단일 물성 정보만을 제공한다는 한계가 있어, 보다 다양한 기계적 거동 정보 를 효율적으로 확보할 수 있는 시편 설계가 요구된다. 본 연구에서는 LPBF로 제조된 Ti-6Al-4V 합 금 미니어처 인장시편의 표점부에 격자구조를 도입하고, 격자 구조 및 소재 미세조직이 시편의 기 계적 거동에 미치는 영향을 분석하였다. ASTM E8 미니어처 인장시편 규격을 기반으로 표점부 내 부에 형상과 셀 크기가 상이한 격자구조를 삽입한 모델을 설계하고, 유한요소해석(Finite element analysis)을 통해 격자구조가 적용된 시편과 격자가 없는 표준 미니어처 시편의 인장 거동을 비교 하여 격자 형상, 상대밀도 및 셀 크기에 따른 응력-변형률 곡선, 항복 및 인장강도, 변형 집중 거동 의 변화를 규명하였다. 또한 동일 조건으로 LPBF 제작한 실제 미니어처 시편의 인장시험을 병행 하여 미세조직과 기계적 물성 간의 상관관계를 평가하였다. 본 연구는 미니어처 시편 표점부의 격 자 구조 설계 및 소재 미세조직 제어를 통해 기계적 물성 데이터 확보 효율을 높이는 동시에 국부 변형 거동을 제어할 수 있음을 규명하였으며, 소재 데이터 고속생성을 위한 시편 설계 최적화의 기초자료를 제공한다.

[P1-41]
코발트기 초합금의 DED 공정 중 균열 억제 연구: 이태규*, 김승규(국립한밭대학교)
Keywords: 코발트계 초합금, DED, 적층제조

Tribaloy T-400은 Co-Mo-Cr-Si계 Laves상을 기반으로 내마모성과 내갈링성이 우수하여 하드페이싱 코팅에 활용된다. Laves상은 전위의 생성과 이동에 강하게 저항하여 높은 경도를 제공하지만, 소성변형으로 응력을 완화하지 못해 연신율이 낮다. 이 때문에 레이저 적층 과정에서 인장 잔류응력이 축적되면 균열이 쉽게 발생하며, 이러한 균열 민감성이 T-400 코팅의 실제 적용을 제약해 왔다. T-400의 균열을 억제하기 위해 기판 예열, 조성 수정, 버퍼층 삽입, 후처리의 방법이 사용되어 왔다. 그러나 예열은 잔류응력을 낮추는 대신 기판의 Fe 희석을 촉진해 Laves상 분율과 경도를 떨어뜨리고, Fe 첨가에 의한 조성 수정도 같은 이유로 경도와 내마모성을 저하시킨다. 버퍼층을 삽입하면 순수 T-400의 물성을 얻기 어렵고, 열간등방압 후처리는 표면과 연결된 균열을 봉합하지 못한다. 결국 기존 방법에서는 균열 억제와 경도 유지가 상충하며, 두 목표를 동시에 만족하는 조건은 충분히 다루어지지 않았다. 본 연구는 균열 억제와 희석 저감을 함께 달성하는 공정 조건을 찾는 것을 목표로 한다. 이를 위해 두 요인을 각각 다른 공정 변수로 제어한다. 희석은 저입열 적층으로 기판 용융을 억제해 낮추고, 균열은 예열로 냉각 시 온도 구배와 잔류응력을 완화해 억제한다. 다만 저입열은 냉각속도를 높여 균열에 불리하게 작용하므로, 예열이 이를 상쇄하는 역할을 함께 맡는다. 기판으로는 T-400과의 열팽창계수 차이가 작은 마르텐사이트계 스테인리스강 SUS420을 사용한다. SUS420은 계면 열응력을 줄여 주지만 열영향부에서 마르텐사이트 변태가 일어나 새로운 균열원으로 작용하므로, 예열 온도는 이 취화를 억제하면서도 희석을 최소화하는 범위에서 설정한다. 실험은 지향성 에너지 증착(directed energy deposition) 공정으로 수행하며, 레이저 출력과 스캔 속도, 예열 온도를 변수로 공정 조건을 구성한다. 각 조건의 시편에서 균열 밀도와 희석률을 측정하고, 광학현미경과 주사전자현미경으로 균열이 발생한 위치와 진행 경로를 클래딩 층, 계면, 열영향부로 나누어 관찰한다. 아울러 경도 분포를 측정해 열영향부의 취화 정도를 확인한다. 이를 바탕으로 무균열 조건과 희석률 10% 이하 조건이 겹치는 공정창을 도출하고, SUS420 기판에서 경도를 유지하면서 균열 없이 적층할 수 있는 조건을 규명하고자 한다.

[P1-42]
직접용융증착법으로 제조된 INCOLOY 903 합금의 극저온·상온·고온 기계적 특성과 미세조직 분석: 여승민, 김정기*(경상국립대학교)
Keywords: Additive manufacturing, Incoloy alloy, Extreme environments, Process optimization, Mechanical property, Microstructure

우주환경 부품은 극저온부터 고온까지 광범위한 온도 환경에 노출되므로, 높은 강도 및 인성을 가지면서 온도 변화에 대한 상 안정성이 요구된다. INCOLOY 903(IN903) 합금은 낮은 열팽창계수와 우수한 강도를 갖는 Fe-Ni-Co계 초내열합금으로 극한환경용 우주항공 부품에 적용된다. 기존 공정으로 제조된 IN903 부품은 복잡 형상의 구현과 부품 일체화를 통한 경량화에 한계가 있다. 따라서 부품 일체화를 통해 경량화를 구현할 수 있는 직접용융증착법(Directed Energy Deposition, DED)의 적용이 주목받고 있다. 이에 본 연구에서는 DED 공정으로 제조된 IN903 합금의 최적 공정 조건을 레이저 출력 및 주사 속도에 따른 치수 정확도, 상대밀도, 기공률을 비교하여 도출하였다. 이후 As-built 및 Solution treatment aging 열처리 적용 시편에 대해 극저온·상온·고온 인장 특성과 극저온·상온 충격 특성을 평가하였다. 또한 미세조직 분석을 통해 탄화물과 석출상 등이 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 바탕으로 DED 공정으로 제조된 IN903 합금의 극한 환경용 항공우주 부품 적용 가능성을 평가하였다

[P1-43]
금속-유기 골격체의 직접 성장을 통한 무접착제 금속-고분자 이종 접합 및 계면 특성 연구: 명건우, 한병준, 김정한*(국립한밭대학교)
Keywords: 금속-유기 골결체, 이종 접합, 표면처리, 기계적 맞물림, 알루미늄 합금

최근 경량화 및 다기능성이 요구되는 첨단 산업 분야에서 금속과 고분자의 이종 접합 기술이 광범위하게 활용되고 있다. 그러나 기존의 접합 공정은 주로 화학적 접착제에 의존하고 있어, 시간이 지남에 따른 결합력 저하나 열화학적 불안정성 등 치명적인 한계가 존재한다. 이에 본 연구는 기존 화학 접착제를 대체할 혁신적인 물리적 연결 고리로서 금속-유기 골격체의 완전히 새로운 활용

방향성을 제시한다. 금속-유기 골격체는 금속 이온과 유기 리간드로 구성된 고도의 다공성 및 결정성 물질로, 정밀한 기공 제어와 넓은 내부 표면적이라는 압도적인 장점을 지니고 있다. 하지만 이러한 훌륭한 특성에도 불구하고 주로 가스 저장이나 약물 전달 등에만 활용되었을 뿐, 이종 소재 접합을 위한 계면 공학에 적용된 사례는 세계적으로도 극히 드물다. 이러한 독창적인 가능성에 착안하여, 본 연구에서는 수산화나트륨 수용액으로 표면을 활성화한 AA8079 알루미늄 합금 기판을 직접적인 금속 이온 공급원으로 활용해 MIL-53(Al) 층을 제자리 수열 합성하였다. 합성 과정에서 코팅층의 박리나 제어되지 않은 벌크 침전을 방지하기 위해 전구체 용매의 조성을 세밀하게 제어하였으며, 150 ℃에서 24시간 동안 반응을 진행하여 성장 조건을 정밀하게 최적화하였다. 또한, 합성 후 용매 침지 및 치환 공정을 거쳐 잔류 미반응 리간드를 완벽히 제거하였다. 주사전자현미경 분석을 통해 화학적 접착 물질 없이도 기판에 견고하게 성장한 계면을 확인하였고, 이후 해당 계면에 폴리프로필렌을 사출 성형한 결과 용융된 고분자 수지가 사출 압력에 의해 다공성 구조 내부로 깊숙이 침투하여 강력한 기계적 맞물림을 형성하는 접합 기구를 증명하였다. 나아가 본 발표에서는 응력 인가 시 고분자가 아닌 알루미늄 기판과 금속-유기 골격체 계면에서 우선적으로 발생하는 박리 거동을 분석하고, 해당 계면의 초기 결합력을 극대화하기 위한 표면 처리 및 추가 공정 최적화 결과를 함께 논의한다. 궁극적으로 본 연구는 금속-유기 골격체의 나노 다공성을 활용한 계면 제어가 향후 무접착제 이종 접합 기술의 획기적인 패러다임이 될 수 있음을 보여주고자 한다.

[P1-44] [Canceled]
밀스케일 업사이클링을 위한 활성탄 복합 펠렛 제조 및 니켈 흡착 특성 분석: 허홍, 조연하, 김세호*(고려대학교)

[P1-45]
LLM 기반 격자구조 압축 물성 데이터 수집 프레임워크: 최성훈, 남주형, 성효경*(국민대학교)
Keywords: 격자구조, 문헌 데이터베이스, 압축 물성, LLM
격자구조의 압축 물성 데이터는 개별 문헌에 분산되어 있고 상대밀도 등 실험 조건도 상이하여 설계 및 물성 비교를 위해서는 체계적인 통합과 검증이 필요하다. 본 연구에서는 문헌 데이터 처리를 수집·추출·검증·빌드의 네 단계로 구성한 파이프라인을 구축하였다. 수집 단계에서는 정규식으로 표 캡션을 인식해 압축 결과표를 포함한 문헌을 선별하고, 추출 단계에서는 언어모델을 이용해 물성값을 정해진 스키마로 추출하면서 원문 문구와 표 위치를 함께 기록하였다. 검증 단계에서는 값과 인용의 일치 여부 및 단위 정합성을 수치별로 검사하여 부적합한 값과 행을 제외하였다. 빌드 단계에서는 단위 환산 후 동일 문헌에서 상대밀도만 달리한 시편군을 시리즈로 묶어 Gibson–Ashby 멱법칙을 피팅하고, 품질 및 상대밀도 범위 기준을 통과한 시리즈로 상대밀도에 따른 압축 물성 경향을 정리하였다. 언어모델은 추출 단계에서만 사용하고 나머지 과정은 파이썬으로 자동화하였으며, 논문 단위 원자료를 보존하여 판정 기준 변경 시에도 데이터베이스를 재구성할 수 있도록 하였다. 이를 통해 유한요소해석으로 예측한 물성을 문헌 경향과 비교하여 신규 격자구조의 물성을 평가하는 절차로 확장하고자 한다.

[P1-46]
삼중주기 최소곡면 기반 다공성 금속 구조의 방향별 탄성계수 역설계: 김주안, 김영훈, 성효경*(국민대학교)
Keywords: 삼중주기최소곡면, 탄성계수, 역설계, Ti-6Al-4V, 미세조직
삼중주기 최소곡면 기반 다공 구조는 매끄러운 연속 곡면과 3차원으로 연결된 기공을 가져, 적층제조 다공성 금속 부품의 설계 기저로 주목받고 있다. 특히 체내 금속 임플란트에서는 응력 차폐를 줄이기 위한 강성 저감, 뼈가 자라 들어올 수 있는 다공률과 기공 연결성, 그리고 뼈의 방향성에 대응하는 방향별 탄성계수가 함께 요구된다. 그러나 선행 연구에서의 상대밀도 조절, 구배부여, 위상 혼합 설계는 세 축의 탄성계수를 함께 변화시키거나 부위별 물성 분포를 조절하는 수단이어서, 단위셀 하나에서 세 방향의 탄성계수를 각각 목표값으로 지정하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 목표 방향별 탄성계수를 입력하면 이를 만족하는 삼중주기 최소곡면 단위셀의 수식과 설계변수를 출력하는 역설계 프레임워크를 구축하였다. 네 종의 고전 삼중주기 최소곡면 구조(자이로이드, 다이아몬드, Primitive, I-WP)에 진폭비와 2차조화항을 도입하여 곡면을 연속적으로 변형할 수 있도록 일반화하고, 상대밀도를 0.30으로 고정한 형상 데이터베이스를 구축하였다. 각 형상에서 기하 디스크립터 32개를 측정하고, 주기 균질화 유한요소해석으로 방향별 유효 탄성계수를 계산한 뒤, 디스크립터로부터 탄성계수를 예측하는 기계학습 모델을 학습하였다. 학습된 모델을 대리 모델로 활용하여 입자군집최적화로 설계변수 공간을 탐색하였으며, 도출된 후보는 균질화 유한요소해석으로 재계산하여 최종 물성을 확정하였다. 해석 절차는 동일한 방법으로 생성한 기본형 구조의 계산값을 문헌의 독립적 균질화 결과와 대조하여 검증하였다. 본 연구는 상대밀도와 기공 연결성을 유지한 채 방향별 탄성계수를 지정하는 설계경로를 제시하며, 도출된 구조를 Ti-6Al-4V로 적층제조하여 축별 압축시험과 표면·미세조직 관찰을 통해 예측값과 실측값의 차이 및 그 원인을 규명하였다.

[P1-47]
가압경수로 2차계통 배관용 저탄소강 분기배관 용접부의 열이력에 따른 국부 부식 거동 : 김대한, 이원찬(국립한밭대학교), 문성인(한국원자력연구원), 김정한*(국립한밭대학교)
Keywords: 탄소강, 부식, 전기화학, 미세조직
가압경수로 2차계통의 분기배관과 같이 복잡한 유체 유동 교란이 발생하는 부분은 유동가속부식(Flow-Accelerated Corrosion, FAC)에 의한 국부 감육 파손에 위험이 높다. 또한, 배관 형상 구현을 위한 용접 및 용접 후열처리(Post-Weld Heat Treatment, PWHT)과정에서 열이력에 의한 미세조직 불균질성에 의한 취약성이 수반된다. 따라서 분기배관에서 관찰되는 복합적인 FAC 감육

현상을 규명하기 위해서는 유체 흐름에 의한 수력학적 요인과 배관 재료 고유의 미세조직, 전기화학적 요인을 분리하여 해석할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 실제 배관 제작에 사용되는 저탄소강 소재의 제작 공정 중의 열이력 차이에 의한 재료의 미세조직 분포와 계면 부식 반응 변화를 비교·분석하였다. 제작 열이력에 의한 특성 변화 비교를 위해 시편은 모재 (Base Metal, BM), 630 ℃에서 30분간 열처리된 모재 (BM+HT), 동일 열처리 조건으로 PWHT된 용접 열영향부 (HAZ+PWHT)의 3가지 조건으로 시편을 준비하였다. 각 시편의 열이력에 의한 미세조직 및 불균질성 변화를 확인하기 위해 광학현미경 이미지를 사용한 펄라이트 밴드의 Banding ratio (BR) 계산 및 Vickers 경도 시험을 병행하였다. 추가적으로, 열이력이 재료의 내부식성에 미치는 영향을 분석하기 위해 탈기된 상온의 3.5% NaCl 수용액에서 전기화학 시험을 진행하였다. 동전위 분극시험(Potentiodynamic polarization, PD)과 전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)을 수행하여 시편별 부식 전위, 부식 속도 및 전하전달저항 등의 전기화학 패러미터를 측정하였고, PD 시험 후 부식 표면 분석을 통해 조건별 부식 형태 특성을 비교하였다. 미세조직 분석 결과, 모재에서 가공 방향을 따라 연속적으로 발달해 있던 펄라이트 밴드 조직은 열처리 및 PWHT를 거치며 BR의 감소를 확인하였고, 이에 따라 국부 경도 편차 역시 감소하는 경향을 보였다. 전기화학 시험 결과, PD 분극 곡선에서 측정된 열이력에 의한 유의미한 부식 속도 차이는 발생하지 않았으나, EIS 시험에서 측정된 전하전달저항과 부식 반응의 공간적 분포에는 확연한 차이가 확인되었다. 결론적으로, 본 연구 결과는 배관 제작 중의 열이력이 평균 부식속도의 증감보다는 국부 부식 기구 및 손상 거동에 더 큰 영향을 미침을 시사한다.

[P1-48]

열처리 조건에 따른 딥드로잉된 Ni 도금강의 미세조직 및 전기화학적 부식 특성: 윤정민, 이정민(국립공주대학교 신소재공학부), 문종언*(국립공주대학교 신소재공학부, 첨단분말소재부품센터)

Keywords: 니켈도금강, 전기화학적 부식, 공식

친환경 모빌리티 시장의 확대에 따라 전기차 배터리 케이스의 장기 내구성과 신뢰성 확보가 중요해지고 있으며, 외부 환경에 의해 발생할 수 있는 공식 및 표면 손상에 대한 저항성 향상이 요구되고 있다. 본 연구에서는 서로 다른 열처리 조건이 적용된 딥드로잉된 니켈 도금강판의 공식 부식 거동을 전기화학적으로 평가하고, 이에 영향을 미치는 미세조직학적 인자를 분석하였다. 3.5 wt.% NaCl 용액에서 동전위 분극시험을 수행하여 공식전위를 측정하였으며, 주사전자현미경을 이용하여 도금층 두께와 부식시험 후 피트를 관찰하였다. 또한 전자후방산란회절분석을 통해 결정립 크기, 상분율, 결정방위 및 집합조직을 비교하였다. 분석 결과, 열처리 조건에 따라 니켈 도금강판의 공식 부식 거동에 차이가 나타났으며, 도금층 두께와 결정학적 집합조직이 공식 저항성과 가장 중요한 영향을 미치는 인자로 분석되었다.특히 적절한 열처리를 통해 형성된 도금층의 집합조직이 부식 저항성 향상에 중요한 역할을 하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 니켈 도금 배터리 케이스의 내식성 향상을 위해 도금층 두께뿐만 아니라 열처리에 따른 집합조직 제어를 함께 고려해야 함을 보여준다.

[P1-49]

Na_2SO_4 및 $NaNO_3$ 전해질을 이용한 모의 CRUD 코팅 STS304의 전해제염 특성 비교 연구: 심영민, 조민식, 박성현(충남대학교 신소재공학과), 신재명(한국재료연구원), 네르시시안 하이크(충남대학교 급속응고신소재연구소), 이종현*(충남대학교 신소재공학과, 충남대학교 급속응고신소재연구소)

Keywords: 전해제염, 원전 해체, CRUD, Na_2SO_4, $NaNO_3$

원자력발전소 해체 시 SUS304 계통 표면에는 Co-60 등 방사성 핵종을 함유한 CRUD 산화막이 침적되어, 금속폐기물 저감과 작업자 피폭 저감을 위한 오염층의 선택적 제거가 요구된다. 전해제염은 화학제염 대비 2차폐기물 발생을 억제하면서 오염층을 제거할 수 있는 기술이나, 전해질 종류가 제염 거동 및 2차폐기물 특성에 미치는 영향에 대한 체계적 비교는 부족한 실정이다. 본 연구는 Co-도핑 마그네타이트로 코팅한 SUS304를 대상으로 Na_2SO_4 전해질을 적용한 전해제염 및 부산물 분석을 수행하였으며, 이를 바탕으로 $NaNO_3$ 전해질과의 비교 평가를 수행하였다. 1.2 mol/L Na_2SO_4 전해질에서 정전류 전해제염을 수행한 결과, 공정 진행에 따라 전해질 색이 연한 황색에서 진한 황색으로 변화하였고 pH는 초기 6.2에서 5.3까지 감소하였다. ICP-OES 분석 결과 Cr, Ni 이온 농도는 공정 시간에 비례하여 증가하였으나 Fe는 검출되지 않았으며, 이는 용해된 Fe가 $Fe(OH)_3$ 형태로 침전되었기 때문으로 해석되었다. 전해제염 후 시편 표면은 균일하게 연마된 형태로 관찰되었다. 동일한 CRUD 모사 코팅 시편에 포화 $NaNO_3$ 전해질을 적용하여 정전류 전해제염을 수행한 결과, 전해질 색은 Na_2SO_4와 유사하게 황색으로 점차 진해지는 경향을 보였다. 시편 임의 지점의 두께를 측정한 결과, 전류밀도가 높아질수록 최대·최소 제거두께 간의 편차가 확대되는 경향이 나타났다. 또한 제염 후 시편 표면은 Na_2SO_4 조건과 달리 육안으로도 확인되는 불균일한 요철이 관찰되었다. 이를 통해 두 전해질의 제염 결과를 비교분석하였으며, 후속 공정 및 2차폐기물 처리 설계 시 전해질을 선정하는 데 활용할 수 있는 기초 자료를 확보하였다.

[P1-50]

적층 제조된 Co-Cr-Fe-Ni-Mo 고엔트로피 합금의 내식성에 대한 Cr과 Mo 간의 조성적 트레이드오프의 영향: 전혜원, 이정민(국립공주대학교), 이재혁(단국대학교), 조성재, 신민호, 임현빈(국립공주대학교), 홍순직(국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터), 주수현(단국대학교), 문종언*(국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터)

Keywords: 몰리브덴 네트워크, 내부식성, 전기화학적 시험, 직접 에너지 적층, 고엔트로피 합금

본 연구에서는 직접 에너지 증착법 공정 중 형성되는 cellular 미세조직 내 조성 편석을 활용해 내부식성이 우수한 네트워크 구조를 구축하고, 이를 통해 국부 부식 상황에서 우수한 내식성을 확보하고자 하였다. 이를 위해 서로 다른 화학 조성을 가진 두 가지 분말을 이중 노즐을 통해 공급 속도를 조절하여 두 가지 조성의 적층재를 제작하였다. 제조된 합금을 3.5 wt% NaCl 용액에서 전

기화학적 시험을 수행한 결과, Mo-rich cellular 네트워크를 가진 합금이 Mo-lean cellular 네트워크를 가진 합금에 비해 부식 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 특히, Mo-rich 네트워크 합금 의 부식 전위는 비교재에 비해 약 200 mV 정도 양의 방향으로 이동하였으며, 부식 전류 밀도가 감소하고 국부적인 피팅이 억제되었다. 이러한 부식 성능 향상은 적층제조로 발생한 Mo-rich 네트워크가 국부 공식 메커니즘을 제어하여 피트의 성장을 억제하는 것으로 밝혀냈다. 반면, Mo-lean 네트워크 합금은 낮은 부식 저항성의 경계면으로 인해 재부동태화가 제한적이었으며, 합금 내부로 피트 전파가 가속되었다. 본 결과는 적층제조된 고엔트로피 합금의 전기화학적 안정성을 위해서는 크롬의 일방적인 농축보다 크롬-몰리브덴 균형을 유지하고, 공식저항성이 높은 cellular 네트워크를 구축하는 것이 고엔트로피 코팅 소재의 공식저항성을 비약적으로 향상시킬 수 있다는 것을 보여준다.

[P1-51]

산화막 균일성과 표면 경도 향상을 위한 ECO-Almag 합금 양극 산화 공정 최적화: 홍다준(인하대학교, 생산기술연구원), 임하나*(생산기술연구원)

Keywords: 알루미늄, 양극산화, 전처리, 공정 최적화

탈탄소화 흐름에 따라 온실가스 배출을 최소화한 친환경 알루미늄 합금인 ECO-Almag의 수요가 증가하고 있다. 하지만 ECO-Almag의 높은 마그네슘 함량은 양극 산화과정에서 MgO 형성을 유발하며, 이는 산화막의 국부적 파괴, 두께 불균일성, 그리고 표면 경도 저하와 같은 전기화학적 결함을 초래한다. 본 연구에서는 이러한 조성의 한계를 극복하고 균일한 산화막을 형성하기 위해 체계적인 전처리 공정과 다변수 Anodizing 설계를 도입하였다. 전처리 공정으로는 알루미늄 표면의 불균일한 자연 산화막 형성과 화학물질 잔류로 인한 얼룩을 방지하기 위해 Degreasing, Etching, Desmutting & Deoxidation을 순서대로 수행하였다. Anodizing 공정에서는 기존 황산 전해질을 유기산을 첨가하여 전해질 조성을 변경했다. 유기산 첨가제는 완충 능력과 알루미늄 이온과의 상호작용을 통해 양극 산화막의 용해를 억제하고 균일한 피막 성장을 가능하게 한다. 전해질 속 알루미늄 이온의 농도를 제어하여 양극 용해 속도를 감소시키고 피막-기판 계면의 장벽층을 안정화하였다. 공정 온도는 낮게 유지하여 열에 의해 활성화되는 피막 용해를 억제하고 고마그네슘 합금에서 발생하는 국부적인 버닝 현상을 완화했다. 최적화된 아노다이징 프로토콜을 적용한 결과 ECO-Almag의 표면 특성을 크게 향상시켰다. 최적화된 조건에서 생성된 양극 산화막은 Hard Anodizing 조건에서 표준 6xxx 및 7xxx 시리즈 합금에서 달성할 수 있는 수준에 근접하는 눈에 띄게 향상된 표면 경도를 나타냈고 피막 두께의 균일성이 크게 향상되었다. 이번 연구는 유기산 첨가 전해질, 제어된 알루미늄 이온 농도, 저온 공정이 복합적으로 적용된 새로운 ECO-Almag Anodizing 공정을 확립하였다. 이는 환경적, 기계적 장점을 가진 ECO-Almag Anodizing을 통해 산업 분야가 요구하는 엄격한 표면 성능 기준을 통과하여 적용 가능하게 했다는 점에서 의의가 있다.

[P1-52]

DC 마그네트론 스퍼터링 공정변수 제어에 따른 AlTiVCr 고엔트로피 공융합금 코팅층의 미세조직 및 기계적 물성 분석: 허윤제, 현명우, 이유진, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범*(세종대학교)

Keywords: 스퍼터링 공정, 고엔트로피 공융합금 코팅, 타겟 공정변수, 미세조직, 기계적 물성

최근 연질상과 경질상이 혼재된 이상(Dual-phase) 조직의 상보적 작용을 통해 강도와 연성을 동시에 확보할 수 있는 고엔트로피 공융합금에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. AlTiVCr 합금은 이러한 공융 조성을 바탕으로 제조된 합금으로, 상간 계면 강화 효과로 인해서 고온 강도 및 항복 강도를 확보할 수 있는 것으로 알려져 있으며 경량성 원소로 제조되어 낮은 밀도와 높은 비강도를 가진다. 이러한 우수한 비강도 및 고온 특성을 지닌 AlTiVCr 조성을 기반으로 하여, 증착 조건에 따른 코팅층의 미세조직 및 기계적 물성의 변화를 규명하고자 하였다. DC 마그네트론 스퍼터링 공정을 사용하였으며, 이를 위해 DC 마그네트론 스퍼터링 공정의 인가 전력과 코팅층의 두께뿐만 아니라, 반응성 질소 가스의 혼입을 주요 독립 변수로 설정하여 금속 및 질화물 코팅층을 제조하였다. 특히 질소의 혼입은 코팅층 내 격자 왜곡 효과를 가중시키고 원자의 확산을 지연시키며, 그에 따른 결정립 미세화를 유도하여 표면 경도 및 내마모성을 극대화하는 역할을 한다. 공정 후 각 코팅층의 물성을 비교하여 제어된 공정 변수에 따른 결정 구조 및 물성 변화를 관찰하였고, 이를 통해 뛰어난 물성을 확보할 수 있는 최적의 공정 조건을 도출하였다. 본 연구의 결과는 AlTiVCr 금속 코팅층과 질화물 코팅층을 활용한 다층 코팅 연구를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P1-53]

고온·황산 환경에서 금속 분리판의 부식 거동 및 코팅 효과: 유민, 김혜진*(한국공학대학교)

Keywords: 스테인리스, 분리판, 코팅

1. 서론 탄소중립 실현과 수소에너지 산업의 성장에 따라 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)의 활용이 확대되고 있으며, 이에 따라 연료전지의 성능과 내구성을 좌우하는 핵심 부품인 분리판의 중요성도 증가하고 있다. 금속 분리판은 우수한 전도성과 경제성을 갖지만, PEMFC의 기본적인 산성 운전 환경에서 지속적으로 부식에 노출된다. 특히 고온 조건에서는 Ti나 스테인리스강처럼 부동태 피막이 형성되는 재료는 전기화학적 반응 속도와 금속 용출이 증가하여 산성 환경에 의한 부식이 더욱 가속되므로, 온도 상승은 금속 분리판의 부식 거동을 변동시키는 주요 인자로 작용한다. 금속 분리판의 가혹한 운전 환경에서 금속 표면의 부식을 억제하고 안정성을 확보할 수 있는 표면 보호 코팅 기술이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 Ti 및 STS316, STS470을 대상으로 온도 변화에 따른 부식 거동을 비교하고, Au 코팅이 내식성에 미치는 영향을 분석하여 금속 분리판의 내식성 향상을 위한 설계 방향을 제시하고자 한다. 2. 실험 방법 본 연구에서는 Ti 및 STS316, STS470 세 가지 금속 소재에 각각 Au 코팅을 적용하여 총 6종의 시편을 제작하였다. 시편의 기본적인 미세조직 분석을 위해 전기화학적 시험 전에 SEM 및 EBSD 분석을 수행하였다. 전해질은 0.5 M 황산(H_2SO_4) 용액을 사용하였으며, 온도 조건은 상온과 유사한 30 ℃와 실제 운전 환경을 고려한 80 ℃에서 설정하였다. 전기화학적

특성 평가는 개방회로전위(OCP)를 약 1200초 동안 안정화한 후, 전기화학 임피던스 분광법(EIS)과 동전위 분극 시험(potentiodynamic polarization)을 통해 수행하였다. 이후 부식에 따른 표면 변화 분석을 위해 SEM 및 XPS 분석을 수행하였다. 3. 결과 요약 본 실험 결과는 온도 조건에 따른 비교를 통해, 고온의 환경에서 전반적으로 부식이 가속되는 경향이 나타나 온도가 금속 분리판의 부식 반응에 중요한 영향을 미침을 확인하였다. 이는 온도 상승에 따라 반응 속도가 증가하고 산성 환경에서 금속 용출 및 산화 반응이 촉진되기 때문으로 판단된다. 또한 소재별 비교에서 티타늄(Ti)은 안정한 산화피막 형성으로 인해 스테인리스강(STS316, STS470)보다 우수한 내식성을 나타내었으며, 스테인리스강은 고온·산성 환경에서 피막 안정성이 저하되어 상대적으로 부식이 더 크게 진행되는 경향을 보였다. 고온 조건에서는 모든 시편에서 부식 반응이 더욱 뚜렷하게 나타났으며, Au 코팅의 내식성 향상 효과는 소재 특성과 환경 조건에 따라 상이하게 나타났다. 이러한 결과는 온도, 소재 및 코팅 조건이 금속 분리판의 부식 거동에 미치는 영향을 보여주며, 본 연구는 PEMFC 금속 분리판의 부식 특성과 코팅 효과를 이해하고, 내구성 향상을 위한 소재 설계에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P1-54]

High-Temperature Oxidation Behavior of MCrAlY Bond Coatings under Dry, Low Water-Vapor, and Steam-Rich Conditions: Seeun Jang, Daweon Hwang, In-Ho Jung*(Seoul National Univ.)

Keywords: MCrAlY, High-Temperature Oxidation, Thermally Grown Oxide, Water Vapor

MCrAlY bond coatings are widely used in thermal barrier coating (TBC) systems, particularly in high-temperature environments such as gas turbines, due to their ability to form a continuous and protective α-Al_2O_3 thermally grown oxide (TGO) layer. However, high water-vapor environments, such as those in hydrogen-fired gas turbines, can modify alumina phase transformations, delaying the formation of protective α-Al_2O_3 and promoting the growth of non-protective oxides. These effects can alter oxide growth kinetics and increase susceptibility to premature spallation, raising concerns regarding the durability of TBC systems under steam-containing environments. This study systematically investigates the high-temperature oxidation behavior and oxide-scale evolution of conventional MCrAlY bond coatings under varying water-vapor conditions. HVOF-sprayed Amdry 386 and Amdry 365 bond coatings with an APS-deposited 8YSZ top coat were oxidized at 1100 ºC for 10 and 100 h in a muffle furnace under industrial air containing 0, 2.5, and 5 vol% H_2O, as well as under a 100 vol% H_2O steam condition, spanning dry to extreme steam environments. A humidified-gas system employing temperature-controlled water baths was designed based on gas-water vapor equilibrium to generate the target H_2O concentrations during oxidation. After exposure, the cross-sectional microstructures of the coatings were characterized using scanning electron microscopy (SEM), and the TGO thickness and morphology as well as the formation of non-protective mixed oxides were compared as a function of H_2O content, exposure time, and bond coat composition. This work aims to establish the limitations of conventional MCrAlY coatings in steam-rich environments and provide a basis for developing oxidation-resistant bond coatings for future hydrogen-fired gas turbine applications.

[P1-55]

Reduction of Iron Ore Pellets by H_2 - Effect of Hydrogen Reduction Degree on Pellet Microstructure & Porosity: KIM HYUN MIN, Kang Beom Jun, Nishant Kumar, Marie-Aline Van Ende*, In-Ho Jung*(서울대학교)

Keywords: hematite, pellet, porosity, kinetics

철강산업에서 이산화탄소의 배출을 최소화 하기 위해서 직접환원철(DRI)을 철원으로 사용하는 기술들이 지속적으로 개발되고 있다. 따라서 수소를 이용해서 DRI를 제조하는 공정에 대한 연구가 점차 중요해 지고 있다. 본 연구에서는 5종의 상용 헤마타이트 펠릿(BF급 3종, DR급 2종)의 환원 거동을 700–1100 ºC 온도 범위의 수소 분위기에서 체계적으로 연구하였다. 구형의 펠릿 직경은 11–25 mm 범위였고, 2–6L/min의 수소 유량 조건에서 환원을 수행하였다. 미세조직 특성의 점진적 변화를 관찰하기 위해 완전 환원과 더불어 환원율 25%, 50%, 75%, 100%에 해당하는 부분 환원 실험을 함께 진행하였다. 이들 5종 펠릿에 대한 체계적인 연구를 통해 기공률과 환원도 간의 새로운 정량적 상관관계를 도출하였다.

[P1-56]

Investigation of BF Grade DRI Pellet Melting for Electric Smelting Furnances: A novel path to Carbon-Neutral Steel Making: Tae Jeong Kim, Niladri Naskar, Marie-Aline Van Ende*, In-Ho Jung*(경희대학교)

Keywords: DRI, ESF, carburization, melting, porosity, microstructure,

Direct reduced iron (DRI)-electric smelting furnace (ESF) path is getting attention for green steel production on the journey towards carbon-neutral steelmaking. To understand melting process of H2-DRI (Hydrogen reduced DRI) in ESF process, the melting of DRI in the feed-bank zone on top of slag is important to investigate first In this study, BF grade iron ore pellets were reduced with H, to prepare H2-DRI, placed in contact with coke, and charged into an alumina crucible. Carburization and melting experiments were carried out under Ar (99, 999%, 250 mL/min) at 1300- 1550 ºC for 15- 720 min. After polishing and etching, the specimen microstructures were examined by OM, and SEM-BSE imaging. The overall carbon composition in iron was analyzed using LECO, and the local phase carbon and silicon composition was examined using EPMA. ImageJ analysis was conducted to quantify porosity and volume fraction measurement. DRI began to melt as low as 1400 ºC after 30 min. At 1550 and 1500 ºC, a near-complete melting occurred within 15-30 min, and the carbon content in liquid Fe reached 4.5-5.6 wt.% in 1 hr.

[P1-57]

Melting of H_2-DRI Powder to Simulate Electric Smelting Furnace (ESF) Process: Part II - Variation of Coke/DRI Ratio and Slag Composition: Juwon Hwang(Sungkyunkwan Univ.), Minhun Kim, Niladri Naskar, Marie-Aline Van Ende, In-Ho Jung*(Seoul National Univ.)

Keywords: green steel, hydrogen direct reduced iron, electric smelting furnace, carburization, coke/DRI ratio, slag composition

Electric Smelting Furnace (ESF) is a promising route for low-carbon steelmaking using H_2-DRI. However, the control of carbon and silicon content in liquid metal during DRI melting in ESF process has not been well investigated. In the present study, the carburization behavior of H_2-DRI during melting in slag was investigated. DRI-coke mixtures were melted on a pre-melted synthetic slag in the induction furnace, followed by analysis of the recovered metal nuggets and slag. Influence of coke/DRI ratio and slag composition to carbon and silicon content in liquid iron was examined.

[P1-58]

Melting of H_2-DRI Powder with Slag: Carburization and Slag–Metal Reaction Behavior: Minhun Kim, Juwon Hwang, Niladri Naskar, Marie-Aline Van Ende, Inho Jung*(Seoul National Univ.)

Keywords: green steel, hydrogen direct reduced iron, electric smelting furnace, slag–metal reaction, carburization

The electric smelting furnace (ESF) is a key unit in hydrogen-based ironmaking, expected to deliver hot metal with a carbon content comparable to the blast furnace (2-3 wt.%). Unlike the blast furnace, where carburization proceeds through an extensive coke bed, the ESF operates with a shallower bath and a different charge configuration, and the mechanism by which carbon reaches the metal is not yet established. This study reproduces the ESF environment at laboratory scale, melting hydrogen-reduced DRI powder with anthracite coal on synthetic CaO-SiO2-MgO-Al2O3 slag under Ar-H2 in an induction furnace, across two campaigns: one varying temperature, holding time, and crucible refractory (Al2O3 vs. MgO) to isolate slag-crucible interaction from metal carburization, and a second varying charge mass together with slag quantity and composition to separate their respective effects on the attainable metal carbon level. Recovered metal and slag are characterized by combustion analysis (LECO), XRF, and EPMA. Preliminary results suggest which of these variables may meaningfully shift the attainable metal carbon level, aiming to define operating conditions for the ESF to reliably meet its carbon target.

[P1-59]

니켈선철 제조를 위한 CaO 첨가에 따른 규산질 니켈 산화광의 슬래그 액상화 및 용융환원 거동: 김동은(한국생산기술연구원 국가희소금속센터, 인천대학교), 배성욱(한국생산기술연구원 국가희소금속센터, 한양대학교), 서석준, 신재홍*(한국생산기술연구원 국가희소금속센터)

Keywords: flux addition, Thermodynamic calculation, High-grade nickel pig iron, Liquid-phase formation.

전기자동차 및 에너지저장장치 보급 확대와 스테인리스강 수요로 니켈 원료의 안정적 확보가 중요해지고 있다. 고품위 니켈 황화광을 대체하기 위해 니켈 산화광의 활용이 요구되지만, 산지에 따라 광물상과 맥석 조성의 편차가 크다. 특히 규산질 원광은 용융환원 과정에서 잔류 SiO_2 고상으로 인해 슬래그 액상화와 금속 입자의 응집 및 침강이 저해될 수 있어, 원광 조성에 적합한 flux 첨가량 및 슬래그 액상화 조건 설계가 필요하다. 본 연구에서는 규산질 니켈 산화광을 대상으로 FactSage 열역학 계산을 통해 CaO 첨가량에 따른 슬래그 액상화 조건을 도출하고, 탄소 열환원 후 Ni의 농축 및 금속–슬래그 간 분배 거동을 평가하였다. 사용된 원광은 quartz가 주상인 규산질 광석으로, Ni, Fe 및 Mg 함량은 각각 2.72, 4.61 및 8.19 wt%였다. 계산 결과, CaO 무첨가 시 약 1656 ºC에서 완전 액상이 형성되었으며, 원광 100 g당 CaO 15.43 g 및 10.01 g 첨가 시 각각 1500 ºC와 1600 ºC에서 완전 액상 슬래그가 형성되는 것으로 예측되었다. 열역학 계산 결과를 검증하기 위해 1500 ºC와 1600 ºC에서 CaO와 탄소를 첨가하여 Ar 분위기에서 8시간 용융환원 실험을 수행하였다. 두 조건 모두에서 금속상과 슬래그상의 분리가 확인되었으며, 온도에 따라 금속상의 응집 특성과 Ni의 금속–슬래그 간 분배 거동에 차이가 나타났다. 또한 Ni가 금속상으로 선택적으로 농축되는 경향을 확인하였다. 본 연구를 통해 원광 조성에 기반한 열역학적 CaO 첨가 설계를 통해 규산질 니켈 산화광의 완전 액상화 조건을 도출하고, 고품위 니켈선철(Nickel Pig Iron, NPI) 제조 가능성을 확인하였다.

[P1-60]

폐 NdFeB 자석 스크랩의 전기화학적 분체화를 통한 침출 반응성 향상 및 희토류 선택적 분리: 서유빈(한국생산기술연구원, 인천대학교), 김명석(한국생산기술연구원, 고려대학교), 페브리나와르타 부르한, 신재홍*(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교)

Keywords: 폐 NdFeB 자석 스크랩, 희토류 원소, 전기화학적 분체화, 황산염 침전, 용매추출

최근 전기자동차(EV) 및 첨단 전자기기의 보급 확대에 따라 희토류(rare earth elements, REEs)의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 희토류는 일부 국가에 편중되어 있으며, 특히 중국이 세계 생산량의 약 68.5%를 차지하고 있어 자원 공급의 불안정성이 지속적으로 제기되고 있다. 주요 생산국들은 희토류를 국가 전략자원으로 지정해 수출을 제한하고 있으며, 이에 따라 폐자원의 재활용이 희토류의 안정적인 공급망 확보를 위한 주요 전략으로 주목받고 있다. 이 중 폐 NdFeB 자석은 Nd-Pr 및 Dy와 같은 고부가가치 희토류를 함유하고 있어 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 폐 NdFeB 자석은 치밀한 미세조직과 표면 산화층의 영향으로 침출 반응성이 제한되며, 기존 기계적 분쇄를 통해 제조된 마이크로미터급 분말은 비표면적이 낮아 침출 효율 향상에 한계가 있다. 또한 나노급 분말 제조를 위해서는 높은 에너지 투입이 요구되어 효율적인 미세화에 어려움이 있다. 이에 낮은 에너지로 나노급 분말을 제조하여 비표면적 및 침출 반응성을 향상시킬 수 있는 공정이 필요하다. 이와 함께 침출액에는 다양한 유가금속이

함께 존재하며, 희토류 원소 간 화학적 성질이 유사해 선택적 분리가 어려운 문제가 있다. 따라서 폐 NdFeB 자석으로부터 희토류를 효율적으로 회수하기 위해서는 침출 반응성을 향상시키는 동시에 희토류의 선택적 분리가 가능한 공정 개발이 요구된다. 본 연구에서는 폐 NdFeB 자석 스크랩으로부터 희토류를 효율적으로 회수하기 위해 저에너지의 전기화학적 분체화 공정을 적용하였다. 전기화학적 분체화를 통해 기존 기계적 분쇄 대비 비표면적이 큰 나노급 분말을 제조함으로써 침출 반응성을 향상시키고자 하였다. 침출 공정 후에는 Na_2SO_4를 활용한 황산염 침전을 통해 선택적으로 희토류를 회수하였다. 회수된 희토류염은 용매추출 공정을 통해 Nd-Pr와 Dy의 선택적 분리 가능성을 평가하였으며, O/A 비와 추출제 농도 등 주요 공정 변수가 희토류 분리 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

[P1-61]

자전연소합성 공정을 이용한 고순도 티타늄카바이드 분말 제조 및 프리카본 제어 연구: 윤태경(인하대학교, 한국생산기술연구원), 심재진*(한국생산기술연구원)

Keywords: 티타늄카바이드, 자전연소합성, 프리카본

티타늄 카바이드는 뛰어난 경도와 내열성, 내마모성 덕분에 절삭 공구나 고온 마모 부품으로 쓰여 왔다. 다만 고상반응, 탄화 반응법, 기계적 합금화, 화학기상증착 같은 기존 합성법은 고온·장시간 반응이나 낮은 순도, 복잡한 장비 구성 같은 한계가 있어, 보다 경제적이고 효율적인 제조 방식이 필요하다. 이를 극복할 대안으로 외부 에너지 공급 없이 자체 발열만으로 화합물을 합성하는 자전연소합성 공정이 주목받고 있다. 본 연구에서는 자전연소합성 공정을 적용하여 물성 저하를 유발하는 미반응 프리카본 생성을 억제하고자 탄소 투입 비율을 제어하는 실험을 진행하였으며, 이를 통해 고순도의 티타늄 카바이드 분말을 합성하기 위한 최적 조건을 도출하였다. TiO_2, Mg, C를 출발 물질로 하여 금속 환원과 탄화가 동시에 일어나도록 반응을 유도했으며, 환원제 Mg는 4몰로 고정하였다. 본 연구의 핵심 변수는 탄소 몰비로, 프리카본 발생을 최소화하면서 고순도 상을 형성할 수 있는 조건을 찾기 위해 1.1에서 1.5몰까지 다섯 단계로 나눠 진행했다. 합성 후에는 산세 공정으로 잔류 MgO와 미반응 물질을 제거하였으며, 각 조건의 시료를 채취해 탄소·황 분석기로 측정하였으며, XRD와 SEM을 통한 상 분석 및 미세조직 관찰도 함께 수행하였다. 탄소 분석 결과 C 몰비가 1.3~1.5로 올라갈수록 측정된 탄소 함량도 22.0~25.1 wt%까지 함께 증가해, 투입량이 많을수록 프리카본이 남는 경향을 보였다. 반면 1.1몰 조건(TiO_2 + 4Mg + 1.1C)에서는 탄소 함량이 20.4 wt%로 측정되어, TiC의 이론 탄소 함량인 20.06 wt%에 가장 근접한 값을 보였다. 이론값 대비 편차는 +0.34%p로, 다섯 조건 중 프리카본 생성이 가장 적고 고순도 TiC 상이 형성될 가능성도 가장 높은 조건이다. 이 결과는 자전연소합성이 단일 공정만으로도 고순도 TiC 분말을 효율적으로 제조할 수 있는 방법임을 보여주며, 생산 비용 절감과 공정 단순화로도 이어질 수 있다.

[P1-62]

Knowledge Graph-Guided Multi-Step Reasoning for Inverse Design of Sulfide-Based Solid Electrolytes: Sohyun Suk, Joonhee Kang*(Pusan National Univ)

Keywords: Knowledge Graph, Graph Retrieval-Augmented Generation, LangGraph

The development of sulfide-based solid electrolytes with high ionic conductivity requires systematic understanding of the relationships among chemical compositions, crystal structures, synthesis conditions, and electrochemical properties. However, experimental knowledge relevant to solid electrolyte design is widely distributed across the literature, making it challenging to identify transferable design strategies and utilize accumulated experimental results for the discovery of new material compositions. In this study, we propose a knowledge graph-based inverse design framework for sulfide-based solid electrolytes by integrating structured literature data with multi-step reasoning. Experimental information, including material compositions, crystal structures, precursors, processing conditions, and electrochemical properties, was manually collected from published studies and organized into a structured database. The curated data were transformed into a Neo4j knowledge graph, in which relationships among materials, elements, synthesis processes, and properties were explicitly represented. Based on the constructed knowledge graph, a multi-stage reasoning workflow was developed to retrieve relevant experimental evidence, identify parent compositions, analyze reported compositional modification patterns, and generate candidate solid electrolyte compositions. The generated candidates were subsequently evaluated using the retrieved knowledge, and relevant synthesis information was traced from experimentally reported materials to provide evidence-supported synthesis routes. The proposed framework enables the material design process to be systematically traced from literature-derived experimental evidence to compositional modification strategies and candidate generation. By organizing heterogeneous experimental knowledge into an interconnected representation and utilizing it throughout the reasoning process, the framework reduces unsupported material recommendations and improves the interpretability and traceability of inverse design. This study demonstrates the potential of knowledge graph-based reasoning as a data-driven approach for accelerating the exploration and design of sulfide-based solid electrolytes.

[P1-63]

Atomistic Origins of Crosslink-Controlled Lithium-Ion Transport in Aqueous Gel Polymer Electrolytes: Chaeyun Jin, Joonhee Kang*(Pusan National Univ.)

Keywords: Aqueous gel polymer electrolyte, PVA–Borax, Li-ion transport, Density functional theory, Machine-learning interatomic potential

Aqueous gel polymer electrolytes are promising for safer and cost-effective lithium-ion batteries because of their low flammability and ability to combine ionic transport with mechanical integrity. However, how dynamic crosslinking regulates Li-ion coordination and transport within these networks remains poorly understood at the atomic scale. Here, we combine first-principles calculations, machine-learned interatomic potentials (MLIPs), and long-timescale molecular dynamics simulations to uncover the atomistic origins of crosslink-controlled Li-ion transport in poly(vinyl alcohol) (PVA)–borax aqueous gel electrolytes. First-principles calculations reveal the relative stability of PVA–borate crosslinks and Li interactions with crosslinks, PVA, borate, and sulfate species, providing training data for an MLIP that enables extended simulations of crosslinked gel networks. By systematically varying the crosslink density, we reveal how PVA–borate networks modify the local coordination environment and diffusion dynamics of Li ions. Complementary experiments on PVA–borax–Li_2SO_4 gels with varied compositions further connect molecular-scale network formation with mechanical and electrochemical properties. Together, these results establish a direct link between crosslinking, Li-ion coordination, and ion transport in aqueous gel polymer electrolytes, providing a molecular basis for designing mechanically robust electrolytes with efficient Li-ion transport for aqueous lithium-ion batteries.

[P1-64]

Synergistic Integration of a Cu-ZIF-8-Functionalized Membrane and an In-Situ Polymerized Hybrid Solvating Electrolyte for High-Rate, Dendrite-Free Sodium Metal Batteries: Seogyeong Park, Hae Su Jung, Geon Woo Kim, Gyeong Jun Lee, Yun Sung Lee*(Chonnam Univ.)

Keywords: Sodium metal batteries Metal–organic framework (Cu-ZIF-8) In-situ polymerized quasi-solid-state electrolyte Anion trapping / Na^+ transference number Functional PVDF-HFP separator

The depletion of lithium resources has accelerated the search for sodium metal batteries (SMBs) as a sustainable next-generation energy-storage technology. However, their practical deployment is hampered by sodium dendrite growth, low cation transference numbers, and unstable electrode/electrolyte interfaces. Herein, we present a quasi-solid-state sodium metal battery that synergistically combines a Cu-ZIF-8–functionalized porous membrane with an in-situ polymerized hybrid solvating electrolyte. A porous PVDF-HFP membrane was fabricated via a non-solvent induced phase separation (NIPS) process using a controlled water content, and Cu-ZIF-8 was embedded as a functional filler whose open Cu Lewis-acid sites trap anions and homogenize the Na^+ flux, thereby suppressing dendrite growth. In parallel, a hybrid (weakly) solvating electrolyte based on 1 M $NaPF_6$ in a G2/DOL system was converted into a semi-solid state through $Al(OTf)_3$-initiated ring-opening polymerization of DOL, minimizing interfacial resistance while ensuring mechanical integrity and inducing an anion-rich coordination environment that favors an inorganic-rich solid-electrolyte interphase. The Cu-ZIF-8–containing polymerized electrolyte (CZ-PDOL) exhibited a markedly enhanced Na^+ transference number (0.72 vs. 0.41 for pristine PDOL) and superior long-term symmetric-cell stability. In NVP‖Na full cells, the system retained ~98 mAh g^{-1} at 5C with negligible capacity fading and full capacity recovery upon returning to low rates, demonstrating excellent rate capability and reversibility. This membrane–electrolyte co-design offers a promising route toward stable, high-rate sodium metal batteries.

[P1-65]

고전압 수계 아연–아이오딘 전지를 위한 유기 염화물계 전해질 첨가제의 구조–기능 상관관계 범밀도함수이론 연구: 구권빈(경희대학교, 한국에너지기술연구원), 이진홍, 정규남, 임강훈*(한국에너지기술연구원)

Keywords: 수계전지

수계 아연–아이오딘($Zn–I_2$) 전지는 높은 안전성과 낮은 비용을 갖는 차세대 에너지저장장치로 주목받고 있다. 특히 기존 I^-/I^0 2전자 반응을 $I^-/I^0/I^+$ 4전자 반응으로 확장하면 더 높은 전압과 용량을 구현할 수 있지만, 수계 환경에서 고산화수 아이오딘 종인 I^+의 불안정성과 폴리요오드화물 셔틀 현상으로 인해 가역적인 반응과 장기적인 전지 구동이 제한된다. 따라서 4전자 아이오딘 반응을 안정적으로 유지하여 배터리의 용량을 높이는 동시에, 부반응을 억제하여 장기 안정성을 향상시킬 수 있는 전해질 첨가제의 설계가 중요하다. 본 연구에서는 범밀도함수이론(density functional theory) 계산을 통해 분자 구조와 작용기의 종류가 서로 다른 5종의 유기 염화물계 첨가제를 비교하고, 어떠한 분자 구조가 아이오딘 종의 안정화와 수계 전해질 환경 조절에 유리한지를 이론적으로 규명하고자 하였다. 각 첨가제의 정전기 전위를 계산하여 분자 내 전하 분포와 주요 상호작용 부위를 분석하고, I_3^- 및 ICl 또는 ICl_2^-와의 결합 구조와 결합 에너지를 비교하여 폴리요오드화물 포획 및 고산화수 아이오딘 종의 안정화 가능성을 평가하였다. 또한 분자동역학 계산을 통해 첨가제와 물 분자 사이의 방사형 분포함수(radial distribution function)과 배위수를 분석하여 작용기의 종류와 배치가 주변 물 분자의 분포와 상호작용에 미치는 영향을 비교하였다. 이를 통해 첨가제의 아민(amine) 및 하이드록실(hydroxyl) 작용기 구성, 분자 내 전하 분포와 배위 특성이 아이오딘 종 및 물 분자와의 상호작용에 미치는 영향을 이해하고, 고용량 4전자 반응의 가역성을 확보하면서 폴리요오드화물 셔틀 현상과 I^+ 관련 부반응을 억제할 수 있는 전해질 첨가제의 분자 설계 방향을 제시하고자 한다. 궁극적으로는 수계 $Zn–I_2$ 전지의 용량과 사이클 안정성을 동시에 향상시키는 것을 목표로 한다.

[P1-66]

Microstructural Refinement and High-Rate Performance of a Li–Sn Powder-Based Composite Anode through Repeated Rolling: Hye Jin Hwang, Se Jong Yeon, Hyeon Bi Kim, Min Su Kim, Jun Young Kim, Hee-Tae Jeong, Woo Jin Kim*(Hongik Univ.)

Keywords: lithium metal anode, Li–Sn composite, $Li_{22}Sn_5$, repeated rolling, microstructural refinement, high-rate performance

Lithium metal is a promising anode material because of its high theoretical capacity and low electrochemical potential; however, nonuniform Li deposition and dendrite growth limit its cycling stability, particularly at high current densities. In this study, a Li–Sn powder-based composite anode was fabricated through repeated rolling and folding to investigate the relationship between microstructural evolution and high-rate electrochemical performance. X-ray diffraction confirmed the formation of the $Li_{22}Sn_5$ intermetallic phase. With increasing rolling cycles, the $Li_{22}Sn_5$ regions were progressively fragmented and more uniformly distributed within the Li matrix, resulting in a finer and more homogeneous composite microstructure. The dispersed $Li_{22}Sn_5$ phase may provide heterogeneous nucleation sites and reduce localized current concentration, thereby promoting more uniform Li deposition. Consequently, the repeatedly rolled Li–Sn composite exhibited reduced polarization and improved capacity retention under high-rate cycling conditions. These results demonstrate that controlling the size and distribution of $Li_{22}Sn_5$ through repeated rolling is an effective strategy for improving the high-rate performance of Li metal composite anodes.

[P1-67]

음이온교환막 수전해(AEMWE)를 위한 다공성 NiFe 합금박막 OER 전극 개발: 성동건(인하대학교, 한국생산기술연구원), 임하나*(한국생산기술연구원)

Keywords: Mesoporous NiFe alloy, Electrodeposition, Oxygen evolution reaction, Durability

탄소중립을 위한 그린수소 생산 기술로 수전해가 주목받고 있으나, 느린 산소 발생 반응(OER) 속도가 전체 효율을 제한하는 요인으로 작용한다. 특히 고전류밀도, 장시간 구동 조건에서는 구조적 열화로 내구성이 저하되는 경우가 많아, 이를 극복할 고내구성 전극 소재 개발이 요구된다. 본 연구는 Ni mesh 위에 Pluronic P123을 이용한 mesoporous NiFe 합금박막을 전해도금법으로 제조하여, 양산 가능한 OER 전극으로서의 적용성을 평가하였다. 증착 전위 제어로 Ni/Fe 조성을 조절하였으며, 형상과 상구조는 SEM, XRD로 확인하였다. 내구성은 7 M KOH 내 1 A/cm^2 정전류 조건과 3000 사이클 On/off 가속열화시험으로 평가하였고, 알칼리 열처리로 NiFeOOH 표면층 형성도 확인하였다. 다공 구조로 넓은 표면적을 가진 NiFe 전극은 우수한 OER 활성과 내구성을 동시에 보였으며, 차세대 수전해용 고성능 전극 소재로서의 가능성을 확인하였다

[P1-68]

Data-Driven Design of Three-Dimensional Metal Nanostructures for Reversible Metal Electrodeposition-Based Electrochromic Systems : Taehoon Ha, Jaeha Cho, Seung Woo Kim, Cheon Woo Moon*(Soonchunhyang Univ.)

Keywords: Metal-Based Electrochromism, Reversible Metal Electrodeposition, Nanostructure, Inverse Design, Deep Learning, Generative Design

Metal-based electrochromic systems modulate optical properties through reversible electrochemical processes. Among these systems, reversible metal electrodeposition (RME) modulates transmission and reflection through metal deposition and dissolution. The optical behavior of metal electrodeposits depends on their morphology, including size, shape, and spatial distribution. Recent RME studies have investigated electrolyte composition, ionic additives, and alloy electrodeposition because these factors affect deposit formation, electrochemical reversibility, and optical properties. Because electrodeposits may exhibit irregular three-dimensional (3D) morphologies, their spatial structure is not readily represented by conventional morphology descriptors or idealized particle models. In nanophotonics, data-driven methods have been used for spectral prediction and inverse identification of structures with specified optical properties. Recent work has also examined strategies for exploring larger design spaces while reducing the computational cost of electromagnetic simulations. These developments motivate the use of data-driven structural representations for electrodeposited metals, whose irregular morphologies are difficult to describe using idealized geometries. In this study, a computational framework combining finite-difference time-domain (FDTD) simulation and deep learning is developed to relate 3D metal morphology to wavelength-dependent optical response. Metal nanostructures are computationally generated without imposing predetermined particle shapes, and their transmission and reflection spectra are calculated using FDTD simulation. The paired structural and spectral data are used to construct a structure–response dataset in which the metal geometry is represented directly in three dimensions. A learning-based model is then used to establish the relationship between structural geometry and optical response and to identify candidate structures. Direct representation of electrodeposited metals in three dimensions allows structure–property relationships to be examined without reducing the structures to idealized particle descriptions. The framework links electromagnetic simulation with data-driven structural design and supports the investigation of morphology-dependent optical modulation in RME systems. Overall, this approach provides a computational route for studying metal-based electrochromic systems in which electrochemically induced changes in morphology are associated with changes in optical properties.

[P1-69]

Regulating Zn Electrodeposition through Solvation Structure in Acetate-Based Water-in-Salt Electrolytes for Reversible Smart Windows: SEO YUN CHOI, Cheon Woo Moon*(Soonchunhyang Univ.)

Keywords: Smart window, Zn electrodeposition, Solvation structure

Reversible aqueous Zn electrodeposition provides a promising platform for energy-efficient smart windows with low operating voltages and high optical modulation. Their optical switching is governed by the reversible deposition and stripping of Zn on transparent

electrodes. However, hydrogen evolution and nonuniform Zn nucleation can produce heterogeneous deposit morphologies and incomplete stripping, limiting optical reversibility and long-term stability. Acetate-based water-in-salt electrolytes may alleviate these problems by reducing water activity and establishing an acetate-rich Zn^{2+} solvation environment. Nevertheless, the relationship between electrolyte composition, the Zn^{2+} solvation environment, deposit morphology, and smart-window performance has not yet been fully established. Here, the relative composition of potassium acetate (KOAc) and zinc acetate [$Zn(OAc)_2$] is systematically varied while maintaining a constant total salt molality to investigate how the relative $Zn(OAc)_2$ content affects the Zn^{2+} solvation environment, Zn deposit morphology, and smart-window performance. KOAc serves as both a supporting salt that establishes a highly concentrated ionic environment and a hydrotropic agent that enhances the solubility of $Zn(OAc)_2$. We hypothesize that varying the KOAc/$Zn(OAc)_2$ ratio alters Zn^{2+}–acetate coordination, interfacial Zn^{2+} availability, and ion transport, thereby governing Zn nucleation, deposit morphology, and electrochromic reversibility. These effects of electrolyte composition on Zn electrodeposition and optical behavior are investigated using cyclic voltammetry, chronoamperometry, simultaneous optical transmittance measurement, and scanning electron microscopy. An intermediate $Zn(OAc)_2$ content is expected to provide an optimal balance between interfacial Zn^{2+}supply and ion transport, promoting dense and uniform Zn deposition with enhanced optical switching. In contrast, an excessive Zn^{2+}content may strengthen Zn^{2+}–acetate association, increase viscosity, and restrict ionic transport, resulting in heterogeneous Zn growth and reduced stripping reversibility. This study is expected to demonstrate that reversible smart-window operation is governed by the balance among Zn^{2+} solvation structure, ion mobility, and deposit morphology rather than by Zn concentration alone, providing an electrolyte-design principle for durable Zn-based smart windows.

[P1-70]

Solvation Structure Modulation in Ionic Liquid-Organic Cosolvent Electrolyte for Enhanced Electrochromism: Seung Woo Kim, Jaeha Cho, Taehoon Ha, Cheon Woo Moon*(Soonchunhyang Univ.)

Keywords: Reversible Metal Electrodepositions, Solvation structure, Surface Engineering

Electrochromic devices (ECDs) enable reversible optical modulation under an applied voltage and have attracted considerable interest in applications such as smart windows and reflective displays. Their electrochromic performance is strongly influenced by the electrolyte, as ion transport, the solvation structure of electroactive species, and reversible interfacial reactions govern the efficiency and stability of coloration and bleaching. Ionic liquids (ILs) exhibit low volatility, which suppresses solvent loss and helps maintain a stable electrolyte composition during prolonged operation. Their high thermal stability is advantageous for operation at elevated temperatures, while their wide electrochemical windows support stable electrochemical switching. However, strong ion–ion interactions in ILs can reduce ionic mobility and modify the local solvation structure, thereby affecting interfacial reaction kinetics and electrochemical reversibility. This can lead to incomplete deposition–dissolution and reduced electrochromic switching performance. Therefore, improving ion transport and controlling the local solvation structure are important for achieving reversible electrochromic operation in IL-based electrolytes. In this study, an organic cosolvent was introduced into an IL-based electrolyte to modify ion–ion and ion–solvent interactions and thereby improve ion transport and control the local solvation structure. The effects of IL–cosolvent interactions, solvent composition, and salt combinations on electrochemical response, reversibility, and optical modulation were investigated. The results show that changes in the local solvation structure are closely associated with the reversibility of interfacial electrochemical reactions and electrochromic behavior. These findings demonstrate the importance of solvation structure in the design of IL–organic cosolvent electrolytes for improved electrochromic performance.

[P1-71]

Hollow Mesoporous Silica Nanoparticles/Polyimide 기반 저유전 반도체 패키징 소재 연구: 김시현(인하대학교, 한국생산기술연구원), 임하나*(한국생산기술연구원)

Keywords: 중공 메조다공성 실리카 나노입자, 저유전율, 반도체 패키징, 폴리이미드, 고분자 복합체

AI 반도체의 고집적화 및 첨단 패키징 기술의 발전에 따라 재배선층(Redistribution Layer, RDL)의 배선 폭과 간격이 지속적으로 감소하고 있다. 이에 따른 배선 간 기생 정전용량(Parasitic Capacitance) 증가는 신호 지연 및 전력 손실을 유발하므로, 고속 신호 전송과 전력 효율 향상을 위한 저유전 절연 소재의 중요성이 증대되고 있다. 폴리이미드(Polyimide, PI)는 우수한 열적 안정성과 기계적 물성을 바탕으로 패키징용 절연 소재로 폭넓게 활용되고 있으나, 차세대 고집적 패키징 환경에 대응하기 위해서는 기존 물성을 유지하면서 유전율을 획기적으로 낮출 수 있는 소재 설계가 요구된다. 본 연구에서는 Hollow Mesoporous Silica Nanoparticle (HMSN)를 PI와 복합화하여 반도체 패키징용 저유전 절연 소재로의 적용 가능성을 평가하였다. 유전율이 매우 낮은 공기를 절연 소재 내부에 안정적으로 도입하는 것은 유효 유전율을 낮추기 위한 효과적인 접근법이다. 이에 내부에 중공 구조와 메조기공을 동시에 보유한 HMSN을 PI에 도입하여 복합체 내부의 공기 영역을 증가시키고 유효 유전율을 감소시키고자 하였다. HMSN는 먼저 균일한 SiO_2 나노입자를 제조하고, 이를 기반으로 메조다공성 실리카 구조를 형성한 후 선택적 에칭 공정을 통해 내부 실리카 코어를 제거하여 제조하였다. 이러한 합성 과정을 통해 높은 기공률과 내부 공기층(air void)을 갖는 중공 메조다공성 구조를 형성하였으며, 이를 통해 PI 복합체의 유효 유전율 감소에 유리한 구조적 특성을 확보하였다. 제조된 HMSN의 입자 크기와 분산 특성은 Dynamic Light Scattering(DLS)을 통해 분석하였으며, Transmission Electron Microscopy(TEM)를 이용하여 입자의 형상과 중공 구조를 확인하였다. 또한 질소 흡·탈착 분석을 통해 비표면적, 기공 크기 및 기공 부피 등의 기공 특성을 정량적으로 평가하였다. 최종적으로

HMSN/PI 복합체를 제조하고 HMSN의 함량 및 구조적 특성에 따른 유전 특성 변화를 고찰하였다. HMSN의 중공 및 메조기공 구조에 의해 형성된 공기 영역이 복합체의 유효 유전율에 미치는 영향을 고찰하고, HMSN의 구조적 특성과 복합체의 유전 특성 간의 연관성을 분석하였다. 이를 통해 HMSN 도입에 따른 저유전 특성 변화를 규명하고, 고집적 반도체 패키징용 저유전 절연 소재로서 HMSN/PI 복합체의 적용 가능성을 제시하였다.

[P1-72]

유한 공급원 확산 모델을 이용한 Cu 배선/TiN 배리어 두께 조합 최적화 전산모사: 김하진, 최현우, 김서정, 양예성, 이은재, 한태경, 차필령*(국민대학교)

Keywords: 구리 배선 TiN 확산방지막 유한 공급원 확산 모델 유한차분 전산모사 벌크저항

구리는 높은 전기전도도로 인해 반도체 배선재로 널리 사용되지만, 절연막으로 확산될 경우 누설전류 증가 등 소자 신뢰성 저하를 유발한다. 이를 억제하기 위해 확산방지막을 두껍게 형성하면 배선의 유효 단면적이 감소하여 저항이 증가하므로, 배선과 배리어 두께를 동시에 고려한 설계가 요구된다. 기존 연구는 대부분 Cu를 무한 공급원으로 가정하여 배리어 성능 평가에 집중해 왔으나, 배선 체적이 급감하는 초미세 공정에서는 확산량이 과대 예측될 수 있다. 본 연구에서는 Cu 배선을 유한 공급원으로 설정한 1차원 확산 모델을 구축하고, 박막 증착 구조를 [Cu 배선]/[Ti 접착층]/[TiN 배리어]/[SiO_2]로 단순화하여 전산모사를 수행하였다. Fick의 제2법칙을 지배방정식으로 하여 영역별 확산계수 D(x)를 부여하고, Python 기반 유한차분법(FDM)으로 400 ºC 조건에서 시간에 따른 Cu 농도 분포를 계산하였다. 배리어를 통과하여 SiO_2 영역으로 이동한 Cu의 양을 마이그레이션량 M(t)으로 정의하고, 동시에 배리어 두께 증가에 따른 Cu 유효 단면적 감소를 반영하여 벌크저항($R = \rho L/A$) 변화를 산출하였다. Cu 배선 두께(50, 100, 200 nm)와 TiN 배리어 두께(1, 5, 10, 20 nm)에 대한 파라미터 스캔을 통해 마이그레이션량 및 벌크저항 증가율 히트맵을 작성하였으며, 계산 결과가 선행연구의 정성적 경향(배리어 두께 증가 시 확산 억제, 온도 상승 시 확산 증가)과 일치하는지 검증하였다. 최종적으로 초기 Cu 공급량 대비 확산량이 기준치 이하로 유지되면서 벌크저항 증가가 상대적으로 작은 두께 조합을 1차 후보 조건으로 제시하였다. 본 결과는 계면 접촉저항을 제외한 벌크저항만을 반영한 것으로, 향후 계면저항 및 배리어 결함 효과를 포함한 확장 연구를 통해 보완될 필요가 있다.

[P1-73]

Pd 합금 포고핀–Sn계 솔더의 계면 반응과 포고핀 Failure의 연관성 분석: 최종범, 송호정(동아대학교), 서현준, 이석연, 문정탁(MK전자), 권현아*, 전종배*(동아대학교)

Keywords: 포고핀, Pd alloy, Sn-based solder, 계면반응, IMC(Intermetallic compound), Failure analysis

포고핀(pogo pin)은 반도체 테스트 소켓 및 고집적 전자 시스템에서 솔더볼과 반복적으로 접촉하여 전기적 신호를 전달하는 핵심 부품으로, 장기 사용에 따른 접촉부의 안정성은 소자의 신뢰성과 밀접한 관련이 있다. 특히 Pd 합금 포고핀과 Sn계 솔더가 접촉하는 경우 Sn의 확산에 의해 Pd-Sn계 금속간화합물(intermetallic compound, IMC)이 형성될 수 있으며, 포고핀과 솔더에 포함된 Ag와 Cu 역시 계면에서의 확산 및 석출 반응에 관여할 수 있다. 이러한 계면 반응은 반복적인 전기적·열적 노출에 따른 포고핀의 열화 및 Failure와 연관될 가능성이 있으므로, 열압착을 통해 형성한 모사 계면과 실제 사용 중 Failure가 발생한 포고핀을 비교하여 계면 반응과 Failure 간의 연관성을 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 열압착 시험을 이용하여 Pd 합금 포고핀 소재와 Sn계 솔더 사이의 계면 반응을 모사하고, 실제 사용 중 Failure가 발생한 포고핀과의 비교를 통해 계면 반응과 Failure의 상관관계를 분석하고자 한다. 이를 위해 Pd 합금 포고핀과 Sn계 솔더를 열압착 및 aging 처리 후 형성된 계면 반응층의 형상과 조성 분포를 분석하고, 이를 실제 반도체 테스트 환경에서 사용 중 Failure가 발생한 포고핀의 접촉부 미세조직 및 원소 분포와 비교한다. 계면 및 접촉부의 미세조직은 SEM을 이용하여 관찰하고, EDS mapping 및 line scanning을 통해 Sn, Pd, Ag, Cu 등 주요 원소의 확산 및 분포 변화와 반응층 및 석출상의 형성 특성을 평가한다. 본 연구를 통해 Pd 합금 포고핀과 Sn계 솔더 사이에서 발생하는 계면 반응과 원소 확산 특성을 파악하고, 열압착 모사 시편과 실제 Failure 포고핀에서 나타나는 미세조직 및 조성 분포의 공통점과 차이점을 비교하여 포고핀 Failure와 연관된 계면 반응 인자를 분석하고자 한다. 특히 Pd-Sn계 반응과 Ag, Cu 및 Sn의 재분포 특성을 중심으로 솔더 접촉에 따른 계면 열화와 Failure의 연관성을 고찰한다. 이러한 결과는 Pd 합금 포고핀의 솔더 접촉에 따른 열화 및 Failure 메커니즘을 이해하고, 장기 접촉 신뢰성이 향상된 포고핀 소재 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P1-74]

착화제 종류에 따른 Ag 코팅 Cu 입자의 제조 및 전기적 특성: 김민석, 이종현*(서울과학기술대학교)

Keywords: Cu@Ag, 착화제, 무전해 도금, 핵생성, 도전성 페이스트, 비저항

Ag 코팅 Cu(Cu@Ag) 입자는 Ag와 Cu가 모두 보유하는 우수한 전기·열전도성을 그대로 유지하면서, Ag의 높은 산화 저항성과 Cu의 저비용이라는 장점을 동시에 취할 수 있어 Ag 입자를 대체할 수 있는 저비용 전도성 소재로 주목받고 있다. Cu 입자 표면에 Ag를 코팅하는 무전해 도금 공정에서는 Ag 이온의 환원 및 석출 거동이 최종 코팅층의 균일성과 전기적 특성에 큰 영향을 미친다. 특히 Ag 이온의 환원 속도가 지나치게 빠를 경우 Cu 표면에서의 석출보다 도금액 내 균일 핵생성(homogeneous nucleation)이 우세해질 수 있으며, 이는 불균일한 Ag 코팅층뿐 아니라 최종 분말 내 코팅되지 않는 Ag 입자의 생성을 유발할 수 있다. 따라서 Ag 이온과 착물을 형성하여 반응성을 조절하는 착화제의 선정이 균일한 Ag 코팅 Cu 입자 제조에 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 착화제 종류에 따른 Ag 코팅 Cu 입자에서 Ag 코팅층의 형성 거동과 그에 따른 전기적 특성을 비교하였다. Cu 입자의 표면 산화막을 제거하기 위한 전처리 후, 여러 종류의 착화제를 이용하여 Ag 이온과 착물을 형성하고 아스코르브산을 환원제로 사용하여 Cu 입자 표면에 Ag 코팅을 실시하였다. Ag 전구체와 환원제 농도 등의 주요 조건들을 일정하게 유지하면서 착화제 종류를

변화시켜 Ag 이온의 착화 거동이 Ag의 핵생성 및 성장에 미치는 영향을 분석하였다. 제조된 Cu@Ag 입자의 표면 형상과 Ag 코팅 상태는 주사전자현미경(SEM) 및 에너지 분산형 분광분석(EDS)을 통해 관찰하였으며, X선 회절 분석(XRD)을 이용하여 합성 입자의 결정상을 분석하였다. 제조된 Cu@Ag 입자의 실제 전도성 소재로서의 적용 가능성을 평가하기 위해 입자를 무입자형 Ag complex ink와 혼합하여 Cu@Ag 페이스트를 제조하였다. 제조된 페이스트를 기판에 도포한 후 열처리를 통해 소결 전극을 형성하였으며, 4-point probe를 이용하여 소결 전극의 비저항을 평가하였다. 그 결과, 착화제의 종류에 따라서 Cu 입자 표면의 Ag 코팅층 상태와 균일성이 달라졌으며, 이러한 표면 특성의 차이는 소결 과정에서 입자 간 접촉 및 전도 경로 형성에 영향을 미쳐 소결 전극의 전기적 특성 차이로 나타났다. 즉, 적절한 착화제를 적용한 Cu@Ag 입자는 상대적으로 균일한 Ag 코팅층을 형성하여 입자 간 Ag 접촉 및 소결이 효과적으로 진행되었고, 이에 따라 제조된 페이스트는 향상된 전기전도도 특성을 나타냈다. 본 연구를 통해 착화제를 이용한 Ag 이온의 반응성 제어가 Cu@Ag 입자의 Ag 코팅 균일성 뿐만 아니라 이를 필러로 사용한 페이스트 소결 후 전기적 특성에도 중요한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 결론적으로 적절한 착화제의 선정 및 반응 조건 최적화를 통해 균일한 Ag 코팅층과 우수한 전기전도성을 갖는 Cu@Ag 입자를 제조할 수 있으며, 이는 저비용 도전성 페이스트의 필러 소재로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. Acknowledgements: 이 연구는 과학기술정보통신부와 연구개발특구진흥재단이 지원하는 2025년도 대덕연구개발특구육성사업(지역 혁신 실증 스케일업)으로 수행된 연구결과입니다

[P1-75]

250 ℃ 열처리에 따른 Cu 접촉 WSe_2 백게이트전계효과 트랜지스터의 전달 특성 변화: 금대호*(충남대학교)

Keywords: WSe_2, 2D FET, Cu contact, annealing, transfer characteristics

연구 목적 및 의의 전이금속 칼코게나이드계 이차원 반도체인 WSe_2는 얇은 채널과 조절 가능한 전하 수송 특성으로 차세대 저전력 전자소자의 채널 재료로 주목받고 있다. 그러나 실제 소자 성능은 반도체 자체의 특성뿐 아니라 금속 전극과 WSe_2 사이의 접촉 상태, 계면 오염 및 트랩에 크게 좌우된다. 특히 열처리는 잔류 유기물을 줄이고 접촉을 개선하기 위한 공정으로 활용되지만, 금속과 이차원 재료의 조합 및 공정 조건에 따라 오히려 전달 특성을 저하시킬 수 있다. 본 연구에서는 Cu source/drain 전극을 갖는 WSe_2 백게이트 FET 한 소자를 대상으로 250 ℃, 10 min 열처리 전후의 전달 특성을 동일한 측정 조건에서 비교하였다. 문턱전압, 최소 subthreshold swing, 전계효과 이동도 및 on/off 전류비의 변화를 정량화하여 해당 열처리 조건이 Cu 접촉 WSe_2 소자의 스위칭 성능에 미치는 영향을 평가하는 것을 목적으로 하였다. 2. 실험 방법 전기적 평가는 사전 제작된 Cu 접촉 WSe_2 백게이트 FET를 제공받아 수행하였다. 소자는 285 nm SiO_2/Si 기판 위에 형성되어 있으며, Cu source/drain 전극의 두께는 40 nm, 채널 길이와 폭은 각각 14 μm와 30 μm이다. Keithley 4200을 이용하여 진공에서 드레인 전압 V_D = 0.1 V를 인가하고, 게이트 전압 V_g를 −50 V에서 +50 V까지 순방향으로 주사하여 I_D–V_g 전달곡선을 측정하였다. 소자 구조 Back-gate WSe_2 FET / Cu source·drain contact 채널·절연막 L = 14 μm, W = 30 μm / SiO_2 = 285 nm 측정 조건 Keithley 4200, 진공, V_D = 0.1 V, V_g = −50 → +50 V 열처리 조건 250 ℃, 10 min, 진공 분위기(N_2 purge 후) 초기 측정 후 소자를 N_2 purge를 거친 진공 분위기에서 250 ℃로 10 min 열처리한 뒤 동일한 조건으로 다시 측정하였다. 전계효과 이동도는 $\mu_{FE} = [L/(W \cdot C_{ox} \cdot V_D)] \cdot (dI_D/dV_g)$로 계산하였고, C_{ox}는 285 nm SiO_2의 단위면적당 정전용량을 사용하였다. I_{ON}/I_{OFF}, V_{th}, SS_{min} 및 g_m을 함께 추출해 열처리 전후 변화를 비교하였다. 3. 결과 열처리 전후 모두 음의 게이트 전압 영역에서 전류가 증가하는 p형 우세 전달 거동이 관찰되었다. 다만 250 ℃ 열처리 후 off 상태의 누설전류가 증가하고 곡선의 subthreshold 전이가 완만해졌으며, 문턱전압은 더 음의 방향으로 이동하였다. Fig. 1. 250 ℃ 열처리 전 Cu 접촉 WSe_2 FET의 순방향 전달곡선 (V_D = 0.1 V, V_g = −50 → +50 V). Fig. 2. 250 ℃, 10 min 열처리 후 Cu 접촉 WSe_2 FET의 순방향 전달곡선 (V_D = 0.1 V, V_g = −50 → +50 V). 4. 정량 비교 및 고찰 지표 열처리 전 열처리 후 변화 I_{ON} (A) 6.92×10^{-7} 5.26×10^{-7} 24% 감소 I_{OFF} (A) 2.13×10^{-13} 4.51×10^{-12} 약 21배 증가 I_{ON}/I_{OFF} 3.2×10^{6} 1.2×10^{5} 약 1/27로 감소 V_{th} (V) −4.0 −12.0 −8.0 V 이동 SS_{min} (mV/dec) 941 2, 433 약 2.6배 증가 g_m (A/V) 1.392×10^{-8} 1.097×10^{-8} 약 21% 감소 μ_{FE} ($cm^2/V \cdot s$) 5.36 4.23 약 21% 감소 열처리 후 I_{ON}은 6.92×10^{-7} A에서 5.26×10^{-7} A로 24% 감소한 반면, I_{OFF}는 2.13×10^{-13} A에서 4.51×10^{-12} A로 약 21배 증가하였다. 이에 따라 I_{ON}/I_{OFF}는 3.2×10^{6}에서 1.2×10^{5}로 약 27배 감소하였다. 또한 V_{th}는 −4.0 V에서 −12.0 V로 이동했고, SS_{min}은 941 mV/dec에서 2, 433 mV/dec로 증가하였다. g_m과 μ_{FE}도 각각 약 21% 감소하였다. 이 결과는 본 조건의 열처리가 Cu 접촉 WSe_2 FET의 접촉 및 계면 상태를 개선하기보다 off 전류 증가와 게이트 제어력 저하를 유발했음을 보여준다. 가능한 원인으로는 Cu/WSe_2 접촉 상태의 변화, 흡착종의 탈착·재배열, 계면 트랩 및 잔류 유기물의 열적 변화가 고려될 수 있다. 다만 본 측정에는 열처리 후 Cu의 화학 상태나 계면 구조를 직접 확인하는 분석이 포함되지 않았으므로, 특정 원인으로 단정할 수 없다. 5. 결론 Cu 접촉 WSe_2 백게이트 FET에 250 ℃, 10 min 열처리를 적용한 결과, on 전류와 전계효과 이동도는 감소하고 off 전류 및 subthreshold swing은 증가하여 스위칭 특성이 전반적으로 저하되었다. 따라서 해당 조건은 본 소자의 성능 개선에 유효하지 않았다. 향후에는 다수 소자의 반복 측정, 열처리 온도·시간의 체계적 변화, 순·역방향 주사와 출력 특성 측정, 그리고 XPS·Raman·AFM 등 계면 분석을 병행하여 열처리에 따른 열화 원인을 검증할 필요가 있다. 연구의 범위 및 한계 · 동일한 한 소자의 열처리 전후 비교이므로 소자 간 편차와 통계적 재현성은 평가하지 못하였다. · 순방향 전달곡선만 비교했으며, 역방향 주사에 따른 히스테리시스와 I_D–V_D 출력 특성은 포함하지 않았다. · Cu 및 Cu/WSe_2 계면의 화학·구조 분석이 없어 열화 원인은 가능한 기작으로만 해석하였다.

Acknowledgement 본 연구의 전기적 평가에 사용된 WSe_2 FET 시료를 제공해 주신 충남대학교 김호준 조교께 감사드립니다.

[P1-76]

Neuromorphic Synaptic Transistor Enabled by Conductance Modulation in MoS_2: Sujin Jo, Jihoon Huh, Jeongyeol Park, Yohan Lee, Seung Ji Lo, Narae Lee, Jae Hyun Kim, Moonsang Lee*(Inha University, Program of Semiconductor Convergence,

Inha University)
Keywords: MoS_2, Neuromorphic, Synapse

Two-dimensional transition metal dichalcogenides offer attractive opportunities for neuromorphic electronics owing to their unique electrical properties. Here, we demonstrate an artificial synaptic transistor based on a MoS_2 field-effect transistor. Gate-controlled conductance modulation enables essential synaptic functions, including potentiation, depression, and paired-pulse facilitation, together with stable multilevel conductance states. Neural-network simulations using MNIST datasets further demonstrate the feasibility of the device for neuromorphic computing applications.

[P1-77]

Chemical Vapor Deposition을 이용한 WO_3/WSe_2 core/shell nanowire 합성 연구: 김여진, 위신혜(동아대학교), 송유진(한국기초지원연구원), 신한균, 김정한*(동아대학교)

Keywords: TMD, WO_3/WSe_2, Core/shell 나노구조체, CVD, Selenization

전이금속 칼코겐화합물(Transition Metal Dichalcogenide, TMD)은 차세대 2차원 반도체 소재이다. 이는 우수한 광학적, 전기적 특성을 가지고 있으며 구조에 따라 밴드갭 조절에 유리하다. 이러한 특징은 우수한 전기적 스위칭으로 이어져 초소형, 고효율 트랜지스터 및 광소자에서의 핵심 소재로 각광받고 있다. 본 연구에서는 TMD인 WSe_2가 WO_3 나노와이어를 감싸는 core/shell 나노구조체를 채택하였다. Core/shell 나노구조체의 핵심적 이점은 우수한 계면 접합이다. 또한, p-type인 WSe_2와 n-type인 WO_3가 p-n접합을 이루며 효율적인 전하분리가 가능해진다. WO_3는 자외선 영역의 빛을, WSe_2는 가시광선 및 근적외선 영역의 빛을 흡수하기에 WO_3/WSe_2 core/shell 나노구조체는 자외선부터 근적외선 영역까지의 넓은 파장대의 빛을 이용할 수 있다. WO_3/WSe_2 core/shell 나노구조체는 Tungsten foil의 KOH Etching과 Oxidation 과정을 거쳐 WO_3나노와이어를 형성한 후, Chemical vapor deposition (CVD) 기반의 Selenization 공정을 통해 제작했다. X-선 회절(XRD)을 통한 합성여부 확인과 주사전자현미경(SEM)을 통해 표면 형상 및 화학 조성 분석을 진행하였다. 최종적으로 투과전자현미경(TEM)을 통해 미세조직 및 결정구조을 분석하여 WO_3/WSe_2 core/shell 나노구조체가 안정적으로 형성되었음을 입증하였다.

[P1-78]

Finding the limit coverage of color gamut with plasmonic Cu: YOORIM KIM, Cheon Woo Moon*(Soonchunhyang University)

Keywords: color gamut, limit coverage, plasmonic Cu

Electrochromic technologies provide electrically tunable optical states and are attractive for low-power reflective displays, where ambient light is modulated rather than continuously emitted. For multicolor operation, wavelength-selective control of the optical response is required to achieve a broad color gamut. Plasmonic coloration offers such control because localized surface plasmon resonance (LSPR) is strongly governed by the size, shape, and spacing of metallic nanostructures. Among plasmonic metals, Cu is particularly attractive for scalable electrochromic applications because it is less costly and more abundant than Au or Ag, while retaining high electrical conductivity and a useful plasmonic response in the visible region [1]. The central challenge is that the optical response of electrodeposited Cu is inseparable from its growth process. During electrodeposition, isolated nuclei evolve into larger particles and eventually into coalesced metallic structures. This continuous morphological evolution changes the LSPR condition and can transform wavelength-selective coloration into broadband absorption or metallic reflection, making it difficult to reproducibly access a wide color gamut. Recent Cu-based devices have demonstrated transparent, blue, red, and mirror states through controlled voltage protocols [2], confirming that nucleation and growth are critical factors in color generation. However, demonstrating only several discrete optical states does not define the full color range accessible to plasmonic Cu, and further control over nucleation and subsequent growth is required. Herein, we investigate doping and step-voltage control are considered as complementary chemical and electrical strategies for regulating Cu growth. Doping is introduced to modify the nucleation and growth behavior of Cu, whereas step-voltage control is used to distinguish the initial nucleation stage from subsequent particle growth. By controlling particle size, density, and coalescence, these strategies can tune the wavelength-dependent plasmonic response rather than simply increasing the amount of deposited Cu. The relationship between Cu morphology, optical response, and resulting color can therefore be used to identify the conditions that determine the accessible color space. The relationship between Cu growth behavior, nanostructure, plasmonic response, and optical color can be used to determine the accessible color gamut of plasmonic Cu. Controlling nucleation and growth through chemical and electrical approaches can broaden the range of wavelength-selective optical states before Cu develops into broadband dark or reflective structures. These findings may provide design guidelines for expanding the color range of electrically tunable multicolor reflective displays. Establishing this relationship can provide a framework for defining and extending the color gamut of plasmonic Cu. The combined chemical and electrical control of Cu growth may offer a practical route toward electrically tunable multicolor reflective displays with an expanded color range.

[P1-79]

플라즈모닉 멤브레인 기판을 이용한 광유도 나노입자 농축 및 라만 검출: 정동혁, 윤민기, 이수인, 민강희, 임승묵, 김관형, 윤국노, 위정섭*(국립한밭대학교 신소재공학과)

Keywords: 플라즈모닉 멤브레인, 나노입자 농축, 광열 효과, 라만 분광법

나노입자는 다양한 산업 분야에서 활용이 확대됨에 따라 사용 및 폐기 과정에서 환경으로 유출될 가능성이 증가하고 있으며, 이를 검출하고 분석하기 위한 다양한 측정 기법이 연구되고 있다. 이 중 라만 분광법은 비파괴적 분석이 가능하고 시료 전처리가 간단하며 분자 구조에 대한 특이적인 정보를 제공할 수 있다는 장점이 있지만, 라만 산란 단면적이 매우 작아 저농도 시료의 검출에는 한계가 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해, 본 연구에서는 레이저 조사에 따른 국소 광열 효과와 대류 유동을 이용하여 Si 나노입자를 조사 영역에 국소적으로 농축하고 라만 신호를 증대시키는 플라즈모닉 멤브레인 기판을 제안하였다. 기판은 상용 멤브레인 필터에 40 nm 두께의 Au 박막을 증착하여 제작하였으며, 멤브레인 표면의 기공 구조를 이용하여 Au 박막 증착 과정에서 자연스럽게 형성되는 나노구조를 플라즈모닉 구조로 활용하였다. 제작된 기판에 100 ppm 농도의 Si 나노입자 분산액을 도포한 후 레이저를 조사하여 나노입자의 국소 응집을 유도하였다. 이후 광학현미경을 이용하여 응집된 나노입자의 형태를 관찰하고, 응집 영역에서 라만 분광 측정을 수행하였다. Au가 증착되지 않은 대조군 기판에서는 나노입자 응집이 관찰되지 않은 반면, 플라즈모닉 멤브레인 기판에서는 레이저 조사 영역에 나노입자가 뚜렷하게 응집되는 현상이 확인되었다. 이는 플라즈모닉 나노구조에 의해 기판 표면 근방에서 광 에너지가 국소적으로 집중되고, 이에 따른 광열 효과가 도포액 내 유동을 유도하여 나노입자를 레이저 조사 영역으로 이동·농축시킨 결과로 해석된다. 또한 응집 영역에서 수행한 라만 측정 결과, 약 520 cm^{-1}에서 Si의 특성 피크가 뚜렷하게 검출되었으며, 이는 광유도 국소 농축을 통해 라만 분광 신호를 확보할 수 있음을 보여준다. 본 연구 결과는 제안된 플라즈모닉 멤브레인 기판이 저농도 나노입자의 국소 농축 및 라만 기반 검출을 위한 효과적인 플랫폼으로 활용될 수 있으며, 향후 다양한 나노입자의 검출 및 분석에도 적용될 수 있음을 시사한다.

[P1-80]

소수성 패턴 적용을 통한 나노입자의 국소 농축 및 라만 검출 한계 개선: 김민서, 김민채, 황지연, 정다인, 박소윤, 김관형, 윤국노, 위정섭*(국립한밭대학교 신소재공학과)

Keywords: 플라즈모닉 필터, 소수성 패터닝, 나노입자 농축, 라만 분광법

실리콘 나노입자(Si NPs)는 에너지 재료, 광학 소자 및 바이오메디컬 응용 분야 등 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 나노 크기에서 나타나는 고유한 물리·화학적 특성으로 인해 정확한 검출 및 특성 분석이 요구된다. 그러나 저농도 시료의 경우 측정 영역 내에 존재하는 입자 수가 적어 충분한 라만 산란 신호를 확보하기 어려우므로, 일반적인 라만 분광법을 이용한 Si NPs의 검출에는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 Si NPs의 국소 농축과 플라즈모닉 효과를 동시에 활용할 수 있는 플라즈모닉 주사기 필터를 제작하고, 이를 이용한 저농도 Si NPs의 라만 검출 성능을 평가하였다. 이를 위해 상용 멤브레인 필터 표면에 40 nm 두께의 금(Au) 박막을 증착하고, 필터 표면에 직경 약 2 mm의 구멍이 형성된 파라필름(Parafilm)을 적용하였다. 소수성 특성을 갖는 파라필름을 이용하여 시료 용액이 필터를 통과하는 영역을 제한함으로써 Si NPs가 구멍 내의 제한된 영역에 집중되도록 하였으며, 동시에 Au 나노구조에서 발생하는 플라즈모닉 효과를 활용하여 라만 신호를 향상시키고자 하였다. 제작된 플라즈모닉 필터를 주사기 내부에 장착한 후, 서로 다른 농도의 Si NPs 분산액을 주입하여 시료를 필터를 통해 통과시켰다. 이후 필터 표면에서 라만 스펙트럼을 측정하고, 파라필름 적용 여부에 따른 Si NPs의 검출 성능을 비교하였다. 실험 결과, 파라필름을 적용하지 않은 필터에서는 100 ppm 이상의 농도에서만 Si의 특성 라만 피크가 관찰된 반면, 파라필름을 적용한 플라즈모닉 필터에서는 1 ppm 농도의 Si NPs에서도 특성 라만 피크가 검출되었다. 이에 따라 최소 검출 농도가 100 ppm에서 1 ppm으로 감소하여 약 100배의 검출 한계 개선을 확인하였다. 이러한 결과는 제한된 영역으로의 Si NPs 국소 농축이 저농도 시료의 라만 검출 성능 향상에 효과적으로 기여할 수 있음을 보여준다. 본 연구에서 제안한 플라즈모닉 주사기 필터는 시료의 간단한 주입 과정만으로 나노입자의 국소 농축과 라만 신호 향상을 동시에 구현할 수 있으며, 향후 저농도 나노입자의 간편한 검출 및 분석을 위한 유용한 플랫폼으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

P2 : 가공-표면처리
Room 1층 전시홀, 10월 28일

[P2-1]
Electrochemical Corrosion Behavior and Intergranular Corrosion Mechanism of Almag6 in Chloride Environments: YeWon Han(KITECH, Hanyang.univ), ChaeHyun Jeong(KITECH, Sunkyunkwan.univ), Sekwon Oh*(KITECH)
Keywords: Electrochemical Corrosion Behavior and Intergranular Corrosion Mechanism of Almag6 in Chloride Environments

Aluminum (Al) is widely used in heat exchangers and chemical equipment due to its excellent thermal conductivity (200 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) and low density. Although aluminum is a thermodynamically active metal with a low standard reduction potential (E^o = -1.7 V vs. SHE), it exhibits excellent corrosion resistance because a thin and dense native oxide film forms on its surface upon exposure to oxygen or water. However, since pure aluminum is a soft metal with low strength, it is typically alloyed with other elements to improve its mechanical properties. In Al-Mg alloys, as the Mg content increases, the precipitation of the β-phase (Al_3Mg_2) within the matrix increases, thereby enhancing mechanical strength. However, the formed β-phase has a more electrochemically active potential than the aluminum matrix, thereby inducing microgalvanic corrosion. Consequently, the β-phase, which heavily precipitates at the grain boundaries, acts as a primary driver for accelerated intergranular corrosion. Although numerous studies on Al-Mg alloys have been conducted to date, research elucidating the electrochemical corrosion mechanisms and corrosion rates of alloys containing high Mg content (6 wt% or more) remains relatively scarce. In this study, the corrosion behavior of Almag6, a high-Mg aluminum alloy, was evaluated in a chloride (NaCl) environment in comparison with the representative commercial A5052 alloy. Potentiodynamic polarization tests and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) were employed to quantitatively elucidate the variations in electrochemical corrosion kinetics and mechanisms as functions of environmental conditions. Furthermore, electron backscatter diffraction (EBSD) was utilized to analyze surface grain boundary characteristics, while scanning electron microscopy combined with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM/EDS) was used to characterize the microstructural evolution before and after corrosion, as well as the morphological and compositional effects of β-phase precipitation on localized corrosion. Preliminary electrochemical evaluation results revealed a negative shift in the corrosion potential (E_{corr}) and an acceleration of intergranular corrosion depending on variations in alloy composition and environmental conditions within the NaCl environment.

[P2-2]
Comparative wear behavior of cast iron, carbon–ceramic, and laser-cladded ceramic coatings for brake applications: Woocheol Shin(Korea Institute of Industrial Technology), Taejune Nam(Korea Institute of Industrial Technology, Sunchon Univ.), Sumin Song(Korea Institute of Industrial Technology, Hanyang Univ.), Kyuntaek Cho*(Korea Institute of Industrial Technology)
Keywords: Laser cladding, Ceramic coating, Brake discs, Hardness, Wear behavior

Cast iron remains the most widely used material for brake discs because of its low cost and ease of manufacturing. Although advanced materials such as carbon–ceramic composites offer enhanced wear resistance, thermal stability, and durability, their high production cost and complicated fabrication processes restrict broader application. In this context, laser-cladded ceramic coatings represent a promising and economical alternative for improving brake-disc performance. Despite increasing interest in these brake-disc materials, systematic comparisons among cast iron, carbon–ceramic materials, and laser-cladded ceramic coatings remain limited. Therefore, this study provides a comparative evaluation of their wear behavior under room-temperature conditions. The microstructural features of cast iron, carbon–ceramic, and the laser-cladded ceramic coating were characterized by scanning electron microscopy (SEM), confirming compact microstructures with few observable defects. Vickers hardness measurements were conducted to assess their mechanical properties, and the laser-cladded coating showed markedly higher hardness than cast iron while exhibiting hardness levels comparable to those of carbon–ceramic. In the laser-cladded coating, hardness progressively decreased toward the substrate, which was associated with compositional variation and dilution near the coating–substrate interface and supported the formation of a sound metallurgical bond. Room-temperature wear behavior was evaluated using ball-on-disk tests under applied loads of 10, 20, and 30 N. Although the wear rate increased with load for all materials, the laser-cladded coating maintained substantially greater wear resistance than cast iron and demonstrated performance comparable to carbon–ceramic, owing to its dense microstructure and high hardness. These findings suggest that laser-cladded ceramic coatings have strong potential as a more economical alternative to carbon–ceramic brake discs, offering comparable wear performance with a less costly and less complex manufacturing route. **Acknowledgement** This study has been conducted with the support of the Ministry of Trade, Industry and Energy as “Materials and Components Technology Development Project (RS-2024-00506823)”.

[P2-3]

Microstructural and Cu–Sn Interfacial Characterization of Hot-Dip Tin-Plated 0.16 mm Copper Fine Wire: Gi-Hyun Lim, Hyeon-jun Heo, JuChan Kwon, Handong Cho*(Mokpo National Univ.)

Keywords: Hot-dip tin plating, Copper fine wire, SEM-EDS, Cu-Sn interface, Offshore wind cable

With the expansion of offshore wind power and marine electrical infrastructure, corrosion-resistant copper wires have become increasingly important. Hot-dip tin plating, applied to copper wire, is a representative surface treatment used to suppress oxidation and improve solderability and corrosion resistance. As wire diameters decrease, precise evaluation of dimensional uniformity and plating layer/interfacial characteristics becomes increasingly critical. In this study, hot-dip tin-plated 0.16 mm-class copper fine wire was analyzed using OM, SEM, and EDS to characterize dimensional uniformity, plating layer microstructure, and elemental distribution at the Cu-Sn interface. OM analysis showed an average diameter of 164.37 ± 1.76 μm (n = 4), with small deviation indicating a uniform cross-section. SEM analysis confirmed a Sn plating layer on the Cu substrate, with an average thickness of approximately 0.64 μm; however, local variations in thickness and interfacial morphology, along with surface contaminants and scratch marks, were partially observed. EDS analysis showed Sn as the dominant element in the plating layer and Cu as dominant in the substrate, clearly distinguishing the two regions' composition, while Cu was partially co-detected near the interface due to electron beam scattering effects. These results confirm the formation of a Sn plating layer on 0.16 mm-class copper fine wire, with local thickness variation and surface condition identified as factors that may affect plating quality uniformity. The findings are expected to serve as foundational data for elucidating the correlation between pretreatment conditions and plating process parameters, and for stabilizing plating quality and optimizing the process for fine-wire products. Acknowledgement This research was supported by the Regional Specialized University(Glocal University) 30 ANCHOR PROGRAM through the Jeollanamdo Anchor Center, funded by the Ministry of Education(MOE) and the Jeonnam-Gwangju Special Metropolitan City, Republic of Korea.(2026-ANCHOR-14-001)

[P2-4]

반도체 패키징 몰딩 금형용 아크 이온 플레이팅 기반 다층 질산화물 코팅막의 기계적 물성 및 표면 특성 평가: 김영석*, 정용, 신연철, 서민수(에이피스(주))

Keywords: 방오염성, 표면에너지, 아크 이온 플레이팅, 반도체 금형, 산화물

최근 반도체 패키징 기술은 칩의 고성능화 및 다기능화 요구에 따라 3D 적층, FO-WLP 등 대면적·초미세 고집적 패키징 형태로 급격히 전환되고 있다. 이러한 고집적 캡슐화 공정에서는 내부 칩과 배선을 수분 및 물리적 외력으로부터 보호하기 위해 에폭시 몰딩 컴파운드(Epoxy Molding Compound, EMC)를 이용한 트랜스퍼 또는 압축 몰딩 성형이 필수적으로 수행된다. 그러나 성형 공정은 가혹한 고압 환경에서 진행되며, 이 과정에서 몰딩 금형강 표면은 심각한 열화 경로를 겪게 되며, 반복적인 성형 과정에서 금형 미세 기공에 침착 후 산화되어 강한 화학적 오염 층을 형성한다. 이로 인해 제품의 이형 불량 및 외관 불량이 발생할 뿐만 아니라, 성형성 회복을 위한 멜라민 세정 화합물의 사용 빈도가 증가하여 공정 다운타임 확대 및 생산성 저하를 초래한다. 현재 이를 억제하기 위해 금형 표면에 하드 크롬 도금이나 PVD 기반의 CrN, TiN 등의 코팅 등이 적용되고 있으나, 가혹해지는 후공정 환경과 에폭시 수지 조성의 변화로 인해 화학적 흡착을 완벽히 차단하고 물리적 마모를 동반 억제하기에는 한계에 봉착해 있다. 따라서 수지와의 화학적 친화력을 근본적으로 낮출 수 있는 매우 낮은 표면 자유 에너지 특성과 함께 고압의 실리카 슬러리 유동을 견딜 수 있는 우수한 나노 경도 및 높은 계면 밀착력을 동시에 만족하는 새로운 기능성 표면 처리 기술이 시급히 요구된다. 본 연구에서는 고집적 반도체 패키징의 에폭시 몰딩 컴파운드(Epoxy Molding Compound, EMC) 성형 공정 중 발생하는 금형의 화학적 오염 및 기계적 마모 문제를 해결하기 위해, 아크 이온 플레이팅(Arc Ion Plating, AIP) 공정 기반의 고경도·저표면에너지 질·산화물 다층 코팅막을 개발하고 그 특성을 평가하였다. SKD11 기판 위에 밀착력 향상을 위한 Cr 또는 Ti의 금속 버퍼층을 증착한 후, 반응성 가스(O_2, N_2) 분압을 정밀 제어하여 나노 다층 구조막을 합성하였다. 산소 분압 제어를 통해 공정 중 아크 방전 안정성을 확보하였으며 미세 입자(Droplet) 생성이 억제된 균일한 산화물 상을 형성하였다. 이 후 XRD, 로크웰 테스트, 나노인덴테이션, 칼로테스트 및 수접촉각 분석을 통해 개발 된 코팅의 기계적 물성 및 표면 특성을 분석하였다. 감사의 글 이 연구는 중소벤처기업부의 재원으로 중소기업기술정보진흥원의 지원 (RS-2025-25440602, 반도체 패키징 금형 부품의 방오염 및 내마모성 향상을 위한 나노다층구조 복합(질·산화물) 코팅 기술 개발)에 의하여 수행 되었습니다.

[P2-5]

해상풍력용 고강도 볼트 상용소재의 부식거동 분석: 권홍기(포항소재산업진흥원), 이승민(세아베스틸), 정정진(KPF), 박상원*(포항소재산업진흥원)

Keywords: 합금강, 해양부식, 부식거동, 미세조직

해상풍력 발전설비에 사용되는 체결용 볼트는 해양환경의 염수 및 고습 조건에 장기간 노출되므로 부식에 의한 소재 열화를 고려한 환경 내구성 확보가 중요하다. 특히 고강도 볼트의 경우 실제 사용환경에서 부식과 응력이 동시에 작용할 수 있어 소재의 부식거동과 응력부식균열에 대한 평가가 요구된다. 본 연구에서는 향후 해상풍력용 고강도 볼트 개발소재의 환경 특성 확보를 위한 기초자료를 마련하고자 상용 고강도 볼트 소재를 대상으로 SST, CCT 및 SCC 평가를 수행하였다. 인장시험을 통해 소재별 항복강도를 측정하고, 항복강도의 70% 수준의 응력을 적용하여 SCC 시험을 수행함으로써 부식환경에서의 균열 발생 여부를 확인하였다. 또한 SST 및 CCT를 1, 000시간 동안 수행하면서 일정 주기마다 시편의 표면 상태를 관찰하여 시간에 따른 부식 진행 양상을 비교하였다. SCC 시험 후 시편에서는 균열 발생 여부를 확인하였으며, SST 및 CCT 시험 시편에 대해서는 표면 및 단면 관찰을 통해 부

식층과 부식생성물의 형성 특성을 분석하였다. 이를 바탕으로 장시간 염수 및 복합부식환경에서 형성되는 부식생성물과 소재의 부식 거동 간의 관계를 고찰하고, 상용소재의 환경 내구성 특성을 정립하였다. 본 연구 결과는 향후 해상풍력용 개발소재의 부식환경 설계 및 내식성 향상을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P2-6]

Ni-Cr-Mo 합금 튜브 내면 전해연마 시 상대전극 직경이 전류-전압 특성에 미치는 영향: 양현석, 정우철, 한덕현, 최광수, 공만식*(고등기술연구원)

Keywords: 전해연마, Hastelloy C-22, 상대전극, 전류-전압 특성, 폴리싱 플래토, 튜브 내면

Ni-Cr-Mo계 내식 합금 튜브는 반도체 공정가스 배관 등 고청정·고내식 환경에 사용되며, 내면의 표면 품질 확보를 위해 전해연마(electropolishing, EP)가 적용된다. 소구경 튜브의 내면 전해연마에서는 튜브 내부에 삽입되는 상대전극의 직경이 전극 간 거리와 전해액 유동 단면적을 동시에 결정하므로, 공정 거동에 미치는 영향에 대한 체계적 이해가 필요하다. 본 연구에서는 1/4인치 Hastelloy C-22 튜브를 대상으로 인산-황산계 전해액을 순환시키며 상대전극 직경(1.2–1.8 mm)을 변수로 전류-전압(I-V) 스윕을 수행하고, 전해연마의 특성 영역인 연마 발생 구간의 형성 거동을 분석하였다. 그 결과 상대전극 직경이 증가함에 따라 연마 구간이 저전압 방향으로 이동하는 경향이 확인되었으며, 이는 전극 간 환형 갭의 기하학적 변화에 따른 셀 저항의 감소로 해석되었다. 도출된 직경 별 플래토 전위 구간은 소구경 튜브 내면 전해연마의 공정조건 설정 기준으로 활용하고자 한다.

[P2-7]

Powder Evolution and Hot-Press Densification Kinetics of Mechanically Alloyed ZrMoTiCuSi Multi-Element Alloy: gihoon kwon, Byoungho Choi, Jihun Shin, Kyong Jun An, Kyoung Il Moon*(Korea Institute of Industrial Technology)

Keywords: Multi-element alloy; Mechanical alloying; Hot pressing; Densification kinetics; Master Sintering Curve

Refractory-rich multi-element alloys (MEAs) are promising materials for advanced structural and functional applications owing to their excellent mechanical and thermal properties. However, the relationship between powder evolution during mechanical alloying and subsequent densification behavior remains insufficiently understood. In this study, ZrMoTiCuSi MEA powders were prepared by mechanical alloying, and their powder characteristics and hot-press densification kinetics were systematically investigated. The effects of milling time on particle morphology, elemental homogeneity, phase evolution, and thermal behavior were examined. The mechanically alloyed powders were subsequently consolidated by hot pressing under various temperatures, heating rates, and applied loads. After 12 h of mechanical alloying, a highly homogeneous powder distribution suitable for consolidation was obtained. Under optimized hot-pressing conditions, the relative density reached approximately 96%, while the hardness and indentation fracture toughness increased from 210 to 910 HV and from 3.06 to 5.99 $MPa \cdot m^{1,2}$, respectively. A Master Sintering Curve (MSC) constructed using an apparent activation energy of 350 $kJ \cdot mol^{-1}$ exhibited excellent fitting accuracy ($R^2 = 0.995$) and densification predictability ($R^2 = 0.987$). These results demonstrate that controlling powder evolution through mechanical alloying, combined with MSC-based kinetic analysis, provides an effective strategy for optimizing the densification of refractory-rich MEAs.

P3 : 에너지재료
Room 1층 전시홀, 10월 28일

[P3-1]
Fluorinated Metal–Organic Framework with 3D Ion-Conducting Channels for High-Voltage Lithium Metal Batteries: Hyungdoo Lee, ChanJin Park *(Chonnam Univ.)
Keywords: High voltage, lithium metal battery, Composite quasi solid electrolyte, Fluorinated metal, organic framework, 3D ion conducting channel, In situ polymerization

High-voltage lithium metal batteries (LMBs) are considered promising candidates for next-generation energy storage owing to their high energy density. However, conventional liquid electrolytes suffer from oxidative decomposition at high operating voltages, while many composite electrolytes still face discontinuous ion transport that limits Li^+ conduction. Overcoming these two challenges simultaneously remains a key requirement for realizing stable high-voltage LMBs. In this study, a composite quasi-solid electrolyte (CQSE) was developed by uniformly growing a fluorinated metal–organic framework (MOF), derived from ZIF-8 by partially substituting the 2-methylimidazole linker with 2-methyl-4-(trifluoromethyl)imidazole, on the surface of PVDF-HFP nanofibers, followed by in-situ polymerization of a matrix based on vinyl ethylene carbonate (VEC) and pentaerythritol tetraacrylate (PETEA) with succinonitrile (SN). The uniform, surface-grown MOF layer forms interconnected, three-dimensional (3D) ion-conducting channels along the nanofibers, providing continuous Li^+ transport pathways together with abundant Lewis acid sites, while the fluorinated imidazolate linkers are expected to enhance the oxidative stability of the framework, enabling stable operation under high-voltage conditions. The optimized CQSE demonstrated an ionic conductivity of 0.55 mS cm^{-1} at 30 °C, oxidative stability up to 5.2 V vs. Li/Li^+, a high Li^+ transference number of 0.77, and interfacial resistance of 800 Ω. Lithium symmetric cells maintained stable plating/stripping for 100 h at 0.1 mA cm^{-2} with a low overpotential. This study provides a strategy for constructing 3D ion-conducting channels through fluorinated MOFs to enhance high-voltage stability in lithium metal batteries

[P3-2]
Improved Sodium-Ion Transport via COF-Based Quasi-Solid Polymer Electrolyte for Sodium-Metal Batteries: Hyeon-Seo Lee(Department of Materials Science and Engineering, Chonnam National Univ.), Chan-Jin Park*(Department of Materials Science and Engineering, Chonnam National Univ., Engineering Research Institute, Chonnam National Univ.)
Keywords: Sodium-metal batteries, Composite quasi-solid electrolyte, Sulfonated COF, In-situ polymerization, PDOL

Developing robust solid-state electrolytes (SSEs) has become a critical requirement for next-generation energy storage systems that combine high energy density with improved safety. Among the candidate chemistries, sodium-metal batteries (SMBs) have attracted considerable attention as a cost-effective alternative, owing to the natural abundance of sodium resources. However, their widespread adoption remains hindered by insufficient ionic conductivity at room temperature, poor mechanical robustness, and high interfacial resistance between the electrolyte and electrodes. In this study, a COF-composite quasi-solid electrolyte (CCQSE) was developed through a facile two-step route. A sulfonated covalent organic framework (S-COF) was first co-assembled with a porous PVDF-HFP membrane to form a free-standing composite host. Subsequently, 1, 3-dioxolane (DOL) was polymerized in situ within the host to generate a poly(1, 3-dioxolane) (PDOL) phase, yielding a mechanically stable composite quasi-solid polymer electrolyte. The S-COF provides permanent, ordered porous channels functionalized with SO_3Na groups, which facilitate selective Na^+ transport while restricting anion mobility, thereby enhancing the Na^+ transference number. In addition, the in-situ polymerization allows conformal contact with the electrode, lowering the interfacial resistance of the resulting solid-state sodium-metal battery. The optimized CCQSE containing 5 wt% S-COF (CCQSE-5) exhibited an ionic conductivity of 0.47 mS cm^{-1} and a Na^+ transference number of 0.68 at 30 °C. Moreover, the CCQSE showed an electrochemical oxidation stability of up to 4.8 V vs. Na/Na^+. Furthermore, the Na|CCQSE-5|NVP full cell achieved discharge specific capacities of 106.2 and 93.1 mAh g^{-1} at 0.1 C and 2 C, respectively. These results demonstrate that the integration of S-COF with an in-situ polymerized PDOL phase provides an effective strategy for facilitating Na^+ transport and enhancing interfacial stability in solid-state sodium-metal batteries.

[P3-3]
Effect of Pore Structure on Ion Transport and Capacitive Performance of Anthracite-Derived Activated Carbons in Neutral Alkali Sulfate Electrolytes: Eom Hee Seung, Kwang Hyun Park, Jae Eun Jin, So Yeon An, Bo Young Yoon, Ryun Kyeong Lee, Tae Young Park, Cheng Ai Li, Sung Ho Song*(Division of Advanced Materials Engineering, Center for Advanced Materials and Parts of Powders, Kongju National University), Wang-Geun Shim*(Department of Chemical Engineering, Sunchon National University)
Keywords: Activated carbon, Hierarchical porous structure, Electric double-layer capacitor, Sulfate electrolytes, Electrochemical energy storage

Mongolian anthracite-derived activated carbons with different pore structures (MRA-Micro and MRA-Meso) were evaluated as electrode materials for electric double-layer capacitors in neutral Li_2SO_4, Na_2SO_4, and K_2SO_4 electrolytes. MRA-Meso exhibited a hierarchical micro/mesoporous structure and superior electrochemical performance compared with MRA-Micro. In particular, MRA-Meso in K_2SO_4 delivered the highest specific capacitance of 136.2 F g^{-1} at 100 mV s^{-1}. EIS, DDC, and complex capacitance analyses confirmed lower resistance, faster ion transport, and more efficient pore utilization in MRA-Meso. These results demonstrate that coupling hierarchical pore structures with appropriate electrolyte ions is critical for enhancing charge-storage kinetics and provide useful design guidelines for advanced electrochemical energy-storage systems. This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(RS-2019-NR040074)

[P3-4]

Graphene-Regulated K-Ion Transport in Hierarchically Porous Biomass-Derived Carbon for High-Power Aqueous Supercapacitors: boyoung yoon, Soyeon An, Jaeeun Jin, Hee Seung Eom, Ryun Kyeong Lee, Tae Young Park, Kwang Hyun Park, Cheng Ai Li, sungho Song*(Kongju National Univ.)

Keywords: Biomass-derived carbon, graphene, potassium-ion transport, hierarchically porous carbon, electric double-layer capacitor, aqueous supercapacitor

Understanding how graphitic structures evolve in biomass-derived carbon and regulate ion transport is critical for designing high-power aqueous supercapacitors. However, the evolution of graphene-like domains during chemical activation of biomass-derived carbons and their subsequent influence on ion-specific charge-storage kinetics remain poorly understood. This study elucidates the activation-induced evolution of graphene-like domains in hierarchically porous carbon derived from balsa wood and establishes their role in regulating electrolyte-dependent ion storage. Structural evolution during activation involves the selective removal of disordered sP3-rich carbon and K-mediated intercalation/exfoliation, followed by liquid-phase-assisted reconstruction of exfoliated graphitic sheets into extended graphene-like layers at 900 °C. In neutral K2SO4, the optimized Act.900 electrode maintains an energy density of 9.4 Wh kg−1 even at a high power density of 21.1 kW kg−1, demonstrating its rapid charge-storage capability. Comparative electrochemical analysis using Li+, Na+, and K+ electrolytes reveals a distinct K+ advantage under high-rate conditions, arising from its low hydration energy, rapid desolvation, and favorable interaction with graphene interlayers. Electrodes with different degrees of graphene evolution further demonstrate that continuous graphene-like domains critically regulate high-rate K-ion storage, providing a mechanistic basis for designing biomass-derived high-power aqueous supercapacitors. This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(RS-2019-NR040074)

[P3-5]

EIS-Based State-of-Health of LIBs Using Hybrid CNN–GPR Model: dongsoo lee, seungyeon lee, Il sohn*(Yonsei Univ.)

Keywords: Battery, Recycling, Diagnosis, Artificial Inteligence

Reliable battery diagnosis is required not only to estimate state-of-health (SOH), but also to determine whether a retired battery is more suitable for reuse, direct recycling or material recovery. This work forms part of a broader study that seeks to infer internal battery condition and degradation mechanisms from electrical measurements. At the present stage, the objective is to establish a continuous SOH prediction model using electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and to examine whether changes across the measured frequency range contain useful information about battery condition. Five public EIS datasets were integrated into a metadata database containing information on cell chemistry, cell format, state of charge, temperature, measurement protocol, capacity based SOH, and data quality. A controlled subset of NCM 811 cells measured at 25 °C was then selected. Raw and normalized complex impedance spectra were processed using a two branch one dimensional convolutional neural network (CNN). The raw branch retained information related to absolute impedance magnitude, whereas the normalized branch emphasized differences in spectral shape. The resulting representations were standardized, reduced in dimension, and used as inputs to a Gaussian process regression (GPR) model. Cell wise nested cross validation was applied so that measurements from the same physical cell were not divided between training and test sets. The model achieved a battery macro mean absolute error of 1.010%p, an overall mean absolute error of 1.005%p, a root mean square error of 1.393%p, and an R^2 of 0.964. The Gaussian process model also provided a predictive distribution for each EIS measurement. These results demonstrate that EIS combined with a CNN-GPR framework can provide accurate, uncertainty-aware SOH prediction.. The framework provides a basis for subsequent physics-informed analysis linking impedance evolution to transport, reaction, interphase, and mechanical degradation mechanisms, ultimately enabling diagnosis of specific LIB degradation modes.

[P3-6]

Hydrovoltaic Performance and Heavy-Metal Ion Adsorption Applicability of Biomass-Based CH-TMA Frameworks: Yewon Do(Korea Institute of Industrial Technology, Inha Univ.), Seung-Hwan Lee, So Hyun Baek, Yu-Na Lee, Kanghyuk Lee, Taeseok Oh, Yongbum Kwon, Yoseb Song(Korea Institute of Industrial Technology), Haejin Hwang(Inha Univ.), Da-Woon Jeong*(Korea Institute of Industrial Technology, Chung-Ang Univ.)

Keywords: Hydrovoltaic, Energy harvesting, Chitosan, Long-term operational stability, Heavy-metal ion adsorption

Hydrovoltaic energy harvesting, which uses water from the surrounding environment, is an environmentally friendly technology that generates electrical energy without an external power source. Chitosan is a biopolymer with abundant hydroxyl and amine groups, which impart hydrophilicity and facilitate the formation of porous structures, making it suitable for hydrovoltaic applications that require water absorption and transport. Moreover, the amine and hydroxyl groups of chitosan, which contribute to hydrophilicity and water transport, can also provide interaction sites for heavy-metal ions, suggesting the potential of chitosan-based frameworks for heavy-metal ion adsorption. Although chitosan-based materials have been studied for hydrovoltaic energy harvesting, how reactant concentration affects their framework morphology and hydrovoltaic behavior remains insufficiently understood. In this study, we fabricated chitosan-trimesic acid (CH-TMA) frameworks and investigated the effects of reactant concentration on their morphology, long-term hydrovoltaic operation, and applicability for heavy-metal ion adsorption under simulated wastewater conditions. We synthesized the CH-TMA frameworks by controlling the total reactant concentration within the range of 13.3-20.4 wt% while maintaining a constant mass ratio between chitosan and TMA. As the reactant concentration increased, the morphology tended to become denser, thereby affecting water accessibility, ion-transport pathways, and structural stability. The best-performing devices generated a maximum open-circuit voltage of over 0.7 V and a short-circuit current of 70 μA, while maintaining continuous hydrovoltaic operation for approximately 100 h. The CH-TMA framework contains chitosan-derived amine and hydroxyl groups as well as TMA-derived carboxyl/carboxylate groups, which can interact with heavy-metal ions such as Pb^{2+} through coordination bonding, chelation, and electrostatic interactions. These functional-group-mediated interactions indicate the potential applicability of the CH-TMA framework not only as a hydrovoltaic energy-harvesting material but also as an adsorbent for heavy-metal ions in simulated wastewater. These results demonstrate that controlling the reactant concentration enables the tailoring of the structural properties and hydrovoltaic performance of CH-TMA frameworks. Furthermore, this study suggests their potential as sustainable environmental and energy materials that combine energy harvesting with heavy-metal ion adsorption.

[P3-7]

DFT 및 ML-MD 기반 Vanadium-free NASICON $Na_3V_2(PO_4)_2F_3$ 양극재의 전기화학적 성능 평가: 유승원, 최용석*(단국대학교)

Keywords: 소듐 이온 배터리, 양극재, 원소 치환, 범밀도함수 계산, 분자동역학 계산

Sodium-ion batteries (SIBs)는 소듐 자원이 풍부하고 원재료 가격 변동성이 상대적으로 낮다는 이점을 가지기 때문에, lithium-ion batteries (LIBs)를 대체할 차세대 이차전지로 주목받으며 활발한 연구가 이루어지고 있다. 특히 NASICON (Na Super Ionic Conductor) 구조를 갖는 $Na_3V_2(PO_4)_2F_3$ (NVPF) 양극재는 높은 작동 전압, 우수한 구조적 안정성, 빠른 Na^+ 확산 특성 및 긴 수명 특성을 동시에 갖추고 있어 차세대 소듐이온전지용 양극재로 큰 관심을 받고 있다. 그러나 NVPF의 핵심 구성 원소인 바나듐(V)은 독성과 환경 유해성이 존재하며 자원 확보 측면에서도 지속가능성에 대한 우려가 제기되고 있다. 이에 따라 바나듐을 사용하지 않거나 함량을 줄인 Vanadium-free 또는 저바나듐 양극재 개발이 활발히 진행되고 있으며, 이를 통해 친환경성과 경제성을 동시에 확보하고자 하는 연구가 지속되고 있다. 본 연구에서는 NVPF의 바나듐을 각각 니켈(Ni), 크롬(Cr), 망간(Mn)으로 완전히 치환한 $Na_3Ni_2(PO_4)_2F_3$ (NNPF), $Na_3Cr_2(PO_4)_2F_3$ (NCPF), $Na_3Mn_2(PO_4)_2F_3$ (NMPF)를 대상으로 계산과학 기반의 전극 성능 비교를 수행하였다. Density Functional Theory (DFT)를 이용하여 각 전극의 구조 안정성, 형성에너지, 탈삽입 전압 및 열역학적 특성을 평가하였으며, 머신러닝 퍼텐셜 기반 Molecular Dynamics (ML-MD) 시뮬레이션을 통해 다양한 온도에서의 Na^+ 이온 확산 거동과 확산계수를 분석하였다. 또한 각 조성에 대한 전압 프로파일과 이온 이동 특성을 종합적으로 비교하여 전이금속 치환이 전극의 전기화학적 성능에 미치는 영향을 규명하였다. 본 연구는 환경 유해성이 있는 바나듐을 대체할 수 있는 NASICON 기반 양극재의 가능성을 계산과학적으로 제시하고, 차세대 친환경 소듐이온전지 양극재 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

[P3-8]

수소 및 불순물 함유 PWR 증기발생기 틈새 환경에서 소성변형이 Alloy 690의 전면부식 거동에 미치는 영향과 열역학적 고찰: 전순혁*, 한지영, 김성우(한국원자력연구원)

Keywords: 증기발생기, Alloy 690, 소성변형, 전면부식, 불순물

가압경수로형 원전 2차계통 증기발생기 전열관 재료로 사용되는 Alloy 690은 우수한 내식성을 갖지만, 장기 운전 중 발생하는 소성변형과 틈새 내 불순물 축적은 부식 거동에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 수소 및 불순물 Pb가 함유된 PWR 2차측 증기발생기 틈새 모사 환경에서 소성변형(0, 15, 30%)이 Alloy 690의 전면부식 거동에 미치는 영향을 평가하고, 산화층 형성 메커니즘 및 불순물 Pb 거동을 열역학적으로 고찰하였다. 소성변형에 따른 표면조도, 결정방위, 전위밀도 및 입계 특성을 EBSD와 SEM을 이용하여 분석하였으며, 산화층의 미세구조와 조성은 FIB-TEM/EDS를 통해 평가하였다. 부식시험 결과, 소성변형이 증가할수록 전면부식 속도는 증가하였으며, 이는 표면 결함 및 조도의 증가, 전위밀도 증가, 저에너지 CSL 입계 분율 감소에 기인하는 것으로 판단되었다. 또한 소성변형 시 형성된 산화층은 불균일하고 불연속적인 구조를 나타냈으며, 내부 Ni-rich 산화층에서 불순물 Pb 농축이 증가하였다. HSC Chemistry를 이용한 열역학 계산 결과, $Pb(OH)^+$ 및 $Pb(OH)_2$의 환원 반응은 모두 음의 Gibbs 자유에너지를 나타내어 자발적으로 진행 가능함을 확인하였으며, 이에 따른 합금원소의 용출 촉진이 산화층 결함 증가와 부식속도 향상에 기여하는 것으로 해석하였다. 본 연구는 소성변형과 불순물이 공존하는 PWR 증기발생기 틈새 환경에서 Alloy 690의 전면부식 메커니즘을 미세조직 변화와 열역학적 관점에서 규명하였으며, 장기 운전 원전 증기발생기 전열관의 건전성 평가 및 수명예측을 위한 기초자료를 제공할 것으로 기대된다.

[P3-9]

Micro-Compositional Characterization of Radioactive Materials: Hot-Cell Metallographic Protocols and Shielded EPMA: Gahyun Choi*(Korea atomic energy research institute)

Keywords: EPMA, radioactive materials

The Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA) is a high-precision instrument capable of characterizing micro-scale elemental compositions and chemical states in solid materials. A distinct analytical advantage of EPMA lies in its operational stability under high beam currents, which yields exceptional data reproducibility and reliability over extended acquisition times. At the Irradiated Materials Examination Facility (IMEF) of the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), post-irradiation examinations are routinely conducted on high-activity research specimens from the HANARO reactor and commercial nuclear power plants. To mitigate radiation exposure, sample preparation is performed remotely within shielded hot cells. These facilities are equipped with manipulators and integrated metallographic units to carry out precision cutting, grinding, and polishing. This study delineates an optimized workflow encompassing hot-cell metallographic preparation and subsequent micro-compositional analysis via a shielded EPMA, establishing a robust framework for handling highly radioactive materials.

[P3-10]

Flexible and Tough MXene/Graphene Hybrid Films Enabled by Metal-Ion Crosslinking for Efficient EMI Shielding: Soyeon An, Jae Eun Jin, Hee Seung Eom, Bo Young Yoon, Ryun Kyeong Lee, Tae Young Park, Kwang Hyun Park, Cheng Ai Li, Sung Ho Song*(Kongju Univ.)

Keywords: MXene, Reduced graphene oxide(rGO), Metal-ion crosslinking, Electromagnetic interference(EMI) shielding, Conductive porous films

The growing demand for lightweight, flexible, and highly conductive electromagnetic interference (EMI) shielding materials has stimulated the development of mechanically robust MXene-based architectures. Herein, a three-dimensional $Ti_3C_2T_x$ MXene/reduced graphene oxide (MX-rGO) hybrid film containing magnetic Fe nanochains was fabricated by vacuum-assisted filtration followed by hydroiodic acid reduction. Fe^{2+}-mediated interfacial cross-linking strengthened the interactions between MXene and graphene sheets, forming a stable interconnected network with enhanced mechanical strength, flexibility, electrical conductivity, and antioxidative stability. The resulting hybrid film exhibited enhanced EMI shielding performance owing to the synergistic effects of the highly conductive MXene/rGO network and magnetic Fe components. Efficient conductive loss, interfacial polarization, multiple internal reflections, and magnetic loss promoted electromagnetic wave attenuation and energy dissipation throughout the three-dimensional porous architecture. Consequently, the MX-rGO hybrid film achieved high EMI shielding effectiveness while maintaining excellent mechanical robustness and flexibility, demonstrating its potential as a lightweight multifunctional shielding material for flexible electronics, wearable devices, and aerospace applications. This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(RS-2019-NR040074)

P4 : 반도체
Room 1층 전시홀, 10월 28일

[P4-1]

Ag–Al–Mn 합금 기반 나노다공성 Ag의 2차 탈합금에 따른 순도·비표면적 변화 및 소결접합 특성: 이현채(인하대학교 신소재공학과), 성재욱*, 현승균*(인하대학교 제조혁신전문대학원 첨단소재공정공학과)

Keywords: 나노다공성 실버, 탈합금 공정, Ag-Al-Mn 합금, 비표면적, 소결 접합

전력반도체의 고출력 및 고온 구동 환경이 확대됨에 따라 기존 Sn계 솔더를 대체할 수 있는 고내열 접합 소재에 대한 관심이 증가하고 있다. Ag 기반 소결접합 소재는 높은 열, 전기전도도와 우수한 고온 안정성을 가지며, 특히 나노구조 Ag는 높은 비표면적과 표면에너지로 인해 비교적 낮은 온도에서 소결이 가능하다는 장점이 있다. 탈합금법으로 제조된 나노다공성 Ag는 연속적인 다공성 구조와 높은 비표면적을 확보할 수 있어 Ag의 소결 온도를 낮추고 치밀화를 촉진할 수 있는 접합 소재로 주목받고 있다. 그러나 탈합금 후 잔류하는 합금 원소 및 중간상은 Ag의 확산과 소결을 저해할 수 있으므로, 비표면적뿐만 아니라 Ag 순도 역시 접합 특성에 영향을 미치는 주요 인자로 고려된다. 본 연구에서는 Ag–Al–Mn 합금 기반 나노다공성 Ag에 2차 탈합금 공정을 적용하여 Ag 순도와 비표면적 변화가 소결접합 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 일반적으로 탈합금 시간을 증가시키면 잔류 비귀금속 원소의 제거가 촉진될 수 있으나, 장시간의 탈합금은 Ag 표면확산에 의한 ligament 조대화와 비표면적 감소를 유발할 수 있다. 이에 장시간의 단일 탈합금 대신, 1차 탈합금을 통해 나노다공성 구조를 형성한 후 추가적인 고농도, 저온 조건의 2차 탈합금을 실시하여 구조적 변화는 최소화하면서 잔류 Al 및 Mn의 추가 제거를 유도하였다. Ag–Al–Mn 모합금은 arc melting과 melt spinning을 통해 제조한 후 분말화하였으며, 황산 수용액을 이용해 나노다공성 Ag를 제조하였다. 이후 2차 탈합금 조건에 따라 시료를 제조하고, ICP-OES, XRD, BET 및 SEM을 통해 조성, 상, 비표면적 및 미세구조를 분석하였다. 또한 분말을 시트 형태로 성형한 후 Cu 기판 사이에서 소결접합을 수행하고 전단강도를 평가하였다. 이를 통해 2차 탈합금에 따른 Ag 순도 및 비표면적 변화와 접합강도 간의 상관관계를 규명하고, 나노다공성 Ag 소결접합 특성에 영향을 미치는 인자를 비교하고자 하였다.

[P4-2]

반도체 후공정용 자동화 Caulking 장비의 압입자 최적화 및 결함 분석: 김민지, 윤덕재, 김경택*(한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소)

Keywords: Semiconductor assembly, Caulking, Jig, Cover, Magnetic

반도체 제조의 In-line 및 Back-End 공정에서는 PCB 및 패키징 제품을 지그(Jig)와 커버 사이를 자력으로 고정한 후 압입하는 코킹(Caulking) 공정이 적용된다. 그러나 압입 조건과 지그의 형상 및 재질이 적절하지 않을 경우, 고정력 불균일에 따른 부품의 미세 유동, 조립 정밀도 저하 및 체결 불량과 자석의 파손 등으로 인한 제품 불량이 발생할 수 있다. 특히 반도체 장비용 지그와 코킹 공정에 관한 표준화된 설계·제작 기준이 미비하여 공정 신뢰성 확보를 위한 체계적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 자동화 코킹 장비의 압입자 형상과 수량을 최적화하고, 코킹 변형부 및 자석에서 발생하는 결함을 분석하여 안정적인 공정조건을 확립하고자 한다. 이를 위해 압입자 팁 형상 3종과 압입자 수량 3종에 따른 소성변형 거동을 해석하고, 그 결과를 바탕으로 압입자의 형상과 수량을 최적화하여 시작품을 제작할 예정이다. 또한 광학현미경 및 비전카메라를 활용하여 코킹 변형부의 두께, 폭 및 길이를 측정하고 형상 균일도를 평가할 계획이다. 홀 가장자리의 균열, 찢김 및 버(Burr) 발생 여부와 코킹 가공 후 자석의 치핑(Chipping) 및 균열 등 파손 여부도 분석하고자 한다. 아울러 압입 압력과 램 스트로크를 최적화하고, 압력·위치·시간 제어 및 비전 검사를 연계하여 장비의 위치 정밀도 향상과 공정 불량 저감을 위한 기초자료를 확보할 예정이다.

[P4-3]

Modulation of Threshold Voltage in IDT-BT Organic Transistors by Interfacial Polymer Brushes: Seong Ju Han, Gi Min Kim, Ye Ho Bae, Jae Hyeong Kim, Si Heon Ryu, Ji Hoon Park*(Pukyong National University)

Keywords: IDT-BT, organic field-effect transistor, polymer brush, interface engineering, threshold voltage, P(VDF-TrFE)

Interface engineering at the organic semiconductor/gate dielectric interface plays a critical role in determining charge transport and thershold voltage in organic field-effect transistors (OFETs). Here, we investigate the effects of various polymer-brush interlayers on the electrical characteristics of p-type IDT-BT transistors. Bottom-gate, top-contact devices were fabricated with a 10-nm-thick Al_2O_3 gate dielectric deposited by atomic layer deposition, followed by the introduction of three polymer brushes: poly(methyl methacrylate) (PMMA), poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) [p(VDF-TrFE)], and polystyrene(PS). IDT-BT was subsequently deposited as the semiconductor channel. Transfer and output measurements revealed pronounced differences in transistor behavior depending on the polymer brush incorporated at the dielectric/semiconductor interface. In particular, the PMMA-, P(VDF-TrFE)-, and PS-brush devices exhibited systematic variations in threshold voltage and drain current, demonstrating that ultrathin interfacial polymer layers can effectively modulate OFET operation. These preliminary results suggest that ultrathin polymer-brush interfaces offer a simple and versatile approach for tuning the electrical characteristics of organic transistors. Atomic force microscopy studies of surface morphology, together with further interface engineering using P(VDF-TrFE) brushes, clarify the relationship between polymer-brush interfaces and carrier transport.

[P4-4]

Ag-Si-Fe 나노 복합 구조 합금 설계를 적용한 저온 소결 접합용 나노 다공성 은 개발: 손성빈, 현승균*, 성재욱*(인하대학교)

Keywords: 나노다공성 실버, Ag-Si-Fe 합금, 급속응고 공정, 탈합금, 저온 소결

고온 및 고출력 전력반도체의 적용이 확대됨에 따라 패키징 내 다이 어태치(Die attach) 소재의 내열성과 장기 신뢰성이 중요해지고 있다. Ag는 우수한 열적·전기적 특성을 바탕으로 현재 전력반도체용 접합 소재로 활용되고 있으며, 나노 단위로 가공할 경우 낮은 소결 온도를 가지게 되어 저온 공정 및 높은 신뢰성 확보가 가능하게 된다. 특히 나노 다공성 구조의 Ag는 마이크로 크기의 Ag 입자에 나노 단위의 기공을 구현한 것으로 높은 비표면적을 통해 낮은 온도에서의 소결이 가능할 뿐만 아니라 기존 나노 Ag의 높은 제조 단가를 극복할 수 있어 다이 어태치 소재로의 적용이 검토되고 있다. 본 연구에서는 Ag-Si 이원계 합금에 급속응고(Rapid Solidification Process, RSP) 공정과 선택적 Si 용출을 적용하여 나노 다공성 Ag를 제조하고자 하였다. 그러나 RSP 공정 중 Ag 휘발로 인해 합금 제조 및 조성 제어에 어려움이 발생하였다. 이를 억제하기 위해 Fe를 첨가한 Ag-Si-Fe 합금을 설계하였다. Fe가 첨가되지 않은 40Ag-60Si(at.%) 합금의 회수율은 97.9%였으나, Fe 첨가 후 약 99.9%로 증가하여 RSP 공정 중 Ag 휘발이 억제됨을 확인하였다. 40Ag-58Si-2Fe(at.%) 합금 리본을 분말화한 후 NaOH 수용액에서 Si를 선택적으로 용출하였다. 탈합금 결과 나노 다공성 구조가 형성되었으며, BET 비표면적은 9.86 m^2/g으로 확인되었다. 그러나 탈합금 후 잔류한 Fe가 전기전도도와 열전도도에 악영향을 미치는 것을 확인하였다. 이에 Fe 함량을 2.0 at.%에서 0.1 at.%까지 순차적으로 감소시킨 합금을 추가로 제조하고 물성을 비교하였다. Fe 함량이 낮아짐에 따라 전기전도도와 열전도도가 향상되었으며, 이를 통해 Fe 함량 제어가 나노 다공성 Ag의 소결 특성에 중요한 인자임을 확인하였다. 향후 저 Fe 조성을 기반으로 탈합금 조건을 최적화하고, 2차 에칭을 통한 잔류 Fe 제거를 검토하여 나노 다공성 Ag의 소결 특성을 향상시키고자 한다.

[P4-5]

Super-Tough 0D–1D All-Carbon Hybrid Fibers Enabled by Graphene Quantum Dot Anchoring: Jae Eun Jin, So Yeon An, Hee Seung Eom, Boyoung Yoon, Ryun Kyeong Lee, Tae Young Park, Cheng Ai Li, Kwang Hyun Park, Sung Ho Song*(Kongju National Univ.)

Keywords: Wet-spinning, SWCNT fibers, Graphene quantum dots, 0D-1D all-carbon hybrid, Mechanical reinforcement

Single-walled carbon nanotube (SWCNT) fibers possess excellent mechanical and electrical properties but are limited by weak inter-tube interactions and CNT slippage. Here, we present a chemical treatment-free 0D–1D all-carbon hybrid strategy using graphene quantum dots (GQDs) as nanoscale anchors within wet-spun CNT fibers. After systematic optimization of wet-spinning conditions, GQDs were directly incorporated into the CNT network to enhance interfacial interactions and suppress inter-tube slippage without chemical functionalization. The optimized CNT (1:2) hybrid fibers exhibited 1.60- and 1.85-fold increases in tensile strength and elongation, respectively, resulting in a 2.96-fold enhancement in toughness compared with pristine CNT fibers; under moderate drafting, toughness increased by nearly four-fold. This improvement exceeds the typical 1.5–2-fold mechanical enhancement reported for conventional CNT fiber reinforcement approaches. The pronounced toughening originates from GQD anchoring, which facilitates stress transfer and energy dissipation within the CNT network. These findings establish a 0D–1D all-carbon hybrid system as a new strategy for developing super-tough CNT fibers, providing a promising direction for high-performance actuators and advanced fiber-based applications. This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(RS-2019-NR040074)

[P4-6]

나노다공성 Ag 분말을 이용한 반도체 접합용 sheet 제조 및 접합특성 평가: 조은서, 현승균*, 성재욱*(인하대학교)

Keywords: Ag sheet 직접 성형, 다공성 Ag 분말, 저온 소결 접합, SiC 전력반도체

전력반도체의 고출력·고집적화에 따라 우수한 열·전기전도성을 갖는 Ag 기반 접합 소재의 수요가 증가하고 있다. 기존 Ag paste는 우수한 소결 접합 특성을 갖지만, 유기물 첨가 및 건조 등 추가 공정이 요구된다. 탈합금(dealloying) 공정을 통해 제조된 나노다공성 Ag 분말은 일반 Ag 분말 대비 낮은 겉보기 밀도와 탭 밀도, 높은 비표면적을 나타낸다. 이러한 구조적 특성은 소결 시 높은 표면에너지를 제공하여 입자 간 치밀화를 촉진하고, 저온에서 우수한 접합 특성을 확보하는 데 기여한다. 본 연구에서는 이러한 나노다공성 Ag 분말을 paste화 공정 없이 sheet 형태의 접합 소재로 제조하는 공정을 제안하였다. 다공성 Ag 분말의 성형성을 확보하기 위해 PEG400과 EtOH를 사용하였으며, PEG400 함량과 sheet 성형 압력을 조절하여 제조 조건을 최적화하였다. PEG400은 이후 소결 과정에서 열분해 및 휘발을 통해 제거된다. 제조된 sheet의 단면과 접합 후 계면을 SEM으로 분석하고 접합 특성을 평가하였다. 성형 압력 증가에 따른 BLT(Bond Line Thickness) 감소율과 전단강도의 변화는 크지 않았으며, 비교적 낮은 압력에서도 안정적인 접합 특성을 확보할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 나노다공성 Ag 분말의 높은 비표면적과 다공성 구조를 활용하여 paste 공정 없이 우수한 접합 특성을 갖는 sheet형 접합 소재를 구현하였다. 이를 통해 SiC 전력반도체용 저온 소결 접합 소재로써의 적용 가능성을 제시하였다.

[P4-7]

나노다공성 Ag 제조를 위한 40Ag-60Cu 리본의 전기화학적 탈합금 거동: 김여빈, 현승균*, 성재욱*(인하대학교)

Keywords: 나노다공성 실버, 전기화학적 탈합금, Ag-Cu 합금 리본, 소결 접합

고온 및 고출력 동작 전력반도체의 신뢰성 요구가 높아짐에 따라 다이 어태치 접합 소재의 내열성과 장기 신뢰성 확보가 핵심

과제로 떠오르는 가운데, 높은 비표면적으로 인해 저온 소결 특성이 우수한 나노 실버가 접합 소재로 주목받고 있다. 기존의 나노 실버 접합 소재와 달리 급속 응고 리본 형태의 40Ag-60Cu 합금을 전기화학적 탈합금(electrochemical dealloying)하여 얻어지는 나노다공성 Ag 리본은 별도의 분말화·페이스트화 과정 없이 그 자체로 접합재로 활용 가능하다는 이점을 지닌다. 이에 본 연구에서는 해당 리본을 제조하고, Cu를 선택적으로 용출시켜 리가먼트 구조 기반의 나노다공성 미세구조를 형성하고자 하였다. 2단자 DC 조건에서 $CuSO_4$, Na_2SO_4, Acetate buffer 세 전해질을 대상으로 인가전압, 교반 여부, 전해질 농도를 변수로 설정하여 Cu 용출 거동과 다공성 미세구조 형성 경향을 비교하였다. $CuSO_4$는 인가전류의 자연 감소 시점을 종료 기준으로 삼고 교반을 도입해 균일한 다공성 구조를 형성한 반면, Na_2SO_4는 시트 유지와 다공성 발달 간 trade-off로 부분적 성공에 그쳤고, Acetate buffer는 Cu 산화막에 의한 용출 저해로 실패하였다. SEM·EDS 분석 결과, 인가전압에 따른 반응 속도 차이와 종료 시점 판단, 교반에 의한 물질전달 개선이 균일한 다공성 구조 형성의 핵심 요인으로 확인되었다. 이를 바탕으로 $CuSO_4$가 다이 어태치용 나노다공성 Ag 제조에 가장 유효함을 확인하였으며, 향후 H_2SO_4 스크리닝과 3전극 potentiostat 기반 정밀 최적화를 진행할 예정이다.

[P4-8]

다중 리플로우 사이클에 따른 SAC305/Cu 솔더 접합부 계면의 금속간화합물 성장 거동 및 기계적 신뢰성 평가: 김송의, 유동열, 고용호*(한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소)

Keywords: Multi-reflow cycles, Intermetallic compounds, Isothermal aging, Mechanical reliability

본 연구에서는 단일 및 다중 리플로우 공정이 등온 시효 중 Sn-3.0Ag-0.5Cu(SAC305)/Cu 솔더 접합부의 계면 금속간화합물(IMC) 성장 거동, 미세조직 변화 및 기계적 신뢰성에 미치는 영향을 조사하였다. 단일 및 다중 리플로우 공정을 적용한 솔더 접합부를 100, 125 및 150 ℃에서 최대 1000시간 동안 등온 시효한 후, 계면 IMC층의 성장 거동, 미세조직 변화 및 고속 전단 특성을 평가하였다. 시효 시간과 온도가 증가함에 따라 계면 IMC층이 성장하고 전단강도가 감소하였으며, 이러한 변화는 다중 리플로우 접합부에서 더욱 뚜렷하게 관찰되었다. 또한 반복적인 리플로우는 솔더 미세조직과 계면 Cu_6Sn_5 결정립의 조대화를 촉진하였으며, 이는 시효 시간 및 온도 증가에 따른 고속 전단강도 저하에 기여한 것으로 판단된다. 파면 분석 결과, 시효가 진행됨에 따라 연성 파괴 분율은 감소하고 취성 파괴 분율은 증가하였다. 이를 통해 다중 리플로우 공정에 따른 SAC305/Cu 솔더 접합부의 계면 열화 및 기계적 신뢰성 저하 거동을 규명하고, 장기 신뢰성을 고려한 리플로우 공정 설계의 근거를 제시하였다. 이 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (RS-2026-25530327)

[P4-9]

반도체용 포토레지스트 분야의 특허 동향 분석: 김미애, 김효석*(지식재산처)

Keywords: 반도체, 포토레지스트, ArF, KrF, EUV, 산업 맞춤형 심사혁신 사업

반도체 미세화와 고집적화에 따라 노광 공정의 핵심 소재인 포토레지스트의 기술적, 산업적 중요성이 지속적으로 확대되고 있다. 이 과제에서는 최근 20년간 IP5(MOIP, USPTO, JPO, EPO 및 CNIPA)에 출원, 공개된 반도체용 포토레지스트 관련 특허를 대상으로 발행국, 출원인 국적 및 기술분야별 동향을 분석하였다. 반도체용 포토레지스트는 노광 파장에 따라 KrF, ArF 및 EUV 포토레지스트로 분류하였으며, EUV 포토레지스트는 구성 재료를 기준으로 유기물 기반의 유기 EUV 포토레지스트와 무기물 기반의 무기 EUV 포토레지스트로 세분화하였다. 분석 결과, KrF, ArF 및 유기 EUV 포토레지스트를 포함하는 유기물 기반 기술에서는 일본 국적 출원인이 높은 출원 점유율을 나타낸 반면, 무기 EUV 포토레지스트를 포함하는 무기물 기반 기술에서는 미국 국적 출원인의 점유율이 상대적으로 높게 나타났다. 이러한 분석 결과는 국내 포토레지스트 산업의 기술개발 방향을 검토함에 있어 공정 맞춤형 소재와 차세대 EUV 소재에 관한 연구개발 및 특허 동향을 지속적으로 살펴볼 필요가 있음을 시사한다.

P5 : 상변태
Room 1층 전시홀, 10월 28일

[P5-1]
알루미나이드 코팅된 금형의 결함분석 및 코팅거동: 양하영, 김선진, 정현준, 강전준(국립한밭대학교), 이효룡(신우금형), 오용준, 박준식*(국립한밭대학교)
Keywords: Aluminide coating, Pack cementation, Coating thickness, Surface defects
타이어 몰드 표면에 존재하는 결함은 성형 제품의 표면 품질과 몰드 수명에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 타이어 몰드의 표면 결함 보수를 목적으로 Al pack cementation 확산 코팅을 적용하고, 처리 온도, 유지 시간 및 활성제 함량에 따른 코팅층의 형성 거동과 표면 특성을 평가하였다. 형성된 코팅층의 미세조직 및 두께는 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 분석하였으며, 단면 미소경도 측정을 통해 코팅층의 기계적 특성을 평가하였다. 또한 코팅 전후의 표면 상태를 비교하여 코팅층 형성에 따른 결함 보수 및 표면 품질 개선 가능성을 확인하였다. 이를 통해 표면 결함을 충진할 수 있는 충분한 코팅층 두께를 확보하는 동시에, 과도한 코팅층 성장에 따른 균열 및 표면 결함 발생을 억제할 수 있는 공정 조건을 도출하고자 하였다. 궁극적으로 타이어 몰드의 국부적인 표면 결함을 보수하고 표면 품질을 향상시킬 수 있는 Al pack cementation 기반 확산 코팅 공정의 적용 가능성을 제시하고자 하였다.

[P5-2]
달 레골리스 모사체로 제조한 벌크 유리의 기계적 물성과 열물성 경향 분석: 송원택, 이명준, 박은수*(서울대학교)
Keywords: Lunar regolith, Nano-indentation, Oxide glass
달 현지자원활용을 위한 유리 기반 소재를 설계하려면 달 토양 모사체의 조성과 열적·기계적 특성 간의 관계를 정량적으로 이해할 필요가 있다. 본 연구에서는 달 고지대 모사체 LHS-1과 월해 모사체 LMS-1의 혼합비를 변화시켜 19개 조성의 다성분 산화물 유리를 제조하고, 조성 변화에 따른 유리전이온도(Tg), 밀도, 나노경도 및 환산탄성률(Er)을 평가하였다. 혼합 원료는 1500 ºC에서 30 min 동안 용융한 후 Cu boat에서 냉각하였으며, 대표 시료의 비정질 형성 여부를 X선 회절분석으로 확인하였다. Tg는 시차주사열량분석으로, 밀도는 아르키메데스법으로 측정하였다. 기계적 특성은 최대 하중 5 mN에서 25개 지점을 나노압입하여 평가하였다. 동일한 30 $K \cdot min^{-1}$ 조건에서 측정한 말단 조성의 Tg는 LMS-1의 682.6 ºC에서 LHS-1의 745.0 ºC로 상승하였다. 반면, 밀도는 3.631에서 3.343 $g \cdot cm^{-3}$, 나노경도는 9.06에서 7.83 GPa, Er은 108.09에서 92.28 GPa로 감소하였다. 조성 및 밀도를 바탕으로 계산한 NBO/T와 충진도 역시 각각 1.040에서 0.209 및 0.741에서 0.701로 감소한 반면, 몰부피는 16.41에서 19.87 $cm^3 \cdot mol^{-1}$로 증가하였다. 이러한 결과는 LHS-1 분율 증가에 따른 네트워크 중합도 증가와 충진 효율 감소가 동시에 발생할 가능성과 일치한다. 즉, 네트워크 연결성의 증가는 구조 완화에 필요한 온도를 높여 Tg 상승에 기여할 수 있지만, 낮아진 충진 효율과 증가한 몰부피는 상온에서의 압입 저항과 탄성 응답을 감소시킬 수 있다. 따라서 본 다성분 산화물 유리계에서 Tg와 경도 및 Er이 동일한 구조 인자에 의해 같은 방향으로 변화한다고 가정해서는 안 된다. 본 연구는 달 토양 모사체 기반 유리의 조성 설계에서 열적 거동과 기계적 성능을 함께 고려해야 한다는 점을 제시한다.

[P5-3]
B 다층 코팅한 Si + B 확산코팅 TZM 합금의 고온 산화거동: 정현준, 양하영, 김선진, 강전준, 남선미, 박준식*(국립한밭대학교)
Keywords: TZM 합금, Pack cementation Coating, 코팅 성장거동, 내산화성, 미세구조
몰리브덴은 고온 응용 분야에서 중요한 역할을 하는 내화 금속의 가장 중요한 구성 요소 중 하나이다. 그러나 순수한 Mo의 응용은 융점에 비해 낮은 재결정화(1100 ºC) 온도, 높은 연성-균열 전이 온도 및 그에 따른 고온에서의 낮은 기계적 특성으로 인해 제한적이다. 탄화물 안정화 합금으로 분류된 TZM은 가장 널리 사용되는 몰리브덴 기반 합금이다. Mo-0.5Ti-0.08Zr-0.002C (wt%)의 명목 조성을 가진 TZM 합금은 높은 용융 온도, 높은 온도에서의 우수한 크리프 강도, 아연, 납, 비점성 공정 등 액체 금속 환경에 대한 우수한 내식성을 가지고 있다. 따라서 TZM 합금은 고온 원자로, 항공우주, 발전 및 화학 산업 분야에서 내열성 및 구조 재료로 사용하기 위한 다양한 몰리브덴 기반 합금 중에서 주요 후보로 고려되고 있다. 본 연구에서는 TZM 합금에 Pack cementation 코팅 기법으로 Si + B / Si + B 후 2차 B 코팅을 진행하고 각 코팅 조건에 따른 코팅층의 미세구조와 코팅층의 성장 동역학을 분석하였다. 또한, 고온 정적 산화 시험을 통해 코팅 조건에 따른 내산화 특성을 비교하고, 미세구조의 변화를 관찰하고자 하였다.

[P5-4]
냉각 속도 구배에 따른 심리스 수소 강관의 미세조직 구성상과 수소취성 저항성 상관관계 분석: 임성진, 정윤종, 권민철, 신윤지, 송기안*(공주대학교 신소재공학과)
Keywords: Hydrogen Pipeline, Microstructure, Mechanical properties, Slow Strain Rate Test
탄소중립 실현을 위한 수소 에너지의 활용이 확대됨에 따라, 수소를 안전하게 운송하기 위한 배관 소재의 신뢰성 확보가 중요해지고 있다. 심리스 강관은 용접 강관과 다르게 용접부가 존재하지 않아 국부적인 응력집중과 취화 위험이 낮은 장점이 있으나, 제조 공정 중 외부 분사식 수냉 방식으로 인해 두께 방향으로 냉각 속도 구배가 발생하며 위치별로 상이한 미세조직이 형성된다. 배관용 강재에서 형성되는 미세조직은 온도와 냉각 속도에 의해 결정된다. 냉각 속도가 상대적으로 느린 내부 영역에서는 PF(polygonal

ferrite)가 주로 형성되고, 중간 냉각 속도에서는 결정립 내부 변형에서 핵생성되어 임의의 방향으로 성장하는 침상형 조직인 AF(Acicular ferrite)가 형성된다. 냉각 속도가 빠른 외부 영역에서는 GB(Granular bainite), BF(Bainitic ferrite)와 같이 높은 전위 밀도를 가지는 조직이 형성된다. 이러한 구성상은 수소 균열 전파 경로와 속도가 달라, 일반적으로 PF와 AF는 수소취성 저항성을 향상시키고, GB와 BF는 이를 저하시키는 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 미세조직과 수소취성 저항성의 상관 관계는 다양한 조성과 열처리 조건에 걸쳐 일관되게 성립하는지에 대해서는 체계적인 검토가 부족하다. 따라서 본 연구에서는 API 5L X65 및 X70 심리스 강관을 대상으로, 서로 다른 템퍼링 조건과 두께 방향 위치에서 시편을 채취하여 미세조직 구성상 분율과 기계적 물성, 수소취성 저항성의 상관 관계를 분석하고자 한다. 구체적으로 주사전자현미경(SEM), X선 회절 분석기(XRD), 후방산란전자 회절 패턴 분석기(EBSD)를 통해 두께 방향에 따른 합금의 미세조직적 차이를 정량 분석하였으며, In-situ Slow Strain Rate Testing (SSRT)를 통해 강재의 수소 취성 저항성을 평가하였다.

[P5-5]

Austenite Phase Stability-Guided Composition and Process Design of Fe–Mn–Si Shape Memory Alloys: 윤제인, 김지영, 박은수*(서울대학교 재료공학부)

Keywords: Keywords s: Shape Memory Alloys, Precipitation, Reversible Martensitic Transformation, Shape Memory Effect (SME), Single-Phase Region, Compositional Designing

Fe 기반 형상기억합금(Fe-based shape memory alloy, Fe-SMA)은 Ni–Ti계 합금 대비 우수한 원가 경쟁력을 바탕으로 구조용 형상기억 소재로서 높은 활용 가능성을 지닌다. 본 연구에서는 Fe-SMA의 회복응력 및 회복변형률 향상을 위해 결정립계와 석출상을 복합적으로 제어하는 다차원 결함 설계 전략을 제시하고자 하였다. 특히 안정적인 오스테나이트 단상 영역을 확보하고 HCP 및 BCC상의 형성을 억제하기 위해 조성 설계를 우선적으로 수행하였다. Ni 및 Cr 당량(Ni_eq, Cr_eq)을 기반으로 첨가원소의 함량을 조절하여 오스테나이트 상 안정성을 확보하고, 이후의 미세조직 제어를 위한 합금 조성을 설계하였다. 미세조직 제어를 위해 냉간압연과 재결정화를 반복하는 2-step cyclic heat treatment를 적용하여 균일한 미세 결정립 조직을 형성하였으며, 이후 예비변형과 시효 처리를 연계한 thermomechanical treatment(TMT)를 수행하였다. 이를 통해 결정립계 및 기지 내부에 나노 크기의 $M_{23}C_6$ 탄화물을 형성하였다. 형성된 석출상은 오스테나이트 기지의 항복강도를 증가시키는 석출강화 효과와 함께, 기지와의 격자 불일치에 의해 적층결함(stacking fault)의 형성을 촉진함으로써 가역 마르텐사이트 변태를 위한 핵생성 사이트로 작용하였다. 본 연구는 오스테나이트 단상 영역의 조성 설계와 결정립계–나노 석출상에 대한 다차원 결함 제어를 통해 Fe-SMA의 미세조직과 변태 거동을 효과적으로 제어하고, 회복응력과 회복변형률을 동시에 향상시키기 위한 설계 방향을 제시하였다. 이러한 결과는 향후 고성능 Fe 기반 형상기억합금의 조성 및 열–기계 처리 공정 최적화를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P5-6]

High-Performance Fe-Based Nanocrystalline Soft Magnetic Alloys through Diversification of Immiscible Elements: Subin Ahn, Hyun Gi Min, Wan Kim, Eun Soo Park*(Seoul National Univ.)

Keywords: Soft Magnetic Material, Immiscible Element, Multi-Cluster, Nanocrystal, Processing Window

Fe-based nanocrystalline alloys are attractive core materials for compact, high-frequency inductors because they can combine high saturation magnetic flux density (Bs), low coercivity (Hc), and low core loss. Conventional Cu- and Nb-assisted alloy designs, however, reduce the ferromagnetic-element fraction, whereas Nb-free Fe-rich alloys often require ultrafast annealing or exhibit a narrow processing window because of rapid grain growth. This work introduces diversification of immiscible elements as a cluster-engineering strategy to increase nucleation-site density and tune the crystallization sequence while minimizing the total content of non-ferromagnetic additions. Fe-Co-Si-B-based amorphous ribbons containing selected single and combined immiscible-element additions were prepared by melt spinning and annealed under conventional heating conditions. Differential scanning calorimetry and in situ X-ray diffraction tracked primary alpha-(Fe, Co) precipitation, while small-angle X-ray scattering and transmission electron microscopy evaluated clustering and nanocrystal-size distributions. Compared with a single-nucleant design, complementary immiscible elements generated cluster populations with different formation onsets and distributed nucleation over a wider temperature interval. Fine nanocrystals were consequently maintained across a broader annealing window without Nb or ultrafast annealing. Magnetic characterization showed that suppressing grain coarsening while preserving high Fe-Co content provides a favorable combination of high Bs and low Hc. The results establish a scalable route to high-performance soft magnetic alloys by matching element-specific partitioning pathways rather than simply increasing the amount of a single nucleating solute.

[P5-7]

Analysis of the Fault Assisted hP_{24} Phase Transformation And Stacking Fault Energy guided Design Strategy of a Co based superalloys system: Hyungi Min(Seoul National University), Streit Cunningham(University of California Santa Barbara), Minseok Kim(Seoul National University), Kooknoh Yoon(Hanbat university), Daniel Gianola(University of California Santa Barbara), Eun Soo Park*(Seoul National University)

Keywords: Co superalloy, phase transformation, martensite

Co-based superalloys are considered promising candidates for high-temperature applications due to their higher cP4(γ′) solvus temperatures and superior oxidation resistance. However, their broader use has been limited by the metastability of the cP4 phase, which

can lead to microstructural instability during service. While prior efforts have focused on raising the solvus temperature to improve phase stability, we observed a high-temperature diffusionless phase transformation from cP4 to the hP24 phase in a specifically designed Co-based alloy. This transformation is initiated by fault formation along (111) planar slip, indicating a defect-assisted martensitic mechanism. These results demonstrate that the metastability of the cP4 phase can be controlled by tuning the Stacking Fault Energy to suppress planar fault formation. We propose an SFE-guided design strategy to complement solvus-based design, enabling improved cP4 phase stability and creep resistance in Co-based superalloys.

[P5-8]

Complex Second-Phase Design for Lead-Free Cu-Zn Brasses with Controlled Microstructure and Magnetic Response: Jieun Lee(Seoul National University), Siyeon Lee(WONJIN Metal), Eunsoo Park*(Seoul National University)

Keywords: Lead-Free Brass, Complex Second-Phase Precipitates, Mechanical property, Machinability, Magnetic Response

Cu-Zn brasses are widely used because of their formability, corrosion resistance, and machinability. However, conventional free-cutting brasses rely on Pb-rich second phases for chip fragmentation, creating a need for Pb-free microstructural designs. Controlling magnetic response is also important for expanding the application range of Pb-free brass components. This study examines phase formation and microstructural evolution in Cu-Zn brasses containing Pb, Bi, and compositionally complex second-phase additions. Pb- and Bi-containing alloys were used as reference systems, while multicomponent and medium-entropy-alloy additions were evaluated as Pb-free candidates. Thermo-Calc predictions of liquid-phase separation and phase formation were compared with SEM-BSE, SEM-EDS, and XRD analyses, together with selected measurements of mechanical properties, machinability, and magnetic behavior. The results show that second-phase composition strongly affects phase selection, elemental partitioning, and morphology. Compositionally complex second phases therefore offer a potential route for tailoring microstructure and magnetic response in Pb-free Cu-Zn brasses while maintaining balanced mechanical properties and machinability.

[P5-9]

Design of High-Phosphorus Fe-Based Amorphous Alloys for Efficient Hydrogen Evolution Reaction: JuneYoung Lee, Seonghoon Yi*(Kyungpook National University)

Keywords: Amorphous Alloys, Hydrogen Evolution Reaction, Catalyst

The escalating global demand for carbon neutrality has positioned green hydrogen as a vital and sustainable energy solution. At the core of this technology is the Hydrogen Evolution Reaction (HER), which requires highly efficient catalysts to lower the activation energy barrier. However, widespread commercialization remains hindered by the reliance on scarce and expensive Platinum Group Metal (PGM) catalysts. To address this limitation, we propose a PGM-free catalyst design utilizing high-phosphorus Fe-based amorphous alloys. The inherently disordered amorphous structure provides an abundance of active surface sites, while the high phosphorus concentration optimizes hydrogen adsorption free energy and accelerates HER kinetics. By leveraging these structural and chemical advantages, this Fe-based metallic ribbon offers an efficient, scalable, and low-cost alternative to conventional PGM catalysts, advancing the development of high-performance materials for HER applications.

[P5-10]

잔류 원소가 Invar 합금의 전기화학적 부식 거동에 미치는 영향: 강승연, 고유정, 류채우*(홍익대학교)

Keywords: Invar 합금, 내식성, 부동태 피막

Fe-36Ni Invar 합금은 매우 낮은 열팽창계수를 나타내어 파인 메탈 마스크(Fine Metal Mask, FMM) 및 항공우주용 정밀 부품 등 높은 치수 안정성이 요구되는 다양한 첨단 산업 분야에서 활용되고 있다. 실제 상용 Invar 합금은 제조 과정에서 Fe-36Ni 이원계 외의 잔류 원소를 포함할 수 있으며, 이로 인해 이상적인 이원계 합금과 조성 및 미세구조에서 차이가 발생할 수 있다. 특히 잔류 원소에 의해 유발되는 국부적인 화학적·미세구조적 불균일성은 부식 환경에서 전기화학적 거동에 영향을 미칠 수 있다. 기존 연구에서는 Invar 합금의 열팽창 및 기계적 특성에 미치는 조성 및 미세구조의 영향이 주로 연구되어 왔으나, 잔류 원소에 따른 국부적인 불균일성이 전기화학적 부식 거동에 미치는 영향은 충분히 규명되지 않았다. 이에 본 연구에서는 결정립 크기가 유사한 Fe-36Ni 이원계 Invar 합금과 잔류 원소를 포함하는 Invar 합금을 대상으로 잔류 원소에 따른 전기화학적 부식 거동을 비교·분석하였다. 또한 잔류 원소에 따른 미세구조 및 국부적인 화학 조성의 변화를 분석하고, 이를 부식 및 부동태 거동과 연계하여 고찰하였다. 이를 통해 잔류 원소가 Fe-36Ni Invar 합금의 내식성과 부동태 피막의 안정성에 미치는 영향을 규명하고자 하였으며, 본 연구 결과는 Invar 합금의 내식성을 고려한 조성 및 미세구조 제어를 위한 기초 지표가 될 것으로 기대된다.

[P5-11]

Cu-X 합금의 첨가 원소 제어를 통한 미세조직 변화 및 기계적·광학적 특성 연구: 장성문, 김현영, 조가은, 황의정, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범*(세종대학교)

Keywords: 고압비틀림, 압연, 유색합금

Cu 합금에서 적층결함에너지 (SFE)는 첨가원소를 통해 제어 가능하며 이를 통해 물성을 제어에 관한 선행연구가 활발히 이루어졌다. SFE는 완전전위가 두 부분전위로 갈라지는 간격을 주요하게 지배하며, SFE가 낮을수록 이 간격이 넓어져 교차슬립이 어려워지

고 변형 수준에 따라 서로 다른 결함이 활성화되어 기계적 특성이 달라진다. 낮은 SFE 합금은 교차슬립 기반의 전위셀 구조 대신 적층결함·변형쌍정과 같이 국소화된 결함이 발달하기 쉬운 것으로 알려져 있으며, 고 SFE 합금의 경우, 적층결함을 형성하기 어려워, 전위 위주의 변형 메커니즘을 가지게 된다. 이런 변형 메커니즘 차이는 동일한 시편에서도 소성 변형 공정 조건에 따라 서로 다른 정도의 결정립 미세화와 결함 형성을 유발해 기계적, 광학적 특성에 차별적인 영향을 줄 것으로 예상했으며, 이에 맞추어 실험을 설계하였다. 본 연구는 SFE 차이를 보이는Cu-Ge, Cu-Al, Cu-Ni 합금계를 후보군으로 선정했다. 각 합금의 상태도를 참고하여 단상 영역인 7at. %까지 첨가하여, HPT의 높은 변형을 견딜 수 있도록 설계했다. 이후 원소 함량에 따른 SFE 및 변형 거동 분석을 위해 3at. %, 5at. %로 비교군을 설정했다. 또한 75% 압연 시편과 고압 비틀림 (HPT) 공정처리 시편을 비교, 분석함으로써 SFE차이 의한 결정립 크기 및 변형 결함 형성과 기계적·광학적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석해, 수십 나노미터 수준의 결정립계 및 다양한 결함이 색상 및 물성에 미치는 영향과 상관관계를 규명하고, 기존 연구보다 개선된 물성을 통해 합금의 활용 가능성을 넓히고자 하였다. 모든 시편은 실험 변인 통제를 위해 Ar 기체 분위기에서 유도용해 주조한 후 24시간 균질화 열처리를 거친 후 소성가공을 진행했다. 압연 시편의SEM 관찰 결과 Ge는 국소적으로 뚜렷한 전단대 형태의 밴드가, Al은 여러 방향으로 분포한 완만한 평면슬립 밴드가, Ni는 굽어져 있으며 균일하고 조밀한 밴드 조직이 관찰되어 SFE에 따라 변형 거동이 뚜렷이 차이를 보였다. 이는 HPT 합금의 EBSD 분석 결과와 일치하는 경향성을 보였으며, 결정립계 크기, 결정립계 방위차 분석 결과가 SFE에 따른 이론적 변형 거동과 잘 일치하는 모습을 보였다. 경도 분석 결과 압연 대비 HPT 공정의 경도 상승량이 Ge, Ni 합금은 약 30%, Al 합금은 60% 로 차이를 보였다. 광학적 특성 분석 결과 75% 압연 전후로는 색도 변화가 뚜렷하지 않았던 것과 달리, HPT 가공된 합금군에서는 적색도(a*)와 황색도(b*)가 모두 낮아지는 공통적인 경향이 나타났다.

[P5-12]

Cu-Ge-Cr **합금의 상변화 및 제2상 분산 특성 연구**: 황의정, 김현영, 장성문, 조가은, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범*(세종대학교)

Keywords: 컬러 합금, Cu-Ge-Cr 합금, 금속간화합물, 병치혼합, 분산 강화

Cu는 가시광선 중 청록색 파장 영역의 빛을 d-band에서 페르미 준위로의 전자 전이로 선택적으로 흡수하고 나머지 파장을 반사함으로써 특유의 붉은 색상을 나타낸다. 이러한 전자구조를 활용해 색상을 변화시키는 Cu 기반 컬러 합금의 설계 방식은 합금의 전이 에너지 제어를 이용한 전이에너지 제어형과 금속간 화합물의 정출제어를 통한 병치혼합형으로 구분된다. 전이에너지 제어형은 첨가원소를 Cu 기지에 고용시켜 전이에너지를 제어하기에 고용한도 내에서 연속적인 색상 제어가 가능하지만 단상 영역으로 조성이 제한된다. 반면, 병치혼합형은 기지와 다른 성질의 제2상을 형성시켜 각 상의 색이 시각적으로 혼합되어 합금 전체의 색상이 결정되기에 합금 설계의 자유도가 상대적으로 넓다. 본 연구에서 다루는 Cu-Ge-Cr 합금계는 병치혼합형 메커니즘을 활용 가능하도록 설계되었다. Ge은 Cu 기지에 고용되어 전이에너지 제어형 발색과 고용강화에 기여하지만 선행 연구에서 단상 고용체만으로는 확보 가능한 기계적 강도에 한계가 있음이 확인되었다. 이에 Cu 기지 내 고용도가 낮아 별도의 제2상을 형성하기 쉬운 Cr을 추가로 첨가함으로써 제2상 분산강화를 통해 기계적 강도를 보완하고자 하였으며, 이 경우 합금의 색상은 병치혼합형 기구에 따라 제2상의 상대적 비율에 의해 영향을 받을 것으로 예상된다. 고용강화를 위한 Ge 첨가량은 5at%로 고정하고 Cr 함량을 1, 3, 5at%로 변화시켜, Cr 첨가에 따른 제2상 분산 거동과 물성 변화를 비교하였다. 주조 상태에서는 Cr 함량이 증가할수록 기지 내 제2상 입자의 분율이 늘어났으며, 이에 따라 Cr을 첨가하지 않은 합금 대비 경도는 50~80%, 압축강도는 90~100% 향상되어 제2상 분산강화 효과가 뚜렷하게 나타났다. 색도 분석 결과 무채색에 가까운 Cr 기반 제2상의 분율이 늘어날수록 병치혼합에 의한 희석 효과로 채도가 감소하는 경향을 보였다. 균질화 열처리 후에는 주조 상태와 다른 회절 피크가 관찰되어 Cr_3Ge 금속간화합물이 형성되었음을 확인하였으며, Cr 함량 증가에 따라 제2상 분율이 늘어나는 경향은 열처리 후에도 유지되었다. 다만 열처리에 따른 조직 변화와 연화로 인해 경도는 주조 상태 대비 약 40% 감소하였고, 적색도와 황색도는 Cr 1at%에서 일시적으로 증가했다가 Cr 함량이 더 늘어나면서 다시 감소하는 비단조적인 경향을 보였다. 따라서 Cr 함량 증가에 따른 제2상 분산은 기계적 특성을 향상시키고 색채 특성을 저하시켰으며, 균질화열처리는 Cr_3Ge 금속간화합물의 형성과 조직 변화를 유도하여 경도를 감소시키는 것으로 확인되었다.

[P5-13]

Microstructural Design Strategies and Corrosion Behavior of Cu-Al-Zn-Sn Alloys: Hae Jin Park*, Gyeol Chan Kang, Sung Hwan Hong, Ki Buem Kim*(Sejong University)

Keywords: Cu-alloy, Stacking fault Energy, Microstructure, Corrosion Behavior

Cu-Al-Zn-Sn alloys are widely used in coinage and decorative applications for their distinctive aesthetic and mechanical properties. Building on our previous work, in which Al and Zn contents were adjusted at fixed Cu and Sn levels to precisely tune stacking fault energy (SFE) and induce deformation twinning, this study extends the investigation to the electrochemical stability of these SFE-engineered microstructures. Alloys with varying Al content are compared to examine how SFE-driven differences in twinning behavior influence electrochemical response. In parallel, hot rolling is applied to independently control dislocation density and twin boundary formation. Compositional variation, quantified via stacking fault energy, and processing-induced changes in defect density are evaluated as distinct microstructural variables. This approach clarifies the mechanistic link between SFE, deformation twinning, and the resulting passivation behavior. Passivation kinetics and interfacial resistance are assessed across these compositional and processing conditions to determine how grain refinement and increased dislocation density affect overall corrosion resistance. Surface analyses further characterize the morphology of corrosion products and the distribution of key alloying elements, providing insight into the mechanisms governing passive film stability. Ultimately, these results are expected to establish fundamental guidelines for designing high-strength, corrosion-resistant Cu-Al-Zn-Sn alloys through the combined control of alloying composition and thermomechanical processing.

[P5-14]

확산코팅된 나사의 조도 및 내마모 거동: 김선진, 양하영, 정현준, 강전준(국립한밭대학교), 최정묵((주)진합), 오용준, 박준식*(국립한밭대학교)

Keywords: FDS(Flow Drill Screw), Pack cementation coating, wear, Hardness, Heat Treatment

자동차 차체 경량화와 이종소재 적용 확대에 따라 고강도 접합부품의 표면 건전성 확보가 중요해지고 있다. FDS screw는 복잡한 형상과 가혹한 체결 조건에 노출되므로 표면층의 건전성과 열처리 후 특성 변화에 대한 체계적 검토가 필요하다. 본 연구에서는 FDS screw에 Al pack cementation 코팅을 적용하고 후열처리를 실시하여 미세조직과 기계적 특성 변화를 분석하였다. 코팅 온도·시간, 활성제 종류 및 후열처리 조건에 따른 코팅층 형성 거동과 표면 조도 변화를 SEM/EDS, XRD, 경도 및 마찰·마모 시험을 통해 평가하였다. Fe–Al 금속간 화합물 기반의 확산 코팅층이 형성되었으며, 후열처리 후에도 코팅층 경도가 유지되고 모재 강도가 회복되었다. 본 연구는 복잡 형상 부품에 대한 Al pack cementation 코팅의 적용 가능성과 후열처리 연계 공정의 유효성을 제시한다.

[P5-15]

압연 공정 및 열처리 공정에 따른 CoCuFeNi 기반 고엔트로피 합금의 기계적 물성 최적화에 대한 연구: 이규필, Yusupov Dilshodbbek, Abbas Muhammad Aoun, 강결찬, 홍동성, 강원묵, 홍성환, 박혜진, 김기범*(세종대학교)

Keywords: High entropy alloy, Microstructure, Cold rolling, Heat treatment, Mechanical property

고엔트로피 합금은 4~5개 이상의 금속 원소가 비슷한 분율로 구성되어 있는 합금이다. 다원소 구성에서 기인하는 높은 엔트로피로 인해 금속간 화합물의 형성 없이 고용체 상을 안정적으로 형성한다. 그 중에서 3d 전이금속을 활용한 FCC 고엔트로피 합금은 뛰어난 연성을 가짐으로써 제조 및 가공에 용이하므로 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 상대적으로 낮은 강도를 보이는 한계점을 가지고 있어 이를 극복하기 위한 다양한 공정이 활발히 연구되고 있다. 본 연구에서는 FCC 고엔트로피 합금 설계 방식에 기반하며 타 구성원소들과 양의 혼합 엔탈피 관계를 가져 상분리를 통해 FCC1과 FCC2의 이중상 조직을 형성하는 $(CoCuFeNi)_{100-x}V_x$ 합금계를 선택하였다. 해당 조성의 합금은 선행 연구를 통해 V의 첨가량에 따라 두 그룹으로 미세조직의 형상 및 각각의 이중상에 대한 화학적 조성이 달라짐이 보고되었다. 이를 기반으로 각 그룹의 물성을 대표하는 조성을 하나씩 선택하였다. 선택한 합금 조성에 압하율 50%를 적용하여 냉간압연을 진행하고 FCC1과 FCC2 두 상 간의 변형 및 회복·재결정 정도를 제어하고자 어닐링을 진행하였다. 이를 통해 미세조직 변화에 따른 물성 변화가 있는지 확인하고 강도와 연성의 최적화를 진행하였다. 이러한 공정 과정을 통해 FCC 고엔트로피 합금의 한계를 극복하여 고강도 및 고장력의 우수한 물성의 합금 설계를 목표로 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 첨가 원소 V의 함량에 따라 변화된 미세조직을 가진 합금 조성에 대하여 균질화 열처리를 진행 후 냉간 압연 및 어닐링을 진행하여 미세조직 분석 및 기계적 물성을 평가하였다. 합금의 제조는 $(CoCuFeNi)_{100-x}V_x$(x = 5, 15at%) 조성의 합금을 아크 용해법 및 낙하 주조법을 통해 6 mm × 12 mm × 50 mm의 판상시편을 주조하였다. 시편의 미세조직 및 상 분석은 N-SEM(JEOL JSM-6390), FE-SEM(HITACHISU-8010), X-선 회절분석(XRD: Panalytial)을 이용하였으며 기계적 물성의 평가는 비커스 경도 시험(Vickers indentation test, SIMADZU HMV-G21DT), 만능시험기(UTM, Universal Testing Machine)을 이용한 상온에서의 인장시험을 진행하였다.

[P5-16]

Quasicrystal Growth and Nanomechanical Behavior in Cu-Microalloyed Ti–Zr–Ni Alloys: Thiri Shwe Sin, Go Eun Kim, Geunhee Yoo, Wan Kim, Eun Soo Park*(Department of Materials Science and Engineering, Research Institute of Advanced Materials & Institute of Engineering Research, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea)

Keywords: Quasicrystal, icosahedral phase, Ti–Zr–Ni alloy, Cu microalloying, EBSD, nanoindentation, nanoscratch

Quasicrystals possess long-range atomic order without the translational periodicity found in conventional crystals, giving rise to mechanical behavior that differs from both crystalline and amorphous materials. Ti–Zr–Ni alloys are promising candidates for high-strength quasicrystal-reinforced materials because they can readily form thermodynamically or kinetically favorable icosahedral phases. In this work, the influence of a minor Cu addition on quasicrystal formation, grain-size development, and local mechanical behavior in Ti–Zr–Ni alloys was systematically examined. Cu-free and Cu-microalloyed Ti–Zr–Ni alloys were produced and subjected to controlled cooling rates to facilitate the formation of quasicrystalline phases. Their phase constitution, microstructural morphology, and grain characteristics were investigated using scanning electron microscopy, X-ray diffraction, and electron backscatter diffraction. The electron backscatter diffraction results revealed that the Cu-containing alloy developed larger quasicrystal grains than the alloy without Cu. This observation suggests that Cu microalloying alters the balance between quasicrystal nucleation and grain growth, thereby promoting the coarsening of the quasicrystalline phase. The local mechanical responses of the quasicrystals and the neighboring matrix were assessed through nanoindentation measurements. Hardness, elastic modulus, and indentation displacement behavior were compared to determine differences in deformation resistance between the two microstructural regions. Nanoscratch tests were also conducted to evaluate localized deformation, frictional response, and surface damage under sliding contact. The combined microstructural and nanomechanical analyses clarify the relationship between Cu-assisted quasicrystal grain growth and the local deformation behavior of Ti–Zr–Ni alloys. These findings highlight the potential of minor Cu additions as a compositional strategy for controlling quasicrystal development and tailoring the mechanical performance of quasicrystal-containing alloys.

[P5-17]

DC 마그네트론 스퍼터링 기반 AlCrFeNi 고엔트로피 합금 결정질/비정질 Self-composite 코팅의 공정 최적: 현명우, 허윤제, 이유진, 서진오, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범*(세종대학교)

Keywords: DC 마그네트론 스퍼터링, 고엔트로피 합금 코팅, Self-composite, 잔류응력 진화, 기계적 물성

최근 높은 경도와 우수한 내마모성 및 내산화성을 바탕으로 고엔트로피 합금(HEA)을 스퍼터링 하드코팅으로 구현하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중 AlCrFeNI 기반 코팅은 Al 원소에 따른 BCC/B2 상 안정화 효과를 통해 코팅층의 하중 지지능력을 극대화할 수 있다. 이러한 특성을 기반으로 AlCrFeNi 코팅은 활발히 연구되어 왔으나, 기존 연구는 주로 단일 결정질·비정질 코팅 형성 또는 ex-situ multi-layer 방식을 통한 이종 구조 구현에 초점을 맞추어 왔다. 이에 본 연구에서는 별도의 타겟 교체나 다층 증착 없이, 단일 스퍼터링 공정만으로 결정질 상부층-비정질 하부층이 자발적으로 형성되는 self-composite 구조를 갖는 AlCrFeNi 고엔트로피 합금 하드코팅을 구현하고자 하였다. DC 마그네트론 스퍼터링 과정에서 수반되는 고에너지 입자 타격(Atomic peening)은 코팅층 내부에 막대한 응력을 축적시키며 비평형 성장을 주도한다. 선행연구를 통해 이러한 비평형 성장 과정에서 타겟 제조방식에 따른 원소 간 화학적 균일도 차이가 기판 표면에서의 원자 확산 및 재배열 거동에 영향을 미쳐, 동일한 명목 조성의 타겟이라 하더라도 서로 다른 상 형성 경향을 유도할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 self-composite 구조가 특정 타겟 조건에 국한되지 않고 보편적으로 형성되는 성장거동인지 검증하고 이를 구현할 확률을 높이기 위해, 원소 균일도가 상이한 주조(Casting) 타겟과 혼합분말(Mixed powder) 타겟 두 종류를 이용하여 코팅을 증착하였다. 이렇게 형성된 두 종류의 self-composite 코팅의 상 구조와 미세조직을 비교·분석하고, 나노 압입시험을 통해 기계적 물성 차이를 확인하였다. 또한, 코팅층 내부에 축적된 응력의 정도와 그 완화 거동이 결정립 성장 및 경도 변화에 미치는 영향을 파악함으로써, AlCrFeNi Self-composite 하드코팅의 최적 공정조건을 규명하였다.

P6 : 표면계면
Room 1층 전시홀, 10월 28일

[P6-1]
기계적 결합력 향상을 위한 탄소강의 양극산화: 이진원, 윤태환, 임효균, 박일송*, 우태규*(전북대학교)
Keywords: 양극산화, 이종 접합, 탄소강
철강 소재는 이종 접합 시 계면 접착력 저하로 인한 박리 문제가 빈번히 발생한다. 양극산화 시 탄소강 내 탄화물의 국부 용해로 생성되는 피트(Pit)는 수지 침투를 통해 기계적 맞물림(anchor effect)을 유도할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 탄소강의 피트 형성을 극대화하기 위해 0.1 M 불화암모늄과 1 M DI water를 첨가한 에틸렌글리콜 유기 전해액에서 정전압 양극산화를 실시하였다. 이후 200 ℃에서 30분간 유지하여 표면에 잔류한 에틸렌글리콜을 증발시킨 후 열처리를 진행하였으며, X선 회절(XRD) 분석을 통해 안정한 결정상이 형성됨을 확인하였다. 주사전자현미경(SEM) 분석 결과, 페라이트 영역에서는 나노 기공 피막이 성장하고, 시멘타이트 영역에서는 화학적 용해가 집중되어 마이크로 단위의 피트가 형성되었다. 표면 조도 분석 결과, 양극산화 후 Ra, Rz 값이 모두 증가하여 표면 거칠기가 전반적으로 상승하였고 결정 구조가 변화하였다. 이상의 결과를 바탕으로 탄소강 소재에 양극산화 공정을 적용하여 기계적 결합력을 개선할 수 있는 구조적 기반을 제시하였다. 이 논문은 2026년도 정부(중소벤처기업부)의 재원으로 중소기업기술정보진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(S3471397, 2026년 지역혁신선도기업육성사업).

[P6-2]
Effect of Mg Content on Microstructure and Corrosion Resistance of Zn-Mg-Al Hot-Dip Coatings: TaeYeon Lee(Purpose Built Mobility Group, Seonam Technology Application Division, Korea Institute of Industrial Technology, Chonnam National University), TaeSeong Kim(Purpose Built Mobility Group, Seonam Technology Application Division, Korea Institute of Industrial Technology, Sunchon National University), GaYeon Lee(Purpose Built Mobility Group, Seonam Technology Application Division, Korea Institute of Industrial Technology, Jeonbuk National University), JaeYeol Jeon*(Purpose Built Mobility Group, Seonam Technology Application Division, Korea Institute of Industrial Technology)
Keywords: Zn-Al-Mg, Coating thickness, Corrosion resistance, Microstructure, Hot-dip galvanizing
Recently, Zn-Mg-Al hot-dip coating is widely used in industrial fields. The objective of this study is to investigate the correlation between microstructure and corrosion resistance of Zn-Mg-Al hot-dip coatings with different Mg contents while the Al content is fixed at 12 wt.%. In this study, three different compositions such as Zn-3.0Mg-12.0Al, Zn-5.0Mg-12.0Al and Zn-7.0Mg-12.0Al were prepared for hot-dip coating. M30 washers made of SS400 carbon steel were used as substrates and the pretreated washers were immersed for 3 minutes in the molten coating baths maintained at 470–510 ℃. The coating behaviors of the coated washers were evaluated. The microstructures were analyzed using field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). In addition, corrosion resistances of the coating with three different compositions were evaluated by potentiodynamic polarization and salt spray test (SST). Microstructural analysis showed that the primary Zn regions decreased and the $MgZn_2$ phase increased with increasing Mg content. Potentiodynamic polarization tests showed that the corrosion potential (E_{corr}) increased and the corrosion current density (I_{corr}) decreased with increasing Mg content. In addition, the salt spray test showed that Zn-7.0Mg-12.0Al exhibited the greatest suppression of red rust formation and the highest corrosion resistance.

[P6-3]
WC-Co 초경합금 스크랩을 이용한 WO_3-$CoWO_4$ 복합산화물 나노구조 박막의 에어로졸 증착 평가: 한철웅*(한국생산기술연구원)
Keywords: 에어로졸 증착 공정, 나노구조 박막, WO_3-$CoWO_4$ 복합산화물, WC-Co 초경합금 스크랩, 입자 충돌, 피닝 치밀화
에어로졸 증착 공정(Aerosol Deposition Process, ADP)은 마이크로 단위 세라믹 입자를 기판에 고속 충돌시켜 입자의 파쇄 및 소성변형을 유도함으로써, 별도의 열처리 없이 상온에서 치밀한 나노구조 박막을 형성하는 코팅 기술이다. 본 연구에서는 WC-Co 초경합금 공구 스크랩을 등온 산화 처리하여 WO_3 및 $CoWO_4$ 복합산화물로 전환하고, 이를 ADP용 원료 분말로 활용하여 박막을 제조하였다. 산화 처리된 원료는 파·분쇄 공정을 통해 평균입경(D50) 1.85 μm, D90 3.05 μm의 입도 분포로 제어되었으며, 해당 분말을 실리콘 웨이퍼 기판 상에 에어로졸 증착하여 WO_3-$CoWO_4$ 박막을 형성하였다. 제조된 박막은 기판과 뚜렷한 계면 결함 없이 밀착된 치밀 구조를 나타내었으며, 미세조직 관찰 결과 결정립 미세화를 동반한 나노구조가 형성됨을 확인하였다. 이러한 미세구조 형성은 입자의 기판 충돌 시 발생하는 운동에너지의 전달 및 소산 과정과 밀접히 관련되며, 특히 반복적인 입자 충돌에 의한 peening 효과가 기존 입자층의 재치밀화 및 결정립 미세화를 촉진하는 주된 기구로 작용한 것으로 판단된다. 본 연구는 초경합금 스크랩으로부터 유래한 산화물이 상온 공정만으로 기능성 박막 소재로 전환될 수 있음을 실증함으로써, 금속 스크랩의 산화물 자원화 및 ADP 기반 박막 소재 공정 개발에 기여한다.

[P6-4]
Prediction of Silicon Isotope Enrichment and Incidence-Angle Effects during 45 keV ^{28}Si Self-Implantation Using Dynamic BCA Simulation (SDTrimSP): CHAN YOUNG LEE*, Jae Kwon Suk, Jun Mok Ha, In Mok Yang, Jun KuePark, Yong Seok

Hwang, SunmogYeo, Myung-Hwan Jung(KAERI)
Keywords: Silicon isotope enrichment (^{28}Si), Ion self-implantation, SDTrimSP dynamic BCA simulation, Sputtering yield and incidence-angle dependence

Isotopically enriched ^{28}Si, free of nuclear spin, is a key material governing the coherence time of spin qubits, and high-fluence ^{28}Si self-implantation is a promising route to enrich a near-surface layer locally. In this work, the depth-resolved isotopic composition and sputtering behavior of natural silicon (^{28}Si 92.23 %, ^{29}Si 4.67 %, ^{30}Si 3.10 %) irradiated with 45 keV ^{28}Si ions to a fluence of 2.63×10^{18} ions/cm^2 were predicted using dynamic SDTrimSP calculations, comparing normal (0 °) and tilted (7 °) incidence. Because SDTrimSP cannot distinguish isotopes of identical atomic number, a two-component surrogate target was constructed in which the combined ^{29}Si+^{30}Si fraction (7.77 %, weighted mean 29.4 amu) was replaced by phosphorus (30.97 amu). To make the surrogate behave like a silicon isotope, the surface binding energy (4.7 eV) and displacement energy (15 eV) were set identical to those of Si; the resulting error in the mean atomic mass of the target is limited to about 0.4 % (28.09 → 28.21 amu). The target was modeled as 500 nm divided into 100 cells with a density of 2.33 g/cm^3 using the KrC potential. The ^{28}Si fraction increased from the natural value of 92.23 % to approximately 99.8 % from the surface down to about 130 nm, while ^{29}Si + ^{30}Si decreased from 7.77 % to about 0.2 %, returning to the natural composition through a transition region between 130 and 200 nm. This effective enrichment depth is roughly twice the single-ion projected range obtained from SRIM (Rp = 66.7 nm), indicating that surface erosion and accumulation of the implanted species at high fluence extend the enriched layer beyond the static prediction. The total sputtering yields were 0.957 (0 °) and 0.984 (7 °); both remain below unity, so no net loss of the implanted species occurs (net-deposition regime), although surface erosion increased by about 24 % (78.1 → 96.7 nm) at tilted incidence. Since an amorphous target is assumed, channeling is not included and the depth profiles of the two angles differ only marginally. The instantaneous yield approaching equilibrium near unity with increasing fluence is consistent with the TRIDYN results of Holmes et al., and the profile shape—an enriched plateau followed by a steep decay to the natural value—agrees with KAERI SIMS measurements. The present calculations can therefore be used to optimize irradiation conditions for ^{28}Si-enriched silicon and to predict SIMS depth profiles.

[P6-5]
Preliminary Study on the Isotopic Enrichment of Silicon-28 via Mass-Separated Ion Implantation and Structural Characterization: Jun Mok Ha*, Jae Kwon Suk, Chan Young Lee, In Mok Yang, Yong Seok Hwang, Sunmog Yeo, Jun Kue Park, Myung-Hwan Jung(Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI))
Keywords: Silicon-28, Ion Implantation, Isotope Enrichment, Thermal Annealing, Quantum Computing

Silicon-based spin qubits have emerged as a highly promising platform for fault-tolerant quantum computing. However, their quantum coherence time is severely limited by the nuclear spin bath noise originating from the natural ^{29}Si isotopes. To realize a highly enriched, spin-free ^{28}Si layer, we investigate a mass-separated ion implantation technique as a viable and scalable alternative to conventional gas centrifuge methods. In this preliminary study, we established the foundational process conditions for high-fluence ^{28}Si implantation and evaluated the resulting isotopic purity along with the structural modifications of the silicon substrate. Natural silicon wafers were implanted with a mass-separated $^{28}Si^+$ beam at an acceleration energy of 30 keV. Secondary ion mass spectrometry (SIMS) depth profiling confirmed that the concentrations of ^{29}Si and ^{30}Si were significantly suppressed in the implanted region, successfully demonstrating a localized ^{28}Si enrichment level of approximately 97%. Furthermore, the structural damage induced by the high-fluence ion bombardment was systematically characterized. While conventional X-ray diffraction (XRD) showed limitations in probing the ultra-thin damaged layer due to the dominant bulk signal, Raman spectroscopy clearly revealed the dose-dependent amorphization behavior. The structural degradation was marked by the decay of the crystalline optical phonon peak at 520 cm^{-1} and the subsequent evolution of the broad amorphous band at 480 cm^{-1}. To restore the diamond cubic lattice via solid-phase epitaxial regrowth (SPEG) while effectively suppressing the thermal interdiffusion of background isotopes, a customized pseudo-rapid thermal annealing (RTA) process is proposed for subsequent phases. These foundational results provide a critical process window and evaluation methodology for the scalable fabrication of quantum-grade ^{28}Si-enriched substrates.

[P6-6]
Defect-Mediated Electrochemical Epitaxial Growth of Cu(111) on Graphene-Deposited Metallic Substrates: Moo Young Jung, Minhyeok Kim, Yongqiang Meng, Sunghwan Kim, Mi-Jeong Kim, Dongwoo Kim(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff*, Sun Hwa Lee*(Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))
Keywords: Epitaxy, Electrodeposition, Defect Engineering, Cu(111), Single crystal

Epitaxy is the oriented growth of a crystalline material on a crystalline substrate, enabling precise control over crystallographic orientation and interfacial structures. The epitaxial growth of Cu is particularly crucial for tailoring its electrical, catalytic, and surface properties. Although epitaxial growth through graphene has often been attributed to remote epitaxy, the periodic potential of an underlying metal substrate is strongly screened by its free electrons, rendering remote epitaxy on metallic substrates unlikely. Furthermore, previous approaches have relied predominantly on vapor-phase techniques such as molecular beam epitaxy (MBE) and chemical vapor deposition (CVD). Here, we demonstrate the electrochemical epitaxial growth of Cu(111) on graphene-deposited

Cu(111). Plasma treatment was utilized to introduce controlled pinhole defects into graphene, followed by systematic optimization of defect density and electrodeposition conditions. Structural characterization revealed that these plasma-induced defects establish crystallographic registry between the deposited Cu and the underlying Cu(111) substrate, supporting a defect-mediated epitaxial growth mechanism over remote epitaxy. This work provides an electrochemical strategy for achieving epitaxial metal growth from graphene-deposited metallic substrates. This work is supported by Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

P7 : 원자력 재료
Room 1층 전시홀, 10월 28일

[P7-1]
이종 분말 혼합을 통한 고성능 산화물 분산강화 합금 제조 및 특성 평가: 김주현, 김태균, 김대식, 노상훈*(국립부경대학교)
Keywords: 산화물 분산강화 합금, 바이모달 미세구조, 냉간가공성, 인장특성

산화물 분산강화(Oxide Dispersion Strengthened, ODS) 합금은 미세하게 분산된 나노 산화물 입에 의해 우수한 고온 강도와 미세조직 안정성을 나타내어 차세대 원자로용 핵연료 피복관 후보 소재로 주목받고 있다. 그러나 높은 강도와 미세한 결정립으로 인해 냉간가공성이 제한되어 박판 제조 과정에서 반복적인 중간 열처리가 요구된다. 본 연구에서는 이러한 한계를 개선하기 위해 서로 다른 변형 특성을 갖는 두 ODS 합금 분말을 혼합하여 냉간가공성을 향상시키고자 하였다. 또한 두 합금의 서로 다른 재결정 거동을 이용하여 미세립과 조대립이 공존하는 바이모달 미세조직을 형성하고, 고온 기계적 특성의 균형을 확보하고자 하였다. Fe-15Cr-2W계 ODS 분말(#24)과 Fe-22Cr-5Al-3Mo계 ODS 분말(#25)을 각각 기계적 합금화한 후 1:1 부피비로 혼합하여 하이브리드 ODS 분말(#26)을 제조하였다. #24, #25 및 #26은 동일한 조건에서 열간등방압가압(HIP)과 열간압연을 수행하였다. 열간압연 후 각 합금의 미세조직과 인장특성을 평가하고 냉간가공성을 비교하였다. 이후 최종 압연율 90%에 도달한 시편을 재결정 열처리한 후 미세조직과 인장특성의 변화를 평가하였다. 미세조직과 산화물 분포는 EBSD, WDS 및 TEM을 이용하여 분석하였다. 냉간압연 과정에서 #24와 #25는 약 60%의 압연율에서 균열이 발생하여 추가 가공을 위해 중간 열처리가 필요하였으나, #26은 중간 열처리 없이 90%까지 냉간압연이 가능하였다. 재결정 열처리 후 #26에서는 미세립과 조대립이 공존하는 바이모달 미세조직이 형성되었으며, 두 영역에서 서로 다른 산화물 분포가 관찰되었다. 또한 재결정 열처리한 시편의 800 ºC 및 850 ºC 인장시험에서 #26은 #24와 #25 사이의 중간 수준의 강도와 연신율을 나타냈다. 이러한 결과는 서로 다른 특성을 갖는 ODS 합금의 혼합과 재결정 거동을 활용한 미세조직 제어가 냉간가공성을 향상시키고, 고온에서 강도와 연성의 균형을 확보하기 위한 효과적인 설계 전략이 될 수 있음을 시사한다.

[P7-2]
기계적 합금화 공정과 중간열처리를 활용한 페라이트계 ODS 강의 고온 인장특성 향상: 김태균, 김성대, 김대식, 노상훈*(국립부경대학교)
Keywords: 원자로 피복관, 산화물분산강화, 기계적 합금, 원자력 재료, 분말야금

제4세대 원자로 및 사고저항성핵연료(ATF) 시스템의 가혹한 노심 환경(고온, 고중성자 조사)을 견디기 위해서는 연료 피복관의 열기계적 건전성 및 내방사선성 확보가 필수적이다. Al이 첨가된 FeCrAl 산화물 분산 강화(ODS) 페라이트 강은 우수한 고온 내산화성과 더불어, 기지 내 분산된 나노 산화물이 조사 결함의 소멸처 역할을 하여 유망한 피복관 소재로 평가받는다. 그러나 실제 얇은 두께의 피복관 튜브로 제조하기 위해서는 우수한 상온 냉간 가공성이 요구되지만, 통상적인 기계적 합금화 공정은 고온 소결 중 Al이 조대한 Al_2O_3로 우선 석출되어 상온 취성을 유발하는 한계가 있다. 이는 튜브 성형 공정의 수율을 저하시킬 뿐만 아니라, 고온 크립 저항성과 방사선 조사 저항성에 기여하는 초미세 나노 복합 산화물의 형성을 억제한다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하고자 중간 열처리가 결합된 2단계 MA 공정을 적용하여 피복관용 FeCrAl ODS 강을 개발하였다. Al 장입 전 도입된 중간 열처리를 통해 세륨에 의한 산소 포획 및 우선 결합을 유도하여 조대 Al_2O_3 석출을 효과적으로 억제하고 미세한 Ce-Y-O 복합 산화물의 분산을 촉진하였다. 미세조직 분석 결과, 2단계 공정은 기지에 축적된 소성 변형 에너지를 완화하고 안정한 결정립을 형성하여 튜브 압출 가공에 필요한 상온 소성 변형 능력을 개선하였다. 미세구조적으로는 조대 Al_2O_3 분율이 감소하고, 초미세 Ce-Y-O 복합 산화물의 수밀도가 증가하여 균일한 분산 특성을 나타내었다. 온도 구간별 인장 평가 결과, 상온에서는 내재 전위 밀도 감소로 인해 항복강도가 일부 희생되었으나 피복관 제조에 필수적인 상온 연신율은 뚜렷하게 증가하였다. 이와 동시에, 원자로 정상 가동 온도 대역에서는 고밀도로 분산된 나노 산화물들이 오로완 분산 강화 및 고온 전위 고착을 유도하여, 통상적인 공정 시편 대비 고온에서의 항복강도 및 최대인장강도는 향상되는 강도 역전 현상이 확인되었다. 결론적으로, 도입된 2단계 MA 공정은 미세조직의 효과적인 제어를 통해 상온에서는 향상된 연신율을, 고온에서는 우수한 기계적 강도를 동시에 달성함으로써 상온 성형성과 고온 장기 건전성 간의 상충 관계를 성공적으로 극복하였으며, 차세대 원자력 시스템을 위한 신뢰성 높은 피복관 제조에 실질적인 해법을 제시한다.

[P7-3]
수소 환원 전처리와 Y_2O_3 첨가가 방전 플라즈마 소결 W–3Ta계 합금의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향: 김대식, 김태균, 김주현(국립부경대학교), 이동원(한국원자력연구원), Ryuta Kasada(동북대학교(일본)), 노상훈*(국립부경대학교)
Keywords: 텅스텐–탄탈럼 합금, 산화물 분산강화, 수소 환원, 방전 플라즈마 소결, 치밀화

텅스텐은 높은 융점, 낮은 스퍼터링 수율 및 우수한 열전도 특성으로 인해 핵융합로 플라즈마 대면재료 후보로 연구되고 있다. 그러나 상온 취성과 높은 연성–취성 천이온도뿐만 아니라 고온에서 발생하는 재결정과 결정립 성장으로 인해 강도와 미세조직 안정성이 저하되는 한계가 있다. 이를 개선하기 위해 Ta 첨가를 통한 재결정 저항성 향상과 Y_2O_3 산화물 분산강화를 통한 고온 미세조직 안정성 확보가 검토되고 있다. 본 연구에서는 W–3Ta 합금을 기준으로 Y_2O_3 첨가와 수소 환원 처리가 치밀화, 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. W–3Ta 및 W–3Ta–0.2Y_2O_3 분말을 300 rpm, 10 h, ball-to-powder ratio 5:1 조건에서 기계적 합금화한 뒤, 일부 분말을 1200 ºC에서 2 h 동안 수소 환원하였다. 제조된 분말은 1800 ºC, 80 MPa에서 10 min 동안 방전 플라즈마 소결하였다. 소결체의 상대밀도, 비커스 경도, 상온 및 500 ºC 인장 특성을 평가하고, SEM과 WDS로 기공 및 Ta, O, C, Y의 분포를 분석하였다. 또한 W–O, W–C, Ta–O 및 Ta–C 이원계 상태도를 계산하여 산화물과 탄화물계 2차상의 형성 가능성을 검

토하였다. 수소 환원 후 상대밀도는 W–3Ta에서 92.7%에서 98.2%로, W–3Ta–0.2Y_2O_3에서 92.7%에서 97.3%로 증가하였다. 비커스 경도는 각각 390.0에서 457.8 HV0.3 및 359.8에서 487.4 HV0.3로 증가하였다. 수소 환원한 ODS 합금에서는 조대한 Ta-rich 영역이 감소하고 미세한 Ta-rich 영역이 분산된 미세조직이 관찰되었으나, O 및 C 농축 영역과 잔류 기공도 함께 확인되었다. 상대밀도와 경도는 증가하였지만 인장강도는 뚜렷한 향상을 보이지 않았으며, 파면에서는 벽개면을 동반한 취성 파괴가 지배적으로 나타났다. 이는 잔류 기공, 입자계면 및 O/C-rich 2차상이 인장 파괴에 영향을 미친 결과로 판단된다. 향후 분말 전처리와 SPS 조건을 최적화하고 열간압연 등의 후속 열기계적 치밀화 공정을 연계하여 잔류 기공과 취약한 입자계면을 제어하면, 고밀도 W–Ta계 합금의 제조공정을 확립할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구결과는 수소 환원과 산화물 분산강화를 연계한 W–Ta계 합금의 치밀화 및 미세조직 제어 공정 개발에 기여할 수 있다.

[P7-4]

SA508강의 제조공정 별 미세조직 및 기계적 특성 변화 거동: 박성민, 윤준원(한국생산기술연구원, 고려대학교), 박형기(한국생산기술연구원), 김정길, 안세환(두산에너빌리티), 김동회(고려대학교), 박창수*(한국생산기술연구원)

Keywords: SMR, SA508, PM-HIP, 미세조직, 충격인성

원자로 압력용기에 대표적으로 사용되는 SA508 Grade 3강은 Mn-Mo-Ni계 저합금강으로, 열처리를 통해 주로 베이나이트 기지와 탄화물로 구성된 미세조직을 형성한다. 기존 SA508 대형 부품은 주조 및 단조 공정을 기반으로 제조되며, 대형 잉곳의 제작과 단조 이후 최종 형상 구현을 위한 후속공정이 요구된다. 이러한 기존 제조 공정의 소재 손실과 긴 제작기간을 개선하기 위한 대안으로 분말야금 열간등방압 성형 (Powder Metallurgy-Hot Isostatic Pressing, PM-HIP)공정이 연구되고 있다. PM-HIP공정은 near-net-shape 제조가 가능하여 소재 이용률을 향상시키고 후속 가공공정을 최소화할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 기존 주단조 공정과 PM-HIP공정으로 제조된 SA508 Grade 3강을 동일한 열처리를 적용하고, 제조공정에 따른 미세조직 및 기계적 특성의 변화 거동을 비교하였다. 특히, 노말라이징 온도를 변화시켜 초기 제조공정에 따른 미세조직의 열적 안정성과 조직변화 거동을 조사하였다. 열처리 후 시편에 대해 인장시험 및 충격시험을 수행하여 기계적 특성을 비교하였으며, EBSD분석을 통해 결정립 크기, 결정립계 특성 및 미세조직 변화를 분석하였다. 또한, Thermo-calc의 TCFE database와 각 소재의 화학조성을 이용한 열역학 계산을 통해 결정립계 이동을 억제할 수 있는 석출상의 형성 거동을 예측하였다. 이러한 석출상의 분포와 특성은 TEM을 통해 분석하였다. 이를 바탕으로 초기 제조공정이 후속 열처리 과정에서의 미세조직 변화와 기계적 특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

[P7-5]

Molecular Dynamics Investigation of the Interaction Between Screw Dislocation and Hydrogen in BCC Tungsten: SANGHUN KIM(Yonsei Univ.), HYOUNGRYUL PARK(University of Illinois Urbana-Champaign), KEONWOOK KANG*(Yonsei Univ.)

Keywords: Tungsten, Hydrogen, Nudged E<lastic Band, Molecular Dynamics, Screw Dislocation

Tungsten (W) is a primary candidate material for plasma-facing components in fusion reactors owing to its high melting point, excellent thermal conductivity, and radiation tolerance. Nevertheless, concerns remain regarding material degradation caused by the hydrogen-rich environment of fusion reactors. Furthermore, the understanding of hydrogen effects on dislocations in tungsten remains limited, with conflicting behaviors (hardening vs. softening) simultaneously reported. To elucidate the atomic-scale origins of these conflicting behaviors, we present a systematic atomistic investigation combining using the nudged elastic band (NEB) calculations and Molecular Dynamics (MD) simulations. Under applied shear stress, kinkKink-pair activation enthalpy barriers were quantitatively evaluated for 15 distinct hydrogen sites around a 1/2<111> screw dislocation, while and finite-temperature (400 K) MD simulations under shear stress of 750 MPa were conducted to derive dynamic slip behavior and kink-pair nucleation rates. The NEB calculations reveal that the activation enthalpy barrier varies significantly depending on the hydrogen position, a variation quantitatively governed by the change in hydrogen binding energy and the kink-hydrogen interaction. Specifically, when hydrogen is positioned ahead of the dislocation, the activation enthalpy barrier decreases by approximately 10% relative to pure W. The MD simulation results align remarkably well with these NEB findings. For the 1st slip with hydrogen ahead of the dislocation, the nucleation rate increases 2.9-fold compared to pure W, demonstrating hydrogen-induced softening. During the 2nd slip with hydrogen directly behind the dislocation, the nucleation rate remains virtually identical to pure W. Furthermore, when the dislocation advances two Peierls valleys ahead of hydrogen (3rd slip), the nucleation rate decreases by approximately 40% compared to pure W, revealing a distinct solute drag effect. These findings demonstrate that hydrogen-dislocation interactions in BCC tungsten are inherently position-dependent and dynamic, shifting from localized softening to neutral response and ultimately to solute drag during continued dislocation motion. Acknowledgement This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2024-00445448, NRF-2022R1A2C2011266) Reference (1) Hyoungryul Park, Sunil Moon, and Keonwook Kang., 2024, ‘‘The effect of atomic hydrogen on the behavior of a single dislocation of <111>{112} in bcc tungsten: Atomistic study.’’ Journal of Nuclear Materials 589: 154842. (2) Wang, Li-Fang, et al., 2017, ‘‘Embedded-atom method potential for modeling hydrogen and hydrogen-defect interaction in tungsten.’’ Journal of Physics: Condensed Matter 29.43: 435401. (3) Joachim Roth, and Klaus Schmid., 2011, ‘‘Hydrogen in tungsten as plasma-facing material.’’ Physica Scripta 2011.T145: 014031. (4) Seunghwa Ryu, Keonwook Kang, and Wei Cai., 2011 ‘‘Predicting the dislocation nucleation rate as a function of temperature and stress.’’ Journal of Materials Research 26.18: 2335-2354.

[P7-6]

보론 함유 스테인리스강 전자빔용접부의 미세조직 및 부식 특성에 용접후열처리가 미치는 영향: 김중훈(한국생산기술연구원, 울산과학기술원), 남희일(한국생산기술연구원, 부산대학교), 최재훈(동아대학교), 강인지, 김형찬, 김병준(한국생산기술연구원), 박성수*(울산과학기술원), 김병구*(한국생산기술연구원)

Keywords: 보론 함유 스테인리스강, 전자빔용접, 용접후열처리, 미세조직, 부식특성

AI 기술의 발전과 전기차 보급 확대에 따른 전력 수요 증가로 전 세계적으로 원자력 발전의 활용이 확대됨에 따라, 수십 년에서 100년 이상의 장기적인 저장 및 관리가 요구되는 사용후핵연료의 건식저장 필요성이 증가하고 있다. 이에 따라 저장 기간 동안 용기의 강도, 연성 및 인성과 같은 기계적 특성을 유지하고, 균열 및 부식 등에 의한 구조적 열화를 방지하기 위한 장기 건전성 확보가 중요해지고 있다. 우수한 강도, 연성 및 인성을 비롯한 기계적 특성과 중성자 흡수능을 갖는 ASTM A887 규격의 borated stainless steel (BSS)은 사용후핵연료 습식저장랙, 건식저장 및 운반용기 내부 바스켓과 같이 중성자 흡수능과 구조적 안정성이 동시에 요구되는 부품에 활용되고 있다. BSS는 판재 형태로 제작되므로 이를 적용한 구조물에서는 판재 간 접합을 위한 볼트, 리벳 및 용접 등의 다양한 접합 공정이 요구되며, 이 중 용접은 자동화가 가능하고 제조 효율 및 생산성을 향상시킬 수 있어 주요 접합 공정으로 활용될 수 있다 그러나 BSS는 용접 과정에서 보론의 편석에 의해 저융점 공정상이 형성될 수 있으며, 이러한 용접부 미세조직의 불균일성은 용접부의 강도, 연성 및 인성을 비롯한 기계적 특성과 국부 부식 거동에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 보론 함량이 0.81 wt.%인 ASTM A887 304B3급 BSS 판재를 제조하고, 용접부를 최소화할 수 있는 전자빔용접을 수행하였다. 이후 BSS 레이저용접부의 미세조직에 대한 용접후열처리의 영향을 분석한 선행연구 결과를 참고하여 400 ℃, 800 ℃ 및 1200 ℃에서 각각 24시간 동안 용접후열처리를 실시하였다 [1, 2]. 용접후열처리에 따른 용접부 미세조직의 변화 거동은 OM 및 FE-SEM을 이용하여 관찰 및 분석하였다. As-welded 및 400 ℃와 800 ℃에서 24시간 열처리한 조건에서는 용접부의 dendritic 공정조직이 관찰되었으나, 1200 ℃에서 24시간 열처리한 조건에서는 용접부의 dendritic 공정조직이 소멸하고 모재에서 관찰되는 형태와 유사한 boride가 재석출되는 것을 확인하였다. 또한, 3극 전기화학 셀을 이용하여 potentiodynamic polarization test 및 electrochemical impedance spectroscopy 시험을 수행한 결과, 1200 ℃에서 24시간 열처리한 조건에서 용접부의 부식 특성이 모재 수준으로 향상되는 것을 확인하였다. 더불어 AFM-SKPFM을 이용하여 기지상과 boride를 포함하는 상 사이의 volta potential 차이를 분석한 결과, 본 연구의 BSS 합금에서 관찰되는 국부 부식은 상 간 volta potential 차이에 기인한 micro-galvanic corrosion이 주요 메커니즘으로 작용함을 확인하였다. [1] Kim, Joonghoon, et al. "PWHT effect on the microstructure and microhardness of boron-added stainless steel laser weldments." Journal of Nuclear Materials 614 (2025): 155905. [2] Won, Chi-Hyoung, et al. "Effect of annealing on mechanical properties and microstructure evolution of borated stainless steels." Journal of Nuclear Materials 515 (2019): 206-214.

[P7-7]

Monte-Carlo-Informed Molecular Dynamics Simulations of Neutron Irradiation Damage and Defect Evolution in Tungsten: Jungjin Cho, Younggak Shin, Hyunggyu Lee, Keonwook Kang*(Yonsei Univ.)

Keywords: Tungsten, Molecular Dynamics, Neutron Irradiation, Primary Knock-on Atom, Irradiation Defects

Tungsten is a promising plasma-facing material for next-generation fusion reactors due to its excellent thermal properties. However, it suffers severe structural degradation from massive displacement cascades induced by 14.1 MeV high-energy neutron irradiation. To investigate this damage mechanism at the atomic level, we conducted Monte-Carlo-informed molecular dynamics (MD) simulations using the particle transport code (Geant4) [1] and LAMMPS [2]. First, Geant4 was used to extract the recoil energy probability distribution of Primary Knock-on Atoms (PKAs), revealing that the probability initially decreases as energy increases, then rebounds to reach a peak around 36 keV, with the overall distribution extending up to 315 keV. To prevent the strong cascade overlap, that often occurs when multiple PKAs are randomly introduced, we pre-measured the maximum cascade size for the PKA energy range. Specifically, a 300 keV PKA exhibited a defect propagation distance of 46 nm on average, with a maximum up to 70 nm. Based on these measurements, we applied a non-overlap multi-PKA generation technique to minimize defect interference. By applying this method to a single-crystal tungsten model, we identified defect evolution behaviors, including point defect generation, clustering, and dislocation loop formation. Future work will extend this approach to polycrystalline tungsten to evaluate the influence of grain boundaries on radiation-induced defect evolution. Acknowledgement This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2024-00445448, NRF-2022R1A2C2011266) Reference [1] Agostinelli, S., et al., 2003, "Geant4—a simulation toolkit." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 506: 250-303. [2] Thompson, A. P., et al., 2022, "LAMMPS - a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales." Computer Physics Communications 271: 108171.

[P7-8]

Ti 첨가가 냉간압연 및 어닐링한 CrMnFeCoNi 고엔트로피 합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향: 나찬수, 장성혁, 박성현, 정재길*(전북대학교)

Keywords: High entropy alloy, Cold rolling, Electron backscatter diffraction, Transmission electron microscopy, Tensile property

고엔트로피 합금(High entropy alloy, HEA)은 5가지 이상의 주요 원소를 동등하거나 유사한 원자비로 혼합한 합금이다. HEA는 칵테일 효과, 느린 확산과 격자 왜곡 등으로 인해 높은 기계적 특성을 가지며 높은 배열 엔트로피로 인해 단일상 형성이 유리하다

고 알려져 있다. 그 중 대표적인 FCC 계열 고엔트로피 합금인 CrMnFeCoNi 합금은 우수한 연성, 열적 안정성 및 저온 특성을 보이며 극한 환경용 구조재료로서 주목받고 있다. 특히나 원자력 발전소의 구조 재료로서 기존 스테인리스 강을 대체할 후보 소재로 연구되고 있으나, 상온에서의 낮은 항복 강도로 인해 합금 원소 첨가로 이를 극복하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 Ti 첨가는 Ni_3Ti의 석출 및 격자 왜곡을 통해 합금의 강도를 향상시키는 것으로 보고되었으나, 기존 연구들은 주로 주조 및 어닐링 조건에서의 미세조직 분석에 집중되어 있으며, 구조재료에 주로 적용되는 공정인 냉간압연 및 후속 어닐링 거동에 대한 분석은 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 CrMnFeCoNi HEA에 Ti 첨가가 냉간압연 및 후속 어닐링 과정에서 결정립 크기, 쌍정, 재결정 및 집합조직 등 미세조직 변화와 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 진공 유도 용해(Vacuum induction melting, VIM)를 통해 주조재를 제조한 후 균질화 처리와 냉간압연을 진행하였으며, 재결정 및 결정립 성장 거동을 분석하기 위해 700, 900, 1100 ºC에서 1시간 동안 어닐링을 실시하였다. 주사전자현미경(Scanning electron microscopy, SEM)과 후방산란전자회절법(Electron backscatter diffraction, EBSD)을 통해 Ti 첨가에 따른 산화물, 결정립 크기, 쌍정 및 집합조직의 변화와 재결정 거동을 분석하였으며, 투과전자현미경(Transmission electron microscopy, TEM)을 통해 인장 시험 후 변형 기구를 분석하였다. 기계적 특성을 평가하기 위해 인장 시험과 비커스 경도 시험을 진행하였으며, 이론적 항복 강도 계산을 통해 강화 기구를 규명하고, 슬립 및 쌍정에 의한 변형 거동을 분석하였다.

[P7-9]

Development of Ni-Based Cladding Materials for Corrosion Resistance in MSRs: Microstructure and Tensile Properties: GyunTae Kim(Korea Atomic Energy Research Institute, Hanyang Univ), SangTae Kim(Hanyang Univ), Jaeseong An(Korea Atomic Energy Research Institute, Chungnam Univ), Jungmin Kim(Korea Atomic Energy Research Institute, University of Science & Technology), Daejong Kim, Chaewon Kim*(Korea Atomic Energy Research Institute)

Keywords: Molten Salt Reactor, Cladding, Alloy 625, Microstructure, Tensile properties

Molten salt reactors (MSRs) offer inherent safety and high thermal efficiency through atmospheric-pressure operation, drawing attention as a next-generation baseload power source for the AI era and maritime decarbonization. However, MSR commercialization requires corrosion-resistant materials that maintains long-term structural integrity in high-temperature molten salt. Only ASME Code (Sec. III, Div. 5)-listed materials must serve as the primary structural material, and qualifying an new alloy is a lengthy process. The ASME Code exempts a cladding softer than the base metal from the code qualification. Alloy 625 is officially designated as a candidate material in the ongoing data-collection effort to expand the ASME Section III, Division 5 high-temperature design criteria, and offers excellent resistance to neutron-irradiation-induced swelling and creep, but its high Cr content necessitates improved corrosion resistance in molten salt. Accordingly, new cladding alloys were developed based on Alloy 625. In this study, tensile properties and microstructure of newly-developed cladding materials were evaluated in comparison with Alloy 625.

[P7-10]

상용 텅스텐의 온도에 따른 기계적 특성과 파괴거동의 상관관계 평가: 조예진, 김대식, 김태균, 김주현, 김성희, 노상훈*(국립부경대학교)

Keywords: 상용 텅스텐, 연성-취성 천이, DBTT, 인장시험, 기계적 특성, 파단면 분석, 파괴거동

텅스텐(W)은 높은 융점, 우수한 고온 강도 및 내열성으로 인해 핵융합로 플라즈마 대면재료로 활용되는 대표적인 내화금속이다. 그러나 상온에서 낮은 연성과 높은 파괴취성을 나타내며, 제조 공정과 가공 이력에 따라 형성되는 미세조직의 차이로 인해 연성-취성 천이 온도(ductile-to-brittle transition temperature, DBTT)가 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 제조 공정과 조성이 서로 다른 세 종류의 상용 텅스텐인 ITER급 순수 텅스텐(ITER-grade pure tungsten, IGW), 포타슘 도핑 텅스텐(potassium-doped tungsten, KdW) 및 상용 순수 텅스텐(commercially pure tungsten, PuW)의 온도 의존적 기계적 특성과 파괴 거동을 비교하였다. IGW는 분말야금 및 열간압연으로 제조된 ITER 규격 소재이며, KdW는 K 도핑을 적용한 텅스텐, PuW는 상용 순수 텅스텐으로서 소재별 제조 및 열기계 가공 이력이 상이하다. 다양한 온도에서 인장시험을 수행하여 항복강도, 인장강도 및 연신율을 평가하였으며, 연신율의 급격한 증가와 파단 양상의 전이가 나타나는 온도 범위를 기준으로 DBTT를 평가하였다. 또한 인장시험 후 파단면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하고 전자후방산란회절(EBSD) 분석을 통해 결정립 크기, 형상 및 결정방위 분포를 비교함으로써 미세조직과 기계적 특성에 미치는 제조공정의 영향을 평가하였다. 세 소재 모두 시험 온도가 증가함에 따라 항복강도와 인장강도는 감소하고 연신율은 증가하는 경향을 나타냈다. 연신율 변화와 파단면 전이를 기준으로 산정한 DBTT는 IGW가 300–400 ºC, KdW가 270–300 ºC, PuW가 220–225 ºC로 평가되었다. DBTT 이하에서는 벽개파괴가 우세한 취성 파단면이 관찰되었으며, 천이 온도 영역에서는 소성변형을 동반한 혼합 파괴의 비율이 증가하였다. 이러한 파단 양상의 변화는 인장시험에서 측정된 연신율 증가와 일치하였다. 소재별 DBTT와 파괴 거동의 차이는 K 도핑 유무뿐만 아니라 제조 및 열기계 가공 과정에서 형성된 결정립 형상과 결정방위 분포의 차이가 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 본 연구는 상용 텅스텐의 제조 공정–미세조직–기계적 특성–파괴 거동 간 상관관계를 제시함으로써 핵융합로 플라즈마 대면부품용 텅스텐 소재의 선정과 제조 공정 최적화를 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

[P7-11]

결정소성 유한요소법(CPFEM) 기반 텅스텐(W) 대면재 나노압입 해석 매개변수 민감도 분석: 안동현*, 진형하(한국원자력연구원)

Keywords: 대면재, 텅스텐, 유한요소법, 나노압입

텅스텐(W)은 초고융점 및 높은 열전도도 등의 특성을 바탕으로 핵융합로 대면재 소재로 채택되고 있지만, 고온 플라즈마 환경과

가혹한 중성자 조사 조건 등으로 인해 사용 중 표면 취화 및 조사 유기 경화 현상을 겪는다. 표면부에 집중되는 미세조직 열화 메커니즘을 이해하고 개선하기 위해 국소 영역의 역학적 거동을 평가할 수 있는 나노압입 시험과 결정립 방위 및 전위 슬립 거동을 모사하는 결정소성 유한요소해석(CPFEM)의 상호 연계가 효과적으로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 텅스텐 재료의 미세역학적 소성 변형 특성을 정밀 해석하고자 3차원 Berkovich 압입자 모델을 적용한 CPFEM 나노압입 전산모사를 수행하였다. 체심입방(BCC) 격자 구조 특성을 반영한 구성 모델을 구축하고, 주요 매개변수인 초기 임계분해전단응력(CRSS), 기준 전단변형률 속도 민감도 계수, 가공경화율 및 포화 전단응력의 통계적 분포를 부여하였다. 확률적 매개변수 변동에 따른 해석 결과를 바탕으로 각 매개변수가 나노압입 거동에 미치는 정량적 민감도를 확인하였다. 본 연구를 통해 도출된 매개변수 민감도 데이터베이스는 압입 시험 결과로부터 텅스텐 고유 물성을 역산하는 데 유용한 기준을 제시하고, 향후 극한 환경에 노출된 핵융합 대면재의 미세구조 기반 건전성 평가 및 수명 예측 기술 고도화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[P7-12]

An investigation of tensile deformation and Portevin-Le-Chatelier (PLC) band of Nitronic 50 at high temperature: Min-Su Lee, Sung-Min Park, Jun Won Yoon(한국생산기술연구원), Seok Su Sohn, Dong Hoe Kim(고려대학교), Chang-Soo Park*(한국생산기술연구원)

Keywords: Austenitic stainless steels, Solid solution strengthening, Precipitate, High temperature, Digital image correlation

Austenitic stainless steels (ASSs) have been extensively used in nuclear, aerospace, (petro-) chemical industries owing to their excellent mechanical properties and high resistance to corrosion. The types 304 and 316 stainless steels are typical Fe-Cr-Ni alloys. These exhibit a low yield strength (200-260 MPa in tension [1-2]) compared with other load-bearing structural materials (e.g., Ti and Al alloys), and it limits their further applications. Solid hardening is one of the effective strengthening mechanisms. Nitronic 50 (N50) was developed as nitrogne-hardened ASS, and it was used for core and pressure vessels of nuclear reactor. The water-cooled nuclear reactor use superitical water as a coolant, which is ~374 ºC and 22.1 MPa at core outlet of small modular reactor (SMR). Increasing the core outlet temperature to 500 ºC can improve the thermal efficiency up to ~45% compared with that of current reactors [3]. Precipitates such as carbides and nitrides are formed at high temperature, and these play a crucial role in deformation. Neverthelss, the underlying mechanism of N50 has not been explored at high temperature. In the present study, we investigated the deformation behaviour and hardening mechanisms of N50 at high temperature. The tensile tests were performed in the temperature range from 20 ºC to 700 ºC. Digital image correlation (DIC) technique was used to measure full-field strain in the samples. In the deformed microstructure, the grain structures and precipitates were characterised by electron backscattered diffraction (EBSD) and energy dispersive X-ray sepctroscopy (EDX). The DIC analysis revealed that Portevin-Le-Chatelier (PLC) bands are observed at 300 ºC and 400 ºC, and it becomes more pronounced at 600 ºC and 700 ºC. In contrast, the PLC band was absent in the test at 500 ºC, which results in the highest uniform elongation. This is attributed to the suppression of precipitates at 500 ºC. Reference [1] Yin, Y. J., Sun, J. Q., Guo, J., Kan, X. F., & Yang, D. C. (2019), Materials Science and Engineering: A, 744, 773-777. [2] San Marchi, C., Somerday, B. P., Tang, X., & Schiroky, G. H. (2008), International Journal of Hydrogen Energy, 33(2), 889-904. [3] Wu, P., Ren, Y., Feng, M., Shan, J., Huang, Y., & Yang, W. (2022), Progress in Nuclear Energy, 153, 104409.

[P7-13]

환형 금속연료심 제조를 위한 주조장치 및 몰드 설계 평가: 박상규*, 안정수, 여승환(한국원자력연구원)

Keywords: 금속 연료, 환형 연료, 연속 주조, 사출 주조, 중력 주조

현재 원자력발전은 가동 후 발생하는 폐기물 및 안정성의 문제가 원자력에너지의 확대를 제한하는 원인이 되고 있다. 따라서 기존 경수로에 비해 경제성과 안전성이 우수한 제 4세대 원자로 개발을 위한 국제적인 연구가 추진되고 있다. 현재 원자력연구원에서는 기존 핵연료에 비해 연소 효율과 안정성이 높은 핵연료를 개발하고 있으며, 이에 따라 소듐 충진 공정을 생략하여 공정 효율성을 증대시킬 수 있는 환형 핵연료에 대한 연구가 진행되고 있다. 상용 핵연료 제조공정에는 사출주조, 연속주조, 중력주조 등이 개발되어 있으며, 현재 원자력연구원에서는 환형 핵연료를 이러한 공정기술에 접목하기 위한 기술을 개발하고 있다. 본 연구에서는 외경 6.4 mm, 내경 2 mm의 환형연료심을 주조하기 위한 다양한 공정기술을 설계하고 평가하였다. 연속주조의 경우 환형 금속연료 주조 시 내부 공동의 접합으로 인한 공정상의 문제가 발생하였고, 사출주조법의 경우 내부 몰드의 수축율 차이로 인한 표면 결함의 문제가 발생하였다. 이러한 단점을 보완하여 중력을 이용한 신형 주조방법을 고안하였고, 이를 활용한 환형 연료심 장치 및 몰드를 설계하여 검증시험을 수행하였다. 시험 결과 다른 주조방법에 비해 상대적으로 우수한 연료심을 제조할 수 있었고, 이에 대한 추가적인 분석을 바탕으로 공정조건을 개선하고자 하였다.

[P7-14]

지르코늄 합금 산화막 결정상의 현상학적 고찰을 통한 산화막 성장기구 해석: 안효진, 정양일*, 김희원, 안양덕, 장명진(한국원자력연구원(KAERI))

Keywords: 지르코늄 합금, 산화막, 수측 부식, 부식 전이, 노내 조사 효과

지르코늄 합금은 낮은 열중성자 흡수 단면적과 우수한 부식 저항성으로 인해 수냉식 원자로의 핵연료 피복관 재료로 널리 사용되어 왔다. 최근 연소도 확장 및 운전 주기 연장이 추진됨에 따라 피복관은 고온·고압 냉각수와 강한 방사선 조사 환경에 더 오랜 시간 노출되고 있으며, 이에 따른 수측 부식과 수소 흡수는 핵연료 건전성을 좌우하는 핵심 인자로 대두되고 있다. 따라서 지르코늄

합금의 부식 현상에 대한 정확한 이해는 고내식 합금 설계의 필수 전제가 된다. 이에 본 연구에서는 지르코늄 합금 산화막 형성 및 성장 메커니즘을 결정학적·미세조직적 관점에서 정리하고, 최근 10년간 발전한 미세 라만 분광법·XANES 과 같은 첨단 분석법과 위상장·DFT·머신러닝 기반 전산 모사가 이러한 메커니즘 규명에 기여한 바를 검토하였다. 아울러 이러한 고해상도 분석이 설명되지 않는 실제 노내 부식 거동과의 차이점을 드러내는 데 기여한 대표적 사례들 - 전이 후 단계에서의 비대칭적 부식 가속, 조사에 따른 산화막 결정상·미세조직 변화, 제2상 입자의 조사 유기 비정질화, 그림자 부식과 같은 노내 고유 현상, 연소도 증가에 따른 수소 흡수 분율의 편차 - 를 종합하였다. 결정학적 이해가 노내 부식을 예측하는 데 필요조건이지만 충분조건은 아니며, 고연소도·장주기 운전에 대응하는 고내식성 합금 설계를 위해서는 노외 거동을 출발점으로 삼되, 조사 및 수화학 환경 변수에 대한 체계적인 보정이 반드시 병행되어야 함을 제안하고자 한다.

[P7-15]

단일구조 사용후핵연료 처분용기 소재의 부식특성 평가: 김가영*, 우정현, 장준혁, 박선영(한국원자력연구원)

Keywords: 처분용기, 사용후핵연료, 부식

원자력발전소에서 배출된 고준위방사성폐기물은 최소 수만 년 이상 격리할 필요가 있어 지하 500m 이상의 깊이에 영구처분하는 심층처분방식이 개발되었다. 핀란드는 세계 최초로 고준위방폐장을 준공하여 2026년 말 가동이 예정되어 있으며, 우리나라 또한 현재 처분부지 선정을 준비 중이다. 심층처분은 금속처분용기와 벤토나이트 완충재와 같은 공학적방벽재와 천연암반과 같은 천연방벽재를 이용하여 고준위방사성폐기물을 최종처분하는 방식이다. 이중 처분용기는 고준위방사성폐기물을 직접적으로 밀봉하는 1차 방벽재로서, 처분환경에서 부식방지를 위한 구리와 기계적 건전성 유지를 위한 주철(혹은 탄소강)을 적용한 이중 구조를 지닌다. 이러한 이중 구조 처분용기 제작에는 정밀 조립 및 접합부 관리, 제작비 증가와 같은 이슈가 수반된다. 따라서 본 연구에서는 기계적 물성과 내부식성을 동시에 만족하는 사용후핵연료 처분용기 소재를 개발하고자 하였다. 이를 위해 Ni 및 Cu 기반의 합금을 설계하였으며, 기계적 물성의 개선을 위해 첨가원소의 조성 및 시효처리 조건을 변화시켰다. 이와 같이 제조된 합금의 부식거동은 분극곡선 및 임피던스 측정을 통해 분석하였다. 모든 실험은 국내처분환경 조건이 반영된 지하처분연구시설에서 채수된 지하수 용액을 바탕으로 실시하였다. 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-나노 및 소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구이다(RS-2025-25441247).

[P7-16]

옥살레이트 함유 방사성 슬러지 폐기물의 열분해 안정화-시멘트 고형화 연계 특성 평가: 장준혁*(한국원자력연구원), 진총명(한국원자력연구원, 서울대학교), 이근영, 손성준(한국원자력연구원)

Keywords: 슬러지폐기물, 안정화, 시멘트고화체, 방사성폐기물처분, 처분적합성

원전의 운전 및 해체 시, 킬레이트 성분이 포함된 방사성 슬러지 폐기물이 다량 발생하지만 이를 적합하게 처분하는 요소기술은 아직 부족한 상황이다. 이러한 방사성 슬러지 폐기물은 한국원자력환경공단(KORAD) 지침에 따라, 킬레이트 성분을 화학적으로 안정한 형태로 변환 시켜야 하며, 시멘트나 지오폴리머 등과 같은 적절한 매질을 사용하여 물리적인 핵종의 이동을 방지하여야 한다. 이에 본 연구에서는 옥살레이트 성분 함유 슬러지의 열분해 안정화 및 시멘트 고형화 특성을 평가하였다. 원전 제염해체 시 발생하는 슬러지 조성을 Surrogate 방사성폐기물로 선정하고, TGA 분석을 통하여 400도 이상의 온도에서 옥살레이트가 성공적으로 분해되는 것을 확인하였다. XRD 분석을 통하여 옥살레이트가 카보네이트로 변환되어 안정화 됨을 확인하였다. 안정화 슬러지의 고화특성을 확인하기 위하여 시멘트를 활용한 고화체 제조를 수행하였다. 다양한 물/시멘트/슬러지 비율에서 시멘트 고형화 작업성을 평가 한 결과, 모의 슬러지 사용 실험에서 30 wt%물, 20 wt%시멘트, 50 wt%슬러지 배합을 도출하였다. 해당 배합비로 제조한 슬러지 고화체를 활용하여 압축강도시험, 침수시험, 열순환시험, 침출시험을 수행하여, 해당 고화체가 KORAD의 처분장 인수기준에 적합함을 확인하였다. 본 결과로부터, 킬레이트 함유 슬러지 폐기물의 열분해 안정화 – 시멘트 고형화 연계 폐기물 처리 기술의 적용 가능성을 확인하였다.

[P7-17]

용융염 원자로 구조재용 Ni 합금의 고온 연성에 미치는 화학조성의 영향: 윤지현*, 임상엽(한국원자력연구원), 안재성(충남대학교), 김정민(과학기술대학원대학교), 김채원, 김대종(한국원자력연구원)

Keywords: 용융염 원자로, Ni기 합금, 인장, 연신율, EBSD

용융염 원자로(MSR) 구조재용 Ni기 합금은 부식 저항성과 함께 장기 고온 운전에서의 우수한 기계적 특성 유지가 필수적이다. 본 연구에서는 Cr, Mo 함량만 다르고 나머지 조성이 유사한 NH2(Ni–8Cr–4Mo)와 NH4(Ni–10Cr–6Mo) 두 모델합금을 대상으로 상온 및 700 ℃ 인장 거동을 비교하였다. 두 합금은 상온에서 총 연신율이 동일(53%)한 반면, 700 ℃에서는 NH4의 총 연신율이 NH2보다 약 1.8배 크고, 후 넥킹 연신율은 약 2.6배 우수하였다. 균일 연신율은 두 합금에서 유사하여, 조성-연신율 관계가 고온·후 넥킹 영역에서 선택적으로 나타남을 확인하였다. 그립 근접부(grip shoulder, 저 변형률 기준부)와 파단면 인근부의 EBSD 비교 결과, 두 합금은 유사한 고각 결정립계(HAGB) 우세 조직에서 출발했으나, 변형 후 파단면 인근에서 NH4가 HAGB를 훨씬 더 잘 유지하였다. TEM–SAED, EDS, XRD 분석, CALPHAD(Thermo-Calc) 분석을 조합한 결과, NH4에는 미세한 M_6C 상이 확인되었다. NH4에서는 M_6C solvus (~1000 ℃)가 어닐링 온도(930 ℃) 위에 위치하여 열처리 전 과정에서 안정한 반면, NH2에서는 solvus (~830 ℃)가 어닐링 온도 아래에 위치하여 노냉 중에만 재석출된다. 예측된 평형 M_6C 부피 분율도 NH4가 NH2보다 약 3배 크다. 결론적으로, NH4의 우수한 고온 후 넥킹 연신율은 Mo에 의한 적층결함에너지 감소 효과와 미세 M_6C에 의한 결정립계 재구성 억제(Zener 효과)의 두 가지 열활성화 메커니즘이 상보적으로 작용한 결과로 해석된다.

[P7-18]

Development of Laser-Cladded 316 Stainless Steel for Molten Chloride Salt Nuclear Reactor Applications: Jungmin Lee, Hwasung Yeom*(POSTECH)

Keywords: Molten Salt Reactor, Laser Cladding, Corrosion, Dilution

Molten salt reactors (MSRs) are gaining attention as a next-generation reactor concept, offering advantages such as high thermal efficiency, inherent passive safety, and compact modular design, which has motivated their development for marine propulsion applications. However, chloride molten salts are highly corrosive to conventional structural alloys such as 316 stainless steel due to selective dissolution of Cr, resulting in intergranular corrosion. To prevent this, low-Cr Ni-based alloys are mainly investigated. However, manufacturing structural components of bulk Ni-based alloy is costly, hence making surface cladding via laser deposition economically favorable. Nevertheless, the cladded layer involves rapid solidification, segregation, and dilution, so it cannot be assumed to have the same corrosion behavior as a bulk alloy. Research on how these cladding properties affect corrosion still remains limited. In this study, three cladding materials (pure Ni, Ni-Mo, and Hastelloy-N) are deposited onto a 316SS substrate by laser cladding, and processing conditions that suppress defects are identified for each composition by varying the deposition parameters. Cross-sections of the fabricated specimens are examined by optical microscopy and SEM/EDS to characterize clad layer thickness, solidification morphology, elemental segregation, defect distribution, and the degree of dilution. Outcome of this study can be used to identify which of the three materials is most suitable as a corrosion-resistant layer for chloride molten salt environments, providing practical guidance for future MSR applications.

[P7-19]

원자로용기 노심대 적용을 위한 고강도 SA508 Gr.3 Cl.2 저합금강 적용요건 및 특성 평가: 김민철*, 현세미, 권준엽, 최권재, 홍석민, 이봉상(한국원자력연구원)

Keywords: i-SMR, 원자로용기, SA508 Gr.3 Cl.2 저합금강, ASME BPVC code, 기계적 특성

국내에서 개발이 진행되고 있는 혁신형 소형모듈형원자로(i-SMR)의 원자로용기에는 경량화를 위하여 경수형 상용원전에 적용되고 있는 SA508 Grade 3 Class 1(Gr.3 Cl.1) 저합금강보다 강도가 높은 SA508 Gr.3 Cl.2 저합금강을 적용하려고 한다. 이는 상대적으로 높은 설계강도로 인해 원자로용기의 두께가 감소하여 전체적인 무게 감소를 통한 경량화가 가능하기 때문이다. 이러한 고강도 소재의 적용은 SMR 제작기간의 단축을 위해 고려되고 있는 전자빔용접(EBW)과 같은 최신 제작공정 적용을 위해서도 필수적으로 요구된다. Cl.2 저합금강은 Cl.1 저합금강과 ASTM 규격 상에 동일한 화학조성 범위를 가지나, 실제 원자로용기에 적용된 사례가 없고 증기발생기에 일부 적용된 경험이 있다. 최근 해외에서 개발되고 있는 SMR 노형에서 Cl.2 저합금강을 중성자 영향이 없는 원자로용기 상부에 적용하는 것을 고려하면서 이 소재의 원자로용기 적용과 관련된 규정들의 개정이 진행되었다. 그러나 이 소재를 원자로용기 노심대에 적용하기 위해서는 ASME BPVC code와 더불어 중성자 조사취화와 관련된 추가적인 요건들을 만족하여야 한다. 본 연구에서는 Cl.2 저합금강을 원자로용기 노심대에 적용하기 위해 ASME BPVC code 및 10 CFR 50, Reg. Guide 1.99-rev.2 등 관련 요건들을 정리하고, ASME 규정상의 SA508 Gr.3 Cl.1과 Cl.2의 특성차이를 비교하였다. 이와 더불어 실제 국내에서 연구용으로 제작된 Cl.2 저합금강의 기계적 특성을 평가하여 상용원전의 적용된 Cl.1 저합금강의 특성과 비교하고, Cl.2 저합금강의 원자로용기 노심대 적용성을 분석하였다.

[P7-20]

i-SMR 무붕산 LiOH/KOH 환경에서 핵연료 피복관 재료의 부식 거동: 백시은, 조수용(한국원자력연구원, 충남대 에너지과학기술대학원), 고대균, 이충용(한전원자력연료), 심희상*(한국원자력연구원)

Keywords: i-SMR, 수화학, 핵연료피복관, 부식, 무붕산

국내에서 개발 중인 혁신형 소형모듈원자로(i-SMR)는 무붕산 노심 제어를 설계에 반영하고 있으며, 원자로 냉각재 수화학은 계통 재료의 부식을 최소화하는 것을 목적으로 한다. 그래서 i-SMR의 1차 계통 수화학 조절제로 KOH, LiOH, NH_3 등의 알칼리제를 사용하는 방안을 고려하고 있다. i-SMR 원자로 냉각재 계통은 크게 증기발생기 재료인 Alloy 690, 핵연료 피복관 재료인 HANA-6, 내부 구조물 재료인 SS 304 등으로 구성된다. 따라서 무붕산 수화학 환경에서 이들 재료의 적용성을 평가하기 위해서는 응력부식균열 및 일반부식 등 이들 재료에 대한 건전성 평가가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 대표적인 pH 조절제인 KOH와 LiOH를 이용한 무붕산 수화학 환경에서 HANA-6를 포함한 3종의 지르코늄 합금 재료의 부식 특성을 비교·평가하였다. 부식 실험은 3종 재료를 대상으로 $pH_{303.5\,^oC}$=6.9 및 7.2 조건의 KOH와 LiOH 수용액에서 이루어졌으며, 350 °C에서 6, 000시간을 목표로 진행되고 있으며, 본 논문에서는 1, 000시간까지의 부식 실험 결과를 비교·평가하였다. 부식 실험 후, 시험의 분석은 FIB-SEM, EDS 및 XRD 분석을 통해 이루어졌다. 이러한 결과를 바탕으로 i-SMR에 적용 가능한 3종의 핵연료 피복관 재료에 대해 pH 조절제 및 pH 조건이 부식 특성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

[P7-21]

I-SMR 무붕산 수화학 조건에 따른 피복관 재질별 CRUD 부착 특성 연구: 조수용, 백시은(한국원자력연구원, 충남대학교 에너지과학기술대학원), 고대균, 이충용(한전원자력연료), 안동현, 심희상*(한국원자력연구원)

Keywords: I-SMR, CRUD, 피복관, 무붕산, 과냉각 핵비등

I-SMR(Innovative Small Modular Reactor)은 기존 가압경수형 원자로와 달리 무붕산 수화학 조건에서 운전되며, 냉각재의 pH

제어를 위해 LiOH 및 KOH 등의 알칼리 pH 조절제가 고려되고 있다. 원자로의 수화학 조건은 피복관의 부식뿐만 아니라 냉각재 내 금속 이온의 이동 및 침전 거동에 영향을 미칠 수 있으며, 이는 피복관 표면의 부식생성물(Chalk River Unidentified Deposit, CRUD) 형성 및 부착 거동에 영향을 줄 수 있다. CRUD는 피복관 표면에 형성되어 열전달 및 국부적인 수화학 환경에 영향을 미치며, 피복관의 건전성 평가를 위해 CRUD의 형성 및 부착 특성을 이해하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 I-SMR의 수화학 환경을 모사한 고온·고압 조건에서 상용 피복관 및 I-SMR 설계에 반영된 지르코늄 합금 피복관을 포함하는 3종의 지르코늄 합금 피복관을 시험 대상으로 선정하였다. 각 피복관에 대해 LiOH 및 KOH를 pH 조절제로 적용한 무붕산 수화학 조건에서 실험을 수행하여, 피복관 재질 및 pH 조절제에 따른 CRUD 부착 특성을 비교 평가하고자 한다. I-SMR 무붕산 수화학 환경에서 노심의 과냉핵비등(Subcooled Nucleate Boiling, SNB) 조건을 모사하고, CRUD source를 주입하여 CRUD 부착 실험을 수행하였다. 실험 후, ICP-AES를 이용하여 Fe 및 Ni 농도를 정량 분석하고, SEM, EDS 및 XRD 분석을 수행하여 CRUD의 형상, 성분, 상 등의 특성을 비교 평가하였다. 실험 결과, 3종 피복관 표면에 형성된 CRUD는 니켈페라이트($Ni_xFe_{3-x}O_4$)로 확인되었으며, 국부적으로 비등침니(boiling chimney) 구조가 관찰되었다. 재질 및 pH 조절제에 따른 CRUD 부착량의 차이는 추후 구체적으로 논의하고자 한다.

[P7-22]

TRISO 연료입자 SiC 피복층 결함 분석 시스템: 안정수*, 김재준, 김응선(한국원자력연구원)

Keywords: 고온가스로, TRISO 피복입자연료, 탄화규소 피복층, 침출-연소-침출 시험, 결함 분석

고온가스로용 삼중피복입자(TRISO) 연료에서 탄화규소(SiC) 피복층은 금속 핵분열생성물의 방출을 억제하는 핵심 방벽으로 작용한다. 따라서 연료 제조 과정에서 발생할 수 있는 SiC 피복층 결함을 정량적으로 평가하는 기술이 요구된다. 본 연구에서는 TRISO 연료입자의 노출 커널 및 SiC 피복층 결함을 분석하기 위한 침출-연소-침출(Leach-Burn-Leach, LBL) 시험 시스템을 구축하고 주요 실험조건을 검토하였다. LBL 시험은 연료 컴팩트의 전기화학적 탈결합, 연소 전 침출, 탄소층 연소 및 연소 후 침출 단계로 구성하였다. 연료 컴팩트는 70% 질산에 침지하고 백금선을 양극으로 사용하여 1–3 W의 전력을 인가함으로써 흑연 기지로부터 TRISO 입자를 분리하였다. 회수된 입자는 60% 질산 100 mL에서 90 ºC로 48시간 동안 침출하였으며, 질산 증발을 억제하기 위해 4 ºC의 냉각수를 순환시켰다. 이후 800 ºC에서 10분 또는 750 ºC에서 72시간 동안 열처리하여 외부 열분해탄소층과 결합 경로의 탄소를 제거하고, 동일한 조건으로 연소 후 침출을 수행하였다. 각 침출액에 용해된 우라늄 농도는 ICP-MS 및 ICP-OES를 이용하여 분석하도록 구성하였다. 이를 통해 연소 전 침출 결과로부터 노출 커널 결함을 평가하고, 연소 후 침출 결과로부터 SiC 피복층 결함 입자의 분율을 산정할 수 있는 기초 분석체계를 확립하였다.

[P7-23]

장기 Dry Layup 환경에서 원전 복수기 부식생성물의 특성 및 철 산화물 변화 분석: 임상엽*, 전순혁, 하성준(한국원자력연구원)

Keywords: Nuclear power plant, Condenser, Dry layup, Corrosion products, Iron oxide, XPS, Raman spectroscopy

원자력발전소 2차계통의 복수기는 증기터빈에서 배출된 증기를 응축하여 급수계통으로 회수하는 주요 설비로, 장기간의 운전 및 정지 과정에서 내부에 부식생성물이 축적될 수 있다. 특히 장기 정지 기간 중 수행되는 Dry Layup 조건에서는 계통 내 냉각수가 제거된 상태로 대기 중 산소에 장기간 노출됨에 따라, 정상 운전 중 형성된 철 산화물의 산화상태 및 결정구조가 변화할 가능성이 있다. 이렇게 변질된 부식생성물은 발전소 재가동 시 계통수로 재유입되어 수화학 및 기기 건전성에 영향을 미칠 수 있음에도, 실제 발전소의 장기 Dry Layup 환경에서 발생하는 부식생성물의 물리·화학적 변화 거동에 대한 체계적인 연구는 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서는 장기 Dry Layup이 수행된 원전 복수기의 Ti 튜브 표면 침적물(deposit)과, 육안상 색상(Black, Orange, Red)으로 구분되는 부식생성물 시료를 채취하여 종합적인 특성 분석을 수행하였다. SEM-EDS를 통해 시료의 미세조직 및 원소조성(Fe, O)을 확인하였으며, XRD 및 Raman spectroscopy를 이용하여 Magnetite(Fe_3O_4), Hematite(α-Fe_2O_3) 등 주요 결정상을 다각도로 평가하였다. 아울러 FTIR 분석을 통해 Fe–O 및 hydroxyl 결합의 존재를 확인함으로써 FeOOH 계열 산화수산화물의 존재 가능성을 검토하였고, XPS(Fe 2p, O 1s) 및 TEM 상 분석을 병행하여 철의 화학적 산화상태, 산소 결합 상태 및 국부 결정상을 종합적으로 규명하였다. 분석 결과, 복수기 부식생성물은 서로 다른 산화상태를 갖는 철 산화물이 복합적으로 혼재하는 특성을 보였으며, 시료의 색상 및 채취 위치에 따라 주요 산화물 구성비와 산화 정도에 뚜렷한 차이가 관찰되었다. 이러한 결과는 장기 Dry Layup 과정에서 기존에 존재하던 저산화 상태의 철 산화물이 잔류 산소 및 미량 수분과 반응하여 점진적으로 추가 산화되었음을 시사한다. 본 연구 결과는 장기 정지 원전 복수기 내 부식생성물의 상변화 거동을 이해하는 데 기여하며, 향후 발전소 재가동 시 부식생성물의 이동 및 수화학적 영향을 평가하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P7-24]

Spectrum-Dependent Neutron Attenuation Characteristics of Boron-Containing Neutron Absorber Materials: Youngju Kim*, Wankchuk Woo, Jongyul Kim, Tae Uk Kang, Hobyung Chae, Myung-Kook Moon(Korea Atomic Energy Research Institute)

Keywords: neutron shielding material, neutron attenuation, boron stainless steel, boron aluminum, spent nulcear fuel

Boron-containing metallic materials, such as borated stainless steel (BSS) and boron-aluminum (B4C-Al) materials, are widely used as neutron absorbers in spent nuclear fuel storage and transportation systems. Their neutron attenuation performance is generally characterized using neutron transmission or attenuation coefficients. However, practical neutron imaging facilities employ polychromatic neutron beams, and the wavelength dependence of neutron interaction cross sections can affect the measured attenuation characteristics, particularly for materials containing strong neutron absorbers. In this study, neutron attenuation characteristics of BSS and B4C-Al absorber materials with different boron contents were investigated using thermal neutron imaging. The measured

transmission behavior was compared with attenuation characteristics estimated from the elemental composition, material density, and wavelength-dependent neutron cross sections. The neutron spectrum of the imaging beam was additionally considered to examine its influence on the effective attenuation response of the absorber materials. The results indicate that the spectral effect becomes increasingly important with increasing neutron absorption, suggesting that attenuation characteristics evaluated at a single representative wavelength may not fully describe the behavior of strongly absorbing boron-containing materials. This study provides a basis for interpreting neutron imaging measurements and evaluating the attenuation performance of metallic neutron absorber materials under practical polychromatic neutron beam conditions.

[P7-25]

핵융합로 디버터용 W/Cu/CuCrZr 소재 및 접합부의 초기 미세조직 특성 분석: 임상엽*, 진형하, 강석훈, 권준현, 안동현, 박선영, 이동원(한국원자력연구원)

Keywords: Fusion divertor, W/Cu/CuCrZr, TEM, STEM-EDS, Interface microstructure, Cr-rich precipitate, Zr enrichment, Over-aging

핵융합로 디버터는 플라즈마로부터 발생하는 높은 열유속과 고속 입자에 직접 노출되는 핵심 부품으로, 우수한 열적 특성과 구조적 건전성이 동시에 요구된다. 이에 따라 높은 융점과 내열성을 지닌 텅스텐(W)을 대면재(plasma-facing material)로 사용하고, 우수한 열전도도와 기계적 특성을 가지는 CuCrZr 합금을 열제거를 위한 냉각 라인 및 구조재로 적용하며, 두 소재 간 물성 차이로 인한 접합성 저하를 완화하기 위해 순수 구리(Cu)를 중간층(interlayer)으로 삽입한다. 이러한 W/Cu/CuCrZr 디버터는 제조 과정에서 열간등가압착(HIP) 등의 공정을 통해 각 소재를 접합하며, 이 과정에서 부여되는 고온의 열이력은 구성 소재의 미세조직뿐 아니라 접합 계면에서의 원소 확산 및 석출 거동에도 변화를 야기할 수 있다. 이는 곧 디버터의 열적·기계적 특성 및 사용 수명에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로, 제조 직후 소재 및 접합부의 초기 미세조직을 정밀하게 규명하는 것이 후속 성능 평가 및 공정 최적화의 기초 자료로서 중요한 의미를 갖는다. 본 연구에서는 W/Cu/CuCrZr 디버터를 구성하는 개별 소재 및 접합부를 대상으로 투과전자현미경(TEM) 미세조직 관찰과 STEM-EDS 원소 분석을 수행하여, W, Cu, CuCrZr 각 소재의 미세조직 특징과 W/Cu 및 Cu/CuCrZr 접합 계면의 미세구조 및 원소 분포 경향을 살펴보았다. 분석 결과, W/Cu 접합 계면에서는 관찰된 영역 내에서 뚜렷한 상호 확산층이 확인되지 않았으며, 비교적 명확한 계면이 형성되어 있는 것으로 판단된다. 한편 CuCrZr 소재에서는 일반적인 시효경화 조직에서 보고되는 미세 석출물과는 다소 상이하게, 상대적으로 조대화된 형태의 Cr-rich 석출상이 관찰되었으며, Cu 기지(matrix) 내에는 Cr 및 Zr이 거의 고용되어 있지 않은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 디버터 제조 과정에서 부여된 열이력이 CuCrZr 합금의 석출 거동에 영향을 미쳤을 가능성을 시사하며, 과시효(over-aging) 경향과 관련이 있는 것으로 추정되나, 이에 대해서는 초기 상태의 CuCrZr 튜브 및 시효 조건별 대조군 분석 등을 통한 보다 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 아울러 Cu/CuCrZr 접합부에서는 계면을 따라 CuCrZr 모재 내부에서는 관찰되지 않았던 Zr 농축 영역이 국부적으로 존재하는 것이 확인되었으며, 이는 접합 공정 중 열이력에 의한 Cr 및 Zr의 재분포 가능성을 시사한다. 본 연구에서 확인된 미세조직 및 원소 분포 경향은 W/Cu/CuCrZr 디버터의 초기 상태를 이해하는 데 참고 자료가 될 수 있으며, 이를 바탕으로 향후 열적·기계적 특성과의 상관관계를 추가적으로 검토할 예정이다.

P8 : 가공-용접 및 접합
Room 1층 전시홀, 10월 28일

[P8-1]
FSP를 통한 듀플렉스 스테인리스강 전자빔 용접부의 CISCC 저항성 향상: 이재훈, 백종민, 이아름(국립창원대학교), 하종문(두산에너빌리티), 홍현욱*(국립창원대학교)
Keywords: Duplex Stainless Steel, Electron Beam Welding, Friction Stir Processing, U-bend, CISCC
듀플렉스 스테인리스강은 페라이트계 및 오스테나이트계 스테인리스강 대비 우수한 기계적 물성과 내식성을 동시에 갖추어 해양 구조물에 폭넓게 적용되고 있다. 이러한 해양 구조물은 대부분 해안 지역에 설치되므로 염분에 의한 염화물 응력 부식 균열(Chloride Induced Stress Corrosion Cracking, CISCC)에 노출될 위험이 존재한다. 이에 따라 CISCC 저항성 확보가 필수적인데, CISCC는 주로 용접 열영향부에서 탄화물 또는 시그마(σ)상이 석출되면서 주변 Cr이 결핍되어 발생한다. 본 연구는 canister 전자빔 용접부(EBW) 표면에 마찰교반가공(FSP)을 적용했을 때 미세조직이 어떻게 변화하며, 이것이 CISCC 저항성에 어떤 영향을 미치는지 규명하고자 하였다. 모재는 페라이트와 오스테나이트가 유사한 상분율로 존재하였으며, 전자빔 용접부의 미세조직은 페라이트와 함께 grain boundary austenite(GBA), intra-granular austenite(IGA), Widmanstatten austenite(WA)로 이루어졌다. 용접부의 상분율은 페라이트 58.4 %, 오스테나이트 41.6 %였으나, FSP 적용 후에는 오스테나이트 70.0 %, 페라이트 29.9 %, 시그마상 0.1 %로 변화하였다. 표면부는 동적재결정에 의해 결정립이 뚜렷하게 미세화되었고(모재 약 17.3 μm, 용접부 약 51.9 μm, FSP 영역 약 2.6 μm), 동시에 높은 변형률(strain)이 분포하는 것으로 나타났다. 이러한 결정립 미세화는 Cr이 입내에서 입계까지 확산되는 거리를 단축시켜 입계를 통한 표면 확산을 용이하게 하고, 결과적으로 표면에 더 두꺼운 부동태 피막(passive film)을 형성함으로써 CISCC 저항성을 향상시킬 것으로 판단된다. 아울러 FSP tool의 마모로 유입된 텅스텐에 의한 강화 효과도 FSP 영역에서 관찰되었다. FSP를 통한 결정립 미세화가 실제로 CISCC 저항성 향상에 기여하는지 확인하기 위해 U-bend 염수 분무 시험을 진행하였다. EBW 용접부 표면에서는 다수의 pitting corrosion과 함께 EDS 분석(Cr 증가, Fe 감소)을 통해 미세한 CISCC도 확인되었다. 반면 FSP 처리된 표면에서는 pitting이나 CISCC가 전혀 관찰되지 않았다. 이를 통해 FSP를 이용한 미세조직 제어가 CISCC 저항성 향상에 효과적임을 검증하였다.

[P8-2]
Cu 기판의 표면 조도 정량화에 따른 Ag 소결 접합층의 기계적 특성 평가: 황승환, 현승균*(인하대학교), 김근수(호서대학교), 백정연, 이수현(인하대학교)
Keywords: 소결, 접합, 표면조도
차세대 전력 반도체 패키징 분야에서 Ag 소결 접합은 우수한 방열 특성과 고온 신뢰성으로 주목받고 있다. 기존 연구들에 따르면 기판의 표면 조도가 접합 강도에 유의미한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나, 기계적 및 화학적 연마를 통한 조도 형성은 무작위적 특성을 띠어 정량적인 제어와 분석에 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 Cu 기판 표면에 인위적이고 정량화된 미세 패턴을 형성하여 표면 조도가 Ag 소결 접합층의 기계적 특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 정량적 패턴 구현을 위해 10×10 mm 규격의 Cu 기판에 OHP 투명 점착 필름(두께 0.188 mm) 기반의 0.7×0.7 mm (5×5 배열) 마스크를 부착하고, 구리 식각액을 이용한 습식 식각을 진행하여 목표 깊이 30 μm의 미세 홈을 형성하였다. 특히, 습식 식각 특유의 등방성 식각 현상과 미세 가공된 마스크의 둥근 모서리 형태를 역이용하여 접합부의 구조적 안정성을 도모하였다. 이러한 완만한 곡면 형태의 홈 구조는 Ag 페이스트 도포 시 유체의 표면 장력에 의한 모서리부 미충진 결함을 억제하여 젖음성을 향상시킨다. 또한, 소결 완료 후 외부 하중 인가 시 발생할 수 있는 응력 집중 현상을 효과적으로 완화하여, 페이스트와 기판 간의 기계적 맞물림 효과를 극대화할 수 있다. 본 연구에서는 정량적 단차 구현을 위한 최적의 식각 시간을 도출하여 표면 조도를 균일하게 제어한 후 Ag 소결 접합을 진행한다. 최종적으로 정량화된 조도 패턴이 전단 강도 등 기계적 특성 향상에 기여하는 메커니즘을 분석하고, 신뢰성 높은 다이 접합 공정을 위한 표면 제어 가이드라인을 제시하고자 한다.

[P8-3]
AA6061-T6 판재의 마찰교반용접 시 열입량이 접합부의 기계적 특성에 미치는 영향: 윤영식, 이광진*(한국생산기술연구원)
Keywords: 마찰교반용접(FSW), AA6061-T6, 열입량(Heat input), 기계적 특성, 미세조직
기존 용융 용접은 과도한 열 발생으로 인한 열변형 및 강도 저하 문제가 존재하며, 이를 보완하기 위해 고상 용접 기술인 마찰교반용접(FSW)이 널리 활용되고 있다. 그러나 FSW 역시 공정 중 과도한 열이 입력될 경우 접합부의 미세조직 변화 및 물성 약화를 초래할 수 있으므로, 적절한 열입량 제어가 필수적이다. 본 연구에서는 AA6061-T6 2mmt 판재의 FSW 공정에서 열입량이 접합부 특성에 미치는 영향을 규명하고 최적 공정 조건을 도출하고자 하였다. Tool의 회전 속도와 이송 속도를 조합하여 총 7가지 조건으로 시편을 제작하고 조건별 열입량을 산출하였으며, 인장시험 및 미세경도 측정을 통해 기계적 특성을 평가하였다. 실험 결과, 일정 수준 이상의 열입량이 가해질수록 상온 인장강도와 경도가 감소하는 경향성을 확인하였다. 이는 과도한 열 입력이 재료의 열영향부(HAZ) 및 교반부(SZ) 내 연화 현상을 유발하며, FSW 공정 시 적절한 열입력이 재료에 가해져야 함을 의미한다. 본 연구 결과는 AA6061-T6 FSW 적용 시 고품질 접합부를 확보하기 위한 공정창(Process window) 설정의 기초 데이터로 활용될 수 있다.

[P8-4]

Zr-Ti계 저융점 비정질 삽입재를 이용한 Ti의 천이액상 확산접합 및 계면반응: 김태엽, 김동우, 노주림, 이진규*(국립공주대학교)

Keywords: 삽입재, 천이액상 확산접합, 비정질, 계면, 확산

티타늄 및 그 합금은 높은 비강도와 우수한 내식성을 바탕으로 항공우주, 해양 및 의료 산업에서 널리 활용되고 있다. 그러나 고온 접합 과정에서 발생할 수 있는 α-β 상변태는 모재의 변형 및 미세조직 변화를 유발할 수 있으므로, β 천이온도 이하에서 건전한 접합부를 형성할 수 있는 저온 접합 공정이 요구된다. 천이액상 확산접합(Transient Liquid Phase, TLP)은 저융점 삽입재를 일시적으로 용융시킨 후, 융점 저하 원소의 모재 내 확산에 의해 액상 조성이 변화하면서 등온응고가 진행되는 접합 공정이다. 특히 융점 저하 원소의 확산과 이에 따른 등온응고는 접합부 내 잔류 액상 및 취성 반응상의 형성과 계면 미세조직에 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 Ti의 저온 TLP 접합을 위해 멜트 스피닝 공정을 이용하여 Zr-Ti-Co-Cu계 저융점 비정질 삽입재를 제조하였다. 제조된 삽입재의 비정질 형성 여부와 용융 거동을 분석하고, 제조된 비정질 리본을 적용하여 β 천이 온도 이하에서 Ti의 TLP 접합을 수행하였다. 접합온도에 따른 계면 미세조직과 원소 분포 변화를 주사전자현미경(SEM) 및 전자탐침미량분석(EPMA)을 이용하여 분석하였으며, 이를 바탕으로 삽입재 구성 원소의 확산과 계면 반응층의 형성을 고찰하였다. 또한 TLP 접합에서의 등온응고 거동을 정량적으로 평가하기 위해 확산 지배 이동 경계면 모델(moving boundary model)을 적용하고, 주요 융점 저하 원소인 Co와 Cu의 확산에 따른 등온응고 완료 시간을 계산하였다. 계산 결과를 실험적으로 관찰된 접합부의 원소 분포 및 미세조직과 비교하여, 접합 유지시간에 따른 등온응고 및 계면반응의 변화를 고찰하였다.

[P8-5]

고강도 알루미늄 합금 마찰교반접합(FSW) 접합부의 미세조직 및 기계적 특성 평가: 김한중, 김경일*, 김문조, 김동응, 배장현, 김석진(한국생산기술연구원)

Keywords: Friction Stir Welding, AA7075, Microstructure, Mechanical property

고강도 알루미늄 합금 중 하나인 AA7075(Al-Zn-Mg-Cu)는 산업적으로 사용되는 대표적인 고강도알루미늄 합금이며, 우수한 강도 대 중량비 덕분에 다양한 차량 및 항공구조 응용 분야에서 적합하다. 하지만 이러한 합금은 GTAW 및 GMAW와 같은 기존 용융용접 공정에서 응고 균열에 대한 민감도가 높아 용접성이 낮으며, 용융 및 응고 과정에서 발생하는 편석과 열 영향에 의해 기계적 특성을 저하시킬 수 있다. 따라서 마찰교반용접(FSW)을 이용하여, 재료를 용융시키지 않는 고상접합용접을 통해 열 입력을 최소화하여 합금의 강도 저하나 미세조직 변화를 상대적으로 줄일 수 있다. 본 연구에서는 고강도 AA7075 합금의 용융용접에서 발생하는 문제점을 극복하기 위해 마찰교반용접(FSW)을 적용하였다. 두께 33 mm의 AA7075 합금에 대해 마찰교반용접(FSW)을 수행하여, 접합부의 미세조직 및 기계적 특성을 평가하였다. 광학현미경(OM)을 이용하여 거시조직 및 미세조직 관찰하고, 접합부에 대하여 인장시험 및 경도시험을 수행하였다. 추가적으로, SEM을 이용해 파단면의 형상 및 파괴 양상을 관찰함으로써 미세조직 변화와 기계적 특성 간의 상관관계를 규명하고자 하였다.

[P8-6]

Interfacial and Mechanical Characteristics of Cold-Sprayed Stainless Steel/Aluminum Dissimilar Joints: Minjune Park, Hwasung Yeom*, Jinwook Choi, Ganghyeon Bae, Doowon Jung(POSTECH)

Keywords: Stainless Steel, Aluminum, IMC, Cold-Spray, metalizing, interfacial strength

Stainless steel (SS)/aluminum (Al) dissimilar joints are of industrial importance for lightweight structural applications. However, dissimilar joining SS and Al remain challenging because of their dissimilar thermophysical properties and the formation of brittle Fe–Al intermetallic compounds during fusion based joining. Cold spray offers a solid-state route for producing SS/Al joints through high velocity particle impact without bulk melting. In this study, STS304L and STS430 powder were deposited onto A356-T6 aluminum alloy substrates to investigate the effects of coefficient of thermal expansion (CTE) of depositing material and traverse speed on interfacial and mechanical characteristics. Cross sectional microstructures and elemental distributions at the SS/Al interfaces were characterized by SEM/EDS to evaluate particle deformation, interfacial morphology, and localized elemental mixing. Specimen curvature was quantified to determine residual stress development in the coated samples. The results show the relationships of processing, structure, and property governing cold sprayed SS/Al dissimilar joints.

[P8-7]

방열부품 적용을 위한 무산소동의 확산접합 및 접합특성 평가: 이동혁, 권희정, 김태균, 김대식, 노상훈*(국립부경대학교 / Pukyong National University)

Keywords: 무산소동 (Oxygen-free copper), 방전 플라즈마 소결 (Spark plasma sintering), 확산접합 (Diffusion bonding), 미세조직 (Microstructure)

AI 반도체 및 고성능 전자기기의 발열 문제가 심화됨에 따라 우수한 열 분산 능력을 갖춘 방열부품의 수요가 급증하고 있다. 내부에 미세 모세관 구조(Wick) 및 채널을 포함하는 구조를 가지는 방열부품을 제작하기 위해서는 접합 공정 시 채널의 소성 변형을 방지함과 동시에 내부 냉각재 유지를 위한 완벽한 기밀성 확보가 필수적이다. 기존의 고온 융착 방식은 미세 구조의 붕괴를 초래할 수 있어 정밀한 확산접합 공정의 도입이 요구된다. 본 연구에서는 무산소동(Oxygen-free copper, OFC) 판재에 방전 플라즈마 소결(Spark plasma sintering, SPS) 공정을 활용하여 확산접합을 수행하였다. 접합부 산화막을 제거하기 위해 저농도 황산용액으로 표면 전처리를 수행한 후, 대기 노출을 최소화하여 챔버에 장입하였다. 확산 접합 공정은 내부 미세 채널의 소성 변형을 최소화하기 위해

8 MPa의 저압 조건에서 수행되었다. 접합 온도는 무산소동 국부적 용융을 방지함과 동시에 원자 확산을 극대화할 수 있는 온도로 최적화하였으며 유지 시간을 다양하게 조절하여 접합부 미세조직 변화를 관찰하였다. 광학현미경을 통한 단면 관찰 결과, 짧은 접합 시간에서는 미세 기공(Void)이 일부 관찰되고 접합 계면의 흔적이 잔존하였다. 반면 30분 유지 조건에서는 산화막의 방해 없이 계면을 가로지르는 원자의 충분한 상호 확산 및 결정립 성장이 이루어져 접합 경계면이 소멸된 완벽한 야금학적 결합 조직이 형성됨을 확인하였다. 이는 접합부 전처리 직후 즉시 장입과 정밀한 온도, 압력 제어가 무산소동의 우수한 접합부 미세조직 형성에 복합적으로 기여하였다고 판단된다. 향후 전단강도(shear strength) 평가를 통해 공정 조건에 따른 접합 건전성 평가를 수행하고자 한다.

[P8-8]

Lotus Cu를 적용한 Cu–Sn TLP 접합부의 미세조직 및 접합 특성: 이수현(인하대학교), 김근수(호서대학교), 현승균*(인하대학교)

Keywords: Lotus Cu, Unidirectional Porous Cu, TLP bonding, IMC

고출력 및 고집적 전력반도체의 적용이 확대됨에 따라 고온 환경에서 안정적으로 사용할 수 있는 접합 기술의 중요성이 증가하고 있다. 천이액상확산(Transient Liquid Phase, TLP) 접합은 저융점 금속의 확산 반응을 통해 고융점 금속간화합물(intermetallic compound, IMC)을 형성함으로써 우수한 고온 신뢰성을 확보할 수 있는 기술로 주목받고 있다. 특히 일방향으로 배열된 기공 구조를 갖는 다공성 구리(Lotus Cu)는 기존 Conventional Cu와 다른 확산 및 응력 거동을 나타낼 수 있어 Cu–Sn계 TLP 접합부의 미세조직과 기계적 특성에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 본 연구에서는 Lotus Cu interlayer를 적용한 Cu–Sn TLP 접합부를 대상으로 접합 압력과 고온 열처리 조건에 따른 미세조직 변화 및 기계적 거동을 분석하였다. 다양한 압력 조건에서 thermo-compression 접합을 수행한 후 고온 열처리를 실시하였으며, 열처리 시간에 따른 잔류 Sn의 변화와 IMC 층의 성장 거동을 정량적으로 평가하였다. 또한 전단 시험을 통해 Lotus Cu 적용 접합부와 비교 구조의 기계적 특성을 비교하고, 파단면 및 단면 분석을 통해 열처리 조건에 따른 파괴 위치와 파괴 양상의 변화를 확인하였다. 그 결과, 열처리 시간이 증가함에 따라 잔류 Sn 영역은 감소하고 IMC 층은 지속적으로 성장하는 경향을 나타냈으며, Lotus Cu 적용 접합부는 비교 구조와 상이한 전단 및 파괴 거동을 보였다. 또한 열처리 진행에 따라 주요 파괴 영역이 잔류 Sn이 존재하는 영역에서 성장한 IMC 영역으로 변화하는 경향이 확인되었다.

[P8-9]

단조재-적층제조재 17-4PH 스테인리스강 이종 용접부의 열영향부 석출 거동 및 후열처리 최적화: 황동현, 주하연, 김종훈(국립창원대학교), 이지원(두산에너빌리티 AM개발팀), 홍현욱*(국립창원대학교)

Keywords: 17-4PH Stainless steel, Dissimilar Welded Joints, Heat treatment optimization, Mechanical properties

17-4 PH (Precipitation Hardening) 스테인리스 강은 고강도, 우수한 내식성 및 경화 능력으로 인해 항공, 우주, 방산, 해양 등 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 해당 산업에서는 보다 더 복잡한 소재 요구가 증가하고 있으며, 일반적인 제조 방법으로는 구현하기 어려운 형상의 부품 생산이 필요한 상황이다. 최근 연구들은 이러한 문제를 해결하기 위해 적층 제조된 17-4 PH 스테인리스강의 미세구조 및 기계적 특성을 단조재와 비교하는데 중점을 두고 있다. 3D 프린팅 기술은 복잡한 형상을 정밀하게 구현할 수 있다는 장점이 있지만, 제작 가능한 부품 크기에는 한계가 존재한다. 이러한 문제점을 해결하고자, 본 연구에서는 L-PBF방식으로 제작된 17-4PH 스테인리스 강과 단조된 17-4 PH 스테인리스강 간의 이종 용접부 특성을 조사하고자 하였다. 본 연구에 사용된 AM재와 단조재 모재 모두 full-martensite 조직을 가지고 있으며, AM재에 비해 단조재의 결정립이 더 미세함을 확인하였다. 이러한 두 모재를 GTAW와 EBW 방식으로 용접한 후, 미세조직 및 기계적 특성 평가를 위해 SEM 분석 및 비커스 경도, 인장 평가 등을 실시하였다. 비커스 경도 측정 결과를 통해 단조재와 AM재의 열 영향부 석출 거동이 다름을 확인하였다. 이에 대한 결과로부터 변형 거동을 확인하기 위해 인장 시험을 시행하였다. 상온 인장 시험 결과 용접 열 영향부에 발생한 경도차에 의한 strain imcompatiability에 의해 가장 낮은 경도값을 나타내는 영역에서 파단이 발생함을 확인하였다. 이 결과를 바탕으로, 본 연구에서는 AM 및 단조 17-4PH 스테인리스 강의 이종 용접 시의 석출 거동 평가와 이로 인한 strain imcompatiability를 제어하는 후열처리 방법을 제안하고자 한다.

[P8-10]

빔 와블링 진폭 제어가 Al/Cu 이종 레이저 용접부의 미세조직 및 피로 수명에 미치는 영향: 윤성민, 유채은(부산대학교), 김용(고등기술연구원), 이제인*(부산대학교)

Keywords: 레이저 와블 용접, 이종 접합, 금속간화합물, 피로

알루미늄과 구리 이종 레이저 용접 시 생성되는 금속간화합물(Intermetallic Compounds, IMC)은 접합부의 기계적 신뢰성을 저하시키는 주요 원인이다. 특히 전기자동차용 배터리 팩은 주행 중 지속적인 진동 및 반복 하중에 노출되므로, 이종 용접부의 피로 수명 확보가 필수적이다. 본 연구에서는 빔 와블링 진폭(0 ~ 0.5 mm)이 Al/Cu 레이저 용접부의 미세조직 변화 및 피로 거동에 미치는 영향을 규명하였다. 피로 시험은 주파수 10 Hz, 응력비(R) 0.1 조건에서 인장강도의 30 ~ 90% 수준으로 하중을 설정하여 수행하였다. 시험 결과, 와블링 진폭이 0.4 mm 이상으로 증가함에 따라 단일 직선 용접 대비 피로 수명이 수십 배 이상 대폭 향상되었다. 이는 고진폭 조건에서 하판 구리의 부분 용융으로 인해 IMC 층이 얇게 형성되고, 연성이 뛰어난 구리 모재가 균열 전파를 지연시키기 때문이다. 반면 저진폭 조건에서는 구리 하판이 두께 방향으로 완전히 용융되면서 알루미늄 용융부 중앙과 구리 용융선을 따라 두꺼운 IMC 층이 형성되었고, 이 취성 영역을 따라 피로 균열이 급격히 전파되어 수명이 저하되는 것으로 판단된다.

[P8-11]

Ti 브레이징 접합부의 계면 반응 및 기계적 특성에 미치는 표면 거칠기의 영향: 김동우, 노주림, 이윤서, 이진규*(국립공주대학교)

Keywords: 접합, 표면 거칠기, 브레이징, 계면, 확산

브레이징은 액상 삽입재를 이용해 낮은 온도에서 금속학적 접합을 형성하는 공정으로, 모재의 용융과 열변형을 효과적으로 억제할 수 있다는 장점이 있다. 특히, Zr-Ti계 비정질 삽입재는 낮은 용융점, 균일한 조성, Ti계 소재와의 우수한 계면 반응성으로 Ti 브레이징용 삽입재로 주목받고 있다. 접합부의 형성은 삽입재의 젖음 및 퍼짐 거동과 모재-삽입재 간 계면 반응에 의해 결정되며, 이는 삽입재 조성, 브레이징 조건, 모재 표면 상태에 따라 달라진다. 선행 연구에 따르면 모재 표면 거칠기와 형상이 삽입재의 젖음, 접합면의 접촉 상태, 접합 강도에 영향을 미친다. 따라서 Ti 브레이징 공정에서도 모재 표면 거칠기에 따른 계면 반응과 접합 특성 변화를 체계적으로 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 Zr-Ti계 비정질 삽입재를 이용해 Ti 브레이징 접합부를 제조하고, Ti 모재의 표면 거칠기가 접합부의 계면 반응과 기계적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 평가하였다. Ti 접합면을 다양한 표면 거칠기로 가공한 뒤 동일한 브레이징 조건에서 접합을 수행하고, 표면 상태에 따른 삽입재의 젖음성과 확산 거동을 비교 분석하였다. 또한, 접합부의 미세조직과 원소 분포를 분석하여 계면 반응 및 반응층 형성 거동을 관찰하고, 기계적 특성 및 파괴 거동 평가를 통해 미세조직과 접합 특성 간의 상관관계를 고찰하였다

[P8-12]

GMAW로 용접된 HY-60강의 응력별 피로시험편의 파면 및 미세조직 분석: 김현일, 최재성(동의대학교 신소재공학과, BB21plus), 이상필, 이진경(동의대학교 기계공학과), 배동수(동의대학교 신소재공학과), 조일국*(동의대학교 신소재공학과, BB21plus)

Keywords: GMAW 용접, HY-60강, 피로파괴, 열영향부(HAZ), 파면분석, 미세경도, 아립계

용접구조물은 반복하중 하에서 피로파괴에 취약하며, 용접금속(WM) 및 열영향부(HAZ)는 모재(BM)와 미세조직이 상이하여 피로균열의 개시 및 전파 거동도 모재와 다르게 나타난다. 본 연구에서는 항복강도 약 400 MPa, 인장강도 800 MPa급의 HY-60강을 GMAW로 용접한 시험편에 대해200~400 MPa 응력수준의 피로시험을 수행하고, 파단 시험편의 용접부 및 파면을 광학현미경 (OM), 주사전자현미경 (SEM), 에너지분산형 X선분광법 (EDS), 전자후방산란회절 (EBSD)로 분석하였으며 마이크로 비커스 경도(0.5 mm 간격)를 함께 측정하였다. 육안 및 침투탐상 관찰 결과 WM/BM 경계부를 따라 macro crack 및 slip band가 나타났고, 피로파괴는 응력수준에 관계없이 공통적으로 HAZ와 BM의 경계부에서 발생하였다. OM·SEM 관찰에서 WM은 HAZ에 수직에 가까운 방향으로 수지상(dendrite) 성장을 보였으며 이 성장 방향을 따라 균열이 발생한 반면, BM은 결정립계를 따른 입계균열과 입내 슬립이 관찰되었고 BM/HAZ 경계에 가까울수록 균열 및 그 전파 흔적이 뚜렷하였다. EDS 분석에서는 WM 용접 패스의 삼중 겹침 영역에서 Ti-Al-V계 석출물 및 탄·산화물이 검출되었다. EBSD(KAM) 분석 결과 HAZ에는 급냉으로 인해 미세한 아립계가 형성되었고 이 아립계 주변에 응력이 집중되어 미세균열 개시의 원인이 될 수 있음을 확인하였다. 파면에서는 균열 개시부와 전파부에서 striation과 river pattern이, 최종파단부에서는 dimple을 동반한 연성파면과 3 μm 이하의 미세 pore가 다수 관찰되어 전형적인 피로파면 특징(beach mark, striation)을 나타내었다. 마이크로 비커스 경도는 WM > HAZ > BM 순으로 나타났고, WM 내에서는 급냉부(bottom)와 서냉부(up)의 경도가 유사한 반면 중앙(middle) 영역이 가장 높았다. 이상의 결과로부터, HAZ 인근에서 성장한 결정립과 그 입계의 석출물·아립계가 응력 집중 지점으로 작용하여 cavity 생성과 균열 전파의 주요 경로를 제공하였다. 본 결과는 GMAW 용접 구조물의 피로수명 예측 및 설계 시 HAZ/BM 경계부의 미세조직 제어가 중요함을 시사한다.

[P8-13]

Grain Refinement and Oxidation Reduction in the Cladding-Layer Weld of Ti Clad Carbon Steel Material Using Dynamic Wire Feed TIG (DWF-TIG): Jisu Kim, 이희근(Research Institute of Medium&small Shipbuilding (RIMS)), 유경훈(Wooyang HC), 김성웅(SeAH Steel), 안현준*(Research Institute of Medium&small Shipbuilding (RIMS))

Keywords: Ti클래드, TIG 용접, GTAW 용접, 진동 와이어

Ti clad materials, which combine the structural strength of the base metal with the corrosion resistance of the titanium layer, are widely applied in marine structures and heat exchangers. However, grain coarsening and oxidation embrittlement caused by the absorption of oxygen and nitrogen during welding of the cladding layer remain major factors degrading the reliability of the joint. In this study, dynamic wire feed TIG (DWF-TIG, hot-wire TIG with mechanical wire oscillation) was applied exclusively to the titanium cladding layer, and the resulting weld microstructure and oxidation behavior were evaluated. DWF-TIG combines filler-wire preheating with mechanical wire oscillation, thereby reducing the energy burden required for the arc to melt the filler wire while simultaneously increasing the deposition rate and, consequently, the travel speed. This leads to a reduction in heat input per unit length (J/mm). In addition, weld pool agitation induced by wire oscillation is known to increase nucleation sites during solidification, promoting grain refinement. In this study, DWF-TIG was applied to a Ti clad carbon steel material under various welding conditions, and the grain size, surface oxidation color, and corrosion characteristics of the weld metal and heat-affected zone (HAZ) were compared with those obtained using conventional cold-wire TIG welding. A tendency toward grain refinement in the weld metal and HAZ is expected as a result of the reduced heat input, and a corresponding decrease in the extent of surface oxidation discoloration is anticipated due to the shortened peak temperature exposure and dwell time within the HAZ. These results are expected to demonstrate that DWF-TIG is a viable alternative for achieving simultaneous grain refinement and reduced oxidation in the welding of the cladding layer of Ti clad materials.

[P8-14]

오스테나이트계 고용강화형 내열합금의 아크용접 공정에 따른 다층용접부의 미세조직 변화: 오정민(국립부경대학교), 이윤상(두산에너빌리티), 천은준*(국립부경대학교)

Keywords: High-temperature structural alloy, Solid-solution strengthened alloy, Multi-pass welding, Remelted weld metal, Reheated weld metal, Microstructural evolution, Carbide precipitation

에너지 수요 증가에 따라 고효율 및 고유연성 에너지 시스템에 대한 관심이 확대되고 있으며, 소형 모듈 원자로(Small Modular Reactor, SMR)와 같은 차세대 고온 원자로를 포함한 고온 운전 환경에서는 구조재 및 용접부의 신뢰성이 중요한 요소로 부각되고 있다. 오스테나이트계 고용강화형 내열합금은 우수한 고온강도와 내식성을 바탕으로 고온 구조용 후보 재료로 검토되고 있다. 그러나 이러한 재료에 다층패스 아크 용접이 적용될 경우, 용접부와 열영향부에서 복합적인 미세조직 변화가 발생할 수 있으므로 이에 대한 체계적인 평가가 필요하다. 현재까지 이와 관련 연구는 특정 용접방법이나 용접조건을 적용하여 용접부의 특성 평가에 집중된 경우가 많아, 고온 원자로 제작을 위해 다양한 아크 용접 공정을 적용한 다층패스 용접부의 미세조직 변화 거동을 종합적으로 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 고용강화형 내열합금에 대해 서로 다른 용접 입열 조건으로 다층패스 아크용접을 수행하고, 용접금속과 용접열영향부의 결정립 변화와 석출 거동을 분석하였다. 경도 분포와 미세조직 관찰 결과를 바탕으로 다층 용접 과정에서 형성되는 서로 다른 용접금속 영역의 특성을 구분하여 비교하였으며, 열이력에 따른 조직 변화 양상을 함께 고찰하였다. 아울러 미세조직 특성과 결정학적 분석 결과를 연계하여 다층패스 용접 시 나타나는 조직 변화 경향을 분석하였다. 이를 통해 다층패스 용접 과정에서의 재용융 및 재가열 영향에 따른 미세조직 변화 특성을 비교하고, 입열 조건에 따라 용접부 및 열영향부의 거동이 달라질 수 있음을 확인하였다.

[P8-15]

고온용 니켈기 합금 다층 용접부의 고온균열 거동 정량적 평가: 김희은, 천은준*(국립부경대학교), 정수경(고려용접봉), 이윤상(두산에너빌리티)

Keywords: Key Words: High-temperature nickel-based alloy, Arc welding process, Multi-pass weld metal, Hot cracking, Crack susceptibility

최근 첨단 산업의 성장과 함께 안정적인 전력 공급의 중요성이 높아지면서, 소형 모듈 원자로(Small Modular Reactor, SMR)과 같은 차세대 에너지 시스템용 소재 및 용접 기술에 대한 관심이 확대되고 있다. 고온용 니켈기 합금은 우수한 고온 기계적 특성과 내식성을 바탕으로 가혹한 운전 환경의 구조부재 및 주요 부품용 소재 후보로 검토되고 있다. 그러나 해당 합금의 용접부에서는 고온균열 발생 가능성이 존재하며, 소형화·고신뢰성 운전 조건이 요구되는 점을 고려할 때 용접 재료와 공정, 그리고 용접조건에 따른 균열 민감도에 대한 체계적인 평가가 필요하다. 본 연구에서는 고온용 니켈기 합금을 대상으로 서로 다른 용접재료 및 아크용접 공정을 적용하여 다층 용접부를 제작하였다. 용접재료와 용접공정에 따른 고온균열 민감도는 정량적 평가 기법을 활용하여 비교하였으며, 이를 바탕으로 건전한 다층 용접부를 확보한 후 기계적 특성을 포함한 용접부 성능을 평가하였다. 이를 통해 다층 용접부의 고온균열 거동에 영향을 미치는 요인을 비교 분석하고, 관련 용접재료 및 공정 적용 시 고려사항을 도출하였다.

P9 : 알루미늄
Room 1층 전시홀, 10월 28일

[P9-1]

기계학습을 통해 제안된 Al-Zn-Mg-Cu합금의 시효처리에 따른 기계적특성 변화: 이의재, 어광준*(한국재료연구원, 과학기술연합대학원대학)

Keywords: 7000계 알루미늄 합금, 시효처리, 과시효처리, 인장물성, 석출거동

알루미늄 7000계 합금은 우수한 비강도와 경량 특성으로 인해 항공기용 구조재로 널리 활용되고 있다. 최근에는 차세대 고강도·경량 합금 개발을 위해 인공지능(AI) 및 머신러닝(Machine Learning)을 활용한 데이터 기반 합금 설계 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 준지도 오토인코더 기반의 능동학습을 통하여 도출된 후보합금에 대하여 시효 열처리 조건을 변화시켜 석출 거동과 기계적 특성을 관찰하고자 하였다. 도출된 조성들은 배치당 1 kg으로 샘플러 주조하였으며 균질화 열처리 후 열간 및 냉간압연을 진행했다. 냉간압연 후 통상적인 T6 열처리(용체화 470 ºC 2시간, 시효 120 ºC 48시간)를 실시하였다. 본 연구에서는 인장특성이 가장 우수한 합금과 3종의 비교 합금을 이용하였다. 인장 특성이 가장 우수한 합금은 항복강도 611 MPa, 인장강도 645 MPa, 연신율 9.1%를 나타내었다. 각 열처리 단계(용체화 직후, 아시효, 피크 시효, 과시효)에서 미세조직, 경도, 인장 특성을 분석함으로써 열처리에 따른 미세조직 및 석출거동이 기계적 특성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

[P9-2]

Mechanical and Electrical Properties of Al Alloy Wire According to Multi-Pass Drawing Process: Hyeon-jun Heo, Gi-Hyun Lim, Hyunkyoo Cho, Seong-Hee Lee*(Mokpo National Univ.)

Keywords: aluminum alloy, cold drawing, microstructure, mechanical properties, electrical conductivity.

An aluminum alloy was newly designed to simultaneously enhance mechanical strength and electrical conductivity. Following casting and extrusion, the Al alloy wire was cold-drawn from 12 mm to 2 mm in diameter through 22 passes. The subsequent evolutions in microstructure, mechanical properties, and electrical conductivity were systematically investigated using SEM/EBSD analysis, hardness testing, tensile testing, and electrical conductivity measurements. During cold drawing, the initial recrystallization texture gradually transformed into a deformation texture with the preferential development of the {110}<111> orientation. The fraction of low-angle grain boundaries (LAGBs) increased from 72.1% to 89.2%, indicating continuous dislocation accumulation and subgrain formation, whereas the high-angle grain boundary (HAGB) fraction exhibited a slight recovery at the final drawing stage owing to dislocation rearrangement. With increasing drawing strain, the hardness and tensile strength increased substantially. Concurrently, the electrical conductivity exhibited an exceptionally minimal degradation, decreasing only slightly from 61.6% to 59.7% IACS. Compared with the previously reported Al-Fe-Mg-Cu-B alloy, the newly developed Al alloy wire exhibited a comparable yet slightly lower tensile strength but a significantly improved electrical conductivity. These findings demonstrate its high potential as a next-generation material for high-performance aluminum conductors. Acknowledgement: This research was supported by the ANCHOR program through the Jeollanamdo ANCHOR center, funded by the Ministry of Education(MOE) and the Jeonnam-Gwangju Special Metropolitan City, Republic of Korea.(2026-ANCHOR-14-001)

[P9-3]

Al-0.3Fe-(Ce, Y, Zr) 합금의 온도에 따른 전기적·기계적 특성 변화 및 미세조직학적 해석: 윤연희(한국재료연구원, 한양대학교), 이동윤(한국재료연구원), 김형준(한국재료연구원, 부산대학교), 안지혁, 오영석, 이윤수*(한국재료연구원), 장재일*(한양대학교)

Keywords: 알루미늄 합금, 미량 원소 첨가, 미세조직, 전기 전도도, 기계적 특성

전기차 산업의 확대와 에너지 효율 향상 요구가 증가함에 따라, 경량성과 높은 전기 전도도를 갖는 알루미늄 도전재의 중요성이 커지고 있다. 알루미늄은 낮은 밀도와 비교적 높은 전기 전도도를 나타내지만, 순 알루미늄은 기계적 강도가 낮아 적용 범위에 한계가 있다. 반면 강도 향상을 위한 합금 원소의 첨가는 전기 전도도의 저하를 수반할 수 있어, 전기 전도도와 기계적 특성 간의 상충관계를 고려한 합금 설계가 요구된다. 본 연구에서는 Al–Fe계 알루미늄 합금을 기반으로 Ce, Y 및 Zr을 단계적으로 첨가하여, 각 원소의 첨가에 따른 미세조직 변화를 전기 전도도 및 기계적 특성과 연계하여 분석하였다. 특히 고용 원자, 이차상 및 결정립 크기 등 주요 미세조직 인자가 두 특성에 미치는 영향을 구분하여 분석함으로써, 전기 전도도와 강도 간의 상충관계를 미세조직 수준에서 해석하였다. 또한 실제 작동 환경에서 발생할 수 있는 온도 상승을 고려하여, 25–80 ºC 범위에서 전기 전도도와 기계적 특성의 변화를 함께 평가하였다. 실험 결과, Ce 및 Y이 첨가된 합금에서는 전기 전도도와 강도가 동시에 향상되었으며, Zr이 추가된 합금에서는 가장 높은 강도를 나타낸 반면 전기 전도도는 감소하였다. 또한 온도가 상승함에 따라 모든 합금의 전기 전도도와 강도는 감소하였으나, Zr이 첨가된 합금에서 온도 변화에 따른 특성 감소율은 가장 작게 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 미량 원소의 단계적 첨가에 따른 미세조직 변화와 Al–Fe계 합금의 전기 전도도, 기계적 특성 및 온도 의존성 간의 관계를 규명하였으며, 고전도도·고강도 알루미늄 도전재 개발과 실제 사용 온도를 고려한 합금 설계를 위한 기초 자료를 제시하고자 하였다. (감사의 글) 본 연구는 2024년도 산업통상자원부(MOTIE) 및 산업기술기획평가원(KEIT)의 소재부품기술개발사업(RS-2024-00421212)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

[P9-4]

균질화 열처리 조건에 따른 AA6008 합금의 고온 비틀림 변형 거동 및 미세조직 변화: 강신욱(국립공주대학교 신소재공학부 금속재료전공), 김효섭, 김동응, 한철웅, 김양후(한국생산기술연구원), 이지운*(국립공주대학교 신소재공학부 금속재료전공)

Keywords: AA008 알루미늄 합금, 열처리, 열간 비틀림 시험, 미세구조

AA6008 알루미늄 합금은 Al-Mg-Si 계열의 열처리형 알루미늄 합금으로, 비교적 우수한 비강도와 성형성 및 내식성을 바탕으로 수송기기 및 구조용 부품 분야에서 활용되고 있다. Al-Mg-Si 계열 합금의 기계적 특성은 열처리 조건에 따라 형성되는 석출상, 결정립 크기 및 회복·재결정 거동에 큰 영향을 받는다. 특히 열간 성형 및 적층제조 후처리 공정에서는 소재의 초기 미세조직이 고온 변형 저항과 변형 중 미세조직 변화에 영향을 미치므로, 열처리 조건에 따른 고온 변형 거동의 체계적인 분석이 필요하다. 본 연구에서는 서로 다른 열처리 조건을 적용한 AA6008 알루미늄 합금의 고온 비틀림 변형 거동과 미세조직 변화를 분석하였다. AA6008 합금 시편은 실온 상태를 포함하여 열처리 온도 및 유지시간을 달리한 총 7개의 조건으로 준비하였으며, 각 시편에 대해 변형률속도 0.2 s^{-1} 조건에서 고온 비틀림 시험을 수행하였다. 비틀림 시험으로부터 얻어진 토크-회전수 데이터를 바탕으로 유동응력-변형률 거동을 비교하였으며, 변형 전후 시편의 미세조직은 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM) 및 에너지 분산형 분광분석(EDS)을 이용하여 분석하였다. 또한 열처리 조건별 경도 변화를 측정하여 미세조직 및 고온 비틀림 변형 거동과의 상관관계를 평가하였다. 실험 결과, 열처리 조건에 따라 AA6008 합금의 유동응력 및 변형 거동에서 차이가 나타났으며, 이는 열처리에 따른 석출상 변화, 결정립 특성 및 변형 중 회복·재결정 거동의 차이와 관련된 것으로 판단된다. 유지시간 및 열처리 조건에 따라 일부 시편에서는 미세조직의 균질화와 연화 거동이 나타났으며, 다른 조건에서는 상대적으로 높은 변형저항과 경도 변화가 관찰되었다. 이러한 결과를 통해 AA6008 알루미늄 합금의 열처리 조건이 초기 미세조직뿐만 아니라 고온 비틀림 변형 중 변형저항 및 미세조직 변화에 중요한 영향을 미침을 확인하였다. 본 연구 결과는 AA6008 합금의 열간 성형 및 적층제조 공정 후 열처리 조건 설정을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P9-5]

지연 퀜칭시킨 A356 합금에서 예비 시효가 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향: 윤영준(한국재료연구원, 부산대학교), 이정무, 이윤호, 어광준, 조영희(한국재료연구원), 강남현(부산대학교), 손현우*(한국재료연구원)

Keywords: Al-Si-Mg alloy, A356, Pre-aging, Delayed-quenching, Microstructure, Mechanical properties

경량화와 함께 산업에서 요구되는 특성을 맞추기 위하여 A356 주조 합금(Al-7Si-0.35Mg)의 기계적 특성에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. A356 합금은 열처리형 합금으로 용체화 처리 후 시효석출을 통해 기계적 특성을 향상시킬 수 있다. 즉, 용체화 처리 후 급랭을 통해 용질원소를 과포화 고용시키고 높은 농도의 공공을 형성시킨 후, 인공시효 과정에서 공공을 매개로 한 용질원소의 확산 및 강화상의 석출을 유도하는 것이다. 그러나, 용체화 처리후 실시하는 수냉 처리시 높은 내부 응력 발생으로 인해 뒤틀림 등의 변형이 발생하는 문제점이 있다. 이러한 문제를 보완하기 위해 일정 온도 이하에서 냉각하는 지연 퀜칭(delayed quenching)이 연구되어 왔으나, 용체화 처리후 냉각 속도(quenching rate)는 과포화 고용 상태에 영향을 주어, 일반적으로 수냉 처리보다 강화 효과가 낮은 것으로 알려져 있다. 따라서, 지연 퀜칭된 합금에서 기계적 특성을 개선하는 방안에 대한 모색이 필요하다. 열처리형 알루미늄 합금에서 인공시효를 하기 전에 저온에서 예비시효를 하는 연구가 진행되어 왔다. 예비 시효(pre-aging)는 시효 과정 초기에 형성되는 클러스터의 종류와 형태를 제어함으로써 인공시효 거동에 영향을 주는 것으로 알려져 있으며. 이를 통해 기계적 특성을 향상시킬 수 있다. 하지만, 수냉 처리와 달리 상대적으로 느린 냉각 과정을 거치는 지연 퀜칭시킨 합금에서 예비시효의 효과에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 지연 퀜칭시킨 A356 합금에서 예비시효가 기계적 특성에 미치는 영향을 검토하고자 하였다. 이를 위하여, A356 합금을 용체화 처리한 후 지연 퀜칭을 실시하고, 예비시효 및 인공시효를 실시하였다. 예비시효 처리 유무에 따라 인공시효 시간별 경도, 전기전도도의 변화를 관찰하고, 인장시험 등을 실시하여 기계적 특성을 평가하였다. 아울러, 수지상정에서 용질원자의 농도구배를 분석하고, 투과전자현미경으로 시효석출상의 변화를 관찰하여, 예비시효의 효과에 대하여 고찰하였다.

[P9-6]

Effect of Mn and Borax Complex Addition on Fe Removal and Refining Characteristics of ADC12 Casting Aluminum Alloy: ByeongKwon LEE, EunChan Ko(KITECH, Chonnam national university), YongHo Kim, HyoSang Yoo, HyeonTaek Son*(KITECH), TaeHoon Kim(Chonnam national university)

Keywords: ADC 12casting alloy, Iron removal, Melt refining

Fe impurities in ADC12 casting alloys form harmful needle-like compounds that degrade physical properties, and their removal efficiency via simple gravity settling is extremely low. This study proposes a melt refining process that maximizes Fe reduction efficiency by utilizing the synergistic effect of phase transformation induced by Mn addition and accelerated settling facilitated by Borax flux. The ADC12 melt, containing an initial 0.94 wt.% Fe, was melted at 750 ºC, followed by the addition of 0.6 wt.% Mn and 1.0 wt.% Borax, with the holding time controlled at 640 ºC. The analysis revealed that holding the melt at 640 ºC for 30 minutes reduced the Fe content to 0.637 wt.%, achieving a maximum reduction rate of 33%. Microstructural analysis demonstrated that the harmful needle-like phase was restructured into a polygon-shaped {Al(Fe, Mn)Si} phase, which is highly advantageous for gravity settling. However, a critical holding time was identified, as prolonged holding beyond 30 minutes caused the Fe concentration to increase again due to phase re-dissolution. These findings prove that highly efficient Fe reduction can be achieved solely through the optimal control of additives and holding time.

[P9-7]

$Al_{50}Mg_{30}Si_{10}Cu_5Zn_5$ 합금의 조대한 이차상과 나노 석출물 제어: 전정민, 박성현(전북대학교), 신은주(한국원자력연구원), 정재길*(전북대학교)

Keywords: Al-Mg_2Si alloy, Microstructure, Precipitation, Transmission electron microscopy, Small-angle neutron scattering

다성분 Al 합금은 낮은 밀도와 높은 비강도로 인해 경량 구조용 소재로 주목받고 있으며, 특히 Mg와 Si 함량이 높은 Al–Mg_2Si 계 합금은 높은 경도와 강도를 갖는 Mg_2Si상을 활용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 주조 과정에서 형성되는 조대한 Mg_2Si상은 응력집중 부위로 작용하여 합금의 기계적 특성을 저하시킬 수 있으므로, 이를 미세화하기 위한 미세조직 제어가 필요하다. 한편, Cu와 Zn과 같은 석출 형성 원소의 첨가는 후속 시효처리를 통해 추가적인 석출강화를 유도할 수 있으며, 다량의 합금원소를 포함하는 Al 합금에서는 기존 상용 Al 합금과는 다른 복잡한 나노 석출 거동이 나타날 수 있다. 따라서 조대한 Mg_2Si상의 미세화와 함께 시효 과정에서 형성되는 나노 석출물의 거동을 규명하는 것은 다성분 Al–Mg–Si–Cu–Zn 합금의 기계적 특성 향상을 위해 중요하다. 본 연구에서는 경량화를 목적으로 설계한 $Al_{50}Mg_{30}Si_{10}Cu_5Zn_5$ 합금의 P 첨가에 따른 이차상의 변화와 시효 처리에 따른 나노 석출 거동을 분석하였다. 이차상과 나노 석출물은 주사전자현미경(Scanning electron microscopy, SEM)과 투과전자현미경(Transmission electron microscopy, TEM)을 이용하여 분석하였으며, 나노 석출물의 화학조성과 밀도, 크기는 원자탐침단층분석(3D atom probe tomography, 3D-APT)을 통해 분석하였다. 또한, 소각중성자산란(Small-angle neutron scattering, SANS)을 이용하여 시효 과정에서 형성되는 나노 석출물의 크기와 분율 변화를 정량적으로 평가하였다. 이를 바탕으로 $Al_{50}Mg_{30}Si_{10}Cu_5Zn_5$ 합금의 미세조직과 기계적 특성 간의 상관관계를 규명하고자 하였다.

[P9-8]

Microstructure and Mechanical Properties of AA6061 Sheets Processed by Four-Layer Stack Cold Roll-Bonding and Conventional Rolling: Gi-Hyun Lim, Hyeon-jun Heo, Handong Cho, Seong-Hee Lee*(Mokpo National Univ.)

Keywords: Cold roll-bonding, AA6061 alloy, mechanical properties, microstructure, annealing

This study investigates the microstructural evolution and mechanical properties of AA6061 aluminum alloy sheets fabricated via a four-layer stack cold roll-bonding (4L-CRB) process followed by annealing. Commercial 1-mm-thick AA6061 sheets were stacked into four layers and successfully roll-bonded using a two-pass cold rolling process. For comparison, conventional rolling (CR) was also performed under the same ambient temperature conditions. The as-processed sheets from both CR and 4L-CRB exhibited typical deformation structures with grains elongated along the rolling direction. However, post-deformation annealing for 1 hour at temperatures ranging from 200 °C to 500 °C revealed distinct recrystallization behaviors between the two processes. Notably, at annealing temperatures above 350 °C, the 4L-CRB specimens demonstrated a significantly smaller and more homogeneous grain diameter compared to the CR counterparts. Consequently, the specimens processed by 4L-CRB exhibited superior mechanical properties over the CR specimens. Acknowledgement: This research was supported by the ANCHOR program through the Jeollanamdo ANCHOR center, funded by the Ministry of Education(MOE) and the Jeonnam-Gwangju Special Metropolitan City, Republic of Korea.(2026-ANCHOR-14-001)

[P9-9]

Microstructure and Mechanical Properties of Cold Roll-Bonded Layered Aluminum Sheets after Heat Treatment: Hyeon-jun Heo, Gi-Hyun Lim, Seong-Hee Lee*(Mokpo National Univ.)

Keywords: Cold roll-bonding, AA5052 alloy, Mechanical properties, Microstructure, Annealing

In this study, an AA1050/AA6061/AA1050 layered aluminum sheet was successfully fabricated using a cold roll-bonding (CRB) process, and the subsequent microstructural evolution and changes in mechanical properties during aging treatments were systematically investigated. Two commercial AA1050 sheets with a thickness of 1 mm and one AA6061 sheet with a thickness of 2 mm were stacked such that the AA6061 sheet was positioned between the two AA1050 sheets, and they were then roll-bonded to a final thickness of 2 mm by cold rolling after surface treatments including degreasing and wire brushing. The fabricated layered sheets were subsequently subjected to natural aging (T4) and artificial aging (T6) treatments. While the as-roll-bonded sheet exhibited a typical deformation structure with grains elongated along the rolling direction, the sheets after T4 and T6 aging treatments displayed a recrystallized structure consisting of coarse grains in both the AA1050 and AA6061 regions, with different grain sizes in each region. Consequently, an inhomogeneous hardness distribution developed along the thickness direction, where the AA6061 region maintained a higher hardness value than the AA1050 region after the aging treatments. Tensile test results revealed that the T6-treated specimen possessed higher tensile strength than the T4-treated one; however, the strength-ductility balance was significantly superior in the T4-treated specimen. Finally, the tensile properties of the layered aluminum sheets achieved in this study were compared and analyzed with those from previous studies, thereby validating the effectiveness of the proposed processing strategy. Acknowledgement This research was supported by the Regional Specialized University(Glocal University) 30 ANCHOR PROGRAM through the Jeollanamdo Anchor Center, funded by the Ministry of Education(MOE) and the Jeonnam-Gwangju Special Metropolitan City, Republic of Korea.(2026-ANCHOR-14-001)

[P9-10]

잔류 Mg의 S′상 석출을 통한 고온용 6xxx 압출재의 열안정성-강도-전도도 상충 특성 개선 : 김태연(한국재료연구원, 부산대학교), 이

윤호, 이상익(한국재료연구원), 강남현(부산대학교), 어광준, 손현우*(한국재료연구원)
Keywords: Al-Mg-Si(-Cu) 합금, 구리(Cu), 열안정성

열처리형 Al-Mg-Si(-Cu)계(6000계) 합금은 우수한 성형성, 높은 비강도, 내식성을 가져 자동차, 항공기 등 수송 분야의 구조재료로 널리 사용되어 왔다. 최근에는 AI 서버용 GPU의 열설계전력 증가와 전기차의 초급속 충전 기술 확산에 따라, 배터리 쉘 및 방열부품과 같이 구조적 강도와 열전달 특성을 동시에 요구하는 응용 분야로도 그 사용이 확대되고 있다. 그러나 이러한 부품은 열환경에 지속적으로 노출되어 과시효가 진행될 경우 기계적 특성이 저하되므로, 기존보다 높은 온도 영역에서도 우수한 열안정성을 확보하는 것이 요구된다. 합금원소 비율을 조정하여 Mg/Si ratio를 높일 경우 L상 형성이 지배적이 되어 열안정성은 향상되나, Mg-rich 조성에서는 강도와 전도도가 동시에 저하되는 문제가 발생한다. 이는 L상이 100% 형성되는 조건의 Mg/Si ratio가 3.0 이상인 반면, L상 자체의 Mg/Si ratio는 약 1.24에 불과하여, 이론상 첨가된 Mg의 절반 이상이 L상 형성에 기여하지 못하고 고용체로 잔류하기 때문이다. 이러한 잔류 Mg는 강도 기여 없이 전자 산란원으로 작용하여 강도와 전도도 모두에 손실을 초래한다. 따라서, 본 연구에서는 추가 Cu의 첨가가 고온용 6XXX계 알루미늄 압출재의 강도, 전도도에 미치는 영향을 연구하였다. Mg/Si ratio 2.45 기반 합금 조성을 기본으로 하여 Cu 합금 조성을 단계적으로 변화시켰다. 실험 결과, 1.17 wt% Cu를 첨가한 합금에서 우수한 강도와 전도도 상충특성이 나타났으며, 기존 6000계 합금보다 우수한 값을 보였다. 이러한 결과는 Cu 첨가를 통해 잔류 Mg가 S'상으로 석출되어, 강도 향상과 더불어 고용 Mg 감소에 따른 전도도 개선이 동시에 이루어졌음을 시사한다.

[P9-11]

브레이징 온도와 희토류 첨가에 따른 알루미늄 클래드재의 접합 특성, 미세조직 및 기계적 특성 변화: 고은찬*, 이병권(한국생산기술연구원, 전남대학교), 유효상, 김용호, 손현택*(한국생산기술연구원), 김태훈(전남대학교)
Keywords: 알루미늄 클래드, 브레이징, 희토류, 미세조직 및 기계적 특성

알루미늄 클래드재는 우수한 열전도도와 비강도를 바탕으로 자동차 열관리 시스템의 핵심 소재로 활용되고 있으며, 라디에이터, 응축기, 증발기 및 오일 쿨러 등 다양한 브레이징 부품에 적용되고 있다. 자동차의 경량화와 고성능화가 요구됨에 따라 우수한 브레이징 접합성 및 기계적 특성을 동시에 확보할 수 있는 고기능 알루미늄 클래드재의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 알루미늄 클래드재의 브레이징 온도에 따른 접합 특성을 평가하고, 희토류 원소 첨가에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화를 분석하였다. 첫 번째 연구에서는 3000계 Al 합금 심재와 4000계 Al 합금 클래드재로 구성된 이종 클래드재를 대상으로 브레이징 온도에 따른 접합 특성을 평가하였다. 브레이징 온도는 570–630 ℃로 설정하고, 유지 시간은 10분으로 고정하였으며, $KAlF_4$ 플럭스를 적용하였다. 570 ℃에서는 접합이 이루어지지 않았으나, 590–610 ℃에서는 안정적인 접합이 확인되었다. FE-SEM 분석 결과, 590 ℃와 610 ℃에서는 Al–Si–Mn–Fe계 상이 비교적 균일하게 형성되었지만, 630 ℃에서는 해당 상의 조대화가 관찰되었다. 따라서 본 실험 조건에서 적정 브레이징 온도 범위는 590–610 ℃로 판단된다. 두 번째 연구에서는 3102계 Al 합금에 희토류 원소를 0–1 wt.% 첨가하여 클래드용 합금을 제조하고, 브레이징 온도 및 희토류 첨가량에 따른 미세조직과 기계적 특성 변화를 조사하였다. 브레이징 온도는 590–630 ℃, 유지 시간은 10분으로 설정하였으며, $KAlF_4$ 플럭스를 사용하였다. X-ray CT, FE-SEM 및 EBSD 분석 결과, 590 ℃에서는 심재와 클래드재 사이의 경계가 뚜렷하게 유지되었으나, 610 ℃에서는 안정적인 접합이 형성되었다. 또한 희토류 첨가량이 증가함에 따라 평균 결정립 크기는 약 303.67 μm에서 71.98 μm로 감소하였으며, 재결정이 촉진되는 경향이 나타났다. 희토류 첨가에 따른 기계적 특성을 평가한 결과, 최대인장강도는 102.6 MPa에서 110.2 MPa로 증가하였고, 연신율은 36.1%에서 39.6%로 향상되었다. 이는 희토류 첨가에 의해 강도와 연성이 동시에 개선되었으며, 일반적으로 나타날 수 있는 강도–연성 간 상충 관계가 본 연구 조건에서는 관찰되지 않았음을 의미한다. 이상의 결과로부터 브레이징 온도는 알루미늄 클래드재의 접합성과 계면 미세조직을 결정하는 주요 공정 변수이며, 희토류 첨가는 결정립 미세화와 재결정 거동 제어를 통해 기계적 특성 향상에 기여하는 것으로 확인되었다. 본 연구는 알루미늄 클래드재의 브레이징 공정 조건 최적화와 희토류 첨가를 통한 미세조직 및 기계적 특성 제어에 관한 기초 자료를 제공하며, 자동차 열관리 부품용 경량·고강도 클래드재 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

[P9-12]

Thermal Degradation and Interfacial Debonding Behavior of Resin-Bonded Permanent Magnets in an End-of-Life Traction Rotor: Ui Hyun Baek, HoNam Lim, Cheo Jin Jung, HongJun Chae*(Institute for Advanced Engineering (IAE))
Keywords: End-of-life traction motor, Nd-Fe-B permanent magnet, Rare-earth recycling, Adhesive removal, Interfacial debonding

The rapid expansion of electric mobility has increased demand for Nd-Fe-B permanent magnets, whose critical rare-earth content (Nd, Dy) results in substantial supply-chain risk due to geographic concentration. As early-generation electric vehicles progressively approach end-of-life, the generation of end-of-life traction motors is expected to increase significantly, requiring technologies to selectively recover magnets—firmly fixed in rotor slots by polymeric adhesives—without fracture or contamination, making adhesive-layer weakening essential for dismantling. In this study, rotor segments from a disassembled end-of-life traction motor were used to investigate the thermal characteristics of the rotor-adhesive-magnet interface and their effect on mechanical debonding behavior. The chemical structure and thermal degradation behavior of the adhesive were analyzed via FT-IR and TGA-DSC, and conditioning temperatures were selected to avoid irreversible magnet damage. After cross-sectional examination of the interfacial morphology, localized loading was applied using a segmented pin to evaluate load-displacement response, maximum separation load, and debonding strength, along with fracture surface analysis. These results establish a fundamental basis for developing a selective adhesive-removal process for stable permanent magnet recovery from end-of-life traction motor rotors.

[P9-13]

6000계 알루미늄 칩 스크랩 고상 재활용 압출재의 부식 메커니즘 분석: 변지우, 정재윤, 최진주, 이병덕*(고등기술연구원)

Keywords: 알루미늄 칩 스크랩, 고상 재활용 기술, 열간 압출, 국부 부식

운송부문의 탈탄소화 목표의 당위성이 부각됨에 따라, 자동차 및 항공우주 산업계는 차체와 항공기 구조 전반의 경량화를 위해 높은 비강도와 우수한 성형성을 가진 6000계 Al-Mg-Si 합금의 적용 범위를 확대하고 있다. 이에 수반하여, 가공 중 발생하는 칩 형태의 스크랩 배출량 또한 지속적으로 증가할 것으로 전망되는 가운데, 알루미늄은 재활용 시 1차 지금 생산 대비 에너지 사용량을 최대 95%까지 절감할 수 있어 높은 탄소 저감 효과를 기대할 수 있는 만큼 효율적인 재활용 방법의 필요성이 대두된다. 일반적으로 칩 스크랩은 재용해 공정을 주축으로 재활용되어 왔으나, 용융하는 과정에서 연소 및 슬래그(Dross) 혼입으로 인해 금속 회수율이 감소한다는 한계가 존재한다. 고상 재활용(Solid state recycling, SSR) 기술은 금속 손실을 방지하기 위해 재용해 단계를 생략하고, 극심한 소성 변형을 가하는 방법으로 자원의 순환이용 체계를 구축할 수 있는 새로운 대안으로 부상하고 있다. 한편, 알루미늄은 부동태 금속으로서 대기 중에 노출됨과 동시에 Al_2O_3와 같은 얇은 산화피막이 형성되기 때문에, 칩 스크랩이 SSR 공정을 거치는 과정에서 표면의 산화막이 합금 내에 파쇄된 상태로 잔류하며, 이로 인해 칩 계면의 접합력이 저하되어 기공 및 균열이 형성될 수 있다. 아울러, 열간 압출과 같은 후속 공정을 거쳐 제품으로 제작되면서 미세구조적 불균일성이 부동태 피막의 안정성을 저하시키고 국부 부식으로 발전할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 6000계 알루미늄 칩 스크랩 고상 재활용 압출재 및 신재 빌렛 압출재를 제조하여 미세구조적 특성을 기반으로 전기화학적 시험 및 가속침지시험을 통해 부식 메커니즘을 규명하고자 하였다.

[P9-14]

냉각속도 및 인공시효 온도에 따른 Al 6110A 합금의 시효거동 및 물성 변화: 정지석, 손현우*(한국재료연구원)

Keywords: 금속, 알루미늄

Al-Mg-Si계 6110A 합금은 우수한 기계적 특성과 전기적 특성을 동시에 요구하는 소재로, 이러한 특성은 Mg-Si계 석출거동에 크게 영향을 받는다. 특히 용체화 처리 후 냉각속도는 기지 내 용질 원자와 vacancy의 상태를 변화시켜 이후 인공시효 과정에서의 석출거동 및 최종 물성에 영향을 미치는 중요한 공정변수이다. 또한 인공시효 온도에 따라 석출 kinetics가 달라지므로 동일한 냉각 조건에서도 서로 다른 시효거동이 나타날 수 있다. 따라서 냉각속도와 시효온도가 6110A 합금의 기계적·전기적 특성에 미치는 영향을 종합적으로 이해할 필요가 있다. 본 연구에서는 공랭, 미스트 냉각 및 수냉을 적용하여 냉각속도를 달리하고, 165 ℃ 및 185 ℃에서 인공시효를 실시하여 경도, 전기전도도 및 인장강도의 변화를 비교하였다. 또한 석출물의 분율과 크기를 분석하여 냉각속도 및 시효온도에 따른 석출거동과 물성 변화의 상관관계를 고찰하였다. Al-Mg-Si계 6110A 합금의 냉각속도와 인공시효 온도가 시효거동 및 기계적·전기적 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 용체화 처리 후 공랭(Air Cooling, AC), 미스트 냉각(Mist Cooling, MC), 수냉(Water Quenching, WQ)을 적용하여 냉각속도를 달리하였으며, 이후 165 ℃ 및 185 ℃에서 인공시효를 실시하였다. 시효시간에 따른 경도와 전기전도도를 측정하고, 인장시험 및 미세조직 분석을 통해 냉각속도에 따른 석출거동과 물성 변화를 비교하였다. 165 ℃에서 초기 경도는 AC, MC, WQ 조건에서 각각 63, 82, 94 HV로 냉각속도가 증가함에 따라 높게 나타났으며, 시효 후 최고 경도는 각각 88, 117, 132 HV로 증가하였다. 전기전도도 역시 시효에 따라 각각 46→47, 43→46, 39→44 %IACS로 증가하였다. 185 ℃에서는 초기 경도가 AC, MC, WQ 조건에서 각각 63, 82, 101 HV였으며, 시효 후 최고 경도는 각각 95, 149, 185 HV로 나타나 165 ℃보다 큰 시효경화 효과를 보였다. 전기전도도는 각각 47→49, 43→47, 39→45 %IACS로 증가하였다. 인장강도는 165 ℃ 시효 후 AC, MC, WQ 조건에서 각각 238, 248, 391 MPa로 나타났으며, 185 ℃에서는 각각 220, 233, 382 MPa로 나타났다. 미세조직 분석 결과, AC와 WQ 조건의 석출물 면적분율은 각각 0.015%와 0.013%로 유사한 수준을 나타냈으나, 평균 석출물 직경은 각각 0.79 μm와 0.61 μm로 냉각속도가 증가할수록 감소하였다. 이는 냉각속도가 증가함에 따라 시효 과정에서 형성되는 석출물의 크기 및 분포 특성이 변화함을 의미한다. 이상의 결과를 통해 냉각속도는 용질 원자 및 vacancy의 잔존 상태에 영향을 미치고, 이에 따른 Mg-Si계 석출거동의 차이가 시효경화 및 전기전도도 변화에 영향을 주는 것으로 판단된다. 본 연구는 Al 6110A 합금의 냉각속도 및 시효온도 제어를 통한 기계적 특성과 전기전도도의 균형 확보에 대한 기초자료를 제공한다.

[P9-15]

해저케이블 적용을 위한 재생 알루미늄 합금의 기계적 및 전기적 특성 평가: 양원석*, 김창근(대한전선(주)), 김선기((주)나이스엘엠에스), 오민철(고등기술연구원), 신동훈(대한전선(주))

Keywords: 알루미늄, 재활용, 저탄소, 친환경, 전기전도도

최근 글로벌 전력 수요의 급증과 신재생 에너지 연계망 확충에 따라, 케이블의 대형화 및 장거리 송전이 가속화되면서 가볍고 경제적인 도체 소재에 대한 산업적 요구가 증대되고 있다. 전통적으로 가공송전선에 주로 국한되어 사용되던 알루미늄 도체는 지속적인 구리 가격 상승과 구조적 하중 문제를 해결하기 위한 최적의 대안으로 부상하였으며, 현재 저압(LV) 및 초고압(EHV) 지중케이블부터 대규모 해저 케이블에 이르기까지 그 적용 범위가 폭발적으로 확대되는 추세이다. 전력케이블에서 알루미늄 소재를 적용하는 핵심적인 이점은 압도적인 경량성과 경제성에 있다. 알루미늄의 밀도는 구리의 약 30% 수준으로, 체적 기준 전기 전도도를 보완하기 위해 도체의 단면적을 확대하더라도 동일 전류 9용량 대비 케이블의 전체 중량을 구리 케이블의 절반 수준으로 저감할 수 있다. 이는 질량 대비 전도도가 훌륭하다는 것을 의미하며, 결과적으로 시공 편의성 향상, 운송비 절감, 케이블 트레이 등 지지 인프라의 하중 부담을 획기적으로 완화하는 장점을 제공한다. 나아가 유럽의 탄소국경조정제도(CBAM) 시행을 비롯한 강력한 글로벌 환경 규제와 ESG 경영 기조가 케이블 산업의 새로운 표준으로 자리 잡으면서, 생산 전 과정(LCA)에서의 탄소 발자국 감축이 필수불가결한 과제로 대두되었다. 보크사이트 제련을 통한 1차 알루미늄 생산 방식 대신, 금속 스크랩을 재용해하는 재생 알루미늄을 도체로 적극 도입할 경우 생산 에너지를 최대 95% 절감하고 이산화탄소 배출을 80%이상 감축할 수 있다. 그러나 순 알루미늄을 적용한

해저케이블은 심해 포설 시 발생하는 막대한 기계적 인장력과 대전류 송전에 따른 고온 연화현상에 취약하다는 구조적 한계를 지닌다. 특히 부유식 해상풍력과 같은 동적 환경에서는 해류와 파도에 의한 피로 파괴 위험이 가중되어 도체 소재의 물리적 강인함이 필수적으로 요구된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 지르코늄(Zr) 및 스칸듐(Sc)을 첨가한 친환경 재생 알루미늄 합금 도체의 적용 타당성을 평가하고자 한다. 이를 위해 각 합금의 기계적·전기적 특성을 분석하여 순수 재생 알루미늄과의 물성을 비교하고, 향후 고신뢰성 해저케이블에 적용 가능한 알루미늄 합금 도체의 최적화 방안을 도출하고자 한다.

[P9-16]

고강도 알루미늄의 미세조직과 마찰교반용접 특성: 김현(한국공학대학교), 최효남, 신재혁(한국자동차연구원), 최정원(류코쿠대학교), 이승준*(한국공학대학교)

Keywords: 마찰교반용접, AA7068, 동적 재결정, Texture

본 연구에서는 고강도 AA7068-T6 알루미늄 합금을 대상으로 마찰교반용접(friction stir welding, FSW)을 수행하고, 용접속도 변화가 미세조직, 집합조직 및 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 툴 회전속도는 600 rpm으로 고정하였으며, 용접속도는 150, 250, 350 mm/min으로 변화시켰다. FSW 후 모든 용접 조건에서 HAZ에서 최저 경도를 보이고 SZ에서 일부 회복되는 W자형 경도 분포가 나타났다. 용접속도가 증가함에 따라 SZ의 평균 결정립 크기는 3.9 μm에서 2.1 μm로 감소하였으며, 이는 입열량 감소와 Zener-Hollomon 상수 증가에 따른 재결정 후 결정립 성장 억제와 관련되는 것으로 판단된다. 또한 TMAZ에서 grain subdivision과 island-type HABs가 관찰되어, FSW 중 연속 동적 재결정(CDRX)이 주요 미세조직 변화 기구로 작용함을 확인하였다. 인장시험 결과, 모든 용접재는 HAZ에서 파단되었으며, 250 mm/min 조건에서 최대 인장강도 487.2 MPa, 연신율 9.0%, 인장강도 기준 용접효율 80.1%로 가장 우수한 강도-연성 균형을 나타냈다. 따라서 본 연구의 공정 범위에서는 250 mm/min이 AA7068-T6 합금의 최적 FSW 조건으로 판단된다.

[P9-17]

반응고 및 액상 A356 용탕 환경에서 표면처리에 따른 금형강의 용손 거동 평가: 하원*, 곽종민, 김덕, 김명균(포항산업과학연구원)

Keywords: 금형강, 다이캐스팅, 반응고, 반용융, 알루미늄, 용손

알루미늄 다이캐스팅은 완전 액상의 용탕을 고속·고압으로 충전하는 공정으로 생산성이 우수하나, 난류 충전에 수반되는 가스 혼입과 응고 수축으로 인해 열처리성과 용접성이 제한된다. 반면 반응고 주조는 구상화된 초정 α-Al 입자가 분산된 반응고 슬러리를 이용하며, 전단담화(shear thinning) 거동에 기인한 층류 충전이 가능하여 기공 결함이 현저히 저감되고 T6 열처리 적용이 가능하다. 또한 충전 온도가 액상선 이하로 낮아 응고 잠열과 수축량이 감소하므로 치수 정밀도 확보와 금형 열피로 저감 측면에서도 유리하다. 이러한 장점으로 최근 전기차용 배터리 하우징, 모터 하우징, 서브프레임 등 고강도·고인성이 요구되는 대형 구조부품을 중심으로 반응고 부품의 적용이 확대되고 있다. 한편 알루미늄 용탕과 직접 접촉하는 금형강은 Fe-Al 금속간화합물의 형성과 응착에 의한 용손(soldering/erosion)이 금형 수명을 지배하는 주요 인자이다. 반응고 공정은 충전 온도가 낮아 용손이 완화될 것으로 기대되나, 고상 입자에 의한 기계적 침식과 슬러리의 높은 점도에 따른 계면 전단응력 증가가 오히려 손상을 촉진할 가능성이 있어, 용탕 상태에 따른 정량적 비교 데이터의 확보가 요구된다. 본 연구에서는 SKD61 및 ASSAB 618HH 2종의 금형강에 대하여 ① 무처리재, ② micro shot peening으로 Rz 약 20 μm의 표면 조도를 부여한 시편, ③ micro shot peening 후 질화처리를 추가한 시편 등 총 6종의 시편을 제작하였다. 각 시편을 전용 홀더에 장착한 후 A356 합금 용탕에 침지하고 300 rpm으로 일정 시간 회전시켜 용탕 유동에 의한 용손 환경을 모사하였으며, 침지 조건은 다이캐스팅 온도 조건과 고상율 10~20%의 반응고 온도 조건으로 구분하였다. 시험 전·후의 중량 변화로부터 용손량을 정량화하고, 계면 반응층 및 표면 손상 형상 관찰을 병행하여 금형강 종류, 표면 조도, 질화 유무 및 용탕 상태(액상/반응고)가 용손 거동에 미치는 영향을 고찰하였다.

[P9-18]

Real-time Observation of Grain Refinement in HMR-treated Silafont-36 by Synchrotron X-ray Radiography: Go Eun Kim, Jae Kwon Kim, Eun Soo Park*(Seoul National University)

Keywords: synchrotron X-ray radiography; in-situ solidification; grain refinement; Al–Si alloy; columnar-to-equiaxed transition; high-entropy alloy

High-entropy multi-component grain refiners (HMRs) have been shown to refine α-Al grains and improve the mechanical performance of Silafont-36 Al–Si casting alloys. However, the real-time solidification behavior responsible for this refinement has not been sufficiently clarified. In this study, in-situ synchrotron white-beam X-ray radiography was used to compare the solidification behavior of Silafont-36 with and without 0.5 wt% $(TiZrNb)_2$(CrFeNi) HMR under identical cooling conditions. The base alloy showed coarse columnar α-Al dendrite growth along the imposed thermal gradient, whereas the HMR-added alloy exhibited a transition toward fine, near-equiaxed α-Al grains with growth largely decoupled from the thermal gradient. HMR addition promoted earlier and denser α-Al nucleation, restricted dendritic growth, and reduced dendrite arm development. The radiographic observations also resolved differences in the solidification temperature window and the temporal evolution of Mn-rich intermetallic compounds and eutectic formation. These results indicate that HMR modifies both nucleation and growth during solidification, supporting a grain-refinement mechanism based on heterogeneous nucleation promotion and dendritic growth restriction. This study demonstrates the usefulness of in-situ synchrotron X-ray radiography for understanding grain refinement in aluminum casting alloys.

[P9-19]

압출용 Al-Zn-Mg 합금의 열처리 조건에 따른 기계적 특성 및 전기전도도 변화: 양현석, 정우철, 최광수(고등기술연구원), 서창환(알루스(주)), 공만식*(고등기술연구원)

Keywords: Al-Zn-Mg 합금, 압출, 인공시효, 경도, 전기전도도, 인장특성

고강도 Al-Zn-Mg계 합금은 우수한 비강도와 압출성으로 차량 경량화 및 충돌 성능 향상 부품 소재로 주목받고 있으나, 시효처리 조건에 따라 기계적 특성이 민감하게 변화하므로 압출 공정과 연계한 열처리 조건의 최적화가 요구된다. 본 연구에서는 압출용으로 개발된 Al-Zn-Mg 합금 압출재를 대상으로 인공시효 온도 및 시간을 변수로 한 시효처리를 수행하고, 로크웰 경도(HRB), 전기전도도(%IACS) 및 상온 인장특성의 변화를 통합적으로 분석하였다. 시효 시간 증가에 따라 경도와 전기전도도는 상이한 거동을 나타내었으며, 이를 석출 단계(GP zone → η′ → η)의 진행과 연계하여 해석하였다. 경도–전기전도도 상관 맵을 활용하여 피크시효 도달 여부를 비파괴적으로 판별할 수 있는 가능성을 확인하였고, 이를 인장시험 결과와 대조하여 최적 시효 조건을 도출하였다. 최적 조건에서 인장강도 500 MPa 이상의 T6급 강도가 확보되었으며, 시효 온도–시간 조합에 따른 강도–공정시간 트레이드오프를 정량적으로 제시하였다.

[P9-20]

연속주조로 제조된 A6008 합금의 균질화 거동에 미치는 용탕 초음파 처리 및 승온 조건의 영향: 배병진*(한국생산기술연구원, 인하대학교), 이영기, 송람, 조훈(한국생산기술연구원), 현승균(인하대학교)

Keywords: 연속주조공정, 용탕 초음파 처리, A6008 합금, 균질화 열처리, 미세조직

연속주조로 제조된 알루미늄 합금 빌렛은 응고 과정에서 합금원소의 불균일한 분포와 다양한 정출물이 형성될 수 있다. 이러한 초기 응고조직은 압출과 같은 고온 가공 및 최종 제품의 특성에 영향을 미칠 수 있기 때문에 주조 후 균질화 열처리를 수행하는 것이 일반적이다. 한편, 주조 중 용탕 초음파 처리(Ultrasonic melt treatment, UMT)를 적용할 경우, 결정립 미세화 및 정출물의 균일 분산 등의 효과를 기대할 수 있으며, 이러한 초기 응고조직의 특성을 고려한 적절한 열처리 조건의 검토가 필요하다. 균질화 열처리에서 처리온도와 유지 시간이 주요 공정변수로 고려되지만, 목표 온도까지의 승온 과정에서도 용질 원소의 확산과 정출물 및 석출물의 변화가 진행되기 때문에 승온조건 또한 주요 공정변수로 작용한다. 본 연구에서는 연속주조로 제조된 직경 8inch A6008합금 빌렛을 대상으로 초음파 인가 유무에 따라 비교하였으며, 승온시간을 1, 4, 8 hr, 목표 온도에서의 유지시간을 4, 8, 12 hr로 달리하여 균질화 열처리를 수행하였다. 이후 열처리 조건에 따른 정출물 및 석출물의 크기와 분포 등 미세조직 변화를 비교 분석하여, UMT 적용에 따른 초기 응고조직의 차이와 균질화 열처리의 승온조건에 따른 균질화 거동을 평가하고자 하였다.

[P9-21]

재활용 A356 알루미늄 합금의 실시간 응고 데이터 기반 미세조직 및 결함 형성 메커니즘 분석: 조우빈, 조원준, 최우솔, 임민혁(경북대학교), 이명호(현대자동차), 곽호재, 최선호(포항가속기연구소), 한지훈(다목적방사광가속기구축사업단), 한인성*(경북대학교)

Keywords: 재활용 알루미늄, A356 합금, 실시간 X-선 투과촬영, 응고 결함, 금속간화합물

탄소중립 정책에 따라 재활용 알루미늄 사용이 증가하고 있으나, 스크랩 재활용 과정에서 축적되는 불순물(Fe 등)로 인한 응고 결함 예측에 한계가 있다. 기존의 사후(Post-mortem) 분석 방식으로는 결함의 발생 시점과 성장 메커니즘을 명확히 규명하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 포항방사광가속기(PAL 9D)의 실시간 X-선 투과촬영(In-situ X-ray Radiography)을 활용하여 A356 알루미늄 합금의 불순물 함량에 따른 응고 거동을 실시간으로 관찰하였다. 냉각 속도, Fe 불순물(0.1~0.3 wt%) 및 미세화제 첨가 여부를 주요 공정 변수로 설정하였다. 실시간 관찰 결과, Fe 농도의 증가는 용탕의 액체 보상(Liquid feeding) 능력을 저하시켜 수축 기공(Shrinkage porosity)의 조기 형성을 촉진하였으며, 결과적으로 전체 결함 면적 분율을 급증시켰다. 또한, 응고 말기에는 이렇게 선행 형성된 수축 결함 부위에 응력이 집중되면서 고온 균열(Hot tearing)로 전파되는 메커니즘을 확인하였으며, 특히 Fe-rich 금속간화합물 주변에서 이러한 균열 발생이 집중되었다. 반면, 결정립 미세화제의 동시 첨가는 응고 조직을 미세화하여 Fe 불순물에 의한 수축 결함 형성 및 균열 전파를 일부 완화시키는 효과를 보였다. 본 연구에서 규명된 실시간 응고 데이터는 향후 재활용 알루미늄의 결함-물성 상관관계 데이터베이스 구축 및 품질 예측 모델링을 위한 핵심 기초 자료로 활용될 것이다.

[P9-22]

Al–Mg 이원계 합금의 Mg 함량이 기계적 특성 및 부식 거동에 미치는 영향: 김대영, 권교민, 김동규, 한효주, 김세훈*(한국자동차연구원)

Keywords: 알루미늄, 압출, 기계적 성질, 부식 특성

최근 자동차 산업 내 경량화 및 친환경 소재에 대한 수요가 급증하면서, 우수한 강도와 연성, 성형성, 그리고 재활용성을 두루 갖춘 Al–Mg 합금에 대한 관심이 크게 높아지고 있다. 특히 차량 전동화의 가속화와 탄소 배출 규제 강화에 대응하기 위해서는 합금 조성, 공정 조건, 그리고 재료의 최종 특성 간의 상호 관계를 명확히 이해하는 것이 더욱 중요해졌다. Al–Mg 이원계 합금에서 Mg 첨가는 고용 강화 및 변형 경화를 일으켜 기계적 강도를 향상시키는 반면, 과도한 Mg 첨가는 β(Al_3Mg_2) 상 형성 및 결정립계 편석을 유발하여 국부 부식 감수성을 높이는 부작용을 동반한다. 이러한 상충 관계는 넓은 조성 영역에 걸친 체계적인 연구가 필수적임을 보여준다. 따라서, 본 연구에서는 0–12 wt.% 범위의 Mg 함량을 갖는 Al–Mg 합금을 주조, 압출 및 후속 열처리를 거쳐 제작하고, Mg 함량과 공정 조건이 기계적 특성, 미세조직 변화, 부식 거동에 미치는 영향을 고찰하였다.

[P9-23]

스크랩 함량에 따른 자동차용 6N01 알루미늄 합금 연속주조 빌렛의 미세조직 및 기계적 특성: 신병수*, 최진주, 이병덕(고등기술연구원)

Keywords: 저탄소 알루미늄, 6N01 합금, 스크랩 재활용, 연속주조, 기계적 특성

탄소중립 정책과 완성차 업계의 공급망 탄소배출(Scope 3) 저감 요구에 따라, 자동차 부품용 알루미늄은 1차 지금(primary ingot) 중심의 공급 체계에서 재활용 스크랩 기반의 저탄소 알루미늄으로 전환되고 있다. 재활용 알루미늄은 1차 지금 대비 약 95%의 에너지 절감 효과를 가지므로 소재 단계의 유효한 탄소 저감 수단으로 평가된다. 그러나 스크랩 사용 비율이 증가하면 Fe를 비롯한 불순물이 축적되며, Fe는 알루미늄 기지 내 고용도가 낮아 응고 시 Al-Fe-Si계 금속간화합물로 정출되어 연성과 성형성을 저하시킨다. 이러한 이유로 재활용 알루미늄은 주로 주조용 합금으로 활용되어 왔으며, 전신재 부품에 적용하기 위해서는 스크랩 함량에 따른 소재 특성 변화의 정량적 규명이 요구된다. 본 연구에서는 범퍼, 크래시박스 등에 적용되는 Al-Mg-Si계 6N01 합금을 대상으로, 소성가공 이전 단계인 연속주조 빌렛에서 스크랩 재활용의 영향을 평가하고자 한다. 동일 합금계 스크랩 함량을 0, 20, 40, 60, 80, 100 wt.%로 달리하여 용탕을 동일한 용해 조건에서 준비하고, 연속주조를 통해 직경 50 mm의 원통형 빌렛으로 제조하였다. 주조 속도와 주입온도 등 주요 공정 변수는 전 조건에서 동일하게 유지하여 스크랩 함량의 영향을 평가하였다. 제조된 빌렛에 대해 스크랩 함량 변화에 따른 조성 및 미세조직 인자의 변화와 기계적 특성의 상관관계를 분석하고자 한다. 이를 통해 6N01 합금이 수용 가능한 재활용 소재의 적용 범위를 도출하고, 향후 압출 공정 및 합금 조성 최적화 연구의 기초 자료로 활용하고자 한다.

[P9-24]

금속복합소재 적용 Al-Si 합금 다이캐스팅 공정 조건 도출 평가: 최승규(한국자동차연구원, 전북대학교), 빙현식, 김진평*(한국자동차연구원)

Keywords: Aluminum alloy, Casting Of Minimized Pressure Applied for Composite Technology, Metal composite, electrical conductivity

미래 친환경 전기차 및 모빌리티 차체 알루미늄 합금 부품 분야에서 기계적 물성뿐만 아니라 전기전도도 특성 또한 중요한 특성으로 주목받고 있다. 전기차 부품의 향상된 전기전도도 특성은 전기차 충전 및 전기 노출로 야기되는 전식 현상을 억제하는 중요한 특성이다. 이에 본 연구에서 전기차에 적용하기 위한 Al-Si base 합금을 설계하였으며, 설계한 base 합금에 금속복합소재를 적용하여 기계적 물성과 전기전도도를 동시에 확보하기 위한 연구를 진행하였다. 금속복합소재를 적용한 Al-Si 합금을 다이캐스팅 장비를 통해 시편을 제작하였으며, 인장시험 및 전기전도도를 평가하였다.

[P9-25]

Enhancement of Electrical Conductivity in A1070 Alloy via Reduction of Fe, Ti, and Other Impurities for Compliance with Global Regulations: Yongho Kim*, Hyosang Yoo, Byeongkwon Lee, Eunchan Ko, Hyeontaek Son(KITECH)

Keywords: Recycling, Flux refining, CBAM, Electrical conductivity

With the full-scale implementation of global carbon-neutral environmental regulations, such as the RE100 initiative and the EU's Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), reducing carbon emissions across the supply chain and promoting scrap resource circulation have emerged as core survival strategies in the aluminum industry. Although aluminum offers a density of 2.7 g/cm^3—substantially lower than copper's 8.9 g/cm^3—making it highly attractive as a low-carbon lightweight material, the accumulation of impurities during scrap recycling increases defect rates and degrades physical properties, hindering its high-value-added application. This study investigates the effects of flux refining on impurity reduction and electrical conductivity enhancement in A1070 recycled aluminum alloy to secure competitiveness in conductivity applications amidst RE100 and CBAM frameworks. In particular, transition element impurities such as Fe, Ti, and V, which are inevitably retained and accumulated in recycled aluminum wires and scraps, induce lattice distortion within the aluminum matrix and severely degrade electrical conductivity; thus, developing a dedicated high-efficiency refining process is essential to overcome carbon tariff barriers. Each alloy specimen was melted at 750 ℃ in an electric furnace, followed by the introduction of a Borax-KCl-NaCl-based mixed flux, with samples fabricated under varied flux holding times and melt post-treatment conditions. Following refining and casting, the quantitative reduction efficiency of the impurities within the specimens was evaluated via spectrometry. Field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM) was utilized to observe the crystallization behavior of Al-Fe-Ti-based intermetallic compounds and the distribution of impurity segregation within the microstructure, as well as to analyze phase fraction changes. Furthermore, to verify the improvement in electrical performance relative to the metallurgical refining efficiency, room-temperature electrical conductivity was precisely evaluated using an eddy-current conductivity meter.

[P9-26]

수계 세정 전처리에 따른 6000계 알루미늄 가공칩 스크랩 고상 재활용 압출재의 불순물 혼입 및 기계적 특성 거동: 최진주, 정재윤, 변지우, 신병수, 이병덕*(고등기술연구원)

Keywords: Aluminum machining chip, Chip cleaning, Solid-state recycling, Hot extrusion, Mechanical properties

CBAM 및 ELV 등 글로벌 환경규제가 완성차 공급망 전반에 재생원료 적용과 탄소배출 저감을 요구하면서, 저탄소 알루미늄 재활용 기술의 중요성이 커지고 있다. 그러나 알루미늄 부품의 절삭가공 과정에서 발생하는 칩 스크랩은 높은 비표면적으로 인해 기존 재용해 공정 적용 시 산화 손실과 오염이 심화되어 원소재 회수율과 합금 가치가 저하된다. 특히 고가의 6000계 가공칩은 재용해 과정에서 합금 성분과 청정도 유지가 어려워 저부가가치 주조용 원료로 다운사이클링되는 경우가 많다. 고상 재활용(Solid-State Recycling, SSR)은 용해·주조 공정을 생략하고 압축 성형과 압출을 통해 가공칩을 직접 벌크 소재로 제조하는 기술로서, 에너지 소비와 소재 손실을 줄이는 동시에 합금 성분을 보존할 수 있어 이러한 한계의 대안으로 주목받고 있다. 다만 칩 표면에 형성된 자연

산화막과 잔류 절삭유, 이종 금속·비금속 불순물은 압출 중 칩 계면의 금속학적 접합을 저해하여, 신재 빌렛으로 제조된 압출재 대비 기계적 특성을 저하시킬 수 있다. 본 연구에서는 6000계 알루미늄 가공칩 스크랩을 대상으로 수계 세정 및 건조 공정을 적용한 세척칩과 세정 공정을 거치지 않은 무세척칩(as-received)을 각각 압축 성형하여 브리켓을 제조한 후, 열간압출과 T6 열처리를 통해 고상 재활용 압출재를 제조하였다. 세정 공정에 따른 잔류 절삭유 및 오염원 제거 수준은 열중량분석(TGA)을 통한 절삭유 잔량과 푸리에 변환 적외선 분광분석(FT-IR)을 통한 유기 탄소 화합물 검출로 확인하였으며, 합금 조성과 금속 불순물 수준은 X선 형광분석(XRF) 및 유도결합 플라즈마 분석(ICP-OES)으로, 산소 함량은 산소분석(ONH)으로 정량하였다. 제조된 압출재는 인장강도, 항복강도, 연신율 등 기계적 특성을 평가하였으며, 주사전자현미경(SEM/EDS)과 전자후방산란회절분석(EBSD)을 이용하여 칩 계면의 접합 상태, 잔류 오염원에서 기인한 불순물의 분포와 집적 거동, 결정립 및 재결정 거동을 관찰하였다. 이를 바탕으로 세척 공정 적용이 칩 표면 오염원 제거와 압출 중 계면 접합 품질에 미치는 영향을 평가하였으며, 세척 유무에 따른 불순물 혼입 거동과 압출재 기계적 특성 간의 상관관계를 분석하였다.

[P9-27]

Al-Si계 알루미늄 합금의 저압주조 조건 도출 평가: 방현식, 최승규, 김진평*(한국자동차연구원)

Keywords: Aluminum alloy, Low-pressure die casting(LPDC), Process parameters, Mechanical properties

알루미늄 합금은 자동차 및 미래 모빌리티 경량화 부품 제조를 포함하여 다양한 산업 분야에서 주조 소재로 활용되고 있다. 최근, 대면적 차체 부품을 주조 공정으로 제조하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 특히 저압주조 공정은 고압 다이캐스팅 공정으로 제조하기 어려운 대면적 주조 부품을 제조하기 위한 대안으로 주목받고 있다. 저압주조 공정은 알루미늄 용탕을 가압하여 금형 내에 저속 충진시킨 후, 일정 시간 가압하여 주조하는 공정으로, 공정 조건에 따라 부품의 성형성 및 물성이 변화하기에 최적 공정 조건을 도출하기 위한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 대면적 차체 부품 제조를 위해 설계한 고성형성 Al-Si계 합금을 저압주조 공정에 적용하기 위해, 최적 저압주조 조건을 도출하기 위한 연구를 진행하였다. 주조품 물성 향상을 위해 저압주조 가압 및 시간, 냉각 조건 등을 변수로 설정하여 주조품을 제조하였으며, 기계적 특성 평가 및 미세조직 분석을 통해 최적의 저압주조 조건을 도출하였다.

[P9-28]

6000계 알루미늄 칩 스크랩 고상 재활용 압출재의 시효 온도별 인공시효 거동 및 peak aging 조건 도출: 정재윤, 최진주, 변지우, 이병덕*(고등기술연구원)

Keywords: Aluminum, Solid-State-Recycling, Peak-aging

CBAM 및 ELV 등 글로벌 환경규제가 완성차 공급망 전반에 재생원료 적용과 탄소배출 저감을 요구하면서, 저탄소 알루미늄 재활용 기술의 중요성이 커지고 있다. 그러나 알루미늄 부품의 절삭가공 과정에서 발생하는 칩 스크랩은 높은 비표면적으로 인해 기존 재용해 공정 적용 시 산화 손실과 오염이 심화되어 원소재 회수율과 합금 가치가 저하된다. 특히 고가의 6000계 가공칩은 재용해 과정에서 합금 성분과 청정도 유지가 어려워 저부가가치 주조용 원료로 다운사이클링되는 경우가 많다. 고상 재활용(Solid-State Recycling, SSR)은 용해·주조 공정을 생략하고 압축 성형과 압출을 통해 가공칩을 직접 벌크 소재로 제조하는 기술로서, 에너지 소비와 소재 손실을 줄이는 동시에 합금 성분을 보존할 수 있어 이러한 한계의 대안으로 주목받고 있다. 다만 SSR 공정의 원료인 절삭 칩은 절삭가공 시 도입된 소성변형 조직과 표면 산화피막을 수반하며, 벌크화 과정에서도 산화피막 파괴와 계면 접합을 위해 높은 압출비가 적용되므로, 최종 압출재는 신재 압출재와는 다른 미세조직적 특징을 가질 수 있다. 이러한 미세조직 차이는 6000계 합금의 시효경화를 지배하는 Mg-Si계 석출물의 핵생성 및 성장 거동에 영향을 미칠 수 있으며, 따라서 신재를 기준으로 확립된 기존 T6 열처리 조건이 SSR 소재에 대해서도 최적임을 보장하기 어렵다. 그럼에도 현재까지 SSR 소재에 대한 연구는 대부분 압출 직후 상태 또는 단일 열처리 조건에서의 물성 평가에 국한되어 있어, SSR 소재 자체의 시효거동과 최적 시효 조건에 대한 체계적 데이터는 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 6000계 알루미늄 칩 스크랩 SSR 압출재를 대상으로 용체화(520 ºC, 1 h) 및 수냉 처리 후 160, 180, 200 ºC의 세 가지 시효 온도에서 1, 2, 4, 8, 16, 24, 48 h의 인공시효를 실시하고, 시효시간에 따른 비커스 경도 변화를 추적하여 온도별 시효곡선을 도출함으로써 각 시효 온도에서의 peak aging 조건을 결정하였다. 각 peak aging 조건에서는 인장시험을 수행하여 항복강도·인장강도·연신율을 비교 평가하였다. 또한 미세조직 분석을 통해 결정립 조직과 칩 간 계면의 접합 상태를 관찰하고, 시효 조건에 따른 상 구성 변화를 분석하였다. 이를 통해 SSR 압출재에 대한 시효 온도-시간-경도 관계를 정량적으로 제시하고, 강도-연신율 균형 관점에서 최적 시효 온도를 선정함으로써 SSR재에 특화된 열처리 공정 설계의 기초 데이터를 확보하고자 한다.

[P9-29]

Drawing-Induced Microstructural and Mechanical Property Changes in Monolithic and Clad Aluminum Tubes for Heat Exchanger Application: HyoSang Yoo*, YongHo Kim, ByeongKwon Lee, EunChan Ko, CheolWoo Kim, HyeonTaek Son(Korea Institute of Industrial Technology)

Keywords: Aluminum, Tube, Multi-pass drawing, Microstructural, Mechanical properties

Efficient thermal management is increasingly important for enhancing the performance and energy efficiency of electric and hybrid vehicles. Aluminum tubes are widely used in automotive heat exchangers because of their low density, high thermal conductivity, and excellent formability. In particular, clad aluminum tubes provide improved corrosion resistance through the combination of a core material and a protective cladding layer. However, the heterogeneous deformation of the core and cladding layers during tube drawing

can affect microstructural uniformity and mechanical performance. In this study, monolithic and clad aluminum tubes were subjected to multi-pass drawing to investigate the effects of progressive deformation on their microstructure and mechanical behavior. Changes in tube geometry and microstructural characteristics at different drawing stages were examined using optical microscopy, scanning electron microscopy, and electron backscatter diffraction. Vickers hardness measurements and tensile tests were also conducted to evaluate the evolution of mechanical properties during drawing.

[P9-30]

Effect of Retrogression and Re-aging (RRA) on the Mechanical Properties and Corrosion Resistance of a Newly Designed High-Solute Al-Mg-Zn-(Cu) Alloy: Kim Dong-Kyu, Kwon Kyo-Min, Kim Dae-Young, Shin Jae-Hyuck, Kim Jin-Pyeong, Kim Sehoon, Jung Young-Kil*(Korea Automotive Technology Institute (KATECH))

Keywords: Al-Mg-Zn alloy, retrogression and re-aging, corrosion resistance

As the aerospace and future mobility sectors rapidly grow, there is an increasing demand for lightweight aluminum alloys that exhibit both high strength and excellent corrosion resistance. Retrogression and re-aging (RRA) treatment is essential for achieving the combination of mechanical performance and corrosion resistance required for aerospace-grade aluminum alloys. Accordingly, this study aims to comprehensively evaluate the effect of RRA treatment on a newly designed Al-Mg-Zn-(Cu) alloy by correlating its mechanical properties with corrosion behavior and microstructural characteristics. Stress corrosion cracking susceptibility, surface corrosion products, fracture characteristics, and cross-sectional microstructures were investigated to clarify the influence of RRA treatment on the corrosion and fracture behavior of the alloy. A billet of the target composition was cast, extruded into a Φ10 mm bar, and subjected to T6 and subsequent RRA treatments. Tensile properties were evaluated in the longitudinal direction using ASTM sub-size specimens. Corrosion behavior and stress corrosion cracking susceptibility were evaluated in a 3.5 wt.% NaCl solution through electrochemical measurements and slow strain rate testing (SSRT), respectively. Following SSRT, the fracture surfaces, corrosion products formed on the specimen surfaces, and cross-sectional microstructures were characterized by OM and SEM-EDS to clarify the corrosion and fracture behavior of the alloy.

[P9-31]

혼합 EOL 알루미늄 스크랩 기반 재활용재의 조성 및 물성 평가: 한효주, 권교민, 김대영, 김동규, 김세훈*(한국자동차연구원)

Keywords: 탄소중립, 알루미늄, 재활용 스크랩

탄소중립 및 자원순환에 대한 요구가 증가함에 따라 알루미늄 산업에서는 EOL(End-of-Life) 스크랩을 활용한 재활용 소재 개발의 중요성이 증가하고 있다. 그러나 실제 회수되는 EOL 스크랩은 다양한 합금계가 혼재되어 있어, 별도의 선별 없이 직접 재활용할 경우 원료 조성의 편차가 발생하고 최종 소재의 물성에도 차이가 나타날 수 있다. 본 연구에서는 혼합 EOL 알루미늄 스크랩을 100% 적용하여 재활용 소재를 제조하고, 주조 및 압출 공정 적용 후 나타나는 조성과 물성 차이를 평가하고자 하였다. EOL 스크랩을 이용하여 9개의 빌렛을 주조한 후 모든 시편에 동일하게 450 ℃ 열간압출 및 후열처리를 적용하였다. 화학조성 분석 결과 시편별로 합금 원소의 조성 차이가 확인되었으며, 일부 시편에서는 Mg, Si 및 Cu 함량이 상대적으로 높게 나타났다. 또한 인장시험, 전기전도도 및 열전도도 평가 결과 동일한 제조공정을 적용한 이후에도 시편별로 서로 다른 특성이 확인되었다. 이를 통해 혼합 EOL 알루미늄 스크랩을 직접 소재화할 경우 시편별 조성과 물성에 차이가 나타날 수 있음을 확인하였으며, 향후 원료 선별 및 조성 관리를 통한 재활용 알루미늄의 품질 안정화 연구를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

P10 : 마그넷

Room 1층 전시홀, 10월 28일

[P10-1]

Improvement of magnetic properties of Nd–Fe–B sintered magnets through grain boundary diffusion using Tb–La–Cu–Al: Dong Hyun Lee(DGIST, Kyungpook National Univ.), Seong Chan Kim, Hyeonjong Jeong, Ju-young Baek, Tae-Young Yun, Jong Tae Kim(DGIST), Donghwan Kim, Sang Hyub Lee(Star Group), Jong Wook Roh*(Kyungpook National Univ.), Dong Hwan Kim*, Jeongmin Kim*(DGIST)

Keywords: GBDP, Nd-Fe-B sintered magnet, Light rare-earth (LRE), Coercivity, Remanence

Nd–Fe–B sintered magnets are widely used in sensors, wind-turbine generators, high-efficiency compressors, and electric motors because of their excellent magnetic performance. However, coercivity decreases with increasing operating temperature, leading to performance degradation. A representative strategy to secure coercivity at elevated temperatures is the grain boundary diffusion process (GBDP) employing heavy rare-earth (HRE) elements. Nevertheless, the limited supply stability and high price volatility of HRE remain major constraints on their widespread implementation. Therefore, optimization of the process conditions and diffusion source composition is required to achieve the target coercivity with reduced HRE consumption. In this study, the effects of La and Tb contents in the diffusion source on the magnetic properties were systematically investigated to optimize the GBDP. The stamp-coating method developed in our previous work enables simultaneous process simplification and reduced diffusion source consumption, while still improving magnetic performance. In addition, we discuss the grain boundary diffusion behavior, microstructure and the coercivity enhancement mechanism in GBD-treated magnets prepared with $Tb_{(80-x)}La_xCu_{15}Al_5$ (x = 0, 20, 40, 60) (wt.%).

[P10-2]

Effect of Cu Addition on Nanocrystallization and Core Loss of Fe-Based Amorphous Alloys Consolidated by Spark Plazma Sintering: seongjun kim, Seonghoon Yi*(Kyungpook National University)

Keywords: soft magnet, amorphous, nanocrystallization

Fe-based amorphous alloys have attracted considerable attention as promising soft magnetic materials owing to their low coercivity, high permeability, and relatively high electrical resistivity. Controlled nanocrystallization of an amorphous precursor can further enhance their soft magnetic performance through the formation of nanoscale α-Fe grains and the resulting exchange averaging of local magnetocrystalline anisotropy. In this study, Cu was introduced into an Fe-based amorphous alloy to promote nanocrystallization, and bulk soft magnetic cores were fabricated by spark plasma sintering (SPS). The Cu content was selected based on the densification behavior during SPS, and the composition exhibiting favorable densification was subjected to further structural and magnetic characterization. The Cu-free alloy retained a predominantly amorphous structure after consolidation, whereas the Cu-containing alloy exhibited the formation of nanoscale α-Fe grains within the amorphous matrix. The nanocrystallized Cu-containing core exhibited lower core loss than the Cu-free amorphous core under high-frequency excitation. The reduction in core loss is associated with the formation of fine α-Fe nanocrystals, which can reduce the effective magnetic anisotropy through exchange averaging. These results demonstrate that Cu-assisted nanocrystallization combined with SPS consolidation provides a promising route for simultaneously achieving high densification and improved high-frequency magnetic performance in bulk Fe-based amorphous soft magnetic cores.

[P10-3]

전류 유도 가열을 통한 소결 Nd-Fe-B 자석의 중희토류 확산: 이상현, 박승일, 설채민, 이유진, 조성준, 김태훈*(전남대학교 신소재공학부)

Keywords: NdFeB, GBDP, 추가확산

NdFeB 영구자석은 높은 최대 자기 에너지적((BH)max)을 가져 전기자동차의 구동 모터, 로봇, 정밀 기계 등 현대 산업의 핵심 부품으로 광범위하게 사용되고 있다. 하지만 NdFeB 자석은 약 200 ºC의 큐리 온도로 인해 고온의 환경에서 사용 시 자기 특성이 저하되는 문제를 가지고 있다. 이를 개선하기 위해 열처리를 통해 중희토류(HRE)와 경희토류(LRE)를 결정립계를 따라 자석 내부로 확산시켜 H/LRE-rich 결정립계 상 및 결정립에 H/LRE-rich shell을 균일하게 형성하여 역자구 핵생성을 억제함으로써 보자력을 향상시키는 입계확산공정(Grain Boundary Diffusion Process, GBDP)이 활발하게 연구되고 있다. 하지만 열처리 과정 중 확산물질이 결정립계를 따라 내부로 확산되기 전에 표면층의 결정립과 반응하며 두꺼운 shell을 형성하여 확산 깊이에 한계가 있으며, 동시에 결정립이 조대화되어 보자력이 감소한다는 문제가 있다. 이를 개선하기 위해 본 연구에서는 중희토류가 확산된 NdFeB 자석의 확산 방향으로 전류를 인가해 결정립과 결정립계의 저항차이로 발생하는 Joule heat을 통해 중희토류를 내부까지 확산시키는 방법을 시도하였다. 그 결과 확산 깊이를 보다 증가시킬 수 있었으며, GBDP의 열확산 과정에서 발생하는 결정립 조대화 현상을 억제하고 보자력을 향상시킬 수 있었다.

[P10-4]
Effect of Al Addition on Magnetic Properties and Oxidation Resistance of Fe-based Amorphous Alloy: Seungeui Hong, Pyuck-Pa Choi*(KAIST)
Keywords: 연자성체, 비정질합금

Fe-based amorphous alloys are soft magnetic materials that have garnered sustained attention for various applications owing to their excellent soft magnetic properties. The long-range disordered structure of these alloys results in extremely low coercivity. However, partial crystallization on the surface due to oxidation may occur during production or heat treatment, which severely deteriorates these soft magnetic properties. Therefore, methods to inhibit partial crystallization and oxidation to increase processability is required. In this study, Al addition is investigated as a method to suppress oxidation and resultant partial crystallization of Fe-Si-B soft magnetic amorphous alloy. To evaluate the effect of Al addition, the Al content was varied from 0 to 2 at. % (0, 0.5, 1, and 2 at. %). The microstructural changes induced by Al addition and oxidation were observed, and their relationship with oxidation resistance is discussed. Also, effect of Al addition on coercivity is also measured to investigate the relationship between Al addition and magnetic properties.

[P10-5]
Influence of Annealing Temperature and Heating Rate on Magnetic Properties of $Fe_{bal.}$-(Si, B, P, C)$_{7.67}$-$Cu_{1.00}$ (wt%) Amorphous Soft Magnetic Alloy: Jongil Lee, Seonghoon Yi*(Kyungpook National Univ.)
Keywords: amorphous, soft magnetic

Fe-based amorphous alloys have attracted considerable attention as soft magnetic materials because of their low coercivity, high permeability, and relatively high saturation magnetization. Further improvement in their soft magnetic properties can be achieved through the formation of a uniform nanocrystalline structure by appropriate heat treatment. Since the nucleation and growth behavior of nanocrystals is strongly dependent on the thermal history, precise control of annealing conditions is important for optimizing the magnetic performance of Fe-based amorphous alloys. In this study, the effects of annealing temperature and heating rate on the nanocrystallization behavior and soft magnetic properties of Fe-based amorphous ribbons were investigated. Amorphous ribbons were prepared by melt spinning and subsequently annealed under various thermal conditions by independently varying the annealing temperature and heating rate. The thermal behavior and crystallization characteristics of the ribbons were evaluated, and the structural evolution induced by heat treatment was analyzed by X-ray diffraction. The magnetic properties of the as-spun and annealed ribbons were characterized to determine the relationship between the annealing conditions, nanocrystalline structure, and soft magnetic performance. The results showed that the nanocrystallization behavior of the Fe-based amorphous ribbons was significantly affected by both annealing temperature and heating rate. Changes in the thermal history influenced the nucleation and growth of crystalline phases, resulting in different nanocrystalline structures after annealing. Corresponding variations in the magnetic properties were observed, demonstrating a close relationship between the nanocrystalline structure and soft magnetic performance. In particular, appropriate control of the heating rate and annealing temperature was effective in suppressing excessive grain growth while promoting favorable nanocrystallization. These results indicate that optimization of not only the annealing temperature but also the heating rate is important for controlling the nanostructure and improving the soft magnetic properties of Fe-based amorphous ribbons.

[P10-6]
Enhanced Magnetic Properties and Thermal Stability of Nd–Fe–B Magnets through Grain Boundary Diffusion of Dy–LRE–Zn–Cu Alloys: 정현종(Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology), 이동현(Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology, Kyungpook National University), 하정우, 김성찬(Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology), 임범식(Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology, Kyungpook National University), 백주영, 윤태영, 김종태, 정석환(Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology), 김동환, 이상협(R&D Center, Star Group), Vitalii Galkin(Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology, Kyungpook National University), 김동환, 김정민*(Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology)
Keywords: Nd-Fe-B, Grain boundary diffusion(GBD), Low-melting-point diffusion source, Coercivity, Dy consumption reduction

High-performance Nd–Fe–B sintered magnets are key functional materials for advanced energy and transportation technologies, including wind power generators and electric vehicle traction motors. Despite their high remanence and maximum energy product, their intrinsic coercivity and thermal stability deteriorate markedly at elevated temperatures, limiting their reliable operation in high-temperature environments. Grain boundary diffusion (GBD) using heavy rare-earth (HRE) elements, particularly Dy, has been widely employed to overcome this limitation. However, conventional Dy-based diffusion is limited by the high melting point of Dy and its associated low diffusion efficiency, as well as by the unstable supply and high cost of Dy. Therefore, the development of resource-efficient diffusion strategies with reduced HRE consumption remains highly desirable. In the present work, a series of low-melting-point diffusion sources were designed by partially substituting Dy with realtively abundant light rare-earth (LRE) elements (Pr and Nd) and transition metals (Zn and Cu). The diffusion alloys were prepared by induction melting and subsequently processed into fine powders by hydrogen decrepitation and sieving to below 53 μm. Grain boundary diffusion was carried out at 750, 800, 850, and 900 ºC to investigate the effects of diffusion temperature and source composition on the diffusion behavior, microstructure, and magnetic properties of the magnets. The magnets diffused with Dy20Pr60Zn10Cu10 and Dy20Nd60Zn10Cu10 at 850 ºC exhibited room-

temperature coercivities comparable to that of the Dy100-treated magnet, while showing improved magnetic properties at 150 °C. EPMA elemental mapping revealed excessive intragranural diffusion and pronounced Dy accumulation near the surface of the Dy100-treated magnet. In contrast the Dy–LRE–Zn–Cu-treated magnets exhibited a more uniform Dy distribution along the grain boundaries and well-defined thin Dy-rich shells in the Nd2Fe14B grains. TEM analysis further demonstrated that GBD with Dy20Pr60Zn10Cu10 notably increased the GBP thickness compared with magnet treated without LRE addition. The formation of thin Dy-rich shells together with the modified grain boundary structure promoted a more homogeneous distribution of Dy throughout the magnet, resulting in improved coercivity and thermal stability. Therefore for Dy20Pr60Zn10Cu10 and Dy20Nd60Zn10Cu10-treated magnets enhanced magnetic properties compared with Dy100-treated magnets, despite despite containing only 20 wt.% Dy in the diffusion source.

[P10-7]

Development and Soft Magnetic Properties of High-C Amorphous Alloys: Effect of Cu Content: Mingyo Jeong, Seonghoon Yi*(Kyungpook National Univ.)

Keywords: High Carbon, Hot Metal, Amorphous, Soft magnetic, Cu content, Heat treatment

In conventional steelmaking processes, molten iron is produced prior to refining steps in which various impurities are removed to meet steel-grade requirements. Utilizing the compositional characteristics of such high-carbon hot metal as a materials design concept provides an alternative approach for exploring functional materials based on minimally refined compositions. In our previous work, Cu addition was introduced to high-carbon Fe-based amorphous alloys to alter the crystallization pathway, successfully suppressing carbide precipitation and promoting primary α-Fe phase formation via Cu clustering. To further advance this materials design concept, this study focuses on the systematic optimization of alloy composition and heat treatment conditions to maximize soft magnetic performance. Specifically, the alloy composition was fine-tuned closer to the actual hot metal chemistry by strategically reducing specific constituent elements to enhance magnetic softeness while controlling the Cu content. Fe-based amorphous ribbons were prepared via melt-spinning and subsequently annealed under various temperature conditions. Crystallization behavior and phase evolution were analyzed using differential scanning calorimetry (DSC) and X-ray diffraction (XRD). Furthermore, the magnetic properties were comprehensively evaluated using Vibrational Sample Magnetometry (VSM) for saturation magnetization (M_s) and DC B-H loop analysis for coercivity (H_c). Through compositional optimization and precise control of the heat treatment process, a high density of fine α-Fe nanocrystals was successfully developed. Consequently, the optimized alloy exhibited exceptional soft magnetic performance, achieving a high saturation magnetization (M_s) of 1.6 T alongside a remarkably low coercivity (H_c) of 3–4 A/m. These results demonstrate the high potential of high-C hot-metal-derived nanocrystalline alloys for advanced soft magnetic applications.

[P10-8]

Sm-Co 자성분말의 제조 조건에 따른 분말 특성 평가: 김현준, Madavali babu, Gangala Anil Kumar, 홍순직*(국립공주대학교)

Keywords: Sm-Co permanent magnet, magnetic powder, particle size, microstructure, oxidation

Sm-Co계 영구자석은 우수한 고온 자기적 특성을 기반으로 고온 환경에서 사용되는 영구자석 소재로 주목받고 있다. 특히 소결 Sm-Co 자석의 자기적 특성과 소결 거동은 원료 분말의 입도, 형상, 조성 및 미세조직에 크게 영향을 받기 때문에, 고특성 및 고내열성 Sm-Co 소결자석 제조를 위해서는 분말 제조 공정에 따른 분말 특성을 자세히 분석하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 Sm-Co 자성분말의 제조 조건에 따른 분말 특성을 분석하여 추후 성형 및 소결 공정에 적합한 분말 제조 조건을 최적화 하기위한 분석을 진행하였다. 각기 다른 제조 조건을 통하여 제조된 Sm-Co 분말의 입도 및 분말 형상을 비교 분석하였다. 또한 분말 제조 과정에서 발생할 수 있는 조성 변화 및 산소함량을 평가하였으며, 분말의 미세조직과 결정상 변화를 분석하여 제조 조건과 분말 특성 사이의 상관관계를 조사하였다. 이러한 분석을 통해 Sm-Co 분말 제조 조건이 입도 및 형상뿐만 아니라 산화 특성, 미세조직 및 결정상 에 미치는 영향을 종합적으로 평가하였다. 본 연구 결과는 향후 균일한 입도분포와 적절한 미세구조를 갖는 Sm-Co 자성분말 제조 조건을 확립하고, 자장 성형 시 분말의 배향성 및 성형성을 향상시키기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P10-9]

Suppression of Oxidation and Phase Decomposition in $Sm_2Fe_{17}N_3$ Powders via Low-Temperature High-Energy Ball Milling: HyeSu Kim, Jaehyuk Kim, Ho-Jeong Kim, Kyungmi lee, Seong Min Choi, Wooyoung Lee*(Yonsei Univ.)

Keywords: $Sm_2Fe_{17}N_3$ powder, low-temperature high-energy ball milling, oxidation suppression, phase stability, magnetic properties

Sm-Fe-N powders have attracted considerable attention as promising candidates for high-performance bonded permanent magnets because of their high magnetocrystalline anisotropy field and large saturation magnetization. In this study, $Sm_2Fe_{17}N_3$ powders were processed by high-energy ball milling under low-temperature conditions. The effects of milling temperature on the particle morphology, crystal structure, oxygen content, and magnetic properties of the powders were systematically investigated. Compared with powders milled at room temperature, the low-temperature-milled powders exhibited a more uniform particle morphology, reduced oxygen uptake, and improved retention of the $Sm_2Fe_{17}N_3$ phase. These structural and chemical improvements resulted in enhanced magnetic properties, particularly higher remanence and coercivity. The results demonstrate that low-temperature high-energy ball milling effectively suppresses oxidation and milling-induced phase decomposition, thereby preserving the hard-magnetic characteristics of $Sm_2Fe_{17}N_3$ powders. This approach provides a practical processing route for producing high-performance Sm-Fe-N powders for bonded permanent-magnet applications.

P11 : 적층제조 및 분말
Room 1층 전시홀, 10월 29일

[P11-1]
직접용융증착법으로 제조된 Inconel 625 / Al2O3경사기능재의 단열 및 기계적 특성: 유현용(경상국립대학교), 유진영(부산대학교), 김태현, 이진수(경남대학교), 안성열(포항공과대학교), 이태경(부산대학교), 김세윤(경남대학교), 김형섭(포항공과대학교), 김정기*(경상국립대학교)
Keywords: Maintenance, Repair and Overhaul, Additive Manufacturing, Thermal Barrier Coating, Directed Energy Deposition, Functionally Graded Material, Flame thermal gradient test

가스터빈의 열효율 향상을 위해 터빈 작동 온도가 지속적으로 증가하면서, 터빈 부품은 더욱 극한의 고온 환경에서 운용되고 있다. 이에 따라 고온 환경에서 부품 파손에 대한 유지·보수·정비(Maintenance, Repair and Overhaul, MRO)의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 최근에는 초내열합금 부품의 국부 보수를 위한 적층제조(Additive Manufacturing, AM) 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 열차폐 코팅(Thermal Barrier Coating, TBC)은 여전히 기존 용사코팅(Thermal Spray) 공정에 의존하고 있어 부분 보수 시 금속-세라믹 계면 박리 및 접합 신뢰성 저하가 발생하는 문제가 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로, 조성이 점진적으로 변화하여 열적 특성 차이를 완화할 수 있는 경사기능재(Functionally Graded Material, FGM)가 주목받고 있다. 특히 직접용융증착법(Directed Energy Deposition, DED)은 정밀한 조성 제어와 작은 열영향부를 동시에 확보할 수 있어 FGM 제조에 적합한 공정으로 평가된다. 이에 본 연구에서는 DED 공정을 이용하여 Inconel 625/Al2O3 FGM을 제조하고, TBC로서의 적용 가능성을 검토하였다. 공정 변수 최적화를 통해 분말 과열 및 박리 현상 없이 안정적인 적층 조건을 도출하였으며, 적층 과정 중 용융풀 내 대류에 의해 두 상 간의 미세한 혼합 구조가 형성됨을 확인하였다. 이러한 미세구조적 결합은 3점 굽힘 시험에서 균열 전파를 억제하는 것으로 확인되었다. 또한, 레이저 섬광 분석 (Laser Flash Analysis, LFA) 및 화염 열구배 시험 (Flame thermal gradient test) 결과, 적층된 Al2O3 층은 1300 ºC의 고온 환경에서도 Inconel625 기판의 온도를 효과적으로 저감시키는 것으로 나타났다. 상기 결과를 통해 DED 기반 FGM 구조가 가스터빈 고온 부품의 열차폐 코팅 제조 및 부분 보수를 위한 대안 전략으로 활용될 수 있음을 확인했다.

[P11-2]
복합파우더 제조 방법에 따른 L-DED AlSi10Mg/TiC의 미세조직 및 기계적 물성 변화: 김재형, 최윤석*, 이혜인(부산대학교)
Keywords: 알루미늄, 복합재료, AMC, 적층제조, DED

알루미늄 복합재료(AMC)는 낮은 밀도와 우수한 비강도 및 비강성으로 인해 우주항공 및 방위산업 분야에서 경량 구조재로 주목받고 있으며, 최근에는 적층제조 분야에서 AMC가 활발히 연구되고 있다. 그러나 파우더가 바닥에 깔리는 LPBF(Laser Powder Bed Fusion)과 달리, DED(Directed Energy Deposition)는 노즐을 통해 파우더를 직접 공급하는 방식이기 때문에 복합파우더의 유동성 및 구형도와 강화재의 부착 안정성이 적층 품질을 좌우하는 핵심 변수가 된다. 따라서 DED 공정에 적합한 복합파우더를 확보하기 위해서는 파우더 제조 방법에 대한 체계적인 공정의 확립이 필요하다. 본 연구에서는 AlSi10Mg 파우더 표면에 TiC 강화재를 부착하기 위해 Turbula 믹싱, 바인더를 이용한 코팅, 바인더 기반 습식 코팅의 네 가지 방법으로 복합파우더를 제조하였다. 제조된 각 복합파우더에 대해 강화재 분산 균일성, 응집 정도, 파우더 구형도 및 유동성을 평가한 후, DED 적층을 수행하였다. 적층 후에는 미세조직 분석, 기공율 평가, 경도 및 인장 시험을 진행하였으며, 복합파우더 제조 방법이 적층체의 미세조직과 기계적 물성에 미치는 영향을 비교·분석하였다. 이 연구는 2023년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRIT-CT-23-007, 지능형 적층제조 특화연구실)

[P11-3]
레이저 분말 베드 용융 공법으로 적층제조된 철계 준안정 고엔트로피 합금의 극저온 인장 거동: 박하음(한국재료연구원, 고려대학교), 김연우(한국재료연구원), 이유나(부산대학교), 권현석(포항공과대학교), 장효선(한국재료연구원), 김형섭, 유지훈(포항공과대학교), 강남현(부산대학교), 손석수(고려대학교), 박정민(한국재료연구원, 고려대학교)
Keywords: Ferrous medium-entropy alloy, Laser powder bed fusion, Microstructure, Tensile behavior, Cryogenic temperature

첨단 항공우주 시스템의 구조 부품은 극저온을 포함한 넓은 온도 범위에서 충분한 강도와 연성을 유지해야 하며, 경량화와 효율 향상을 위한 복잡한 내부 유로 및 일체형 형상도 요구된다. 이러한 복잡 형상 부품을 효과적으로 구현하기 위해 레이저 분말 베드 용융(laser powder bed fusion, LPBF) 공정이 활용되고 있다. LPBF 공정은 높은 형상 자유도를 제공할 뿐만 아니라, 급속 응고와 반복적인 열 이력에 의해 미세한 셀 구조, 높은 전위 밀도 및 나노 크기의 석출물로 구성된 계층적 미세조직을 형성한다. 최근에는 이러한 극한환경용 적층제조 합금의 기계적 성능을 확보하기 위해 공정 유래 미세조직뿐만 아니라 합금 조성에 따른 고용 및 석출 강화 효과를 함께 활용하는 연구가 이루어지고 있다. 이러한 관점에서 철계 중엔트로피합금(Fe-rich medium-entropy alloy, FeMEA)은 준안정한 면심입방 구조를 가지며, 극저온 변형 중 발생하는 변형 유기 마르텐사이트 변태(deformation-induced martensitic transformation, DIMT)를 통해 높은 가공경화를 나타낼 수 있다. 특히, 탄소와 같은 침입형 원소는 적은 첨가량으로도 고용 강화와 탄화물 석출을 유도할 수 있어, LPBF FeMEA의 미세조직과 기계적 특성을 조절하기 위한 합금 설계 변수로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 Fe-Co-Cr-Ni계의 기본 조성을 유지하면서 탄소 함량을 각각 0.2 및 0.5 at.%로 조절한 두 FeMEA를 LPBF 공정으로 제조하고, 298 및 77 K에서의 인장 특성과 미세조직을 비교하였다. 초기 미세조직 분석 결과, 두 합금 모두 주상

정 형태의 FCC 기지 내부에 나노 크기의 셀 구조와 고밀도 전위망이 형성되었으며, 셀 경계에서는 Cr-rich $M_{23}C_6$ 탄화물이 관찰되었다. 탄소 함량이 높은 $C_{0.5}$FeMEA는 $C_{0.2}$FeMEA보다 미세한 셀 구조와 높은 전위 밀도 및 탄화물 분율을 나타냈다. 298 K에서 $C_{0.5}$FeMEA는 $C_{0.2}$FeMEA보다 높은 항복강도와 인장강도를 나타낸 반면, 총 연신율은 낮게 나타나 강도–연성 상충관계를 보였다. 그러나 77 K에서는 $C_{0.5}$FeMEA가 높은 강도와 함께 $C_{0.2}$FeMEA보다 높은 총 연신율을 나타냈으며, 두 합금의 균일 연신율은 유사하게 나타났다. 즉, 298 K에서 나타난 $C_{0.5}$FeMEA의 총 연신율 열세가 77 K에서는 역전되면서, 강도와 총 연신율의 조합이 모두 $C_{0.2}$FeMEA보다 우수하게 나타났다. 극저온 변형 미세조직 분석 결과, 두 합금 모두 FCC상에서 BCC상으로의 DIMT가 발생하였으며, 탄소 함량에 따라 변형 중 상분율의 변화 양상이 다르게 나타남을 확인하였다.

[P11-4]

AISI 4140 저합금강의 소결 조건에 따른 기공 특성 및 Cu 함침을 통한 물성 제어: 김나영, 김경일*(한국생산기술연구원)

Keywords: Metal Injection Molding, AISI 4140, Sintering, Cu Infiltration, Density

금속분말 사출성형(Metal Injection Molding, MIM)은 복잡한 형상의 금속 부품을 대량 제조할 수 있는 공정으로, 탈지 및 소결 공정을 통하여 최종 제품의 형상과 기계적 특성을 확보한다. 그러나 소결 후 잔존하는 기공은 제품의 밀도 및 기계적 특성에 영향을 미치며, 소결 조건에 따른 기공 구조의 제어가 요구된다. Cu 함침은 소결체 내부의 연결 기공을 액상 Cu로 충진함으로써 소결체의 밀도를 향상시키고 물성을 제어할 수 있는 방법이다. 본 연구에서는 MIM 공정으로 제조된 AISI 4140 소재의 소결 조건에 따른 밀도 및 기공 특성을 분석하고, 소결 및 Cu 함침 공정을 통한 물성 제어 방안을 제시하고자 하였다. AISI 4140 시편을 900 ℃에서 가소결한 후 각각 1230, 1290 및 1350 ℃에서 소결을 진행하여 서로 다른 밀도와 기공 구조를 갖는 소결체를 제조하였다. 각 소결 조건에서 제조된 시편은 X-ray computed tomography(CT)를 이용하여 내부 잔존 기공의 분포 및 구조를 분석하였으며, 이후 Cu 함침 공정을 적용하였다. 최종적으로 소결 전후 및 Cu 함침 후의 미세조직을 분석하였으며 소결 공정조건과 Cu 함침에 따른 물성 변화를 평가하였다.

[P11-5]

LPBF로 제작한 Inconel 939의 표면조도 및 강화기구에 미치는 Micro-blasting media 형상의 영향: 이서진, 고도열(한국생산기술연구원, 성균관대학교), 최민호(한국생산기술연구원, 서울대학교), 윤준원(한국생산기술연구원, 고려대학교), 이해진(한국생산기술연구원), 송승욱(성균관대학교), 이병수*(한국생산기술연구원)

Keywords: 적층 제조, 마이크로 블라스팅, Inconel 939, 연마재, 표면조도

LPBF 공정은 복잡한 형상 구현에 유리하나, 적층 각도가 낮아질수록 Down-skin 부위에 unmelted powder가 과도하게 고착되고 표면 조도가 급격히 악화되는 특성을 갖는다. 이러한 열악한 표면은 기계적 부하에서 응력집중원으로 작용하여 적층 제조된 부품의 기계적 성능을 저하시키는 핵심 원인으로 작용한다. Micro-blasting은 이러한 표면 결함을 제거하는 동시에 연마재의 반복적인 충돌에 의해 표면 소성 변형을 유도할 수 있으나, 연마재의 재질 및 형상에 따른 재료 제거와 표면 강화 메커니즘의 차이에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 LPBF 공정으로 제조된 IN939 합금의 표면조도 및 강화 기구에 미치는 Micro-blasting 연마재 형상의 영향을 연구하였다. 이를 위해 30 °~55 °의 다양한 적층 각도로 2×21×51 mm^3 크기의 판재 시편을 LPBF로 적층하였으며, 표면 결함의 영향이 가장 크게 나타난 30 ° 적층 시편을 사용하였다. Micro-blasting은 형상이 상이한 Al_2O_3 및 ZrO_2 연마재를 사용하여 4 bar의 분사압력, 6.9 mm 노즐 직경, 90° 분사각도, 100 mm 분사 거리 조건에서 최대 300초간 수행하였으며, Up-skin과 Down-skin의 표면조도 및 시편 두께 변화를 측정하였다. 또한, 표면부 미세조직 관찰을 위해 SEM, EBSD 및 XRD 분석을 진행하였으며, 상온 인장시험 및 DIC 분석을 통해 연마재 종류에 따른 기계적 거동 변화를 평가하였다. 실험 결과, Al_2O_3와 ZrO_2 연마재 모두 As-built 시편 표면의 unmelted powder와 표면 요철을 감소시켰으나, 연마재의 형상에 따라 서로 다른 표면 강화 메커니즘을 나타냈다. 각진 입자 형상의 Al_2O_3는 강한 재료 제거 작용을, 구형의 ZrO_2는 재료 제거를 억제하면서 peening에 의한 표면 소성 변형을 유도하였다. XRD 분석 결과, Down-skin의 γ-Ni (111) 피크 FWHM은 As-built의 0.236 °에서 Al_2O_3와 ZrO_2의 블라스팅 처리 후 각각 0.680 °와 0.633 °로 증가하였으며, EBSD 분석에서도 표면 직하부의 국부 변형조직이 관찰되었다. 이러한 표면 및 미세조직적 변화와 함께, 인장시험에서는 Micro-blasting 처리 후 As-built 대비 연신 거동이 개선되는 경향이 확인되었다. 이러한 결과는 연마재의 형상과 충돌 특성에 따라 표면 제거 및 강화 거동이 달라진다는 점을 보여주며, 이를 활용한 Micro-blasting 공정을 통해 LPBF IN939 부품의 표면 상태와 기계적 특성을 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다.

[P11-6]

Sn 공급량 및 성장 온도에 따른 SnO_2나노와이어의 성장 거동: 배주은, 이지운*, 유현우(국립공주대학교 신소재공학부)

Keywords: VLS, SnO_2nanowire, Growth condition, Growth temperature, Growth optimization

본 연구에서는 전기적 특성 변화 관찰을 위해 VLS법으로 SnO_2nanowire를 성장시키고자 하였다. SnO_2nanowire는 대표적인 n형 산화물 반도체 나노와이어로, 넓은 밴드갭, 우수한 화학적·열적 안정성, 높은 전자 이동도를 갖는다는 장점이 있다. SnO_2의 경우 산소 공공에 의해 전자 농도가 쉽게 변화하며, 표면에서의 산소 흡착 및 탈착 반응이 전기전도도 변화와 직접적으로 연결된다. 따라서 SnO_2nanowire는 표면 상태 변화에 민감한 전기적 거동을 나타내며, 표면 개질을 통한 특성 제어가 가능하다고 판단했다. 이러한 SnO_2nanowire를 제조하기 위한 최적의 공정 조건을 알아내고자 하였다. SnO_2nanowire는 vapor–liquid–solid(VLS) 성장법을 이용하여 제조하였다. 전구체로 Sn 분말을 사용하였으며, Sn 분말을 1~3g 알루미나 도가니 내부에 장입하였다. 나노와이어 성장 기판으로는 Pt가 3~5 nm 코팅된 기판을 사용하였으며, 기판의 Pt 코팅면이 Sn 전구체와 마주하도록 알루미나 도가니 상부에 배치하였다. Sn 분말과 Pt 코팅 기판이 장입된 알루미나 도가니를 진공 퍼니스 내부에 위치시킨 후, 퍼니스 내부를 진공 분위기로 조성하였다.

이후 퍼니스의 온도를 700~900 ºC까지 승온하였다. 목표 온도에 도달한 후 Ar과 O의 유량비를 97:3이 되도록 공급하였으며, 성장하는 시간을 10분으로 조절하였다.. 고온에서 증발한 Sn 전구체는 산소와 반응하여 SnO_2를 형성하였으며, Pt 촉매와의 계면에서 VLS 성장기구를 통해 기판 표면에 나노와이어 형태로 성장하였다. 성장 공정이 종료된 후 혼합가스 공급과 가열을 중단하고, 시편을 퍼니스 내부에서 냉각하였다. SnO_2nanowire의 형상과 표면을 관찰하기 위하여 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM)을 이용하였다. SEM 분석을 통해 나노와이어의 직경, 길이, 분포 및 표면 형상 변화를 비교하였다. Sn 분말의 장입량이 과도한 경우, 기판 표면에서 나노와이어가 서로 응집되어 개별 나노와이어의 형상이 명확하게 구분되지 않는 현상이 관찰되었다. 반면, Sn 분말의 장입량을 1 g으로 조절한 경우에는 상대적으로 응집이 덜하며, 개별 나노와이어의 형상이 보다 선명하게 관찰되었다. 이는 Sn 공급량이 나노와이어의 핵생성 및 성장 거동에 직접적인 영향을 미치며, 과도한 Sn 분말이 공급될 경우 높은 핵생성 밀도와 국부적인 과성장으로 인해 분말이 응집되어 나타날 수 있음을 나타낸다. 성장 온도에 따른 나노와이어의 형상 변화 또한 뚜렷하게 나타났다. 퍼니스 온도가 700도인 조건에서는 Pt 촉매의 활성화가 충분하지 않아 전형적인 VLS 성장보다는 VSS(Vapor-Solid-Solid)에 가까운 성장 거동이 나타났으며, 나노와이어의 형성 역시 제한적으로 관찰되었다. 성장 온도를 800도로 증가시키면 Pt 촉매가 활성되며 SnO_2의 결정화와 나노와이어 성장이 본격적으로 진행됨을 관찰할 수 있었다. 퍼니스 온도를 900도까지 증가시켰을 때, 800도의 나노와이어보다 뚜렷하고 연속적인 선형 구조가 나타났다. 이는 높은 성장 온도에서 Sn 전구체의 증발과 물질 전달이 촉진되고 촉매를 통한 수직축방향 성장이 활성화되면서 나노와이어의 성장이 더욱 원활하게 이루어진 결과로 판단된다. 위 실험의 결과를 바탕으로 SnO_2nanowire의 안정적인 성장을 위한 공정 조건을 확립하였다. 최종 성장 조건은 Sn 분말 3g을 알루미나 도가니에 장입하고, 약 3~5 nm 두께로 Pt가 코팅된 Si 기판을 사용하여 퍼니스 온도를 900도로 설장하는 것이다. 이후 Ar과 O_2의 유량비를 97:3으로 조절한 혼합가스를 10분간 공급하여 SnO_2나노와이어를 성장시켰다.

[P11-7]

압연 및 재적층이 Inconel625 직접에너지적층재의 미세조직변화와 피로수명에 미치는 영향: 황건희, 이동규, 김현중(공주대학교), 전재열(한국생산기술연구원), 임민혁(고등기술연구원), 김종태, 한준희(한국생산기술연구원), 이지운*(공주대학교)

Keywords: 인코넬 625, 직접에너지 적층, 압연, 재적층 피로수명

직접에너지적층(Directed Energy Deposition, DED) 공정은 금속 소재의 적층제조 및 부품 보수에 활용되고 있으니, 적층 과정에서 발생하는 반복적인 열 이력으로 인해 기계적 이방성이 형성될 수 있으며, 이는 적층재에 피로수명에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해 압연과 같은 소성변형 공정을 적층 공정과 결합하는 방법이 제시되고 있으며, 압연에 의해 유도되는 소성변형과 재적층 과정에서 발생하는 열이력이 적층재의 조직 및 피로특성에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 본 연구에서는 DED 공정으로 제조한 Inconel 625 합금을 대상으로 압연-재적층-압연-재적층 공정에 따른 피로수명의 변화를 평가하고, 공정 반복에 따른 피로수명의 상관관계를 분석하고자 하였다. 이를 위해 DED 적층재에 일정한 압하율의 압연을 적용한 후 재적층하는 공정을 반복하여 시편을 제작하였다. 제작된 시편은 공정 반복 조건에 따라 구분하여 피로시험을 수행하고, 각 조건에서의 피로수명을 비교할 예정이다. 또한 피로시험 후 파면 분석을 통해 피로균열의 발생 및 전파 거동을 분석하여 재적층 고정이 피로수명에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

[P11-8]

LPBF로 제작한 Inconel 625의 고온산화거동에 미치는 표면처리의 영향: 고도열, 이서진(한국생산기술연구원, 성균관대학교), 최민호(한국생산기술연구원, 서울대학교), 이해진(한국생산기술연구원), 송승욱(성균관대학교), 이병수*(한국생산기술연구원)

Keywords: 장시간 산화, 레이저 분말 베드 융합, 인코넬 625, 마이크로블라스팅, 잔류응력, 적층각도

Micro-blasting 표면 처리는 LPBF 소재의 표면 특성을 개선하는 동시에 표면에 소성 변형과 압축 잔류응력을 형성할 수 있는 기계적 표면 후처리 기술이다. 최근 들어 LPBF의 응용 범위가 크게 확장되어 Micro-blasting 표면 처리도 광범위하게 동시에 적용되고 있다. 특히, Ni기 초합금들이 적용된 부품들은 고온에서 장시간 노출되기 때문에 우수한 산화 저항성을 확보하기 위해 표면처리는 반드시 필요하다. 더욱이, LPBF의 적층 각도에 따라 미세조직이 크게 변화하기 때문에 미세조직에 따른 산화 저항성 평가가 우선적으로 요구된다. 본 연구에서는 다양한 적층 각도로 LPBF 적층한 Inconel 625 합금의 고온 산화 거동에 미치는 Micro-blasting 표면 처리의 영향을 규명하고자 하였다. Inconel 625 시편을 0 º, 30 º, 60 º의 서로 다른 적층각도로 제조하였으며, 쇄기형 Al2O0 bead를 이용하여 Micro-blasting 표면처리를 실시하였다. 고온산화실험은 900, 1000 및 1100 ºC의 대기 분위기에서 최대 720시간까지 노출하여 고온산화거동을 평가하였다. 표면조도와 산화막 두께를 측정하였으며 내부 미세조직 분석을 위해 SEM-EDS, EBSD, EPMA를 이용하였다. 또한 잔류응력을 XRD를 이용하여 깊이별로 측정하였다. 표면에 형성된 잔류응력이 고온 산화거동에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. LPBF Inconel 625는 적층 각도에 따라 결정립의 형상과 결정방위가 뚜렷한 차이가 있었으며, 이러한 미세조직 차이에 따라 고온 산화 거동에서도 차이가 나타났다. 특히 적층 각도에 따른 입계 분포는 Cr을 비롯한 합금 원소의 확산 경로에 영향을 미쳐 Cr-rich 산화층의 형성과 성장 거동에 차이가 나타났다. 산화 후에는 주로 보호성 Cr_2O_3 산화층과 산화층/기지 계면 부근의 Ni_3Nb 금속 간 화합물이 관찰되었으며, 산화가 진행됨에 따라 Cr 고갈 영역과 Ni-rich 및 Nb-rich 비보호성 산화물이 형성되었다. Micro-blasting은 적층 각도에 따른 초기 표면조도 향상 및 표면의 소성변형과 잔류응력 변화를 유도하였으며, 이에 따라 Cr의 외방확산과 Cr-rich 산화층의 형성 거동에 영향을 주었다. 따라서 LPBF Inconel 625의 고온 산화 저항성은 적층 각도에 의해 형성되는 결정립 형상, 결정방위 같은 미세조직 특성과 밀접한 관련이 있으며, Micro-blasting에 의한 표면 개질 및 응력 상태 변화가 합금원소의 확산과 산화막 성장에 있어 뚜렷한 차이를 보였다

[P11-9]

Ti, Si 복합 첨가 L-PBF Al7075 합금의 석출 거동 제어를 위한 열처리 전략: 장동민, 김수빈(인하대학교 / Inha Univ.), 이마태(포항공과대학교 / POSTECH), 김재황(한국생산기술연구원 / KITECH), 이병주(포항공과대학교 / POSTECH), 이기안*(인하대학교 / Inha Univ.)

Keywords: Laser powder bed fusion, Al7075 alloy, Ti–Si addition, Heat treatment, Double direct aging

Al7075 합금은 높은 비강도를 갖지만, 넓은 응고 온도 범위와 높은 고온 균열 감수성으로 인해 L-PBF공정 적용이 제한된다. 본 연구에서는 Ti과 Si이 첨가되어 printability 가 향상된 Al7075 합금을 L-PBF로 제조하고, T6 및 double direct aging (DDA) 열처리에 따른 미세조직과 석출 거동을 조사하였다. Ti 첨가에 의해 형성된 Al_3Ti상은 이종 핵생성 사이트로 작용하여 결정립 미세화를 유도하였으며, 열처리 후에도 비교적 안정적으로 잔류하여 결정립 성장 억제에 기여하였다. Si는 응고 말기의 잔류 액상 유동성을 향상시켜 고온균열을 억제하고, Mg_2Si 및 Si-rich 이차상의 형성에 영향을 미쳤다. 제조 직후 시편에서는 급속 응고로 인해 Zn, Mg 및 Cu가 결정립계와 세포 경계에 편석되었으며, η/η′-$MgZn_2$계 석출상과 Al_3Ti 및 Si계 이차상이 함께 관찰되었다. T6 처리 후에는 고온 고용화 과정에서 $MgZn_2$계 석출상이 재용해·재분배되었으나, 비정상 결정립 성장과 기공 성장으로 인해 기계적 특성이 저하되었다. 반면 DDA 처리에서는 제조 직후의 미세 결정립과 Al_3Ti상 및 Si-rich 이차상을 유지하면서 기지 내부에 미세한 η′/η-$MgZn_2$계 석출상이 균일하게 형성되었다. 이에 따라 DDA 시편은 항복 강도 437.6 MPa 및 인장 강도 493.6 MPa로 가장 높은 강도를 나타냈다. 상기 결과들을 바탕으로 Ti–Si 복합 첨가와 DDA 열처리의 조합은 L-PBF Al7075 합금의 응고 균열을 억제하고 미세조직 및 석출 거동을 효과적으로 제어할 수 있는 전략으로 판단된다.

[P11-10]

Nb-Si-Ti계 합금의 L-DED 미세조직 모사를 위한 표면 레이저 스캔 및 미세조직 분석: 김예본, 김찬, 박민수, 조해주, 이욱진*(부산대학교 재료공학과)

Keywords: Nb-Si계 합금, L-DED, 레이저 출력, 이송 속도, 미세조직

Nb-Si계 합금은 높은 융점과 우수한 고온 기계적 특성을 가지고 있어 차세대 고온 구조재료로 평가받고 있다. 이 합금은 인성에 기여하는 Nb 고용체(Nbss)와 고온 강도 및 크립 저항성을 제공하는 silicide상이 공존하는 미세조직을 가지며, 미세조직의 합금원소 함량에 따라 상 분율과 동정이 크게 영향을 받는다고 알려져 있다. 더불어 Nb-Si계 합금에 종종 주요 첨가 원소로 사용되는 Ti는 Nbss의 소성변형능 및 파괴인성을 향상시키는 동시에 silicide 상의 조성 및 안정성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 한편, 레이저 직접 적층 공정 (Laser directed energy deposition, L-DED)은 금속 분말 공급과 동시에 레이저를 조사하여 국부적인 용융부를 형성하고 이를 통해 재료를 층층히 적층하여 3차원 형상을 제조하는 3D 프린팅 공정이다. L-DED로 금속 소재를 적층할 시 빠른 응고 속도와 반복적인 열이력으로 인하여 기존 제조 공정에서는 나타나기 어려운 독특한 미세조직이 형성되는 것으로 보고되고 있다. 다양한 합금 조성에 따른 L-DED 공정에서의 미세조직 형성 거동을 평가하기 위해서는 각 조성에 해당하는 합금 분말을 가스분무법 등을 통해 개별적으로 제조한 후 L-DED 공정을 수행해야 하므로, 다수의 합금 조성을 평가하는 데 많은 시간과 비용이 요구된다. 따라서 다양한 합금 조성의 L-DED 적용 가능성을 효율적으로 검토하기 위해, 실제 분말 제조 및 적층에 앞서 L-DED 공정에서 발생하는 국부적인 용융 및 응고 과정을 모사하여 합금 조성과 레이저 공정 조건에 따른 미세조직 형성 거동을 선행적으로 평가할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 표면 레이저 스캔을 활용하여 Nb-Si-Ti계 합금의 L-DED 공정에서 발생하는 국부적인 용융 및 응고 과정을 모사하고, 이에 따른 미세조직 형성 거동을 규명하고자 하였다. 이를 위해 Si 및 Ti 함량을 변화시킨 9종의 Nb-Si-Ti 합금 기판에 표면 레이저 스캔을 수행하였다. 레이저 출력과 이송 속도를 변화시키며 용융부를 형성하고, 각 조건에서 형성된 미세조직과 결함을 비교·분석하였다. 본 연구의 결과는 향후 Nb-Si-Ti계 합금의 L-DED 적용을 위한 유망 조성 및 공정 조건 설정의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P11-11]

L-PBF 및 3D 프린팅 된 희생 패턴 기반 정밀주조 이중공정으로 제작된 Ni/Ai 이종금속 격자구조: 김찬, 이주영, 김태윤, 이욱진*(부산대학교)

Keywords: Inconel, Al, 격자구조, PBF, 정밀주조, 금속간 화합물, 기계적 특성

Ni계 합금은 높은 강도와 우수한 내열 특성으로 항공우주 및 수송 분야의 고부가가치 구조부품에 널리 적용되고 있다. 대표적인 Ni계 초합금인 Inconel 718은 고온 환경에서도 우수한 기계적 특성을 유지하지만, 높은 밀도와 원재료 비용으로 인해 경량 구조부품에 적용할 경우 질량 및 소재 사용량 측면에서 한계가 있다. 이러한 한계를 보완하기 위한 구조 설계 방법으로 격자구조가 주목받고 있다. 격자구조는 스트럿과 노드로 구성된 단위격자가 3차원 공간에 반복적으로 배열된 구조로, 낮은 상대밀도에서 높은 비강도와 에너지 흡수 특성을 구현할 수 있다. 또한 격자구조 내 서로 다른 특성을 지닌 재료를 배치함으로써 격자구조체의 기계적 특성을 조절할 수 있다. 본 연구에서는 Inconel 718 격자에 저밀도 Al 합금인 A356을 부분적으로 적용하여 질량 대비 기계적 성능을 확보할 수 있는 이종금속 격자구조를 구현하고자 하였다. Inconel 718/A356 이종금속 격자구조를 제작하기 위해 레이저 분말 베드 용융법 (Laser Powder Bed Fusion, L-PBF) 과 희생패턴 기반 정밀주조를 결합한 하이브리드 공정을 적용하였다. BCC 구조의 Inconel 718 격자를 L-PBF로 제작하였으며, A356 격자와 용탕 유로에 해당하는 희생패턴을 Digital Light Processing 방식으로 제작하여 Inconel 718 격자와 조립하였다. 이후 조립체를 석고 주형재에 매몰하고 소실 공정을 통해 희생패턴을 제거하여 주조 공동을 형성한 뒤, A356 용탕을 주입하여 두 격자가 결합된 Inconel 718/A356 이종 금속 격자구조를 제조하였다. 제조된 이종금속 격자의 A356 충전상태와 주조결함을 확인하였으며, Inconel 718/A356 계면의 미세조직을 분석하여 계면 반응과 금속간 화합물의 형성 거동 및 결합 상태를 평가하였다. 또한 격자의 하중지지 능력과 변형 및 파단 거동을 분석하기 위해 3점 굽힘 시험을 진행하였다. 단일 금속 격자와 이종 금속 격자의 굽힘 특성을 비교하여 A356 격자 도입에 따른 기계적 특성 변화를 분석하였다.

[P11-12]

직접에너지적층-소성가공 복합공정에 따른 Inconel 625 합금의 재결정 거동 및 미세조직 변화: 이동규*, 황건희, 김현중(국립공주대학교), 전재열(생산기술연구원), 임민혁(고등기술연구원), 김종태, 한준희(생산기술연구원), 이지운(국립공주대학교)

Keywords: 인코넬 625, 직접 에너지 적층(DED), 냉간 압연, 재결정

고에너지 빔을 활용하는 DED(Directed Energy Deposition) 적층 제조 기술은 대형 부품의 정밀한 제조 및 국부 보수에 유리하여 첨단 제조 산업에서 크게 각광받고 있다. 특히 주요 소재로 활용되는 Inconel 625는 니켈 기반 초합금으로, 극심한 고온 및 부식 환경에서도 우수한 기계적 특성을 유지하여 터빈 블레이드 등 고부가가치 부품에 필수적이다. 그러나 DED 공정으로 적층된 Inconel 625는 용융풀의 급속 응고와 1차원적 열 흐름으로 인해 조대한 기둥형 결정립이 강하게 발달하며, 이는 부품의 치명적인 이방성(Anisotropy)을 초래한다. 기존에는 이러한 이방성 완화를 위해 장시간의 후열처리나 화학적 첨가제(TiC 등)가 활용되었으나, 공정 효율성 저하 및 조대 조직의 잔존 등 근본적인 한계가 존재했다. 이에 본 연구는 외부 열처리 없이 냉간 압연(Cold Rolling)에 의한 변형 에너지 축적과 DED 재적층 시 발생하는 고입열을 결합한 '다중 사이클 적층-성형 복합 공정'을 제안하고, 해당 공정이 미세조직의 등축정화(Equiaxed grain formation)를 유도하는 거동 및 재결정 메커니즘을 분석하고자 한다. 본 연구에서는 Inconel 625 초기 적층재에 상온에서 30% 압하율로 다중 패스 냉간 압연을 수행하였다. 이후 변형이 인가된 표면 위에 DED 재적층(3 mm)을 진행하여 공정 고유의 열 이력(Thermal history)을 바탕으로 재결정(Recrystallization)을 유도하였으며, 이 '압연-재적층' 사이클을 최대 2회 반복하였다. 아울러, 압연 공정에 의한 조직 제어 효과를 검증 및 비교하기 위해 변형이 인가되지 않은 단순 재적층 시편을 비교군으로 함께 제작하였다. 레이저 가감속 및 불균일한 열 방출로 인한 단부 결함을 배제한 시편 중심부의 RD-ND 면을 기준으로 EBSD 분석을 계획하였다. 추후 진행될 EBSD 분석(IPF, KAM, GOS 등)을 통해, 30% 냉간 압연으로 시편 전반에 걸쳐 급증한 전위 밀도(Dislocation density)와, 특히 변형 에너지가 고도로 집중되는 전단 밴드(Shear band) 및 변형 쌍정(Deformation twin) 주변의 국부적 응력이 재적층 고입열에 의해 어떠한 재결정 구동력(Driving force)으로 작용하는지 관찰할 예정이다. 변형이 인가되지 않은 단순 재적층 시편과 비교 분석하여, 압연-재적층 복합 공정 적용 시에만 기존의 조대한 주상정이 미세한 등축정으로 완벽히 변환되는 양상을 확인하고자 한다. 아울러 다중 사이클이 반복됨에 따라 GOS 2° 미만의 재결정 분율 변화량을 관찰하고, 내부 잔류 응력을 나타내는 KAM 수치의 완화 거동을 단계별로 분석할 계획이다.

[P11-13]

Lithography-based Metal Manufacturing 기법으로 적층제조한 순수 Cu의 저온 충격 특성 및 미세조직: 최정석, 홍민기(국립공주대학교), Gyorgy Harakaly(Incus GmbH), 이기준(국립금오공과대학교), 이지운*(국립공주대학교)

Keywords: 구리, 충격시험, 극저온, Lithography-based Metal Manufacturing

순구리는 우수한 전기 및 열전도성과 높은 연성을 바탕으로 다양한 산업 분야에서 활용되는 대표적인 구조 및 기능성 소재이다. 최근에는 복잡한 형상의 구리 부품을 제조하기 위한 적층제조 기술이 주목받고 있다. 그중 Lithography-based Metal Manufacturing (LMM) 공정은 금속 분말과 광경화성 바인더를 이용하여 높은 치밀도의 금속 부품을 제조할 수 있다. LMM 공정은 구리처럼 높은 반사율과 열전도율로 직접 레이저를 조사하여 형상을 만드는 기존 적층제조 공정에 적용 한계가 있는 재료의 차세대 적층제조 공정이다. 이렇게 LMM 공정을 통해 제작된 구리 부품이 다양한 산업 분야에 적용되려면 극저온 환경에서의 기계적 특성과 변형에 따른 미세조직 변화에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 LMM 공정을 이용하여 제작한 순구리의 극저온 충격 특성과 충격 변형에 따른 미세조직 변화를 분석하였다. 충격시험은 상온, -100 ℃, -196 ℃에서 수행하였으며, 각 온도에서의 충격에너지 흡수량을 비교하였다. 또한 충격시험 전후의 미세조직적 변화를 분석하기 위해 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM), 전자후방산란회절(EBSD)를 이용하였다. Kernel Average Misorientation(KAM), 저각입계(LAGB) 분율, IPF map 등을 통해 충격시험 온도에 따른 결정립의 변형 정도와 전위 축적 거동을 평가하였다. 실험 결과, LMM 공정으로 제작된 순구리는 충격시험 온도가 감소하여도 충격에너지 흡수량이 감소하지 않는 결과를 보였다. 특히 -196 ℃에서 가장 큰 충격에너지 흡수량을 얻었다. EBSD 분석결과 극저온으로 갈수록 KAM 값과 저각입계의 분율이 증가하는 경향을 나타냈다. 이를 통해 극저온으로 갈수록 전위 축적이 증가했다는 것을 확인했고, 극저온에서도 전위의 활주를 통한 소성변형 및 충격에너지 흡수 거동이 효과적으로 작동했다고 판단하였다. 또한 온도 감소에 따라 약 60° 부근의 방위차 분포가 증가하는 경향이 관찰되었으나, Σ3 쌍정 분율의 변화는 제한적이어서 쌍정 변형보다는 전위 기반 소성변형이 주요한 변형 기구로 작용한 것으로 판단된다. 이러한 결과를 통해 LMM 공정으로 제작된 순구리는 극저온 환경에서도 전위의 활주에 기반한 소성변형 능력을 유지하며, 취성 파괴로의 전이가 일어나지 않는다는 것을 확인하였다.

[P11-14]

DED로 제조된 316L 스테인리스강의 적층 방향에 따른 극저온 변형거동 분석: 박정현, Muhammd Ishtiaq(경상국립대학교), 김영균(한국재료연구원), 강성규*(경상국립대학교)

Keywords: 316L 스테인리스강, 극저온, 적층제조, DED

316L 스테인리스강은 경제성과 저온에서의 우수한 기계적 성능으로 인해 액체수소 저장탱크 및 항공우주 구조물과 같은 극저온 응용 분야에서 널리 활용되고 있다. 최근 적층 제조(additive manufacturing) 기술의 발전으로 인해 극저온 환경에 적합한 316L 스테인리스강 부품을 제조하려는 연구 관심이 증가하고 있다. 그러나 지금까지 단조재 및 주조재 316L의 극저온 변형 거동에 대한 연구는 다수 보고된 반면, 적층 제조된 316L에 대한 연구는 상대적으로 제한적이다. 이에 본 연구에서는 Directed Energy Deposition (DED) 공정을 통해 제조된 316L 스테인리스강의 변형 거동을 298 K, 77 K, 4.2 K에서 비교 분석하였다. 적층 공정에서의 빌드 형상 및 적층 방향에 따른 미세조직의 영향을 고려하여 시편을 제작한 후 각 온도 조건에서 인장시험을 수행하였다. 또한 변형 전·후의 미세조직 변화를 관찰함으로써 온도 의존적 변형 메커니즘과 강도-연성 간의 상관관계를 규명하고자 하였다. 그

결과, 온도가 감소함에 따라 항복강도와 인장강도는 모두 증가하였으며, 극저온 조건에서도 변형쌍정과 변형 유기 마르텐사이트의 활성화로 인해 높은 연신율이 유지되는 것을 확인하였다. 또한 4.2 K에서는 뚜렷한 세레이션 거동(serrated flow)이 관찰되었으며, 이는 초극저온 조건에서 불연속적인 전위 운동이 변형 거동으로 작용함을 시사한다. 본 연구는 DED 공정으로 제조된 316L 스테인리스강의 극저온 기계적 특성과 변형 메커니즘에 대한 기초적인 이해를 제공하며, 극저온 구조 부품의 설계 및 적용을 위한 중요한 지침을 제시한다.

[P11-15]

MicroCT 기반 Ti-6Al-4V 옥텟트러스 격자구조체의 열처리에 따른 변형 거동 분석: 전찬혁, 차다은, 강성규*(경상국립대학교)

Keywords: 타이타늄 합금, 격자구조체, 적층제조, Micro-CT

옥텟트러스 격자구조체는 뛰어난 경량성과 우수한 충격흡수능으로 인해 차세대 구조 소재로 주목받고 있다. 적층제조를 활용한 Ti-6Al-4V 합금 기반 격자 구조체는 빠른 냉각속도에 의해서 α′ 마르텐사이트 미세조직이 형성되어 취성 거동이 나타난다. 열처리시 α′ 마르텐사이트 미세조직을 α+β로 분해하여 취성 거동을 완화시킬 수 있다. 그러나 열처리시 복잡한 형상을 지닌 격자구조체의 변형 거동이 변화하게 되어, 열처리 전후에 따른 격자구조체의 변형 거동 및 스트럿 단위 파단 거동에 대한 체계적인 분석이 필요하다. 이에 본 연구에서는 적층제조로 옥텟트러스 격자구조체를 제작 후 열처리 전후 옥텟트러스 격자구조체 시편에 국부 파단 메커니즘 차이를 분석하기 위해 압축 시험 후 Micro-CT 촬영하였다. 그 결과 서로 다른 스트럿 직경(스트럿 직경 0.4, 0.5, 0.6 mm)및 열처리 시간(900 ºC 10, 30, 60, 120분)을 가진 옥텟트러스 구조체의 국부 파단 양상의 차이를 확인하였다. 옥텟트러스 격자 구조체 조건 별 파단 부를 확인하기 위해 Micro-CT 상에서 끊어진 스트럿 개수를 확인하였으며 Micro-CT 데이터를 3차원으로 재구성하여 압축 전 형상과 비교함으로써 스트럿의 좌굴 양상 및 국부 파단 메커니즘을 분석하였다. 본 연구를 통해 격자 구조체의 국부 파단 메커니즘을 명확히 규명하는 데 기여하며, 향후 안정성과 기계적 신뢰성이 확보된 격자 구조 설계의 기초 자료로 활용될 수 있다.

[P11-16]

DED 공정으로 제조된 SS316L/CoCrNi 이종 접합체의 계면 미세조직 및 국소 변형 메커니즘 분석: 강태욱, 채호병, 우완측*(한국원자력연구원)

Keywords: SS316L, CoCrNi, Heterogeneous Interface, Microstructure

본 연구에서는 적층 제조(Direct Energy Deposition, DED) 공정을 통해 SS316L 기판 위에 CoCrNi 고엔트로피 합금을 적층한 이종 소재 접합체의 계면 미세조직 특성과 변형 메커니즘을 고찰하였다. 계면 영역에 대한 SEM, EDS, EBSD 분석 결과, 적층 인터페이스는 SS316L / MIX (혼합 영역) / CoCrNi 의 세 가지 특징적인 영역으로 구분됨을 확인하였다. 상이한 영역 간 경계면은 결정학적 위상(Phase)이 불연속적으로 단절되지 않고 연속적인 결정립 성장을 보이며 상호 연결되는 반면, 화학 조성 측면에서는 구배를 형성하며 명확히 변화하는 특성을 보였다. Kernel Average Misorientation (KAM) 맵 분석 결과, 원자 확산 및 열이력이 집중된 MIX 영역에서 주변 기주 및 적층재 대비 상대적으로 높은 국소 변형/전위 밀도가 존재함을 확인하였다. 인장 시험 후 파단면(Fractography) 관찰 결과, 계면 부근에서 기공이나 균열 등 유해한 기계적 결함(defect)은 관찰되지 않았다. 특징적으로 SS316L 영역과 CoCrNi 영역 간 연성 딤플(dimple)의 크기가 확연한 차이를 보였으며, 딤플 사이즈의 전이는 316L/CoCrNi 계면을 경계로 정밀하게 발생하였다. 변형 후 EBSD 분석을 통해 SS316L 및 MIX 영역에서는 변형 쌍정(Deformation Twin)과 함께 Kurdjumov-Sachs (K-S) 방위 관계를 갖는 변형 유도 마르텐사이트 상변태가 발생한 반면, CoCrNi 영역에서는 마르텐사이트 변태 없이 변형 쌍정 위주의 변형이 유도되었음을 확인하였다. 향후 연구에서는 In-situ 중성자 회절(Neutron Diffraction) 인장 시험을 수행하여, 변형 과정 중 영역별(SS316L, MIX, CoCrNi) 국소 하중 분배(Load Partitioning) 행동 및 계면 응력 집중 현상을 정량 평가할 예정이다. 아울러 변형률 가해에 따른 오스테나이트-마르텐사이트 실시간 상변태 운동학(Kinetics) 및 격자 변형률(Lattice Strain) 변화를 실시간으로 추적함으로써 SS316L/CoCrNi 이종 접합체의 변형 메커니즘을 규명하고자 한다.

[P11-17]

Fabrication and characterization of refractory NbTaV complex concentrated alloy powder via ultrasonic atomization for additive manufacturing: Jinwoo Seok(Korea Institute of Industrial Technology, Kyung Hee University), Juree Jung, Jongtae Kim, JeSun On, Seul-Ki Han(Korea Institute of Industrial Technology), Bin Lee(Kyung Hee University), Junhee Han, Leeseung Kang*(Korea Institute of Industrial Technology)

Keywords: Powder metallurgy, Refractory Complex Concentrated Alloy, Ultrasonic Atomization, additive manufacturing

Refractory complex concentrated alloys (RCCAs) have attracted significant attention for extreme-environment applications owing to their high melting temperatures, exceptional thermal stability, and superior mechanical performance. However, shaping these refractory elements (Nb, Ta, V) into high-quality feedstock powder remains challenging due to high melting points and high reactivity with interstitial gases. In this study, spherical NbTaV RCCA powder was successfully fabricated via ultrasonic atomization to apply a clean and tailored feedstock for metal additive manufacturing (AM). The physical, chemical, and microstructural characteristics of the atomized powder are systematically evaluated to verify its suitability as a feedstock for additive manufacturing. Scanning electron microscopy (SEM) is utilized to examine the particle morphology, surface characteristics, and presence of satellite particles. Phase formation and crystalline structure are analyzed via X-ray diffraction (XRD) to examine the evolution of the body-centered cubic (BCC) solid solution. Furthermore, the interstitial pickup (O, N, H) during the atomization process is quantitatively determined using inert gas fusion. The powder flowability and dynamic rheological behavior are thoroughly assessed through Hall flowmeter and avalanche testing to investigate the recoating behavior and packing quality required for powder bed fusion. Based on these evaluations, the feasibility and

processing window of ultrasonic atomization for producing clean, spherical refractory complex concentrated alloy powders will be presented and discussed in detail.

[P11-18]

LPBF Co–Cr–Mo–N 합금의 초기 미세조직에 따른 열처리 후 미세조직 진화 및 기계적 특성 변화: 김려현, 정다은, 곽종현(국민대학교), Zhou Zhenxing, Naoyuki Nomura(Tohoku univeristy), 성효경*(국민대학교)

Keywords: CoCrMo-N, LPBF, 공정

Laser Powder Bed Fusion(LPBF)은 높은 냉각속도와 반복적인 열이력으로 인해 방향성 응고조직, cellular substructure 및 결정학적 집합조직과 같은 비평형 미세조직을 형성한다. 이러한 as-built 상태의 초기 미세조직은 후속 열처리 과정에서 발생하는 상변태, 석출 및 조직 재배열에 영향을 미칠 수 있으나, LPBF Co–Cr–Mo–N 합금에서 초기 미세조직과 열처리 후 미세조직 및 기계적 특성 간의 상관관계에 관한 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 동일 조성의 Co–33Cr–5Mo–0.4N (wt.%) 합금을 서로 다른 LPBF 공정조건으로 제조하여 상이한 초기 미세조직을 형성하고, 열처리에 따른 미세조직 진화와 이에 수반되는 기계적 특성 변화를 분석하였다. LPBF 공정조건에 따라 as-built 시편에서는 melt pool 형상, 응고조직, cellular substructure 및 결정학적 집합조직에서 차이가 나타났다. 이후 동일한 열처리를 적용하여 초기 미세조직에 따른 열적 반응을 비교한 결과, substructure의 변화와 함께 결정립 및 결정학적 특성의 변화, 석출상의 형성 및 분포 변화가 관찰되었으며, 이러한 미세조직 진화 양상은 초기 as-built 상태에 따라 상이하게 나타났다. 또한 열처리에 의해 형성된 최종 미세조직의 차이는 각 조건의 기계적 특성 변화와 밀접한 상관관계를 나타냈다. 본 연구를 통해 LPBF Co–Cr–Mo–N 합금의 열처리 후 미세조직과 기계적 특성은 열처리 조건뿐만 아니라 LPBF 공정에서 형성된 초기 미세조직의 영향을 크게 받음을 확인하였다. 이를 바탕으로 LPBF 공정조건–초기 미세조직–열처리 미세조직 진화–기계적 특성 간의 상관관계를 규명하고, Co–Cr–Mo–N 합금의 요구 물성 확보를 위한 LPBF 공정 및 후처리 조건 최적화에 활용할 수 있는 기초적인 설계 지침을 제시하고자 한다.

[P11-19]

고출력 DED Ti-6242 합금의 제조 가능성 및 변형기구 고찰: 한재연, 김준혁(국립창원대학교), 권영삼((주)쎄타텍), 박정효, 김규식, 김대웅(국방과학연구소), 홍현욱*(국립창원대학교)

Keywords: Ti–6Al–2Sn–4Zr–2Mo, Direct energy deposition (DED), α' martensite, α+β lamellae, Tensile properties, Slip transfer

Ti–6Al–2Sn–4Zr–2Mo (Ti-6242) 합금은 Ti–6Al–4V 대비 우수한 고온 기계적 특성을 갖는 near-α Ti 합금으로 항공우주 분야에 활용되고 있으며, 최근에는 복잡 형상 제조 및 공정 비용 절감을 위해 직접 용착 방식(Directed Energy Deposition, DED) 등 적층제조 공정의 적용이 확대되고 있다. 일반적으로 적층제조된 Ti 합금은 급속 냉각으로 인해 α′ 마르텐사이트가 형성되어 높은 강도를 나타내는 반면 연성이 제한되는 것으로 알려져 있으며, 이를 개선하기 위해 후열처리에 의존한 접근이 주로 적용되어 왔다. 그러나 이러한 접근은 공정 조건에 따른 as-built 미세조직 제어 가능성과 이에 따른 변형 거동에 대한 이해를 제한해왔다. 이에, 본 연구에서는 고출력 DED 공정을 적용하여 제조된 Ti-6242 합금을 대상으로 인장 특성과 미세조직 기반 변형 거동을 분석하였다. As-DED 시편의 미세조직은 α′ 마르텐사이트가 지배적이지 않았으며, basket-weave 형태의 α+β 라멜라 조직이 주를 이루고, 국부적으로 grain boundary α 및 구상화된 α상이 관찰되었다. 응력 완화를 목적으로 적용된 stress-relief 열처리 이후에도 α+β 라멜라 조직은 유지되었으며, lath 폭의 소폭 증가 외에 뚜렷한 미세조직 변화는 관찰되지 않았다. 인장 시험 결과, as-DED 시편은 응력완화 열처리 시편 및 기존 문헌의 후열처리된 적층제조 시편 대비 우수한 강도–연성 조합을 나타냈다. 파면 분석에서는 모든 시편에서 dimple 파괴가 지배적으로 관찰되었으며, 적층제조 결함은 확인되지 않았다. TEM 분석 결과 α lath 내부의 높은 전위 밀도와 β상 내 다수의 slip line이 관찰되었으며, 특히 as-DED 시편에서 β상의 변형 정도가 더 크게 나타났다. 이는 α/β 계면에서의 slip transfer 활성화에 의해 전위 수용성이 증가하고, 국부적인 strain accommodation이 지연된 결과로 판단된다. 본 연구는 고출력 DED 공정을 통해 후열처리 없이도 우수한 강도–연성 특성을 구현할 수 있음을 보였으며, 적층제조 Ti-6242 합금의 변형 거동에 대한 미세조직 기반 이해를 제시한다.

[P11-20]

레이저 분말 베드 용융법으로 적층제조된 Ti-6Al-4V 합금의 상대밀도 및 결함 형성에 미치는 공정변수 영향에 대한 SHAP 기반 분석: 윤지상(한국재료연구원 나노재료연구본부, 국립부경대학교 금속공학과), 이승연(한국재료연구원 신기능분말재료연구센터), 박하음(한국재료연구원 나노재료연구본부, 고려대학교 미래융합소재학과), 김연우(한국재료연구원 나노재료연구본부), 정재면(한국재료연구원 재료데이터/분석연구본부), 유지훈(한국재료연구원 나노재료연구본부), 박정민*(한국재료연구원 나노재료연구본부, 한국재료연구원 신기능분말재료연구센터, 고려대학교 미래융합소재학과)

Keywords: 레이저 분말 베드 용융법, Ti-6Al-4V, 공정변수, 상대밀도, SHAP

레이저 분말 베드 용융법(Laser powder bed fusion, LPBF)은 높은 형상 자유도를 기반으로 복잡한 형상의 금속 부품을 제조할 수 있는 대표적인 금속 적층제조 기술이다. LPBF 공정에서 레이저 출력과 스캔 속도 등의 공정변수에 따른 입열량은 조형체의 상대밀도 및 결함 형성에 큰 영향을 미치므로, 고밀도 조형체를 제조하기 위해서는 공정변수의 적절한 제어가 요구된다. 일반적으로 LPBF 공정조건에 따른 입열량을 평가하기 위하여 체적에너지밀도(volumetric energy density, VED)가 널리 활용되고 있으나, VED는 각 공정변수가 입열에 동일하게 기여한다고 가정하기 때문에 개별 공정변수의 영향을 정량적으로 해석하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 다양한 레이저 출력 및 스캔 속도 조건에서 Ti-6Al-4V 합금을 적층제조하고, 공정조건에 따른 상대밀도 및 결함 형성 거동을 분석하였다. 또한 레이저 출력과 스캔 속도가 상대밀도에 미치는 개별적인 영향을 정량적으로 분

석하기 위하여 ANN, GPR, AdaBoost, SVR 및 RF 기반의 머신러닝 모델을 구축하여 상대밀도를 예측하였다. 구축된 머신러닝 모델을 기반으로 SHAP(Shapley additive explanations) 분석을 적용하여 상대밀도 예측에 대한 각 공정변수의 기여도 및 영향 방향을 정량적으로 비교하였다. 이를 통해 기존 VED 기반 분석으로는 구분하기 어려운 레이저 출력과 스캔 속도의 개별적인 영향을 규명하였으며, 본 데이터 기반 분석법은 고밀도 LPBF 조형체 제조를 위한 공정조건 최적화에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P11-21]

DED 공정을 통해 제조된 MSR용 Ni계 초합금의 고온 기계적 특성 및 파단 거동 연구: 이정림, 김기동, 송상우*(한국재료연구원)

Keywords: 직접에너지적층, 용융염원자로, 고온 인장, Ni계 합금

용융염원자로(Molten Salt Reactor, MSR)는 500~700 ºC의 고부식 용융염 환경에서 가동되는 차세대 원자력 시스템으로, 장기간 구조적 안전성을 담보할 수 있는 고온 내부식 다층구조소재(클래딩)의 적용이 필수적이다. MSR의 가혹한 가동 환경을 고려할 때, 원자로의 수명과 안전성을 위해 용융염과 직접 접촉하는 클래딩 적층부의 고온 기계적 특성 데이터의 확보가 요구된다. 최근 DED(Directed Energy Deposition) 공정을 표면 클래딩 기술로 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 아직까지 MSR 환경에 특화된 Hastelloy N 적층재의 온도별 기계적 물성 및 고온 변형 거동에 대한 체계적인 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 기존 MSR 내부식 클래딩 후보재(IN625, Hastelloy N)와 함께, 내식성 증대 및 공정 균열 저감을 목적으로 설계된 Modified Hastelloy N(HN-Mod.) 합금을 DED 공정으로 적층하고, 이들의 고온 인장 거동을 상호 비교·분석하였다. 각 소재에 대한 최적 DED 적층 조건을 도출하였으며, 상온(RT), 300 ºC, 600 ºC 조건에서 고온 인장 시험 (승온 6 ºC/min, 평형 유지 1시간, 변형률 속도 0.0014/s)을 수행하였다. 시험 결과, 세 소재 모두 변형 온도가 300 ºC에서 600 ºC로 상승함에 따라 항복강도와 인장강도가 감소하는 전형적인 고온 연화 현상을 나타내었다. 상온 물성 평가에서는 IN625가 가장 우수한 강도(항복 676.1 MPa, 인장 944.1 MPa)를 보였으며, 신규 설계된 HN-Mod.는 ~47%의 가장 높은 상온 연신율을 기록하여 미세 조성 제어를 통한 연성 확보 효과를 확인하였다. 반면 600 ºC의 고온 환경에서는 소재별 변형 거동의 차이가 뚜렷하게 관찰되었다. IN625는 600 ºC에서도 우수한 강도와 연신율(48.0%)을 유지하며 높은 고온 구조적 안정성을 보인 반면, HN-Ref.와 HN-Mod. 소재는 강도 감소와 함께 연신율이 상온 대비 연신율이 약 30% 수준으로 크게 저하되는 거동을 보였다. 소재 간 상이한 고온 파단 거동 및 물성 저하 원인을 규명하기 위해, SEM 및 EBSD 분석을 통해 기계적 특성에 직접적인 영향을 미치는 야금학적 인자(Laves phase 석출 거동 및 결정립 조대화)를 심층 분석하였다. 이를 바탕으로, 차세대 용융염원자로(MSR) 고온 내부식 구조용 클래딩 소재로서의 적용 가능성을 평가하였다.

[P11-22]

L-PBF로 제조된 Hastelloy X-Y_2O_3 합금의 미세구조 및 기계적 특성 연구: 이주영, 정상희, 이빈*(경희대학교)

Keywords: Hastelloy X, LPBF

니켈 기반 초내열합금인 Hastelloy X는 고용강화로 우수한 고온 특성을 나타내며, 터빈 블레이드와 같이 고온 환경에서 작동하는 발전 산업용 부품에 주로 사용된다. 그러나 L-PBF 공정으로 제조된 Hastelloy X의 고온 성능 향상을 위한 산화물 분산 강화 적용 연구는 아직 제한적이다. 본 연구에서는 Y_2O_3 나노입자의 균일한 분산을 유도하기 위해 L-PBF 공정 전 mechanofusion 기반의 분말 전처리 공정을 적용하였으며, 이를 통해 제조된 Y_2O_3 첨가 Hastelloy X의 미세조직 및 기계적 특성을 평가하였다. 특히 Y_2O_3 첨가 및 분산이 L-PBF Hastelloy X의 미세조직 발달, 결정립 미세화, 균열 거동 및 산화물 분산 강화 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 mechanofusion 공정에 따른 Y_2O_3의 분산 거동을 확인하고, 이러한 산화물 분포가 적층 제조된 Hastelloy X의 상온 및 고온 기계적 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

[P11-23]

Fe-Nb 첨가 및 ODS 강화가 DED 적층 Ti-6Al-4V 합금의 미세조직 및 기계적 이방성에 미치는 영향: 이윤선*, 김다혜, 김건우, 곽륜호(한국생산기술연구원), 서기완(서울대학교)

Keywords: 직접에너지적층 (Direct Energy Deposition), 산화물 분산 강화 (Oxide Dispersion Strengthened), 기계적 이방성, 미세조직

Ti-6Al-4V 합금은 높은 비강도, 우수한 내열성 및 내식성으로 항공우주 분야에서 널리 활용되고 있다. 그러나 낮은 연성과 난삭성으로 인해 복잡한 형상의 부품 제조에 어려움이 있으며, 이를 극복하기 위한 대안으로 직접에너지적층(DED) 공정이 주목받고 있다. 하지만 DED 공정 특유의 급속 냉각은 조대한 주상정 결정립 형성을 유발하여 현저한 기계적 이방성을 초래하고, 구조재료로서의 신뢰성을 저하시키는 문제가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 응고 미세조직 제어를 목적으로 Fe 및 Nb를 첨가한 Ti-6Al-4V-Fe-Nb 합금을 설계하였으며, 산화물 분산 강화(ODS) 분말을 적층 공정 중 도입하여 분산 입자에 의한 결정립 미세화 효과를 통해 기계적 특성을 향상시키고자 하였다. DED 공정으로 제조된 Ti-6Al-4V-Fe-Nb 합금 및 ODS 첨가 합금의 미세조직 변화와 기계적 특성을 체계적으로 분석하고, 기존 상용 Ti-6Al-4V와 비교·평가하였다. EBSD 분석 결과, Fe-Nb 첨가에 의해 주상정 결정립이 부분적으로 완화되었으며, ODS 분말 도입 시 결정립 크기가 885 μm에서 89 μm로 현저히 감소하고 등축정 미세조직으로의 전환이 확인되었다. 경도 및 인장강도는 Fe-Nb 첨가 및 ODS 강화에 따라 순차적으로 향상되었으며, ODS 합금에서 수직/수평 방향 간 강도 차이가 감소하여 기계적 이방성이 효과적으로 개선됨을 확인하였다. 본 연구 결과는 합금 설계 및 ODS 첨가가 DED 제조 티타늄 부품의 이방성 저감과 종합적인 기계적 성능 향상에 기여할 수 있음을 보여준다.

[P11-24]

소수성 SiO_2 나노입자를 통한 저가형 HDH Ti의 L-PBF 적용 및 기계적·기능적 특성 평가: 박상욱, 강태후, 이유진*, 이빈*(경희대학교)

Keywords: Laser Powder Bed Fusion, α-Ti, Mechanical properties, In-situ EBSD, cytocompatibility

Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) 공정은 높은 형상 자유도와 치수 정밀도를 바탕으로 상온 가공이 어려운 타이타늄 합금과 같은 금속 분말의 복잡 형상 제조에 활용되며, 다양한 산업으로 적용이 확대되고 있다. 그러나 L-PBF에 주로 사용되는 구형 Ti 분말은 가스 또는 플라즈마 아토마이징과 같은 고비용 제조공정을 필요로 하며, 높은 원료 가격은 Ti 기반 L-PBF 부품의 상용화를 제한하는 주요 요인 중 하나이다. 본 연구에서는 이러한 경제적 한계를 완화하기 위해 저가의 비구형 hydride-dehydride(HDH) Ti 분말을 구형 Ti 분말과 6:4 비율로 혼합하고, 0.1 wt.% SiO_2 나노입자를 건식 코팅하였다. SiO_2 건식 코팅을 통해 혼합 분말의 유동성을 향상시켰으며, 이를 바탕으로 안정적인 리코팅과 L-PBF 적층성을 확보하였다. 비구형 HDH Ti 분말을 60% 포함한 혼합 분말로 제조된 시편은 최대 인장강도 762.6 ± 3.8 MPa, 항복강도 664.2 ± 4.9 MPa 및 연신율 22.1 ± 0.7%를 나타냈다. 이는 우수한 연성을 유지하면서 ASTM Grade 4 Ti의 최소 강도 요구조건을 상회하는 수준이다. 또한 in vitro 세포독성 평가에서 유의미한 세포독성 반응이 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 고가의 구형 Ti 분말 사용량을 줄이면서도 안정적인 L-PBF 공정성과 우수한 기계적 성능을 확보할 수 있음을 보여준다. 이를 통해 저비용 Ti 적층제조를 위한 원료 설계 전략의 산업적 적용 가능성을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 분말 형상과 SiO_2 건식 코팅이 적층체의 기계적·기능적 특성에 미치는 영향을 보다 체계적으로 비교하였다. 비교 조건은 0.1 wt.% SiO_2가 건식 코팅된 비구형 HDH Ti/구형 Ti 6:4 wt% 혼합 분말, 0.1 wt.% SiO_2가 건식 코팅된 구형 Ti 분말 및 일반 구형 Ti 분말의 세 가지로 구성하였다. 각 조건으로 제조된 시편에 대해 상온 및 극저온 인장시험과 마모 및 부식시험을 수행하였다. 또한 미세조직과 Si 분포를 분석하여 원료 분말 조건에 따른 기계적·기능적 특성 변화와의 상관관계를 평가하였다. 추가적으로 인장 변형 과정에서 단계적인 변형률에 따른 전자후방산란회절(Electron Backscatter Diffraction, EBSD) 분석을 수행하여 결정립 방위 변화와 국부 변형 축적 거동을 추적하였다. 이를 통해 SiO_2 건식 코팅과 원료 분말 형상이 L-PBF Ti의 공정성, 변형 거동 및 기능적 성능에 미치는 영향을 종합적으로 규명하고, 저비용 비구형 Ti 분말의 산업적 활용 가능성을 평가하였다.

[P11-25]

L-PBF CuCrZr 합금의 후열처리에 따른 미세조직과 기계적·전기적 특성: 김수빈, 박준영, 이정림, 이윤주, 김승현, 송상우*(한국재료연구원)

Keywords: CuCrZr, Laser powder bed fusion, Microstructure, Mechanical properties

최근 핵융합 에너지의 상용화를 위한 기술 개발이 가속화되면서, 고열유속 환경에 적용되는 디버터 소재의 제조기술 및 특성 제어에 대한 관심이 증가하고 있다. CuCrZr 합금은 높은 열전도 특성을 바탕으로 핵융합로 디버터의 heat sink 및 냉각 구조에 적용되는 주요 소재이며, 최근 복잡한 형상 구현과 높은 설계 자유도를 확보하기 위한 적층제조 기술의 적용이 연구되고 있다. 본 연구에서는 Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)을 이용하여 CuCrZr 합금을 제조하고, as-built, direct aging (DA) 및 solution annealing + aging (SAA) 조건에 따른 미세조직과 기계적·전기적 특성 변화를 조사하였다. 열처리에 따라 Cr-rich 석출물의 크기와 분포에 뚜렷한 변화가 나타났으며, DA 조건에서는 미세하고 조밀한 Cr 석출물이, SAA 조건에서는 상대적으로 조대한 Cr 석출물이 관찰되었다. 이러한 미세조직 변화에 따라 DA 시편의 항복강도는 as-built의 169 MPa에서 462 MPa로 크게 증가하였다. SAA 시편의 경우, 244 MPa의 항복강도와 47%의 연신율을 나타냈으며, 전기전도도는 90.59%IACS로 세 조건 중 가장 높은 값을 보였다. 이러한 결과를 바탕으로 L-PBF CuCrZr 합금의 후열처리에 따른 Cr 석출 거동과 기계적 특성 및 전기전도 특성 간의 상관관계에 대해 논의하고자 한다.

[P11-26]

Effects of L-PBF Processing on the Proton-Irradiation Hardening of 304L Stainless Steel for SMR Applications: 오지윤, 함준혁, 김지현*(Ulsan National Institute of Science and Technology)

Keywords: Laser powder bed fusion, 304L Stainless Steel, Proton Irradiation, Nanoindentation, Small Modular Reactors, Nuclear Qualification, Additive Manufacturin

Laser powder bed fusion has emerged as a promising additive manufacturing technology for nuclear structural components, offering design flexibility and reduced fabrication lead times relative to conventional processes. In particular, austenitic stainless steel 304L is a well-established alloy in nuclear systems owing to its favorable mechanical properties and corrosion resistance. With growing interest in applying additive manufacturing to small modular reactors, the accumulation of reliable experimental data on additively manufactured nuclear materials has become an important research topic for qualification purposes. In this study, the microstructural, mechanical, and proton-irradiation-hardening characteristics of L-PBF processed 304L stainless steel were examined relative to wrought 304L, as a foundational experimental dataset to support nuclear qualification. Microstructural characterization used optical microscopy, scanning electron microscopy, and electron backscatter diffraction to identify melt-pool morphology, cellular solidification microstructure, and phase fractions. Room-temperature tensile testing provided yield strength, ultimate tensile strength, and elongation, and fracture surfaces were examined by fractography to identify the dominant failure mechanism. Wrought and L-PBF processed 304L stainless steel were also irradiated with 2 MeV protons to 1 and 3 dpa at 360 ^{o}C, and depth-dependent hardness was measured by nanoindentation to assess irradiation-induced hardening. Microstructural characterization revealed a fine cellular solidification substructure in L-PBF 304L that is absent in wrought 304L; melt-pool morphology varied with observation orientation, consistent with the layer-by-layer nature of the build process. L-PBF 304L exhibited higher yield strength than wrought 304L, with comparable ultimate tensile strength and lower but

still substantial elongation, consistent with substructure- and dislocation-mediated strengthening rather than a change in deformation mechanism. Fracture surfaces of L-PBF 304L showed a ductile dimpled morphology together with pore-like defect features, indicating that as-built porosity, while not eliminating ductility, serves as preferential sites for void nucleation. After 3 dpa proton irradiation, L-PBF 304L showed substantially greater hardening than wrought 304L, suggesting that the pre-existing cellular, defect-rich microstructure influences the accumulation and stability of irradiation-induced defects rather than simply adding an independent hardening contribution. These results suggest that the microstructural features responsible for the strength increase in L-PBF 304L, including the cellular substructure, elevated dislocation density, and process-induced defects, also contribute to its enhanced irradiation hardening, consistent with a common microstructural origin for both behaviors. This finding points to a potential gap in applying wrought-alloy-based qualification frameworks to L-PBF materials, warranting further consideration of how L-PBF-specific defect populations couple mechanical and irradiation performance under reactor-relevant conditions. This integrated dataset thus provides a basis for future qualification of L-PBF 304L for SMR applications, with subsequent transmission electron microscopy planned to directly resolve the irradiation-induced defect microstructure and test this proposed substructure-defect interaction mechanism.

[P11-27]

DED 실험 데이터와 기계학습을 이용한 적층제조용 알루미늄 합금 역설계: 김도원, 전서연, 안성빈, 박수원, 송용욱, 최현주*(국민대학교)

Keywords: 알루미늄, 적층제조, 강도, 열전도도

알루미늄 합금은 가볍고 비강도가 높으며 열전도도와 전기전도도가 우수하여 금속 적층제조(additive manufacturing, AM) 분야에서 폭넓게 검토되고 있다. 그러나 기존 문헌 데이터는 특정 합금계에 조성이 편중되어 있고 연구마다 공정변수가 제각각이어서 조성-물성 및 공정-물성 상관성이 약하다(Pearson $|r| < 0.5$). AI 기반 합금 설계에 그대로 활용하기 어려운 이유다. 이를 보완하고자 다중 분말 피더 DED 장비로 공정조건을 통일하여 Al-Si-Cu-Mg-Zn 시편 30종 이상을 제작하고, OES, XRD, SEM/EDS, 마이크로비커스 경도 측정으로 분석하여 조성-미세조직-물성 관계가 일관된 실험 데이터셋을 구축하였다. 이 데이터셋을 바탕으로 경도 예측과 후보 조성 선별에는 VAE를 결합한 ANN을, 전기전도도 예측에는 GridSearchCV로 하이퍼파라미터를 최적화하고 5-fold 교차검증을 적용한 GBR을 사용하여 각각 R^2 0.91, 0.94를 얻었다. t-SNE 차원축소와 K-NN 기반 후보 선별로 역설계를 수행해 최적 조성을 도출하였으며, 도출된 조성을 DED로 제작하였다. Zn, Mg의 휘발로 인한 조성 불일치로 휘발 보정을 진행하여 2차 적층 중이다. 자체 구축한 실험 데이터셋과 기계학습을 결합하면 적층제조용 알루미늄 합금 개발을 앞당길 수 있다.

P12 : 비철금속
Room 1층 전시홀, 10월 29일

[P12-1]
마그네슘 전해제련의 전류 효율 향상을 위한 음극 소재별 젖음성 평가 및 AIMD 전산모사를 이용한 미세포그 억제 메커니즘 규명: 이동희(충남대학교), 이종현*(충남대학교, 급속응고신소재)
Keywords: 마그네슘 전해제련, 미세포그 억제, 전류 효율, 음극 소재, MatterSim 전산모사
마그네슘 용융염 전해제련은 열환원 공정 대비 에너지 소비와 탄소배출 측면에서 유리하나, 전해 중 발생하는 미세포그(metal fog)가 재염화 반응을 유발하여 전류 효율을 저하시키는 주요 손실 요인으로 작용한다. 산업 공정에서는 음극 소재로 철(Fe)이 사용되어 왔으나, 고온 용융염 중에서 표면에 저항성 표면 피막이 형성되기 쉽다. 이에 본 연구에서는 산업 표준 소재인 Fe와 불활성 금속인 텅스텐(W) 및 몰리브덴(Mo)을 음극 후보로 선정하고, 동일한 전류 밀도 조건에서 나타나는 차이가 음극과 마그네슘 사이의 젖음성에 기인한다는 관점에서, 회수 입자의 크기를 지표로 젖음성과 전류 효율의 상관관계를 규명하고자 하였다. 원료는 무수 염화마그네슘($MgCl_2$)을 사용하였으며, NaCl–$CaCl_2$ 용융염에서 1023 K 조건으로 전해를 수행하였다. Cyclic voltammetry와 Chronopotentiometry로 음극 소재에 따른 전극 반응 거동을 분석하였고, 전해 후 회수된 마그네슘 입자는 이미지 분석을 통해 크기와 분포를 정량화하고 불순물 함량을 분석하였다. 그 결과 전류 효율은 Mo 88 %, W 77 %, Fe 63 % 순으로 나타났으며, 회수된 마그네슘의 평균 입자 크기 또한 동일한 순서를 보였다. 입자가 미세할수록 전류 효율이 낮게 나타나 미세포그 형성이 전류 효율 손실과 직접적으로 연관됨을 확인하였으며, Fe 음극에서는 음극 성분의 용출에 따른 순도 저하가 함께 발생하였다. 아울러 MatterSim 기반 전산모사를 수행한 결과, 1023 K 용융염 분위기에서 산출된 Mg 흡착 에너지는 Mo −1.05 eV, W −0.83 eV, Fe −0.52 eV로, 실험에서 얻어진 전류 효율 및 입자 크기 순서와 일치하였다. 이상의 결과는 음극의 젖음성에 따라 회수되는 마그네슘의 입자 크기가 달라지며, 이를 통해 미세포그 생성이 억제되어 전류 효율이 개선됨을 보여준다. 본 연구는 실험과 전산모사를 연계하여 상업용 마그네슘 전해제련 공정의 음극 소재 선정 기준을 제시한다.

[P12-2]
Al-$CaMg_2$ 복합 환원제를 이용한 TiO_2 환원 시 입자 성장 및 산소 제어 메커니즘: 임규석(충남대학교), Hayk Hacob Nersisyan(충남대학교 급속응고신소재연구소), 이종현*(충남대학교, 충남대학교 급속응고신소재연구소)
Keywords: 타이타늄, 비철금속, 열환원
$TiCl_4$의 마그네슘 환원에 기반한 크롤 공정은 여전히 타이타늄 생산의 주된 산업 공정이다. $TiCl_4$를 TiO_2로 대체할 경우 비용을 대폭 절감할 수 있으나, 직접 합성법은 아직 상업적 실용성을 확보하지 못했다. 본 연구에서는 Al-$CaMg_2$ 복합 환원제를 이용하여 TiO_2로부터 Ti-Al 합금 분말을 직접 합성하는 새로운 환원 공정을 시도하였다. XRD 분석 결과, 알루미늄(Al)의 첨가는 Ti-Al 고용체 형성을 촉진하며, 기존의 Mg 환원뿐만 아니라 $CaMg_2$ 환원에 비해서도 잔류 산소상을 현저히 감소시킨다. Ti와 Al 간의 발열 반응은 단계적 가열 공정 중 Al의 천이 액상 형성과 결합하여 소결 조제 역할을 수행한다. 이러한 메커니즘은 입자 성장을 크게 촉진하여, 입자 크기의 중간값을 Mg 환원 시 1.2 μm, $CaMg_2$ 환원 시 3.1 μm에서 약 7.7 μm로 증가시킨다. 합성된 분말은 아크 멜팅을 통해 성형한 후 경도를 측정하여 기계적 물성을 입증하였다. 본 공정은 99% 이상의 높은 회수율과 효과적인 형상 제어 능력을 나타내며, 분말 야금 응용을 위한 고품질 저산소 타이타늄 합금 분말 생산의 유망한 경로를 제시한다.

[P12-3]
반도체성 보론 나노와이어의 표면·계면 전도 메커니즘과 실리콘 음극 사이클 안정성 향상 연구: 이효연(충남대학교 신소재공학과), 네르시시안 하이크(급속응고신소재연구소), 이종현*(충남대학교 신소재공학과, 급속응고신소재연구소)
Keywords: 음극재, 실리콘, 보론 나노와이어, DFT, 표면·계면 전도 메커니즘
차세대 고용량 음극 소재로 주목받는 실리콘(Si)은 흑연(372 mAh/g) 대비 약 10배에 달하는 이론 용량(3, 579 mAh/g, $Li1_5Si_4$ 기준)을 보유하고 있다. 그러나 충·방전 시 발생하는 최대 약 300%의 부피 팽창은 입자를 분쇄하여 전기적 접촉을 단절시키고, 고체-전해질 계면(SEI)을 지속적으로 파괴·재형성시켜 전극 구조 붕괴와 사이클 수명의 급격한 저하를 야기한다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 실리콘 나노분말에 보론(B) 나노와이어를 혼합한 복합 음극을 제안하였다. 다만 결정질 보론은 1.5–2.1 eV의 넓은 밴드갭을 갖는 반도체로서, 도핑이나 합금화 과정 없이 원소 상태 그대로 혼합된 보론이 어떻게 전도성 네트워크로 기능할 수 있는지는 그동안 명확히 규명되지 않았다. 이를 규명하기 위해 DFT 계산을 수행한 결과, 절연성인 벌크 보론과 달리 나노와이어 표면에서는 절단된 결합에 의한 국소적 금속화, 실리콘과의 일함수 차이에 따른 계면 전자 이동, 리튬화 시 유도되는 가역적 n형 도핑이라는 세 가지 표면·계면 기전이 함께 작용하여 전도성 네트워크를 형성함을 확인하였다. 이러한 표면·계면 기반 전도 메커니즘은 실리콘-보론 복합 음극이 순수 실리콘 대비 향상된 쿨롱 효율(ICE)과 사이클 안정성을 보이는 원인을 설명하는 미시적 근거를 제공한다. 다만 이 전도 경로는 SEI 성장이나 전해질 고갈 등으로 보론-실리콘 접촉이 임계값 이하로 감소하면 급격히 붕괴될 수 있어, 나노와이어 표면적 극대화와 조밀한 Si-B 접촉 형성을 통한 장수명 실리콘 음극 설계 전략이 중요함을 시사한다.

[P12-4]

고상 연소 합성법으로 제조한 CaB_6 나노큐브의 전기화학적 수소 발생 특성 및 DFT 기반 반응 메커니즘 연구: 정준모(충남대학교), 네르시시얀 하이크(충남대학교 급속응고신소재연구소), 이종현*(충남대학교, 충남대학교 급속응고신소재연구소)

Keywords: 수소, 알칼리 토금속, 붕화물, 전기화학, DFT

금속 산업은 산업부문 온실가스 배출량의 38.3%를 차지하며, 산업부문 중 가장 많은 온실가스를 배출하고 있다. 온실가스 배출을 줄이기 위해 금속산업에서는 철광석을 수소로 환원시키는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이를 위해서는 고순도 수소가 요구된다. 고순도 수소는 대부분 전기분해를 통해 얻어지며, 고가의 금속인 Pt를 촉매로 사용하기 때문에 이를 대체하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 저가 산화물(B_2O_3, CaO)과 Mg의 고상 연소 합성법으로 {100}면이 노출된 CaB_6 나노큐브를 합성하였다. CaO 첨가량(k)을 0.35→1.5로 늘려 연소 온도를 1920→1620 ºC로 낮춤으로써 큐브 한 변을 0.1–1.0 μm로 제어하였다. SEM·TEM·XRD·XPS로 단상 CaB_6임을 확인하였고, 0.5 M H_2SO_4에서 10 mA cm^{-2} 과전압 220 mV, Tafel 기울기 60 mV dec^{-1}, 패러데이 효율 92 %를 얻었으며 1, 000 사이클 후에도 성능이 유지되었다. DFT 계산에서는 B 종단면 atop-B($\Delta G^* = -1.25$ eV)와 Ca 종단면 hollow(−0.74 eV)가 활성점으로 나타나 노출 결정면이 활성을 지배함을 확인하였다.

[P12-5]

SUS304 도가니 기반 저비용 $Li_{13}Si_4$ 합성 공정 개발 및 반응 발열 특성 분석: 주신형, 후엔쑤안비엣(충남대학교 신소재공학과), 이종현*(충남대학교 신소재공학과, 충남대학교 급속응고신소재연구소)

Keywords: $Li_{13}Si_4$, 열전지 음극재, 포정반응, 단일공정 용융 합금화, 단열 발열량, SUS304 도가니

열전지(Thermal Battery)는 상온 비활성 상태를 유지하다 열원 활성화 시 순간 고출력을 발생시키는 1차 예비전지로, 음극재의 상 순도와 재현성이 성능을 좌우하는 핵심 인자이다. 본 연구에서는 블랙파우더로부터 환원한 리튬을 사용하여 Li-Si 이원계 상태도의 포정반응(peritectic reaction, 618 ºC)을 공정 설계 근거로 활용, 열전지 음극 활물질인 $Li_{13}Si_4$를 저비용 SUS304 도가니 기반 단일공정으로 선택적 합성하는 방법을 확립하였다. Li:Si 몰비 3.25:1 조건으로 750 ºC까지 단일 승온 후 완전 용융 상태에서 열역학적으로 안정한 $Li_{13}Si_4$와 달리 초정(primary crystallization)으로 우선 석출되는 $Li_{17}Si_4$가 확산 제한에 따른 속도론적 지연으로 잔류하는 문제를 확인하였다. 이에 따라 교반을 통해 액상 균질화 및 물질전달을 촉진함으로써 포정반응 활성화를 유도하였으며, 투입 스케일 상승시에서 동일 단일$Li_{13}Si_4$상 재현에 성공하여 XRD WPPF(Whole Powder Pattern Fitting) 정량분석 결과 $Li_{13}Si_4$ 단일상을 확인하였다. Taubert 등이 보고한 정밀 생성엔탈피($\Delta fH^\circ = -24.4 \pm 0.3$ kJ/mol-atom)를 기준으로 완전 단열조건을 가정한 반응계($Li_{3.25}Si$)의 이론 발열량은 약 0.49 kcal/g이며, 시료만을 열용량으로 고려할 경우 이론상 964 K에 달하는 온도상승이 가능하다. 그러나 실측 발열 스파이크(투입 Li 6.08~22.11 g 규모, 반응 소요시간 69~102초)에서 관측된 온도상승은 105~425 K로 이론값의 11~45% 수준에 그쳤으며, 이 비율은 투입량이 증가할수록 뚜렷하게 상승하였다. 이는 고정 열용량을 갖는 SUS304 도가니가 반응열의 상당 부분을 흡수하는 열싱크(heat sink)로 작용하며, 시료 대비 도가니의 상대적 비중이 작아질수록 반응계 자체의 온도상승이 더 온전히 보존됨을 정량적으로 뒷받침한다. 본 결과는 스케일업 시 도가니 설계(질량·재질) 및 승온 프로파일 최적화를 위한 정량적 근거를 제공한다.

[P12-6]

Theoretical Operating Window for Direct Electrorefining of Metallic Lithium from NCM811 Black Powder: A First-Principles Study: Nguyen Viet, Joo Sin-Hyong(충남대학교), Hayk Nersisyan(급속응고신소재연구소), Lee Jong-Hyeon*(충남대학교, 급속응고신소재연구소)

Keywords: Direct lithium recycling, Black powder electrorefining, DFT/CI-NEB simulations, NCM811 ($LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O_2$), Open-circuit voltage

Rising lithium demand and the growing stock of end-of-life lithium-ion batteries motivate simpler recycling routes. Direct electrochemical lithium extraction from NCM-containing black powder, without prior separation of Ni, Co, and Mn could reduce process complexity relative to conventional pyro- and hydrometallurgy. Selecting an applied potential, however, requires composition-resolved knowledge of both the thermodynamic driving force for delithiation and solid-state Li-transport kinetics. Here, density functional theory and climbing-image nudged elastic band (CI-NEB) calculations were used to determine equilibrium Li-extraction voltages and migration barriers at discrete compositions of $Li_xNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O_2$ (NCM811). Here, x is the Li fraction remaining in the fully lithiated reference structure therefore, 1 − x represents the nominal extracted fraction. The calculated voltage profile had a mean value of 3.85 V, and all sampled voltages remained below a selected 4.30 V literature-derived degradation benchmark. Li-migration barriers were strongly non-monotonic: values were 0.02 – 0.54 eV at most sampled compositions but reached 1.16 eV near $x \approx 0.75$. This maximum coincided with a change in calculated Ni magnetic moments consistent with Ni-centered redox, suggesting a composition-dependent kinetic bottleneck. Applying a 0.10 V margin below the selected benchmark gives a provisional upper cutoff of 4.20 V vs. Li/Li^{++}. Because end-of-life black powder contains NCM particles with heterogeneous local Li contents, the composition mapping identifies $x \approx 0.75$ as a priority region for targeted validation. The proposed cutoff is intended to guide experimental design, electrolyte oxidation, interfacial polarization, support-electrode reactivity, and particle-scale heterogeneity must be evaluated independently .

[P12-7]

Cu-6Ni-1.26Si 합금의 불연속 석출 거동 분석: 김가은, 정이화(경상국립대학교), 김규낙(한국재료연구원), 최동인, 한흥남(서울대학교), 안지혁(한국재료연구원), 강성규*(경상국립대학교)

Keywords: Cu-Ni-Si 합금, 통전처리, 연속 석출, 불연속 석출

구리는 높은 전기전도도와 열전도도를 가져 전기·전자 산업에 널리 사용되지만, 낮은 강도로 인해 구조재료로서 활용은 제한적이다. 석출경화형 합금인 Cu-Ni-Si 합금은 우수한 강도와 전도도를 동시에 확보할 수 있는 재료로 주목받고 있다. 이 합금은 시효 시간이 증가함에 따라 결정립 내부에서 미세한 석출물이 균일하게 형성되는 연속 석출(Continuous Precipitation, CP)과 결정립계 부근에서 판 형태로 석출물이 성장하는 불연속 석출(Discontinuous Precipitation, DP)이 발생한다. 이 중 DP는 결정립계 이동과 이에 따른 용질 원자 확산에 의해 성장하며, 그 성장 kinetics는 원자 확산과 결정립계 이동도에 따라 달라질 수 있다. 통전 처리는 이 두 인자를 모두 촉진하는 것으로 알려져 있어, DP의 성장 거동과 라멜라 미세구조 형성에 영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서 통전 처리가 불연속 석출 거동에 미치는 영향에 대해 보다 체계적인 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 전류 인가를 통해 확산 및 석출을 가속화하는 통전 처리(Electrical Current Treatment, ECT)를 적용하여 Cu-6Ni-1.26Si 합금의 석출 거동과 물성 변화를 분석하고, 불연속 석출 거동과 라멜라 미세구조 변화를 중점적으로 고찰하였다. 본 합금은 Ni과 Si의 합이 고용 한도를 초과하는 조성으로, 용체화 처리 후 과포화 고용체가 형성되어 석출 거동이 가속될 것으로 예상된다. Cu-6Ni-1.26Si 합금을 대상으로 열처리 및 통전 처리 전후 미세조직을 관찰하고, 이를 바탕으로 비커스 경도와 전기전도도 변화를 해석하였다. 통전 처리 시편은 동일한 온도 및 시간 조건에서도 열처리 시편보다 DP의 성장 속도와 면적 분율이 현저히 증가하였으며, Cu 기지 영역에서 더 높은 경도를 나타냈다. 또한 전기전도도는 통전 처리 90 min 시편에서 40.7 %IACS로 향상되었다. 특히 DP 면적 분율이 유사한 열처리 90 min 시편(52.4%)과 통전 처리 60 min 시편(52.9%)을 비교한 결과, 통전 처리 시편의 DP 영역 경도가 더 높게 나타났다. 이러한 원인을 규명하기 위해 SEM 분석을 수행한 결과, 통전 처리 시편의 DP 라멜라가 더욱 미세하고 조밀하게 형성된 것을 확인하였다. 이에 DP 라멜라의 미세구조와 원소 분포를 분석하기 위해 EBSD 분석을 통해 Primary DP가 포함된 동일한 결정방위의 grain을 선정하고 Matrix/DP 계면을 포함하는 FIB 시편을 제작하여 TEM 및 EDS 분석을 수행하였다. TEM 분석 결과, 통전 처리 시편의 DP 라멜라는 열처리 시편보다 더 얇은 두께와 더 좁은 라멜라 간격을 나타내어, 미세하고 조밀한 구조를 형성하였다. 또한 EDS line scan 분석을 통해 DP 라멜라에서 Ni와 Si가 농축된 원소 분포를 확인하였다. 이러한 결과는 통전 처리에 따라 열처리와는 다른 DP 성장 거동과 라멜라 미세구조가 형성됨을 보여주며, 이러한 미세구조적 차이가 유사한 DP 면적 분율에서도 통전 처리 시편의 DP 영역 경도 향상에 기여한 것으로 판단된다.

[P12-8]

생성형 AI 모델을 활용한 고엔트로피 탄화물 촉매 개발 및 CO_2 환원 반응 평가: 이현주(충남대학교), 네르시시얀 하이크(급속응고신소재연구소), 이종현*(충남대학교)

Keywords: High-Entropy-Cabide, CO_2 Reduction Reaction

여러 산업에서 화석연료 사용량 증가로 인해 대기 중 이산화탄소(CO_2) 배출량이 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라, 지속 가능한 에너지 전환을 위해 CO_2를 단순히 폐기하는 것이 아니라 고부가가치 탄소화합물로 전환하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 CO_2를 유용한 화합물로 전환하기 위한 고성능 촉매 개발이 핵심 연구 분야로 주목받고 있다. 본 연구에서는 대표적 생성형 모델인 MatterGen을 파인튜닝한 CarbideMattergen을 활용하여 CO_2 전기화학적 환원 반응(eCO_2RR)에 특화된 고엔트로피 탄화물(HEC) 소재를 설계하고 제조하였다. 설계된 HEC 촉매의 성능과 실효성을 실험적으로 검증하기 위해 eCO_2RR 실험을 수행하였으며, 반응 후 가스크로마토그래피(GC) 및 핵자기공명분광기(NMR) 등의 장비를 활용하여 반응 생성물에 대한 정밀한 정량 분석을 진행하였다. 추가적으로, 밀도범함수이론(DFT) 계산을 통해 CO_2와 촉매 간 흡착 에너지를 산출하여 eCO_2RR 반응 메커니즘을 분석하였다. 또한, 실제 반응 경로(pathway)를 따라 각 단계별 자유 에너지(free energy) 변화를 계산하여 AI가 예측한 촉매의 활성과 선택성을 이론적으로 확증하였다.

[P12-9]

생성형 AI 기반 고엔트로피 가넷 역설계 및 LLZO/PEO 복합 전해질의 리튬 계면 안정성 연구: 윤혜진(충남대학교), 네르시시얀 하이크(급속응고신소재연구소), 이종현*(충남대학교, 급속응고신소재연구소)

Keywords: 가넷형 고체전해질 / LLZO (Garnet-type Solid Electrolyte / LLZO) 자전 연소 합성법 (Self-propagating High-temperature Synthesis, SHS) 복합 고체 전해질 (Composite Solid Electrolyte, CSE) 리튬 금속 음극 / 리튬 계면 안정성 (Lithium-Metal Anode / Li-Metal Stability) 생성형 AI / 역설계 (Generative AI / Inverse Design)

전통적인 고체상 반응을 통한 $Li_7La_3Zr_2O_{12}$(LLZO) 합성은 900–1200 ºC의 고온 열처리와 반복적인 분쇄 공정이 요구되며, 이로 인한 마이크로미터 단위의 불규칙한 입자 성장과 응집은 고체전해질의 성능을 저하시키는 주요 원인이다. 이에 본 연구에서는 초기 점화 후 반응물 자체의 발열 에너지만으로 고온 반응을 자발적으로 유지하는 자전 연소 합성법(SHS, Self-propagating High-temperature Synthesis)을 도입하였다. 이를 통해 외부 에너지 소모와 공정 시간을 획기적으로 단축하여 공정 효율을 극대화하면서도 최적화된 LLZO 분말을 합성하였고, 이를 고분자 매트릭스와 복합화하여 전기화학적 성능을 평가하였다. XRD와 SEM 분석을 통해 소성 온도에 따른 결정 구조 변화와 미세 구조의 진화를 규명하였다. 합성된 미세 LLZO 분말은 PEO(Polyethylene oxide) 및 리튬염(LiTFSI)과 함께 Acetonitrile 용매에 분산시켜 균일한 복합 고체 전해질(Composite Solid Electrolyte, CSE)로 제조되었다. 제조된 LLZO/PEO 복합 전해질은 LLZO 필러의 균일한 분산으로 인해 PEO의 결정성을 효과적으로 억제하고 이온 전도도를 향상시켰다. 또한, 리튬 대칭 셀(Li Symmetric Cell) 테스트 결과, 리튬 금속과의 우수한 계면 접촉을 바탕으로 낮은 과전압과 안정적인

충·방전 거동을 나타내었다. 본 연구는 자전 연소 합성법과 고분자 복합화 공정의 결합이 차세대 전고체 전지의 계면 안정성 확보와 성능 향상을 위한 효과적인 전략임을 제시한다. 나아가 확산 생성 모델(MatterGen)을 활용해 리튬 금속 음극에 안정한 고엔트로피 가넷형 고체전해질을 역설계함으로써, 리튬 환원에 의한 계면 열화를 근본적으로 억제할 수 있는 새로운 소재 설계 방향을 함께 제시한다.

[P12-10]

중성염 전해질 전해제염 공정에서 발생하는 6가 크롬의 저감 방안: 조민식, 박성현, 심영민 (충남대학교), Hayk Hacob Nersisyan(급속응고신소재연구소), 이종현*(충남대학교, 급속응고신소재연구소)

Keywords: 전해제염, 6가크롬, 2차폐기물

원자력발전소 해체 시 발생하는 금속폐기물의 전해제염에는 2차폐기물 발생을 억제할 수 있는 중성염 전해질이 널리 활용된다. 그러나 Na_2SO_4, $NaNO_3$ 등의 중성염 전해질을 사용하는 경우, STS304의 양극 용해 과정에서 높은 양극 전위에 의해 크롬이 유해 화학종인 6가 크롬으로 산화될 수 있다. 6가 크롬은 독성이 높고 알칼리 조건에서도 침전되지 않아 이온 형태로 전해질에 잔존하므로, 폐액 처리 및 전해질 재생을 위해 반드시 저감되어야 한다. 본 연구는 전해제염 후 전해질에 잔존하는 6가 크롬을 저감하기 위한 화학적·전기화학적 처리 방안을 확보하였다. 6가 크롬을 독성이 낮고 침전 가능한 3가 크롬으로 환원시킨 뒤 수산화물로 침전시키는 것을 기본 원리로 하여, 환원제를 이용한 화학적 처리를 통해 6가 크롬의 환원 및 침전이 가능함을 확인하였다. ICP-OES 및 UV-Vis 분석법을 통해 제염 전후 전해질에 존재하는 화학종을 정량적으로 분석하였다. 나아가, 처리 과정에서 폐액 및 2차폐기물의 증가를 최소화하는 관점에서, 외부 환원제를 사용하지 않는 전기화학적 환원을 통한 저감 방안을 함께 확보하였다. 본 연구는 중성염 전해질 기반 전해제염에서 필연적으로 생성되는 6가 크롬의 화학적·전기화학적 저감 방안을 마련함으로써, 전해제염 공정의 환경 안전성을 확보하고 전해질 재생 및 폐액 처리로의 적용 가능성을 제시한다.

[P12-11]

전산모사를 통한 U자형 배관 전해제염 공정에서의 anode effect 발생 기구 규명: 박성현, 정준모, 조민식(충남대학교), 네르시시안 하이크(급속응고신소재연구소), 이종현*(충남대학교, 급속응고신소재연구소)

Keywords: 스테인리스, 전해 제염, 복잡형상, 전산모사

전해 제염은 원전 해체 시 발생하는 오염 배관 처리에 효과적인 기술이지만, 실제 1차 계통 배관의 상당 부분을 차지하는 U자형 곡관부에 적용할 경우 직관과는 다른 전기화학적 거동이 나타난다. 실제 U자형 STS304 배관을 이용한 전해제염 실험에서 직관 대비 현저히 높은 셀 전압이 측정되었고, 정전류 분극(chronopotentiometry) 시험에서도 큰 분극이 관찰되어 anode effect의 발생이 확인되었다. 전기분해 시 발생하는 기체가 곡관부에 정체되어 국부적으로 유효 반응 면적을 감소시키는 것이 anode effect의 원인으로 판단되나, 밀폐된 배관 내부에서 진행되는 현상의 특성상 이를 실험만으로 규명하기는 어렵다. 본 연구에서는 COMSOL Multiphysics 기반 전산모사를 통해 U자형 배관 내부의 기체 발생 및 정체 거동을 해석하고, 이것이 anode effect로 이어지는 과정을 규명하고자 한다. 배관 내벽에서의 기체 생성과 부력에 의한 이동, 그리고 곡관부에서의 축적 과정을 추적할 계획이다. 이를 통해 기체 축적에 의한 국부적 유효 반응 면적 감소가 실험에서 관찰된 전압 상승 및 분극 거동을 설명할 수 있는지 검토한다. 나아가 전류 밀도와 전해질 유동 조건에 따른 기체 정체 거동의 변화를 해석하여 anode effect를 억제할 수 있는 공정 조건을 탐색하고자 한다. 본 연구는 실험적으로 접근이 어려운 배관 내부 현상을 전산모사로 가시화함으로써, 복잡한 형상의 배관 폐기물에 대한 전해제염 공정 설계의 근거를 제공할 것으로 기대된다.

[P12-12]

Experimental Investigation of Deoxidation Equilibrium and Kinetics of Al, Ti and Cr in Liquid Nickel: Seung-Ho Lee, Hyun-Jae Kim(Pohang University of Science and Technology), Yoon Seok Ko(Agency for Defense Development), Youn-Bae Kang*(Pohang University of Science and Technology)

Keywords: Nickel-based superalloy, Deoxidation, Equilibrium oxygen content, Oxygen removal rate, Melt cleanliness

Nickel-based superalloys are widely used in high-temperature aerospace components. Their mechanical properties strongly depend on melt cleanliness at ultra-low oxygen levels during refining processing. In vacuum induction melting (VIM), oxygen is first removed by carbon deoxidation through CO(g) formation. Residual oxygen is then further reduced by adding alloying elements with a high affinity for oxygen, such as Al. Although metallic deoxidation equilibria in liquid nickel are well established thermodynamically, the extent and rate at which actual melts approach equilibrium remain unclear. In this study, Al, Ti, and Cr were selected as deoxidizing elements with different oxygen affinities. Their calculated equilibrium oxygen contents were compared with experimentally measured values. Also, apparent deoxidation rates were evaluated. The equilibrium oxygen contents were calculated using FactSage. Approximately 495 g of Ni was melted at 1500 ºC under an Ar atmosphere at 1 atm. The initial oxygen content was adjusted by O_2 blowing, after which 1 wt% of each deoxidizing element was added separately. Samples were taken at intervals for up to 1 h of reaction. The calculated equilibrium oxygen contents were 0.12, 1.18, and 20.3 ppm for Al, Ti, and Cr, respectively. After 1 h, the measured contents were 3.6, 5.2, and 22.7 ppm. During the first 30 s, oxygen removal was fastest for Ti followed by Al and Cr. These results demonstrate that thermodynamic equilibrium oxygen contents do not necessarily represent the oxygen levels experimentally attainable during the refining process.

[P12-13]

Cold spray 가스 압축 온도 및 후열처리 조건이 구리-알루미늄 접합부의 금속간화합물 성장과 접합강도에 미치는 영향: 안지영(경북대학교, 한국재료연구원), 김규낙(한국재료연구원), 조현욱(SHKOREA), 민경문(한국재료연구원), 박성혁*(경북대학교), 안지혁*(한국재료연구원)

Keywords: Copper, Aluminium, Cold Spray, Annealing, Intermetallic compounds

구리-알루미늄 이종접합 소재는 우수한 비강도와 전도도를 가져 차세대 버스바 및 방열판 소재로 주목받고 있다. 금속 분말을 용융점 이하의 고상 상태로 초음속 분사하는 cold spray 공정은 산화를 최소화하고 near net-shape 제조가 가능하여 이종접합 소재 제조 기술로 각광받고 있다. 그러나 cold spray 적층재는 결함 저감을 위한 후열처리가 필수적인데, 열처리 중 구리-알루미늄 계면에서 성장하는 금속간화합물이 접합강도를 저하시킬 수 있어, 공정 조건에 따른 계면 반응의 정량적 이해가 요구된다. 이에 본 연구에서는 적층 후 열처리를 통해 구리-알루미늄 접합부의 금속간화합물 성장 거동과 접합강도를 분석하였다. 가스 압축 온도 700–1000 ºC 및 압력 50 Bar에서 순 알루미늄 기판에 순도 99.9% 구리 분말을 cold spray 공정으로 적층한 후, 250, 300, 350 ºC에서 0–9 h 동안 열처리하였다. SEM 분석과 금속간화합물 성장 속도 계산 결과, 구리-알루미늄 계면에서 Al_2Cu, AlCu, Al_4Cu_9의 금속간화합물이 형성되었으며 성장 지수 n의 평균값은 0.41로 Grain boundary diffusion 성장 거동과 volume diffusion 성장 거동을 동시에 보였다. 또한 열처리 온도와 가스 압축 온도가 증가할수록 성장 속도 상수 k는 증가하고, 활성화 에너지 Q는 감소하는 경향을 보였다. 이는 가스 예열 온도 증가에 따른 계면 산화막 파괴와 야금학적 접합 면적 증가로 확산 경로가 확대된 것에 기인하는 것으로 판단된다. 한편 접합강도는 가스 예열 온도 700, 800 ºC에서 후열처리 시간이 증가할수록 50 MPa에서 38 MPa까지 감소한 반면, 1000 ºC에서는 후열처리 후에도 시험용 접착제의 파단 강도(50 MPa)를 상회하는 접합강도를 유지하여, 고온 가스 조건이 후열처리를 수반하는 구리-알루미늄 이종접합재 제조에 유리함을 확인하였다.

[P12-14]

Cu–Zn–Si 합금 압출재의 열처리에 따른 절삭성 및 직진도 변화: 김규낙(경상국립대학교, 한국재료연구원), 민경문, 안지영, 김형준(한국재료연구원), 이진수((주) 대창), 강성규*(경상국립대학교), 안지혁*(한국재료연구원)

Keywords: Lead-free brass, Microstructure, Chip segmentation, Phase transformation, Straightness

Si계 무연 황동은 우수한 강도, 절삭성 및 내부식성을 가져 수도 배관용 소재로 널리 활용된다. 그러나 다른 황동 대비 높은 강도로 인해 냉간 가공 시 직진도가 낮다는 한계가 있다. 열처리를 통해 잔류응력을 완화함으로써 직진도를 개선할 수 있으나, 과도한 열처리는 Cu–Zn–Si 합금의 강도와 절삭성에 기여하는 준안정 κ상의 분율을 감소시킨다. 본 연구에서는 압출된 Cu–Zn–Si 합금의 강도와 절삭성을 유지하면서 냉간 인발 시 직진도를 향상시키기 위한 최적의 열처리 조건을 조사하였다. 특히 준안정 κ상의 상변태 거동이 잔류응력 및 절삭 거동에 미치는 영향에 주목하였다. 400 ºC에서의 열처리는 κ상이 Cu_3Si 금속간화합물로 분해되는 것을 촉진하는 반면, 600 ºC에서의 열처리는 κ상에서 α상으로의 상변태를 유도한다. κ상에서 α상으로의 변태는 심각한 격자 왜곡을 발생시키고 내부 잔류응력을 증가시켜, 인발 과정에서 치수 안정성의 저하를 초래한다. 반면, 400 ºC에서 1시간 동안 열처리하면 κ상 분율이 0.11로 열처리 전과 유사하게 유지되어 칩 분절을 촉진하고 낮은 절삭력을 유지하며 잔류응력의 발생을 억제한다. 그 결과, 이 조건은 절삭성과 치수 안정성 사이에서 최적의 균형을 제공하여 인발 후 직진도를 향상시킨다. 이러한 결과는 열처리를 통한 κ상의 상변태 거동이 Cu–Zn–Si 합금의 절삭성을 유지하면서 인발 후 직진도를 향상시키는 효과적인 방법임을 보여주며, 고절삭성 무연 황동으로서 산업적 응용 가능성을 제시한다.

[P12-15]

냉간 압연에 의한 사전 변형이 Cu-Ni-Si 합금의 불연속 석출 거동에 미치는 영향: 장정아, 김가은(경상국립대학교), 김규낙(경상국립대학교, 한국재료연구원), 안지혁(한국재료연구원), 강성규*(경상국립대학교)

Keywords: Cu-Ni-Si 합금, 불연속 석출, 냉간 압연

Cu-Ni-Si 합금은 우수한 강도와 전기전도도를 동시에 갖춰 리드프레임 및 커넥터 등 전기/전자 기기 분야의 핵심 소재로 널리 활용되고 있다. 불연속 석출(discontinuous precipitation, DP)로 강화된 Cu-Ni-Si 합금은 고강도와 우수한 전기전도도를 동시에 확보할 수 있으나, DP 거동은 합금 조성뿐 아니라 시효 이전에 도입되는 변형 상태에 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다. 특히 냉간 압연과 같은 사전 변형은 슬립 밴드·전단 밴드 및 고밀도 결함을 도입하여 DP의 핵생성과 성장 경로를 변화시키지만, 변형량과 국부 변형 분포에 따른 DP 형성·성장 거동은 아직 충분히 규명되지 않았다. 본 연구에서는 시효 이전에 도입되는 냉간 압연 사전 변형량이 Cu-Ni-Si 합금에서 DP의 형성 및 성장 거동에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 하였다. 이를 위해 Cu-6.0Ni-1.26Si 합금을 각각 20%, 30% 압하율로 냉간압연한 시편과 미변형 시편을 준비하여 773 K에서 시효 처리하였다. 이후 시효 시간에 따른 미세조직 변화를 관찰하였으며, 비커스 경도 및 전기전도도 측정을 통해 물성 변화를 평가하였다. 그 결과, 냉간 압연을 실시한 시편은 미변형 시편에 비해 DP 발생이 촉진되고 완전 DP 상태에 더 빠르게 도달하였으나, 일부 조건에서는 변형이 과도하게 집중된 영역에서 DP가 억제되는 현상이 관찰되었다. 또한 DP 발생 영역의 면적 분율로부터 도출한 Avrami 지수 n 값을 통해 사전 변형에 따른 DP 성장 속도의 변화를 정량적으로 확인하였다. 이러한 결과는 냉간 압연 사전 변형량과 변형 분포의 제어를 통해 DP 형성을 효과적으로 가속할 수 있음을 보여주며, 고강도·고전도 Cu-Ni-Si 합금의 공정 최적화 및 제조 비용 절감을 위한 자료로 활용될 수 있다.

[P12-16]

팔라듐 합금 스크랩의 고순도 재활용을 위한 습·건식 연계 전처리 공정 연구: 허성규, 소윤지, 김호병, 최상훈*(고등기술연구원)

Keywords: 팔라듐 합금 스크랩, 고순도 재활용, 습·건식 하이브리드 전처리, 전처리 공정

본 연구에서는 반도체 집적회로(IC) 검사용 소모품의 제조·가공 과정에서 발생하는 팔라듐 합금 스크랩의 고순도 재활용을 위한 습·건식 하이브리드 전처리 공정을 개발하고자 하였다. 해당 스크랩의 표면에는 절삭유 등의 유기물과 산화물이 잔류하고 있어, 후속 재활용 공정에 앞서 이들 불순물을 효과적으로 제거하기 위한 전처리가 요구된다. 스크랩에 잔류하는 절삭유의 주요 성분을 확인하기 위해 기체크로마토그래피-질량분석법(GC-MS)을 이용하였으며, 분석 결과를 바탕으로 세정액 조성 및 세정 조건에 따른 습식 세정 특성을 평가하였다. 세정 전후의 불순물 제거 거동은 푸리에 변환 적외선 분광분석법(FT-IR), 열중량분석(TGA) 및 탄소·산소 함량 분석을 통해 비교하였다. 또한 습식 세정 후 잔류 불순물의 추가적인 제거를 위해 진공 및 수소 분위기 열처리를 적용하여 건식 전처리 조건에 따른 불순물 제거 특성을 평가하고자 하였다. 최적화된 습식 세정 조건에서 탄소와 산소는 각각 최대 88% 및 73%의 제거율을 나타내었다. FT-IR 분석에서도 세정 후 유기물에 기인하는 특성 흡수 밴드가 현저히 감소하여 팔라듐 합금 스크랩 표면의 유기성 불순물이 효과적으로 제거되었음을 확인하였다. 이를 통해 습식 세정 조건의 최적화가 스크랩에 잔류하는 유기물 및 산소계 불순물 저감에 효과적인 것으로 확인되었다. 향후 습식 세정과 진공 및 수소 분위기 열처리를 연계하여 잔류 불순물의 제거 거동을 평가하고, 팔라듐 합금 스크랩의 고순도 재활용을 위한 습·건식 하이브리드 전처리 공정을 확립하고자 한다.

[P12-17]

수소환원에 따른 아연소광 내 Pb의 선택적 환원 거동: 정우철, 장대환, 문정식, 정항철*(고등기술연구원)

Keywords: 아연소광, 수소환원, 탄소저감, 납제거

아연 소광에 존재하는 Pb는 Zn 및 Fe계 산화물과 복합적으로 분포하고 있어 단순한 물리적 선별만으로는 효과적인 분리가 어렵다. 또한 후속 아연 회수 공정에서 불순물로 작용할 가능성이 있으므로, 소광 내 Pb를 선택적으로 환원·금속화하여 분리할 수 있는 공정 조건의 검토가 필요하다. 본 연구에서는 Zn 및 Fe계 산화물과 Pb 산화물의 환원 특성 차이에 기반하여 수소 분위기에서 Pb의 선택적 환원 거동을 평가하였다. 열역학적 반응 특성을 검토한 후 650–800 ºC 범위에서 수소 환원 실험을 수행하였으며, 반응 온도와 유지시간에 따른 Pb 함유상의 변화 및 금속 Pb의 생성 특성을 분석하였다. 또한 환원 생성물에 대한 SEM/EDS 분석을 통해 Pb-rich 영역의 형성 및 분포 변화를 관찰하고, 환원 조건에 따른 Pb 함유상의 변화를 확인하였다. 그 결과, 환원 조건 변화에 따라 소광 내 Pb 산화물의 환원 및 금속 Pb의 형성 거동에 차이가 나타났으며, 고온 조건에서 Pb 함유상의 변화가 상대적으로 뚜렷하게 나타났다. 이를 통해 아연 소광 내 Pb의 선택적 환원 및 물리적 분리를 위한 수소 환원 공정의 적용 가능성을 확인하였다.

[P12-18]

스크랩 부산물 내 니켈 화합물 활용 건식 환원 공정 변수에 따른 금속 니켈 회수 공정 연구: 김호병, 소윤지, 허성규, 최상훈*(고등기술연구원)

Keywords: Nickel, Reduction, Hydrogen, Pyrometallurgy Nickel, Reduction, Hydrogen, Pyrometallurgy

이차전지의 수요 증가로, 배터리의 주원료인 니켈의 수요가 급격히 증가하고 있으나 원료 확보 문제 등으로 공급이 원활하지 않으며, Ni 재자원화 기술을 개발하여 고순도 Ni을 제조하고 있으나 증가하는 이차전지의 수요에는 미치지 못하는 상황이며, 재활용 공정은 습식 공정으로 폐수 발생 등 환경적으로 좋지 않은 영향을 미치고 있다. 본 연구에서는 이러한 상황을 개선하기 위하여 Ni-Cr이 함유된 스크랩을 재활용하여 그 부산물인 Ni 화합물로부터 Ni 금속을 건식 환원공정 기술을 적용하여 회수하고자 한다. Ni 금속 회수를 위한 공정은 Ni 화합물을 원료로 하여 하소(Ni 산화물 상변화)-수소 환원공정-자성분리로 설계하였으며, 공정의 최적화를 위하여 하소 및 환원공정의 조건에 따른 Ni 금속 회수에 대하여 연구를 수행하였다. Ni 화합물로부터 Ni 산화물로의 상변화를 위한 하소공정 전처리로 Ni 화합물의 건조를 다양한 조건으로 수행하였으며, 하소 후 생성물을 활용한 수소 환원 공정에 대하여 공정시간에 따라 회수 된 Ni 금속에 대하여 연구를 수행하였다. 조건에 따른 상변화 후 시료에 대한 분석과 상변화 후 시료의 수소환원 조건에 따른 변화를 분석하기 위하여 SEM 및 XRD, PSA, BET를 활용하여 생성 된 물질의 성분에 대하여 고찰하였다. Ni 화합물의 하소를 통해 Ni 산화물로의 상변화를 XRD 분석을 통해 확인하였으며, 하소 조건에 따라 분말 표면 특성이 변화하는 것을 SEM분석을 통해 확인하였다. 수소환원 공정 후 Ni 금속으로 환원되는 것을 XRD 분석을 통해 확인하였으며, 수소환원 조건에 따라 Ni 금속으로의 환원 정도의 변화를 확인하였다.

[P12-19]

Temperature-Dependent Deformation Behavior and Mechanical Properties of $Cu_{83}Ga_{17}$ Alloy with Low Stacking Fault Energy: Sung Hwan Hong*, Gaeun Jo, Hae Jin Park(Sejong University), Jürgen Eckert(Montanuniversität Leoben), Ki Buem Kim(Sejong University)

Keywords: Copper alloy, Stacking fault energy, Mechanical twinning, Deformation temperature, Workability

Copper (Cu), with face-centered cubic (FCC) crystal structure, is well known for its tunable stacking fault energy (SFE), which can be effectively controlled through alloying and temperature. The SFE in Cu alloys is considered a critical factor because it governs the activation of plastic deformation mechanisms and determines the balance between strength and ductility. Furthermore, tailoring the SFE enables the controlled introduction of microstructural defects, such as stacking faults and deformation twins, providing an effective strategy for optimizing workability and overall mechanical performance. Gallium (Ga) is particularly effective in lowering the SFE of Cu, while solution treatment enables the formation of a supersaturated α-Cu solid solution containing up to 17 at% Ga. Although the resulting $Cu_{83}Ga_{17}$ alloy exhibits extensive stacking fault formation and deformation twinning during room-temperature plastic deformation, the pronounced solid-solution strengthening associated with Ga supersaturation results in a strength–ductility trade-off,

thereby limiting its plastic deformability and workability. In this study, the influence of deformation temperature on the plastic deformability and deformation mechanisms of a single-phase supersaturated $Cu_{83}Ga_{17}$ alloy was systematically investigated. Solution-treated $Cu_{83}Ga_{17}$ specimens were subjected to compression tests at room temperature, 100 ºC, and 200 ºC. Although stacking faults and deformation twins were activated under all testing conditions, their density and spatial distribution varied markedly with deformation temperature, leading to distinct differences in the mechanical response. These findings demonstrate that controlling the deformation temperature of low-SFE Cu alloys provides an effective strategy for improving workability and tailoring mechanical properties through tailoring defect structure.

[P12-20]

TiN첨가에 따른 Ti-0.3Mo-0.8Ni 합금의 미세조직 및 기계적 특성 평가: 김송이*, 김휘준(한국생산기술연구원 지능화뿌리기술연구소)

Keywords: Ti-based alloy, Titanium nitride, microstructure, wear resistance

Ti 합금은 우수한 내식성과 기계적 강도로 인해 항공우주, 화학 플랜트 및 해양 구조물 분야에서 널리 사용되고 있다. 특히 Ti–0.3Mo–0.8Ni 합금(ASTM Grade 12)은 뛰어난 내식성을 바탕으로 화학, 석유화학 및 해양용 밸브 소재로 활용되고 있다. 본 연구에서는 합금의 내마모성을 향상시키기 위해 TiN을 첨가하는 분산 강화 전략을 적용하였다. Ti-0.3Mo-0.8Ni 합금 분말에 TiN을 10, 20 및 30 wt.% 첨가하여 acoustic mixing 공정을 통해 혼합하였다. 혼합 분말은 10^{-2} Torr의 진공 분위기에서 50 MPa, 1200 ºC에서 spark plasma sintering(SPS)으로 소결하였다. TiN 함량에 따른 미세조직 변화는 OM, SEM 및 EDS를 통해 분석하였다. 기계적 특성과 마모 거동은 경도시험과 마모시험을 통해 평가하였으며, 마모시험은 WC 볼을 상대재로 사용하여 선속도10 cm/s, 하중 10 N의 마모 조건에서 수행되었다. 그 결과 TiN 첨가량이 증가함에 따라 TiN입자 분포와 크기가 변화하였으며, 마이크로 비커스 경도(HV0.3)는 267 HV에서 최대 1209 HV까지 증가하였다. 또한 마모 트랙의 표면 형상을 분석하여 TiN 첨가량에 따른 마모 손상 거동을 비교하였다. 이상의 결과를 통해 TiN 첨가에 따른 Ti–0.3Mo–0.8Ni 합금의 미세조직 및 마모 거동 변화를 확인하였으며, 밸브 및 에너지 설비용 내마모 소재 개발을 위한 TiN 첨가 효과를 제시하였다.

[P12-21]

Invar 합금 내 MgO계 개재물 제어를 위한 Mg 투입 조건 및 변화 양상에 관한 연구: 김두연, 강영조*(동아대학교)

Keywords: Invar 합금, FMM, 비금속 개재물, 개재물 개질, MgO, VIM

Invar 합금은 열팽창 계수가 0에 가까운 특수 합금으로, 이러한 우수한 열적 안정성 덕분에 OLED 디스플레이 패널 제조의 핵심 부품인 미세 금속 마스크(FMM, Fine Metal Mask) 소재로 널리 활용되고 있다. 최근 전자기기 수요 증가와 디스플레이 시장의 성장에 따라 고품질 FMM에 대한 요구가 높아지면서, 제조 과정 중 결함을 유발할 수 있는 비금속 개재물의 제어 및 개질 기술의 중요성이 크게 부각되고 있다. FMM 제조 공정 중 개재물의 성상은 VIM 및 VAR 과정을 통해 제어될 수 있으며, MgO계 개재물은 용탕 내 미세 분산이 용이할 뿐만 아니라 기지 합금과의 양호한 정합성을 가져 소재의 품질 향상에 유리한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 Mg 합금을 사용하여 용융 합금 내 개재물을 개질하고자 할 때, Mg 원료의 투입 조건 및 방식에 따른 개재물의 발달·변화 양상을 조사하였다. 이를 통해 Invar 합금 내 비금속 개재물을 MgO계로 개질하기 위한 메커니즘을 고찰하고 공정 제어 조건을 도출하고자 하였다.

[P12-22]

Stress Corrosion Cracking Susceptibility and Passive-Film Evolution of Candidate Copper Canister Alloys in Sulfate-Rich Simulated Groundwater at 70 ºC: Yunju Lee, Seunghyun Kim, Sinbeom Go, Sangwoo Song*(Korea Institute of Materials Science)

Keywords: Deep geological disposal canister, Copper alloys, sulfate environment, corrosion

Copper is widely considered a promising corrosion-barrier material for high-level radioactive waste disposal canisters. Most previous safety assessments of copper canisters have focused on chloride- or sulfide-containing environments. However, deep groundwater in South Korea contains a relatively high concentration of sulfate, requiring the environmental cracking behavior of copper canister materials to be evaluated under sulfate-rich conditions. In this study, the stress corrosion cracking susceptibility of oxygen-free copper (Cu-OF), oxygen-free phosphorus-alloyed copper manufactured to the Swedish SKB specification (Cu-OFP), and phosphorus-deoxidized copper (Cu-DHP) was comparatively investigated. Slow strain rate tests were conducted following ASTM G129-21. Room-temperature air tests were used to characterize the reference mechanical behavior, while environmental tests were performed at 70 ºC in domestic groundwater supplemented with 0.5 M Na_2SO_4. During the environmental tests, the open-circuit potential and electrochemical impedance spectroscopy responses were monitored to evaluate the evolution of the surface film under continuous deformation. After testing, the gauge sections and fracture regions were examined using scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, electron backscatter diffraction, and X-ray photoelectron spectroscopy. The stress-strain curves showed the intrinsic differences in strength and ductility among the three copper alloys, but no pronounced degradation of the macroscopic tensile behavior was observed in the sulfate-rich groundwater. In contrast, the open-circuit potential and impedance responses evolved with strain and differed among the alloys, indicating material-dependent surface-film disruption and reformation during deformation. Post-test examinations revealed localized intergranular or crack-like features in Cu-OF and Cu-DHP, whereas such features were markedly suppressed in Cu-OFP. X-ray photoelectron spectroscopy indicated that the surface films were dominated by Cu(I)-rich oxide species

consistent with Cu_2O, together with hydroxylated, hydrated, and sulfate-associated surface species. These results indicate that sulfate-rich groundwater affects the tested copper alloys primarily through localized film rupture-repassivation and interfacial degradation rather than through substantial bulk embrittlement. Within the present test conditions, Cu-OFP exhibited the highest resistance to localized environmentally assisted damage. The results also demonstrate that macroscopic stress-strain behavior alone is insufficient to assess the environmental cracking susceptibility of copper canister materials, and that in-situ electrochemical monitoring should be combined with post-test microstructural and surface-chemical characterization.

[P12-23]

Microstructure and Corrosion Behavior of Cu-Based Joining Materials Recycled from Nuclear Decommissioning Metal Waste: dongjun Shin*, Hwan Seo Park(Korea Atomic Energy Research Institute)

Keywords: nuclear decommissioning, metal waste upcycling, copper filler metal, impurity-tolerant alloy design, corrosion potential

Decommissioning of nuclear power plants generates substantial volumes of copper-bearing metallic waste from cables, windings, and condenser tubing. Recycling this material rather than disposing of it offers a direct reduction in waste treatment and repository costs, while recovering a valuable metal. In this study, copper-based welding filler and brazing alloys were developed under the practical prerequisites governing the reuse of contaminated metals. A Cu–Si–Mn–(Sn, Ni) system was selected, in which Si and Mn provide deoxidation and single-phase α solid-solution strengthening, while Ni and Sn enhance chloride corrosion resistance and narrow the freezing range. Microstructure and corrosion behavior were the principal focus of evaluation: dendritic morphology, interdendritic segregation, and secondary phases were examined by FE-SEM/EDS, phases identified by XRD, and electrochemical response assessed by open-circuit potential and potentiodynamic polarization in 3.5 wt.% NaCl. The results indicate that heat-treatment-free Cu–Si–Mn alloys derived from decommissioning scrap can satisfy the microstructural and electrochemical requirements of copper filler metals when the Si/Mn ratio is controlled. Future work will address scale-up to drawn wire, hot-cracking qualification, and restricted reuse within the nuclear sector.

[P12-24]

Pd-Ag-Cu 합금의 미세조직과 기계적 전기적 물성에 미치는 용체화 냉각속도의 영향: 최민호(한국생산기술연구원 기능성소재부품그룹, 서울대학교 신소재공학부), 안정환(한국생산기술연구원 기능성소재부품그룹, 연세대학교 기계공학부), 김상권(지능화뿌리기술연구소 주문형생산연구부문), 송람, 조훈(지능화뿌리기술연구소 소재공급망연구부문), 박형진, 설재복(포항공과대학교 친환경소재대학원), 이석연, 문정탁(MKE 전자 신소재개발팀), 이병수*(한국생산기술연구원 기능성소재부품그룹)

Keywords: Pd-Ag-Cu합금, 용체화처리, 퀜칭용액, 냉각속도, 미세조직

Pd-Ag-Cu 합금은 우수한 내구성과 낮은 비저항을 가지고 있기 때문에 포고핀 (Pogo Pin) 등 전기접점 소재등으로 폭 넓게 사용되고 있다. 특히, Pd-Ag-Cu 합금은 열처리 온도 및 시간, 그리고 냉각속도에 따라 형성되는 상의 종류와 입계분율이 결정되며 이것을 기계적 전기적 물성과 직접적으로 연결된다. 본 연구에서는 Pd-Ag-Cu 합금의 용체화 열처리 이후 냉각방법에 따른 미세조지과 기계적 전기적 물성에 미치는 영향을 연구하였다. 용체화 열처리 온도는 900 ºC이며 1시간 유지 후 다양한 퀜칭 용액으로 냉각하였다. 퀜칭용액은 물, 오일, 고분자, 그리고 50/50 고분자-물등 이다. 냉각속도를 측정하기 위해 시험편에 열전대를 연결하였으며 데이터 로거에 데이터를 저장하였다. 미세조직 분석을 위한 OM, SEM, EBSD 를 이용하였다. 상분석을 XRD를 이용하였다. 인장시험은 상온에서 수행하였으며 각 조건에서 3개씩 진행하였으며 봉상형으로 Guage 직경은 2 mm 이고 길이는 15 mm 이다. 비저항은 4 probe tester를 이용하였다. 냉각속도는 퀜칭 용액의 종류에 따라 크게 변화하였으며 물, 오일, 50/50고분자-물, 그리고 고분자 순으로 냉각속도가 감소하였다. 낮은 냉각속도에서 입계와 쌍정계면에서 beta상이 형성되었으며 alpha 결정립 조직으로 형성되어 있다. beta상의 분율은 0.2 이며 냉각속도가 낮을수록 beta 상 분율은 증가하였다. alpha 결정립의 크기는 냉각속도가 낮을수록 증가하였으나 크기는 상대적으로 크지 않다. 더욱이 냉각속도가 낮을수록 격장상수는 감소하였으며 낮은 냉각속도에서 beta 상 peak들이 관찰되었다. 미세조직과 연관하여 기계적 물성과 전기전 물성간의 상관관계를 연구하였다.

[P12-25]

알루미늄 다이캐스팅 합금 및 열간공구강에 따른 용손 거동: 최봉재*(인하공업전문대학)

Keywords: 다이캐스팅, 용손, 열간공구강

알루미늄 다이캐스팅 공정에서 금형은 고온의 용탕과 반복적으로 접촉하며, 금형–용탕 계면에서의 화학적 반응에 의해 소착(soldering)과 용손(erosion)이 발생한다. 이러한 현상은 금형의 수명을 단축시키고 주조품의 품질과 생산성을 저하시키는 주요 요인이다. 본 연구에서는 알루미늄 다이캐스팅 합금의 조성 및 열간공구강 종류에 따른 용손 거동을 정량적으로 평가하고, 공정조건과 계면반응의 영향을 분석하였다. 주조재로 ALDC12, CASTASIL-37, SILAFONT-36 및 순 Al을 사용하였으며, 금형재로 STD61, DAC-P, DAC-M 및 DIEVAR 열간공구강을 사용하였다. 직경 13 mm의 공구강 시험편을 Al 용탕에 침지하여 용탕온도, 유지시간, 회전속도 조건에서 시험하였다. 시험 후 표면에 부착된 Al을 30 wt.% NaOH 수용액으로 제거하고 단위면적당 중량감소량을 이용하여 용손량을 평가하였으며, 광학현미경과 EPMA를 이용하여 계면반응층의 미세조직과 원소분포를 분석하였다. STD61을 이용한 기초시험에서는 용탕온도, 유지시간 및 회전속도가 증가함에 따라 전반적으로 용손량이 증가하였다. ALDC12와 STD61의 계면에서는 유지시간 증가에 따라 Fe–Al 및 Fe–Al–Si계 반응층이 성장하였고, 이후 반응층의 박리와 함께 금형강의 용손이 진행되는 거동이 관찰되었다. Al 용탕에 대한 평균 용손량의 경우, DAC-M과 DIEVAR은 STD61 대비 각각 약 33% 및 24% 낮은 용손량을 나타낸

반면, DAC-P는 상대적으로 높은 용손량을 나타내어 열간공구강의 일반적인 고온 기계적 특성과 Al 용탕에 대한 내용손성이 반드시 일치하지 않음을 확인하였다. 또한 순 Al에서는 열간공구강 종류와 관계없이 상대적으로 높은 용손이 나타나, Al 합금 내 Si, Fe 및 Mn 등의 합금원소가 Fe–Al 계면반응층의 형성 및 안정성에 중요한 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 따라서 알루미늄 다이캐스팅 금형의 용손 거동은 열간공구강 자체의 특성뿐만 아니라 Al 합금 조성, Fe–Al계 금속간화합물의 형성 및 성장, 그리고 용탕 유동에 따른 반응층의 박리가 복합적으로 작용하여 결정되는 것으로 판단된다.

P13 : 철강A-제선, 제강, 환경, 에너지
Room 1층 전시홀, 10월 29일

[P13-1]
폐플라스틱 기반 가탄재의 조성 변화에 따른 슬래그 포밍 반응 거동 분석: 안효주, 이아영, 박노근*(영남대학교)
Keywords: 슬래그 포밍, 전기로, 저탄소, 탄소중립, 재활용

지속 가능한 철강 생산을 위한 탄소중립 실현을 위하여, 본 연구에서는 전기로 공정에서 사용되는 가탄재의 일부를 폐플라스틱으로 대체하여 슬래그 반응성과 내부 구조 변화에 미치는 영향을 평가하였다. 실험은 폐플라스틱이 미치는 영향을 파악하기 위하여 단순화된 CaO-SiO2-FeO 3원계 슬래그를 대상으로 수행되었으며, 전기로 내 포트를 통해 시간에 따라 변화하는 슬래그 포밍의 거동을 추적하였다. 특히, 슬래그 내부의 기공 특성을 정량적으로 평가하기 위해 반응 단계별로 시편을 채취하고, X-ray CT 데이터를 적층하여 3차원 구조로 시각화하였다. 이를 통해 슬래그 내 전체 기공률, 기공 분포 및 개별 기공의 형상 변화를 분석하였으며, 폐플라스틱 첨가 여부에 따른 차이를 비교하였다. 분석 결과, 동일 반응 시간 조건에서 폐플라스틱을 첨가한 경우 반응성이 뚜렷하게 향상되어 기공률이 높게 나타났으며, 내부 기공의 발생이 더 활발히 진행됨을 확인하였다. 또한, 각 반응 단계별 시편 단면 내 기공의 형상 변화와 분포를 정량적으로 분석하였고, 개별 기공의 위치를 추적하여 특정 영역에 기공이 집중되는 경향을 확인하였다. 이를 바탕으로 폐플라스틱 첨가 시 수소 등 경량 기체의 발생에 따른 공간적 반응 특성을 고찰하고, 반응이 우선적으로 발생하는 영역을 파악하였다. 본 연구는 폐플라스틱 첨가가 전기로 슬래그의 미세구조와 화학적 반응성에 미치는 영향을 다방향으로 규명하였으며, 이를 통해 철강 산업에서 폐플라스틱을 활용한 가탄재 대체의 실질적 가능성과 긍정적인 환경적 영향을 제시한다.

[P13-2]
9% Ni강의 4.2 K 초극저온 기계적 특성: 천재용(한국재료연구원, 충남대학교), 윤성준(한국재료연구원, 고려대학교), 정덕현(충남대학교), 장태진, 나영상*, 김영균*(한국재료연구원)
Keywords: Martensite, Cryogenic tensile test, Charpy Impact test, Microstructure, Hydrogen embrittlement

최근 수소경제의 확산에 발맞춰 대용량 수소의 효율적인 저장 및 운송을 위한 액화수소 (LH_2, 약 20 K) 인프라 구축이 가속화되고 있다. 이에 따라 저장탱크 및 배관 등 액화수소 시스템에 적용되는 구조재의 경우 극저온 환경에서의 우수한 기계적 특성이 요구된다. 9%Ni강은 LNG 수준의 극저온 환경에서 높은 강도와 우수한 특성을 나타내어 대표적인 극저온 구조재로 활용되고 있으나, 액화수소 온도 이하의 초극저온 환경에서 나타나는 기계적 특성 및 변형 거동에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 9%Ni강의 미세조직 및 4.2 K 초극저온 환경에서의 인장 특성 및 변형 거동을 조사하였다. 초기 미세조직 분석 결과, 9%Ni강은 마르텐사이트 기지 조직을 나타냈으며 평균 결정립 크기는 약 12.2 μm로 측정되었다. 인장시험 결과, 시험온도가 감소함에 따라 항복강도와 최대인장강도가 크게 증가한 반면, 4.2 K에서는 연성이 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 인장시험 후 변형 미세조직 및 파단면 분석을 통해 9%Ni강의 초극저온 변형-파괴 거동을 고찰하였다.

[P13-3]
Thermodynamic Assessment of Liquid Ti-Al-V Ternary System Using Modified Quasichemical Model: Hosea Simanjuntak, Min-Kyu Paek*(Clausthal University of Technology)
Keywords: Thermodynamic modeling, Ti-Al-V alloy, Modified Quasichemical Model, Ti extraction

An accurate thermodynamic description of the Ti-Al-V system is important for optimizing the production of high-performance aerospace alloys and the pyrometallurgical extraction of titanium from industrial waste. Since this ternary system is asymmetric with Short-range ordering by Al addition, traditional dilute solution or regular solution models based on the symmetric Muggianu interpolation method will lead to a poor description of liquid solution properties. Therefore, in this study, the Gibbs Free Energy of Ti-Al-V liquid solution was explicitly described by the Modified Quasichemical Model (MQM) in the pair approximation by applying the Toop-like asymmetric interpolation method. The phase diagram of Ti-Al-V ternary system and its sub-binary systems were successfully constructed using MQM. The developed database will be also used to predict the optimum condition of Ti extraction process and physical properties such as molar volume and surface tension of Ti-Al-V alloy melt.

[P13-4]
Ladle Slag의 CAM Flux 첨가에 따른 API강의 탈황거동: 차은환, 정용석*(한국공학대학교)
Keywords: API강, 산업부산물, CAM Flux, 액상분율, 탈황거동

API강(American Petroleum Institute Steel)은 내식성과 인성이 요구되는 송유관 강재로 극저온, 산소 및 황과 같은 불순물에 노출되는 환경에서 사용된다. 황화물로 인한 API강의 기계적 물성 저하 및 취성파괴를 예방하기 위해 Ladle Furnace에서 2차정련을 통한 탈황이 필요하다. 한편, L.F. 공정에서 과도한 석회석의 사용으로 형성된 C/A=2.0인 고염기 탈황 슬래그는 고상 형성으로 인한 슬래그 반응성 저하와 같은 문제가 있어 추가적인 열원이 요구된다. 이를 보완하기 위해 Flux를 사용하여 슬래그의 액상분율을 개선하는 조업이 검토되고 있다. 본 연구에서는 Recycled CaO, CA6 및 폐 MgO 내화물과 같은 산업부산물을 재활용하여 MgO 함량(0, 5, 10 wt%)을 가진 저융점 $CaO-Al_2O_3-MgO$(CAM) Flux 3종을 설계했다. 고주파 유도 용해로를 활용하여 1550 ºC, 60분

간 API강과 $CaO-Al_2O_3-5SiO_2-1MgO-5MnO$(C/A=2.0) Ladle Slag 및 CAM Flux 3종 10 wt%첨가 시 시간에 따른 용강의 탈황 거동을 연구하였다. 정량적인 평가지표로 L_S(Sulfur Distribution Ratio)를 사용하였다. XRF, ICP-OES, C/S analysis 분석 결과. Slag 중 MnO 환원과, FeO의 생성이 관찰되었다. 초기 슬래그 염기도(1.7~2.0)와 L_S는 비례하지 않았고, L_S는 액상분율의 증가(87.4%~93.1%)에 비례하는 상관관계를 보였다. 이는 60분간 API강의 탈황거동이 열역학적보다 속도론적 인자에 의해 영향을 받았음을 의미한다. 결과를 바탕으로 탈황 반응속도론적 해석을 진행하여, CAM Flux 첨가와 API강의 탈황거동의 상관관계를 제시한다.

[P13-5]

복합산화방지제 첨가에 따른 MgO-C 내화물의 압축강도 특성 평가: 이지혁, 정용석*(한국공학대학교)

Keywords: MgO-C 내화물, 고온 중량감소, 압축강도, 산화방지제, 산화물첨가제

MgO-C 내화물은 MgO의 우수한 내열성과 Carbon의 높은 열전도도와 낮은 열팽창 계수로 인한 뛰어난 열충격 저항성 및 슬래그 저항성으로 철강 제조공정에서 내벽 소재로 주로 사용된다. 최근 전로 공정에서는 이산화탄소 배출량 저감을 위해 스크랩 사용량을 증가시키는 방안이 연구되고 있으나, 스크랩 장입 과정에서 발생하는 충돌은 내화물의 손상을 야기하며, 이에 대한 기계적 물성 향상이 필요하다. 본 연구에서는 MgO-C 내화물에 Al, Si, B_4C 등의 함량 변화 및 단일 혹은 복합 첨가를 통해 압축강도를 평가하고자 하였다. Al, Si 단일첨가시 Si의 압축강도 향상 효과가 더 크며 복합 첨가시 무첨가 MgO-C 내화재보다 2배 향상된 강도를 보였다. 복합 첨가한 조성에 B_4C를 첨가하여 추가적인 강도 향상을 확인해 보았으며 약 20% 강도가 상승하였다. 본 발표에서는 추가적으로 상분석(XRD)과 미세조직 분석(SEM)을 통해 산화방지제 및 산화물 첨가제의 고온 반응 거동을 이해하고 이에 따른 기계적 물성 향상 원인을 규명 하고자 한다.

[P13-6]

그래프 신경망(GNN)을 활용한 호퍼 내 입자 거동의 예측 가속화: 권지선, 양현진*(인하대학교)

Keywords: 이산요소법(Discrete Element Model, DEM), 대리 모델

호퍼(Hopper)는 분체 및 과립성 소재를 중력 기반으로 정량 배출하는 수렴형 용기로, 철강산업을 비롯한 다양한 산업 공정에서 핵심 저장 및 이송 설비로 폭넓게 활용된다. 호퍼 내부 입자 거동 분석에는 이산요소법(DEM)이 대표적인 수치해석 기법으로 활용된다. 이산요소법은 Lagrangian 관점에서 뉴턴의 운동법칙을 개개 입자에 적용하여 입자-입자 및 입자-벽 간 상호작용을 통해 궤적을 추적하는 기법으로 이를 통해 입자의 배출 거동을 정밀하게 파악할 수 있다. 그러나 이산요소법은 입자 수의 증가 및 시뮬레이션 시간에 따라 접촉 연산량과 계산 비용이 기하급수적으로 증가한다는 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 계산적 한계를 극복하고자, 이산요소법으로부터 확보한 데이터를 활용하여 그래프 신경망(GNN)을 학습시켜 초기 상태로부터 후속 시점의 입자 운동을 순차적으로 예측하는 대리 모델(Surrogate Model)을 구축하였다. 최종적으로 그래프 신경망을 통해 예측된 개개 입자의 거동과 더불어 Eulerian 관점에서의 과립 유동 속도장을 이론 및 이산요소법 결과와 정량적으로 비교 검증함으로써, 본 모델의 예측 정확도 및 계산 가속 성능을 평가하고자 한다.

[P13-7]

AOD 더스트 첨가에 따른 스테인리스강 더스트의 염기도 변화 및 Cr 환원 거동: 박종형, 김선중*(조선대학교)

Keywords: Stainless steel dust, AOD dust, Basicity

스테인리스강 제조 공정에서 발생하는 더스트는 Fe, Cr, Ni 등의 유가금속을 함유하고 있어 금속 자원의 회수 및 재활용 측면에서 중요한 철강 부산물이다. 또한 AOD 더스트는 Ca계 산화물을 다량 함유하고 있어 슬래그 조성 및 염기도 조절을 위한 재활용 원료로 활용될 수 있다. 한편, Cr은 산소와 쉽게 결합하여 안정한 Cr_2O_3를 형성하기 때문에 환원이 어려우며, 슬래그의 조성과 염기도는 Cr의 환원 거동에 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 분코크스를 환원제로 사용하여 1573K에서 스테인리스강 더스트에 CaO 및 AOD 더스트의 첨가를 통해 염기도 조절에 따른 Cr의 환원 및 회수 특성을 평가하였다. 금속상의 Fe, Cr, Ni 함량은 습식분석으로 평가하고, SEM-EDS로 상분석을 수행하였다.

[P13-8]

전기용융로(ESF) 플라즈마 아크의 계산 가속화를 위한 차수축소모델(ROM) 개발: 김준엽, 양현진*(인하대학교)

Keywords: 자기유체역학(MHD), 다중물리(Multiphysics), 적합직교모델(POD), 방사기저함수(RBF)

철강 산업의 탄소중립 달성을 위해 탄소 기반의 용융 공정을 전기 기반으로 전환하려는 수요가 증가함에 따라 플라즈마 아크를 열원으로 활용하는 전기용융로가 유망한 대안으로 주목받고 있다. 전기용융로 내부의 플라즈마 아크는 전기에너지를 고온의 열에너지로 변환하여 직접환원철(DRI)에 전달하므로 아크의 온도, 유동 및 전자기적 거동의 실시간 예측은 용융 효율과 안정성을 결정하는 핵심 요소로 작용한다. 그러나 플라즈마 아크는 극고온, 초고속의 제트 유동과 전자기장 및 열전달이 상호작용하는 복잡한 다중물리 현상으로 전산유체역학 기반 계산은 많은 시간과 전산 자원이 요구된다. 특히 다양한 조업 조건에 따른 아크 거동을 과도적(transient)으로 분석하기 위해서는 기존 다중물리기반 모델의 계산 부담을 완화할 수 있는 예측 모델이 필요하다. 본 연구에서는 서로 다른 직류 전류 조건에서 플라즈마 아크의 과도 거동을 신속하게 예측하기 차수축소모델(ROM)을 구축하였다. 먼저 자기유체역학(MHD) 지배방정식에 기반하여 물리기반 시뮬레이션을 수행함으로 전류 및 시간에 따른 기초 데이터를 확보하였다. 이 데이터에 적합직교분해를 적용하여 고차원 물리장에 반복적으로 나타나는 주요 패턴을 파악하고 소수의 기저로 축약하였다. 또한 방사기저함수 보간법을 이용하여 전류와 시간에 따른 변화를 예측하고 이를 기저와 결합하여 원하는 조업 조건과 시점의 전체 물리장을 복원하는 모델을 구축하였다. 구축된 차수축소모델은 모델 검증에서 물리기반 시뮬레이션으로 계산된 물리장 분포를 안정적으로 재현하였으며

에너지 기반 적합도가 99% 이상으로 도출되었다. 또한 단일 조건의 데이터를 확보하는 데 필요한 계산 시간을 기존 물리기반 모델 대비 600배 이상 단축하였다. 이를 통해 복잡한 지배방정식을 수치해석적으로 계산하지 않고도 특정 전류 조건과 시간에서의 플라즈마 아크 거동을 빠르게 예측할 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 플라즈마 아크를 효율적으로 모사할 수 있는 계산 방법을 제시하며 향후 전기용융로의 조업 조건 탐색 및 실시간 상태 예측을 위한 기반 모델로 활용될 수 있다.

[P13-9]

MgO_{Sat}-SiO_2-FeO계 슬래그 내 Ni용해도에 미치는 슬래그 조성의 영향: 김동우, 허정호*(한국지질자원연구원(KIGAM), 과학기술연합대학원대학교(UST))

Keywords: 저품위 Ni광석, 불순물, 슬래그 조성, 니켈 용해도, 열역학

니켈 (Ni)은 이차전지 산업의 핵심 원료로서 수요가 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 안정적인 Ni 공급원 확보를 위해 기존 고품위 원료뿐만 아니라 사문석과 같은 저품위 Ni 광석의 활용 가능성을 검토할 필요가 있다. 저품위 Ni 광석의 활용 방안 중 하나로 페로니켈 (Fe-Ni) 제련 공정 내 기존 Ni 원료 대체재로서 일부 투입하는 방안을 고려할 수 있다. 그러나 저품위 Ni 광석은 기존 Fe-Ni 공정에 사용되는 라테라이트 광석에 비해 Ni 함량이 낮고 불순물이 상대적으로 높으며 성분과 조성에도 차이가 있다. 따라서, 저품위 Ni 광석을 공정에 투입할 경우, 원료 조성 변화에 따라 슬래그 조성이 변화하고 이는 슬래그 내 Ni 용해 거동에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 저품위 Ni 광석의 활용 가능성 평가를 위해 슬래그 조성 변화가 Ni 용해도에 미치는 영향을 열역학적으로 규명할 필요가 있다. 본 연구에서는 저품위 Ni 광석 활용에 따른 슬래그 조성 변화를 모사하고자 주요 불순물인 CaO, Al_2O_3 및 Cr_2O_3 함량을 2, 4, 6 wt%로 제어하였고, MgO/SiO_2를 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3으로 조절하였다. 실험은 수퍼 칸탈 수직 저항로를 이용하였으며 MgO 도가니에 Fe–22%Ni 합금 30 g과 슬래그 18 g을 넣고 이를 로내 장입하였다. 고순도 Ar 분위기 하 1550 ℃에서 24시간동안 실험을 진행한 후 급냉하였으며, 확보된 샘플들의 조성 및 상분석을 위해 ICP-OES, XRF 및 XRD 분석을 실시하였다. 또한 FactSage™ 8.3을 활용하여 열역학 계산을 병행하였다. CaO, Al_2O_3 및 Cr_2O_3 함량이 증가함에 따라 슬래그 내 NiO 함량은 전반적으로 증가하는 경향을 나타냈다. MgO 포화 조건에서 NiO는 nickelate (NiO_2^{2-})로 안정하며 산성 거동을 한다고 보고된 바, 현 조건 내 CaO, Al_2O_3 및 Cr_2O_3 모두 염기성 거동을 하는 것으로 판단된다. CaO, Al_2O_3 및 Cr_2O_3의 함량 증가에 따라 NiO의 활동도계수는 (γ_{NiO}) 감소하는 경향을 보였으며, 이는 슬래그 내 NiO의 열역학적 안정성이 증가하여 Ni의 슬래그 상으로의 용해가 촉진될 수 있음을 의미한다. 따라서 저품위 Ni 광석 활용 시 CaO, Al_2O_3 및 Cr_2O_3에 의한 슬래그 조성 변화를 적절히 제어하는 것이 Ni 손실 저감에 중요할 것으로 판단된다.

[P13-10]

산업부산물 기반의 제강용 Flux 조성 설계 및 개재물 정련 거동 평가: 오혜민, 김인아, 김용찬*(포항산업과학연구원), 정은진*(한국산업기술기획평가원)

Keywords: 금속, Flux, 부산물, 제련, 정련

철강 산업에서 탄소중립과 자원 순환이 전 세계적으로 중요한 과제로 대두되고 있으며, 산업부산물의 재활용은 환경 부담을 줄이는 동시에 새로운 경제적 가치를 창출하는 핵심 기술로 주목받고 있다. 유럽의 경우 약 60% 수준의 재자원화율을 달성하고 있는 반면, 국내는 23% 수준에 머물러 있으며 연간 약 11만 톤 이상의 산업부산물이 매립되고 있다. 이는 철강 산업 내 폐자원 고부가가치화 기술의 국산화 필요성을 시사한다. 한편 국내 철강 공정에서 활용되는 정련용 첨가제 및 Flux 원료는 상당 부분 수입에 의존하고 있으며, 이로 인한 원가 상승과 공급망 불안정성 문제가 꾸준히 제기되어 왔다. 이에 본 연구에서는 국내 산업부산물을 원료로 하여 수입 첨가제를 대체할 수 있는 제강용 복합 산화물계 Flux 조성을 설계하고, 그 정련 성능을 학술적으로 평가하고자 한다. 본 연구의 목적은 복합 고상 산화물계 Flux 설계를 통해 철강 내 비금속 개재물, 특히 Al_2O_3 성분에 대한 정련 거동을 규명하고 그 가능성을 제고하는 데 있다. 이를 위해 다양한 폐자원 조합을 기반으로 중심 조성을 설정하고, 주요 산화물 간 상호작용에 따른 개재물 포집 특성을 정량적으로 평가하였다. 또한 개재물 제거 메커니즘의 이론적 근거를 마련하기 위해 상평형 다이어그램에 기반한 조성 최적화와 고온 반응 거동 분석을 함께 수행하였다. 본 연구는 폐자원의 단순 재활용을 넘어 정련 공정의 친환경적 전환과 핵심 소재의 국산화를 동시에 실현할 수 있는 가능성을 시사한다. 특히 철강 내 개재물 정제 기술에 대한 학술적 접근으로서, 정련제 구성 성분의 조성 및 물리화학적 특성이 불순물 제거 효율에 미치는 영향을 계량적으로 해석하고자 하였다. 나아가 본 연구 결과는 실증 공정 적용 가능성을 토대로 기술적 유효성과 산업적 확장성을 단계적으로 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

[P13-11]

철강제품 EPD 기반 탄소발자국 데이터의 비교 가능성에 관한 연구: 이승희, 심아령, 강신곤*(동아대학교)

Keywords: 환경성적표지(EPD), 전기로(EAF), 지구온난화지수(GWP), 금속 장입 내 스크랩 비율(SFMC)

전기로(electric arc furnace, EAF) 조업은 철강 탄소집약도를 낮추는 주요 수단으로 제시되고 있으나, 실제 배출량은 금속 장입의 스크랩 구성과 전력 공급 조건에 따라 설비별로 달라질 수 있다. 이러한 차이는 환경성적표지(environmental product declaration, EPD)를 통해 제품 단위의 탄소발자국 값으로 공개되며, 최근 조달과 정책에서 제품 간 비교 자료로 활용되고 있다. 다만 EPD의 제3자 검증은 프로그램 및 제품범주규칙(product category rule, PCR) 요건에 대한 적합성을 확인하는 절차이므로, 선언 간 비교 가능성까지 보장한다고 보기는 어렵다. 본 연구에서는 공개 레지스트리에서 수집한 철근·선재 EPD를 대상으로 보고된 수치를 원본 문서와 대조 검증하고, 전기로 용해 여부, 금속 장입 내 스크랩 비율(scrap fraction in metallic charge, SFMC) 수준, 시스템 경계를 사전에 설정한 기준으로 삼아 각 선언이 비교에 충분한 증거를 제시하는지를 평가하였다. 그 결과 비교 조건을 충족한 제품라인의 비율은 제한적인 것으로 나타났으며, 스크랩 비율로 제시된 다수의 수치는 사용후 재활용률이나

재활용 함량과 같이 실제 장입 스크랩 비율과 구별되는 수량이어서 정량 증거로 인정되지 않았다. 비교 조건을 충족한 집합 내에서도 선언된 A1–A3 지구온난화지수(global warming potential, GWP; kg CO_2eq/t)는 넓은 분포를 보였고, 이를 공정 단위로 분해하는 데 필요한 정보는 확인되지 않았다. 다만 본 연구는 공개된 문서 증거만을 대상으로 한 것으로 기저 전과정 인벤토리나 설비 조업을 검증하지는 않았으며, 적용한 임계값 또한 본 연구의 분석 목적에 따라 설정한 기준이다. 따라서 본 결과는 특정 제품이나 생산자의 환경 성능 순위로 해석되기 어려우며, EPD 탄소발자국 데이터를 비교·집계하기에 앞서 분석 목적에 따른 증거 심사가 필요한 것으로 판단된다.

[P13-12]

제강분진의 선택적 휘발을 통한 Zn 회수 및 중금속의 입도별 분포 특성: 임기찬(인하대학교), 신동주(한국지질자원연구원), 김영재*(인하대학교)

Keywords: 제강분진, 아연 회수, 중금속, 앤더슨 샘플러, 고온 휘발

철강 공정에서 발생하는 전기로 제강분진(Electric Arc Furnace Dust, EAFD)은 Zn을 비롯하여 Fe, Pb, As 등 다양한 금속 성분을 함유하고 있어 유가금속 회수를 위한 이차자원으로서 높은 활용 가치를 가진다. 특히 고온 열처리를 이용한 Zn 회수공정에서는 원소 및 화학종에 따른 휘발성 차이에 의해 Zn과 일부 휘발성 원소가 기상으로 이동하며, 이후 냉각 과정에서 미세입자로 형성된다. 따라서 온도에 따른 원소별 휘발 거동과 생성 입자의 입도별 성분 분포를 파악하는 것은 Zn의 선택적 회수와 후단 집진공정의 최적화 및 중금속의 분리를 위해 중요하다. 본 연구에서는 제강분진의 고온 처리 과정에서 발생하는 Zn 및 기타 금속의 휘발 거동 및 휘발 금속의 입도별 특징을 평가하고자 하였다. 먼저 제강분진의 결정상과 화학조성을 분석하고, 유도 가열로를 이용하여 온도 변수에 따라 열처리를 진행하였다. 열처리 과정에서 휘발한 입자는 앤더슨 샘플러를 이용하여 입도별로 포집·분리하였다. 각 스테이지에서 분리된 입자의 성분, 결정상, 미세 구조를 분석하여 온도에 따른 휘발 입자의 종류와 결정학적 특징, 형상 그리고 입도 분포 등을 평가하였다. 또한 열처리 전·후 시료의 질량 및 조성을 비교하여 주요 원소의 잔류 및 휘발 거동을 정량적으로 확인하였다. 이를 바탕으로 열처리 온도에 따른 Zn, Pb, As 등 주요 원소의 휘발 및 응축 특성과 입도별 분포 양상을 평가하고, Zn 회수 입도 영역과 불순물의 분리 가능성을 검토하였다. 이를 통해 제강분진으로부터 Zn의 선택적 회수를 위한 열처리 조건과 중금속의 휘발을 고려한 후단 집진 조건 설정을 위한 가이드라인을 제시하였다.

[P13-13]

철광석 브리켓의 특성 및 고로 철원 활용성 검토: 문지성, 강영조*(동아대학교 신소재공학과)

Keywords: 고로, 브리켓, 기공, 압축강도, 철광석, 환원

세계적으로 탄소중립에 대한 요구가 거세짐에 따라 CO2 배출의 상당 부분을 차지하는 철강 산업 분야의 공정 개선이 필요하다. 고로는 철광석이 원료인 제철 제강 공정의 CO2 배출에 크게 관여하고 있으며, 고로에서의 CO2 배출을 저감할 경우 철강 산업 전체의 CO2 배출량이 크게 감소할 것을 기대할 수 있다. 고로의 철원 장입물 중 소결광 및 펠렛은 소결, 소성 공정을 거치며 생산되기 때문에 그 과정에서 CO2 배출이 발생하지만 바인더와 분철광석을 혼합, 압분한 브리켓으로 대체할 경우 고로 철원의 생산 공정에서 CO2 배출을 저감할 수 있을 것으로 예상된다. 브리켓이 고로에서 사용되려면 기존 철원 수준의 환원율 및 압축강도가 확보되어야 한다. 본 연구에서는 철원별 환원율 평가 및 환원율과 기공률의 관계를 확인하였으며 환원 온도 조건을 설정하여 환원 중 압축강도 열화 거동을 조사하였다. 이를 통해 브리켓의 고로 철원으로서의 활용성을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

[P13-14]

배가스 온도 영역에서 CO 가스 분압에 따른 Biomass-DRI 복합 펠렛의 반응 및 잔류 탄소 거동 연구: 김윤하, 김선중*(조선대학교)

Keywords: Direct reduced Iron, Biomass, pelletizing

최근 철강 산업에서는 탄소중립 실현을 위해 수소 기반 직접환원철(H-DRI)을 전기로에 사용하는 방안이 대두되고 있다. 그러나 H-DRI는 무탄소 특성으로 조업 시 막대한 열에너지 손실이 발생하여 이를 보완하기 위해 배가스를 활용한 장입물 예열 공정이 필수적으로 요구된다. 이때 바이오 탄소재가 배합된 복합 펠렛을 활용하면 예열 구간 내에서 화학적 효율을 극대화할 수 있다. 이러한 복합 펠렛이 장입 전 예열대를 통과할 때 다성분계 배가스에 노출되므로, 배가스 내 CO 가스와 펠렛 내부 탄소 간의 상호작용이 펠렛의 가탄 및 초기 환원거동에 미치는 영향을 확인할 필요가 있다. 본 연구에서는 배가스 환경 중 CO 분압에 따른 Biomass와 DRI 간의 환원 및 가탄 거동을 예열 온도 영역인 1273K에서 조사하였다. 펠렛 내 환원제 및 가스 비율에 따른 열역학적 반응 특성과 반응 후 회수된 펠렛의 미세조직 변화를 확인하였다.

[P13-15]

Effects of Al Addition on Deoxidation and Ti Composition Control During Atmospheric Melting of Maraging Steel: Jiyeon Kim(Purpose Built Mobility Group, Seonam Technology Application Division, Korea Institute of Industrial Technology, Chonnam National University), Jiwon Seung(Purpose Built Mobility Group, Seonam Technology Application Division, Korea Institute of Industrial Technology, Jeonbuk National University), Jaehong Shin(Korea National Institute for Rare Metals, Korea Institute of Industrial Technology), Jaeyeol Jeon*(Purpose Built Mobility Group, Seonam Technology Application Division, Korea Institute of Industrial Technology)

Keywords: Maraging Steel, Atmospheric Induction Melting, Deoxidation, Thermodynamic Calculation

Maraging steel is typically produced through vacuum induction melting (VIM) often followed by vacuum arc remelting (VAR).

Atmospheric induction melting offers advantages for recycling maraging steel due to its simple equipment and low processing costs. However, melting under atmospheric conditions requires control of the oxidation and loss of reactive alloying elements caused by oxygen ingress. This study aims to produce Maraging Steel from recycled maraging steel scrap under atmospheric conditions and to achieve the target alloy composition by controlling the oxidation and loss of Ti and Al during melting based on thermodynamic calculations. Thermodynamic calculations using FactSage were performed to predict changes in the composition of major alloying elements due to atmospheric oxygen ingress. The results showed negligible oxidation of Ni, Mo and Co, whereas Ti and Al were preferentially oxidized during the initial stage of melting. Based on these oxidation behaviors, the required Al and Ti additions were thermodynamically calculated to control the oxygen content in the molten steel and adjust the Ti content. Al was subsequently added as a deoxidizer, followed by additional Ti addition. The experimental results showed that the oxygen content in the molten steel was reduced and the target Ti content was achieved. The experiments confirmed that thermodynamically determined Al deoxidation and Ti addition can effectively control the alloy composition during atmospheric induction melting of recycled maraging steel.

[P13-16]

고질소 스테인리스강과 CaF_2-CaO-Al_2O_3-MgO계 ESR 슬래그 반응에서 Si과 Al 함량 변화에 관한 열역학적 고찰: 김윤진, Yao Su (한양대학교), 정재석(두산에너빌리티), 박주현*(한양대학교)

Keywords: High nitrogen stainless steel, Electroslag remelting(ESR), Slag-metal equilibrium, Si- Al_2O_3 reaction

전 세계적인 에너지 공급 불안정성과 탄소중립 요구가 심화됨에 따라 소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR)를 중심으로 원자력 발전이 주목받고 있으며, SMR의 구조재료로서 우수한 강도와 내식성을 갖는 고질소 오스테나이트계 스테인리스강(High-Nitrogen Stainless Steel, HNSS)에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. HNSS는 질소를 첨가함으로써 고가의 니켈(Ni) 함량을 감소시키면서도 오스테나이트 조직을 유지할 수 있으며, 탄소(C)보다 높은 고용강화 효과를 통해 우수한 기계적 특성과 경제성을 확보할 수 있는 소재이지만, 기공, 개재물 및 편석을 최소화하기 위해서는 Electro-slag Remelting (ESR)과 같은 특수 정련 공정이 요구된다. 그러나 ESR 공정에서 용강-슬래그 간의 산화-환원 반응으로 인해 Si, Al과 같은 반응성 원소의 산화 손실로 인해 재용해 잉곳의 조성이 변화하여 목표 조성을 확보하는 데 어려움이 있다. 본 연구에서는 수직 관상로를 이용하여 아르곤 분위기, 1500 ºC 조건에서 HNSS와 CaF_2-CaO-Al_2O_3-MgO계 ESR 슬래그 사이의 슬래그-금속 평형 반응에 대한 열역학적 고찰을 수행하였다. 또한 Si 함량 감소를 억제하기 위해 슬래그 조성과 반응 온도가 ESR 잉곳의 Si과 Al 함량에 미치는 영향을 분석하였다. 슬래그 조성 설계를 위해 Ion-Molecular Coexistence Theory (IMCT)와 상용 열역학 계산 소프트웨어인 FactSage(Ver. 8.3)를 비교 분석하였다. 계산 결과와 실험 결과를 비교하여 열역학적 예측의 타당성과 슬래그 조성에 따른 Si/Al의 평형 거동을 평가하였다. 연구 결과, 용강 내 Si-loss와 Al-pickup 현상은 슬래그 내 SiO_2 함량 (활동도) 증가와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났으며, 슬래그와 용강 사이에서 발생하는 $3[Si]+2(Al_2O_3)=3(SiO_2)+4[Al]$ 반응의 열역학적 평형에 의해 지배되는 것으로 확인되었다. 특히 슬래그 내 SiO_2 함량을 1~3 wt%로 증가시키는 것은 용강 내 Si-loss와 Al-pickup을 효과적으로 억제할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 SiO_2를 과도하게 첨가할 경우 용강 내 산소 함량 증가와 Cr 및 Mn과 같은 합금 원소의 손실이 발생할 수 있음을 확인하였다.

[P13-17]

고알칼리 소결 더스트의 자원화 기술 개발: 박종인*, 임형묵, 조문경(포스코)

Keywords: 부산물, 더스트, 수세척, 자원화, 알칼리

소결공정의 Waste EP에서 배출되는 더스트는 철 함량이 높음에도 불구하고 설비 내 부착물 생성을 유발하는 K_2O 및 Na_2O 등 알칼리 성분이 5 wt% 이상 함유되어 철원으로의 활용이 제한적이다. 본 연구에서는 수세척을 통해 더스트에서 알칼리 성분을 제거하는 방법을 도출하고 세척 후 더스트의 소결공정 재활용을 위한 공정 설계를 수행하였다. 소결공장에서 사용 가능한 조건에 부합하도록 수세척 조건 변화에 따른 알칼리 제거율을 평가하였고 더스트의 탈수 방법을 도출하였다. 또한 본 연구의 상용화를 위한 수세척 설비의 주요 구성 요소에 대해 설계를 수행하였다. 본 연구를 통한 기술 적용 시 고함철 부산물의 자원화가 가능하며, 철원 회수 및 매립비 절감 효과가 기대된다.

[P13-18]

Effect of Carbon and Flux on Melting Behavior of H_2-DRI Coupled with Technique for Determination of Collapse Temperature: Jooho Park, Won-Bum Park, Youn-Bae Kang(POSTECH), Sang-Dong Lee, Joonhyun Nam(Technical Research Laboratories, POSCO), SangHo Yi*(POSTECH)

Keywords: H_2-DRI, HT-CLSM, Image analysis

In efforts to address climate change, ironmaking industry has been actively pursuing strategies to reduce greenhouse-gas (GHG) emissions. Hydrogen (H_2) has recently attracted interest as a reducing agent for iron ore, serving as an alternative to fossil fuels. By employing H_2, it is possible to reduce GHG emissions and produce an iron source known as Hydrogen Direct Reduced Iron (H_2-DRI). However, it remains challenging to lower the energy consumption in the smelting process because of its low carbon content and insufficient flux. In order to promote melting of H_2-DRI, combination of carbon feeding and fluxing was considered. The required additive amounts for melting of Fe and gangue in H_2-DRI were predicted through thermodynamic calculation using FactSage v8.4. It was indicated that formation of liquid slag is possible above 1400 ºC while Fe can be melted at eutectic temperature by added carbon. It

implies that melting temperature of gangue determines the melting temperature of H_2-DRI. Through thermodynamic estimation, blends of H_2-DRI-carbon-flux were designed. Melting behavior of blends was observed using High Temperature Confocal Laser Scanning Microscope (HT-CLSM). It was confirmed that FeO reduction occurred above 1000 ºC, and physical separation of liquid steel and slag took place when liquid slag was formed. HTML-based image-analysis tool was applied to measure collapse temperature from CLSM videos. It was identified that collapse temperature of blends can be determined by abrupt change of bright-area fraction in the CLSM images. It is anticipated that video analysis techniques will support the measurement of collapse temperature of (H_2)-DRI reducing observer-dependent error.

P14 : 철강B-압연, 강종개발, 후처리
Room 1층 전시홀, 10월 29일

[P14-1]
Batch annealing공정이 3Mn Q&P강의 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향: 김규헌, 임용수(한양대학교), 김지훈(부산대학교), 김진경*(한양대학교)
Keywords: 중망간강, Batch annealing, Q&P, TRIP

중망간강(Medium Mn steel)은 3세대 고강도강으로 우수한 강도–연성 조합을 확보할 수 있어 주목받고 있다. 본 연구에서는 batch annealing 이 Q&P 강의 최종 미세조직과 기계적 물성에 미치는 영향을 분석하였다. batch annealing은 냉간 압연성을 향상시키는 동시에, Mn의 분배에 따른 화학적 불균질성을 유도하는 데 목적이 있다. Fe-3Mn-0.2C-1Al(wt%)의 강을 열연 후 680 ℃ 1시간의 batch annealing 유무에 따라 시편을 제조하였다. Q&P 공정은 두 조건 모두 1분의 오스테나이트화 열처리 후, 220 ℃에서 퀜칭 및 파티셔닝을 수행하였다. 미세조직 분석 결과, 초기 조직의 차이는 Q&P 공정 중 상변태 거동에 영향을 미쳐 prior austenite grain (PAG) 크기와 잔류 오스테나이트, 템퍼드 마르텐사이트 및 베이나이트의 분율 변화를 유발했고, 특히 batch annealing을 진행 시 증가한 잔류 오스테나이트 분율과 형태에 의해 TRIP 효과가 향상되어 우수한 연성을 나타내었다. 결과적으로 batch annealing에 따른 초기 조직의 변화는 Q&P 공정 후 형성되는 미세조직과 기계적 특성을 제어하는 주요 인자로 작용하였으며, 이를 통해 강도와 연성의 균형을 조절할 수 있음을 확인하였다.

[P14-2]
Cu 첨가가 3Mn Q&P강의 미세조직에 미치는 영향 분석: 문태영, 김규헌, 김진경*(한양대학교)
Keywords: Q&P강

Quenching and partitioning (Q&P) 강은 높은 강도의 마르텐사이트와 TRIP 효과를 유발하는 오스테나이트가 복합적으로 존재함으로써 우수한 강도와 연신율의 조합을 나타낸다. 일반적으로 Q&P강은 오스테나이트화 후 quenching과 partitioning 과정을 거쳐, 마르텐사이트로부터 탄소가 오스테나이트로 확산됨으로써 탄소 함량이 높고 상온에서 안정한 retained austenite (RA)를 갖도록 설계된다. 본 연구에서는 Cu 첨가 여부에 따른 미세조직 및 경도 변화를 확인하기 위해, Fe-2.8Mn-0.27C-1.3Al (wt%) Q&P강과 Cu를 첨가한 강을 제조하였다. 아크 멜팅을 통해 제조한 합금에 대해 1200 ℃에서 120분간 균질화 열처리를 수행하였으며, 이후 열간 압연 및 냉간 압연을 거쳐 오스테나이트화 온도인 900 ℃에서 열처리를 진행하였다. 이후 다양한 quenching 온도 (QT)에서 30초간 유지한 뒤, 460 ℃에서 5분간 partitioning을 실시하고 상온으로 최종 quenching하였다. 해당 시편에 대해 X선 회절 분석 (XRD), 주사 전자 현미경 (SEM), 후방 산란 전자 회절 분석 (EBSD)을 통해 Cu 첨가 여부에 따른 미세조직 (상분율 및 분포)과 경도 변화를 분석하고 고찰하였다.

[P14-3]
Fe-21Cr-5.8Al 합금의 Mo 함량이 상 형성 거동 및 고온 압축 특성에 미치는 영향: 권제영(한국생산기술연구원, 고려대학교), 신승우(한국생산기술연구원), 고원석*(고려대학교), 박형기*(한국생산기술연구원)
Keywords: APMT, FeCrAl, 내열강, High Temperature compressive properties

신재생 에너지 및 산업 설비의 확대에 따라 고온 산화 환경에서 장시간 사용이 가능한 내열 합금에 대한 수요가 증가하고 있다. 이러한 환경에서 소재의 수명은 표면에 형성되는 산화피막의 보호 여부에 의해 결정된다. 고온용 내열강은 형성되는 산화피막의 종류에 따라 구분되며, Cr을 다량 함유한 합금은 Cr_2O_3 피막으로 내산화성을 확보하지만 사용 온도가 높아질수록 보호성이 저하되는 한계를 갖는다. 반면 Al이 첨가된 FeCrAl 합금은 고온 산화 시 α-Al_2O_3를 주체로 하는 스케일을 형성하여, 1100 ℃를 초과하는 분위기에서 가장 긴 사용 수명을 나타내는 금속 소재로 알려져 있다. 다만 FeCrAl 합금은 ferrite 기지의 특성상 기계적 강도가 낮다는 한계를 갖는다. Mo는 이를 보완할 수 있는 고용강화 원소이지만, 21 wt% Cr 조성에서 내산화성을 저하시키는 것으로 보고되어 적정 첨가량의 검토가 요구된다. 본 연구에서는 고온 강도와 상 안정성을 동시에 만족하는 FeCrAl계 내열 합금의 최적 Mo 함량을 도출하고자 하였다. 조성 설계의 근거를 확보하기 위해 Thermo-Calc와 TCFE 데이터베이스를 이용한 평형 열역학 계산이 선행되었으며, Mo 함량에 따른 상태도와 온도별 평형 상 분율이 계산되었다. 잔류 산소의 영향을 평가하기 위해 산소를 계에 포함한 계산 또한 별도로 수행되었다. 이를 바탕으로 Fe-21Cr-5.8Al-xMo (x = 0, 1, 3, 5, 7 wt%) 조성의 잉곳 5종을 진공 아크 용해로 제조하였다. 제조된 합금은 as-cast 상태에서 SEM / EDS 및 EPMA를 통해 미세조직과 개재물이 분석되었고, XRD Rietveld 정련을 통해 상 분율과 격자상수가 도출되었다. 고온 압축 특성은 Gleeble을 이용하여 1000 ℃, 1×10^{-1} s^{-1} 및 1200 ℃, 1×10^{-3} s^{-1} 조건에서 평가되었으며, 0.2 % offset 항복강도와 유동 곡선 거동을 비교하였다. 열역학 계산 결과와 고온 압축 특성을 종합하여 FeCrAl계 내열 합금에서 Mo 첨가가 갖는 고용강화 효과와 상 안정성 측면의 제약을 함께 검토하였다.

[P14-4]
Microstructure and Mechanical Properties of UNS S45000 Precipitation-Hardening Stainless Steel Compared with UNS S17400 and S13800: Tae Hyeon Hwang, Gang Ho Lee(KITECH, Pukyong Univ.), Gwang Joo Jang, Byung Koo Kim(KITECH), Sang Hoon Noh(Pukyong Univ.), Byung Jun Kim*(KITECH)
Keywords: 석출경화형 스테인리스강, 금속

Precipitation-hardening (PH) stainless steels are widely used for structural components requiring a combination of high strength, toughness, and corrosion resistance. Their mechanical properties are strongly influenced by alloy composition, heat-treatment condition, martensitic microstructure, and the evolution of strengthening precipitates. In this study, the microstructure and mechanical properties of UNS S45000 PH stainless steel were investigated in comparison with UNS S17400 and S13800 steels. Each alloy was evaluated under its respective aging conditions, and the relationships among heat treatment, microstructural characteristics, and mechanical response were systematically examined. Optical microscopy, X-ray diffraction, hardness and mechanical testing, and scanning transmission electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (STEM-EDS) were employed for characterization. The investigated PH stainless steels exhibited predominantly martensitic microstructures, while their mechanical responses varied depending on alloy composition and heat-treatment condition. Hardness initially increased during aging and gradually decreased with prolonged thermal exposure, indicating changes in precipitation-strengthening behavior. STEM-EDS observations further revealed distinct nanoscale precipitation characteristics among the three alloys. S45000 contained numerous fine Cu-rich precipitates relatively uniformly distributed within the lath martensitic matrix, together with localized Ni enrichment. Similar Cu-rich precipitation was observed in S17400, whereas S13800 exhibited fine nanoscale features associated with localized Ni enrichment. These differences in microstructure and precipitation characteristics were accompanied by distinct mechanical responses. Compared with the reference PH stainless steels, S45000 exhibited a favorable balance of strength, ductility, and impact toughness and retained a high level of strength at elevated temperature. The combination of the lath martensitic matrix and finely dispersed nanoscale precipitates is considered to contribute to the favorable mechanical performance of S45000. Overall, the comparative results demonstrate that the mechanical properties of PH stainless steels are closely associated with alloy composition, heat-treatment condition, martensitic microstructure, and precipitation characteristics.

[P14-5]

Al 첨가에 따른 As-Quenched AISI 4340 강의 밀도 저감 및 인장 변형 거동 분석: 박주현, 이승희, 심아령(동아대학교), 김은아(현대제철), 강신곤*(동아대학교)

Keywords: AISI 4340계 마르텐사이트강, Al 첨가, 밀도 저감, 비항복강도, 인장 변형 거동

AISI 4340강은 Ni-Cr-Mo계 저합금 마르텐사이트강으로서 우수한 경화능과 고강도 특성을 바탕으로 항공, 국방 및 수송 분야의 고강도 구조부품에 널리 적용되고 있다. Al은 Fe 대비 낮은 원자량으로 인해 밀도 저감 효과를 기대할 수 있는 원소이나, 이러한 밀도 저감이 중량 대비 강도 특성의 저하 없이 달성될 수 있는지와 Al 첨가가 파단 이전 인장 변형 거동에 미치는 영향은 충분히 규명되지 않았다. 이에 본 연구에서는 0, 1, 2 wt.% Al을 함유한 4340계 합금을 925 ℃에서 오스테나이트화 후 수냉 처리하여 as-quenched 상태를 확보하고, 측정된 밀도와 0.2% 오프셋 항복강도(0.2% offset yield strength)를 이용하여 비항복강도(specific yield strength)를 평가하였다. Al 첨가에 따라 밀도는 7.714에서 7.533 g/cm^{3}로 약 2.3% 감소하였으며, prior-austenite grain size(PAGS)는 증가하였다. 그 결과 비항복강도는 193–197 MPa·cm^3/g의 좁은 범위에서 유지되어, 뚜렷한 저하 없이 밀도 저감이 가능함을 확인하였다. EBSD로 평가한 방위차 및 국부방위차(kernel average misorientation, KAM) 분포는 세 합금에서 유사하게 나타났다. 인장시험 결과, Al 함량 증가에 따라 평균 균일연신율과 총연신율이 증가하였으며, 진응력-진변형률 곡선과 가공경화율에 Considère 기준을 적용한 결과에서도 Al 첨가에 따른 파단 이전 인장 변형 거동의 차이가 확인되었다. 다만 잔류 오스테나이트가 검출되지 않았고 EBSD 방위차 분포에서도 뚜렷한 차이가 없어, TRIP이나 결정립 미세화 등 기존에 알려진 연성화 기구만으로는 이러한 연신율 증가를 온전히 설명하기 어려운 것으로 판단되었다. 이상의 결과로부터, Al 첨가는 as-quenched 4340계 마르텐사이트강에서 비항복강도를 유지하면서 밀도를 저감하고 동시에 파단 이전 인장 변형 거동을 변화시키는 조성 기반 경량화 방안임을 확인할 수 있었다.

[P14-6]

해상풍력용 환경 특화 볼트강의 미세조직과 수소취성의 상관관계: 최수환, 오동규(서울과학기술대학교 신소재공학과), 이승민, 정재훈(세아베스틸 기술연구소), 황병철*(서울과학기술대학교 신소재공학과)

Keywords: Tempered martensitic steel, Hydrogen embrittlement, Slow strain-rate test (SSRT), Relative notch tensile strength (RNTS)

최근 플랜트, 교량, 풍력발전 설비 등 대형 구조물의 적용이 확대됨에 따라 대형 볼트의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 대형 볼트는 높은 강도와 신뢰성이 요구되지만 제조 공정 및 사용 환경에서 유입된 수소에 의해 수소취성이 발생할 수 있어 수소취성 저항성 확보가 필수적이다. 이를 위해서는 강재 내부에서 수소의 이동을 억제하고 안정적으로 포획할 수 있는 비가역적 수소 트랩 사이트 (irreversible trapsite)를 확보하는 것이 중요하다. 특히 Nb, Ti, V와 같은 미량합금원소는 탄질화물 형성을 통해 강한 수소 트랩 사이트를 제공하고, 동시에 결정립 미세화를 통해 수소 확산 거동을 제어함으로써 수소취성 저항성을 향상시키는 것으로 알려져 있다. 그러나 결정립 미세화는 오스테나이트 결정립계 분율을 증가시켜 페라이트 및 베이나이트 변태를 촉진하므로 경화능을 저하시킬 수 있다. 직경이 큰 대형 볼트는 표면부와 중심부의 냉각속도 차이가 크기 때문에 경화능이 저하될 경우 중심부에서 충분한 마르텐사이트 조직이 형성되지 않아 기계적 특성이 저하될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 대형 볼트 중심부를 대상으로 미세조직의 변화가 수소취성 저항성에 미치는 영향을 분석하였다. 열역학 계산 프로그램과 주사전자현미경, 후방산란전자회절 (electron backscatter diffraction, EBSD)를 이용하여 미세조직 및 석출물의 분포를 분석하였다. 또한 수소 주입 조건에서 저속변형률시험 (slow strain-rate test, SSRT) 와 열탈착 분석 (thermal desorption analysis, TDA)을 수행하여 미세조직과 수소취성 거동 간의 상관관계를 분석하였다.

[P14-7]

SA372 강의 열처리 조건에 따른 기계적 특성 및 미세조직 변화: 박종건, 이정찬(한국생산기술연구원, 고려대학교), 김동회*(고려대학교), 이민수, 박창수*(한국생산기술연구원)

Keywords: SA372, 열처리, 기계적 특성, 미세조직, Tempered martensite, Prior austenite grain

최근 친환경 에너지원으로서 수소의 활용에 대한 관심이 증가함에 따라, 수소의 안정적인 저장 및 이송을 위한 관련 기술의 중요성이 높아지고 있다. 특히 고압 및 저온 환경에서 사용되는 압력용기 소재는 우수한 강도와 인성뿐만 아니라 수소취성에 대한 높은 저항성이 요구된다. SA372 강은 높은 강도와 우수한 인성을 갖는 압력용기용 저합금강으로, 수소 환경 적용을 위해 열처리를 통한 기계적 특성과 미세조직의 최적화가 필요하다. 본 연구에서는 SA372 강에 다양한 열처리 조건을 적용하고, 열처리 조건에 따른 기계적 특성과 미세조직 변화를 분석하였다. 인장시험을 통해 항복강도, 인장강도 및 연신율을 평가하였으며, SEM과 EBSD 분석을 통해 열처리에 따른 prior austenite grain(PAG) 및 martensitic substructure의 변화를 비교하였다. 시험 결과, 반복 열처리에 따라 인장강도는 소폭 감소하는 경향을 보였으나, EBSD 분석 결과 일부 조건에서 Prior Austenite Grain(PAG)크기가 감소하는 효과가 확인되었다. 또한, 열처리 조건에 따라 Kernel Average Misorientation(KAM)과 Low-Angle Grain Boundary(LAGB) 및 High-Angle Grain Boundary(HAGB) 분포에서도 변화가 관찰되어, 반복 열처리가 PAG뿐만 아니라 Martensitic Substructure에도 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 이러한 미세조직 변화는 강도 및 연성뿐만 아니라 수소취성 저항성에도 영향을 미칠 수 있는 주요 인자로 판단된다. 향후 열처리 조건별 수소취성 평가를 추가적으로 수행하여 기계적 특성 및 미세조직 변화와 수소취성 거동 간의 상관관계를 분석하고, 이를 바탕으로 압력용기용 SA372 강의 최적 열처리 조건을 도출하고자 한다.

[P14-8]

Cr 함량에 따른 API 5CT OCTG강의 HIC 및 수소취성 특성: 성효진, 정민섭(서울과학기술대학교 신소재공학과), 안규백(일진제강), 서환수(세아베스틸 기술연구소), 황병철*(서울과학기술대학교 신소재공학과)

Keywords: Oil country tubular goods (OCTG), Microstructure, Hydrogen embrittlement, Hydrogen Induced Cracking (HIC), Slow strain-rate test (SSRT)

최근 화석연료 자원의 고갈로 고압 및 고온의 초심도 시추환경으로 확대됨에 따라, OCTG (Oil Country Tubular Goods)강은 우수한 기계적 특성과 내식성뿐만 아니라 sour 환경에서의 우수한 내수소취성을 동시에 확보해야 한다. 이러한 환경에서는 H_2S에 의한 부식 과정에서 발생한 수소가 강재 내부로 침투하여 수소취성 및 수소유기균열(HIC, Hydrogen Induced Cracking)을 유발하며, MnS와 같은 개재물 및 미세조직 내 결함은 수소의 흡착과 균열 개시를 촉진하여 구조적 안정성을 저하시킬 수 있다. 이에 따라 OCTG강에서는 내식성 향상을 위해 Cr 함량을 증가시키는 연구가 활발히 이루어지고 있으나, Cr의 증가는 탄화물 석출 거동과 미세조직 변화를 유도하여 수소의 확산 및 트랩 거동에 영향을 미칠 수 있다. 이는 강재의 HIC 발생 거동에 영향을 미쳐 내수소취성을 저하시킬 수 있다. 또한 Cr 증가에 따른 과도한 탄화물 형성을 억제하기 위해 C 함량을 함께 제어하므로, Cr과 C 함량의 상호 연계는 강재의 미세조직과 내수소취성을 결정하는 주요 인자로 작용한다. 그러나 Cr 및 C 함량 변화에 따른 탄화물 석출 거동, 미세조직 및 수소취성의 상관관계는 아직 명확히 규명되지 않았다. 본 연구에서는 C 및 Cr 함량이 서로 다른 API 5CT L80-1, 3Cr 및 13Cr강을 대상으로 HIC 분석과 저속 변형률 시험(Slow Strain Rate Test, SSRT)을 수행하여 수소취성을 평가하였으며, 열탈착 거동 분석(Thermal Desorption Analysis, TDA)을 통해 수소 트랩 거동을 분석하였다. 또한 Thermo-Calc를 활용한 Cr계 탄화물 석출 거동 예측과 SEM 미세조직 분석을 통해 탄화물, 미세조직 및 수소 트랩 특성이 HIC, SSRT 및 TDA 결과에 미치는 영향을 고찰하였다.

[P14-9]

Effect of Annealing on Microstructure and Mechanical Properties of Nb- and V-Microalloyed High-Mn Austenitic Steels: Gang Ho Lee, Tae Hyeon Hwang(Korea Institute of Industrial Technology, Pukyong National University), Byoungkoo Kim(Korea Institute of Industrial Technology), GwangJoo Jang(Korea Institute of Industrial Technology, Pukyong National University), Sanghoon Noh(Pukyong National University), Byung Jun Kim*(Korea Institute of Industrial Technology)

Keywords: High-Mn austenitic steel, Nb microalloying, V microalloying, Annealing, Microstructure, Mechanical properties

The annealing-dependent microstructural evolution and mechanical properties of Nb- and V-microalloyed high-Mn austenitic steels were comparatively investigated using a microalloy-free alloy as a reference. The alloys were annealed at 850, 950, and 1050 °C for 2 h, followed by water quenching. Changes in the γ-austenitic matrix and microalloy-rich particle states were characterized by optical microscopy and scanning transmission electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (STEM–EDS), together with quantitative particle analysis and thermodynamic calculations. Optical microscopy revealed alloy-dependent changes in grain size and morphology with annealing, including a heterogeneous structure in the reference alloy at 850 °C, a minimum mean grain size in the Nb-microalloyed steel at 850 °C, and progressively more uniform grain structures in the V-microalloyed steel. In the Nb-microalloyed steel, coarse processing-inherited Nb-rich particles persisted in the STEM-characterized conditions, while annealing at 850 °C additionally produced a fine population with a mean equivalent circular diameter of 9.57 ± 3.94 nm. In contrast, a discrete V-rich particle population was resolved only at 850 °C among the STEM-characterized conditions, with 80.83% of the 193 measured particles distributed within the 10–100 nm range. Thermodynamic calculations predicted Nb-rich MC-type carbide stability throughout 850–1050 °C, whereas V-rich MC-type carbide was predicted only at 850 °C among the investigated annealing temperatures. These differences in matrix and particle evolution were reflected in the mechanical response. Both microalloyed steels exhibited their highest

mean hardness and yield strength at 850 °C, reaching 297 HV0.5 and 354 MPa for the Nb-microalloyed steel and 242 HV0.5 and 390 MPa for the V-microalloyed steel, respectively, while ultimate tensile strength varied comparatively little. The results demonstrate that annealing temperature produces distinct changes in both the γ-austenitic matrix and microalloy-rich particle states, and that their combined evolution is closely associated with the room-temperature mechanical properties of Nb- and V-microalloyed high-Mn austenitic steels.

[P14-10]

초고경도 마르텐사이트강의 미세조직 및 저온 충격특성에 대한 Nb의 영향: 박건우(울산과학기술원 신소재공학과), 김용우, 장우길, 고성웅(포스코 기술연구원 제품연구소), 박성수(울산과학기술원 신소재공학과), 전종배*(동아대학교 신소재공학과)

Keywords: Ultra-high-hardness martensitic steel, Nb content, Instrumented Charpy impact test, Low-temperature impact toughness, Quantitative microstructural features

초고경도 마르텐사이트강은 높은 경도와 더불어 저온 환경에서 우수한 인성을 동시에 확보하기 위한 고부가가치 내마모 강재로 개발되고 있다. 저온 환경에서 우수한 충격인성을 확보하기 위해서는 마르텐사이트의 미세조직학적 특성을 제어하여 균열의 개시와 전파를 효과적으로 억제하는 것이 중요하다. 마르텐사이트강의 균열 저항성을 향상시키기 위해서는 martensite packet 및 block 크기를 감소시켜 균열의 연속적인 전파를 제한하고, 고각입계 분율을 증가시켜 균열 전파 경로의 굴절을 유도할 수 있다. 특히 Nb는 탄·질화물의 형성과 결정립계 이동 억제를 통해 오스테나이트 결정립 성장 및 마르텐사이트 상변태에 영향을 미치는 주요 합금 원소이다. 이러한 미세조직학적 특성은 합금의 화학 조성에 따라 달라지기 때문에 Nb 함량에 따른 미세조직의 변화와 저온 충격인성 간의 관계를 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 Nb 함량이 다른 초고경도 마르텐사이트강을 제조 Nb 함량에 따른 미세조직학적 특성과 저온 충격특성의 변화를 분석하였다. EBSD 분석을 통해 Nb 함량 변화에 따른 결정립 크기, 고각입계 분율 등의 미세조직학적 특성을 정량적으로 분석하였다. 또한 저온에서 계장화 Charpy 충격시험을 수행하여 총 충격흡수에너지를 측정하고, 이를 균열 개시에너지와 균열 전진에너지로 구분하여 평가하였다. 이후 EBSD 분석을 통해 정량화한 미세조직학적 특성과 계장화 충격시험 결과를 대조하여 Nb 함량에 따른 미세조직학적 특성과 저온 충격인성 간의 상관관계를 분석하였으며, 충격에너지에 영향을 미치는 추가적인 미세조직학적 요인을 함께 검토하였다.

[P14-11]

강종 및 템퍼링 온도에 따른 상용 Cr-Mo계 저합금강의 수소취성 비교: 김철민(서울과학기술대학교 신소재공학과, 세아베스틸 기술연구소), 김상규, 황병철*(서울과학기술대학교 신소재공학과)

Keywords: Low-alloy steel, Slow strain-rate test (SSRT), Hydrogen embrittlement, Tempering, Microstructure

최근 탄소 중립 및 전 과정평가(LCA) 확산에 따라 자동차, 조선 등 주요 산업계에서 부품 경량화 및 고수명화를 위한 기계구조용 Cr-Mo계 저합금강의 고강도화 수요가 급격히 증가하고 있다. 그러나 강재의 고강도화는 수소취성 감수성을 증가시켜 구조물의 신뢰성을 저해하는 주요 원인이 된다. 이에 본 연구에서는 상용 Cr-Mo계 저합금강 3종 (AISI 4140, 4340, 4330VM)을 대상으로 템퍼링 온도에 따른 미세조직 및 기계적 물성의 변화를 관찰하고, 저속 변형률 시험 (Slow strain-rate test, SSRT) 및 저온(-40 °C) 충격 시험을 통해 상용 강종별 템퍼링 조건에 따른 강도, 저온 인성, 수소취성 저항성 (RNTS)의 영향성을 고찰하였다. 이를 통해 고강도 Cr-Mo강의 강도, 인성, 내수소취성 균형을 위한 강재 및 열처리 조건을 제시하고자 한다.

[P14-12]

Hydrogen-Assisted Deformation and Fracture Behavior of Hot-Forged High-Mn Austenitic Steel at Room and Cryogenic Temperatures: GwangJoo Jang, Tae Hyeon Hwang, Gang Ho Lee(Korea Institute of Industrial Technology, Pukyong National University), Byoungkoo Kim(Korea Institute of Industrial Technology), Sanghoon Noh(Pukyong National University), Byung Jun Kim*(Korea Institute of Industrial Technology)

Keywords: High-Mn austenitic steel; Hydrogen-assisted degradation; Low-strain-rate tensile test; Cryogenic deformation; Fracture behavior; Secondary cracking

High-Mn austenitic steels have attracted increasing attention as candidate structural materials for cryogenic and hydrogen-related applications because of their high strain-hardening capacity, excellent ductility, and superior low-temperature toughness. However, their mechanical reliability under hydrogen-containing environments can be affected by temperature, strain rate, hydrogen uptake, and deformation-induced microstructural evolution. In this study, the hydrogen-assisted deformation and fracture behavior of hot-forged 24 wt.% Mn austenitic steel was investigated at room temperature and −150 °C using low-strain-rate tensile testing. Tensile tests were conducted at nominal strain rates of 10^{-3} and 10^{-4} s^{-1} with and without hydrogen pre-charging, and the resulting mechanical responses and fracture morphologies were systematically compared. Hydrogen pre-charging caused a clear reduction in tensile ductility, while its influence on ultimate tensile strength was relatively limited. The degree of ductility degradation depended strongly on both test temperature and nominal strain rate. At room temperature, hydrogen-induced ductility loss became more pronounced at the lower strain rate, indicating that slow deformation enhanced hydrogen-assisted damage development. At −150 °C, the tensile response was additionally influenced by cryogenic deformation behavior, including enhanced strain hardening and localized deformation. Fractographic observations revealed that hydrogen charging promoted a transition from predominantly ductile microvoid coalescence to mixed fracture features involving flattened dimples, quasi-cleavage-like regions, and secondary cracking. These damage features

became more evident under lower strain-rate and cryogenic conditions. The results suggest that hydrogen-assisted fracture in hot-forged high-Mn austenitic steel is governed by the combined effects of hydrogen charging, strain rate, temperature-dependent deformation behavior, and localized damage development. The observed fracture characteristics are consistent with hydrogen-enhanced localized plasticity at room temperature and transformation- or localization-assisted cracking under cryogenic deformation. This study provides useful insight into the hydrogen compatibility of high-Mn austenitic steels for cryogenic and hydrogen-energy infrastructure.

P15 : 가공-열처리
Room 1층 전시홀, 10월 29일

[P15-1]
상 및 미세조직 제어에 따른 Cu-Al 합금의 광학적·기계적 특성 변화: 김현영, 조가은, 장성문, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범*(세종대학교)
Keywords: Cu-Al, 과포화고용체, 고용강화, 광학적 특성, 기계적 특성

구리 합금은 우수한 전기·열전도성과 함께 합금 원소 첨가에 따른 전자구조 변화로 다양한 색상 구현이 가능하여 기능성 외장 소재로 활용될 가능성이 높다. 그러나 합금 원소의 함량이 증가하면 금속간 화합물이 형성되어 가공성이 저하될 수 있으므로 단상 영역을 확보하면서 기계적 특성을 향상시키는 합금 설계가 요구된다. Al은 Cu 내 높은 고용도를 가지면서도 비교적 큰 원자 반경 차이로 α-Cu 격자에 왜곡을 유발할 수 있어 단상 영역 확보와 고용강화를 동시에 기대할 수 있는 합금 원소로 선정하였다. 기존 Cu계 합금에서는 합금 원소 함량 증가에 따라 색좌표 b^* 값이 감소하는 경향이 보고된 반면, Cu-Al 합금에서는 Al 함량 증가에 따라 b^*값이 증가하는 특성이 나타난다. 이에 $Cu_{100-x}Al_x$(x = 3-19at. %) 합금을 대상으로 조성 및 용체화 처리에 따른 상 구성, 미세조직 변화가 광학적·기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. Cu-Al 상태도를 기반으로 XRD 및 미세조직 분석을 수행한 결과, $Cu_{100-x}Al_x$(x=3-13at. %) 합금은 단상 α-Cu 고용체, $Cu_{100-x}Al_x$(x=15-19at. %) 합금은 α-Cu + γ_2-Cu_9Al_4 이상으로 구분되었다. 이상 조성의 합금은 용체화 처리 후 급랭을 실시하여 과포화 단상 α-Cu 고용체를 형성시켰다. CIE $L^*a^*b^*$ 색 좌표 분석 결과, Al 첨가량 증가에 따라 a^* 값이 감소, b^* 값이 증가하는 경향이 확인되었으며 동일 조성에서 용체화 처리 전후의 색차는 $\Delta E \leq 1.6$으로 제한적으로 나타났다. 반면, 비커스 경도는 상 구성 및 미세조직에 크게 의존하였다. 경도는 15at. % Al까지 조성 증가에 비례하여 선형적으로 상승하였으나 17at. % Al 이후 γ_2상의 형성과 함께 경도가 최대 33.6% 증가하였다. 이러한 결과는 Cu-Al 합금에서 조성에 의해 색상을 제어하는 동시에, 동일 조성에서는 용체화 처리를 통한 상 및 미세조직 제어를 이용하여 색상 변화를 최소화하면서 기계적 특성을 조절할 수 있음을 시사한다.

[P15-2] [Canceled]
V 함량에 따른 MC 탄화물 특성 변화가 고속도강의 뜨임연화거동에 미치는 영향: 최재영(영남대학교 신소재공학과), 이준오, 박노근*(영남대학교 신소재공학부)

[P15-3]
DED로 제조된 Inconel 625 합금의 열처리에 따른 미세조직 진화 및 강화 거동: 김준혁, 한재연(국립창원대학교), 권영삼(CetaTech), 박정효, 김대웅, 김규식(국방과학연구소 극한금속재료팀), 홍현욱*(국립창원대학교)
Keywords: Inconel 625, Directed Energy Deposition(DED), gamma double prime, Heat treatment, Tensile properties

Inconel 625 초내열 합금은 항공, 방산 등 다양한 산업 분야에서 폭넓게 활용되는 소재이다. 특히 DED(Directed Energy Deposition) 공정과 같은 적층 제조 기술이 주목받고 있으나, SLM(Selective Laser Melting) 공정에 비해 성형체의 미세조직 제어 및 기계적 특성 향상을 위한 체계적인 열처리 조건은 아직 확립되지 않았다. 이에 따라 다양한 열처리 조건과 미세조직–물성 상관성에 대한 심층적인 연구가 요구된다. 본 연구에서는 DED 기반으로 제조된 Inconel 625 합금을 대상으로 후열처리 조건에 따른 미세조직 변화 거동과 상온 인장 특성을 고찰하였다. 강도 향상을 위한 γ″ 상 석출을 유도하고자 direct aging(DA) 및 solution + aging(SA) 열처리를 수행하였으며 aging의 경우 200시간까지 진행하였다. As-built 합금은 적층 방향으로 성장한 columnar 결정립과 뚜렷한 수지상(dendritic) 조직을 보였으며, inter-dendritic 영역에서 Nb 및 Mo가 국부적으로 농축된 미세 석출물이 관찰되었다. DA 열처리에서는 dendritic 조직이 유지된 상태에서 SGB(Solidification Grain Boundary)를 따라 Cr, Mo-rich carbide가 형성되었고, 2시간 이후부터 γ″ 상의 초기 석출이 확인되었다. 이후 시간이 경과함에 따라 γ″ 상의 분율이 증가하고 침상 형태로 조대화 되었으며, 이로 인해 경도는 상승하다가 100시간에서 최대값(290 Hv)을 나타낸 뒤 감소하는 경향을 보였다. SA 열처리에서는 일부 재결정 조직이 확인되었고, 동일한 aging 시간 조건에서 DA 대비 더 높은 경도가 측정되었으며, 200시간 조건에서 최대 경도(305Hv)에 도달하였다. 이는 solution 이후 균일하게 원소가 분포되며 이후 aging 열처리시 미세하고 균일한 γ″ 상 석출에 기인한 것으로 판단된다. 인장 시험 결과, as-built 대비 후열처리 조건에서 모두 강도 향상이 나타났으며, 이는 γ″ 상의 석출 강화 효과에 기인한 것으로 판단된다. 이상의 결과를 바탕으로, 강도와 인성을 동시에 확보할 수 있는 최적의 열처리 설계 방안에 대해 논의하였다.

[P15-4]
열유동 해석 및 TTT 곡선을 활용한 볼트 소재의 열처리 조건 최적화: 강규병(한국생산기술연구원, 고려대학교), 최병철, 권은성, 강동훈(한국생산기술연구원), 김동회*(고려대학교), 나태욱*(한국생산기술연구원)
Keywords: 볼트강, 열처리, TTT curve

대형 볼트의 열처리과정에서는 소재의 형상 및 단면 크기에 따라 표면부와 중심부의 냉각 속도에 차이가 발생하며, 이러한 냉각속도 차이는 미세조직 형성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 특성을 확보하기 위해서는 열처리 시 볼트 내부 위치별 냉각 거동을 고려한 열처리 조건의 설계가 필요하다. 본 연구에서는 볼트 소재의 열처리 조건을 최적화하기 위하여 열유동 해석, Thermo-calc 기

반 TTT curve을 연계하여 분석하였다. 볼트 형상에 대한 시간별 온도 변화를 전산 해석하여 표면부, 3/4R, 1/2R 및 중심부의 냉각 거동을 비교하였으며, 대상 소재의 화학조성을 기반으로 Thermo-Calc를 이용하여 TTT 곡선을 계산하였다. 이후 각 위치에서 도출된 냉각곡선을 TTT 곡선과 연계하여 열처리 과정 중 상변태 거동을 예측하였다. 또한 실제 열처리된 볼트 소재의 위치별 OM 미세조직을 관찰하고, 전산 해석 및 TTT 곡선으로부터 예측된 상변태 거동과 비교하였다. 분석 결과, 볼트의 표면부와 중심부에서 냉각 거동의 차이가 나타났으며, 이에 따라 위치별 미세조직 형성 거동에도 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 열처리 후 미세조직과 열유동 해석 결과를 비교함으로써 위치별 냉각조건과 상변태 거동의 상관관계를 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 볼트 형상과 위치별 냉각 속도 차이를 고려한 열처리 조건을 도출하였으며, 전산 열유동 해석과 TTT 곡선 및 미세조직 분석을 연계한 방법을 대형 볼트 소재의 열처리 공정 설계 및 최적화 조건을 도출할 수 있음을 확인하였다.

[P15-5]

자기냉각 소재 La-Fe-Mn-Si 합금의 수소 취성 경도 국부 물성 평가: 김지민, 배재한(한국재료연구원), 김민직(한국재료연구원, 포항공과대학교), 양우석, 정국채, 이광석*, 신다슬*(한국재료연구원)

Keywords: 자기냉각 소재, 자기 열량 효과, La-Fe-Mn-Si 합금, 수소화, 수소 취성

환경 규제 강화와 탄소 중립 실현에 따라 냉매 가스를 사용하는 기존 가스 압축식 냉각 시스템을 대체할 수 있는 차세대 친환경 냉각 기술로 자기냉각 기술이 주목받고 있으며, 자기 열량 효과(Magneticaloric Effect)를 이용하는 자기냉각 기술은 냉매 가스를 사용하지 않아 환경친화적이며 에너지 효율이 높아 차세대 냉각 기술로 주목받고 있다. $NaZn_{13}$형 결정구조를 갖는 $La(Fe, Si)_{13}$계 합금은 1차 자기 상전이에 의한 큰 자기 엔트로피 변화와 가진 실용적인 자기냉각 소재이다. 그러나 1차 상전이 과정에서는 열 및 자기 히스테리시스가 발생하여 냉각 효율과 반복 구동 특성을 저하시킬 수 있다. Mn 치환 또는 수소화는 1차 상전이 과정에서 상당한 단열 온도 변화(ΔT_{ad})와 급격한 부피감소 ($\Delta V/V$)를 나타내며, 순회전자 메타자성 전이(IEM)와 자기체적 결합을 조절하여 히스테리시스 특성을 개선할 수 있으며, 특히 수소화 공정은 1:13상의 결정격자를 팽창시켜 큐리 온도(Curie Temperature)를 상온 부근으로 조절할 수 있다. 수소화 열처리 공정은 자기냉각 특성 향상에 필수적인 공정인 동시에 수소 침입에 따른 격자 팽창과 국부 변형은 기계적 물성 저하와 수소 취성을 유발하여 기계적 안정성을 저하시킬 수 있어, 자기적 특성과 기계적 안정성을 함께 고려한 수소화의 최적화 조건과 추가적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 열처리 및 수소화 조건에 따른 La-Fe-Mn-Si계 자기냉각 합금의 미세 조직, 기계적 및 자기적 특성 변화를 분석하고, 수소화 조건과 수소 취성 간의 상관 관계를 분석한다. $La_1Fe_{11.7}Si_{1.3}$ 및 $La_1Fe_{11.45}Mn_{0.25}Si_{1.3}$계 합금과 La 과잉 조성의 $La_{1.1}Fe_{11.45}Mn_{0.25}Si_{1.3}$ 합금을 진공 플라즈마 용해법(Vacuum Plasma Melting, VPM)으로 제조한 후 1100 ℃에서 열처리한다. 열처리 된 합금들은 서로 다른 수소 농도의 혼합가스와 순수 수소 분위기에서 0.1 MPa(1 bar) 및 50-700 ℃의 조건으로 수소화 열처리를 진행한다. 수소 분위기와 수소화 온도에 따른 기계적 안정성 및 균열 발생 거동을 평가하기 위해 비커스 경도 시험 및 나노압입시험을 수행하고, 주 상인 NaZn13형 1:13상과 잔류 2차상의 국부 경도 및 탄성 계수를 정량적으로 분석한다. OM 및 SEM 분석을 통해 수소화 전 후의 상 분포, 미세 조직 및 균열 형성 거동을 관찰한 후 이를 평균 기계적 특성과 연계하여 분석한다. 최종적으로 수소화 분위기와 온도, 미세 조직, 기계적 특성 및 자기적 특성 간의 상관관계를 바탕으로 La-Fe-Mn-Si계 합금의 수소 취성 거동을 분석하고, 자기 열량 성능 및 기계적 안정성을 동시에 확보할 수 있는 적절한 수소 안정성 분위기 조건을 도출하고자 한다.

[P15-6]

AISI 316L 저온진공침탄에서 질소 캐리어 가스 적용을 통한 수소 역할 연구: 김현진(한국생산기술연구원, 부산대학교), 김준호*(한국생산기술연구원)

Keywords: 금속, 열처리, 오스테나이트계 스테인리스강, 표면처리, 침탄

오스테나이트계 스테인리스강은 우수한 내식성을 지니고 있으나 상대적으로 낮은 항복강도와 내구성을 극복하기 위해 저온 열화학 표면경화공정을 적용한다. 해당 공정은 예민화 온도 영역대 이하에서 진행되어 모재의 내식성 저하 없이 표면을 경화시킬 수 있다. 다양한 저온 열화학 표면경화공정 중 아세틸렌(C_2H_2)을 이용한 저온진공침탄 연구에서는 일반적으로 수소를 캐리어 가스로 사용하며, 수소 라디칼이 침탄 반응에 도움을 주는 것으로 알려져 있다. 하지만 일부 연구에서는 수소를 높은 유량으로 충분히 투입하더라도 아세틸렌의 비율이 월등히 높을 때 불균일한 경화층이 형성되는 결과를 보였으며 수소 라디칼의 역할에 대한 의문을 남겼다. 따라서 본 연구에서는 높은 아세틸렌 비율에서 형성된 불균일한 경화층이 수소 결핍에 의한 라디칼 부족 현상인지, 반대로 과도한 아세틸렌 공급으로 인한 현상인지 알아보고자 하였다. 본 연구에서는 AISI 316L의 저온진공침탄을 수행하기 위해 반응가스로 아세틸렌, 캐리어 가스로 질소를 사용하였다. 공정 온도와 압력은 각각 450 ℃, 4 mbar로 고정하였으며, 아세틸렌 분율(C_2H_2/N_2 ratio, R)을 각각 0.05, 0.1, 0.2, 5.0으로 달리하였고 공정을 15시간에서 30시간까지 실시하였다. 광학현미경(OM)을 통해 단면 미세조직을 관찰하고 마이크로 비커스 경도기로 표면경도를 측정하였으며, XRD 분석으로 결정구조 및 상 변화를 확인하였으며 이 결과로부터 격자상수 및 미세변형률을 산출하였다. 그리고 경화층의 상과 탄화물 석출 거동을 확인하기 위해 EBSD phase mapping을 실시하였다. 연구 결과, 지금까지 연구된 결과와 상이하게 캐리어 가스로 질소만 주입하여도 확장된 오스테나이트(Expanded austenite)가 형성되었으며, 저온진공침탄에서 수소의 라디칼화가 필수 조건이 아님을 확인하였다. 저온진공침탄 15시간까지는 모든 조건에서 탄화물 없이 단일 확장된 오스테나이트만 형성되었으나, 30시간 시에는 아세틸렌 분율에 따라 상분해 거동이 뚜렷하게 갈렸다. 최저 분율(R 0.05)에서는 30시간 후에도 높은 격자상수를 가진 확장된 오스테나이트층이 형성되고 표면경도가 지속 상승한 반면, 높은 분율(R 0.2)에서는 탄화물이 석출되고 격자상수 및 표면경도가 감소하는 결과를 보였다. 과잉 공급된 분율(R 5.0)에서는 공정 시간과 관계없이 피막처럼 관찰된 수트(Soot)와 불균일한 침탄층이 형성되었다. 이러한 결과를 토대로 저온진공침탄은 수소 라디칼의 영향보다는 캐리어 가스 희석에 따른 탄소 공급량 제어(Flux)가 중요한 인자임을 확인하였다.

[P15-7]
Construction of thermal-stability maps for nanocrystalline metals with U-shaped dependence of stability on grain size: Hee-Tae Jeong*, Woo Jin Kim*(Hongik Univ.)
Keywords: Nanocrystalline; Microstructure; Thermal stability; Grains; Grain growth

Nanocrystalline metals and alloys are attractive for a broad range of structural and functional applications, but their practical use is often constrained by limited thermal stability. Classical curvature-driven grain-growth theory predicts increasingly rapid coarsening with decreasing grain size, whereas recent experiments on face-centered cubic metals and alloys have revealed a non-monotonic dependence of thermal stability on grain size, in which the temperature associated with rapid grain-growth acceleration initially decreases with grain refinement in the microscale regime but increases again in the nanoscale regime, producing a characteristic U-shaped response. Here, we extend the classical grain-growth law by incorporating junction-mediated kinetic resistance, with triple-junction drag associated with coherent twin boundaries (CTBs) identified as a key contribution. The resulting dimensionless drag parameter is formulated using mechanistically motivated contrasts between grain-boundary and junction mobilities, CTB density, and grain-size-dependent junction statistics. A single calibration parameter obtained from a reference metal is retained across other material systems to evaluate model transferability. Time-resolved mean-field simulations incorporating temperature-dependent kinetic parameters and purity-dependent diffusivities reproduce the experimentally observed U-shaped thermal-stability behavior across face-centered cubic systems and capture the relevant range of the crossover grain size separating the conventional and inverse grain-size regimes. The framework further enables the construction of time–temperature thermal-stability maps that describe stable grain-size domains under different thermal exposures, thereby providing a practical basis for grain-size selection, thermal-processing design, and the definition of service windows for microstructure-sensitive applications.

[P15-8]
열처리에 따른 SUS316L 마이크로 금속섬유의 미세조직 변화에 대한 EBSD 분석: 최상구, 백지웅, 김권후*(국립부경대학교)
Keywords: SUS316L, 금속섬유, 재결정 열처리

SUS316L은 내식성과 내열성, 가공성이 우수한 오스테나이트계 스테인리스강으로 화학 설비, 의료기기 및 반도체 공정용 부품 등에 사용되고 있다. 이를 수 마이크로미터 크기의 금속섬유로 제조하면 비표면적이 증가하기 때문에 소음 흡수재와 다공성 필터, 반도체 공정용 가스필터 소재로 활용할 수 있다. 다만 금속섬유는 제조 및 인발 과정에서 많은 변형을 받기 때문에 섬유 내부에 가공조직이 형성될 수 있다. 따라서 열처리 조건을 설정하기 위해서는 재결정 과정에서 나타나는 미세조직 변화를 확인할 필요가 있다. 본 연구에서는 직경 약 2.5 μm의 SUS316L 금속섬유에 재결정 열처리를 실시하였다. 열처리 전후의 표면은 FE-SEM으로 관찰하였으며, EBSD를 이용하여 결정방위, 결정립 형태와 크기 및 결정립계 분포를 분석하였다. 본 연구의 목적은 재결정 열처리에 따른 SUS316L 금속섬유의 미세조직 변화를 확인하고, 섬유 내부에 균일한 결정립을 형성할 수 있는 열처리 조건을 검토하는 것이다. 이를 통해 정밀 가스필터용 SUS316L 금속섬유의 미세조직 제어에 필요한 기초자료를 확보하고자 하였다.

[P15-9]
열처리에 따른 Hastelloy C22 마이크로 금속 섬유의 결정립 및 결정립계 특성 분석: 박정빈, 장성모, 김권후*(국립부경대학교)
Keywords: Hastelloy C-22, 금속섬유, 열처리, 재결정, EBSD

Hastelloy C-22는 Ni계 초합금으로 산화성 및 환원성 환경에서 우수한 내식성을 나타낸다. 이러한 특성으로 인해 화학 반응기, 저장 탱크 및 탈황 장치와 같이 부식 저항성이 요구되는 산업 분야에 널리 활용되고 있다. 최근에는 금속 소재의 조성뿐만 아니라 형상과 미세조직을 제어하여 새로운 기능성 소재로 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 특히 금속섬유는 넓은 비표면적과 우수한 내열성 및 내식성을 바탕으로 항공기 흡·배기 장치, 엔진 사일렌서, 초경량 메시 및 반도체 공정용 가스필터 등에 적용할 수 있다. 그러나 Hastelloy C-22를 수 마이크로미터 직경의 금속섬유로 제조하고, 열처리에 따른 미세조직 변화를 분석한 연구는 아직 부족하다. 본 연구에서는 Taylor 공법을 이용하여 Hastelloy C-22 합금을 금속섬유 형태로 제조한 후, 인발 공정을 통해 직경 약 5 μm의 금속섬유를 확보하였다. 이후 인발 과정에서 형성된 가공조직과 열처리에 따른 미세조직 변화를 확인하기 위해 EBSD 분석을 실시하였다. 이를 통해 열처리 전후 금속섬유의 결정방위, 결정립 형태, 결정립 크기 및 결정립계 분포를 비교하고자 하였다. 본 연구는 열처리에 따른 Hastelloy C-22 금속섬유의 미세조직 발달 거동을 이해하고, 요구되는 특성에 적합한 열처리 조건을 설정하기 위한 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 한다. 또한 Hastelloy C-22의 우수한 내식성과 금속섬유의 넓은 비표면적을 활용하여 고온 및 부식성 환경에서 사용되는 고성능 필터와 기능성 금속섬유 소재로의 적용 가능성을 검토하고자 한다.

[P15-10]
발전소용 오스테나이트 내식강의 고온 가열시 미세조직 변화: 조용빈(국립한밭대학교), 김진하, 이학민((주)피레타), 김정민*(국립한밭대학교)
Keywords: austenitic stainless steel, microstructure, high-temperature

발전소 고온부의 배관 등에 사용되는 오스테나이트계 내식강은 운영 시간이 증가함에 따라 미세조직의 열화가 발생할 수 있으며, 이를 정확하게 파악하는 것은 수명 예측 측면에서 매우 중요하다. 고온 가열시 시그마상, 탄화물 등이 형성되고 성장하게 되면 인성 저하와 크리프 특성 악화가 예상되며, 본 연구에서는 주로 EBSD 분석을 통해 740 ºC 유지 시간에 따른 미세조직 특성의 변화를 조사하는데 주안점을 두었다. 내식강 원소재의 경우 소량의 Cr탄화물을 포함하고 있는 것으로 생각되나 미세한 크기 등으로 인해 정량적으로 확인하기 어려웠으며, 압출 방향에 평행하게 <112> 방향이 약간 우세한 방향성을 나타냈다. 해당 온도에서 가열시간이 증

가하여도 약 1100시간까지 분율 기준 결정립 크기는 별 차이 없이 유지되었으나 개수 기준 결정립 크기는 조금 감소하였으며, 미세한 상 형성과 연관된 것으로 생각된다. 또한, 어닐링 트윈 경계 및 15o 미만의 소경각계의 비율은 대체로 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 한편, 약 1100시간 가열 이후에도 시그마상이 1% 미만으로 거의 관찰되지 않아 해당 소재의 열적 안정성이 우수한 것을 확인할 수 있었으며, 결정립계에 형성된 미세한 상들은 주로 Cr탄화물인 것으로 사료된다. 일부 시편에서의 시그마상 및 탄화물의 정확한 분석은 TEM을 사용하여 수행되었다.

[P15-11]

불순물 Fe가 포함된 Al-Mg-Si계 합금의 어닐링 조직특성: 조용빈(국립한밭대학교), 신경식((주)세림티앤디), 김정민*(국립한밭대학교)

Keywords: Al-Mg-Si, aluminum, annealing, microstructure

전기 자동차 등 경량화가 특히 중요한 산업 분야에서 알루미늄 합금의 수요가 계속 증가하는 추세이며, 특히 기계적 성질, 내식성, 성형성 등이 전반적으로 우수한 Al-Mg-Si계 합금 부품에 대한 관심이 높아지고 있다. 산업 현장에서는 경제성 등의 이유로 불순물 Fe가 일정량 포함된 Al-Mg-Si 합금이 많이 사용되고 있으며, 따라서 Fe를 포함한 화합물의 형성과 특징을 이해하는 것이 물성 제어에서 중요하다. 또한 소성가공 과정에서는 합금의 성형성을 회복하기 위해 중간 어닐링 공정이 보통 필수적이므로 알루미늄 합금의 미세조직 및 경도 변화에 미치는 영향을 파악하는 것도 중요하다. 본 연구에서는 압출재를 350~500 ºC 어닐링 온도에서 열처리한 미세조직과 미소경도를 분석하였으며, 기존 열간 압출과정에서 재결정이 대부분 완료되었기 때문에 어닐링 과정에서는 회복 및 결정립계 특성의 변화가 주로 일어난 것으로 관찰되었다. 압출 원소재에는 다량의 Fe-화합물이 존재하는 것으로 나타났으나 열처리 온도에 따른 조대 Fe-화합물 특성의 차이는 크지 않았으며, 매우 미세한 석출상의 특성 변화는 있는 것으로 조사되었다. 어닐링 열처리 후의 성형성 및 경도에 미치는 미세조직의 영향은 주로 회복/경계 특성과 미세한 Mg2Si 석출상 특성에 의존하는 것으로 판단된다.

[P15-12]

Effects of thermal processing parameters on the hardness-toughness trade-off in cemented carbide with high-entropy alloy binders: Jeong-Han Lee*(Korea Institute of Industrial Technology)

Keywords: Cemented carbide, High-entropy alloy, Thermomechanical consolidation, Microstructural evolution, Mechanical properties

This study investigates the substitution of conventional binders in tungsten carbide (WC) hardmetals with a Co-Fe-Ni-Mo-V high-entropy alloy (HEA). Four distinct HEA compositions with varying Mo and V atomic ratios (HEA 1 to HEA 4) were synthesized and mixed with WC at 3, 5, and 10 wt.%. The composite powders were prepared via high-energy ball milling and consolidated at temperatures ranging from 1200 ºC to 1500 ºC under a pressure of 60 MPa. X-ray diffraction (XRD) analyses confirmed the phase stability of the WC and HEA binders across the different sintering temperatures. The densification and mechanical properties exhibited strong dependencies on both the HEA composition and the sintering temperature. Relative density improved significantly with increasing temperature, reaching near full densification (up to 100%) at 1400–1500 ºC. The composites demonstrated exceptional Vickers hardness, peaking above 2500 HV for specific compositions (e.g., HEA 2 and HEA 4) at 1400 ºC and 1500 ºC. Conversely, fracture toughness reached up to 14.9 MPa·$m^{1/2}$ at lower temperatures (1200 ºC) with higher binder contents, illustrating a clear hardness-toughness trade-off. These results highlight the potential of Co-Fe-Ni-Mo-V HEAs for tailoring the mechanical performance of advanced WC composites.

[P15-13]

가시광-적외선 광학용 Multispectral 황화아연(MS-ZnS) 소재의 제작 공정 및 특성 평가: 김성윤, 이영모, 서석훈, 서지연, 박정철, 우시관*(그린광학)

Keywords: 황화아연, 화학기상증착, 고온등방압, 광학특성

황화아연(ZnS) 소재는 가시광선 및 적외선 파장 영역에서 최대 약 70 %의 우수한 투과 성능을 지니며, 주로 방위산업 분야에서 사용된다. 특히, 방위산업의 특성상 수출·입허가가 필요한 품목으로 분류되어 수급에 어려움이 있다. 최근에는 바이오, 의료, 반도체 등 다양한 분야에서도 개발 가능성이 높아짐에 따라 ZnS 소재에 대한 수요가 급증하고 있다. 현재 광학 렌즈용 ZnS 소재 시장은 미국과 독일의 몇몇 기업이 주도하고 있으나, 국내에서도 ZnS 소재의 국산화를 위한 연구와 개발이 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 화학기상증착(CVD) 공정을 활용하여 장파장 적외선 영역에서 높은 투과 특성을 지닌 ZnS 소재를 제작하였다. 또한, 가시광선 영역까지 투과 범위를 확장한 MS(Multispectral)-ZnS를 제작하기 위해 고온등방압(HIP) 열처리 공정의 조건을 최적화하였다. 제작된 ZnS 소재의 광학적 및 기계적 특성을 평가하기 위해 투과율과 누프 경도를 분석하였으며, X선 회절 분석을 통한 상 분석 및 SEM-EBSD를 이용한 결정 방위 분석을 추가로 수행하였다. 장파장 적외선 영역에서 사용되는 소재의 경우 8 ~ 12 μm 파장 범위에서 약 64 % 이상의 평균 투과율 및 약 HK 200 이상의 누프 경도 값을 달성하였다. 가시광선 파장 영역까지 투과 범위가 확장된 소재의 경우 0.4 ~ 0.8 μm 파장 범위에서 약 67 % 이상의 평균 투과율 및 약 HK 150 이상의 누프 경도를 달성하였다.

본 연구는 2026년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임 [1425179544]

P16 : 이차전지 원료소재
Room 1층 전시홀, 10월 29일

[P16-1]
Si 첨가에 따른 Nickel Pig Iron(NPI)의 산화 거동 및 미세조직 변화: 차은빈(한국생산기술연구원, 고려대학교), 서보성(한국생산기술연구원), 김동회(고려대학교), 박광석*(한국생산기술연구원)
Keywords: Nickel Pig Iron(NPI), Silicon(Si), Oxidation Behavior, Internal Oxidation, Elemental Redistribution

이차전지 산업의 성장과 함께 양극재의 핵심 원소인 Ni의 수요가 지속적으로 증가함에 따라, 니켈 자원의 효율적인 활용을 위한 공정 기술 개발이 요구되고 있다. Nickel Pig Iron(NPI)은 산화광인 Laterite로부터 제조되는 Fe-Ni계 합금으로, 주로 스테인리스강 제조에 사용되어 왔다. 하지만, 최근 이차전지용 고순도 Ni 제조에 주로 사용되는 황화광이 고갈됨에 따라 NPI로부터 고순도 Ni 제조를 위한 연구가 진행되고 있다. NPI의 주요 원료 중 하나인 Saprolite에는 Si이 Mg-Si계 규산염 광물의 형태로 존재하기 때문에 NPI에는 미량의 Si이 존재할 수 있다. 이러한 Si는 높은 산소 친화력으로 인해 NPI의 산화 과정에서 우선적으로 산화되어, Fe-Ni계 합금과 다른 산화 거동을 보일 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 NPI 산화 시, 함유되어 있는 Si이 어떻게 산화 거동에 영향을 미치는지 조사하였다. 이를 위해 Fe-13Ni-2.5C-1.5Si (wt%) 조성의 모합금을 제조한 후 수분사(water Atomization) 공정을 통해 D50 약 50μm의 NPI 분말을 제조하였다. 제조된 분말을 산화 처리를 수행한 후 산화 진행에 따른 Fe, Ni, Si 및 O의 분포와 산화 시 생성되는 산화물 및 미세조직 변화를 분석하였다. 특히, 산소의 내부 확산에 따른 Si의 선택적 산화와 Si-rich oxide의 형성 및 성장 거동을 조사하고, Fe-Ni 기지와 산화물 영역에서 나타나는 Si 및 Ni의 국부적인 농축과 재분배 거동을 분석하였다.

[P16-2]
Microstructure-Resolved Multiphysics Analysis of Porosity-Dependent SiO_x Optimization in Composite Anodes: YEJIN KANG, Seungsoo Jang, Hyunjin Kim, Sunghyun Park, Kang Taek Lee*(KAIST)
Keywords: 3D multiphysics simulation, Composite anode, Lithium-ion battery

Achieving high capacity without compromising structural integrity remains a central challenge in the design of SiO_x/graphite composite anodes. The electrochemical benefit of incorporating SiO_x is closely coupled to electrode architecture, particularly porosity, which controls ion-transport pathways, available free volume, and mechanical constraints during lithiation. In this study, a three-dimensional microstructure-resolved electrochemo-mechanical framework is employed to clarify how variations in SiO_x content and porosity interactively influence electrode performance. The simulations show that capacity, active-material utilization, transport uniformity, and mechanical stress exhibit non-monotonic responses to these design parameters, indicating that simply increasing either SiO_x loading or porosity does not necessarily improve overall performance. Instead, distinct optimal combinations emerge from the competition between enhanced capacity, transport accessibility, volumetric expansion, and stress development. The influence of separator stiffness is further evaluated for the selected electrode configuration, revealing its contribution to interfacial stress regulation. Overall, this work provides a microstructure-based understanding of composition–porosity coupling and offers practical guidance for the electrochemo-mechanical design of high-performance SiO_x/graphite composite anodes.

[P16-3]
Sb-Induced Lewis Acid Sites for Promoting Na^+ Transport in Composite Solid-State Electrolytes: JINGYA WANG, DONGYUN LEE*(Pusan National University)
Keywords: solid-state sodium batteries; composite solid-state electrolyte; NASICON; Lewis acid sites; ion transport

Solid-state sodium-metal batteries have attracted considerable attention because of their potential safety and resource advantages. However, strong Na^+–anion association and sluggish polymer-segmental motion in polymer electrolytes severely restrict room-temperature ion transport and interfacial stability. Herein, Sb^{3++}-doped $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ (Sb-NZSP) was incorporated into a poly(ethylene glycol) diacrylate (PEGDA) matrix to construct a composite solid-state electrolyte with enhanced ionic transport and stable electrode interfaces. Sb^{3+} doping generates Lewis acid sites on the NASICON surface, which coordinate with electrolyte anions, weaken Na^+–anion interactions, and facilitate sodium-salt dissociation, thereby increasing the concentration of mobile Na^+. Meanwhile, the inorganic filler regulates the polymer-chain configuration and local coordination environment, providing continuous pathways for Na^+ migration. Spectroscopic characterization and theoretical calculations jointly reveal the regulation of the anion coordination structure and Na^+ solvation environment by the Sb-induced Lewis acid sites. The optimized composite electrolyte delivers a room-temperature ionic conductivity of 1.24 mS cm^{-1} and a high Na^+ transference number of 0.884, together with favorable electrochemical stability and electrode interfacial compatibility. A Na ‖ Na symmetric cell employing this electrolyte enables stable sodium plating/stripping for over 1000 h. Furthermore, the corresponding NVP ‖ Na cell retains 97.6% of its capacity after 140 cycles. These results demonstrate that regulating anion coordination through Lewis acid sites is an effective strategy for simultaneously improving Na^+ transport kinetics and interfacial stability in composite solid-state electrolytes.

[P16-4]
Comparison of Oxalate and Conventional MHP Routes for Nickel and Cobalt Recovery from Saprolitic Laterite Leachate: Heewon Kang, Jeongwoo Kim, Jaehoon Lee, Dagyeong Lee, Hyunjung Kim*(Hanyang Univ.)
Keywords: Nickel laterite, oxalic acid, precipitation, mixed hydroxide precipitate

Saprolitic laterite pregnant leach solution (PLS) contains high concentrations of magnesium (Mg) and other impurities co-dissolved during acid leaching. Conventional recovery of nickel (Ni) and cobalt (Co) from such solutions generally requires multistage impurity removal and precipitation, which can increase process complexity and cause losses of target metals. In this study, oxalate precipitation was investigated as an alternative route for direct Ni and Co recovery from Mg-rich saprolitic laterite PLS. The effects of oxalic acid concentration, reaction temperature, and reaction time on metal precipitation were evaluated to determine suitable operating conditions. The recovered oxalate precipitate was subsequently calcined to obtain a Ni–Mg mixed oxide, and its composition and morphology were characterized. The overall process performance was then compared with a conventional mixed hydroxide precipitate (MHP) route using the same PLS. The oxalate route provided higher final Ni and Co recoveries, whereas the MHP route showed more effective Mg separation. These results highlight the potential of oxalate precipitation as an alternative recovery route for Mg-rich laterite leachates, while indicating that Mg co-recovery remains a key issue for further process improvement. Acknowledgements This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. RS-2025-02634555) and the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2024-00406500)

[P16-5]
Feasibility of Direct Atmospheric Acid Leaching of Coarse Nickel Laterite Ores without Additional Comminution: Jeongwoo Kim, Heewon Kang, Jaehoon Lee(Hanyang Univ.), Sowon Choi(POSCO N.EX.T Hub), Hyunjung Kim*(Hanyang Univ.)
Keywords: Nickel laterite, Comminution, Atmospheric acid leaching, Particle size

In nickel laterite leaching processes, coarse ore fractions are often subjected to comminution despite its high energy demand, or are excluded from further processing. This study evaluated the feasibility of directly leaching coarse laterite ores without additional comminution. Philippine saprock and limonite were classified into coarse, intermediate, and fine fractions and subjected to 72 h bottle roll leaching tests to evaluate particle size effects on the leaching behavior of nickel, iron, and magnesium. Micro-CT and BET characterization were further conducted to examine internal pores and microcracks. Additional grinding tests to a D_{90} of <150 μm were performed to assess the energy requirement and the effect of comminution on nickel extraction. The results indicated that the coarse fractions achieved nickel leaching efficiencies comparable to those of the corresponding ground ores, while additional grinding provided only limited improvement in nickel extraction. These findings demonstrate that direct leaching of coarse laterite ore can achieve substantial nickel recovery while reducing the energy consumption associated with additional grinding. Acknowledgements This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. RS-2025-02634555).

[P16-6]
Investigation of Particle-Size-Dependent Fe-Ni Alloying Behavior During Beneficiation of Nickel Laterite Ore: Kwanwoo Jeon, Dohyeon Roh, Heewon Kang, Hyunjung Kim*(Hanyang Univ.)
Keywords: Nickel laterite, Phase transformation, Beneficiation, Fe-Ni alloy

Nickel is widely utilized across a broad range of industrial sectors, including defense, marine industries, transportation, and manufacturing. With the rapidly increasing demand for electric vehicles (EVs) and energy storage systems (ESS), global nickel consumption has continued to rise. This growing demand has increased interest in utilization of nickel laterite resources. Accordingly, effective beneficiation processes for nickel laterite are becoming increasingly important. Reduction roasting followed by magnetic separation has been widely studied for nickel recovery, with particular emphasis on promoting Fe–Ni alloy formation to improve magnetic separation efficiency, In this study, Fe–Ni alloy formation was investigated in relation to the metal contents of the raw ore to identify conditions favorable for enhanced alloy formation. Specifically, the raw ore was divided into six particle-size fractions, and (i) the Ni, Fe and Mg grades of the concentrates and tailings obtained after reduction roasting and magnetic separation were evaluated for each fraction, and (ii) the Fe–Ni alloy behavior was examined in relation to the Ni and Fe contents of each fraction using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). Acknowledgements This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. RS-2025-02634555 and No.20227A10100010).

[P16-7]
알칼리 처리 기반 사프로라이트 수소환원에서 니켈의 선택적 환원 연구: 김민희, 이병필, 서민석*, 우강주(포스코홀딩스)
Keywords: 니켈, 사프로라이트, 수소환원, RK-EF

전 세계 니켈에 대한 수요는 스테인리스, 방산, 배터리 분야 등 다양한 산업 분야에서의 역할을 바탕으로 지속적인 증가 추세를

보이고 있다. 니켈 광석은 크게 황화광과 산화광으로 구분되며, 이는 전 세계 니켈 매장량인 약 9, 600만 톤에서 각각 40%와 60%를 차지한다. 과거의 니켈 산업은 주로 높은 품위를 가진 황화광에 의존하였으나, 니켈의 수요 증가와 고품위 황화광 자원이 점차 고갈됨에 따라 산화광의 활용이 점차 확대되고 있다. 니켈 산화광 중 사프로라이트는 높은 Mg 및 Si 함량으로 이루어져 있으며, 이러한 광물 구조로 인해 주로 건식 제련공정인 Rotary Kiln-Electric Furnace(RK-EF) 공정을 통해 처리된다. 그러나 기존 RK-EF 공정은 탄소 기반 환원 공정으로, CO_2 배출량은 니켈 1톤 생산당 약 40-80톤으로 매우 높다. 향후 사프로라이트의 생산 비중이 증가할 것으로 예상되는 만큼, RK-EF 공정의 높은 탄소 배출량은 니켈 산업의 탈탄소화를 저해하는 주요 원인으로 작용하고 있다. 이에 본 연구에서는 저탄소 환원 공정인 수소 환원 공정을 적용하여 탄소 중립 정책에 대한 장기적인 공정 지속성을 확보하고자 한다. 또한 사프로라이트를 주로 구성하는 Serpentine 구조는 열처리 과정에서 Olivine 등의 안정한 상으로 변화한다. 이러한 상의 형성은 니켈의 환원 및 분리 효율을 저하시키는데, 이에 NaOH를 첨가하여 Serpentine 구조를 해리하고 Mg-silicate의 안정한 상 형성을 억제하였다. 따라서 본 연구에서는 NaOH 첨가에 따른 사프로라이트의 상변화 거동과 니켈의 선택적 회수율 향상을 위한 수소 환원 공정의 최적 조건을 도출하고자 하였다.

[P16-8]

양극활물질 제조공정 중에서 발생한 스크랩에서 회수된 NiO의 RF 플라즈마 환원을 통한 Ni 나노입자 합성 거동: 한철웅, 김효섭*
(한국생산기술연구원)

Keywords: Nickel nanoparticles, Nickel oxide, RF thermal plasma, Cathode manufacturing scrap, Resource recycling

전도성 금속 나노입자는 우수한 전기적·열적 특성으로 인해 인쇄전자, 센서, 에너지 저장소자 및 다양한 전자소자의 전극 소재로 널리 활용되고 있다. 특히 니켈 나노입자는 높은 전기전도성, 열적 안정성 및 경제성을 바탕으로 전도성 페이스트, 박막 및 후막 전극용 소재로 활용되고 있으며, 전자소자의 고집적화에 따라 미세하고 균일한 입자 크기의 니켈 나노입자 제조 기술이 요구되고 있다. 본 연구에서는 리튬 이차전지 양극활물질 제조공정 중 회수된 스크랩으로부터 NiO를 확보하기 위해 선택적 분리 및 정제 공정을 수행하였으며, 회수된 NiO 분말을 원료로 Ar/H_2 분위기의 RF 열플라즈마 공정을 이용하여 Ni 나노입자를 합성하였다. NiO 분말을 RF 플라즈마 반응영역에 투입하여 고온 플라즈마 내에서 기화 및 수소 환원 반응을 유도하고, 이후 급속 냉각에 따른 핵생성 및 응축을 통해 금속 Ni 나노입자를 제조하였다. 합성된 분말의 상, 형상 및 입도 특성을 분석하여 RF 플라즈마 공정에서의 NiO 환원 및 입자 형성 거동을 고찰하였다. 분석 결과, 회수된 NiO 원료는 RF 플라즈마 내에서 기화–환원–응축 과정을 거쳐 금속 Ni 나노입자로 전환되는 것으로 확인되었다. 또한 원료 공급량이 증가함에 따라 생성된 Ni 나노입자의 평균 입자 크기가 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 플라즈마 내 Ni 증기의 분압 증가에 따라 응축이 시작되는 임계온도가 상승하고, 상대적으로 높은 온도 영역에서 입자 간 충돌 및 합체 가능성이 증가한 데 기인한 것으로 판단된다. 본 연구는 리튬 이차전지 양극활물질 제조공정에서 발생한 스크랩으로부터 NiO를 선택적으로 회수·정제하고, 이를 Ar/H_2 RF 플라즈마 공정을 통해 고부가가치 Ni 나노입자로 전환할 수 있음을 보여준다. 이를 통해 양극활물질 제조공정 스크랩의 자원순환과 전자·에너지 소자용 기능성 전극 소재 제조를 연계할 수 있는 공정적 가능성을 제시한다.

[P16-9]

Quantitative Analysis of Metallization and Sulfidation Behavior of Saprolite Ore Using Rietveld Refinement: Jeonghwan Kim, Heeju kim, Sengyeon Lee, Il Sohn*(Yonsei University)

Keywords: Saprolite Ore, Sulfate additives, Phase fraction, X-ray diffraction, Rietveld Refinement, Degree of Metallization

As the demand for stainless steel and batteries increases, research is actively underway to enhance nickel selectivity by introducing sulfate additives during extraction from saprolite ores. However, the precise metallization and sulfidation mechanisms of saprolite remain incompletely understood. In this study, the effects of varying reductant content, additive content, and temperature on the degrees of metallization and sulfidation were investigated. By performing Rietveld refinement using the GSAS-II, quantitative phase fractions which are unattainable through titration methods were nondestructively determined, thereby elucidating the underlying metallization and sulfidation mechanisms. Rietveld refinement provides comprehensive crystallographic information from X-ray diffraction (XRD) patterns, including quantitative phase fractions, crystallite size, microstrain, and preferred orientation. According to the refinement results, increasing the carbon contents increases the fraction of the metallic iron (α-Fe) phase, which consequently enhances the overall iron metallization degree. Conversely, the introduction of sulfate additives decreases the α-Fe phase fraction while increasing the fraction of the troilite (FeS) phase. Furthermore, higher roasting temperatures lead to increase in the fractions of both the reduced α-Fe and FeS phases. Ultimately, although quantifying amorphous phases via back-calculation carries inherent errors since the samples are not 100% crystalline, this approach transcends the limitations of conventional characterization methods. The established quantitative phase profiles thereby provide advanced crystallographic information for optimizing the selective metallization of complicated saprolite ores and offer insights into their phase transformation mechanism.

P17 : 재료강도
Room 1층 전시홀, 10월 29일

[P17-1]

비정상 결정립 성장을 이용한 (111) 단결정 구리 박막의 형성: 김수정, 곽지윤, 심영주, 김동현, 김주영*(UNIST)

Keywords: (111) 구리, 단결정 구리 박막, 비정상 결정립 성장

단결정 구리는 다결정 구리와 달리 결정립계가 존재하지 않아 전기 저항이 낮고 우수한 물리적 특성을 나타낸다. 특히 구리 (111) 결정면은 그래핀과의 격자 불일치(lattice mismatch)가 매우 작아 그래핀의 에피택시 성장(epitaxial growth)을 위한 기판으로 적합하다. 이에 따라 (111) 단결정 구리 기판의 제조에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 현재는 주로 벌크 결정 성장이나 고온 재결정화 공정을 통해 단결정 구리 기판을 제조하고 있다. 그러나 이러한 제조 방식은 기판 크기의 제한, 복잡한 공정 및 높은 제조 비용 등의 한계를 가지며, 균일한 단결정을 확보하기 어렵다는 문제도 존재한다. 따라서 대면적 초평탄 단결정 구리 박막을 보다 효율적이고 경제적으로 제조할 수 있는 새로운 공정 기술이 요구된다. 본 연구에서는 스퍼터링을 이용하여 수백 나노미터에서 수 마이크로미터 범위의 두께로 구리 박막을 증착한 후, 온도 및 환경 조건을 제어한 열처리를 통해 비정상 결정립 성장(abnormal grain growth)을 유도하고 있으며, 이를 바탕으로 (111) 단결정 구리 박막을 형성하고 그 과정에서 나타나는 결정립 성장 메커니즘을 분석하고자 한다.

[P17-2]

AA6061 합금 마이크로필라의 크기 및 변형속도에 따른 미세 변형거동: 백인섭(경상국립대학교), 안지혁(한국재료연구원), 이근호(국방과학연구소), 강성규*(경상국립대학교)

Keywords: AA6061-T6, 마이크로필라 압축시험, 크기 효과, 변형속도 효과, 석출경화

항공·우주 분야에서는 구조재료의 경량화뿐만 아니라 다양한 하중 및 충격 환경에서의 기계적 신뢰성이 요구된다. Al–Mg–Si계 석출경화형 합금인 AA6061은 우수한 비강도와 내식성을 바탕으로 이러한 산업 분야에서 널리 활용되고 있다. 실제 사용 환경에서 재료가 경험하는 변형속도는 약 10^{-4} s^{-1}에서 10^{9} s^{-1}까지 광범위하게 변화할 수 있으므로 변형속도 변화에 따른 기계적 거동을 이해하는 것이 중요하다. 그러나 고변형속도 조건에서 수행되는 벌크 시험은 장비 및 시편 준비의 제약으로 인해 반복적인 실험과 미세조직별 특성 평가에 한계가 있다. 마이크로 스케일 압축시험은 이러한 한계를 보완할 수 있는 방법이지만 석출물을 포함하는 상용 알루미늄 합금에 대한 크기 효과와 변형속도 효과의 복합적인 연구는 아직 충분하지 않다. 본 연구에서는 AA6061-T6 합금으로부터 직경 1–10 μm의 마이크로필라를 제작하고, 서로 다른 변형속도 조건에서 압축시험을 수행하여 필라 크기와 변형속도가 기계적 거동에 미치는 영향을 분석하였다. SEM 및 EPMA 분석을 통해 Al 기지 내 Mg–Si계 석출물을 확인하였으며, EBSD 분석을 기반으로 압축시험에 적합한 결정방위를 선정하였다. 또한 TEM 분석을 통해 β″ 석출물의 형상과 분포를 관찰하고 석출물 사이의 평균 간격을 정량화하였다. 압축시험 후 일부 마이크로필라의 단면에 대해 추가적인 EBSD 분석을 수행하였으며 IPF 및 KAM map을 이용하여 변형에 따른 국부 결정방위 변화와 변형 분포를 조사하였다. 마이크로필라 압축시험 결과 필라 직경이 감소함에 따라 강도가 증가하는 크기 의존성이 나타났으나 그 변화 정도는 순수 금속 및 기존 FCC 금속 마이크로필라에서 보고된 일반적인 크기 효과보다 상대적으로 작게 나타났다. 이는 전위의 이동거리가 필라 직경뿐만 아니라 미세하게 분포한 석출물의 간격에 의해서도 제한되기 때문으로 판단된다. 또한 변형속도가 증가함에 따라 유동응력이 증가하는 양의 변형속도 의존성이 확인되었다. 변형 후 EBSD 분석에서는 마이크로필라 내부에서 국부적인 결정방위 변화와 KAM 증가 영역이 관찰되었다. 본 연구 결과는 석출경화형 알루미늄 합금에서 외부 길이 척도인 필라 크기와 내부 미세조직 길이 척도인 석출물 간격이 변형거동에 미치는 영향을 이해하고 다양한 변형속도 환경에서 사용되는 구조재료의 기계적 특성을 평가하는 데 기초 자료로 활용될 수 있다.

[P17-3]

Co-free $L1_2$ 석출강화형 중엔트로피 합금의 초극저온 기계적 특성: 윤성준(한국재료연구원, 극한재료연구소, 고려대학교, 미래융합소재학과), 손석수(고려대학교, 미래융합소재학과), 장태진, 나영상*, 김영균*(한국재료연구원, 극한재료연구소)

Keywords: Medium-entropy alloy, Cryogenic, Microstructure, Mechanical properties,

우주 탐사 및 액체 수소(LH_2) 기반 에너지 시스템에 대한 관심이 증가함에 따라, 극저온 환경에서 우수한 기계적 특성을 유지할 수 있는 구조 재료의 개발이 점차 중요해지고 있다. CoCrNi 기반 $L1_2$ 석출강화형 중엔트로피합금 (medium-entropy alloy, MEA)은 우수한 강도와 연성, 그리고 저온에서의 뛰어난 기계적 안정성으로 인해 극저온 구조용 소재의 유망한 후보로 주목받고 있다. 그러나 Co 함유에 따른 높은 소재 비용은 실제 산업적 활용을 제한하는 요인으로 작용할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 Co-free $L1_2$ 석출강화형 MEA를 제조하고 미세조직과 상온부터 4.2 K까지의 인장 특성을 평가하였다. 초기 미세조직 분석 결과, Co-free $L1_2$ MEA는 조대 결정립으로 구성된 core 영역과 이를 둘러싸며 서로 연결된 미세 결정립의 shell 영역으로 이루어진 core–shell microstructure를 나타냈다. 인장 시험 결과, 시험 온도가 감소함에 따라 항복강도와 최대인장강도가 동시에 증가했으며, 이와 동시에 연성 또한 향상되어 우수한 강도–연성 조합을 나타냈다. 상기 결과들을 기반으로 Co-free L12 MEA의 변형 및 파괴 기구에 대해서 고찰해보았다.

[P17-4]
미케노 발광형 디지털 이미지 상관 기법을 이용한 전고체 배터리 고체전해질의 열화 및 계면균열 가시화 연구: 윤지용(경북대학교 미래과학기술융합학부 에너지 신소재 화학공학전공), 김지식*(경북대학교 나노신소재공학과), 이광호(경북대학교 기후위기재난대응연구소)
Keywords: 전고체 배터리, 고체전해질, 디지털이미지 상관기법, 미케노발광, 이온전도도, 열화, 계면균열

이온전도도 실측과 디지털 이미지 상관(DIC) 및 미케노 발광(ML)은 전고체 배터리의 전기화학적 특성 변화와 기계적 변형 거동을 동시에 분석할 수 있는 유망한 방법으로써, 본 연구는 충방전 과정에서 발생하는 고체전해질의 이온전도도 변화, 변위 및 변형률과 계면균열 거동을 가시화하고, 이를 이용하여 전고체 배터리의 열화 메커니즘 및 안전성 진단에 적용 가능한 미케노 발광형 디지털 이미지 상관 기술을 개발하고자 하였다. 이를 위해 전고체 배터리의 충방전 과정에서 고체전해질의 이온전도도 실측 데이터와 열화 영상 데이터를 획득하였으며, DIC 기법을 적용하여 충전상태(SOC) 변화에 따른 전극 -고체전해질 계면의 변위 및 표면 변형률 분포를 분석하고자 하였다. 또한 미케노 발광현상을 이용하여 고체전해질과 계면에서 발생하는 응력 및 변형률 집중부를 탐색하고, DIC 영상 데이터와 동시에 분석함으로써 계면 균열의 발생 및 진전 거동과 열화 메커니즘을 평가하고자 하였다. 해당 기술은 응력과 변형률을 각각 시각화할 수 있는 미케노 발광 현상과 디지털 이미지 상관법을 진단 소재에 동시 접목함으로써 표준화된 응력-변형률 가시화 영상을 획득하고, 계면균열 첨단부의 응력장 분석과 연계할 수 있다. 향후 획득된 이온전도도, 변위, 변형률 및 열화 영상 데이터는 전고체 배터리의 계면균열 및 열화 메커니즘을 규명하고, 물리정보 신경망 및 인공지능 영상 학습용 데이터로 전환함으로써 배터리 열화 및 안전성 진단 기술에 활용될 것으로 예측된다.

[P17-5]
원자로 압력용기용 SA508 Gr.3 Cl.2 저합금강의 합금원소 첨가에 따른 미세조직 및 기계적 특성 평가: 김송현(경북대학교, 한국원자력연구원), 현세미, 홍석민*, 김민철(한국원자력연구원), 박성혁(경북대학교)
Keywords: SA508 Gr.3 Cl.2 저합금강, 혁신형 SMR, 합금 설계, 미세조직, 기계적특성

최근 탄소중립 실현과 청정에너지 시스템 구축을 위해 전 세계적으로 소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR)의 개발이 활발히 이루어지고 있다. SMR은 원자로 핵심 기기가 하나의 용기에 집약된 일체형 구조로 설계되어, 주요 부품 및 기기를 공장에서 제작한 후 현장에서 설치함으로써 건설비용 및 기간을 크게 절감할 수 있다는 장점이 있다. 국내에서는 전기출력 170MWe급의 혁신형 SMR(i-SMR) 개발이 진행되고 있다. 그러나 SMR은 기존 대형 원전 대비 발전 출력이 낮아 건설비용 절감을 통한 경제성 확보가 필수적일 뿐만 아니라, 모듈의 육상 이송 또한 고려한다면 원자로압력용기(Reactor Pressure Vessel, RPV) 등 대형 부품의 경량화가 필수적으로 요구된다. 이를 위해 혁신형 SMR에서는 현재 상용 원자로압력용기에 적용되고 있는 SA508 Gr.3 Cl.1강 대비 강도가 우수한 Cl.2강을 적용하여 RPV의 두께와 무게를 줄이려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 Cl.2강은 Cl.1강 대비 강도는 높으나, 충격인성이 상대적으로 낮다는 한계가 있다. 원자로압력용기는 고온·고압 환경에서 운전되므로 파괴 안전성을 위한 높은 충격인성 확보가 필수적이므로, Cl.2강의 고강도를 유지하면서도 인성 저하를 극복할 수 있는 고성능 강재 개발이 요구된다. 본 연구에서는 B과 V 등의 합금원소 첨가와 C 함량 조절을 통해 미세조직을 제어하고, 강도와 인성이 모두 향상된 SA508 Gr.3 Cl.2강을 설계하고자 하였다. 제작된 모델 합금은 광학현미경(OM)과 주사전자현미경(SEM)을 활용하여 합금조성에 따른 미세조직과 석출상을 분석하였다. 또한 상온 및 288 ºC에서 인장시험을 수행하고, 충격천이특성을 평가하였다. 이를 통해 SA508 Gr.3 Cl.2 저합금강의 합금원소 조성에 따른 미세조직 변화와 기계적 특성 간의 상관관계를 고찰하였다.

[P17-6]
고망간강의 초극저온 인장 및 충격 특성: 이정우(한국재료연구원, 동아대학교), 윤성준(한국재료연구원, 고려대학교), 전종배(동아대학교), 장태진, 나영상*, 김영균*(한국재료연구원)
Keywords: 고망간강, 초극저온, 기계적 물성, 액화천연가스, 액화수소

최근 지구온난화의 문제가 대두됨에 따라 청정에너지원에 대한 수요가 증가하고 있으며, 수소는 유망한 에너지 운반체로서 주목받고 있다. 특히 대용량 수소의 효율적인 저장 및 운송을 가능케하는 액화수소 기술에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이에 액화수소 환경에 적합한 구조재의 확보가 중요해지고 있다. 액화천연가스(LNG) 저장 시스템용 구조재로 널리 사용되고 있는 오스테나이트계 고망간강은 우수한 극저온 기계적 특성을 바탕으로 액화수소 시스템용 구조재로의 적용 가능성이 기대되며, 이를 위해 초극저온 환경에서의 기계적 특성에 대한 체계적인 평가가 필요한 상황이다. 이에 본 연구에서는 상온부터 20 K 이하의 초극저온 범위에서 인장시험 및 충격시험을 수행하여 고망간강의 기계적 특성을 평가하고, 고망간강의 활용 가능성에 대해 분석하였다. 인장시험 결과, 시험온도가 감소함에 따라 항복강도와 최대인장강도가 증가하였으며, 4.2 K에서는 연성이 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 충격흡수에너지는 시험온도가 감소함에 따라 감소하였으며, 초극저온에서는 취성 파괴 경향이 증가하는 것으로 확인되었다. 인장 및 충격시험 후 변형 미세조직과 파단면을 분석하여 시험온도에 따른 고망간강의 초극저온 변형 및 파괴 거동을 규명하고자 하였다.

[P17-7]
열처리 조건에 따른 Mar-M247 초내열합금의 γ′ 미세조직 및 기계적 특성 변화: 이재훈, 한재연(국립창원대학교), 권혁주(한스코), 홍현욱*(국립창원대학교)
Keywords: Mar-M247, Ni-based superalloy, solution heat treatment, γ′ microstructure, deformation mechanism

Mar-M247은 우수한 고온 크리프 특성으로 인해 항공 및 발전용 가스터빈 부품에 널리 사용되는 다결정 Ni기 초내열합금이다. 이러한 Ni기 초내열합금의 기계적 특성은 γ′ 석출물의 크기, 분율, 형상 등 미세조직에 의해 지배되며, 이 미세조직은 열처리 조

건에 따라 크게 달라진다. 본 연구에서는 용체화 열처리 온도에 따른 γ′ 미세조직 변화와, 이에 수반하는 기계적 특성 및 변형 메커니즘의 변화를 고찰하고자 하였다. Super-solvus 열처리재는 γ' 분율 57%, γ' 크기 145 nm, γ channel 폭 39 nm의 미세하고 균일한 unimodal 미세조직을 나타낸 반면, sub-solvus 열처리재는 γ' 분율 58%, 1차 γ' 크기 660 nm, 2차 γ' 크기 42 nm, γ channel 폭 125 nm로 조대한 1차 γ'와 미세한 2차 γ'가 공존하는 bimodal 미세조직을 나타내었다. Unimodal 및 bimodal 미세조직이 기계적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 상온과 871 ºC에서 인장시험을 실시하였다. Super-solvus 열처리재는 상온에서 항복강도 957 MPa, 인장강도 1001 MPa, 연신율 6.5%를, 871 ºC에서 항복강도 667 MPa, 인장강도 684 MPa, 연신율 4.1%를 보였다. Sub-solvus 열처리재는 상온에서 항복강도 816 MPa, 인장강도 854 MPa, 연신율 9.1%를, 871 ºC에서 항복강도 684 MPa, 인장강도 754 MPa, 연신율 10.6%를 보여, 고온에서는 강도와 연신율 모두 super-solvus재를 상회하는 역전 현상을 나타내었다. 파면 분석 결과 두 열처리재 모두 MC 탄화물 및 결정립계를 기점으로 한 취성 파괴 양상을 보였다. 변형 메커니즘 규명을 위한 TEM 분석 결과, super-solvus재는 상온에서 stacking fault를 동반하여 γ'을 shearing 하였고, 871 ºC에서는 전위가 γ channel 내부로 이동하였다. Sub-solvus재는 상온에서 APB-coupled 전위쌍이 secondary γ'을 shearing하였고, 871 ºC에서는 마찬가지로 γ channel 내부 이동이 관찰되었다. 이를 종합하면, 상온에서는 super-solvus재의 미세한 γ'에 의한 전위 shearing이 우수한 강도를 낳는 반면, 고온에서는 sub-solvus재의 넓은 γ channel이 전위 이동을 용이하게 하여 강도와 연신율을 동시에 향상시키는 것으로 확인되었다.

[P17-8]

Cu 및 Zr 첨가 A356 합금의 용체화 시간에 따른 피로 특성: 이언진, 윤영준, 정창열*(동국대학교 WISE캠퍼스)

Keywords: A356, Zr, Solution Treatment, Porosity, High-cycle fatigue

A356 합금은 중력주조로 제조 시 비강도가 우수하여 수송기기의 경량화를 위해 많이 적용되나, 주조 과정에서 내부 기공과 같은 결함이 발생하기 쉽다. 또한, 용체화 시간이 증가함에 따라 기공의 성장 및 병합으로 인해 소재의 피로 수명과 기계적 특성이 저하되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 Cu 및 Zr을 첨가한 A356 합금의 용체화 시간에 따른 기공률의 변화를 비교하였으며, 피로 특성과의 상관관계를 분석하였다. 미세조직 관찰 결과, 용체화 시간이 6시간에서 24시간으로 변화함에 따라 A356 및 0.5Cu 첨가 합금의 기공률이 증가한 반면 0.2Zr 및 0.5Cu-0.2Zr 첨가 합금은 24시간 열처리 후에도 6시간 용체화 조건과 유사한 낮은 기공률이 유지되었다. 이러한 기공률의 변화는 인장 결과에도 나타나 용체화 시간 증가에 따라 Zr 미첨가 합금의 신율은 감소하였으며, 반대로 Zr 첨가 합금에서는 신율이 증가하는 결과가 나타났다. 동일한 열처리 조건에서 상온 고주기 피로 결과, 0.5Cu-0.2Zr 첨가 합금의 수명이 가장 길었으며, Zr 미첨가 합금에서는 용체화 시간이 증가함에 따라 기공의 성장으로 인해 피로 수명이 감소하는 결과를 나타내었다. 이에 따라 광학현미경, 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM) 및 EDS를 이용하여 용체화 시간에 따른 기공 성장 기구와 피로 특성과의 상관관계를 규명하고자 하였다.

[P17-9]

열적 활성화 제어를 통한 경량 구조용 SLM Ti–6Al–4V의 물성 신뢰성 확보 전략: 이아름, 한재연(국립창원대학교), 김치원(한국재료연구원), 이지원, 최용혁(두산에너빌리티), 홍현욱*(국립창원대학교)

Keywords: Ti–6Al–4V, Selective Laser Melting (SLM), Post heat treatment, α‘ martensite, α+β lamellar decomposition, Elongation

탄소중립 기조와 에너지 효율화 요구의 확대에 따라 고성능 경량 소재의 중요성이 부각되고 있다. 우수한 비강도와 내식성을 지닌 Ti–6Al–4V(Ti64) 합금은 정밀 형상 구현이 가능한 SLM 적층제조 적용 시 높은 산업적 활용 가치를 지닌다. 다만, 적층 공정 중 유발되는 재료 내 극심한 열구배 이력에 따른 α′ martensite 조직은 소재의 연성 저하 및 신뢰성 확보의 제약 요소로 작용하므로 적층 이후 후열처리를 통한 조직 제어가 필수적이다. 본 연구에서는 열처리 온도, 시간, 냉각 조건이 미세조직 진화와 역학적 특성에 미치는 상관관계를 규명하여, 강도 저하를 최소화하면서 연신율을 극대화하는 최적 공정 조건을 도출하였다. 800~950 ºC 영역에서 β 원소 확산에 따라 α′ 조직이 α+β lamellar 구조로 점진적으로 변태하였으며, 950 ºC/1 HR 조건에서 완전한 분해와 함께 최적의 물성 균형 (YS=920 MPa, El.%=15%)을 확보하였다. 이는 비교적 단시간의 공정 제어만으로도 우수한 강도–연성 균형 달성이 가능함을 입증하며, SLM Ti64의 부품 상용화를 위한 유효한 전략을 제시한다.

[P17-10]

오스테나이트계 스테인리스강의 정적 변형 시효에 미치는 상 안정성과 전류 인가의 영향: 권주민(성균관대학교), 김정웅(포항공과대학교), 조형준(Max Planck Institute for Sustainable Materials), 정경재*(성균관대학교)

Keywords: 오스테나이트계 스테인리스강, 정적 변형 시효, 침입형 원소, 상 안정성, 전류 인가

오스테나이트계 스테인리스강은 우수한 내식성과 가공성을 갖는 대표적인 구조재료이지만, 상대적으로 낮은 항복강도를 보완하기 위한 효과적인 강화 공정이 요구된다. 냉간 압연 후 정적 변형 시효는 강도 향상에 효과적이나, 장시간의 열처리는 공정 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 특정 온도 영역에서 예민화에 따른 내식성 저하를 유발할 수 있다. 본 연구에서는 오스테나이트 안정성이 서로 다른 두 종류의 오스테나이트계 스테인리스강을 대상으로 전류 인가가 정적 변형 시효에 미치는 영향을 조사하고, 이를 일반 열처리와 비교하였다. 냉간 압연된 시편에 다양한 온도와 시간 조건에서 일반 열처리와 전류 인가를 실시한 후 인장 강도를 평가하였다. 그 결과, 동일한 온도 조건에서 전류를 인가한 시편은 일반 열처리 시편보다 높은 인장 강도를 나타냈으며, 이러한 강화 효과는 보다 낮은 온도와 짧은 처리 시간에서도 확인되었다. 전자후방산란회절 분석을 통해 시효 및 전류 인가 전후의 변형조직 변화를 분석하고, 실시간 방사광 X선 회절을 이용하여 처리 과정에서의 결정학적 변화를 추적하였다. 또한 원자탐침단층분석을 통해 침입형 원소의 나노미터 규모 분포와 처리 조건에 따른 재분포 양상을 분석하였다. 이러한 결과를 바탕으로 오스테나이트 안정성과 전류 인가

에 따른 변형조직 및 침입형 원소의 재분포 차이를 비교하고, 이들의 상호작용이 정적 변형 시효 메커니즘에 미치는 영향을 규명하고자 한다. 이를 통해 오스테나이트계 스테인리스강의 정적 변형 시효에 대한 이해를 확장하고, 전류 인가를 활용한 저온·단시간 시효 공정 설계의 기초를 마련하고자 한다.

[P17-11]

고강도 API 라인파이프강의 인장 및 충격, 수소취성 특성 비교: 배영훈, 오동규, 황병철*(서울과학기술대학교 신소재공학과)

Keywords: Linepipe steel, Microstructure, Hydrogen embrittlement, Slow strain-rate test (SSRT), Relative notch tensile strength (RNTS)

최근 수소사회로 발전하면서 수소 사용량이 증가함에 따라 수소의 저장과 운송 인프라 구축에 대한 중요성이 증대되고 있다. 그 중 고압수소 운송용 라인파이프강은 대량의 수소를 효율적으로 생산지부터 사용처까지 운송할 수 있어 주목받고 있다. 그러나 라인파이프강과 같은 금속재료는 수소환경에 노출되면 수소가 금속 내부로 확산되어 기지 내 결함에 트랩 (trap) 및 확산하면서 재료의 강도와 연성을 현저히 저하시키는 수소취성 현상이 발생할 수 있다. 따라서 고압으로 수소를 운송하는 환경에서 라인파이프강의 안정성을 확보하려면 가스 내압을 견디기 위한 높은 강도뿐만 아니라 우수한 내수소취성의 동시 달성이 필수적이다. 한편 라인파이프강은 열간압연 이후 가속냉각을 통해 제조되면서 다각형 페라이트, 입상형 베이나이트, 펄라이트 등 복잡한 미세조직 형성을 통해 물성을 확보한다. 높은 강도와 내수소취성 조합을 갖는 라인파이프강을 개발하기 위해서는 이러한 미세조직이 기계적 특성과 수소 트랩 및 수소취성 거동에 미치는 영향을 체계적으로 이해하고 미세조직을 설계할 필요가 있다. 본 연구에서는 페라이트 및 베이나이트계 기지 조직에 일부 펄라이트를 포함하는 API 라인파이프강을 대상으로 미세조직을 자세히 분석하였다. 또한 전기화학적 수소 주입과 동시에 저속 변형률 시험 (Slow strain-rate test, SSRT)를 수행하고 노치인장강도비 (Relative notch tensile strength, RNTS)를 기반으로 내수소취성을 평가하였다. 추가적으로 수소 주입 전후 파단면의 파괴 형태를 분석함으로써 미세조직적 수소취성 메커니즘의 상관관계를 규명하였다.

[P17-12]

Mechanical Properties of NiCoFe Medium-Entropy Alloy-Coated 3D Glassy Carbon Architectures: Elif Nur ADALI, Isoo Jeon(Korea Advanced Insitute of Science and Technology (KAIST)), Kneev Sharma, Vishnu Nair, Jan Torgersen(Technical University of Munich (TUM)), Seung Min J. Han*(Korea Advanced Insitute of Science and Technology (KAIST))

Keywords: 3D Nanoarchitecture, Glassy Carbon, Medium Entropy Alloy

Glassy carbon (GC) architectures fabricated by two-photon polymerization and high-resolution advanced additive manufacturing methods offer low density, thermal stability, and chemical inertness, but their intrinsic brittleness and relatively low load-bearing capability limit their use in engineering systems. Introducing a conformal secondary phase onto architected scaffolds has appeared as an effective method to overcome such mechanical limitations. For instance, recent work on Ni–Al_2O_3 nanoarchitectures (Kang et al.) showed that a conformal ceramic coating improves compressive strength due to the nanoscale size effects and dislocation blocking at the interface. Based on this strategy, this study investigates NiCoFe medium-entropy alloy (MEA) coatings as a metallic reinforcement for three-dimensional porous GC architectures. Compared with single-component metallic coatings, MEA coating offers a method to obtain higher mechanical strength, while electroless plating enables uniform, conformal deposition over complex porous geometries. Porous GC structures of different architectures are coated with NiCoFe via electroless plating, and the coating morphology, elemental composition, and uniformity are characterized by SEM, EDS and FIB. The effect of coating thickness on the effective modulus and compressive strength is investigated through nanoindentation and micropillar compression. This work aims to strengthen architected carbon materials and to investigate the effective design of MEA-coated GC electrodes for anion exchange membrane (AEM)-based electrolysis.

[P17-13]

저합금강 다층용접부의 입열조건에 따른 HAZ 미세조직 및 기계적 특성: 최동기*(서정대학교)

Keywords: High strength low steel, TMCP, CVN, FCAW, 다층용접

플랜트 구조물은 가혹한 사용 환경과 반복적인 피로하중에 지속적으로 노출되며, 이러한 조건은 철강재료의 기계적 성능 저하를 유발하여 구조물의 안전성과 내구성에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 특히 저온 환경에서 운용되는 플랜트 구조물의 경우, 적용 강재뿐만 아니라 용접이음부의 저온 인성과 파괴저항성을 확보하는 것이 구조적 건전성과 안전성을 보증하기 위한 핵심 요소이다. 고강도 극후판 강재는 판두께 증가에 따라 용접 시 요구되는 입열조건과 다층용접 열이력이 달라지며, 이에 따른 용접부 및 열영향부(Heat-Affected Zone, HAZ)의 미세조직 변화가 기계적 특성과 파괴인성에 큰 영향을 미친다. 특히 저온 환경에 적용되는 용접구조물에서는 샤르피 V-노치(Charpy V-Notch, CVN) 충격인성과 균열선단개구변위(Crack Tip Opening Displacement, CTOD)를 이용한 파괴인성의 확보가 중요하게 요구된다. 따라서 저온용 구조강은 높은 강도와 우수한 저온 인성을 동시에 확보해야 하며, 용접이음부 또한 모재에 상응하는 충분한 저온 파괴저항성을 가져야 한다. 본 연구에서는 TMCP(Thermo-Mechanical Controlled Process) 공정으로 제조된 항복강도 460 MPa급 이상의 극저탄소 저합금 고강도 극후판 강재를 대상으로 플럭스코어드아크용접(Flux-Cored Arc Welding, FCAW)을 적용하여 다층 용접이음부를 제작하였다. 용접은 Ar 혼합 보호가스를 적용한 MAG(Metal Active Gas) 방식의 자동용접장치를 이용하였으며, 용접 입열량 조건을 변화시켜 다층용접을 수행하였다. 용접시험편은 강재의 두께 방향 및 용접부 위치를 고려하여 기계적 특성 평가용 시험편을 각각 채취하였다. 제작된 다층 용접이음부에 대해 용접금속 및 HAZ의 미세조직을 관찰하고, 저온 조건에서 CVN 충격시험과 기계적 특성 및 파괴인성을 평가하였다. 이를 바탕으로 용접 입열조건 및 미세조직

변화가 저온 충격인성과 파괴인성에 미치는 영향을 분석하고, 연성-취성 천이(Ductile-to-Brittle Transition, DBT) 거동과 기계적 특성 간의 상관관계를 규명하였다. 또한 저온에서 발생하는 주요 파괴거동 및 파괴기구를 고찰함으로써 고강도 극후판 FCAW 용접이음부의 저온 구조건전성 확보를 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

[P17-14]

해양구조용 H형강 용접부의 저주기 피로 거동과 국부 변형의 결정학적 분석: 한재연, 박정현(국립창원대학교), 김재성(조선선재), 박형권, 이창훈(한국재료연구원), 정준호(현대제철), 홍현욱*(국립창원대학교)

Keywords: H-section steel, Flux-cored arc welding, Low-cycle fatigue, Strain localization, Schmid factor

해양 플랜트 산업의 확대와 함께 극한 환경에서 사용되는 구조용 강재의 중요성이 더욱 커지고 있으며, 그중 H형강은 주요 하중 지지 부재로 널리 적용되고 있다. 이러한 부재는 해상 환경에서 운용 중 파랑 및 바람과 같은 반복하중에 지속적으로 노출되므로, 구조 안정성 확보를 위해 우수한 피로 저항성이 요구된다. 특히, 실제 해양 구조물에서는 용접과 같은 접합 공정이 필수적으로 수반되며, 이 과정에서 형성되는 이종 미세조직은 국부 변형과 손상 집중을 유발할 수 있다. 따라서 모재 자체의 기계적 특성뿐 아니라 용접부의 건전성을 함께 평가하는 것이 중요하다. 그러나 관련 연구는 주로 고강도 확보 및 저온 충격 인성 향상에 집중되어 왔으며 저주기 피로 거동에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 460 MPa급 해양용 H형강의 FCAW (Flux-cored arc welding) 용접부를 대상으로 상온 저주기 피로 (Low-cycle fatigue, LCF) 거동과 손상 메커니즘을 고찰하였다. 모재는 페라이트-펄라이트 조직을 나타낸 반면, 용접부는 침상 페라이트 (Acicular ferrite) 지배의 용접금속과 열영향부에 형성된 베이나이트계 조직을 포함해 전형적인 over-matching 거동을 보였다. LCF 시험에서 용접부 시험편 역시 최종 파단은 모두 모재에서 발생하였으나, 피로 수명은 모재 시험편에 비해 다소 감소하였다. 또한, 피로 변형 거동에서도 차이가 나타났다. 모재는 cyclic softening 이후 뚜렷한 saturation stage를 나타낸 반면, 용접부는 saturation stage 없이 지속적인 cyclic softening 거동을 보였다. 피로 파단 직하 영역에서의 미세조직 분석 결과, 용접부 인접 모재에서는 높은 Schmid factor 기반의 slip system이 국부적인 변형 밴드를 형성시켰으며, 이러한 국부적인 변형 집중은 균열 발생의 우선 위치로 작용하여 용접부의 피로 저항성을 저하시킨 것으로 판단된다.

[P17-15]

D2 공구강의 합금원소에 따른 미세조직 및 경도 변화 연구: 김동규, 신상용*, 김정우, 박나현, 정세인, 박시형, 김동민, 김수현, 송호민(울산대학교)

Keywords: D2 공구강, 합금 조성, 열처리, 경도

공구강은 높은 내마모성 및 우수한 열적 안정성이 요구되는 대표적인 산업용 소재로서 냉간금형, 절삭공구 및 내마모 부품 등에 널리 활용되고 있다. 이 중 AISI D2 Steel은 높은 C 및 Cr 함량을 갖는 공구강으로, 마르텐사이트 기지와 Cr, Mo 및 V를 포함하는 합금 탄화물로 구성된 미세조직을 가진다. 응고 과정에서 형성되는 조대한 탄화물의 경우, 내마모성 향상에는 유리하나 탄화물 주변의 응력 집중으로 인해 충격 인성을 저하시키는 원인이 된다. 또한, 합금 조성과 템퍼링 온도는 기지 조직과 미세 탄화물의 석출 거동에 영향을 미치므로 최종적인 기계적 특성을 결정하는 주요 인자로 작용한다. 이에 본 연구에서는 합금 원소 함량과 템퍼링 온도 변화에 따른 미세조직과 기계적 특성을 분석하였다. 표준 AISI D2 강의 조성을 기준으로 주요 합금 원소인 C, Cr, Mo, V의 함량을 조절하여 VPM(Vacuum Plasma Melting) 공정을 통해 세 종류의 시편을 제작하였다. 각 시편은 1000 ºC에서 1시간 동안 열처리 후 상온의 물에서 급랭하였으며, 템퍼링의 경우, 540 ºC에서 1시간씩 2회 진행한 시편과 440 ºC에서 1시간씩 2회 실시한 시편을 통해 열처리 온도의 영향에 대해 분석하였다. 미세조직은 OM과 SEM을 이용하여 관찰하였으며, 미세조직 내 각 상의 분율 및 탄화물의 평균 크기를 측정하였다. 에너지 분산형 X선 분광분석(EDS)을 통해 기지와 탄화물에 분포하는 합금원소를 정성적으로 분석하였다. 또한 기계적 특성을 분석하기 위해 비커스 경도를 측정하여 시편의 템퍼링 온도와 합금 조성 변화에 의한 경도 변화를 평가하고, 나노인덴테이션 시험을 통해 미세 탄화물의 기계적 특성이 전체 경도에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 연구는 2026년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.20024344, '인장강도 1.0GPa 이상급 차세대 모빌리티 동력전달부품의 고속생산을 위한 AI기반 고탄소강 합금설계 및 7.0 L/hr급 소결기반적층 제조기술개발')

[P17-16]

잠수함용 고강도강 모재 및 용접부의 폭파변형 특성 평가 및 미세조직 분석: 김유섭*, 박시욱, 김용진, 송정규, 함진희, 양성호(국방과학연구소)

Keywords: 잠수함, 고강도강, 폭파변형특성, 미세조직, 변형메커니즘

잠수함은 은닉성, 생존성 및 운용 능력 향상을 위해 압력선체에 적용되는 강재에 대한 고강도화 기술 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 잠수함용 압력선체 구조물을 제작하기 위해서는 용접 공정이 필수적으로 적용되며, 이에 따라 판재 및 용접부의 기계적 물성 및 파괴 특성에 대한 평가가 필수적으로 요구된다. 특히, 압력선체에 적용되는 모재 및 용접부의 폭파변형 저항성을 확인하기 위하여 미해군연구소는 대기중에서 폭파균열생성시험 및 폭파변형시험을 통한 물성 평가를 지속적으로 수행해왔다. 본 연구에서는 가스메탈아크용접 방법으로 만들어진 잠수함용 고강도강의 모재 및 용접부를 대상으로 폭파변형 특성 평가를 실시하였다. 순간적인 폭압 및 고온을 동반하는 폭파변형으로 인해 발달하는 미세조직적 특성에 대해 분석하였고, 이를 바탕으로 폭파변형에 따른 변형메커니즘을 규명하였다.

[P17-17]

핫셀 내 충격시험기를 이용한 S45C재료의 연성-취성 천이온도 분석: 김태영*(한국원자력연구원)

Keywords: 핫셀, 충격시험, 연성-취성 천이온도

핫셀은 방사선이 조사되어 방사화 된 금속시험편의 물성 분석을 할 수 있는 시험시설로서, 조사된 금속의 물성을 평가하기 위해

여러 시험장비를 구비하고 있다. 핫셀 내 여러 시험장비 중, 샤르피 충격시험 장비는 금속의 온도에 따른 충격 흡수에너지를 측정하여 조사취화에 따른 금속의 물성변화를 분석하는데 사용된다. 핫셀에서는 일반적인 실험실 내 충격시험과 달리, 방사화된 시험편으로 충격시험을 진행해야 하기 때문에 원격으로 핫셀 시험을 진행해야 한다. 특히, 충격시험의 경우는 정확한 시험편의 정렬과 챔버로부터 나왔을때 빠른시간에 시험이 진행되어야 하기 때문에, 핫셀 내에 여러 시험장비를 개조하여 시험을 진행해야 한다. 본 연구에서는 핫셀 내 충격시험기, 원격 조종기 및 온도 측정장비를 이용하여 일반적인 탄소강 중 하나인 S45C의 연성-취성 천이온도 분석을 진행하였다. 충격시험온도는 -60도에서 60도 까지 각 20도 마다 시험을 진행하고, 전이구간에서 온도를 조밀하게 배치하여 0도, 5도, 10도, 15도, 20도에서 추가로 시험을 진행하였다. 시험 시 목표온도 도달 후 최소 30분간 유지시킨 후 시험을 진행하였고, 충격시험은 원격으로 진행하기 위해 금속바와 에어피스톤을 이용하여 시험편을 정렬시키고, 원격 버튼을 통해 시험기 해머를 5초 내로 낙하 시켰다. 시험편 회수 후 파단면을 분석하여 파단율을 분석하고, 연성-취성 천이 그래프를 그려 천이온도를 확인 하였다.

[P17-18]

고탄소 공구강의 열처리 공정에 따른 미세조직 및 경도 변화 연구: 박나현, 신상용*, 김정우, 김동규, 정세인, 박시형, 명재현(울산대학교)

Keywords: D2, 공구강, 합금 조성, 열처리, 경도

공구강은 높은 경도와 내마모성 및 열적 안정성이 요구되는 산업용 소재로서 금형, 절삭공구 및 내마모 부품 등에 널리 활용되고 있다. 특히 D2계 공구강은 고탄소-고크롬 합금으로써 열처리 과정에서 형성되는 조대한 Cr계 탄화물은 조직 불균일과 응력 집중을 유발하여 기계적 특성을 저하시킬 수 있다. 따라서 합금원소의 함량과 열처리 조건에 따른 미세조직 변화를 제어하는 것은 공구강의 기계적 특성을 결정하는 중요한 요소이다. Cr은 Cr계 탄화물 형성을 통해 경도와 내마모성 향상에 기여하며, Mo는 템퍼링 과정에서 합금 탄화물의 석출과 2차 경화를 유도한다. 또한 V는 미세하고 열적으로 안정한 V-rich 탄화물을 형성하여 결정립 성장을 억제하고 석출강화 효과를 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 Cr, Mo, V 함량을 변화시켜 제조한 시편을 1000 ºC에서 1 시간 오스테나이트화한 후 수냉하였으며, 저온 템퍼링과 고온 템퍼링 조건에서 탄화물 석출 거동 및 2차 경화 효과를 평가하기 위해 440 ºC 및 540 ºC에서 각각 1 시간씩 2 회 템퍼링하였다. OM 및 SEM/EDS 분석을 통해 탄화물의 크기, 형상, 분율 및 원소 분포를 평가하였으며, 비커스 경도 시험과 나노인덴테이션 분석을 통해 경도 변화를 분석하였다. 이를 통해 D2계 공구강의 Cr, Mo, V 함량과 템퍼링 온도에 따른 탄화물 형성 거동 및 경도 변화의 상관관계를 규명하고자 하였다. 본 연구는 2026년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.20024344, '인장강도 1.0 GPa 이상급 차세대 모빌리티 동력전달부품의 고속생산을 위한 AI기반 고탄소강 합금설계 및 7.0 L/hr급 소결기반적층 제조기술개발')

[P17-19]

STR660 Fe-Ni계 초합금의 합금 조성 및 열처리에 따른 γ′ 석출 거동과 변형기구: 한재연, 황동현(국립창원대학교), 박대영, 신정호((주)세아창원특수강), 홍현욱*(국립창원대학교)

Keywords: Fe–Ni based superalloy, Alloy composition, Heat treatment, γ′ precipitates, Tensile properties

해양플랜트용 체결부품은 고염분 및 고하중 환경에 장기간 노출되므로 우수한 내식성과 높은 기계적 강도가 동시에 요구된다. 현재 해양 환경에는 슈퍼오스테나이트 스테인리스강과 같은 고내식 소재가 적용되고 있으나, 이들 소재는 상대적으로 낮은 항복강도로 인해 고하중 체결부품에 적용하는 데 한계가 있다. 반면, Ni계 초합금은 높은 강도와 내식성을 확보할 수 있으나 고가 합금원소의 다량 첨가로 인해 경제성이 제한된다. 이에 따라 높은 강도와 내식성 및 가격 경쟁력을 함께 확보할 수 있는 Fe–Ni계 γ′ 석출경화형 초합금의 적용이 주목받고 있다. 본 연구에서는 해양플랜트용 고강도·고내식 체결부품으로의 적용을 목적으로 STR660 Fe–Ni계 초합금의 조성 및 열처리 조건에 따른 γ′상과 η상의 석출 거동을 분석하고, 이에 따른 상온 기계적 특성과 변형기구의 변화를 규명하였다. Thermo-Calc 열역학 계산을 통해 C와 Nb 함량 및 Ti/Al 비에 따른 평형상의 분율 변화를 비교하여 γ′상의 안정성 확보와 유해상 형성 억제를 위한 조성 범위를 검토하였다. 계산 결과, C와 Nb 함량이 증가함에 따라 η상의 평형 분율이 일부 감소하였으며, η상의 형성을 억제하기 위해서는 적정 Ti/Al 비의 유지가 필요한 것으로 나타났다. 열처리는 ASTM A453 Grade 660 Class D 규격을 만족하는 온도 범위에서 수행하였으며, 용체화 처리 시간과 시효 처리 시 승온 속도 및 냉각 방식을 조절하여 공정 조건에 따른 γ′상과 η상의 크기, 분율 및 분포를 정량적으로 평가하였다. 이후 상온 인장시험을 통해 열처리 조건에 따른 기계적 특성을 비교하고, 인장 파단면과 변형된 시편의 미세조직을 분석하였다. TEM 분석 결과, 인장 변형 과정에서 전위에 의한 γ′상 전단이 관찰되었으며, 합금 조성 및 열처리에 따른 석출 거동이 STR660 합금의 강도와 변형기구를 결정하는 주요 인자로 작용함을 확인하였다.

[P17-20]

이종소재 접합용 초음파 혼의 Dovetail 체결 방식 최적화를 위한 하중별 응력 및 안전율 경향성 분석: 이영인((재)한국화학융합시험연구원), 신재오*(나이프플러스(주)), 전재혁((재)한국화학융합시험연구원)

Keywords: Dovetail, Ultrasonic horn, Comparison of stress distribution and safety factor

진동을 이용한 기술은 기계, 전기, 전자 등 전 산업부문에서 적용되고 있으며, 그 중 초음파 용착은 접착 및 접합기술의 일종으로 첨단산업분야에서 사용되고 있다. 최근 이종재료간의 접합이 새로운 필수 기술로 인식되면서 중요성을 인식하게 되었으며, 초음파 용착 혼의 설계 기술은 미국, 일본, 유럽에서 많이 발전하여 왔으며, 국내에서도 그 기술이 점차 발전하고 있다. 기존 이종소재 접합용 초음파 혼의 경우, 널 플레이트의 극심한 마모량으로 인해 매우 짧은 내구수명을 가지고 있어 평균 수 일내로 교체가 이뤄지고 있으며, 이로 인한 설비의 가동 중지 문제와 유지보수 시간 및 비용 등으로 생산효율에 있어 큰 손실을 초래하고 있다. 이에, 기술개발을 통해 Dovetail 체결 방식 및 볼트 체결 방식을 적용한 초음파 혼을 개발한 다음 성능평가를 수행함으로써 최적의 체결 방식

을 선정하고자 한다. 본 연구에서는 사전 조사자료 및 기초연구를 통해 4가지 유형의 Dovetail 체결 방식을 선정하였으며, 각 유형별 체결 방식이 적용된 제품에 대해 하중별 응력분포 및 안전율에 대한 구조해석을 수행하였다. 이러한 구조해석 결과를 종합적으로 분석함으로써 최적의 Dovetail 체결 방식을 도출하고, 이를 체계적으로 정리해 향후 초음파 혼 설계 및 제작 과정에서 활용할 수 있는 기초자료로 구축하고자 한다. 후기 본 연구내용은 중소벤처기업부에서 시행한 2024년도 중소기업기술혁신개발사업 시장확대형(전략형)의 지원을 받아 수행한 연구개발 내용입니다(과제번호: RS-2024-00487025).

P18 : 재료분석
Room 1층 전시홀, 10월 29일

[P18-1]
금속 응고·열처리의 실시간 3차원 이미징을 위한 방사광 가속기용 고온 용해로 개발 및 검증: 조원준(경북대학교), 한지훈(한국기초과학지원연구원), 최선호, 곽호재(포항가속기연구소), 한인성*(경북대학교)
Keywords: in situ tomography, in situ heat treatment imaging, Synchrotron radiation

금속 재료의 응고 및 열처리 과정에서 발생하는 미세구조의 형성·진화와 응고 결함은 최종 기계적 성질을 결정하는 핵심 요인이다. 그러나 대부분의 재료 연구는 최종 미세구조와 기계적 성질 간의 상관관계를 기반으로 결과론적으로 해석하기 때문에, 미세구조와 결함이 형성·발달하는 동적 과정을 직접 규명하는 데에는 한계가 있다. 최근 방사광가속기의 고에너지 X선을 활용한 실시간 응고 및 열처리 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 포항가속기연구소 9D 백색광 빔라인에서는 고온 radiography를 이용한 동적 관찰이 가능하다. 그러나 2차원 영상 정보만으로는 금속간화합물의 부피, 방향성, 곡률과 수축결함의 형상 및 연결성 등 실제 산업 문제와 밀접한 3차원 미세구조를 정량적으로 분석하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 방사광 가속기 기반 실시간 3차원 이미징이 가능한 고온 용해로와 실험환경을 구축하고, 이를 검증하기 위해 알루미늄 6XXX계 합금의 응고 및 열처리 과정에서 금속간화합물의 3차원 미세구조 진화를 관찰하였다. 구축된 시스템을 통해 고온 환경에서 재료 내부의 미세구조 진화를 실시간으로 3차원 이미징할 수 있음을 검증하였으며, 향후 금속 재료의 진화에 대한 정량 해석을 위한 실험 플랫폼으로 활용될 것으로 기대된다. 나아가 본 연구는 고성능 합금 및 제조 공정 설계를 위한 핵심 기반기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P18-2]
HRSG용 AFA 오스테나이트계 내열강에서 다양한 시효조건에 따른 미세 조직변화와 석출물의 성장 거동에 대한 연구: 신선웅(국립부경대학교, 한국재료연구원), 박봉천(한국재료연구원), 장재훈(동아대학교), 김성대*(국립부경대학교), 박이호*(한국재료연구원)
Keywords: 금속, 알루미나 포밍 오스테나이트

최근 전력 수요 증가와 탄소 배출 저감 요구가 확대됨에 따라, 발전 시스템의 에너지 효율 향상이 중요한 기술적 과제로 대두되고 있다. 복합화력발전은 가스터빈과 증기터빈을 결합한 발전 방식으로 높은 에너지 생산 효율을 확보할 수 있어 주목받고 있다. 배열회수보일러(Heat Recovery Steam Generator, HRSG)는 가스터빈의 배기가스를 회수하여 고온·고압의 증기를 생산하며, 이 증기는 증기터빈으로 보내져 2차 발전에 이용된다. 증기터빈의 발전 효율을 높이기 위해서는 높은 온도와 압력의 증기가 요구되며, 이 경우 HRSG의 고온부 소재에는 우수한 내산화성과 크리프 강도가 동시에 요구된다. Alumina-forming austenitic(AFA) 내열강은 Al 첨가를 통해 고온에서 표면에 안정한 Al_2O_3 보호피막을 형성함으로써 기존 Cr_2O_3 형성형 오스테나이트계 내열강에 비해 우수한 내산화성을 나타낸다. 또한, $M_{23}C_6$, Laves, NiAl, NbC와 같은 다양한 석출상을 가지는 미세조직을 가지며, 이러한 석출상은 고온에서 전위의 이동을 억제하여 크리프 강도를 향상시키는 데 기여한다. 이에 따라 AFA강은 복합화력발전소 HRSG 고온부 구조재로의 적용이 기대되고 있다. 특히, W 첨가는 고용강화와 석출상 조대화 억제 효과를 통해 AFA강의 장시간 고온 크리프 저항서을 추가로 향상시킬 것으로 기대된다. 본 연구에서는 AFA강 및 W을 첨가한 AFA-W강을 대상으로 650 ºC와 700 ºC에서 각각 1, 2, 4, 8일간 시효처리를 실시하고, 시효 시간 및 온도에 따른 미세조직 변화를 SEM, TEM 등을 활용하여 분석하고자 한다. 예비 미세조직 분석 결과, 두 합금에서 $M_{23}C_6$, Laves상, NiAl, primary 및 secondary NbC가 확인되었으며, 시효 시간 증가에 따라 이들 석출상의 조대화가 진행되는 경향이 관찰되었다. 본 연구를 통해 AFA강 및 AFA-W강의 장시간 고온 노출에 따른 석출상 안정성 및 미세조직 진화 거동을 규명함으로써, 장기 열처리 시 미세조직의 변화 과정을 예측하는데 기여할 것으로 기대된다.

[P18-3]
전자기 비파괴 평가를 활용한 1.5 GPa급 자동차용 초고장력 강판의 기계적 특성 상관관계 분석: 어윤경, 박채연(서울과학기술대학교), 유성호, 유정현(아산), 변재원*(서울과학기술대학교)
Keywords: 초고장력 강판(AHSS), 비파괴 평가(NDE), 바크하우젠 노이즈, 와전류, 보자력, 전기전도도, 물성 상관관계

자동차용 1.5 GPa급 초고장력 강판 SPFC1470은 원소재 제조 과정에서 강도 편차가 발생할 경우, 향후 롤 포밍(Roll Forming) 등의 후속 가공 공정에서 성형 불량이 유발될 수 있다. 따라서 가공 전 원소재 단계에서 품질 산포를 사전에 정밀 분석하는 기술이 요구된다. 기존의 파괴적 물성 평가 방식은 전수 검사에 한계가 있으므로, 원소재의 물성 편차를 신속하게 평가할 수 있는 비파괴적 검사 기법의 도입이 필수적이다. 본 연구에서는 SPFC1470의 원소재 품질 산포를 사전 예측하기 위해 전자기 비파괴 평가 및 기계적 특성 간의 상관관계(correlation)를 도출하였다. 바크하우젠 노이즈(Barkhausen Noise) 측정을 통해 소재의 보자력(coercivity)을 평가하고, 와전류 탐상 검사(Eddy Current Testing)를 수행하여 전기전도도(electrical conductivity) 변화를 정밀 측정하였다. 이후 경도 시험(Hardness Test)을 통해 얻은 기계적 특성 데이터와 전자기적 물성 치를 매칭 및 피팅(fitting)하여 정량적 상관관계를 규명하였다. 본 연구 결과는 공정 전 단계에서 비파괴적 물성 평가를 통해 불량 소재를 선제적으로 선별할 수 있는 기술적 기반을 제시한다. 나아가 축적된 비파괴 측정 데이터셋(dataset)을 활용하여 AI 기반 결함 자동 분류 알고리즘 및 예측 모델을 구축함으로써, 자동차 부품 제조 공정의 사전 품질 평가 시스템 최적화 및 운용 신뢰성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

[P18-4]

In-situ TEM Analysis of Ferro-rotational Order Switching in 1T-TaS_2: Huseung Lee, Hyobin Yoo*(Seoul National University)

Keywords: In-situ TEM, Diffraction, vdW materials, Charge density wave, Ferro-rotational order

Various ferroic properties, such as ferroelectricity and ferromagnetism, are widely studied due to their significance in material device applications. Recently, ferro-rotational order—arising from structural rotation—has attracted increasing attention. Understanding its switching characteristics requires analyzing ferro-rotational domain dynamics, where distinct ferroic orders coexist. However, unlike ferroelectricity and ferromagnetism, ferro-rotational order does not directly couple with electric or magnetic dipoles, making it challenging to observe switching behavior induced by external stimuli. In this work, we investigate 1T-TaS_2, a charge density wave (CDW) material that hosts ferro-rotational order in its modulated lattice. Using in-situ transmission electron microscopy (TEM), we explore the switching behavior of ferro-rotational order by controlling temperature and applying electric bias. Our finding provides new insights into the structural relationship between CDW and ferro-rotational order, offering pathways for engineering ferro-rotational properties.

[P18-5]

Nb 및 V 첨가에 따른 고망간강의 오스테나이트 결정립 성장 거동 모델링: 김수환(한국재료연구원, 동아대학교), 박봉천(한국재료연구원), 장재훈, 이학성*(동아대학교), 박이호*(한국재료연구원)

Keywords: 고망간강, 결정립 성장

고망간강(High-Mn steels)은 우수한 연성 및 가공경화능을 바탕으로 고강도 구조용 소재로 주목받고 있으나, 적용 범위를 확대하기 위해서는 강도와 연신율 등 기계적 물성의 향상이 요구된다. 본 연구에서는 여러 강화기구 중 Hall–Petch 관계에 기반한 결정립 미세화에 초점을 맞추었다. Nb, V, Ti와 같은 합금 원소는 수 nm에서 수십 nm 크기의 MX 탄질화물을 형성하여 오스테나이트 결정립계의 mobility를 억제하고 결정립 성장을 지연시킬 수 있다. 이때 합금 조성과 열처리 조건에 따른 최종 결정립 크기를 정량적으로 예측하는 것은 결정립 미세화를 활용한 공정 설계에 중요하다. 합금 원소에 의한 결정립 성장 억제는 주로 Zener pinning과 solute drag에 의해 설명된다. Zener pinning은 결정립계에 분포한 미세 MX 탄질화물이 계면의 이동을 물리적으로 저지하는 현상으로, 입자의 체적분율이 높고 크기가 작을수록 결정립계 이동을 억제하는 pinning pressure가 증가한다. 반면 solute drag는 Nb, V 등의 용질 원자가 결정립계에 편석하여 계면과 상호작용함으로써 결정립계 이동 속도를 감소시키는 현상이다. 따라서 실제 결정립 성장 거동을 정량적으로 예측하려면 두 효과를 함께 고려한 모델이 필요하다. 본 연구에서는 Nb 및 V 첨가가 고망간강 오스테나이트 결정립 성장에 미치는 영향을 분석하고, 합금 조성과 열처리 조건에 따른 오스테나이트 결정립 크기를 예측할 수 있는 성장 모델을 개발하고자 하였다. 이를 위해 무첨가강(Base), Nb 첨가 합금, V 첨가 합금 및 Nb–V 복합첨가 합금을 제조하고 다양한 열처리 조건에서 오스테나이트 결정립 성장 거동을 분석하였다. 특히, Nb 첨가 합금은 V 첨가 합금보다 결정립 성장이 효과적으로 억제됨을 확인하였다. 또한 측정된 결정립 크기를 기반으로 경험적 모델(empirical model)의 주요 계수를 도출하여 열처리 조건에 따른 결정립 크기를 예측할 수 있는 결정립 성장 모델을 구축하였다. 본 모델은 결정립 미세화 효과를 정량화하고 최종 결정립 크기를 예측함으로써, 고망간강의 합금 조성 및 열처리 공정 설계에 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

[P18-6]

Real-Time Observation of Skyrmion Dynamics in Fe3GaTe2 under External Stimuli: Sejin An, Younghwan Shin(Seoul National Univ.), Beom Tak Kang, Jun Sung Kim(Pohang Univ. of Science and Technology), Hyobin Yoo*(Seoul National Univ.)

Keywords: Lorentz TEM, vdW magnet, magnetic skyrmion

Magnetic skyrmions are topologically nontrivial spin textures characterized by a vortex-like configuration, and they have attracted significant attention as information carriers in spintronic devices owing to their high stability and low-power controllability. In particular, skyrmions in van der Waals magnetic materials are typically smaller in size and require lower driving currents compared to those in conventional multilayer magnetic thin films, making them advantageous for high-density and low-power device applications. However, a comprehensive understanding of the mechanisms underlying skyrmion nucleation, annihilation, motion, and deformation remains incomplete, and precise control strategies within device architectures have yet to be fully established. To elucidate the transformation mechanisms of skyrmions, we employed in-situ Lorentz transmission electron microscopy to investigate the evolution of skyrmions in the van der Waals metallic ferromagnet Fe_3GaTe_2 under external stimuli. As the applied magnetic field strength increased, skyrmions were nucleated from labyrinthine magnetic domains and subsequently annihilated as the system transitioned into a single-domain state. Furthermore, when the sample was heated above the Curie temperature under a constant magnetic field and then cooled down to room temperature (field cooling, FC), a high density of skyrmions was generated.

[P18-7]

Atomic-scale Characterization of Nanoscale Chemical Heterogeneity in Silicate Glasses Using Atom Probe Tomography: Chang-Gi Lee, Yeon Ha Jo, Se-Ho Kim*(Korea University)

Keywords: Material Characterization, Atom Probe Tomography, Silicate glass

Silicate glasses are composed of silicate structures and are widely used in various industries, including semiconductors, multilayer ceramic capacitors (MLCCs), and mobility applications. In these silicate materials, the incorporation of cations such as aluminum and

sodium can modify the atomic-scale structure and consequently alter the properties of the glass. However, silicate materials are highly susceptible to electron-beam irradiation, making it challenging to characterize their atomic-scale structures using conventional analytical techniques. Atom probe tomography (APT) is a three-dimensional characterization technique that provides near-atomic spatial resolution and high chemical sensitivity, enabling the effective analysis of clusters and nanoscale precipitates. In this study, APT was used to investigate the composition and spatial distribution of cations within the glass at the atomic scale, providing insights into the structural characteristics and properties of silicate glasses.

[P18-8]

Tailoring Structural, Magnetic, and Table-Like Magnetocaloric Properties of $Gd_{2-x}Ho_xNi_{17}$ Intermetallic Compounds through Ho Substitution: Kiran Shinde*, Sung Hwan Hong(Sejong University), Younghun Jo(Korea Basic Science Institute, Daejeon), Dilshodbek Yusupov, Muhammad Aoun Abbas, Ki Buem Kim(Sejong University)

Keywords: Magnetocaloric effect, Rare-earth intermetallic compounds, Magnetic phase transition; Hydrogen liquefaction

Rare-earth intermetallic compounds have attracted significant attention owing to their tunable magnetic transition temperatures and magnetocaloric properties. In this work, Ho substitution was employed to tailor the structural, magnetic, and magnetocaloric behavior of $Gd_{2-x}Ho_xNi_{17}$ (x=0, 0.25, 0.50, and 0.75). Polycrystalline samples were synthesized by conventional arc melting followed by annealing at 900 ^oC for 48 h. X-ray diffraction confirmed that all samples adopt the hexagonal Th_2Ni_{17}-type crystal structure with space group $P6_3/mmc$. The monotonic decrease in the lattice parameters with increasing Ho substitution indicates the successful incorporation of Ho into the crystal lattice and is consistent with the lanthanide contraction. Magnetic measurements show a monotonic change in the magnetic compensation temperature, varying from 156 to 109 K when replacing Gd with Ho. This, in turn, affected the temperature at which the derivative of the magnetization reaches its minimum (T_B), which corresponds to the maximum of the MCE. T_B changed from 32 to 20 K when Gd was replaced with Ho. The maximum magnetic entropy change ($-\Delta S_M$) under a field change of 3 T are 1.10, 1.51, 1.15, and 1.70 J/kg.K for (x = 0, 0.25, 0.50, and 0.75, respectively. Notably, the (x = 0.50) composition exhibits a broad table-like ΔS_M profile spanning 18–57 K together with a maximum adiabatic temperature change (ΔT_{ad}) of 0.79 K under 1.8 T. These results demonstrate that Ho substitution effectively tunes the magnetic transition temperature and magnetocaloric response of $Gd_{2-x}Ho_xNi_{17}$ with the (x = 0.50) composition showing particular promise for cryogenic magnetocaloric applications.

[P18-9]

열처리 조건에 따른 열폭주 방지용 실리카 에어로젤의 열적 안정성 및 구조 변화: 이종범*, 박진호(한국생산기술연구원)

Keywords: 실리카에어로젤, 열안정성, 비표면적

실리카 에어로젤은 나노 크기의 다공성 구조와 Knudsen 효과에 기인한 초저열전도 특성으로 인해 우수한 단열 소재로 활용되고 있으며, 특히 고온 열전달을 억제하는 열폭주 방지용 구조재로의 적용 가능성이 높다. 그러나 열폭주와 같은 고온 환경에 노출될 경우 기공 붕괴와 구조적 치밀화가 발생하며, 이로 인해 열전도도가 증가하고 단열 성능이 저하될 수 있다. 따라서 실리카 에어로젤의 고온 열적 안정성과 구조 변화 거동에 대한 이해는 열폭주 방지용 구조재 적용을 위해 매우 중요하다. 본 연구에서는 실리카 에어로젤을 고진공 분위기에서 열처리한 후, Brunauer–Emmett–Teller(BET) 이론 기반 질소 흡착 분석을 통해 비표면적(Specific Surface Area, SSA)의 변화를 평가하였다. 또한 각 온도 조건에서 시간에 따른 SSA 감소 거동을 이용하여 비표면적 감소 속도론을 분석하였으며, Arrhenius 식을 기반으로 속도상수(k) 및 활성화에너지(Q)를 도출하였다. 추가적으로 Raman 분광 분석을 수행하여 열처리에 따른 구조적 결함 변화를 분석하였다. 연구 결과, 열처리 온도와 시간이 증가함에 따라 SSA가 현저히 감소하였으며, 이는 기공 붕괴 및 구조 치밀화가 점진적으로 진행됨을 의미한다. 또한 계산된 활성화에너지는 열적으로 활성화된 구조 재배열 메커니즘이 지배적으로 작용함을 시사하였으며, Raman 분석 결과 역시 결함 구조의 변화 경향을 뒷받침하였다. 본 연구 결과는 열폭주와 같은 고온 환경에서 실리카 에어로젤의 구조 안정성 및 열적 열화 거동을 이해하고, 열폭주 방지용 구조재로의 적용 가능성을 평가하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

[P18-10]

다이캐스팅 용탕 유동성 향상을 위한 금형 표면의 미세패턴 형성에 관한 연구: 이락규*, 김용유, 윤국태, 김주업, 김봉고, 홍창완((재)대구기계부품연구원)

Keywords: 다이캐스팅, 유동성, 금형 texture, 미세패턴, air-gap

알루미늄 다이캐스팅 공정에서 용탕의 유동성은 제품 충진성, 표면 결함 발생에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소이며, 특히 자동차 부품의 경량화를 위한 박육/복잡한 형상의 제품 수요가 증가함에 따라 제품 표면부의 leak를 저감시킬 수 있는 유동성 향상에 대한 연구가 진행되고 있다. 알루미늄 용탕의 유동성을 향상시키는 방법은 Si 함량 조절, 과열, 유입속도 제어 등 전통적인 방안이 오랜 기간 보고되어 왔을 뿐만 아니라, 다이캐스팅 금형의 표면에 미세패턴을 형성하여 용탕의 유동성을 향상시키는 연구도 보고되고 있다. 금형의 표면에 미세패턴을 형성하면 용탕이 금형의 표면을 흐를 때 미세패턴 내부에 공기층(air-gap)이 형성되어 금형과 용탕 사이의 열유량을 감소시켜 단열효과를 발생시킨다. 동시에 표면의 유효 접촉각을 증가시켜 금형과 용탕 간의 젖음성을 감소시키며, 결과적으로 용탕의 흐름을 개선시키는 것으로 보고되었다. 미세패턴의 기하학적 형상은 용탕의 흐름에 영향을 미치는 가장 중요한 요소이기 때문에 미세패턴의 형상에 따른 유동성에 대한 연구는 다소 보고되었으나, 미세패턴의 홈 크기에 따른 유동성의 영향에 대해서는 거의 보고되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 용탕의 유동성을 향상시킬 수 있는 최적의 미세패턴 크기를 도출하기 위

해, 미세패턴의 폭과 깊이를 다양하게 변화하여 홈 크기에 따른 공기층(air-gap) 형성 경향을 조사하였다. 금형 소재의 표면에 폭/깊이 500 μm 홈을 형성하고 폭과 깊이를 각각 일정한 비율로 증가시키며 알루미늄 용탕에 장시간 노출시킨 후, 공기층이 유지되는 시간을 비교하여 최적의 미세패턴 홈 크기를 도출하였다. 또한, 홈 크기에 따른 열피로 저항 특성을 평가하여, 용탕 유동성을 향상시키면서 금형의 수명까지 고려한 최적의 미세패턴 홈 크기를 제안하고자 한다. (사사) 이 논문은 2024년도 정부(산업통산자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 산업기술국제협력센터(공동연구R&D) 기술개발사업(P0028335)의 지원을 받아 수행된 연구임.

[P18-11]

Understanding oxidation behavior of silicon carbide via Atom Probe and structural analysis: Won-Hyeong Lee, Yeon Ha Jo(Korea university), Tae-Hyeok Kang*(Korea Advanced Institute of Science and Technology), Se-Ho Kim*(Korea university)

Keywords: SiC, Oxidation, Atom Probe Tomography, Microstructural Analysis

Thermal oxidation of silicon carbide (SiC) is a promising approach for the fabrication of advanced power semiconductor devices. However, this process introduces detrimental interfacial defects and residues that degrade device performance, highlighting the critical need to clarify its underlying behavior. Despite this technological importance, the atomic-scale oxidation with carbon-removal mechanisms at the SiC surface and SiC/SiO2 interface remain a subject of debate. Overcoming the traditional metrological hurdles of quantitative compositional analysis in carbide and oxides systems, we investigate the interface evolution using advanced nanoscale characterization coupled with atom probe tomography (APT) using deep-ultraviolet laser(DUV) mode. In this paper, the wide range of oxidation mechanisms under oxidation at 1000 ^{o}C previously discussed for SiC was integrated and investigated. Planar oxidation of SiC, Si formation between SiC/SiO interface, oxide formation in cracks were observed with stacking faults within the SiC matrix along the SiC/SiO interface. Contrary to previous studies suggesting the formation of carbon clusters and CO bubbles during carbon diffusion, neither feature was observed under these conditions.

[P18-12]

Step Spiral Generation on the (-101) Surface of Calcium Oxalate Monohydrate Crystal Investigated by In Situ Liquid-Phase Atomic Force Microscopy: Kang Rae Cho*(Cheongju University)

Keywords: Step Spiral, Calcium Oxalate Monohydrate Crystal, In Situ Liquid-Phase Atomic Force Microscopy

Atomic force microscopy (AFM) is a powerful tool for investigating crystal growth and molecular-scale processes at mineral surfaces in solution. Here, I present the generation and evolution of molecular steps at dislocation outcrops on the (-101) surface of calcium oxalate monohydrate (COM) crystal, a major crystalline component of human kidney stones, and their modification by an acidic model peptide, L-aspartic acid 6mer (L-Asp$_6$), investigated by in situ liquid-phase atomic force microscopy. The results show that a segment of a budding triangular step spiral from the dislocation outcrop begins to move when it reaches a critical length. The adsorption of L-Asp$_6$ onto the budding step spiral induced an elliptical hexagonal morphology, indicating altered orientation-dependent step edge energies, and a pronounced delay in spiral generation. This study illuminates the mechanism in the generation of the COM step spiral on its broadest (-101) surface.

[P18-13]

미량합금원소 첨가에 따른 비열처리용 ADC12 다이캐스팅 합금의 미세조직 개량 방안: 김용윤*, 이락규, 윤국태, 김주업(대구기계부품연구원), 이수안(유림테크)

Keywords: 알루미늄, ADC12, 미량합금원소, 미세조직

다이캐스팅용 알루미늄 합금은 복잡한 제품의 형상을 구현하기 위해 용탕의 유동성을 향상시키는 Si을 다량 함유하며, 후속 시효 열처리없이 완제품으로서 as-cast 상태로 많이 활용되어왔다. 그러나 최근 완성차 업체에서 요구하는 부품의 물성이 향상되어, 추가적인 물성 확보를 위해 다이캐스팅용 알루미늄 합금계에 특정한 합금원소를 미량 첨가하여 상용 합금의 물성은 유지한 채 목표 물성만을 향상시키는 연구가 진행되고 있다. 다이캐스팅용으로 널리 활용되는 ADC12합금의 경우, 다량 함유된 Si과 금형 소착 방지를 위해 첨가되는 Fe로 인해 공정-Si상과 β-$Al_{14}Fe_3Si_3$상이 주로 침상 형태로 형성되는데, 이러한 침상형 이차상으로 인해 제품의 취성이 강해져 기계적 물성의 저하를 유발한다. 본 연구에서는 비열처리용 ADC12 합금의 기계적 물성을 향상시키기 위해, 미량합금원소인 Mn, Sr, Er, Y을 첨가하여 ADC12 합금의 미세조직을 개량하고, 미량합금원소가 기계적 물성에 미치는 영향을 비교하고자 한다. ADC12 합금의 기존 함유원소인 Mn 함량의 증가로 인해 지배적으로 존재하는 Fe-금속간화합물이 침상형 β-$Al_{14}Fe_3Si_3$상에서 구상형 α-Al_{16}(Mn, Fe)$_4Si_3$상으로 개량되었으나, 과함유된 Mn으로 인해 조대한 α상이 일부 존재하였다. Sr을 극미량 첨가하면 침상형 공정-Si상이 섬유상으로 개량되었다. 또한 Er-Y을 복합첨가하면 분산 강화에 효과적으로 기여하는 $L1_2$-Al_3(Er, Y)상이 열처리 없이 형성되어 기계적 물성이 향상되었다. (사사) 본 연구는 2023년도 정부(중소벤처기업부)의 재원으로 중소기업기술정보진흥원의 중소기업기술혁신개발 (RS-2023-00278457)의 지원을 받아 수행된 연구임

[P18-14]

Dose Rate Dependent Electron Beam Damage of Li_6PS_5Cl Solid Electrolyte Investigated by Cryo-TEM: Seungmin Lee, Yunseong Jeon, Choongbog Kim, Sung Kang, Yoon Huh, Jungjae Park*(Research Institute of Industrial Science & Technology (RIST))

Keywords: Li_6PS_5Cl, Sulfide solid electrolyte, Cryo-TEM, Electron beam damage, Electron dose rate

Sulfide-based solid electrolytes have attracted considerable attention for all-solid-state lithium batteries owing to their high ionic conductivity and favorable mechanical properties. However, Li_6PS_5Cl (LPSCl), a representative argyrodite-type sulfide solid electrolyte, is highly sensitive to air exposure and electron irradiation, making transmission electron microscopy (TEM) characterization challenging. In particular, electron-beam-induced structural degradation can alter the intrinsic structure of LPSCl during TEM observation, emphasizing the importance of establishing appropriate imaging conditions. In this study, cryogenic transmission electron microscopy (Cryo-TEM) was employed to investigate the structural degradation of LPSCl under electron irradiation. To prevent air exposure, LPSCl specimens were prepared and transferred to the TEM under an inert atmosphere. The effects of electron dose rate and specimen temperature on beam-induced structural changes were systematically examined by TEM imaging and real-time monitoring of electron diffraction patterns. Under electron irradiation, progressive structural degradation of LPSCl was observed, accompanied by changes in the electron diffraction patterns associated with the formation of LiCl-related crystalline phases. The onset and progression of beam-induced degradation strongly depended on the electron dose rate, while cryogenic conditions effectively suppressed structural degradation compared with room-temperature conditions. These results demonstrate that controlling both electron dose rate and specimen temperature is essential for reliable TEM characterization of beam-sensitive sulfide solid electrolytes.

[P18-15]

TEM 기반 MgO 표면 미세구조 및 화학적 특성 분석: 권다미, 최민영(나노종합기술원 분석평가센터), 박하은, 최진혁(영남대학교 산학협력단 중앙기기센터), 장성진, 박경진, 서윤경, 유정호(나노종합기술원 분석평가센터), 김지혜, 한주환(영남대학교 신소재공학부), 박윤창*(나노종합기술원 분석평가센터), 민봉기(영남대학교 산학협력단 중앙기기센터)

Keywords: Surface Analayis, MgO, $Mg(OH)_2$, TEM, EELS, XPS, TOF-SIMS

Magnesium oxide (MgO)는 높은 열적·화학적 안정성을 갖는 대표적인 세라믹 산화물로, 수분과의 반응에 의해 표면에 $Mg(OH)_2$가 형성될 수 있다. 이러한 표면 반응 및 처리에 따른 변화를 이해하기 위해서는 실제 표면에서 발생하는 미세구조와 화학적 변화를 나노스케일에서 직접 관찰하고 분석하는 것이 중요하다. 본 발표에서는 구연산(citric acid) 처리 유무(CA/NCA)에 따른 MgO 시료 표면의 구조 및 화학적 특성을 비교하기 위해 transmission electron microscopy (TEM) 기반의 복합 분석을 수행하였다. High-resolution TEM (HRTEM)을 이용하여 MgO 표면과 내부의 미세구조 및 격자 구조를 관찰하였으며, electron energy-loss spectroscopy (EELS)를 통해 동일한 미세영역에서 Mg, O 및 C의 신호와 edge structure를 비교하여 화학적 특성을 분석하였다. 또한 X선 광전자분광법(XPS)을 이용하여 구연산 처리 유무에 따른 MgO 표면의 화학적 상태를 비교하고, TOF-SIMS depth profiling을 통해 표면 성분의 깊이 방향 분포와 표면층의 두께 정보를 확인하였다. 이를 HRTEM에서 관찰된 미세구조 및 EELS 기반의 화학 정보와 교차 검증하여 MgO 표면과 구연산의 카복실기 사이의 상호작용 가능성을 평가하였다. 본 분석 사례를 통해 TEM 기반의 구조·화학 분석이 XPS 및 TOF-SIMS와 연계되어 소재 표면 및 계면의 국부적인 특성을 종합적으로 규명하는 데 효과적으로 활용될 수 있음을 제시하고자 한다.

[P18-16]

하나로(HANARO) 중성자 잔류응력측정장치(RSI) 소개 및 광학 비전 기반 센터링 보조 시스템 구축을 통한 장비 운영 효율화: 서보운, 강태욱, 채호병, 우완측*(한국원자력연구원)

Keywords: 중성자, 잔류응력

본 발표는 대한민국 유일의 고선속 중성자 연구로인 하나로(HANARO)의 잔류응력측정장치(RSI)를 활용한 연구 활동을 소개하고, 이용자 편의성과 정밀도 향상을 위해 새롭게 구축된 광학 비전 기반 센터링 보조 시스템의 운용 성과를 공유하고자 한다. 첨단 재료 과학을 위한 핵심 국가 시설로서, 하나로는 X-선과 달리 원자핵과 직접 상호작용하는 중성자를 이용하여 높은 투과력으로 정밀한 내부(Bulk) 분석을 가능하게 한다. RSI는 데바이-쉐러(Debye-Scherrer) 기하학 구조와 위치 민감형 검출기(파장 1.46 Å, 4° 커버리지)를 사용하여 2θ = 25–100° 범위의 회절 중성자를 측정하며, 이를 통해 용접부 및 적층 제조 금속과 같이 수 센티미터 두께의 시편에서도 훅의 법칙(Hooke's law)을 활용한 신뢰성 있는 잔류응력 매핑 및 미세조직 분석을 지원하고 있다. 본 연구에서는 기존 Theodolite 장비를 대체하여 정렬 반복성과 운용 효율을 극대화할 수 있는 디지털 광학 비전 기반의 센터링 보조 시스템을 구축하였다. 시스템은 산업용 고성능 카메라인 Basler acA2440-75um 모델을 PC와 USB3.0 인터페이스로 연동하고, Python 및 OpenCV 기반으로 live vision 화면을 구성하였다. 기존 RSI 모터 구동 시스템의 축 이동 제어 및 장비 좌표계 관리 기능을 그대로 유지하되, 비전 소프트웨어가 초기 캘리브레이션을 거쳐 획득한 빔 센터 기준점을 실시간 Crosshair 눈금으로 오버레이하여 시각적 좌표 보조를 전담하도록 역할을 분리하였다. 이를 통해 샘플 사전 정렬 과정에서 항상 동일한 시야와 기준점을 반복 재현할 수 있는 안정성을 확보하였다. 하나로 중성자 빔라인을 이용하고자 하는 연구자는 이용자 사무국(useroffice@kaeri.re.kr) 또는 장비 담당자(hob2021@kaeri.re.kr, chuckwoo@kaeri.re.kr)를 통해 빔타임 제안서를 제출해야 하며, 학술 목적의 연구는 이용료가 면제된다. 본 비전 보조 시스템의 도입은 향후 인장기나 환경 챔버를 활용한 실시간 모니터링 실험 등 다양한 변수 조건 하에서의 시편 정렬 시간을 단축시켜 빔타임 활용 효율을 한층 더 높일 것으로 기대된다.

P19 : 가공-소성가공
Room 1층 전시홀, 10월 29일

[P19-1]

유한요소 모델링을 통한 알루미늄 압출재의 이방성 변형 및 파단 거동 예측: 김강산(성균관대학교), 김찬양(국립군산대학교), 정경재*(성균관대학교)

Keywords: 알루미늄 압출재, 소성 이방성, 연성 파단, 유한요소 모델링, 굽힘 거동

알루미늄 압출재는 높은 비강도와 우수한 가공성으로 경량 구조부품에 널리 활용되고 있다. 그러나 압출 과정에서 발달하는 집합조직으로 인해 하중 방향에 따라 항복 및 소성변형 거동이 달라지며, 연성 파단 특성 또한 국부 응력 조건과 변형 이력에 크게 영향을 받는다. 따라서 압출재의 실제 성형 및 구조 거동을 정확하게 예측하기 위해서는 소성 이방성과 하중 조건에 따른 파단 특성을 함께 고려할 수 있는 재료모델의 정립과 검증이 중요하다. 본 연구에서는 6xxx 계 알루미늄 압출재를 대상으로 방향 의존적 소성 거동과 연성 파단을 통합적으로 기술하는 유한요소 모델링 방법을 구축하였다. 압출 방향을 기준으로 방향 별 인장시험을 수행하여 항복응력과 소성변형률비를 측정하고, 이를 바탕으로 소성 이방성과 대변형 경화 거동을 모델링하였다. 실험적으로 확보하기 어려운 이축 응력 조건에서의 소성 특성은 결정소성 해석을 통해 보완하여 복합 하중에서의 변형 거동을 기술하였다. 또한 중앙 홀, 노치 및 전단 시편의 파단시험과 수치해석을 연계하여 각 시험의 파단 개시점까지 변화하는 국부 응력 및 소성변형 이력을 도출하였다. 이를 기반으로 하중 조건과 변형 경로에 따른 연성 파괴 거동을 모델링하였으며, 모델 정립에 사용되지 않은 평면변형 인장시험을 통해 예측 성능을 독립적으로 검증하였다. 최종적으로 구축된 재료모델을 굽힘 시험에 적용하여 압출재의 변형 거동과 파단 개시를 예측하고 실험 결과와 비교하였다. 그 결과, 소성 이방성과 굽힘 과정에서 변화하는 국부 응력 및 변형 이력을 함께 고려함으로써 압출재의 굽힘 변형과 파괴 거동을 효과적으로 재현할 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 알루미늄 압출재의 방향 의존적 소성변형과 연성 파괴를 통합적으로 기술하고, 압출 구조부품의 성형성 및 구조 건전성 평가를 위한 모델링 기반을 제시한다.

[P19-2]

Characterization of Magnetocaloric Properties and Microstructures in La(Fe, Si)$_{13}$-based alloys for Room-Temperature Applications: Min Jik Kim(Korea Institute of Materials and Science, Pohang University of Science and Technology), Jae Han Bae, Woo Seok Yang, Kook-Chae Chung, Jong-Woo Kim, Kwang Seok Lee*, Da Seul Shin*(Korea Institute of Materials and Science)

Keywords: Magnetocaloric materials, Magnetocaloric effect, Magnetic refrigeration, La(Fe, Si)$_{13}$ alloys, Magnetic transition

La–Fe–Si-based alloys with a $NaZn_{13}$-type crystal structure, La(Fe, Si)$_{13}$, are promising magnetocaloric materials because of their large magnetocaloric effect and lower rare-earth content than gadolinium (Gd). However, pristine La–Fe–Si alloys generally exhibit magnetic transitions at low temperatures, limiting their use in room-temperature magnetic refrigeration. In this study, Co and Mn substitution combined with hydrogenation was investigated to control the Curie temperature (T_C) and magnetocaloric properties of La(Fe, Si)$_{13}$-based alloys near room temperature. The effects of alloy composition and heat treatment on microstructure, magnetic phase transitions, and magnetocaloric performance were systematically evaluated. Co-substituted La–Fe–Co–Si alloys exhibited second-order magnetic transitions and broad magnetocaloric responses. Co substitution alone successfully shifted Tc to 274–292 K. The designed compositions produced Tc intervals of approximately 6 K, with an average deviation of only 0.76 K between the designed and measured values. The magnetic entropy change (ΔS_M) ranged from 5.61 to 7.05 J kg^{-1} K^{-1}, forming a cascaded response suitable for multilayer magnetic refrigeration systems. In contrast, Mn substitution alone did not significantly increase Tc, and the La–Fe–Mn–Si alloys retained low transition temperatures of 124.4–132.8 K. Subsequent hydrogenation at 673 K for 3 h shifted T_C to 284–296 K. The hydrogenated alloys largely preserved their first-order magnetic transition characteristics and exhibited maximum ΔS_M values of 9.35, 7.72, and 9.10 J kg^{-1} K^{-1}. These results demonstrate that combining composition control with appropriate heat treatment enables precise tuning of Tc and magnetocaloric performance in La(Fe, Si)$_{13}$-based compounds. The developed alloys show strong potential as alternatives to Gd for near-room-temperature magnetic refrigeration, particularly in cascaded and multilayer cooling systems.

[P19-3]

유한요소해석 및 유전 알고리즘을 이용한 열간 회전 단조 공정 설계: 좌리노, 우영윤*, 이영선, 윤은유(한국재료연구원)

Keywords: Finite element analysis, Rotary Forging, Optimization, Genetic Algorithm

최근 에너지 수요 산업의 고도화에 따라 초내열 소재의 성형성과 생산성을 동시에 확보할 수 있는 단조 공정 기술의 중요성이 증가하고 있다. 회전 단조 공정은 상부 금형을 경사시킨 상태에서 회전시키며 소재를 점진적으로 성형하는 방식으로, 일반적인 축대칭 단조 공정에 비해 소재와 금형 사이의 순간 접촉면적이 작아 성형 하중을 효과적으로 저감할 수 있다. 그러나 회전 단조 공정은 금형 회전 속도, 단조 속도 및 소재 온도 등 다양한 공정변수의 상호작용에 의해 성형 하중과 변형 거동이 결정되므로, 적절한 공정 조건을 선정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 회전 단조 공정의 성형 하중을 저감하고 안정적인 소성유동을 확보하기 위해 금형 회전 속도와 단조 속도를 주요 설계 변수로 설정한 뒤, Inconel 718 소재를 적용하여 공정 해석을 수행하였다.

상용 유한요소해석 소프트웨어인 FORGE NxT 4.1을 활용하여 각 공정 조건에 따른 소재의 온도 변화, 유효 변형률 분포 및 성형 하중을 비교 분석하였다. 또한 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)을 적용하여 공정 변수 조합에 따른 해석 결과를 반복적으로 평가하여, 최적 공정 조건을 도출하고자 하였다. 본 연구를 통해 열간 회전 단조 공정에서 공정 하중 저감과 성형 안정성 향상 방안을 제시하고자 한다.

[P19-4]

Hastelloy C-22 합금의 고온 변형물성 및 미세조직 분석을 통한 3축 롤 압연 공정 고도화: 김승용, 최언준, 윤은유*(한국재료연구원)

Keywords: Hastelloy C-22, Hot Deformation, Zener-Hollomon, Finite Element Analusis, 3-Roll Rolling

Hastelloy C-22 합금은 우수한 내식성과 기계적 특성으로 유체 이송용 배관 소재로 활용되고 있으나, 높은 가공 저항과 제한적인 열간가공 온도 범위로 인해 고온 변형 특성을 고려한 공정 해석이 요구된다. 본 연구에서는 온도 및 변형속도에 따른 고온 변형 거동을 규명하고, 도출된 고온 유동 물성을 3축 롤 압연 공정의 유한요소해석에 적용하여 공정 해석을 고도화하고자 하였다. 다양한 온도 및 변형속도 조건에서 고온 압축시험을 수행하여 유동응력을 측정하였으며, Zener-Hollomon parameter를 기반으로 변형 활성화에너지 및 재료 상수를 도출하였다. 그 결과, 온도 및 변형율 속도 변화에 따른 유동응력의 주요 경향을 확인하였으며, 도출된 변형 활성화에너지 값을 바탕으로 C-22 합금의 고온 변형거동을 정량화하였다. 또한, Dynamic Materials Model(DMM)을 기반으로 에너지 소산 효율과 유동 불안정성을 평가하여 Processing map을 구축하였다. 이를 통해 변형 조건에 따른 안정 및 불안정 가공 영역을 구분하고, 주요 안정 영역에 해당하는 온도 및 변형율속도 범위에서 비교적 안정적인 소성유동이 나타남을 확인하였다. 변형 조건별 미세조직 분석을 통해 동적 재결정, 동적 회복 및 결정립 성장 등의 조직 변화 거동을 관찰하였으며, 이를 바탕으로 열간가공성과 미세조직 발달 간의 상관관계를 규명하였다. 도출된 고온 유동응력 데이터와 구성방정식을 Forge NxT에 적용하여 3축 롤 압연 공정을 해석한 결과, 고온 변형거동을 반영한 재료 모델이 공정 중 소재의 유동 및 변형 거동을 효과적으로 예측할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 Hastelloy C-22 합금의 고온 변형 거동과 미세조직 변화 간의 연계성을 규명하고, 이를 반영한 3축 롤 압연 공정 해석의 고도화 가능성을 제시하였다.

[P19-5]

복합 발전용 가스터빈 샤프트 제조 공정 최적화 연구: 허상현, 이진모*, 김남용, 이채훈, 윤선룡, 권하늘, 문지훈((주)태웅)

Keywords: 가스터빈 압축기 부품, 대형 단조 기술, 열처리 기술

본 연구에서는 복합발전용 가스터빈 압축기용 대형 샤프트의 제조를 위한 열간 자유 단조 공정 및 열처리 공정의 최적화 과정을 수행하였다. 원소재인 57톤급 대형 잉곳의 내부 결함을 효과적으로 제거하고 중심부까지 충분한 변형률을 부여하기 위해 유한요소해석 기반의 시뮬레이션을 활용하였다. 기존 단일 공정의 한계를 극복하고자 업세팅 공정을 3단계 분할 방식으로 설계하여 프레스의 허용 용량 내에서 안정적인 성형 조건을 도출하였다. 또한, 코깅 및 단차 작업 단계에서 패스당 압하율 20% 이상, 중심부 기준 누적 단조비 3S 이상을 확보하는 최적 공정 시퀀스를 수립하였다. 또한 열처리 공정 최적화를 위하여 사전 시뮬레이션을 통해 최적 조건을 도출하였다. 이를 적용하여 제작된 샤프트 시제품은 비파괴검사 결과 무결함 수준을 만족하였으며, 최종 형상 및 치수 정밀도를 확보함으로써 대형 가스터빈 부품의 국산화를 위한 단조 기술의 타당성을 검증하였다.

[P19-6]

냉간 인발 및 열처리에 따른 Gd 와이어의 미세조직 변화와 자기열량 이방성 변화: 배재한, 양우석, 김민직, 김현웅, 신다슬*, 이광석*(한국재료연구원)

Keywords: 가돌리늄, 인발, 열처리, 자기열량효과

가돌리늄(Gd)은 상온 부근의 큐리온도, 우수한 열적 안정성, 뛰어난 자기열량효과를 갖기 때문에 상온 자기냉각소재로써 널리 연구되고 있다. 한편, 능동 자기재생기(active magnetic refrigerator, AMR)의 냉각 성능을 향상시키기 위해서는 자기냉각소재와 열전달 유체 사이의 접촉 면적을 늘리고 유체의 압력 소실을 최소화할 수 있는 형상 설계가 중요하다. 이를 위한 미세 와이어 구조는 높은 피표면적과 규칙적인 유로를 형성할 수 있다는 장점이 있지만, 냉간 소성가공 과정에서 발생하는 가공경화, 잔류응력 및 결정집합조직은 재료의 자기적 특성 뿐 아니라 자기열량효과에도 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 다단 냉간 공형 압연, 선재 인발 및 열처리를 이용하여 Gd 와이어를 제조하고, 가공 조건에 따른 미세조직, 결정집합조직 및 방향별 자기열량특성 변화를 조사하였다. 냉간 인발 후 인발 방향(DD)에서 측정한 Gd 와이어의 자기엔트로피변화량은 주조 시료보다 감소하였으나, 반경 방향(RD)에 대해서는 증가하였다. 최종 열처리 후 두 방향 사이의 차이는 줄어들었다. EBSD 및 TEM 분석 결과, 냉간 인발이 결정립 미세화, 쌍정 변형(deformation twin), 격자 왜곡 및 뚜렷한 결정집합조직을 형성함을 확인하였다. 특히, 인발 과정 중 HCP 구조를 갖는 Gd의 자화용이축인 c-axis가 와이어의 반경 방향(RD)으로 우선 배향되는 것이 확인되는데 이는 앞서 확인한 자기 이방성의 직접적인 원인이다. 반면, 냉간 인발후 이어진 열처리 과정은 냉간가공으로 형성된 잔류응력과 격자왜곡을 완화시키 때문에 RD와 DD 두 방향 사이의 이방성은 감소하는 것으로 확인된다. 즉, 이상의 결과는 냉간 인발이 단순히 Gd의 자기열량효과를 저하시키는 것이 아니라 결정집합조직을 형성하여 자기 이방성을 형성하며, 적절한 다단 인발과 열처리를 통하면 자기열량특성의 큰 손실 없이 장선형 Gd 와이어를 제조할 수 있음을 보여준다. 따라서, Gd 와이어를 자기냉각장치에 적용하기 위해서는 가공 및 열처리 조건 뿐 아니라 자화 용이축 및 자기장 방향까지 고려하여 설계되어야 한다.

P20 : 복합재료
Room 1층 전시홀, 10월 29일

[P20-1]
Deep-Trap Engineered $SrAl_2O_4$:Eu Mechanoluminescent Phosphors for OWL (One-Way Luminescence) Tracer Rounds: Seoyeon Park, Youngseung Choi, Chaeyoun Kim, Seongju Park(KAIST), Hee Sik Chin, Mu Jun Song, Ji seong Go(POONGSAN), Byungha Shin*(KAIST)

Keywords: 기계발광, 예광탄, 도핑

Conventional pyrotechnic tracers contaminate barrels and pose fire risks. To replace combustion, this work explores OWL tracer rounds powered by mechanoluminescent $SrAl_2O_4$:Eu in which deep traps are introduced by rare-earth codoping (Dy, Ho, Nd). Co-doping lowers PLQY but markedly enhances charge storage: Eu+Dy and Eu+Dy+Ho retain carriers and exhibit thermally stimulated emission after brief UV charging followed by up to two months of dark storage. A light-tight free-fall steel-ball drop-impact setup evaluates PDMS- or transparent-epoxy-bound pellets; mechanoluminescence intensity increases with impact energy, and Eu+Dy+Ho outperforms Eu+Dy both immediately after UV charging and after 2-day dark storage. Ongoing work calibrates spectra/images to luminance.

[P20-2]]
생체모방형 진주층 구조 BMG-ZrO_2 복합소재의 침투온도가 미세구조 및 기계적 특성에 미치는 영향: 김태윤(부산대학교), 오현석(위스콘신대학교), 이제인*(부산대학교)

Keywords: Bioinspired, Nacre-like, pressureless infiltration, compressive strength

에너지 효율 향상 및 극한 환경에서의 안정적 구동에 대한 요구가 증대됨에 따라, 높은 비강도와 파괴저항성을 갖는 경량 구조재료에 대한 필요성이 증가하고 있다. 그러나 강도와 인성은 일반적으로 상호배타적인 관계를 가져 기존 구조재료의 기계적 특성 향상에 한계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 뼈, 나무, 조개껍질과 같은 자연의 계층적 미세구조를 모방한 생체모방형 복합재료가 주목받고 있다. 특히 조개껍질에서 관찰되는 진주층 구조는 판상의 세라믹과 생체고분자가 벽돌집(brick-and-mortar) 형태로 배열되어 취성의 세라믹이 주성분임에도 불구하고 각 성분 대비 수십 배의 파괴인성 증가를 보인다. 본 연구에서는 세라믹에 대한 젖음성이 우수한 지르코늄기 벌크 비정질합금을 지르코니아 다공체 내부로 무가압 침투시켜, 진주층 구조 BMG-ZrO2 복합재료를 제조하였다. 침투 온도를 주요변수로 하여 온도 변화에 따른 금속기지의 결정화, 금속-세라믹의 계면 반응 및 다공체 열화 양상을 분석하였다. X-선 회절 분석기와 주자전자현미경을 통해 미세조직을 분석하였으며, 시차주사열량계를 통해 복합재료 내 비정질 상의 결정화도를 정량적으로 평가하였다. 또한, 압축실험을 통해 본 연구의 BMG-ZrO_2 복합재료는 독특한 층상 배열을 통해 높은 강화상 분율을 갖고 타 연구 대비 우수한 압축 강도를 가짐을 확인하였다. 침투온도에 따른 미세구조와 기계적 특성의 차이 및 상관관계를 체계적으로 분석함으로써, 우수한 기계적 특성을 갖는 복합소재 설계에 미치는 요인들에 대해 고찰하였다.

[P20-3]
cBN 입자 크기에 따른 주조기반 알루미늄 복합소재의 기계적 및 열적 특성 연구: 정다운, 박현재, 이태호(한국재료연구원, 부산대학교), 김정환, 이상복, 이상관(한국재료연구원), 김양도(부산대학교), 조승찬*(한국재료연구원)

Keywords: 금속복합소재, 알루미늄, 입방정 질화붕소, 열적 특성

반도체 패키징 기술 분야 및 전기차 전력 제어 반도체의 개발로 반도체의 성능이 발전함과 동시에 고집적화로 인한 발열 문제가 심화되고 있다. 이러한 발열은 수명 단축과 같은 성능 저하를 초래하여 열을 효과적으로 방출할 수 있는 방열 소재에 대한 수요가 증가하고 있다. 기존 방열 소재로 사용된 구리(Cu)계, 알루미늄(Al)계는 세라믹 기판과의 열팽창계수 차이로 인한 열응력이 발생하여, 기판 균열 및 계면 박리와 같은 결함이 유발된다. 이를 개선하기 위한 대안으로 금속복합소재(Metal Matrix Composites, MMCs)가 차세대 방열 소재로 주목받고 있다. 알루미늄은 가볍고 우수한 열전도 특성을 가진 금속이며, 입방정 질화붕소(cubic boron nitride, cBN)는 높은 열전도도와 낮은 열팽창계수로 우수한 열적 특성을 갖는 세라믹 소재이다. 따라서 cBN/Al 금속복합소재는 우수한 열적 특성을 갖는 방열 소재 후보로 기대된다. 금속복합소재에서는 강화재의 입자 크기에 따라 열적 특성이 크게 좌우되며, 강화재/기지 계면에서 형성되는 반응상 및 결함의 영향을 받는다. 하지만 현재 cBN/Al 금속복합소재는 이러한 요소들이 열적 특성에 미치는 영향에 관한 연구가 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Al1050 합금을 기지재로 사용하고, cBN을 강화재로 하는 금속복합소재를 액상가압공정을 통하여 제조하였다. 제조된 복합소재의 강화재 크기에 따른 기계적 및 열적 특성을 평가하고, 강화상 분산 및 복합소재 미세조직 분석을 통해 기계적 및 열적 특성과의 상관관계를 규명함으로써, cBN/Al 금속복합소재의 방열 소재로서의 적용 가능성을 검토하였다. 본 연구는 과학기술정보통신부 나노 및 소재기술개발사업(RS-2022-NR068258, RS-2024-00444649)의 지원으로 수행되었음.

[P20-4]
열처리에 따른 Ni–C 이원계 합금의 미세조직 및 상온·극저온 인장 거동: 한희주(영남대학교 신소재공학과), 신현빈, 박노근*(영남대학교 신소재공학부)

Keywords: Ni–C 이원계 합금, 극저온 인장, 열처리, 결정립 성장, 기계적 특성, 미세조직 변화

극저온 환경에서 사용되는 구조재료는 온도 저하에 따른 강도 증가와 함께 충분한 연성을 유지하는 것이 중요하다. Ni은 FCC

구조를 갖는 연성 금속으로 저온에서도 우수한 소성변형 능력을 나타내며, Ni–C 합금에서는 Ni 기지 내 graphite의 형상과 분포가 기계적 거동에 추가적인 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 열처리에 따른 결정립 구조와 graphite stringer의 형태 변화를 분석하고, 이러한 미세조직 변화가 상온 및 극저온 인장 거동에 미치는 영향을 비교하였다. Ni–C 합금은 유도용해 및 주조 후 약 85%의 압하율로 냉간압연하였으며, 650 ℃, 850 ℃ 및 1000 ℃에서 각각 4시간 열처리한 뒤 수냉하였다. 열처리에 따른 결정립 구조와 graphite stringer의 형상 및 분포는 OM과 SEM을 이용하여 관찰하였고, EBSD를 통해 결정학적 미세조직을 평가하였다. 인장시험은 298 K와 77 K에서 1×10^{-3} s^{-1}의 변형률 속도로 수행하였으며, DIC를 이용하여 인장 과정에서의 변형률 분포를 분석하였다. 열처리 온도가 증가함에 따라 평균 결정립 크기는 약 13 μm에서 52 μm까지 증가하였으며, graphite stringer의 aspect ratio는 감소하여 상대적으로 연신도가 낮은 형상으로 변화하였다. 이러한 결정립 조대화에도 불구하고 298 K와 77 K 모두에서 열처리 온도가 증가할수록 강도와 연신율이 함께 증가하였다. 또한 모든 열처리 조건에서 77 K 인장 시 298 K 대비 높은 강도와 연신율을 나타냈으며, 시험 온도와 열처리 조건에 따라 국부 변형 양상에도 차이가 관찰되었다. 이러한 결과는 열처리된 Ni–C 합금의 기계적 특성이 단순한 결정립 크기 효과만으로 결정되지 않으며, graphite stringer의 형태학적 변화와 시험 온도에 따른 변형 거동을 함께 고려할 필요가 있음을 보여준다.

[P20-5]

변태유기소성이 발현되는 FeNi/FeNiCr-TiC 복합재의 적층 제조: 김유빈, 이태규*, 이민제, 신주원(국립한밭대학교)

Keywords: 적층제조, TRIP, 복합재

금속기지복합재는 세라믹 강화상의 첨가를 통해 높은 강도, 경도 및 내마모성을 확보할 수 있다. 특히 TiC는 효과적인 강화상이지만, 함량이 증가할수록 취성이 증가하여 강도와 연성 간의 trade-off가 심화될 수 있다. 따라서 TiC 첨가에 따른 취성 증가를 완화하여 강도와 연성을 동시에 확보할 수 있는 기지 설계가 요구된다. 본 연구에서는 이러한 trade-off를 완화하기 위해 변태유기소성(transformation-induced plasticity, TRIP)이 발현되는 FeNi 및 FeNiCr 기지를 적용하였다. TiC에 의한 입자 강화와 TRIP에 의한 지속적인 가공경화 및 변형 분산을 결합함으로써, TiC 첨가에 따른 취성 증가를 보완하면서 강도와 내마모성, 연성을 동시에 향상시키는 시너지 효과를 기대하였다. 또한 TiC 함량 변화에 따른 오스테나이트 안정성과 TRIP 거동의 변화를 분석하였고, 기계적 특성을 조절할 수 있는 재료 설계 가능성을 확인하고자 하였다. 이러한 재료 설계 개념을 구현하기 위해 directed energy deposition 공정을 이용하여 다양한 조성의 복합재를 제조하였다. FeNi 및 FeNiCr 기지에 TiC를 각각 0, 2.5, 10, 20 vol% 첨가한 분말 조성을 설계하여 시편을 제작하였고, 기지 조성과 TiC 함량에 따른 미세조직, 오스테나이트 안정성 및 TRIP 거동을 분석하였다. TRIP 기지와 TiC 강화상의 상호작용을 바탕으로 기존 금속기지복합재의 강도–연성 trade-off를 완화하고, 요구되는 기계적 특성을 조절할 수 있는 재료 설계 가능성을 평가하였다. 이러한 재료 설계 개념은 향후 베어링, 캠, 롤러 및 금형 등 높은 강도와 내마모성이 요구되는 고하중 부품으로 확장될 수 있다.

[P20-6]

Ni-P 무전해도금을 통한 cBN/Al 복합재의 표면특성 향상 연구: 이지윤, 김민수(한국재료연구원, 부경대학교), 조은서, 정병문, 이상복, 이상관(한국재료연구원), 권한상(부경대학교), 조승찬, 김정환*(한국재료연구원)

Keywords: 금속 기지 복합재료, Ni-P 무전해도금, 표면 조도, 경도

무전해도금은 외부 전원을 사용하지 않고 활성 기판에 금속 이온을 자가 촉매 환원 과정을 통해 증착하는 화학적 환원 기술로, 저렴한 비용으로 복잡한 형상의 소재에도 균일한 코팅층을 형성할 수 있다는 장점이 있다. 그중 Ni-P 무전해도금은 내식성, 내마모성 및 경도 등의 특성을 향상시킬 수 있어 다양한 금속 및 복합소재의 표면 개질에 활용되고 있다. 특히 항공우주와 같은 첨단 응용 분야에서 사용될 수 있는 재료에서는 제조과정에서의 용이한 가공을 위해 우수한 표면 조도가 요구된다. 금속 기지 복합재료(MMCs, Metal Matrix Composites)는 세라믹 강화재와 금속 기지재 간의 물성 차이로 인해 불규칙한 표면 형상이 형성될 수 있다. 특히 cBN/Al 복합재의 경우 높은 경도를 갖는 cBN 입자와 상대적으로 연질인 Al 기지 사이의 물성 차이로 인해 가공 및 연마 과정에서 표면결함이 발생하기 쉬우며, 이를 개선할 수 있는 표면 조도가 우수한 금속 기지 복합재료의 개발이 요구된다. 또한 부식성 환경에서는 Al 기지와 cBN 입자 간의 전기화학적 거동 차이 및 열팽창 특성 차이로 인해 계면 불안정성이 발생할 수 있으며, 이러한 현상은 구조적 안정성과 전기화학적 신뢰성을 저하시켜 cBN/Al 복합재의 산업적 응용을 제한할 수 있다. 특히 알루미늄 기반 소재의 경우 안정한 자연 산화피막으로 인해 후속 Soldering 공정에서 Solder 소재와 젖음성이 좋지 않아 Soldering시 불리하며, Solder 소재와 금속간 화합물을 형성시킬 가능성이 있어 화합물 형성 차단과 젖음성 향상을 위한 도금으로 Ni-P 무전해도금이 사용된다. 따라서 본 연구에서는 cBN/Al 복합재 표면에 Ni-P 무전해도금을 적용하여 불균일한 표면을 보완하여 표면 특성을 향상시키는 것을 목적으로 하였다. 실험은 Nickel 공급원으로 Nickel sulfate를 사용하여 cBN/Al 복합재 표면에 Ni-P 무전해도금을 수행하였다. 코팅 전·후 시편의 미세구조 관찰과 경도, 표면 조도 측정을 위해 Normal SEM, 비커스 경도기, Alpha-Step을 활용하였다. 실험결과, cBN/Al 복합재에 균일한 Ni-P 코팅층이 형성된 것을 확인하였다. 또한 Ni-P 도금 후 시편의 경도는 도금 전 시편에 비해 증가하였으며, 후속 연마 공정을 통해 표면 조도가 향상된 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 Ni-P 무전해도금을 통해 cBN/Al 복합재에 균일하게 도금을 함으로써 표면 조도를 향상시킴과 동시에 경도 등의 기계적 특성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 이러한 균일한 Ni-P 코팅층은 후속 Soldering 공정에서 젖음성 개선과 금속간 화합물의 형성을 차단하는데 기여함과 동시에 외부 부식환경과 Al 기지 사이의 직접적인 접촉을 억제하는 보호층으로 작용할 수 있어 cBN/Al 복합재의 내식성 및 전기화학적 안정성 향상에도 기여할 것으로 판단된다. 따라서 Ni-P 무전해도금은 cBN/Al 복합재의 표면 특성 개선 및 향후 Soldering 적용을 위한 효과적인 표면 개질 방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P20-7]

Investigation of Mechanoluminescent Behavior in Eu+Dy co-doped $SrAl_2O_4$ for Application of Light Tracer: Chaeyoun Kim, Youngseung Choi, Seoyeon Park, Seongju Park(Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)), Hee Sik Chin, Mu Jun Song, Ji seong Go(POONSAN R&D INSTITUTE), Byungha Shin*(Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))

Keywords: Tracer, Mechanoluminescence, $SrAl_2O_4$

'Tracers' are projectiles that emit bright light from the rear, allowing shooters to observe and correct the trajectory in low-light conditions such as nighttime or bad weather conditions. The conventional tracers induce pyrotechnic luminescence through the combustion of tracer compounds, which are composed of oxidizing agent, a raw metal, and an organic propellants. However, the combustion process of the tracers can lead to barrel contamination and having a fire risk. Therefore, it is necessary to develop a non-combustion form of luminous material, known as 'Mechanoluminescence' (ML), which uses the high-pressure generated by the propellant. This research focuses on increasing the luminosity of Eu+Dy co-doped $SrAl_2O_4$ ML materials synthesized through high-temperature solid-state reaction. The crystal structures of the samples were determined by X-ray Diffraction (XRD) and Photoluminescence (PL) measurement, which matched the standard pattern of $SrAl_2O_4$. Eu+Dy co-doped $SrAl_2O_4$ exhibits ML under impact for a very short period, and shows the phosphorescence illumination for a long duration. This ML material can be molded into various designs using PDMS and a hardener.

[P20-8]

Microstructure and Thermal Properties of Mo-Cu Composite Fabricated by Melt Infiltration of Freeze-Cast Mo Preforms: Youngmin Kim, Ji Young Kim, Eui Seon Lee, Sung-Tag Oh*(SEOULTECH)

Keywords: Mo-Cu composite, Freeze casting, Infiltration, Thermal properties

The recent advancement of high-power electronic devices has driven an increasing demand for tailored thermal management materials capable of rapidly dissipating substantial heat in a specific direction (e.g., from a chip to a heat sink). Molybdenum-copper (Mo-Cu) composites, which combine the low coefficient of thermal expansion (CTE) and excellent mechanical properties of Mo with the high thermal conductivity (TC) of Cu, are predominantly utilized in devices requiring superior heat dissipation and high reliability. While conventional Mo-Cu or laminated Cu-Mo-Cu composites exhibit a favorable balance of low CTE and high TC, their isotropic microstructures or thick Mo layers impede through-plane thermal transfer as the relatively lower TC of Mo reduce the efficiency of heat flow. To address these limitations and enhance directional heat dissipation, the formation of unidirectionally aligned heat transfer pathways is required. In this regard, we first attempted to fabricate porous Mo skeletons with unidirectional pore channels utilizing a freeze-casting technique, which enables the formation of a highly aligned pore structure by directionally freezing a water-based slurry. Subsequently, Mo-Cu composites were fabricated by infiltrating molten Cu into the freeze-cast Mo skeletons, where the directional pore channels were replaced with Cu to form continuous heat transport pathways. The density of the resulting composites was measured using Archimedes' principle, and the microstructure was characterized via scanning electron microscopy (SEM). The anisotropic TC and CTE were measured using a light flash analyzer (LFA) and a thermomechanical analyzer (TMA), respectively. Furthermore, the effect of the unidirectional microstructural features on the anisotropic thermal properties was evaluated. The results revealed that the unidirectional microstructure enhances the through-plane TC, parallel to the heat transport direction, compared to conventional Mo-Cu composites.

[P20-9]

소재 간 전처리 차이에 따른 실란트 접착강도 분석: 이인영*, 이창화, 김지완(한화시스템)

Keywords: 실란트, 알루미늄

실란트는 장비의 불완전 접합부의 방수 및 기밀 유지를 위해 적용되는 마감재이다. 실란트 작업 전, 접착 강도 개선을 위해 소재의 접착면에 사포, 프라이머 등의 전처리 작업을 진행한다. 본 연구에서는 실란트 작업 간 균일 품질 확보를 위해 각 전처리 공정을 여러 소재에 적용하고, 접착강도 시험을 진행하여 영향성을 분석한다.

[P20-10]

Fabrication of W-Cu composites by infiltration of W skeletons prepared by freeze casting: Ji Young Kim, Youngmin Kim, Eui Seon Lee, Sung-Tag Oh*(SEOULTECH)

Keywords: Freeze-casting, Infiltration, W-Cu, Microstructure

W-Cu composites have excellent electrical conductivity, high wear resistance, outstanding thermal conductivity, and a low coefficient of thermal expansion. Due to these properties, they are widely used in various fields as electrical contacts, machining electrodes, heat sinks, and electronic packaging materials. Various methods, including vacuum sintering, spark plasma sintering (SPS), and hot extrusion, have been applied to fabricate W-Cu composites. However, these processes often result in an inhomogeneous microstructural distribution due to poor solubility and the significant difference in melting point between W and Cu. To solve this problem, we applied a process of infiltrating molten Cu into a pre-sintered tungsten skeleton. Specifically, the freeze-casting method was employed to design a

W skeleton with a uniform microstructure and interconnected open pores. Initially, a slurry composed of WO_3 powder was freeze-dried to form a green body with the desired pore structures, which was reduced and sintered in a hydrogen atmosphere to yield the W skeleton. Subsequently, molten copper was infiltrated into the pre-sintered W skeleton via heat treatment at 1200 ºC under an H_2 atmosphere. Finally, to evaluate the microstructural homogeneity and phase distribution, the W-Cu composites were examined via SEM and XRD.

[P20-11]

레이저 표면처리를 통한 Al–C_{60} 복합재료 내 생성된 나노 탄화물이 기계적 특성에 미치는 영향: 김수민, 이효정, 한주연, 최현주*(국민대학교)

Keywords: Fullerenes, Aluminum matrix composite, Laser treatement, Al_4C_3, Mechanical property

풀러렌(C_{60})으로 강화한 알루미늄 기지 복합재료는 C_{60} 특유의 열분해 거동 덕분에 경량 고강도 소재로 주목받아 왔다. 열처리 중 C_{60} 케이지 구조가 붕괴하면 탄소 원자가 방출되고, 이 탄소는 Al 격자에 침입형으로 고용되어 격자 왜곡과 고용강화를 일으킨다. 선행 연구에 따르면 5 vol.% C_{60}/Al 복합재료는 500 ºC, 12시간 열처리 후 최대 경도 221 HV에 도달한다. 다만 12시간이라는 처리 시간은 효율성 면에서 한계로 작용한다. 본 연구에서는 레이저 기반 급속 열처리를 대안으로 제시한다. 노 열처리 대신 밀리초 단위 가열·냉각 사이클을 적용해, 처리 시간을 크게 줄이면서 C_{60} 분해와 나노 탄화물 형성을 유도하는 방식이다. Al–5 vol.% C_{60} 복합분말은 3단계 밀링으로 제조했다. 1차 유성 밀링으로 C_{60} 응집체를 풀고, 2차 유성 밀링으로 C_{60}를 Al 분말 표면에 붙인 뒤, 어트리션 밀링으로 Al 기지 내부에 매립했다. 공정제어제를 제거하고 냉간 압착한 분말은 480 ºC에서 열간 압연했다. 레이저 표면처리는 1 kW 광섬유 레이저를 장착한 DED 방식 장비로 진행했고, 출력과 스캔 속도는 조건별로 달리했다. 미세조직은 OM, SEM, EBSD, TEM, XRD, 라만 분광법, XPS로 관찰했다. 기계적 물성은 비커스 경도 시험으로 평가했다. 최적 조건인 300 W, 1000 mm/s에서 최대 경도 245 HV를 얻었으며, 열처리 대비 약 11% 높은 값이다. TEM 분석 결과, 급속 응고 중 탄소 확산이 제한되면서 약 10×10 nm 크기의 나노 Al_4C_3 탄화물이 형성되었다. 이 탄화물은 레이저 에너지 감쇠에 따라 깊이 방향으로 미세조직 구배를 나타냈다.

[P20-12]

WC–NbC–Co 초경합금의 마스터 소결 곡선에서 초기 밀도 정규화의 영향 평가: 이종범*(한국생산기술연구원), 김소현, 김용희(로얄신소재), 정하국(한국생산기술연구원)

Keywords: 초경합금, 치밀화 동역학, 그린 밀도, 마스터 소결 곡선

본 연구에서는 WC–NbC–Co 초경합금의 마스터 소결 곡선(Master Sintering Curve, MSC) 모델링 과정에서 관행적으로 적용되는 초기 성형체 밀도(Green density) 정규화의 물리적 타당성을 평가하고, 이것이 고온 치밀화 예측 정확도에 미치는 영향을 분석하였다. 고정밀 절삭공구 및 내마모 부품용 WC–Co계 초경합금은 소결 미세조직에 의해 기계적 특성이 결정되므로, 액상 형성 전 고상 소결 구간에서 NbC 첨가를 통한 결정립 조대화 제어 및 정확한 동역학 해석이 필수적이다. 비등온 열팽창 계측(Dilatometry) 데이터 분석 결과, 실험 수치를 그대로 반영한 미수정 데이터셋과 인위적으로 초기 밀도를 정규화한 데이터셋 간에 마스터 곡선 궤적 및 겉보기 활성화 에너지(Q) 값의 유의미한 차이가 확인되었다. Python 기반으로 구축된 고해상도 소결 프로세싱 맵(Sintering Processing Map) 비교를 통해, 초기 밀도 정규화가 기공 형태 및 입자 충진 구조의 물리적 편차를 왜곡시켜 치밀화 예측 오차를 유발함을 입증하였다. 아울러 특정 고상 소결 온도에서 퀀칭(Quenching)된 시험편의 BSE/EDS 미세조직 분석을 병행하여, 수학적 모델의 가상 설정과 실제 기공-조직 발달 간의 상호 연관성을 규명하였다.

[P20-13]

질화기반공정으로 제조된 복합재의 공정 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성 비교: 이지원, Kanhu C. Nayak, 이건배(국민대학교), 김정환(한국재료연구원), 최현주*(국민대학교)

Keywords: 알루미늄, 복합재

위성 운영 환경처럼 큰 온도 변동이 반복되는 조건에서는 낮은 열팽창계수(CTE), 높은 열전도도(TC), 충분한 강도를 동시에 만족하는 경량 금속 소재가 요구된다. 그러나 단일 보강재 기반 Al 복합재만으로는 이러한 열·기계적 요구 특성을 동시에 달성하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 질화물 유도 자가 형성 공정(NISFAC)을 이용해 나노/마이크로 하이브리드 Al 복합재를 설계·제조하고, 미세조직과 물성 간의 상관관계를 평가하였다. 보강재로는 nAl/SiC(≈1 μm) 기반 나노 강화 분말과 Diamond(15–25 μm), cBN을 병용하였으며, 비교를 위해 (i) 0.5 nAl/SiC + 6.5D + 23cBN (Al 기지), (ii) 0.5 nAl/SiC + 6.5D + 23cBN (Al7075 기지), (iii) 1.5 nAl/SiC + 6.5D + 23cBN (Al 기지)의 3종 시편을 제작하였다. 분말을 혼합한 뒤 N_2 분위기에서 660 ºC–1 h NISFAC로 소결하고, 580–590 ºC–1 h hot press로 치밀화하여 고상 기반 복합재를 제조하였다. 광학/전자현미경 관찰 결과, Diamond와 cBN이 기지 내에 균일하게 분산된 미세조직이 확인되었으며, EDS 맵핑에서도 각 보강재 위치에서 C(Diamond) 및 B–N(cBN) 신호가 뚜렷하게 검출되었다. NISFAC 시편의 TC는 약 140–186 W/m·K, CTE는 약 11.7–12.5×10^{-6}/ ºC 범위로 나타났으며, 특히 Diamond와 cBN 함량이 동일한 조건에서 기지 합금(Al vs. Al7075)과 nAl/SiC 함량 변화에 따라 TC–CTE–강도 균형이 달라짐을 확인할 수 있었다. 본 연구는 나노/마이크로 보강재 조합과 NISFAC 기반 계면 제어를 통해 열관리용 Al 복합재의 설계 방향을 제시하며, 향후 계면층에 대한 정량 분석과 인장 특성 최적화를 통해 저 CTE–고 TC–고강도 특성의 동시 달성 여부를 검증할 예정이다.

P21 : 가공-주조 및 응고
Room 1층 전시홀, 10월 29일

[P21-1]

Fe–6·8·10Cr 이원계 합금의 고/액 및 고/고 계면 미세조직 천이: 이윤진(국립창원대학교), 신종호(두산에너빌리티), 이재현*(국립창원대학교)

Keywords: 일방향 응고, Fe–Cr 이원계 합금, 상변태, 미세조직 천이

고순도 Fe–Cr 이원계 합금(6, 8, 10 wt.% Cr)에 대해 일방향 응고(DS) 실험을 수행하였다. 이 합금계는 응고 온도 범위(freezing range)가 매우 좁아(ΔT_0 = 0.6~0.9 K) 낮은 응고 속도에서도 고/액(S/L) 계면의 미세조직 천이를 관찰할 수 있다. 또한 응고 후 δ-페라이트가 오스테나이트(γ)로 변태하므로, 하나의 시편에서 고/액 계면과 고/고(S/S; δ→γ) 계면을 동시에 연구할 수 있다. 응고 속도를 변화시킨 결과, S/L 계면은 평면–저속 셀–수지 상정–고속 셀 순서로 천이하였으며, Cr 함량이 증가할수록 각 천이 속도는 높은 쪽으로 이동하였다. S/S 계면에서도 셀·수지상 조직이 관찰되었고, 고체 확산 계수가 액상보다 크게 낮아 계산된 절대속도가 S/L과 S/S에서 약 3자릿수 차이 남을 확인하였다. 천이 조건을 정량적으로 해석하기 위해 임계속도(Vc), 절대속도(Va), KGT 수지 상정 팁 모델로 계면 온도–속도 곡선을 계산하였다. 계산된 수지 상정–고속 셀 천이 속도는 실험과 정성적으로 일치하였으며, 데이터가 부족한 8 wt.% Cr에 대해서도 천이 속도를 예측하였다. 아울러 S/S 계면에서는 δ/γ 변태에 수반되는 탄성 변형에너지(elastic strain energy) 항의 영향을 논의하였다.

[P21-2]

사형 주조된 Mn-Cu 고감쇠 합금의 위치별 미세조직 및 기계적 특성 평가: 한예진, 전종배*(동아대학교 금속공학과), 이영훈((주) 신라금속), 김대경((주) 한화오션)

Keywords: Mn-Cu alloy, Sand cast, Microstructure, Mechanical properties, Fractography

Mn-Cu계 합금은 우수한 진동 감쇠 특성을 바탕으로 진동 및 소음 저감이 요구되는 대형 구조부품에 적용 가능한 고감쇠 소재로 주목받고 있다. 그러나 대형 부품의 경우 사형 주조 과정에서 위치에 따른 응고 및 냉각 조건의 차이가 발생할 수 있으며, 이에 따라 미세조직의 형상과 크기, 원소 분포 및 내부 결함이 불균일하게 형성될 가능성이 있다. 이러한 미세조직학적 불균일성은 재료의 강도와 연성뿐만 아니라 균열의 개시 및 전파 거동에도 영향을 미칠 수 있으므로, 실제 부품의 신뢰성을 확보하기 위해서는 위치별 미세조직과 기계적 특성 간의 관계를 체계적으로 평가할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 사형 주조된 Mn-Cu 고감쇠 합금의 서로 다른 위치에서 나타나는 미세조직 및 기계적 특성의 차이를 분석하고, 조성 분포와 결함을 포함한 미세조직학적 특성이 인장 및 파괴 거동에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 본 연구에서는 Mn-Cu 합금에서 사형 주조재의 채취 위치가 다른 두 시편을 선정하고, 각 위치에서 ASTM E8 규격의 판상 및 봉상 인장시험편과 미세조직 관찰용 시편을 채취하였다. 인장시험을 통해 위치별 항복강도, 인장강도 및 연신율을 평가하였으며, OM을 이용하여 위치별 판상 및 침상 형태의 미세조직 형상과 분포를 비교하였다. 또한 SEM을 이용하여 인장 파단면의 cleavage facet, secondary crack 및 개재물과 같은 파괴 특성을 분석하고, EDS mapping 및 line scanning을 통해 Mn, Cu, Al, Fe 및 Ni의 국부적인 조성 분포와 편석 거동을 분석하였다. 이후 위치별 기계적 특성과 미세조직, 원소 분포 및 파괴 특성을 비교하여 사형 주조 Mn-Cu 합금에서 위치에 따른 미세조직학적 불균일성과 기계적 특성 간의 상관관계를 분석하였다.

[P21-3]

고용강화 페라이트계 구상흑연주철의 조성·미세조직과 기계적 특성 간 상관관계 분석: 홍지우, 김지욱, 최창영, 정유현, 조용재*(한국생산기술연구원)

Keywords: 고용강화 페라이트계 구상흑연주철, 미세조직, 기계적 특성

고용강화 페라이트계 구상흑연주철(Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron, SSFDI)은 고규소(Si)에 의한 고용강화 효과를 이용하여 단일 페라이트 기지에서도 우수한 강도와 연성을 확보할 수 있어 자동차 및 산업기계 부품용 구조재로 적용 범위가 확대되고 있다. 그러나 SSFDI의 기계적 특성은 합금 조성, 흑연 특성 및 기지조직이 복합적으로 작용하여 결정되므로, 개별 인자의 영향뿐 아니라 이들 인자와 기계적 특성 간의 상관관계를 종합적으로 분석할 필요가 있다. 기존 연구에서는 특정 합금원소 또는 미세조직 인자의 영향에 대한 연구는 다수 수행되었으나, 조성과 미세조직 인자를 함께 고려하여 기계적 특성과의 관계를 통합적으로 분석한 연구는 제한적으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 Ti 및 B 첨가량을 달리하여 제조한 SSFDI를 대상으로 화학조성, 미세조직 및 기계적 특성을 평가하고, 이들 인자 간의 상관관계를 분석하였다. 인장시험 및 브리넬 경도시험을 통해 기계적 특성을 평가하였으며, 광학현미경을 이용하여 구상흑연의 개수, 크기, 구상화율 및 흑연 면적률과 기지조직의 페라이트 및 펄라이트 분율을 정량적으로 분석하였다. 또한 조성 및 미세조직 인자와 기계적 특성 간의 상관관계 분석과 주성분 분석(PCA)을 수행하여 각 인자의 상호관계와 특성을 비교·분석하였다.

[P21-4]

전산모사를 활용한 소형전술차량용 허브케이스의 합금 원소 최적화 및 경량화 연구: 강재영, 김대하(포항소재산업진흥원), 연성일, 곽근호(경도공업), 박병호*(포항소재산업진흥원)

Keywords: 합금강, 경량화, 전산모사, 합금설계, 허브케이스

소형전술차량의 현가장치 핵심 부품인 허브케이스의 기동성 향상 및 연비 개선을 위해, 기존 고강도 주강 소재(ASTM A148)를

대체할 수 있는 경량 합금 설계 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 전산모사(Computational Simulation) 해석을 활용하여 기존 합금계를 바탕으로 대표적인 경량 원소인 알루미늄(Al), 실리콘(Si), 타이타늄(Ti)의 첨가 비율을 조정함으로써 철계 합금의 밀도를 낮추고 기계적 물성을 확보하는 최적의 합금 조성을 도출하였다. 소재 특성 분석 결과, 신규 설계된 합금은 기존 합금소재 대비 밀도가 감소하여 허브케이스 부품 기준 약 7%의 중량 절감을 달성하였다. 또한, 경량 원소 첨가에 따른 고용 강화 및 미세 석출물 형성 기구(Strengthening mechanism)에 따른 것으로 예측되며, 이에 경도는 기존 소재를 상회하는 290 Hv를 확보하였다. 결과적으로 연구를 통해 도출된 합금 설계안은 허브케이스의 엄격한 요구 물성을 충족함과 동시에 유의미한 경량화를 달성하였다.

[P21-5]

첨가 원소 종류 및 함량에 따른 TiAl 합금의 주조 유동성 비교: 최광수, 양현석, 정우철(고등기술연구원), 김성웅, 김채원(한국재료연구원), 공만식*(고등기술연구원)

Keywords: TiAl 합금, 주조 유동성, 합금 설계, 중력 주조

본 연구에서는 중력 정밀 주조 공정을 활용하여 TiAl 기반 합금계의 첨가 원소별 응고 거동과 주조 유동성 간의 상관관계를 분석하였다. Al, Nb, W, Cr등 치환형 원소의 종류 및 함량 조절을 통해 액상선 온도 변화, 2상 영역의 온도 폭 제어 및 용질 배출에 따른 조성 과냉을 통해 용탕의 유동 수명과 주형 충전성에 영향을 고찰하였다. 또한, B, Si 및 C의 첨가 원소를 통해 고온 응고 구간 내 이차상 정출 및 고용효과를 분석하였다. 이러한 열역학적 응고 경로 제어 메커니즘을 바탕으로 설계된 Ti-Al-Nb-W-Si-C 합금은 상용 4822 합금 대비 미세화한 응고 조직과 함께 우수한 주조 유동성을 나타내었다. 나아가 균질화 열처리가 적용된 Ti-Al-Nb-W-Si-C 합은 1000 ℃ 고온 환경에서 313 MPa의 항복강도를 보여 고온 환경에서 뛰어난 강도 유지력을 확보하여, 고온 구조 재료로서 요구되는 주조성과 고기능 기계적 물성을 동시에 만족하는 합금 설계적 가능성을 입증하였다.

P22 : 열전
Room 1층 전시홀, 10월 29일

[P22-1]
Effects of Sn and Se Co-doping on the Thermoelectric Properties of $AgSbTe_2$: Hyoju Son, Suhyeon Woo, Jihwan Im, Joseph Ngugi Kahiu, Samuel Kimani Kihoi, Ho Seong Lee*(Kyungpook National Univ.)
Keywords: Thermoelectric, Chalcogenide, $AgSbTe_2$

$AgSbTe_2$ has attracted attention as a promising p-type thermoelectric material for intermediate temperatures due to its intrinsically low lattice thermal conductivity and favorable Seebeck coefficient. In this study, we investigateed the synergistic potential of simultaneous cation and anion substitution on the thermoelectric properties of $AgSbTe_2$ by co-doping Sn at the Sb site and Se at the Te site. While Sn and Se individual dopings are known to enhance electrical transport and suppress lattice thermal conductivity respectively, their co-doping within the investigated composition range led to unexpected transport behaviors, including decreased electrical conductivity and increased thermal conductivity. Herein, the resulting thermoelectric properties and possible reasons for these transport behaviors will be briefly presented and discussed.

[P22-2]
Phase Separation And Microstructural Ordering In (Ti, Cr)FeSb Double Half-Heulesr System: Suhyeon Woo, Hyoju Son, Jihwan Im, Joseph Ngugi Kahiu, Samuel Kimani Kihoi, Ho Seong Lee*(Kyungpook National Univ.)
Keywords: microstructure, half-Heusler material, semi-coherent

Double half-Heusler (dHH) thermoelectric materials have emerged as a promising strategy to overcome the intrinsically high lattice thermal conductivity of conventional half-Heuslers by enlarging the primitive unit cell size. However, experimental validation of their structural stability and phase evolution remains challenging. In this study, we investigated the thermally driven phase separation and microstructural ordering in the (Ti, Cr)FeSb system. Samples were synthesized via arc melting and subsequently subjected to long-term homogenization annealing and sintering. X-ray diffraction and Rietveld refinement revealed that high-temperature annealing promotes phase stabilization, decomposing the non-equilibrium matrix into a distinct dual-phase structure: a cubic TiFeSb-based phase and a hexagonal (Cr, Fe)Sb-based phase. Transmission electron microscopy (TEM) and energy-dispersive spectroscopy (EDS) confirmed the development of an alternating nanolamellar architecture with an aligned crystallographic relationship. Furthermore, high-resolution interfacial analysis identified a semi-coherent transition layer accommodating lattice strain via localized misfit dislocations and stacking faults between the two phases. These findings provide fundamental insights into the phase equilibria, thermally activated phase separation, and interfacial evolution in multi-component double half-Heusler systems.

[P22-3]
Se이 치환된 보르나이트 $Cu_5FeS_{4-y}Se_y$의 열전 성능: 김성윤, 김일호*(국립한국교통대학교 반도체신소재공학과)
Keywords: thermoelectric, Cu_5FeS_4, bornite

보르나이트(bornite, Cu_5FeS_4)는 구성 원소의 지각 내 매장량이 풍부하고 독성이 낮아 친환경 열전 소재로 주목받고 있다. 그러나 가열 과정에서 나타나는 사방정계(orthorhombic)에서 입방정계(cubic)로의 복잡한 상전이 거동은 고온 열전 발전 소재로의 적용을 제한하는 요인으로 작용할 수 있다. 최근에는 S 자리에 Se를 치환함으로써 상전이 온도를 조절하고 전기적 수송 특성을 개선할 수 있음이 보고되었다. 본 연구에서는 Se의 치환량에 따른 상 변화, 결정 구조 및 열전 수송 특성의 변화를 조사하기 위해 기계적 합금화(mechanical alloying, MA)와 고온 가압 소결(hot pressing, HP)을 이용하여 $Cu_5FeS_{4-y}Se_y$ 고용체를 합성하였다. 원소 분말을 350 rpm에서 6 h 동안 기계적 합금화한 후, 723 K에서 2 h 동안 고온 가압 소결하여 치밀한 벌크 시편을 제조하였다. X-선 회절 분석 결과, 모든 조성에서 검출 가능한 이차상 없이 보르나이트 단일상이 형성되었다. 제조된 벌크 시편의 열전 성능을 평가하여, Se 치환이 보르나이트의 전하 운반자 수송과 포논 산란에 미치는 영향을 조사하고자 한다. This study was supported by the Small-Medium Enterprise Innovation Growth Support Project of the Korea RIC Association and the Basic Science Research Capacity Enhancement Project (National Research Facilities and Equipment Center) through the Korea Basic Science Institute funded by the Ministry of Education (Grant No. 2019R1A6C1010047).

[P22-4]
Ni 이 도핑된 보르나이트 $Cu_5Fe_{1-x}Ni_xS_4$의 열전 특성: 김형일, 김일호*(국립한국교통대학교 반도체신소재공학과)
Keywords: thermoelectric, Cu_5FeS_4, bornite

보르나이트(bornite) Cu_5FeS_4는 우수한 전기적 수송 특성과 낮은 격자 열전도도를 동시에 나타내는 황화물계 열전 소재로서, 친환경·고성능 열전 소재의 유망한 후보로 주목받고 있다. 특히 보르나이트의 열전 성능은 구성 원소의 치환 또는 도핑을 통해 전하 운반자 농도, 이동도 및 포논 수송을 조절함으로써 향상될 수 있다. 본 연구에서는 보르나이트의 Fe 자리에 Ni을 도핑한 $Cu_5Fe_{1-x}Ni_xS_4$를 합성하고, Ni 도핑이 상 형성, 결정구조, 미세조직 및 열전 수송 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 시편은 기계적 합금화

(mechanical alloying, MA)와 고온 가압 소결(hot pressing, HP)을 이용하여 제조하였다. MA 분말과 HP 벌크 시편의 상 형성 및 결정구조는 X-선 회절(X-ray diffraction, XRD)을 통해 분석하였으며, Ni 도핑량에 따른 격자 상수와 결정구조의 변화를 비교하였다. 또한 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)과 에너지 분산형 X-선 분광법(energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS)을 이용하여 벌크 시편의 미세조직, 원소 분포 및 조성 균질성을 평가하였다. Hall 측정을 통해 전하 운반자 농도와 이동도를 분석하였으며, 온도에 따른 제벡계수와 전기전도도를 측정하여 전기적 수송 거동을 고찰하였다. 열확산도, 비열 및 밀도를 이용하여 열전도도를 산출하고, 측정된 수송 특성을 바탕으로 파워팩터와 성능지수를 평가하였다. This study was supported by the Small-Medium Enterprise Innovation Growth Support Project of the Korea RIC Association and the Basic Science Research Capacity Enhancement Project (National Research Facilities and Equipment Center) through the Korea Basic Science Institute funded by the Ministry of Education (Grant No. 2019R1A6C1010047).

[P22-5]

비화학양론 위티체나이트 $Cu_{3-x}BiS_3$의 형성 및 열전 수송 특성: 이푸른, 김일호*(국립한국교통대학교 반도체신소재공학과)

Keywords: thermoelectric, Cu_3BiS_3, wittichenite

위티체나이트(wittichenite, Cu_3BiS_3)는 사방정계 구조(공간군 $P2_12_12_1$)를 갖는 반도체로서 약 1.0–1.6 eV의 광학 밴드갭을 나타내며, 차세대 태양전지 흡수층 및 열전 소재로 주목받고 있다. 열전 성능을 향상시키기 위해서는 점결함 제어를 통한 전하 운반자 농도와 이동도의 최적화가 중요하다. 본 연구에서는 Cu 자리에 비화학양론 조성을 도입하여 Cu 결핍에 따른 상 안정성, 결정구조 및 전하 수송 특성에 미치는 영향을 조사하였다. Cu, Bi 및 S 원소 분말을 고순도 Ar 분위기에서 기계적 합금화(mechanical alloying, MA)한 후, 진공 분위기에서 고온 가압 소결(hot pressing, HP)하여 치밀한 벌크 시편을 제조하였다. 제조된 MA 분말과 HP 벌크 시편에 대해 X-선 회절(X-ray diffraction, XRD) 분석을 수행하여 Cu 결핍량에 따른 상 형성, 결정구조 및 격자 상수의 변화를 조사하고, 이차상 형성 여부를 평가하였다. 또한 주사전자현미경과 에너지 분산형 X-선 분광법을 이용하여 미세조직과 원소 분포의 균질성을 분석하고, 전하 운반자 농도와 이동도의 변화와 전기전도도, 제벡계수 및 열전도도를 측정하고, 이를 바탕으로 파워팩터와 성능지수를 평가하여, Cu 결핍에 따른 조성–구조–전하 수송 특성 간의 상관관계를 조사하였다. This study was supported by the Small-Medium Enterprise Innovation Growth Support Project of the Korea RIC Association and the Basic Science Research Capacity Enhancement Project (National Research Facilities and Equipment Center) through the Korea Basic Science Institute funded by the Ministry of Education (Grant No. 2019R1A6C1010047).

[P22-6]

Visualization and Overview of Thermoelectric Generator Performance Based on Literature Data through 2025: Jihui Son, Jeongin Jang, Jongho Park, Jaywan Chung, SuDong Park, Byungki Ryu*(Korea Electrotechnology Research Institute)

Keywords: Thermoelectric generator(TEG), Conversion efficiency, Power density, Literature dataset, Device performance

Thermoelectric generators directly convert thermal energy into electrical energy and have attracted considerable attention for waste-heat recovery and power-generation applications. Although numerous high-performance thermoelectric materials have been developed, systematic quantitative comparisons of experimentally demonstrated generator performance remain limited. In this study, we collected and visualized 170 experimental performance records from 147 papers published through 2025. The dataset includes bibliographic information, material systems, leg structures, device configurations, operating temperature ranges, and thermoelectric performance metrics such as conversion efficiency and power output. The achievable ranges and upper performance levels of efficiency and power density were analyzed as functions of temperature difference and compared across different device architectures, including single-leg and unicouple devices, conventional modules, and multistage configurations. The visualization revealed considerable variations in efficiency and power density even among devices based on similar material systems and operated at similar temperature differences. At the module level, the highest experimental conversion efficiency was 15.1% at ΔT = 473 K for a GeTe/Mg_3Sb_2-based module, while the maximum reported power density was 3.7 W/cm^2 at ΔT = 653 K for a Half-Heusler-based module. This literature-based overview provides a quantitative benchmark for assessing the current performance level of thermoelectric generators and for comparing reported performance with our experimental results.

[P22-7]

Enhancing Seebeck Coefficient of n-Type NbCoSn Half-Heuslers via Sc-Induced Resonant Levels Formation: Hail Park*(Research Institute of Industrial Science and Technology (RIST), Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))

Keywords: Thermoelectric materials, Half-Heusler, Resonant level, Band engineering, Elemental Substitution

NbCoSn half-Heusler alloys are highly promising for medium-to-high temperature thermoelectric power generation, yet their performance is conventionally constrained by the classical trade-off between carrier concentration and the Seebeck coefficient. To overcome this fundamental limitation, we adopt a density functional theory (DFT)-guided materials design strategy utilizing a dilute 1 at.% Sc substitution on the Nb sublattice. Our first-principles calculations predicted that this dilute substitution preserves the semiconducting behavior while successfully creating localized resonant states near the conduction band minimum (CBM). To experimentally validate this, Sc-substituted NbCoSn alloys were synthesized, with quantitative microstructural analyses i.e., Atom Probe Tomography confirming the successful solid solution of Sc. Thermoelectric property evaluations demonstrated that these Sc-

induced resonant levels introduce a pronounced energy asymmetry at the CBM, significantly steepening the density of states (DOS) slope to fundamentally drive the enhancement of power factor (PF). This robust mechanism successfully decouples the electronic transport properties, yielding a maximum enhancement of 7.5% in the Seebeck coefficient and a substantial 20% increase in the power factor compared to the pristine alloy composition. Advanced transport modeling, including Seebeck effective mass and weighted mobility analyses, corroborates that this performance boost fundamentally originates from the resonant states, establishing dilute substitution as a highly effective paradigm for engineering advanced thermoelectric materials.

P23 : 디스플레이재료
Room 1층 전시홀, 10월 29일

[P23-1]
Low ligand density $CsPbBr_3$ Perovskite Nanocrystals for Efficient Ligand-Exchange-Free Light-Emitting Diodes: Yubin Lee, Younghoon Kim*(Kookmin Univ.)
Keywords: $CsPbBr_3$ Perovskite Nanocrystals; Surface Chemistry; Bromide Passivation; Ligand-Exchange-Free; Light-Emitting Diodes

Colloidal $CsPbBr_3$ perovskite nanocrystals (PNCs) are promising emissive materials for next-generation light-emitting diodes (LEDs) owing to their high photoluminescence quantum yield, narrow emission bandwidth, and solution processability. However, conventional PNCs are generally stabilized by electrically insulating long-chain organic ligands, which impede interparticle charge transport and necessitate post-synthetic ligand exchange for efficient device operation. Here, we demonstrate the direct integration of conductive and emissive $CsPbBr_3$ PNCs into LEDs without any post-synthetic ligand exchange by engineering their surface chemistry through an SN_2-based heat-up synthesis. Unlike conventional hot-injection PNCs stabilized by oleylammonium/oleate ligands, the heat-up synthesized PNCs exhibit a substantially reduced organic ligand density and Br^--rich surface passivation. Spectroscopic and surface analyses, together with density functional theory calculations, reveal that the oleylammonium/Br^- surface configuration provides stronger surface stabilization and effectively suppresses surface defect formation. Consequently, the resulting PNC thin films exhibit a photoluminescence quantum yield of 65.8%, a reduced Urbach energy of 29.7 meV, and a charge carrier mobility of 2.59×10^{-6} cm^2 V^{-1} s^{-1}, significantly exceeding those of conventional hot-injection PNC films. Furthermore, their improved crystal size uniformity promotes orientational ordering and reduces energetic disorder in the solid state. Without any additional ligand exchange process, the PNCs were directly employed as emissive layers in LEDs, achieving a maximum external quantum efficiency of 11.4%, a maximum luminance of 314 cd m^{-2}, a turn-on voltage of 2.7 V, and a narrow electroluminescence full width at half maximum of 17 nm. These results demonstrate that controlling ligand density and halide-rich surface passivation provides an effective strategy for directly integrating colloidal perovskite nanocrystals into high-performance optoelectronic devices.

[P23-2]
Scalable Synthesis of Monodisperse Iodide Perovskite Quantum Colloidal Dot Inks via Precursor Diffusion Control for Optoelectronic Devices: Jaehyuk Kim, Younghoon Kim*(Kookmin University)
Keywords: Perovskite Quantum Dots, Precursor Diffusion Control, Scalable Ink, Perovskite Quantum Dot Photovoltaics, Perovskite Quantum Dot Light-Emitting Diodes

Monodisperse iodide-based perovskite quantum dots (PQDs) are promising materials for solution-processed optoelectronics, yet scaling up their synthesis while maintaining material quality remains a critical challenge. Here, we demonstrate a precursor-diffusion-controlled strategy that decouples nucleation and crystal growth, enabling the scalable synthesis of highly monodisperse iodide PQDs without post-synthetic size selection. By eliminating concentration and temperature gradients during scale-up, this diffusion-controlled mechanism ensures narrow size distribution and high batch-to-batch reproducibility, enabling seamless application to both photovoltaics and light-emitting diodes. When applied to photovoltaics, the monodisperse iodide PQDs deliver power conversion efficiencies (PCEs) of up to 16.7%, maintaining over 15% efficiency even with gram-scale batch production. Furthermore, by extending this scalable platform to solution-processable inks for light-emitting diodes (LEDs), the resulting devices achieve a high external quantum efficiency (EQE) of 18.07% (EQE = 16.32% for scalable ink batches) with excellent batch-to-batch reproducibility. Crucially, the process reliability is preserved even when scaling the active device area to 80 mm^2 (EQE = 16.27%). This unified synthesis and engineering approach establishes a practical, scalable route toward industrial-grade optoelectronic manufacturing encompassing both energy-harvesting and light-emitting applications.

[P23-3]
Ag_2Te Colloidal Quantum Dots via Reactivity Control and Surface Passivation for Next-Generation SWIR Display Applications: Dayoung Kang, Younghoon Kim*(Kookmin Univ)
Keywords: Ag_2Te CQDs, SWIR, surface passivation, precursor reactivity, interactive display

Silver chalcogenide colloidal quantum dots (CQDs), particularly Ag_2Te, are promising materials for short-wave infrared (SWIR) optoelectronic applications owing to their low toxicity, solution processability, and tunable bandgap. These characteristics make Ag_2Te CQDs attractive not only for conventional photodetectors but also for next-generation interactive display technologies, including touchless sensing, gesture recognition, and optical sensing systems. However, the strong coordination between Ag precursors and thiol ligands such as 1-dodecanethiol (DDT) can reduce precursor reactivity and delay monomer formation, leading to poor control over nucleation, surface defect formation, and limited optical performance. In this study, the chemical reactivity of Ag_2Te CQDs was regulated by decreasing the ligand-to-metal ratio and increasing the relative proportion of the Ag precursor. Reducing the relative

amount of DDT with respect to Ag alleviates excessive Ag–S coordination and promotes dissociation of Ag–thiol complexes, thereby accelerating the generation of reactive Ag species. The enhanced precursor reactivity enables the reaction system to rapidly reach critical supersaturation, inducing burst nucleation. As a result, highly uniform Ag_2Te CQDs with enhanced photoluminescence were obtained. Although broadening of the excitonic feature was observed in the absorption spectra, TEM analysis confirmed a uniform particle size distribution. This suggests that the spectral broadening is associated predominantly with the intrinsic electronic structure of Ag_2Te, including hybridization between Ag 4d and Te 5p orbitals, rather than particle size dispersity. To further reduce surface defects, an Ag^+ post-treatment using $AgNO_3$ and NH_4OH was performed. The $[Ag(NH_3)_2]^+$ complex formed during this process provides reactive Ag species that compensate Ag-deficient surface sites and passivate Ag-vacancy-related defects. Consequently, the Ag-treated CQDs exhibited enhanced photoluminescence as well as improved colloidal and structural stability. Subsequently, Se-based surface passivation was introduced to further stabilize undercoordinated surface sites and suppress trap-mediated carrier recombination. The Se-treated Ag_2Te CQDs exhibited distinct changes in their optical properties and surface electronic structure, together with improved carrier dynamics, indicating effective surface modification. When incorporated into SWIR photodetectors, the surface-passivated CQDs showed enhanced photoresponse and improved device performance, which were attributed to reduced surface trap density and suppressed nonradiative carrier loss. These results demonstrate that combining precursor reactivity control through ligand-to-metal ratio engineering with sequential Ag^+ and Se surface passivation provides an effective route to high-quality Ag_2Te CQDs. Such SWIR-responsive CQDs offer a promising materials platform for next-generation interactive displays that integrate touchless interaction, gesture recognition, and optical sensing functionalities.

[P23-4]

Nanograin Engineering Enables Low–Dose, High–Resolution Direct Optical Lithography of Polycrystalline Perovskite Films: Lee Hyungdoh, Sun Jae Park, Seonjkyu Maeng, Himchan Cho*(KAIST)

Keywords: metal halide perovskites, direct photolithography, nanograin engineering, high–resolution patterning, crystallization control

Patterning polycrystalline perovskite films via direct optical lithography (DOL) has long been constrained by two coupled limitations: coarse, irregular grains that cap the achievable feature size and sluggish photochemical crosslinking that demands excessive UV exposure. This work tackles both constraints through a single design strategy centered on controlled crystallization. A functional polymer additive is incorporated into the precursor solution, confining grain growth and yielding nanometer-scale, uniform crystallites in place of conventional coarse domains. Paired with a highly reactive thiol–ene crosslinking chemistry, this nanograin-engineered film enables photopatterning at a markedly reduced UV dose while resolving features down to the micrometer scale. Systematic screening across polymer additive concentrations reveals a clear, quantifiable link between grain refinement and pattern quality, evidenced by both a decrease in average grain size and a corresponding rise in the optical contrast of the developed patterns. Beyond monochromatic line patterns, the platform supports multicolor patterning and has been successfully integrated into perovskite light-emitting diodes exhibiting electroluminescent patterns, confirming its compatibility with functional optoelectronic devices. These results establish grain-size control as a practical and generalizable design principle for advancing high-resolution, low-dose photolithography of polycrystalline perovskite thin films toward next-generation display and optoelectronic applications.

[P23-5]

OLED 붕소계 청색 발광 재료의 특허 동향 및 기술 경쟁력 분석: 윤대위, 박함용*(지식재산처)

Keywords: OLED, 발광재료, 붕소, 청색, 품목통계

차세대 디스플레이 산업에서 고효율 및 장수명을 갖춘 청색 발광원 확보는 가장 핵심적인 기술적 과제로 특히 최근 주목받고 있는 붕소(Boron)계 화합물은 우수한 색 순도와 열적 안정성을 바탕으로 기존 소재의 한계를 극복할 대안으로 부상하고 있다. 본 연구는 2025년 품목별 특허통계관리 사업의 데이터를 기반으로, IP5 (한국, 미국, 일본, 중국, 유럽) 내 붕소계 청색 발광 소재의 특허 빅데이터를 정밀 분석하여, 글로벌 기술 경쟁지형과 국내 산업의 대응 전략을 진단하고자 한다. 특허 출원 및 등록 추이 분석 결과, 붕소계 청색 발광 기술은 현재 확연한 "성장 단계"에 진입한 것으로 파악되었고, 기술적 권리화가 가속화 되고 있음을 확인하였다. 국가별 경쟁력, 시장성 분석 및 국가별 점유율 측명에서 대한민국(MOIP)은 글로벌 기술 주도권을 선점하고 있고(LG 화학, 솔루스 첨단소재, SFC, SK 머트리얼스-JNC 등), 국내 원천 기술의 글로벌 시장 권리 확보에 가장 적극적인 행보를 보이고 있으며, 이는 한국의 기술 품질이 양적 성장을 넘어 질적 우위로 이어지고 있음을 시사한다. 그러나 후발 주자인 중국(CNIPA)이 최근 출원인 수를 급증시키며, 공격적인 추격을 전개하고 있다는 점은 향후 큰 위협 요인으로, 국내 기업들은 현재의 기술적 우위를 지키기 우해 고도화된 특허 포트폴리오를 구축하고, 전략적 IP 관리를 통해 중국의 추격 격차를 벌리는 초격차 전략을 지속해야 할 것이다.

[P23-6]

OLED용 인광 금속착물에 관한 특허통계분석: 김지은*, 조다혜, 김경환(지식재산처)

Keywords: OLED, 인광, 도펀트, 유기금속 화합물, 착물

OLED는 전기를 가해 발광층에서의 정공과 전자의 결합으로 발생되는 에너지를 빛의 형태로 방출하는 전계발광 방식을 사용한 발광 소자이고, 상기 에너지를 빛의 형태로 바꿔주는 핵심 역할을 하는 도펀트 화합물로 인광 금속착물이 있다. OLED용 인광 금속착물은 내부양자효율(IQE)이 가장 높은 수준이면서도, 열적 안정성, 발광색 조정 가능성 등 측면에서 매우 유용하고, 수명과 효율의

측면에서 상용화된 적색, 녹색 인광이 현 OLED에서 가장 좋으며, 이러한 적색, 녹색 인광의 경우 색순도, 더 긴 수명 등에 관한 연구가 계속되고 있고, 아직 해결되지 않은 청색 인광의 경우 관련 연구가 현재에도 활발하게 이루어지고 있으며, 이러한 인광은, 새로운 기술인 TADF, HF 등과 경쟁하면서도 서로 보안적인 기술인 점에서, 인광 금속착물에 관한 통계 조사의 의의가 있다. IP5인 한국, 미국, 일본, 유럽, 중국의 공개, 등록 특허를 대상으로 하여 2004년~2025년까지의 출원 및 등록의 추이, IPC별 추이, 출원인의 국적별, 형태별 출원 등의 추이, 국가별 IP 경쟁력, 우리 기업의 IP 경쟁력과 국가별 특허심사동향 등에 관한 품목 통계 조사를 수행하였다.

[P23-7]

Revealing the Role of Metal Halide–Ligand Complexes in the Surface Chemistry of InP Quantum Dots: BOKYEONG SOHN, Seongbeom Yeon, Hwa Seob Choi, Jaehwan Lee, Jae Jun Lee, Jaedong Jang, Hyungdoh Lee, Himchan Cho*(KAIST)

Keywords: indium phosphide quantum dots, metal halide-ligand complex, oxide defect removal mechanism, surface passivation, strain-controlled shell growth

Metal halide–ligand complexes are commonly used to improve the photoluminescence (PL) properties of colloidal quantum dots (QDs). For III–V QDs such as indium phosphide (InP), these complexes are particularly effective in mitigating surface oxidation-related defects, although the detailed reaction pathways and their interplay with metal carboxylates remain poorly understood. Here, we examine the role of zinc oleate ($Zn(OA)_2$) in conjunction with ZnX_2–TOP complexes (ZXT; X = Cl, Br, or I) in promoting the removal of surface oxide species from InP QDs. Compared with treatment using ZXT alone, the addition of $Zn(OA)_2$ substantially enhances oxide removal, with the degree of enhancement varying with the halide. Our results indicate that ZXT can undergo TOP-assisted reactions with surface oxides, but its ability to remove oxidative defects is limited in the absence of $Zn(OA)_2$. $Zn(OA)_2$ is proposed to alter the coordination environment of ZXT, generating mixed-ligand Zn species with reduced steric hindrance. Such coordination changes facilitate both oxide removal and subsequent passivation of the newly exposed surface, thereby limiting reoxidation and suppressing trap formation to improve the PL quantum yield (PLQY). Among the investigated complexes, $ZnCl_2$–TOP exhibits the highest oxide-removal efficiency and requires lower molar equivalents than $ZnBr_2$–TOP and ZnI_2–TOP. This cooperative surface-treatment mechanism also reduces strain buildup during metal chalcogenide shell growth, enabling more homogeneous shell formation and yielding high-quality InP/ZnSe/ZnS core/shell QDs with a PLQY of 88.2%. These findings clarify the role of ligand coordination in surface oxide removal and passivation and provide a framework for designing more effective surface treatments for InP QDs.

P24 : 타이타늄
Room 1층 전시홀, 10월 29일

[P24-1]
고엔트로피 합금 첨가를 통한 Ti-6Al-4V의 β상 안정성 및 TRIP 거동 제어: 최은선, 서기완, 박은수*(서울대학교)
Keywords: Ti-6Al-4V, 준안정 β상, TRIP 효과, Bo–Md 다이어그램

Ti-6Al-4V(Ti64)는 우수한 비강도와 내식성으로 항공·우주 및 모빌리티 분야에 널리 사용되고 있으나, 높은 강도에 비해 항복 이후의 가공경화능이 제한적이어서 강도와 연성을 동시에 향상시키는 데 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 변형 중 상변태를 통해 추가적인 가공경화를 유도하는 TRIP(transformation-induced plasticity) 기작을 활용하고자 하였으며, 상온에서는 잔류하면서도 외부 응력에 의해 마르텐사이트로 변태할 수 있는 준안정 βsup(metastable β)을 정밀하게 설계하는 것을 목표로 하였다. 기존 TRIP 티타늄 합금에서는 β 안정화 원소의 첨가를 통해 준안정 βsup을 형성해 왔으나, 개별 β 안정화 원소는 각각의 한계를 가진다. β-eutectoid 원소는 적은 첨가량으로도 βsup을 효과적으로 안정화할 수 있지만, 과량 첨가 시 Ti계 금속간화합물의 형성 가능성이 증가하여 첨가량에 제약이 있다. 반면 β-isomorphous 원소는 Ti와 높은 고용성을 가지지만, 과도한 첨가는 βsup의 과안정화와 전체 합금원소 함량 증가를 초래할 수 있다. 이에 본 연구에서는 β-eutectoid 원소인 Fe, Cr, Co, Ni의 첨가량을 다원계로 분산하고, β-isomorphous 원소 X(V, Nb, Mo, Ta, W)를 조합한 FeCrCoNiX 첨가계를 설계하였다. FeCrCoNi 조성을 고정한 상태에서 서로 다른 Bo 및 Md 특성을 갖는 X 원소를 적용함으로써, βsup의 Bo–Md 좌표와 준안정성을 보다 넓은 범위에서 조절하고자 하였다. 또한 βsup의 안정성은 벌크 합금 조성뿐만 아니라 α/β 상간 원소 분배에 의해서도 달라지므로, 열처리 온도를 추가적인 설계 변수로 활용하여 βsup의 분율과 실제 조성을 제어하고 목표 Bo–Md 영역을 정밀하게 구현하고자 하였다. 본 연구는 β-eutectoid 및 β-isomorphous 원소의 특성을 고려한 다원계 조성 설계를 통해 준안정 βsup의 설계 자유도를 확장하고, Bo–Md 기반 상안정도 설계를 TRIP 기반 고가공경화 티타늄 합금 개발에 적용하는 새로운 합금 설계 전략을 제시한다.

[P24-2]
수전해용 귀금속-free 고내식 타이타늄 신합금 설계: 김도경(한국재료연구원, 부산대학교), 주재성, 박예준(한국재료연구원), 이제인(부산대학교), 홍재근*, 김재혁*(한국재료연구원)
Keywords: Titanium alloy, Water electrolysis, Precious-metal-free, Corrosion resistance, Passive film

수전해 시스템의 장수명화 및 안정적인 운전을 위해서는 강산 환경에서 우수한 내식성을 갖는 구조 소재의 확보가 요구된다. 타이타늄은 표면에 형성되는 안정한 수동막에 의해 우수한 내식성을 나타내지만, 가혹한 산성 환경에서는 수동막의 안정성이 저하될 수 있다. 이를 개선하기 위해 Ti–Pd계 합금과 같이 귀금속을 첨가하여 재수동화 특성을 향상시킨 소재가 활용되고 있으나, 고가의 귀금속 사용에 따른 소재 비용 증가와 원료 수급 측면의 한계가 존재한다. 본 연구에서는 귀금속 첨가 없이 강산 환경에서 높은 내식성을 확보하기 위해 재수동화 거동, 균질한 β 단일상 조직 및 복합 수동막 형성을 주요 설계 인자로 하는 Ti–Nb–Zr–Mo계 신합금을 설계하였다. Nb는 βsup 안정화와 Nb_2O_5 형성을 통한 수동막 안정성 향상, Zr은 ZrO_2 형성을 통한 수동막의 치밀화, Mo는 강산 환경에서의 재수동화 특성 향상을 목적으로 첨가하였다. 합금원소별 영향을 체계적으로 분석하기 위해 Nb 함량을 20–30 wt.%, Zr 함량을 10–20 wt.% 범위에서 변화시키고 Mo 함량을 3 wt.%로 고정하여 총 6종의 후보 합금을 설계하였다. 설계 합금의 βsup 안정성을 평가하기 위해 Mo 당량($[Mo]_{eq}$), 전자농도(e/a) 및 β 변태온도(Tβ)를 분석하였다. JMatPro 기반 열역학 계산 결과, 설계 합금의 Tβ는 약 562–625 ℃ 범위로 예측되었으며, 이를 바탕으로 β 영역 열처리를 통한 균질한 βsup 조직 제어가 가능할 것으로 판단하였다. 특히 Nb 함량이 높은 합금에서는 상대적으로 높은 $[Mo]_{eq}$ 및 e/a 값을 나타내어 βsup 안정성이 증가할 것으로 예측되었다. 설계된 합금의 강산 환경 내식성을 평가하기 위해 황산 용액에서 동전위 분극시험을 수행하고, 부식전위, 부식전류밀도 및 수동전류밀도 등의 전기화학적 특성을 비교하고자 한다. 또한 부식시험 후 표면에 형성된 산화층의 조성 및 화학적 상태를 분석하여 Nb, Zr 및 Mo 첨가에 따른 복합 수동막의 형성 거동을 규명하고, 합금 조성과 수동막 특성 간의 상관관계를 바탕으로 귀금속-free 고내식 타이타늄 신합금의 설계 방향을 제시하고자 한다.

[P24-3]
Ti-12.1Mo-1Fe 합금의 시효처리에 따른 석출상 형성이 진동감쇠능과 기계적 특성에 미치는 영향: 김진모, 이재관, 이동근*(국립순천대학교)
Keywords: metastable β titanium alloy, Ti-12.1Mo-1Fe alloy, aging treatment, ω phase, secondary α phase, vibration damping

β 타이타늄 합금은 우수한 기계적 특성과 성형성을 바탕으로 항공우주, 자동차 및 다양한 다양한 산업군에서 사용되고 있다. 또한 열처리를 통하여 다양한 석출상을 형성하여, 기계적 물성을 효과적으로 제어 가능하다. 또한, 석출상과 조직 간의 계면 및 미세조직 변화는 재료의 진동감쇠능에 변화를 준다. 고유진동수가 높은 합금은 주파수의 일치 및 근접을 지연시켜 공진에 의한 진동 증폭을 억제할 수 있으며, 이는 부품의 내구성과 구조적 안정성에 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 Ti-12.1Mo-1Fe 합금의 석출상을 제어하여 진동감쇠능과 기계적 특성의 변화를 평가하였다. β-transus이상의 온도인 800 ℃에서 용체화 처리하여 βsup단상 조직을 형성한 후 시효처리 하였으며, 낮은 시효온도에서 ωsup이 일부 형성되었다. 또한, 시효온도가 증가함에 따라 ω 상에서 secondary αsup으로 상변태되어 αsup 분율이 증가하였다. 미세조직에 따른 진동감쇠능의 변화를 측정하였고, 이를 통하여 Ti-12.1Mo-1Fe 합금의 석출상 제어에 다른 미세조직과 진동감쇠능 및 기계적 특성 간의 상관관계를 규명하였다.

[P24-4]

TiO_2가 첨가된 Ti-6242 합금의 In-situ 산화물 형성에 의한 기계적 특성 향상: 김태웅, 김수연, 김홍민, 이동근*(국립순천대학교)

Keywords: Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy, spark plasma sintering (SPS), in-situ oxide formation, TiO_2, mechanical properties

Ti-6242(Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo) 합금은 뛰어난 비강도와 고온 특성을 바탕으로 항공기 가스 터빈 엔진의 중온부 부품 소재로서 기존 Ni기 내열합금(Ni-based superalloy)을 대체하기 위해 활발히 연구되고 있다. 그러나 더욱 가혹해지는 고온 작동 환경에 대응하기 위해서는 추가적인 기계적 특성 향상이 요구된다. 기존의 산화물 분산강화 복합재는 계면 결합력과 비싼 비용이 문제가 되고 있다. 이에 본 연구에서는 Ti-6242 합금에 TiO_2분말을 첨가한 후 방전 플라스마 소결(SPS) 공정을 적용하여 In-situ 산화물 형성 및 산소 고용에 따른 미세조직 변화와 기계적 특성에 미치는 영향을 규명하였다. 특정 소결 조건에서 상대밀도 98.6% 이상의 치밀화 소결체를 확보할 수 있었다. TiO_2가 첨가된 합금은 In-situ 반응을 통해 형성된 나노 산화물로 인한 피닝(Pinning) 효과로 결정립 조대화가 억제되었으며, 기지 강화 효과가 더해져 기계적 특성이 크게 향상되었다.

[P24-5]

Atomic-scale investigation of the oxidation behavior of boron-containing TiAl alloys: Won-Hyoung Lee, Se-Ho Kim*(Korea Univ.)

Keywords: Atom probe tomography, TiAl, Boron, Aerospace

Ni-based superalloys have long been the dominant material in the aerospace industry. However, the growing demand for lightweight components has motivated the search for alternatives. In this context, TiAl alloys have emerged as promising candidates for next-generation aerospace materials. Nevertheless, their use is limited by poor high-temperature oxidation resistance and brittleness, and several alloying elements are therefore added to improve ductility, boron being one of them. The influence of boron on the oxidation behavior of the alloy, however, remains unclear. This is because the earliest stages of oxidation, such as oxygen dissolution, partitioning between the constituent phases, and segregation to interfaces, occur at concentrations and length scales that are difficult to resolve by conventional analysis methods alone. In this work, we therefore employ atom probe tomography (APT), which enables three-dimensional compositional analysis at the atomic scale, to investigate the oxidation behavior of boron-containing TiAl alloys as a function of exposure temperature.

[P24-6]

주조 Titanium Grade 7의 이차상 (β-Ti) 형성에 따른 미세조직 및 국부 부식특성 평가: 이진우, 최재훈, 최원진, 김정한*, 강신곤*(동아대학교)

Keywords: Titanium Grade 7, Secondary phase, Cosegregation, SECM, KPFM

Titanium Grade 7 (Ti-0.15Pd)은 미량의 Pd 첨가를 통해 환원성 산성 환경에서도 우수한 내식성을 나타내는 합금으로, 화학 플랜트 및 해양·담수화 설비 등에 광범위하게 적용되고 있다. 그러나 제조 공정에 따른 미세조직 변화와 그에 따른 부식 거동에 대한 체계적인 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 주조 공정으로 제조된 Titanium Grade 7의 미세조직을 분석하고, 이를 국부 부식 특성과 연계하여 고찰하였다. OM 및 SEM 관찰 결과 주조재의 기지는 층상 (lamellar) α-Ti가 서로 평행하게 배열된 콜로니 조직으로 구성되어 있었으며, α 라멜라 계면 (interlamellar region)을 따라 기지와 명암 대비를 보이는 이차상이 얇은 띠 형태로 시편 전반에 걸쳐 관찰되었다. EPMA 분석에서 해당 영역에 βs상 안정화 원소인 Fe와 Pd이 국부적으로 동시편석 (cosegregation)되어 있음이 확인되었다. XRD에서는 이차상에 대응하는 독립적인 회절 피크가 검출되지 않았으나, EBSD 및 TEM 분석을 통해 기지는 α-Ti (HCP), 이차상은 β → α 변태가 국부적으로 억제되어 형성된 잔류 βs상 (retained β, BCC)임을 규명하였다. 이러한 이차상이 부식 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해 SECM (Scanning Electrochemical Microscopy) 및 KPFM (Kelvin Probe Force Microscopy) 분석을 수행한 결과, β-Ti가 분포하는 경계 영역에서 feedback current의 국부적 증가와 함께 αs상과 βs상 간 약 220 mV의 Volta potential 차이가 측정되었다. 이는 이차상 주변의 전기화학적 활성이 국부적으로 높으며, 두 상 간 전위차에 의한 미소 갈바닉 부식 (micro-galvanic corrosion)으로 상대적으로 활성인 αs상의 우선 용해 (preferential dissolution)가 발생할 수 있음을 시사한다. 향후 부식 환경을 모사한 용액에서 침지 부식 시험 (immersion corrosion test)을 수행하여 시간에 따른 중량 변화를 정량 분석하고, 침지 전후의 표면 미세조직 변화를 OM, SEM 및 AFM으로 관찰하여 이차상 주변의 우선적 부식 발생 여부를 확인할 예정이다. 이를 통해 주조 Titanium Grade 7의 미세조직 특성과 부식 거동 간의 연관성을 이해하고자 한다.

[P24-7]

Effect of Nb addition on the mechanical properties of Ti811 alloy: Yeonju Noh(Korea Advanced Institute of Science and Technology), Yejun Park(Korea Institute of Material Science), Pyuck-Pa Choi*(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

Keywords: Near alpha Titanium alloys, O-phase, Tensile deformation

Near-α titanium alloy Ti-8Al-1Mo-1V (Ti811) provides low density and high specific modulus for aerospace applications. The formation of α_2 (Ti_3Al) enable the material to with stand high temperatures, but at the same time deteriorate the elongation of material because it promotes localized slip and severe dislocation locking. Unlike the α_2 phase, which exhibits restricted slip modes and localized deformation, the orthorhombic O-phase (Ti_2AlNb) possesses multiple active slip systems while retaining high-temperature phase stability. Substituting Nb into the Ti sites of the α_2 phase modifies its stoichiometric equilibrium, driving a phase transition toward the O-phase to accommodate deformation without early embrittlement. In this study, stoichiometric tailoring of α_2 phase was investigated by alloying Nb (0, 2.03, and 6 wt.%) to promote transformation toward ductile orthorhombic O-phase (Ti_2AlNb). Alloy composition were formulated using Bo-Md electron parameters, and phase stability was guided by thermodynamic calculations (JMatPro). Arc-melted

ingots were subjected to a three-step heat treatment followed by water quenching to suppress premature α_2 precipitation. Characterization via SEM and XRD revealed that Nb addition induced constitutional supercooling, refining the α-lath width from 1.83μm to 0.47μm. Micro-tensile evaluation with Digital Image Correlation (DIC) demonstrated significant strength enhancement, with ultimate tensile strength exceeding 1.0GPa in Ti811+6Nb, a 200MPa increase over the baseline alloy. Transmission electron microscopy (TEM) investigation elucidated the specific contributions of nano-sized α_2 and O-phase precipitates to the mechanical response and deformation behavior. Based on these critical mechanisms, strategies for thermal processing optimization were established to achieve a synergy between high strength and balanced ductility.

[P24-8]

Orientation-dependent room-temperature nanoindentation creep of commercially pure titanium: HaSeong Baek(Incheon National University), Yong-Taek Hyun(Korea Institute of Materials Science), Tea-Sung Jun*(Incheon National University)

Keywords: CP-Ti, nanoindentation creep, creep mechanism, orientation-dependent

The dependence of the room-temperature creep behaviour of commercially pure titanium (CP-Ti, grade 1) on crystallographic orientation was investigated through spherical nanoindentation creep testing. Twelve grains ranging from near-basal to near-prismatic orientations were selected using electron backscatter diffraction (EBSD), and constant-load hold tests were performed at various peak loads using a sphero-conical indenter. The indentation response exhibited a distinct orientation dependence. Near-basal grains showed higher resistance to indentation and time-dependent deformation, whereas creep deformation increased as the orientation approached the prismatic orientation. Under 250 mN conditions, after a 1000 s hold, the creep displacement was 219 nm for near-basal grains and increased to 668 ± 89 nm for near-prismatic grains, confirming the existence of significant creep anisotropy at the grain scale. For all orientations, the creep curve consisted of a dominant transient stage followed by a slow quasi-secondary regime, and the relative contribution and time-dependent changes of each stage varied according to crystallographic orientation. The primary creep stage time exponent α ranged from approximately 0.29 to 0.37 for hard orientation, while it tended to increase to approximately 0.39–0.41 as the orientation became softer. The apparent activation volume ranged from approximately 7 to 53 b^3, a result consistent with thermally activated dislocation-mediated deformation rather than diffusional creep. Threshold stress decreased relatively as the orientation became softer, exhibiting a trend similar to the orientation dependence of indentation flow resistance. This implies that crystallographic orientation primarily alters resistance to dislocation motion rather than the fundamental creep mechanism itself. Therefore, it is concluded that room-temperature nanoindentation creep in CP-Ti is governed by a common thermally activated dislocation-glide process, and the magnitude of creep deformation is largely determined by the anisotropic slip resistance of the hexagonal crystal structure. These results provide a basis for understanding orientation-dependent time-dependent deformation and stress redistribution in titanium at the grain scale.

[P24-9]

SMR 열교환기용 고열전도 lean Ti 신합금 설계: 천해영, 주재성, 박예준(한국재료연구원), 박노근(영남대학교), 홍재근*, 김재혁*(한국재료연구원)

Keywords: Titanium alloy, Thermal conductivity, Lean alloy design, Tensile properties

소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR) 열교환기용 구조소재는 우수한 열전달 특성과 함께 구조재로서 충분한 기계적 특성이 요구된다. 순수 타이타늄은 우수한 내식성과 비교적 높은 열전도도를 가지지만, 일반적인 구조용 Ti 합금에서는 기계적 특성 향상을 위한 합금원소 첨가에 따라 열전도도가 크게 감소하는 한계가 있다. 본 연구에서는 SMR 열교환기 적용을 목표로, 열전도도와 기계적 특성을 동시에 고려한 순수 Ti 기반 lean Ti 합금의 조성 설계를 수행하였다. 합금원소는 Ti의 열전도도 감소를 최소화하면서 고용강화 효과를 확보하기 위해 Al, Sn, Zr 및 Nb를 선정하였다. 먼저 Ti-X 이원계 합금을 제조하여 각 합금원소 첨가에 따른 열전도도 변화를 체계적으로 평가하고, 이를 바탕으로 3원계 및 4원계 합금 조성을 설계하였다. 제조된 합금에 대하여 열확산도를 측정하여 열전도도를 산출하였으며, 상온 인장시험을 통해 기계적 특성을 평가하였다. 이원계 합금의 열전도도 평가 결과, 합금원소 첨가에 따른 열전도도 감소 효과는 Nb ≈ Zr < Sn < Al 순으로 나타났으며, 특히 Zr 및 Nb는 Al과 Sn에 비해 열전도도 저하에 미치는 영향이 상대적으로 작은 것으로 확인되었다. 또한 이원계 합금의 실험 결과를 기반으로 합금 조성과 열전도도 간의 경험적 관계를 도출하였으며, 이를 이용하여 다원계 합금의 조성 설계를 수행하였다. 3원계 및 4원계 합금에서도 조성에 따른 열전도도 변화가 이원계 합금에서 확인된 경향과 대체로 일치하였으며, 일부 조성에서 11 W/m·K 이상의 우수한 열전도도를 확보하였다. 상온 인장특성과 열전도도를 함께 비교함으로써, 열전도도 저하를 최소화하면서 구조재로서의 강도를 확보하기 위한 합금원소 조합 및 조성 최적화 가능성을 확인하였다. 본 연구 결과는 기존 고합금 Ti 합금과 달리 최소 합금화를 통해 열전도도와 기계적 특성의 균형을 확보하는 lean Ti 합금 설계 전략을 제시하며, 향후 SMR 열교환기용 고열전도 Ti 구조소재 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P24-10]

Material Extrusion Additive Manufacturing (MEAM) 공정으로 제조된 Ti-15Nb-5Sn 합금(at. %)의 회복 거동에 미치는 infill density의 영향: 임진환, 김민수*(한국생산기술연구원(KITECH))

Keywords: 적층제조, 타이타늄, 생체재료, 기공도

다공성 β형 타이타늄 합금은 낮은 탄성계수, 우수한 생체적합성 및 회복 변형 특성으로 인해 생체 임플란트용 소재로 주목받고 있다. 본 연구에서는 재료압출 적층제조(Material Extrusion Additive Manufacturing, MEAM)로 제조된 다공성 Ti-15Nb-5Sn 합금(at. %)의 infill density에 따른 회복 거동을 체계적으로 조사하였다. 구형 Ti-15Nb-5Sn 합금 분말과 바인더 시스템을 균일하게 혼합하여 필라멘트를 제조하였으며, infill density를 변화시켜 서로 다른 기공도를 갖는 다공성 시편을 MEAM 공정으로 제조하였다. 이후 탈지, 소결 및 용체화 처리를 수행하고 미세조직과 기계적 특성을 분석하였다. infill density가 증가함에 따라 β상의 면적 분율은 증가하고 기공도는 감소하였으며, 이와 함께 산소 함량이 증가하는 경향을 나타냈다. 특히 약 65%의 기공도를 기준으로 회복 변형률의 뚜렷한 전이가 관찰되었다. 임계 기공도 이하에서는 국부적인 소성변형이 지배적으로 발생하여 회복 변형률이 감소한 반면, 임계 기공도 이상에서는 다공성 구조에 의한 국부적인 연화 거동으로 변형 회복이 향상되었다. 또한 이러한 회복 거동은 응력유기 마르텐사이트 변태뿐만 아니라 다공성 스트럿의 굽힘에 의한 회복 변형에도 영향을 받는 것으로 확인되었다. 본 연구 결과는 MEAM이 경제적인 제조 기술일 뿐만 아니라 미세조직과 기공 구조를 제어함으로써 요구되는 기계적 및 생체역학적 특성을 구현할 수 있는 효과적인 제조 방법임을 보여준다. 이를 통해 회복 성능이 향상된 환자 맞춤형 다공성 β형 타이타늄 임플란트 설계를 위한 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

[P24-11]

Ti-VAR Melt Data를 기반한 용해 조건 최적화 모델 개발: 장대건, 최재영, 김경민, 이장호, 임종섭, 유종영, 송영석*(세아창원특수강)

Keywords: 타이타늄, 진공아크재용해(VAR), Meltflow-VAR시뮬레이션, Pool Depth, Pool Volume

타이타늄은 높은 비강도와 우수한 내식성 등의 특성으로 인해 우주, 항공, 화학, 발전, 의료 등 다양한 산업 분야에서 광범위하게 활용되고 있다. 타이타늄은 산소 친화도가 높아 진공 상태에서 잉곳(Ingot)을 제조하며, 주로 진공아크재용해(Vacuum Arc Remelting, VAR) 공정을 통해 통상 2회에 걸쳐 재용해를 수행한다. 이때 용해 조건은 잉곳의 내부 품질을 좌우하는 핵심 요인이다. 고품질 잉곳을 제조하기 위해서는 적절한 용해 파라미터(Parameter) 설정이 필수적이며, 특히 대형 잉곳의 경우 공정 조건에 따른 내부 건전성 편차가 크므로 용융 풀(Melt Pool)의 거동 및 응고 형태를 안정적으로 제어하는 것이 매우 중요하다. 그러나 실제 현장에서 수집되는 용해 실적 데이터만으로는 용융 풀 내부의 미시적 응고 정보(Pool Volume, Pool Depth 등)를 직접 관측하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 용해 실적 데이터와 수치 시뮬레이션을 결합한 하이브리드 데이터 구축 방식을 도입하여 머신러닝 기반의 Ti-VAR 용해 조건 최적화 모델을 개발하였다. 실시간 VAR 현장 용해 실적 데이터(전류, 전압, 용해 속도, 진공도 등)를 수집 및 정제하고, Meltflow 시뮬레이션을 수행하여 계측 불가능한 용융 풀 부피(Pool Volume) 및 용융 풀 깊이(Pool Depth) 데이터를 생성 및 보완하였다. 이를 통해 공정 변수와 응고 품질 특성 간의 정밀한 상관관계 데이터베이스를 구축하였으며, 주요 공정 변수에 따른 용체 거동 예측 및 결함 방지를 위한 최적 용해 조건을 산출하는 머신러닝 최적화 프레임워크를 작성하였다. 시뮬레이션 융합 데이터를 활용하여 머신러닝 모델을 평가한 결과, 실적 데이터 단독 활용 대비 응고 결함 및 용융 풀 형상 예측모델을 만들수 있게 되었다. 결론적으로 본 모델은 결함 유발 가능 구역을 사전에 예측하고 목표 잉곳 품질을 달성하기 위한 최적 전압, 전류 및 용해 속도 가이드를 제시한다. 본 연구 결과는 Ti-VAR 공정의 데이터 기반 스마트 제어 체계를 구축함으로써 실제 현장 적용을 통한 품질 향상 및 생산 원가 절감에 크게 기여할 것으로 기대된다. 향후 지속적인 데이터 축적을 통해 모델의 정확도를 한층 더 향상시켜 잉곳 건전부의 수율을 더욱 향상 시켜나갈 계획이다.

[P24-12]

Ti-Nb-Zr-X-O 합금에서 X원소에 따른 전자구조가 Gum metal 특성에 미치는 영향: 김근채, 김재일*(동아대학교, (주)에쓰엠팹)

Keywords: Gum metal, 탄성계수, 전자구조

Gum metal은 높은 강도와 낮은 탄성계수, 비선형 탄성거동 및 낮은 열팽창계수 등의 독특한 기계적 특성을 나타내는 준안정 β-Ti 합금으로, 생체재료 및 항공우주용 구조재료로서 높은 응용 가능성을 가진다. 이러한 특성은 평균 원자가 전자 수(e/a), 결합차수(Bo) 및 d-orbital 에너지 수준(Md)과 같은 전자구조 인자와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 또한 산소는 Ti 합금의 octahedral site에 침입형으로 고용되어 격자 왜곡을 유발하고 전위 이동을 억제함으로써 강도를 증가시키는 동시에, 준안정 β-Ti 합금에서 α″ 및 ω상의 형성을 억제하여 β상의 안정성에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 기존 Gum metal에 사용되는 고융점?고밀도 원소인 Ta과 더불어, Ti-Nb-Zr-X-O계 합금에서 X원소 종류(X=Cr, Sn, Co, Mn, V) 및 산소 함량에 따른 전자구조와 Gum metal 거동에 미치는 영향을 체계적으로 평가하고자 하였다. Ti-Nb-Zr-X 합금을 기본 조성으로 하여 산소 함량을 0~1.5at% 범위에서 변화시켰으며, 진공 아크 용해를 통해 합금을 제조하였다. 제조된 합금은 96%의 최종 압연율까지 냉간압연한 후 방전가공을 통해 시험편으로 가공하였으며, Ar 분위기에서 봉입 후 용체와 열처리 및 퀜칭을 실시하였다. 각 합금의 조성과 산소 함량에 따른 e/a, Bo 및 Md 값을 계산하고, 상 구성 및 미세조직과 함께 상온 및 저온에서의 인장시험을 통해 얻어진 강도, 탄성계수 및 변형 거동을 비교하였다. 이를 통해 X원소 및 산소 첨가에 의한 기계적 특성의 변화를 분석하고, 전자구조 인자와 실제 Gum metal 거동 사이의 상관관계를 평가하였다.

P25 : 고온재료
Room 1층 전시홀, 10월 29일

[P25-1]
CALPHAD와 기계학습을 활용한 다원계 Nb 기반 합금의 확산 동역학 특성 예측: 유태현, Khushahal Thool, Krishnamohan Thekkepat, 이승철, 최시훈*(국립순천대학교), 서진유(한국과학기술연구원)
Keywords: Nb-based alloy, CALPHAD, Atomic mobility, Diffusion kinetics, Apparent activation energy, Machine learning

Nb 기반 초고온 합금은 우수한 고온 기계적 특성과 열적 안정성으로 인해 극한환경용 구조재료로서 높은 잠재력을 지닌다. 이들 합금의 고온 미세조직 안정성과 상 변화는 구성 원소의 이동 및 확산 거동에 크게 좌우된다. 그러나 다원계 합금에서는 조성과 온도에 따라 원소별 이동도가 복잡하게 변화하므로, 광범위한 조성공간에서 확산 동역학 특성을 실험적으로 평가하는 데 상당한 시간과 비용이 요구된다. 본 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 CALPHAD 기반 kinetic database와 기계학습을 연계하여 Nb 기반 다원계 합금의 조성과 확산 동역학 특성 간의 관계를 예측하는 데이터 기반 프레임워크를 구축하였다. Nb-Ta-Hf-Zr-Ti-V-W 다원계 합금계를 대상으로 가상 조성을 생성하고, Thermo-Calc 및 TC-Python과 열역학 및 mobility database를 이용하여 조성과 온도에 따른 평형상 및 원소별 atomic mobility를 계산하였다. 계산된 atomic mobility와 합금 조성을 기반으로 각 가상 합금의 유효 확산 동역학을 나타내는 mobility-weighted kinetic descriptor를 정의하였으며, 이 descriptor의 온도 의존성을 Arrhenius 관계로 분석하여 apparent activation energy (Qapp)를 산출하였다. 이후 합금 조성과 함께 원자 반경, 전기음성도, 원자가전자수 등의 조성 가중 물리·화학적 descriptor를 기계학습 입력변수로 구성하고, 다양한 지도학습 회귀 알고리즘을 적용하여 합금 조성 및 물리·화학적 특성으로부터 Qapp를 예측하는 surrogate model을 구축하였다. 또한 상관관계 분석과 feature importance 분석을 통해 주요 조성 및 descriptor가 확산 동역학 특성에 미치는 상대적 영향을 평가하였다. 본 연구에서 제안한 CALPHAD-기계학습 연계 방법론은 광범위한 Nb 기반 다원계 조성공간에서 확산 동역학 특성을 효율적으로 탐색하고, 고온 미세조직 안정성을 고려한 합금 후보를 선별하기 위한 계산·데이터 기반 합금 설계 프레임워크로 활용될 수 있다.

[P25-2]
Effects of alloying elements on the intermediate-temperature oxidation behavior of the Nb-Si-based alloy: Jueun Kim(Korea Institute of Materials Science, DongA Univ), Bongchul Kim, Jeonghyeon Do, JoongEun Jung, In Soo Kim, Baig Gyu Choi(Korea Institute of Materials Science), Jong Bae Jeon*(DongA Univ), Daewon Yoon*, Sangwon Lee*(Korea Institute of Materials Science)
Keywords: Nb-Si alloy, High temperature material, Aircraft engines, Oxidation, Alloying element

As the operating temperature of Ni-based superalloys currently used in aircraft engines has reached approximately 85% of their melting point (around 1150 ºC), the development of alternative materials is urgently required. Nb-Si-based alloys have emerged as promising next-generation high-temperature materials due to their superior melting points, lower density, and better creep resistance compared to Ni-based superalloys. However, Nb-Si-based alloys suffer from limitations in oxidation resistance and room-temperature fracture toughness. In particular, they are susceptible to oxidation starting from approximately 350 ºC, with severe degradation of the Nbss at high temperatures, necessitating research to enhance their oxidation resistance. In this study, we investigated the influence of alloying elements in the oxidation behavior of the Nb-Si-Ti-Ta-Hf-Al-Mo alloy system by varying the contents of Ta, Hf, Al, and Mo at 750 ºC for up to 64 hours. Experimental results demonstrated that alloys with increased Ta, Hf, and Al contents exhibited superior oxidation resistance, characterized by suppressed mass gain over time, while the Mo addition induced pest oxidation. Furthermore, to investigate the mechanism underlying each alloying effect, we comparatively analyzed the oxide layer formation and microstructural characteristics of the subsurface region involved in oxidation. This study systematically elucidates the effects of alloying elements content control on the intermediate-temperature oxidation behavior of Nb-Si-based alloys, contributing to the development of next generation high-temperature structural materials with enhanced oxidation resistance.

[P25-3]
V 치환 Fe-Cr-Ni-Al-Ti 철계 내열합금의 미세조직 및 고온물성 변화 연구: 권민철, 최순원(공주대학교 신소재공학과, 첨단 분말 소재 부품 센터), 박강현, 임가람(한국재료연구원 극한재료연구소), 송기안*(공주대학교 신소재공학과, 첨단 분말 소재 부품 센터)
Keywords: Ferritic alloys; L21 precipitate; Compressive test; High temperatures; Coherent interface

규칙 격자 구조인 $L2_1$-Ni_2TiAl 석출상 포함 Fe 기반 합금은 우수한 고온 강도를 부여하지만, Fe 기지상과의 높은 격자 불일치도로 인해 pipe 확산을 유도하는 반정합 계면이 형성될 수 있음으로 계면구조 제어가 요구된다. 선행 연구에서는 Al 함량의 조절을 통해 정합 계면을 도모하여 높은 고온 인장강도를 확보했으나, 과도한 Al 첨가는 재료의 취성을 유발한다는 한계가 존재하므로 대체 원소가 요구된다. 반면, V은 $L2_1$-Fe_2VAl 석출상을 유도할 수 있을 뿐만 아니라 Ti보다 작은 원자 반경을 가지므로, Ti와 V을 부분 치환함으로써 석출상의 격자상수 및 격자 불일치도를 유효하게 제어할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 Fe-Cr-Ni-Al-$Ti_{(4-x)}$-V_x 시스템을 설계하여 V 치환에 따른 계면 정합성, 강화 메커니즘 및 고온 변형거동 변화를 체계적으로 분석하고자 하였다. 구체적으로 진공 아크 용해 및 흡입 주조로 제조된 합금에 대해 주사전자현미경(SEM)과 투과전자현미경(TEM)을 활용하여 석출상의 형성 및 상거동을 분석한다. 정량적 미세조직 파라미터를 바탕으로 석출 강화 메커니즘을 정량 계산하여 각 상이 강도에 미

치는 기여도를 평가한다. 또한 고온 변형 중 기지상과 석출상 간의 응력 분배 및 하중 전달 거동을 실시간으로 추적하기 위해 In-situ 중성자 회절 시험(In-situ neutron diffraction)을 수행하고, 각 상의 격자 변형률의 변화 거동이 합금의 고온 강도와 연성에 기여하는 미시적 메커니즘을 고찰하고자 한다.

[P25-4]

오스테나이트계 경량철강의 온도에 따른 Cyclic Softening/Hardening 거동과 전위 미세조직 상관성: 황동현, 주하연, 김시연(국립창원대학교), 고의석(현대스틸파이프 생산기술연구소), 김치원, 박성준(한국재료연구원 극한재료연구소), 홍현욱*(국립창원대학교)

Keywords: Lightweight steel, Low cycle fatigue, Cyclic hardening, Dynamic Strain Aging

에너지 발전산업의 효율향상과 온실가스 저감이라는 사회적, 경제적 요구에 발맞춰 고비강도 소재에 대한 연구개발이 진행되고 있으며, 후보 소재로 FeMnAlC 합금계의 경량철강이 고려되고 있다. 발전용 저압터빈 블레이드의 적용 환경을 고려할 때, 피로 특성은 필수적으로 요구된다. 이에 따라 본 연구에서는 발전용 저압터빈 블레이드 적용을 위한 FeMnAlC 경량철강소재의 저주기 피로 거동을 해석하고자 하였다. 본 연구의 합금은 오스테나이트계 경량철강 Fe-22Mn-8Al-0.9C이며, 용체화 처리 후 550 ºC/6시간 시효 처리하여 경량 철강의 주요 강화 인자인 κ-carbide의 석출을 유도하였다. 그 결과 미세조직은 오스테나이트 기지에 약 10 nm 수준의 미세하게 석출된 κ-carbide로 구성되었다. 상온 인장 특성은 항복점 (818 MPa) 이후 인장강도 1051 MPa로 우수한 가공경화뿐만 아니라 46%의 높은 연신율을 나타내었다. TEM을 통한 파단부 미세조직 관찰 결과 Shear-band Induced Plasticity 변형 기구가 지배적인 것으로 확인되었다. 다음으로 핵심 요구 특성인 상온/200 ºC 저주기 실험 결과 (total strain range, $\Delta\varepsilon t$ = 0.8~2.0%), 상온에서는 Cyclic softening이 지배적으로 발생하고, 200 ºC에서는 Cyclic hardening이 발생하였다. 또한 상온과 달리 200 ºC에서는 Hysteresis loop에 serrated flow가 관측되었다. DSA의 따른 Cyclic hardening을 규명하기위해 추가적으로 여러 온도에서 (RT~400 ºC) 저주기 피로 시험을 진행하였고, Cyclic softening을 규명하기 위해 상온에서 저주기 피로 수명이 5,000 Cycles인 total strain range, $\Delta\varepsilon t$ = 1.4% 조건에서 1, 000 cycles, 3, 000 cycles 시편과 피로 파단된 5,000 cycles 시편의 전위 거동을 관측하여 본 연구 합금의 저주기 피로 변형 동안 전위 evolution과 Cyclic softening 및 Cyclic hardening 상관성에 대해 고찰하였다.

[P25-5]

The Effect of Directly Introducing $Y_2Ti_2O_7$ on Oxide Dispersed Strengthened Alloys for High-Temperature Applications: YUHAN LU, Sanghoon Noh*(국립부경대학교)

Keywords: Oxide dispersion strengthened alloy, $Y_2Ti_2O_7$, Direct oxide introduction, Mechanical alloying, Spark plasma sintering, High-temperature mechanical properties

Oxide dispersion strengthened (ODS) alloys are promising structural materials for high-temperature applications because of their excellent mechanical strength and microstructural stability. In conventional ODS processing, Ti and Y_2O_3 are separately added and Y–Ti–O complex oxides are subsequently formed during mechanical alloying and consolidation. In this study, pre-synthesized $Y_2Ti_2O_7$ was directly introduced into ODS alloys to investigate the effect of oxide introduction route on microstructure and high-temperature mechanical properties. Pre-synthesized $Y_2Ti_2O_7$ was prepared from Y_2O_3 and TiO_2 by mechanical milling and heat treatment. The ODS alloys were fabricated by mechanical alloying followed by spark plasma sintering. Their microstructures were characterized using scanning electron microscopy, electron backscatter diffraction, and transmission electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy. Mechanical properties were evaluated by Vickers hardness and tensile tests at room and elevated temperatures. Direct introduction of $Y_2Ti_2O_7$ modified the morphology and distribution of Y–Ti–O-rich second-phase particles and significantly affected the resulting mechanical behavior. The results showed that the strengthening response was governed not only by grain size but also by oxide dispersion, particle/matrix interfacial characteristics, and microstructural stability during elevated-temperature deformation. The effect of direct $Y_2Ti_2O_7$ introduction varied with matrix characteristics and testing temperature, demonstrating clear matrix- and temperature-dependent behavior.

[P25-6]

Influence of Ni and Cr Additions on Phase Evolution and High-Temperature Mechanical Properties of γ-TiAl Alloys: Donghee Ryu(Korea Institute of Industrial Technology, Korea Univ.), Juree Jung, Seungtaek Hong(Korea Institute of Industrial Technology), Sahn Nahm(Korea Univ.), Junhee Han, Leeseung Kang*(Korea Institute of Industrial Technology)

Keywords: γ-TiAl alloy / Microstructure / High-temperature mechanical properties

γ-TiAl alloys have attracted considerable attention as lightweight high-temperature structural materials because of their low density and good mechanical properties at elevated temperatures. However, their limited strength–ductility balance remains a major challenge for high-temperature applications. In this study, the effects of Ni and Cr additions on the microstructure and high-temperature tensile properties of γ-TiAl alloys were investigated. Four alloys with different Al, Ni, and Cr contents were fabricated by vacuum arc melting followed by suction casting and subsequent heat treatment. Microstructural and phase evolution were characterized using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and electron backscatter diffraction (EBSD), and tensile tests were conducted at 800 ºC. The Ti-Al alloy exhibited a γ/α_2 lamellar microstructure, whereas the addition of Ni and Cr progressively disrupted the lamellar structure and promoted the formation of Ni- and Cr-rich secondary phases. With increasing Ni and Cr contents, these secondary

phases developed into a network-like morphology, resulting in a significant increase in high-temperature strength. In particular, the alloy with the highest Ni and Cr contents exhibited the highest tensile strength at 800 ºC, while its elongation decreased compared with the γ-TiAl alloys without Ni and Cr additions. These results demonstrate that Ni and Cr additions strongly modify the phase constitution and microstructure of γ-TiAl alloys, leading to a pronounced trade-off between high-temperature strength and ductility.

[P25-7]

Mo 저감 및 Nb/Ta 첨가 Haynes 282 기반 Ni-based superalloy의 온도 의존 고온유동거동 및 구성방정식 분석: 허성준, 박재형(영남대학교 신소재공학부), 정원석, 박노근*(영남대학교 신소재공학과)

Keywords: Ni-based superalloy, Hot compression, High-temperature flow behavior, Constitutive equation, Hot deformation activation energy

본 연구에서는 Haynes 282의 합금조성을 기반으로 Mo 함량을 8.5 wt.%에서 4.5 wt.%로 저감하고 Nb와 Ta를 각각 1 wt.% 첨가한 Ni-based superalloy의 고온 유동거동 및 변형저항 특성을 분석하였다. 고온압축시험은 900, 1000, 1100 및 1200 ºC에서 0.01–1.0 s^{-1}의 변형률속도로 수행하였으며, 일정한 진변형률속도에서 최종 진변형률 0.6까지 압축하여 온도 및 변형률속도에 따른 유동특성을 평가하였다. 진응력–진변형률 곡선에서는 변형 초기 가공경화에 의해 유동응력이 증가한 후 최대유동응력에 도달하고, 이후 동적 연화에 따른 응력 감소가 나타났다. 최대유동응력은 변형온도가 증가함에 따라 감소하고 변형률속도가 증가함에 따라 증가하는 전형적인 열간변형 특성을 나타냈다. 특히 저온영역에서는 온도 및 변형률속도에 대한 변형저항의 민감도가 크게 나타났으며, 900 ºC의 고변형률속도 영역에서는 최대유동응력의 변형률속도 의존성이 감소하는 경향이 확인되었다. 이는 저온영역에서 γ′ 석출상과 전위 간 상호작용이 고온 변형거동에 주요하게 관여함을 시사한다. 최대유동응력을 기반으로 Arrhenius형 구성방정식과 Zener–Hollomon 관계를 분석한 결과, 전체 시험온도 범위에서 평균 겉보기 활성화에너지는 약 656 kJ/mol로 산출되었으며, 구성방정식의 선형 회귀 관계에서도 양호한 상관성이 확인되었다. 또한 열역학적으로 계산된 γ′ solvus 온도를 기준으로 온도영역을 구분한 결과, 저온 및 고온영역에서 상이한 겉보기 활성화에너지가 나타났다. 이러한 차이는 γ′ solvus 전후의 석출상 안정성 변화와 이에 따른 전위 이동 및 동적 연화기구의 차이에 기인한 것으로 해석하였다. 본 연구결과는 Mo 저감 및 Nb/Ta 첨가 Haynes 282 기반 합금의 고온 변형거동을 정량적으로 이해하고 열간가공 조건을 설정하기 위한 기초자료를 제공한다.

[P25-8]

APS YSZ 및 YbSZ 열차폐코팅의 등온 열화 특성 평가: 김유진, 김시원, 이소미, 윤종서(서울과학기술대학교), 김상훈, 장기수, 김규식(한전KPS), 문홍수(세원하드페이싱), 변재원*(서울과학기술대학교)

Keywords: 열차폐코팅(TBC), 대기 플라즈마 용사 (APS), 이트리아 안정화 지르코니아 (YSZ)

항공용 가스터빈의 열효율 향상을 위해 터빈 입구 온도(Turbine inlet temperature, TIT)가 지속적으로 증가함에 따라 터빈 고온부품은 더욱 가혹한 운전 환경에 노출되고 있다. 이러한 환경에서 Ni기 초내열합금만으로는 요구되는 내열성을 확보하기 어려우므로, 낮은 열전도도를 갖는 세라믹 상부 코팅을 적용한 열차폐코팅(Thermal barrier coating, TBC)이 필수적으로 적용되고 있다. 장시간 고온 노출 시 열차폐코팅의 금속 결합층과 세라믹 상부 코팅 계면에 형성되는 열성장 산화층(Thermally grown oxide, TGO)의 성장과 상부 코팅의 소결은 열차폐코팅의 수명을 저하시키는 대표적인 열화 기구로 알려져 있다. 따라서 열차폐코팅의 고온 신뢰성을 평가하기 위해서는 장시간 고온 노출에 따른 계면 및 상부 코팅의 미세조직 변화와 결정상 변화를 종합적으로 평가하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 대기 플라즈마 용사(Air plasma spray, APS) 공정으로 제조된 YSZ 및 YbSZ 열차폐코팅을 대상으로 1100 ºC ºC에서 등온 열화시험을 수행하였다. 고온 노출시간에 따른 TGO 성장 거동과 상부 코팅의 기공률 변화를 분석하였으며, SEM과 EDS를 이용하여 코팅의 미세조직 및 계면 열화 거동을 관찰하였다. 또한 XRD를 통해 고온 노출에 따른 결정상 변화를 분석하였다. 본 연구 결과는 고온용 열차폐코팅 소재의 열화 거동을 이해하고 신뢰성을 평가하기 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

[P25-9]

극한 고온환경용 Nb계 합금의 내산화성 향상을 위한 합금 조성 최적화: 이상민, 임광혁, Muhammad Salman Johry, 서진유*(한국과학기술연구원)

Keywords: Nb계 합금, 열처리, 내산화성, 미세조직, 기계적 물성

차세대 항공우주 추진 시스템의 고성능화에 따라 극한환경용 고온 부품의 수요가 증가하고 있으며, 기존 Ni계 초합금의 적용 온도 범위를 넘어서는 초고온 구조재 개발의 필요성이 대두되고 있다. Nb계 합금은 높은 융점과 고온에서의 우수한 기계적 특성을 바탕으로 차세대 초고온 구조재로서 주목받고 있다. 하지만 동시에 고온에서 낮은 산화저항성으로 인해 실제 구조재로의 적용에 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 개선하면서 기존 Ni계 초합금의 사용 온도 한계를 극복할 수 있는 초고온 구조재 개발을 목적으로, 우수한 내산화성을 갖는 Nb계 합금의 조성 최적화를 수행하였다. Nb 기지에 V, W, Zr 및 Ta 등의 합금 원소를 첨가한 다양한 조성의 합금을 제조하고, 열처리 중 산소 유입 정도를 변화시키기 위해 10^{-1}Torr 및 10^{-3}Torr의 진공 분위기와 Ar 분위기에서 고온 열처리를 수행하였다. 각 조건에서 합금 조성에 따른 산화 거동을 비교하여 내산화성이 우수한 합금 조성을 선별하였다. 선별된 합금에 대해 미세조직 분석 및 상온 인장 특성을 평가하였으며, 상용 Nb계 합금인 C103, Nb521과의 비교를 통해 Nb-V-W 합금이 우수한 내산화성과 상온 기계적 특성을 나타냄을 확인하였다. 본 연구는 이러한 결과를 바탕으로 기존 고온 구조재의 적용 한계를 넘어, 극한 고온환경에서 활용 가능한 차세대 구조재 개발의 가능성을 제시한다.

[P25-10]

열간압연 조건이 Al-Cr-Fe-Ni-Ti 철계 고엔트로피 합금의 초소성에 미치는 영향: 박상민(공주대학교), 박강현(한국재료연구원), 최순원, 송기안*(공주대학교)

Keywords: 초소성 거동, 동적 재결정, 아결정립

γ/γ′ 구조를 갖는 Ni기 초합금은 우수한 고온 특성을 바탕으로 다양한 고온 구조재에 활용되고 있으나, 높은 소재 비용이 한계로 지적된다. 반면, 철계 고엔트로피 합금은 낮은 소재 비용과 열팽창계수를 가져 Ni기 초합금의 대체제로 주목받고 있다. 특히, Al-Cr-Fe-Ni-Ti 철계 고엔트로피 합금은 $L2_1$ 석출상에 의해 기존 철계 합금 대비 우수한 고온 강도를 나타낸다고 보고되었다. 그러나 Al-Cr-Fe-Ni-Ti 철계 고엔트로피 합금은 제한적인 슬립 시스템과 낮은 결정립계 결합력으로 인해 낮은 연성을 보이며, 이는 제품의 성형성에 직접적인 연관이 있기 때문에 개선이 요구된다. 초소성은 고온에서 수백 퍼센트 이상의 큰 변형률을 나타내는 특성으로, 미세한 결정립 구조, 높은 입계 면적, 고온 변형 중 결정립 성장을 억제할 수 있는 미세조직적 안정성과 밀접한 연관이 있다. 특히, 열간가공 중 생기는 전위가 재배열되어 아결정립 구조를 형성하고, 이후 아결정립 회전 및 고각입계로의 전환이 발생하여 Grain Boundary Sliding (GBS)에 유리한 미세조직이 형성될 수 있다. 본 연구에서는 Al-Cr-Fe-Ni-Ti 철계 고엔트로피 합금의 열간압연 공정 조건에 따른 전위 재배열 및 아결정립 형성 거동을 제어하여 초소성 변형에 유리한 미세조직을 형성하고자 한다. 이를 위해 다양한 열간 압연 조건을 적용하고, 각 압연 조건별 미세조직 특성을 EBSD, SEM을 통해 분석하였으며, 열간 압연 조건의 변화가 GBS에 유리한 미세 아결정립 형성에 기여할 수 있는지 평가하였다. 본 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원 연구비 지원에 의한 연구입니다 (P0022331). 본 연구는 2026년도 과학기술정보통신부의 재원으로 과학기술사업화진흥원의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다 (RS-2026-25534590).

[P25-11]

Ni-Cr-Mo-W 계 C-276 합금의 TCP상 저감을 위한 조성 설계 및 열처리 조건 최적화: 이상현, 주하연, 김종훈(국립창원대학교 소재융합시스템공학과), 김덕령(세아창원특수강), 홍현욱*(국립창원대학교 소재융합시스템공학과)

Keywords: Hastelloy C-22, Hastelloy C-276, intergranular corrosion, μ phase, TCP phase, alloy design

에너지 산업에서 초전도 선재의 적용이 확대됨에 따라, 고강도·비자성 특성을 갖는 Ni-Cr-Mo계 금속 기판 소재의 중요성이 증가하고 있다. Hastelloy C-22 및 C-276은 우수한 내식성과 기계적 특성을 갖는 대표적인 Ni-Cr-Mo-W계 합금이며, 이 중 C-276은 초전도 선재용 금속 기판 소재로 활용되고 있다. 그러나 높은 Mo 및 W 함량은 응고 과정에서 원소 편석을 유발하고, 편석 영역에서 μ상을 포함한 TCP(topologically close-packed) 상의 형성을 촉진할 수 있다. 이러한 TCP 상은 주조 후 후속 열처리 과정에서도 잔존할 수 있으며, 내식성 저하와 미세조직 제어의 어려움을 유발할 수 있어 합금 조성 단계에서의 제어가 필요하다. 본 연구에서는 C-22 및 C-276 초도품의 미세조직, 기계적 특성 및 부식 특성을 분석하여 성분 조정에 필요한 주요 인자를 도출하였다. 특히 C-276 초도품에서는 C-22 대비 높은 TCP 상 분율과 낮은 부식 저항성이 확인되었으며, 이를 개선하기 위해 Cr, Mo, W 및 Fe의 함량을 조절하여 TCP 상 형성을 억제하고 내식성을 확보할 수 있는 성분계를 설계하였다. 이후 초도 조성과 최종 조성을 기반으로 실험실 단위 잉곳을 제작하고, 주조 상태에서의 미세조직과 부식 특성을 비교·평가하였다. 최종 성분계는 비교 조성 중 가장 낮은 부식 속도를 나타냈으며, 초도 조성 대비 TCP 상 분율이 크게 감소하고 개별 TCP 상의 크기 또한 뚜렷하게 감소하였다. 이는 주요 합금원소의 함량 조절을 통해 주조 상태에서의 TCP 상 형성을 효과적으로 억제할 수 있음을 보여준다. 특히 C-276 합금에서 초기 TCP 상 저감이 후속 균질화 열처리 중 잔류 TCP 상의 용해 및 원소 균질화에 미치는 영향을 확인하기 위해, 현재 최종 성분계의 균질화 열처리 및 미세조직 평가를 진행하고 있다. 아울러 기계적 특성 평가를 통해 성분 조정에 따른 물성 변화와 균질화 효과를 종합적으로 검토하고 있다.

[P25-12]

Alloying-Element Effects on Oxidation Mechanisms and Thermal-Runaway Susceptibility of Solid and Molten Ni-Based Model Alloys: Jia Hanbing, HO JIN RYU*(KAIST)

Keywords: Ni-based alloys, thermal-runaway susceptibility, oxide-scale evolution, liquid-state oxidation

Ni-based alloys are widely used in aerospace, energy, and nuclear systems because of their excellent mechanical properties and corrosion resistance at elevated temperatures. However, sudden exposure to oxidizing environments can cause rapid oxidation and intense heat release, particularly after partial or complete melting, thereby increasing susceptibility to ignition and thermal runaway. In commercial Ni-based alloys, the simultaneous presence of multiple alloying elements makes it difficult to distinguish their respective roles in oxide formation, elemental transport, and oxidation-induced heat release. In this study, a systematic model-alloy approach is employed to clarify the effects of major alloying elements on the solid- and liquid-state oxidation of Ni-based alloys. Binary Ni–X alloys (X = Cr and Al) are used to separate the individual contributions of protective-oxide-forming, reactive, and volatile-oxide-forming elements. Representative multicomponent alloys are further examined to evaluate interactions between these elements, including the influence of Cr on Al-rich oxide formation. A gas-switching DSC–TGA method is applied in which the alloys are first stabilized under an inert atmosphere in either the solid or molten state and are subsequently exposed to air under isothermal conditions. The resulting heat-flow and mass-change responses are correlated with oxide phases, scale morphology, cross-sectional elemental distributions, and compositional gradients to investigate oxide-growth mechanisms and elemental transport behavior. The Ni–Cr binary alloys exhibit a pronounced dependence on physical state. Melting substantially increases oxygen uptake compared with solid-state oxidation. In the liquid state, Ni–10Cr, Ni–20Cr, and Ni–30Cr show comparable normalized mass gains and similar apparent oxidation

response times, whereas the exothermic heat release increases with Cr content. This difference indicates that Cr content modifies the oxidation pathway and oxide-product distribution more strongly than the total oxygen uptake. Comparative investigation of Al additions distinguishes the effects of protective oxide formation, oxidation exothermicity, scale modification, and oxide volatilization. Particular attention is given to whether protective Cr- and Al-rich scales remain stable after melting and how scale rupture and rapid elemental transport expose fresh metal to further oxidation. This systematic screening establishes composition–oxidation relationships across the solid-to-liquid transition and provides fundamental guidance for the future design of oxidation-resistant Ni-based alloys.

P26 : 생체재료
Room 1층 전시홀, 10월 30일

[P26-1]
Characterizing Iceball Dynamics and Tissue Injury in CO_2-Based Esophageal Cryoablation: yerin Ha(University of Ulsan College, Asan Medical Center), Yubeen Park(Asan Medical Center), Song Hee Kim, Ji Won Kim(University of Ulsan College, Asan Medical Center), Dong-Sung Won(Asan Medical Center), Seung Jin Eo(University of Ulsan College, Asan Medical Center), Sanghee Lee(Korea National University of Transportation), Jung-Hoon Park*(University of Ulsan College, Asan Medical Center)
Keywords: Cryoablation, Esophagus, Carbon dioxide, Flexible catheter, Tissue regeneration, Minimally invasive therapy

Minimally invasive cryoablation is a promising treatment for gastrointestinal lesions, but its safety in thin-walled organs like the esophagus requires careful optimization. This study investigated the feasibility and tissue responses of carbon dioxide (CO_2)-based catheter cryoablation in a rat esophageal model. Iceball dynamics were first characterized in vitro and in a potato model, establishing a 60-second freezing duration as optimal for achieving lethal temperatures (−25 ºC) while limiting excessive tissue damage. In vivo optimization revealed that two freeze-thaw cycles provided effective ablation, whereas three cycles resulted in esophageal perforation. Using the optimized two-cycle protocol, temporal tissue responses were evaluated up to 28 days post-ablation. Immediate localized mucosal injury and transient luminal narrowing, driven by edema and apoptotic cell death (peaking at 10 hours), were observed. Subsequently, the activation of cytoprotective and regenerative pathways (HSP70 and Ki67, peaking at 3 days) facilitated rapid mucosal repair. By day 28, complete structural and functional recovery of the esophagus was achieved without fibrosis or stricture formation, supported by the preservation of the extracellular collagen matrix. These findings demonstrate that CO_2-based catheter cryoablation yields controlled, submucosa-limited tissue destruction followed by constructive remodeling, highlighting its potential as a safe and effective therapeutic modality for superficial mucosal pathologies in luminal organs.

[P26-2]
Irreversible Electroporation Combined with Human Wharton's Jelly Mesenchymal Stem Cell-Derived Extracellular Vesicles and PD-1 Blockade for Prostate Cancer Immunotherapy: Song Hee Kim(Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine, Asan Institute for Life Sciences, Asan Medical center), Yunlim Kim(Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine), Gyeong Joon Moon(University of Ulsan College of Medicine), Bumjin Lim(Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine), Jung-Hoon Park*(Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine, Asan Institute for Life Sciences, Asan Medical center)
Keywords: Irreversible electroporation, mesenchymal stem cell-derived extracellular vesicles, PD-1 blockade, immunotherapy, prostate cancer

Prostate cancer is an immunologically cold tumor that responds poorly to immune checkpoint blockade. Post-ablation fibrosis limits immune cell infiltration and reduces the efficacy of irreversible electroporation (IRE) combined with anti-PD-1. We investigated whether human Wharton's jelly mesenchymal stem cell-derived extracellular vesicles (hWJ-MSC-EVs) attenuate fibrosis and enhance the antitumor efficacy of IRE plus anti-PD-1. TRAMP-C1 tumor-bearing C57BL/6J mice were randomized into seven groups (control, IRE, hWJ-MSC-EVs, anti-PD-1, IRE+hWJ-MSC-EVs, IRE+anti-PD-1, and IRE+hWJ-MSC-EVs+anti-PD-1). Tumor growth, survival, IFN-γ secretion, fibrosis, immune cell infiltration, PD-L1 and TGF-β1 expression, and $CD8^+$ T cell-tumor colocalization were evaluated. All combination groups showed significantly lower tumor volume than the control group ($p<0.001$). The triple combination showed the lowest residual tumor volume and the highest IFN-γ secretion, with no significant effect on body weight and survival. hWJ-MSC-EVs significantly reduced collagen deposition compared with IRE alone and IRE plus anti-PD-1 ($p<0.001$). $CD4^+$ and $CD8^+$ T-cell infiltration, TUNEL positivity, PD-L1 expression, and the $CD8^+$/cleaved caspase-3 double-positive area were significantly increased in the triple combination group ($p<0.001$). TGF-β1 expression was highest in the IRE group and significantly lower in the triple combination group ($p<0.001$). hWJ-MSC-EVs enhanced the therapeutic efficacy of IRE plus anti-PD-1 through attenuation of fibrosis and increased cytotoxic T-cell infiltration.

[P26-3]
Metallic Nanowire Electrodes for Biodegradable Bioelectronic Interfaces: Kihyun Kim(Seoul National University), Ji-Woo Gu(Seoul National University, Ulsan National Institute of Science and Technology), Ju-Young Kim*(Ulsan National Institute of Science and Technology), Seung-Kyun Kang*(Seoul National University)
Keywords: Metallic nanowires, biodegradable electrodes, bioelectronics

Biodegradable bioelectronic devices can reduce the need for secondary removal surgery by degrading in the body after completing their intended function. To realize such devices, conductive materials are required to provide reliable electrical performance while maintaining mechanical compatibility with soft biological tissues. Metallic nanowires are attractive electrode materials because of their high aspect ratio

and excellent electrical conductivity, and they can form mechanically flexible conductive structures when assembled into networks or microscale electrode architectures. In this study, nanowire electrodes based on biodegradable metals were fabricated, and the effects of thermal annealing on their electrical and structural properties were investigated. Electrical resistance and microstructural changes before and after annealing were compared to evaluate how structural evolution of the nanowires influences their electrical performance. The fabricated nanowires were also integrated into biodegradable devices to assess their applicability as electrodes for cardiac and neural interfaces. These results demonstrate that metallic nanowires can serve not only as microscale conductors but also as electrode materials for biodegradable bioelectronic devices that require both mechanical flexibility and reliable electrical performance. This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) (RS-2025-00561988) and by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) and the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) through the International Cooperative R&D Program (Grant No. P0028319-G02P24680020111-10054408).

[P26-4]

Mesenchymal Stem Cell Nanovesicle-Eluting Bioresorbable Scaffold for Vasculomodulatory Control of Restenosis: Ji Won Kim(Asan Institute for Life Sciences, Asan Medical Center, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine), Min-Kyu Kang(Chung-Ang University), Dong-Sung Won, Seung Jin Eo(Asan Institute for Life Sciences, Asan Medical Center, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine), Jeong-Kee Yoon(Chung-Ang University), Jung-Hoon Park*(Asan Institute for Life Sciences, Asan Medical Center, Asan Medical Center, University of Ulsan College of Medicine)

Keywords: Anti-restenosis, Bioresorbable scaffold, Extracellular vesicles, Mesenchymal stem cells-derived nanovesicles, Vasculoregeneration

Stent-based revascularization remains limited by the tradeoff between restenosis prevention and vascular healing. To address this challenge, a mesenchymal stem cell nanovesicle-eluting bioresorbable scaffold (NVE-BRS) was prepared by coating MSC-derived nanovesicles onto a PMB30W-functionalized PLLA scaffold. The coating enabled stable nanovesicle immobilization and sustained local release while preserving nanovesicle morphology and bioactivity. In vitro, MSC-derived nanovesicles promoted endothelial cell migration and angiogenic activity while suppressing vascular smooth muscle cell proliferation and inflammatory macrophage activation, demonstrating favorable vasculomodulatory effects. In vivo, therapeutic efficacy was evaluated in a balloon-injured rabbit iliac artery model using angiography, optical coherence tomography (OCT), histology, and immunofluorescence. Compared with bare BRS, NVE-BRS maintained vascular patency and significantly reduced neointimal thickness (0.17 ± 0.01 vs. 0.40 ± 0.02 mm) and stenosis area (19.38 ± 1.67% vs. 48.80 ± 1.56%). Histological analyses further demonstrated enhanced endothelialization with increased CD31 expression and reduced VCAM-1, PDGFR-β, α-SMA, and CD68 expression. These findings demonstrate that MSC nanovesicle coating improves the regenerative performance of bioresorbable scaffolds by coordinating endothelial repair, suppression of neointimal formation, and inflammatory modulation.

[P26-5]

Programmable Magnetic Patterning in Multifunctional Hydrogel Platforms: Kyeongmi Lee, Yoonseok Park*(Kyunghee Univ.)

Keywords: hydrogel, magnetic hydrogel, hydrogel patterning

Magnetic hydrogels have attracted attention as functional materials for soft robotics [3], biomedical devices [4], and cell culture platforms [5] because of their responsiveness to external magnetic fields and spatially tunable properties. Since cell growth and differentiation are influenced by the mechanical and structural characteristics of the extracellular matrix (ECM), spatial regulation of the hydrogel microenvironment is important for controlling cellular organization. In this study, spatial patterning of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles (MNPs) within a poly(ethylene glycol) diacrylate (PEGDA) hydrogel is demonstrated to enable selective control of its structural and magnetic properties. PEGDA was employed as the hydrogel matrix, and magnetic hydrogels were fabricated via photopolymerization [1]. The MNPs were silica-coated and subsequently functionalized with 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane (MPS) before incorporation into the PEGDA matrix [2]. Photopolymerization conditions were optimized by varying the PEGDA and photoinitiator concentrations and MNPs loading, thereby minimizing nanoparticle leaching while maintaining structural stability. Patterned magnetic structures placed beneath the hydrogel selectively guided the MNPs into predefined regions, generating distinct magnetic and non-magnetic domains. This spatial patterning enables localized control of hydrogel properties and allows external magnetic fields to selectively induce deformation in the magnetic regions. These results provide a fabrication strategy for magnetically patterned hydrogels with potential applications in magnetically actuated soft materials and functional platforms for cell culture and tissue engineering. References [1] Suhail, M. et al. Magnetically responsive hydrogel systems: Fundamental features, emerging applications, and future horizons.Coord. Chem. Rev.543, 216916 (2025). [2] Hui, C. et al. Core-shell Fe_3O_4@SiO_2 nanoparticles synthesized with well-dispersed hydrophilic Fe_3O_4 seeds. Nanoscale3, 701–705 (2011). [3] Chung, G. et al. Magnetically levitated metasurface enabling tangible and bidirectional human-machine interaction. Sci. Adv. 12, eaeg0480 (2026). [4] Yoo, J. et al. Bio-inspired, miniaturized magnetic heart valve system for superior performance cardiovascular simulator. Adv. Mater. 37, 2419504 (2025). [5] Fullenkamp, D. E. et al. Simultaneous electromechanical monitoring in engineered heart tissues using a mesoscale framework. Sci. Adv. 10, eado7089 (2024).

[P26-6]

Intelligent Pressure-Responsive Sensors based on the Fast Reconfiguration of Magneto-Conductive Pathways: Chanyoung Choi, Yoonseok Park*(KyungHee Univ.)

Keywords: Sensor, Pressure, MXene, CIP, nanoparticle

The growing demand for wearable electronics, robotics, and human–machine interfaces has increased the need for pressure sensors capable of converting mechanical stimuli into electrical signals [1, 2]. Conventional resistive pressure sensors generally operate through deformation of a fixed conductive structure, where pressure alters the contact distance or contact area between conductive components and thereby changes the electrical resistance [3]. In contrast, this study proposes a pressure-responsive sensing system in which mobile conductive particles are rearranged by a pressure-induced change in the magnetic field, enabling the conductive pathway itself to be dynamically reconfigured. The sensing material consists of MXene-coated carbonyl iron particles (MXene@CIP) dispersed in silicone oil. The MXene@CIP particles combine the magnetic responsiveness of carbonyl iron particles with the electrical conductivity of MXene, thereby functioning as magnetically mobile conductive building blocks. When external pressure is applied, an upper magnet approaches the sensing cavity, modifying the magnetic field experienced by the particles. The MXene@CIP particles subsequently migrate and rearrange toward the electrodes. Once the particles establish a continuous magneto-conductive pathway and contact the electrodes, the electrical resistance of the device decreases. Thus, unlike conventional pressure sensors in which pressure directly deforms a pre-existing conductive network, the proposed system modulates electrical connectivity through pressure-mediated magnetic reconfiguration of mobile conductive particles. MXene@CIP particles were successfully fabricated and exhibited high electrical conductivity in the dried state. The particles were then dispersed in silicone oil at different concentrations to investigate the relationship between electrical connectivity and particle mobility. At low particle concentrations, the matrix maintained high fluidity but showed limited formation of continuous conductive pathways. Increasing the particle concentration improved electrical connectivity, whereas excessive particle loading reduced fluidity and restricted particle motion, revealing a trade-off between conductivity and reconfigurability. Based on this optimization, both single sensing devices and multi-array devices were fabricated. Electrical measurements confirmed a decrease in resistance under mechanical compression, demonstrating pressure-induced formation of magneto-conductive pathways. This study introduces a pressure-sensing strategy based on the magnetic reconfiguration of conductive pathways rather than the direct deformation of a fixed conductive network. The proposed magnetically reconfigurable conductive system provides a potential platform for multi-point pressure-sensing arrays and adaptive soft electronic systems. References [1] X. Cui et al., iScience 25, 104148 (2022). [2] C. Xu et al., Small 20, 2306655 (2024). [3] G. Tai et al., Sensors 22, 2652 (2022).

[P26-7]

Pressure-driven Drug Delivery Using High-pressure Balloon Catheter Improves Vascular Drug Penetration and Anti-restenotic Effects : Seung Jin Eo, Hyemin Lee(University of Ulsan College of Medicine (Department of Convergence Medicine), Asan Medical Center (Biomedical Engineering Research Center)), Do-Yoon Kang(Asan Medical Center (Department of Internal Medicine)), Jung-Hoon Park*(University of Ulsan College of Medicine (Department of Convergence Medicine), Asan Medical Center (Biomedical Engineering Research Center))

Keywords: 풍선카테터, 혈관성형술

High-pressure drug-coated balloon (HP@DCB) angioplasty enhances vascular drug delivery by overcoming the limitations of passive diffusion-based conventional non-compliant DCB (NC@DCB) systems. We developed a dual-layer HP balloon catheter composed of an outer Nylon 12 layer and an inner Pebax® 7233 layer, and evaluated its feasibility and therapeutic efficacy as a paclitaxel (PTX)-coated platform. Shellac-based PTX coating was uniformly applied to HP@DCB and NC@DCB, and coating thickness, drug amount, release behavior, and mechanical properties were compared. Pressure-assisted drug penetration was assessed in a vascular-mimicking agarose gel phantom using fluorescent PTX and confocal microscopy. In vivo efficacy was evaluated in a balloon injury-induced rabbit iliac artery stenosis model using angiography, optical coherence tomography, histology, immunohistochemistry, and immunofluorescence examinations. Drug amount, coating thickness, and sustained drug release did not differ between groups. The mechanical robustness in HP@DCB was significantly greater than that in NC@DCB. HP@DCB produced significantly greater penetration depth and fluorescence-positive area, indicating enhanced pressure-driven drug transfer. HP@DCB resulted in superior luminal patency, reduced neointimal hyperplasia, and favorable biological responses compared with that in NC@DCB and the sham control. These findings support DCB use based on a dual-layered HP balloon platform as a promising next-generation strategy for stenotic vascular lesion treatment.

P27 : 수소재료
Room 1층 전시홀, 10월 30일

[P27-1]
DED(Directed Energy Deposition, DED) 316L 스테인리스강의 저속인장 시험을 통한 수소취성 민감도 분석: 이준민, 강성규*(경상국립대학교)
Keywords: 316 스테인리스강, 적층제조, 열처리, 수소취성, 저속인장시험

DED 공정으로 제조된 316L 스테인리스강(DED 316L)은 우수한 설계 자유도와 생산성을 바탕으로 수소 저장·이송 설비 등 수소 환경에 노출되는 어플리케이션으로의 활용 가능성이 높은 소재이다. 이에 316L 소재의 수소취성 저항성을 향상시키기 위해 표면 질화, 피닝 등 다양한 표면처리 공정이 적용되고 있다. 그러나 이러한 표면처리의 효과를 정량적으로 분석하기 위해서는, 우선 표면처리가 적용되지 않은 적층제조 소재 자체의 수소환경 저속인장 거동을 규명하는 것이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 DED 316L 시편을 as-built 상태 및 열처리를 통해 전위밀도를 제어한 상태로 구분하고, 전기화학적 수소충전(1M NaOH + 3g/L NH4SCN 수용액, 10mA/cm^{2}의 정전류 인가) 후 저속인장시험(slow strain rate test, SSRT)을 수행하여 열처리 조건에 따른 인장특성 변화 및 수소취성 민감도를 분석하였다. 아울러 파면 및 균열 경로 분석을 통해 열처리에 따른 미세조직 변화가 수소 트랩 거동 및 파괴 양상에 미치는 영향을 고찰하였다.

[P27-2]
고온 질화 처리에 따른 316L 스테인리스강의 수소취화 저항성 변화: 김광균*(영남대학교)
Keywords: 스테인리스강, 수소취성

316L 스테인리스강은 우수한 내식성, 용접성 및 연성을 갖추고 있어 화학 공정, 에너지 산업, 해안 시설 및 해수 관련 설비 등 다양한 산업 분야에서 널리 활용되고 있다. 최근 수소 에너지 산업의 발전과 함께 수소 저장·이송 시스템의 배관, 밸브 및 관련 부품에 적용되는 소재로서 오스테나이트계 스테인리스강에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 316L 스테인리스강은 안정한 오스테나이트 조직을 기반으로 비교적 우수한 수소취화 저항성을 나타내지만, 수소 인프라의 장기적인 신뢰성 확보를 위해서는 수소 환경에서 발생하는 기계적 특성 저하를 최소화할 수 있는 소재 기술이 요구된다. 질소 고용은 오스테나이트계 스테인리스강의 강도를 향상시키고 오스테나이트를 안정화하여 변형유기 마르텐사이트의 생성을 억제하여 수소취화 거동을 완화할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 두께 1.5 mm의 316 L 스테인리스강에 고온질화처리(high-temperature solutioin nitriding)를 적용하고, 질화 시간에 따른 미세조직 변화와 기계적 특성 및 수소취화 거동을 비교·분석하였다. 시편은 1200 ℃ 에서 10, 20, 40, 80 및 160 분 동안 고온질화처리 하였다. 질화 처리에 따라 결정립 조대화가 나타났으나, 질소의 고용에 따른 강화 효과로 인해 항복강도와 인장강도가 각각 미처리재의 230 MPa, 555 MPa 에서 160분 질화재의 256 MPa, 634 MPa 로 증가하였다. 또한 수소 장입 전후의 인장 특성을 비교한 결과, 160 분 질화재를 제외한 모든 질화 처리재에서 상대 연신율 손실(relative elongation loss)이 미처리재보다 감소하였으며, 80 분 질화재에서 미처리재의 12% 대비 4%로 가장 낮은 값을 나타내었다. 이러한 결과는 고온질화처리 조건의 제어를 통해 316L 스테인리스강의 강도와 수소취화 저항성을 동시에 조절할 수 있으며, 수소취화 저항성 향상을 위해서는 최적의 질화 조건 선정이 중요함을 시사한다.

[P27-3]
전기화학적 수소 장입 방식에 따른 마르텐사이트 스테인리스강의 수소취성 및 피로 거동 평가: 이정재, 이진영, 백진수, 박채연(서울과학기술대학교), 이창희, 강성(포항산업과학연구원), 변재원*(서울과학기술대학교)
Keywords: STS410, Hydrogen embrittlement, Electrochemical hydrogen charging, Slow Strain Rate Test(SSRT), Fatigue behavior, Fracture behavior

마르텐사이트 스테인리스강은 높은 강도와 내식성으로 터빈 블레이드, 펌프 샤프트 및 밸브와 같이 반복하중에 노출되는 기계부품에 사용되고 있다. 특히 STS410은 대표적인 마르텐사이트 스테인리스강으로, 미세조직적 특성에 의해 수소의 확산, 포획 및 재분포 거동이 크게 영향을 받을 수 있다. 따라서 STS410의 수소취성은 단순히 유입된 총 수소량뿐만 아니라 수소가 재료 내부에 어떻게 존재하는지에 따라 달라질 수 있으며, 이를 고려한 시험조건의 설정이 중요하다. 수소취성 평가에는 전기화학적 수소 장입법을 이용하여 시험 전 수소를 주입하는 Pre-charging 방식과, 기계적 하중이 가해지는 동안 지속적으로 수소를 공급하는 In situ charging 방식이 주로 활용된다. Pre-charging은 시험 시작 전 재료 내부에 수소를 충분히 확산시켜 내부 수소의 영향을 평가할 수 있는 반면, In situ charging은 하중 인가 중 발생하는 국부 변형 및 결함 구조의 변화에 따른 수소의 지속적인 유입과 재분포 거동을 반영할 수 있다. 이에 따라 동일한 소재에서도 장입 방식에 따라 내부 수소량과 분포가 달라질 수 있으며, 이에 따른 기계적 특성 저하 및 파괴 양상에도 차이가 나타날 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 STS410 마르텐사이트 스테인리스강을 대상으로 Pre-charging 및 In situ charging 조건에서 저속변형률시험(SSRT)과 피로시험을 수행하고, 장입 방식에 따른 기계적 특성 저하와 파괴 거동을 비교함으로써 마르텐사이트계 금속의 수소취성 평가를 위한 시험방법별 특성과 적합성을 규명하고자 하였다.

[P27-4] Canceled

극저온에서 316L 스테인리스강 용접부의 수소취성 거동 분석: 성용훈, 이수열*(충남대학교)

Keywords: 316L, 저온, 수소취성

그린에너지의 중요성이 강조됨에 따라 수소에너지에 대한 관심이 높아지고 있고, 수소 저장 탱크와 배관을 포함한 인프라 구축의 필요성이 강조되고 있다. 그러나 수소는 금속 재료 내부로 침투하여 기계적 성질을 저하시키며, 미세 균열을 발생시켜 취성 파괴를 일으키는 수소취성을 유발할 수 있다. 이에 따라 수소 인프라는 수소 환경에 강인한 재료의 선택이 필요하다. 특히 316L 스테인리스강은 극저온 환경에서 내수소취화성과 기계적 강도, 내부식성으로 액체 수소 탱크에 사용되나, 용접 과정에서 열 영향에 의한 δ-Ferrite 형성은 스테인리스강의 수소취성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 316L 스테인리스강의 모재(BM)와 용접부(WM) 시편의 수소취성을 분석하기 위해 수소를 전기화학적 방법으로 장입하고 상온(RT), 200K, 15K에서 Slow Strain Rate Test(SSRT)를 실시하여 온도 및 수소 주입 여부에 따른 인장 강도의 변화를 비교하였다. 또한, SEM과 EBSD를 통해 파단면, 미세조직 분석을 통해 BM과 WM의 온도에 따른 수소취화 특성을 확인하고자 한다.

[P27-5]

전류밀도 변화에 따른 수소 배관용 API 5L X70 파이프라인 강의 In-situ 수소취성 거동: 신윤지, 임성진, 권민철, 송기안*(국립공주대학교)

Keywords: Hydrogen Pipeline, Mechanical Properties, Hydrogen Embrittlement, Current Density

글로벌 탄소중립 달성과 실현을 위한 핵심 대체 에너지원으로 수소가 주목받음에 따라 대용량의 수소를 안전하고 경제적으로 수송하기 위한 심리스(Seamless) 강관의 수요가 높아지고 있다. 심리스 강관은 용접부가 존재하지 않아 우수한 내압 내구성을 지니고 있기 때문에 활용 가치가 높은 소재이다. 그러나, 수소 수송 배관은 고압 기체 수소환경에 상시적으로 노출되므로 수소 원자가 강재 내부로 확산·침투하여 연성을 급격히 저하시키는 수소 취성(Hydrogen Embrittlement)이 발생한다. 이러한 수소 취성을 규명하기 위해 고압 수소배관의 수소 침투 거동에 대한 연구가 진행되고 있으나, 대부분의 연구는 강관 전체의 단일 시편만을 대상으로 하고 있다. 이로 인해 실제 QT(Quenching & Tempering) 처리된 수소 배관의 두께 방향 냉각속도 차이로 비롯한 위치별(외부·중심부·내부) 미세조직 불균일성과 전류밀도 변화에 따른 기계적 물성 거동을 복합적으로 진행한 연구는 여전히 체계적인 정립이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 API X70 심리스 강관으로 수소 수송 환경에서 발생하는 수소의 침투 속도와 양을 고려하여 전류밀도 변화 및 두께 방향에 따른 실시간 하중 하에서의 정량적 역학 거동과 수소취성 거동을 규명하고자 한다. 구체적으로, QT(Quenching & Tempering) 처리된 API X70 강관의 외부·중심부·내부에서 각각 채취한 인장 시편을 대상으로 상온 조건(Non-Charging) 및 전류밀도 50, 100, 200 A/m^{2}의 조건 하에서 In-situ Slow Strain Rate Test (SSRT)를 수행하여 연성을 포함한 기계적 물성 저하 및 수소 취성 거동을 분석하였다. 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 파단면 관찰을 통한 파괴 거동 평가 및 미세조직 관찰과 전자후방산란회절(EBSD) 분석을 통해 두께 위치 별 미세조직 분율을 규명하였다. 본 연구는 2021년도 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (NO.2021581010009)

[P27-6]

고온 수소 환경이 SUS304 오스테나이트계 스테인리스강의 크리프 거동에 미치는 영향: 윤정민(한국과학기술연구원, 고려대학교), 임광혁(한국과학기술연구원), 김두현(한국과학기술연구원, 고려대학교), 송전영(두산에너빌리티), 에산 노루지(한국과학기술연구원), 손석수*(고려대학교), 서진유*(한국과학기술연구원)

Keywords: SUS304, 크리프, 수소취성, 고온수소환경

수소 에너지의 활용이 확대됨에 따라 고온·고압 수소 환경에서 사용되는 구조용 금속 소재의 장기 건전성 평가가 중요해지고 있다. 특히 오스테나이트계 스테인리스강은 우수한 내식성과 기계적 특성으로 수소 관련 설비의 주요 구조재로 활용되고 있으나, 고온에서 장시간 수소와 기계적 하중에 동시에 노출될 경우 수소와 크리프 손상의 상호작용에 의해 재료의 변형 및 파단 거동이 변화할 가능성이 있다. 따라서 실제 고온·고압 수소 환경에서의 크리프 특성을 평가하고, 수소가 장기 손상 거동에 미치는 영향을 규명할 필요가 있다. 본 연구에서는 SUS304 오스테나이트계 스테인리스강을 대상으로 550 ℃에서 크리프 시험을 수행하여 수소 분위기가 크리프 변형 및 파단 거동에 미치는 영향을 평가하였다. 수소 및 비교 분위기에서 얻어진 크리프 특성과 EBSD(Electron Backscatter Diffraction)를 이용한 미세조직 분석 결과를 바탕으로 크리프 변형속도와 파단수명의 변화를 비교하고, 시험 후 나타나는 미세조직 변화 및 손상 거동을 분석하였다. 이를 통해 고온·고압 수소 환경에서의 크리프 특성 변화와 미세조직적 손상 거동 간의 상관관계를 규명하고자 한다.

[P27-7]

수소환경 피로시험에서 주파수에 따른 피로 거동 평가: 노준혁, 백진수, 이진영, 이정재(서울과학기술대학교), 이창희, 강성(포항산업과학연구원), 변재원*(서울과학기술대학교)

Keywords: Hydrogen Embrittlement (HE), Frequency Effect, S-N Fatigue Life, Fatigue Crack Growth Rate(FCGR)

탄소중립 실현을 위한 수소 에너지 인프라의 확대에 따라 수소를 안전하고 경제적으로 이송 및 제어하기 위한 배관 및 밸브 부품의 신뢰성 확보가 중요해지고 있다. 수소 에너지 수송용 배관 및 밸브 부품은 실제 운전 환경에서 압력 변화에 따른 반복적인 변동 하중을 받으므로, 수소 환경과 하중 주파수에 따른 복합 손상 거동의 평가가 필수적이다. 현실적인 시험 시간의 한계로 인해 대부분의 피로 시험은 실제 운전 조건보다 높은 가속 주파수에서 수행되고 있다. 대기 환경에서 철강 재료의 피로 거동은 일반적인 저주파 영역(0.1~10 Hz)에서 주파수 의존성이 비교적 미미한 것으로 알려져 있으나, 수소 환경에서는 하중 주파수가 감소할수록 한 사이클에 소요되는 시간이 증가하여 수소가 균열 선단의 소성 영역으로 확산·집적될 수 있는 시간이 증가한다. 이에 따라 하중 주파

수의 변화는 수소의 확산 및 집적 거동과 피로 손상 과정에 영향을 미치며, 결과적으로 피로 균열 진전 속도와 피로 수명 등에 주파수 의존성(frequency effect)이 나타날 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실험적·통계적 결과를 바탕으로 주파수 의존적인 경험적 보정 모델을 구축하고, 기준 주파수에서 확보된 피로 데이터를 활용하여 다양한 저주파 운전 조건에서의 피로 균열 진전 속도 및 피로 수명을 추정할 수 있는 변환 관계식을 제안하였다.

[P27-8]

냉간 압연이 Pure V의 미세조직 및 수소 흡·방출 특성에 미치는 영향: 최병철(한국생산기술연구원, 강원대학교), 신중호*(강원대학교), 나태욱*, 강규병, 백민아, 석경찬, 홍성찬(한국생산기술연구원)

Keywords: 바나듐, 압연, 수소저장합금, 키네틱, 수소압축기

수소 경제의 확대와 함께 수소충전소 및 고압 수소압축 기술의 중요성이 더욱 커지고 있다. 기존 기계식 수소압축기는 높은 설비 및 유지 비용뿐만 아니라 소음, 진동, 윤활유 오염으로 인한 수소 순도 저하 등의 한계를 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 설치 및 유지 비용이 낮고 수소의 고순도를 유지할 수 있는 비기계식 수소압축기 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. V 기반 BCC계 수소저장합금은 우수한 수소 저장 용량과 함께 비교적 작은 온도 변화에서도 높은 압축비를 구현할 수 있어 비기계식 수소압축기용 소재로 주목받고 있다. 그러나 수소의 흡·방출 반응 속도가 느리다는 점은 실제 적용을 위한 주요 개선 과제로 남아 있다. 본 연구에서는 Pure V에 냉간 압연을 적용하여 압연율 변화에 따른 미세조직과 활성화 과정에서의 분말화 거동, 그리고 수소 흡·방출 동역학의 변화를 분석하였다. 또한 냉간 압연에 의해 형성된 전위 및 결함 구조가 수소 흡·방출 속도에 미치는 영향을 평가하고, 미세조직 변화와 수소 반응 거동 간의 상관관계를 고찰하였다.

[P27-9]

AB_2계 수소저장합금의 톨루엔 수소화 촉매 거동: 진시원(한국과학기술연구원, 서울대?교), 이재용(한국과학기술연구원, 성균관대학교), 박은수(서울대학교), 김윤석(성균관대학교), 심재혁*(한국과학기술연구원)

Keywords: AB_2 수소저장합금, 액상유기수소운반체, 톨루엔, 수소화 촉매

액상유기수소운반체(Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC)는 높은 수소저장밀도와 기존 액체연료 인프라와의 호환성으로 인해 수소의 저장 및 운송을 위한 기술로 주목받고 있다. 본 연구에서는 가역적인 수소 흡·방출 특성을 갖는 Ti-Zr-Cr-Mn-V-Fe계 AB_2형 수소저장합금을 톨루엔 수소화 반응의 촉매로 적용하여 수소저장소재와 LOHC 시스템의 결합 가능성을 살펴보았다. 아크 용해로 제조한 AB_2 합금을 수소 활성화를 통해 미분화한 후 톨루엔과 함께 반응기에 장입하여 실온 및 120 ℃ ℃에서 수소화 반응을 수행하였다. 120 ℃에서 AB_2 합금이 존재할 경우 반응 중 수소 압력이 지속적으로 감소하였으며, 반응 생성물의 GC 및 NMR 분석을 통해 톨루엔이 methylcyclohexane으로 전환되었음을 확인하였다. 또한 30–150 ℃에서 측정한 pressure-composition-temperature 특성과 톨루엔 수소화 반응 거동을 비교하여 합금의 수소 흡·방출과 LOHC 수소화 반응 간의 연관성을 분석하였다. 반응 전후 AB_2 합금의 수소저장 특성을 비교한 결과, 톨루엔 노출 이후에도 주요 수소저장 특성이 유지되는 것을 확인하였다. 상기 결과들을 바탕으로 AB_2계 수소저장합금이 수소저장재와 LOHC 수소화 촉매의 기능을 동시에 수행할 수 있는 가능성을 제시하고자 한다.

[P27-10]]

$ZrFe_2$계 C15 Laves 합금의 B-site 치환 원소(Ni, V, Al)에 따른 수소 흡장 특성 및 열역학적 거동 분석: 선현덕(한국생산기술연구원, 고려대학교), 배상환(한국생산기술연구원, 서울과학기술대학교), 이준호*(고려대학교), 하태준*(서울과학기술대학교)

Keywords: 수소저장합금, $ZrFe_2$, PCT, EBSD, C15 Laves

수소 저장 및 압축 가스 형태로의 수소 활용을 위해서는 효율적인 압축 공정이 필수적이다. 최근에는 열에너지를 이용하여 수소를 압축하는 C14 Laves 상 기반의 금속수소화물 수소 압축기(Metal Hydride Hydrogen Compressor, MHHC)가 기존의 기계식 압축기를 대체할 수 있는 유망한 대안으로 주목받고 있다. MHHC의 성능은 소재의 평형 압력(plateau pressure)과 히스테리시스 특성에 크게 의존한다. $ZrFe_2$ 기반의 C15 Laves 상 합금은 20oC에서 약 700 bar에 이르는 초고압 평형 압력과 빠른 반응 속도를 나타내어 유망한 수소 압축용 소재로 평가된다. 그러나 순수 $ZrFe_2$ 합금은 초기 활성화가 어렵고, 큰 히스테리시스를 나타내어 압축 효율이 저하되는 한계를 가진다. 이를 개선하기 위해 본 연구에서는 B-site(Fe 위치)에 바나듐(V), 니켈(Ni), 알루미늄(Al)을 치환하고, 치환 원소의 물리적 및 전자적 인자가 $ZrFe_2$ 기반 합금의 수소화물 형성 열역학적 안정성 및 수소 흡·탈착 거동에 미치는 영향을 XRD, EBSD, DFT계산을 통해 체계적으로 분석하였고, Ferro 소재를 활용한 저가원소 기반 수소저장합금 제조 단가 도출을 통해 기존 고가원소인 V, Zr이 포함된 예상 합금 가격을 절감하고자 한다.

[P27-11]

Effects of Microporous layer (MPL) Treatment on the Passive Behavior and Surface Oxide Characteristics of Ti PTL under PEMWE Conditions : OnYu Ha(Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Sungkyunkwan University), Myeongjin Kim(Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Hanyang University), SeKwon Oh*(Korea Institute of Industrial Technology (KITECH))

Keywords: Titanium, PEMWE, PTL, Passivation

Proton exchange membrane water electrolysis (PEMWE) has attracted considerable attention as a key technology for renewable-energy-based green hydrogen production owing to its capability for high-current-density operation and rapid dynamic response. The

anode of PEMWE operates under highly acidic conditions at 60–80 ºC and potentials above 1.6 V, which can promote oxidation and corrosion of metallic components. The porous transport layer (PTL) is a key component that supplies water, removes generated oxygen, and provides electronic conduction, and Ti is widely employed because of its high corrosion resistance. However, the passive film formed on Ti exhibits low electrical conductivity, and changes in its composition and properties can affect the electrochemical behavior and interfacial characteristics of the PTL. Microporous layers (MPLs) have recently been introduced onto PTLs to improve mass transport and interfacial contact; however, the effects of the high-temperature thermal treatment involved in MPL fabrication on the Ti passive film remain insufficiently understood. In this study, the effects of MPL treatment on the passive film characteristics and electrochemical behavior of Ti PTLs were investigated. All electrochemical measurements were conducted in 3 M H_2SO_4 at 75 ºC. Potentiodynamic polarization measurements showed that both specimens exhibited a passive region following active dissolution, with the passive current density at 0.03 V differing by more than a factor of two between the pristine PTL and MPL-treated PTL. In addition, OCP decay measurements performed after anodic polarization at 2.0 V for 300 s showed approximately 1.5-fold faster potential transition kinetics for the MPL-treated PTL, which maintained a final OCP approximately 40–60 mV higher than that of the pristine PTL. These results indicate that MPL treatment alters the electrochemical recovery behavior of the passive film following anodic polarization. HRTEM analysis revealed similar passive film thicknesses of approximately 4–5 nm for both specimens, indicating that the differences in electrochemical behavior were not primarily associated with film thickness. XPS analysis showed that the Ti^{4+} fraction decreased to approximately 40% in the MPL-treated PTL, corresponding to an approximately 50% reduction relative to the pristine PTL, while the fractions of Ti^{3+} and hydroxyl species increased, indicating a transition toward a more non-stoichiometric passive film. The same compositional trends were maintained after Ar^+ sputtering, demonstrating that the chemical-state modification extended into the interior of the passive film. Mott–Schottky analysis revealed an approximately 2.8-fold increase in donor density for the MPL-treated PTL, while EIS showed a 10–15% decrease in charge-transfer resistance, confirming changes in the electronic and defect-related properties of the passive film. Overall, MPL treatment did not substantially alter the thickness of the Ti passive film but significantly modified its electrochemical characteristics, including Ti oxidation states, defect density, and charge-transfer behavior. These changes were reflected in the different passive current responses and post-polarization potential recovery behavior. The results demonstrate that, in addition to mass transport and interfacial contact characteristics, changes in the chemical and electronic structure of the Ti passive film induced by the high-temperature MPL fabrication process should be considered when applying MPLs to Ti PTLs for PEMWE.

[P27-12]

수소 배관용 X70급 고강도강의 내수소취성 향상을 위한 수소취화 거동 분석: 장광후, 정재환, 윤희수*(한국가스안전공사 가스안전연구원)

Keywords: 수소취성, 수소환경, 금속재료

대규모 수소 플랜트 및 수소 인수기지 건설 등을 통한 수소 생산·수입이 추진됨에 따라, 대용량 수소 운송을 위한 인프라의 중요성이 증가하고 있다. 대규모 수소를 지속적으로 공급하기 위한 수소 가스 배관망의 주요 후보 소재로 API 강재가 고려되고 있으나, X70과 같이 높은 기계적 특성을 갖는 고강도 강재의 경우 수소 취화에 대한 민감도가 증가할 수 있어 이에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 X70 강재와 유사한 수준의 기계적 특성을 가지면서 내수소취성 성능을 향상시킨 강재를 설계하고, 기존 X70 강재와 개발 강재의 수소 취화 거동 및 파단 기구를 비교·분석하고자 하였다. 이를 위해 수소 환경에서 저속변형률시험(Slow Strain Rate Test, SSRT)을 수행하였다. 시험 전 고순도 질소 및 수소 가스를 이용한 퍼지를 통해 시험 환경 내 불순물 농도를 최소화하였으며, 대기 및 수소 환경에서 측정된 노치인장강도를 비교하여 각 강재의 수소 취화 민감도를 평가하였다. 또한 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM)을 이용한 파면 분석을 통해 X70 강재와 개발 강재의 수소 환경에서의 파단 거동을 비교하였다. 그 결과, 개발 강재는 기존 X70 강재와 유사한 수준의 기계적 특성을 나타내면서 수소 환경에서 상대적으로 낮은 수소 취화 민감도를 나타냈으며, 파면 분석을 통해 두 강재의 수소 환경에서의 파괴 거동에 차이가 있음을 확인하였다. 이를 통해 개발 강재가 기존 X70 강재 대비 향상된 내수소취성 성능을 나타냄을 확인 하고자 한다.

[P27-13]

SA372 수소압력용기의 미세조직 최적화를 위한 ?칭 냉각거동 및 상변태 해석: 백민아(한국생산기술연구원, 고려대학교), 최병철(한국생산기술연구원, 강원대학교), 강규병(한국생산기술연구원, 고려대학교), 김동회*(고려대학교), 나태욱*(한국생산기술연구원)

Keywords: SA372 강, 수소압력용기, TTT curve, 전산모사, 열유동해석

수소저장용 압력용기는 반복적인 수소 충·방전 환경에서 우수한 기계적 특성과 수소취성 저항성이 요구되며, 이를 위해 소재의 미세조직 제어가 중요하다. SA372 강은 퀜칭 및 템퍼링 열처리를 통해 요구 물성을 확보할 수 있으며, 특히 퀜칭 과정에서의 냉각거동은 마르텐사이트 및 베이나이트 등의 미세조직 형성에 직접적인 영향을 미친다. 그러나 실제 압력용기는 내벽-외벽 간 열전달 차이로 인해 위치별 냉각속도가 상이할 수 있으므로 압력용기 전 영역에서 목표 미세조직을 확보하기 위해서는 위치별 냉각거동과 상변태 거동을 연계한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 SA372 강 수소압력용기의 퀜칭 과정에 대한 전산모사 열유동 해석을 수행하여 내벽과 외벽 간의 대표 위치에서의 온도이력을 분석하였다. 열역학 계산을 통해 상변태 거동 분석을 위한 기준온도를 설정하였으며, 해당 온도 이하에서의 위치별 냉각이력을 SA372의 TTT 선도와 연계하여 상변태 가능성을 분석하였다. 열유동 해석 결과, 외벽 인접부에서는 상대적으로 빠른 냉각이 나타난 반면 내벽으로 갈수록 냉각이 지연되었으며, 이에 따라 압력용기 내 위치에 따라 서로 다른 상변태가 진행될 가능성이 확인되었다. 하지만 실제 유냉 과정에서의 표면 열전달 조건은 냉각매체의 상태와 소재 표면조건 등에 따라 변화하기 때문에 전산모사만으로 실제 경계조건을 정확하게 설정하는 데 한계가 있다. 이에 실제 압력용기의 냉각거동

을 실험실 규모에서 모사하고 열해석 결과를 검증하기 위한 원통형 시험편을 통한 실험 조건을 검토하였다. 압력용기 벽 두께 (t)를 기준으로 원통형 시험편의 반지름을 변화시켜 열유동해석을 수행한 결과, 동일한 가정 경계조건에서 압력용기의 내벽-외벽 간 냉각속도와 가장 높은 유사성을 나타내어 우선적인 모사실험 조건으로 선정하였다. 향후 원통형 시험편을 이용한 유냉 실험 및 미세조직 분석을 통해 열해석에서 적용된 표면 열전달 조건과 상변태 예측 결과를 검증하고자 한다. 또한 합금 조성 변화에 따른 TTT 거동과 검증된 냉각이력을 연계하여 압력용기 내벽까지 목표 마르텐사이트 조직을 확보할 수 있는 조건을 도출하고, 궁극적으로 SA372 강 수소압력용기의 미세조직 및 열처리 조건 최적화를 위한 기반을 구축하고자 한다.

P28 : 고엔트로피합금
Room 1층 전시홀, 10월 30일

[P28-1]
친환경 BCC계 고엔트로피 금속기지복합재의 미세조직과 기계적 특성 평가: 김영환, 박성현, 장성혁, 정재길*(전북대학교)
Keywords: High entropy alloy, Rice husk ash, Metal matrix composite, Powder metallurgy, Spark plasma sintering

고엔트로피 합금 (High entropy alloy, HEA)은 다섯 가지 이상의 주요 원소를 동일하거나 유사한 원자 비율로 포함하는 합금으로, 높은 배열 엔트로피로 인해 주로 단일상 고용체를 형성하는 특징이 있다. 특히 BCC계 HEA는 우수한 항복강도와 고온 안정성을 나타내 항공우주, 원자력 및 수소 저장 등 다양한 산업 분야에서 주목받고 있다. HEA는 아크 용융, 분말 야금, 적층 제조 등 다양한 공정을 통해 제조할 수 있으며, 그 중 분말 야금법은 주조 방식에 비해 균일한 미세조직을 형성하기 용이하고, 우수한 강도 및 경도를 갖는 HEA를 제조할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 기존 HEA의 기계적 특성을 더욱 향상시키기 위한 방법으로 다양한 강화재를 첨가한 복합재 제조가 고려되고 있다. 세라믹계 강화재 (SiO_2, SiC, Al_2O_3, ZrO_2 등)는 높은 경도와 우수한 열적 안정성을 바탕으로 강도 및 경도를 향상시킬 수 있어 다양한 금속 복합재에 활용되고 있으나, 상대적으로 높은 비용과 환경적 부담 등의 한계가 있다. 이에 비해 쌀겨를 연소하여 얻어지는 쌀겨 재 (Rice husk ash, RHA)는 80 wt.% 이상의 SiO_2를 함유하고 있으며, 친환경적이고 경제적이라는 장점을 지녀 기존 세라믹계 강화재를 대체할 수 있는 친환경 강화재로 활용될 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 Fe–28Al–12Cr–9Ni–4Ti–1Mo (at.%) 조성의 BCC계 고엔트로피 합금 분말에 RHA를 강화재로 첨가하여 친환경 BCC계 고엔트로피 합금 복합재를 제조하였다. RHA 첨가량을 0, 1, 5 wt.%로 달리하여 고에너지 볼 밀링을 수행한 후, 방전 플라즈마 소결법 (Spark plasma sintering, SPS)을 통해 벌크 시편 (Φ20 × 6 mm)을 제조하였다. 제조된 복합재 분말 및 소결체의 상 분석은 X-선 회절 분석 (X-ray diffraction, XRD)을 통해 수행하였으며, 광학현미경 (Optical microscopy, OM), 주사전자현미경 (Scanning electron microscopy, SEM) 및 투과전자현미경 (Transmission electron microscopy, TEM)을 이용해 미세조직을 관찰하였다. 또한, 비커스 경도 시험 및 압축 시험을 통해 합금의 기계적 특성을 평가하였다.

[P28-2]
레이저 기반 이중 구배 이종구조 설계를 통한 강도-연성 동시 향상: 김서사랑, 김래언, 구강희, 안성열, 허윤욱(포항공과대학교), 문종언*(공주대학교), Qingfeng Wu(Hong Kong Polytechnic University), 채호병, 백열, 우완측(한국원자력연구원), 권현석(국민대학교), Hidemi Kato(Tohoku University), 김형섭*(포항공과대학교)
Keywords: 이종구조, 중엔트로피합금, 상변태, 표면개질

본 연구에서는 metastable Fe 기반 중엔트로피합금에 레이저 처리를 적용하여 경질 표면–연질 중간–경질 내부의 이중 구배 이종구조를 구현하고, 변형 중 상변태 거동과 기계적 특성의 상관관계를 규명하였다. 기존의 단일 구배 구조와 달리, 마르텐사이트 표면–재결정 중간–역변태 오스테나이트로 구성된 구조를 형성하여 어닐링 시편 대비 약 2.3배 높은 항복강도와 향상된 연신율을 나타냈다. 특히 변형 과정에서 표면에서 내부 방향으로 전파되는 변형유기상변태가 관찰되었으며, 이에 따라 경질/연질 계면이 변형과 함께 동적으로 이동하였다. 이러한 현상은 합금 내 응력 집중을 완화하고 이종구조에 의한 강화 효과와 변태유기 소성(TRIP) 효과를 지속적으로 유지하는데 기여하였다. 이러한 결과는 변형 중 동적으로 전파하는 상변태를 활용하여 강도와 연성을 동시에 향상시킬 수 있는 준안정상 기반 이종구조화 전략을 제시한다.

[P28-3]
패스 변형률 및 유지시간이 $Al_{0.3}$CoCrFeNi 고엔트로피 합금의 고온 단속 변형 중 재결정 거동에 미치는 영향: 오상준(국립공주대학교), 김효섭, 김동응, 한철웅, 김양후(한국생산기술연구원), 이지운*(국립공주대학교)
Keywords: 고엔트로피 합금, 비틀림 실험, 재결정 거동

합금의 열간 압연(Hot Rolling) 및 다단 단조(Multi-pass Forging)와 같은 열간 성형 공정에서는 패스 간 이동 및 대기시간으로 인해 변형과 유지가 반복되는 단속 변형 과정이 발생한다. 이 과정에서 발생하는 미세조직의 연화 및 재결정 거동은 후속 변형 거동뿐만 아니라 최종 제품의 미세조직과 기계적 특성을 결정하는 중요한 요인이다. 본 연구에서는 $Al_{0.3}$CoCrFeNi 고엔트로피 합금의 고온 변형 특성 및 변형 후 재결정 거동을 분석하기 위해, 다양한 패스 변형률 및 유지시간 조건에서 단속 비틀림 시험을 수행하였다. 변형 후 미세조직 분석에는 전자후방산란회절(EBSD)을 이용하였으며, Grain Orientation Spread(GOS), Kernel Average Misorientation(KAM), 저각입계(LAGB) 및 고각입계(HAGB) 분율, 결정립 크기와 Σ3 쌍정 분율을 비교하였다. 이를 바탕으로 동적 재결정(DRX) 및 회복 거동과 유지시간 동안 진행되는 준동적 재결정(MDRX)의 영향을 평가하였다. 실험 결과, 패스 변형률과 유지시간에 따라 변형 에너지의 축적과 재결정 거동에서 뚜렷한 차이가 나타났다. 일부 조건에서는 유지시간 동안 KAM 값이 감소하고 고각입계 및 Σ3 쌍정 분율이 증가하여 변형 후 회복 및 재결정이 진전되는 경향을 보였다. 반면, 유지시간이 짧은 조건에서는 회복 및 재결정이 충분히 진행되지 못해 이전 패스의 변형에너지가 소거되지 않고 축적되는 경향을 보였으며, 일부 조건에서는 결정립 성장도 관찰되었다. 이러한 결과를 통해 $Al_{0.3}$CoCrFeNi 고엔트로피 합금의 고온 단속 변형에서 패스 변형률과 유지시간이 회복 및 재결정 거동에 중요한 영향을 미치는 것을 확인하였다.

[P28-4]

Ti 첨가 및 냉간 압하율 증가가 Fe-Co-Ni-Cr-Mo계 중엔트로피 합금의 석출 거동과 극저온 기계적 특성에 미치는 영향: 박수정, 김태형(단국대학교), 김성욱(포항산업과학연구원), 김형섭(포항공과대학교), 주수현*(단국대학교)

Keywords: Medium-entropy alloy, Cryogenic mechanical property, precipitation, Reduction ratio, Coefficient of thermal expansion

Fe-Co-Ni-Cr-Mo계 중엔트로피 합금(Medium Entropy Alloys, MEAs)은 우수한 극저온 기계적 특성과 낮은 열팽창 특성을 바탕으로 액화수소 저장·운송 설비 및 우주항공 구조재와 같은 극저온 구조재로 주목받고 있다. 선행연구에서는 새로운 Fe-Co-Ni-Cr-Mo계 합금을 설계하여 저열팽창 특성과 우수한 극저온 기계적 특성을 확보하였으나, 추가적인 강도 향상이 요구되었다. 이를 개선하기 위해 본 연구에서는 기존 Fe-Co-Ni-Cr-Mo계 합금에 Ti를 첨가하여 Mo-rich 석출상의 형성 및 분산 거동을 제어하고, 냉간 압하율을 증가시켜 석출강화를 극대화하고자 하였다. 합금은 주조, 냉간 압연 및 열처리를 통해 제조하였으며, 경도 측정을 통해 최적 열처리 조건을 선정하였다. 이후 XRD, SEM 및 EDS 분석을 통해 열처리 후 미세조직과 석출 거동을 분석하였으며, 상온 및 77 K에서 인장시험을 수행하여 기계적 특성을 평가하였다. 그 결과, Ti 첨가와 냉간 압하율 증가는 미세 Mo-rich 석출상의 형성 및 분산을 촉진하여 기존 합금 대비 더욱 우수한 극저온 강도를 확보하였다. 또한 재결정/미재결정 헤테로구조 내 미세 Mo-rich 석출상에 의한 석출강화 메커니즘을 분석하였으며, 이를 통해 Fe-Co-Ni-Cr-Mo계 중엔트로피 합금의 극저온 강도 향상을 위한 미세조직 설계 방안을 제시하였다.

[P28-5]

$Cr_{48}Ni_{37}Fe_{10}Co_5$ eutectic 합금의 극저온 인장 특성: 이동희(한국재료연구원, 울산과학기술원), 윤성준(한국재료연구원, 고려대학교), 조욱(울산과학기술원), 정덕현(충남대학교), 권현준, 장태진, 나영상*, 김영균*(한국재료연구원)

Keywords: Eutectic alloy, Cryogenic tensile behavior, Cold rolling, Annealing, Deformation mechanism

최근 액체수소 연료의 활용 확대와 극저온 첨단산업의 발전에 따라 극저온 환경에서 높은 강도와 연성을 동시에 확보할 수 있는 구조용 금속 소재에 대한 관심이 증가하고 있다. eutectic 합금은 서로 다른 기계적 특성을 갖는 두 상이 미세하게 배열된 복합조직을 형성하므로 우수한 강도–연성 조합을 나타낼 수 있으며, 후처리를 통해 미세조직과 기계적 특성을 조절할 수 있다. 본 연구에서는 $Cr_{48}Ni_{37}Fe_{10}Co_5$ (at.%) eutectic 합금의 미세조직과 극저온 인장 거동에 미치는 냉간압연 및 어닐링의 영향을 조사하였다. as-cast 시편에서는 FCC 상과 BCC 상이 교대로 배열된 방향성 층상 유테틱 조직이 관찰되었다. 70% 냉간압연 후 800 ºC에서 2시간 동안 열처리한 시편 (heat-treated)에서는 기존 층상조직이 분절 및 미세화 되었으며 결정립 구조와 상분포가 변화하였다. 인장시험 결과, 두 시편 모두 시험 온도가 감소함에 따라 항복강도와 최대인장강도가 크게 증가하였다. 특히 heat-treated 샘플은 as-cast 시편보다 모든 온도 범위에서 높은 강도를 나타내면서도 연신율의 현저한 감소 없이 소성변형 능력을 유지하였다. 추가적으로 인장시험 후 변형 미세조직을 분석하여 각 상의 변형 양상과 극저온 변형기구를 고찰하였다.

[P28-6]

중엔트로피 합금에서 전위밀도에 따른 γ′ 석출물 조대화 거동 분석: 한상윤, 박은수*(서울대학교), 류채우*(홍익대학교)

Keywords: 중엔트로피 합금, γ′ 석출물, 전위밀도, 석출물 조대화, 파이프 확산

FCC 기지와 정합계면을 이루는 $L1_2$ 구조의 γ′ 석출물은 전위 이동을 효과적으로 억제하여 우수한 강도–연성 균형을 나타내며, 또한 γ와 γ′사이의 작은 격자 부정합은 고온에서 미세조직 안정성을 유지하는 데 유리하다. 그러나 장시간 고온에 노출될 경우 γ′ 석출물은 계면에너지를 낮추는 방향으로 조대화되며, 이에 석출강화 효과가 저하될 수 있다. 특히 가공 과정에서 도입된 전위는 용질원자의 빠른 확산 경로로 작용할 수 있어, 초기 전위밀도에 따라 파이프 확산(pipe diffusion)을 통한 γ′ 석출물의 조대화 거동이 달라질 가능성이 있다. 따라서 전위밀도에 따른 γ′ 석출물의 조대화 거동을 규명하는 것은 γ′ 석출 강화형 합금의 고온 미세조직 안정성을 이해하는 데 중요하다. 본 연구에서는 CoCrNi(Al, Ti) 기반 중엔트로피 합금의 재결정 시편과 80% 압연 시편에 동일한 열처리 조건을 적용하여 γ′ 석출물의 조대화 거동을 비교하였다. 방사광 X선 회절(synchrotron X-ray diffraction)을 이용하여 열처리에 따른 γ 및 γ′ 상의 격자상수와 γ/γ′ 격자 부정합 변화를 분석하였으며, 소각 X선 산란(small-angle X-ray scattering)을 통해 γ′ 석출물의 크기 분포 변화를 평가하였다. 이를 바탕으로 초기 전위밀도에 따른 γ′ 석출물의 조대화 거동을 비교하고, 파이프 확산이 조대화 거동에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 연구 결과는 가공 이력을 고려한 중엔트로피 합금의 고온 미세조직 안정성을 이해하고 열처리 조건을 설계하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P28-7]

철계 $L1_2$ 석출강화 합금의 저온 변형 중 전위-석출물 상호작용 거동 규명: 문광현, 김진섭(한양대학교), Bijun Xie(University of California), 정찬원(국립부경대학교), 김지훈(부산대학교), Penghui Cao(University of California), 김진경*(한양대학교)

Keywords: 다성분계합금, $L1_2$ 석출상, 고해상도 주사투과전자현미경(HR-STEM)

$L1_2$ 석출강화 합금은 FCC 기지와 정합 계면을 형성하는 질서상 석출물을 통해 연성을 유지하면서 높은 강도를 확보할 수 있다. 이러한 질서상 석출물이 전위에 의해 전단될 때 역상경계(APB) 또는 다양한 초격자 적층결함이 형성될 수 있다고 보고되었다. 본 연구에서는 철계 $L1_2$ 석출강화 합금에서 미세한 $L1_2$ 석출물이 저온변형 중 변형을 수용하는 기구를 조사하였다. 열간압연한 합금을 1000 ºC에서 2시간 동안 어닐링한 후 700 ºC에서 24시간 동안 시효 처리하였다. 그 결과, 결정립 내부에는 평균 크기가 약 10 nm인 미세한 연속 석출물이 형성되었으며, 결정립계에는 조대한 불연속 석출물이 형성되었다. 시효 처리된 합금을 123 K에서 변형한 후 주사전자현미경(SEM)과 투과전자현미경(TEM)을 통해 변형 거동과 전위 구조를 관찰하였다. 또한 고해상도 주사투과전자현미경(HR-STEM)을 이용하여 $L1_2$ 석출물 내부에의 전위-석출물 상호작용과 변형 수용 기구를 규명하였다.

[P28-8]
NiCrAl 중엔트로피 합금의 초기 미세조직이 수소취성 거동에 미치는 영향: 정휘윤, 윤성민, 이제인*(부산대학교)
Keywords: Medium-entropy alloys, Hydrogen embrittlement, Lamellar structure

혼소연료를 사용하는 선박의 엔진의 스핀들에 사용되고 있는 Ni-38Cr-3.8Al (wt.%) 중엔트로피 합금은 고온에서 높은 Cr, Al 함량으로 인한 고내식성과 불연속 석출에 의한 γ상(FCC)과 α-Cr상(BCC)의 라멜라 구조로 인해 고강도를 보인다. 하지만, 혼소연료에 포함된 암모니아에 의한 Ni-38Cr-3.8Al (wt.%) 합금의 수소취성 연구는 현재 보고된 바가 없다. 본 연구에선 1200 ºC에서 1.5분 용체화하여 γ상으로만 이루어진 1200 WQ, 용체화 이후 시효를 거쳐 라멜라 구조를 갖는 700, 875 AC, α-Cr상이 입자 형태로 결정립계 및 내부에 석출된 1050 AC의 기계적 물성 및 수소취성 거동을 분석하였다. 1200 WQ 대비 시효된 합금이 고강도를 보였고, 시효 온도가 감소할수록 고강도 저연신을 보였다. SSRT 실험을 통해 내수소취성을 평가하였고, 전기화학적으로 수소가 장입된 라멜라 구조를 갖는 합금들은 수소 장입 전에 비하여 70 % 이상의 급격한 연신율 감소를 보였다. 수직 단면 분석 결과 4가지 합금 모두 20 μm 정도의 취성 파단을 보였다. BSE 및 EBSD를 활용해 초기 미세조직에 따른 수소기인균열의 개시와 전파를 분석하였다. 1200 WQ 및 1050 AC는 모두 γ상 결정립계에서 균열이 개시되고 소성변형이 증가함에 따라 일부 균열은 결정립 내부로 전파됨을 확인하였다. 라멜라 구조를 갖는 합금들은 라멜라 구조 형성과 무관하게 초기 γ상 결정립계를 따라 균열이 개시되고 전파됨을 확인하였다. 본 연구를 통해 고강도 및 내수소취성을 갖는 FCC/BCC 이상구조를 확인하였다.

[P28-9]
결정립 크기에 따른 TRIP 거동 제어를 통한 FeNiMnCoTiSi 중엔트로피 합금의 극저온 강도-연성 동시 향상: 김서연, 이도원, Peyman Asghari-Rad, 정상국, 손수정, 안성열, 김형섭*, 김은성(포항공과대학교)
Keywords: Medium-entropy alloys, High pressure torsion, Cryogenic deformation, Transformation-induced-plasticity, Hetero-deformation-induced strengthening

면심입방구조 기반 중엔트로피 합금 (medium-entropy alloys, MEAs) 은 변형 유기 소성 효과를 통해 극저온에서 우수한 강도와 연성을 확보할 수 있는 소재로 주목받고 있다. 본 연구에서는 고압 비틀림 공정으로 제조된 Fe-15Ni-8Mn-8Co-3Ti-Si MEA를 700~900 ºC에서 소둔하여, 77K의 극저온 인장 거동을 조사하였다. 700 ºC 소둔 시(A700) ~1 GPa의 항복강도, ~1.34 GPa의 인장강도, 균일 연신율 ~30.3%를 보이고, 900 ºC 소둔 시(A900) ~0.74 GPa의 항복강도, ~1.32 GPa의 인장강도, ~70.1%의 균일 연신율을 보여 결정립 크기에 따른 강도와 연성 간의 trade-off가 뚜렷하게 나타났다. 이러한 차이는 결정립 크기가 전위 거동, 석출물 분포, shear band 발달, 변형 유기 마르텐사이트 변태 (Deformation-Induced Martensitic Transformation, DIMT) 에 미치는 영향이 복합적으로 작용한 결과로 해석되었다. A700에서는 slip trace가 짧고 개별 결정립 내에 국한되며 shear band의 상호작용이 최소화되었고, Ti, Si-rich η상 석출물에 의해 전위 전파가 제한되어 DIMT 개시가 지연되었다. 그 결과 DIMT는 짧은 변형률 범위 내에서 비교적 빠르게 포화되는 경향을 보였으며, 초기 가공 경화는 광범위한 shear band의 발달보다 빠른 전위 저장과 전위-석출물 상호작용에 의해 주도된 것으로 볼 수 있다. 반면 A900에서는 Ti, Si-rich η상 석출물의 제한된 열적 안정성으로 인해 열처리 동안 석출물이 점차 용해되어 그 분포가 감소하였고, 결정립 크기가 커지면서 더 긴 shear band 전파와 빈번한 입계 shear band 교차가 가능해졌다. 이러한 shear band의 교차가 마르텐사이트 형성의 지속적인 핵생성 위치로 작용하여, α' 마르텐사이트 핵생성이 촉진되었다. 이러한 결과는 결정립 크기가 변태 개시 시점과 포화 양상, 변형 국부화 경로를 조절하여 극저온에서의 강도-연성 균형과 가공경화 거동을 결정하는 핵심적인 미세구조 인자임을 보여준다. 본 연구에서 제시된 미세구조 설계 전략은 중/고엔트로피 합금의 극저온 변형 거동을 제어하기 위한 기반을 제공하며, 향후 고강도와 내손상성을 동시에 갖는 극저온 구조재료 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P28-10]
극저온 압연 후 열처리를 통한 CoCrFeMn계 엔트로피 합금의 기계적 특성 향상 연구: 최정훈(충남대학교), 송동현(충남대학교, 국방기술진흥연구소), 정 현, 이동현*(충남대학교)
Keywords: 고엔트로피합금, 극저온압연, 열처리

본 연구에서는 Co10Cr10Fe50Mn30(at%) 엔트로피 합금에 극저온(-193ºC) 압연을 적용하여 TRIP을 유도한 후, 후속 열처리 조건이 미세조직과 기계적 물성에 미치는 영향을 분석하였다. CoCrFeMn 합금을 상온과 극저온에서 압하율 30%으로 압연하였다. 각 압연재에 대해 600ºC ~ 900ºC에서 30분 간 어닐링 후 수냉하였다. 인장 시험과 EBSD 분석을 통해 기계적 특성과 FCC/HCP 상 분율, GOS, GND, KAM을 분석하였다. 극저온 압연과 열처리 조건 조절을 통해 CoCrFeMn 엔트로피 합금의 미세조직과 기계적 특성을 설계할 수 있음을 정량적으로 확인하였다. 특히 700 ºC에서 열처리한 경우, 기계적 특성이 가장 향상된 것으로 확인되어 그 원인에 대하여 논의하였다.

[P28-11]
Effect of Rolling Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Dual-phase High-Entropy Alloys: jongtae kim, Juree Jung, Jinwoo Seok, Mi Hye Lee, Jawoon Kim, Junhee Han, Leeseung Kang*(Korea Institute of Industrial Technology)
Keywords: High-Entropy Alloy, Dual-phase Microstructure, Rolling Temperature

High-entropy alloys (HEAs), composed of multiple principal elements mixed in equimolar or near-equimolar ratios, have attracted significant attention as novel materials capable of achieving excellent combinations of strength and ductility. In particular, dual-phase (duplex-like) HEAs, in which FCC and BCC/B2 phases are distinctly separated at the grain scale, exhibit a phase combination similar to

that of duplex stainless steels, while showing substantial differences in composition and properties between the two phases. Such characteristics are expected to give rise to distinctive microstructural evolution during hot and cold/cryogenic working, driven by the differing deformation behavior of the two constituent phases. In this study, the microstructural changes and accompanying mechanical property variations induced by hot and cryogenic rolling are investigated for an HEA exhibiting a dual-phase microstructure with clearly separated FCC and BCC/B2 phases. Prior to rolling, the phase transformation behavior of the alloy was predicted through CALPHAD thermodynamic calculations and thermal analysis, and appropriate rolling temperature ranges were established based on these results. During the rolling process, particular attention will be paid to the fragmentation and rearrangement behavior of phase-boundary-associated microstructures, the progression of dynamic recrystallization, and strain partitioning behavior between the two phases, in order to analyze the microstructural evolution. In addition, the phase-boundary characteristics and grain morphology are expected to develop differently depending on the rolling temperature, and the influence of these microstructural differences on mechanical properties such as strength and ductility will also be elucidated.

[P28-12]

Ti-V-Nb-Mo 고엔트로피 합금 분말의 원소 균질화 및 소결체 특성에 미치는 밀링 시간의 영향: 이윤서, 송유진, 유형규, 이진규*(국립공주대학교)

Keywords: 고엔트로피, 기계적합금화, 방전플라즈마소결, 밀링, 고융점

Nb, Mo, Ta 및 W 등 고융점 천이원소로 구성된 BCC 고엔트로피 합금은 기존의 내열 재료들의 특성 저하가 발생하는 1000 ºC 이상의 고온에서도 우수한 기계적 특성을 유지하여 차세대 고온 구조재료로 주목받고 있다. 그러나 구성 원소들의 높은 융점으로 인해 일반적인 용해 공정을 이용한 합금 제조에는 한계가 있으며, 이를 극복하기 위한 방법으로 기계적 합금화와 소결을 이용한 분말야금 공정이 활발히 연구되고 있다. 기계적 합금화 과정에서는 반복적인 냉각 압접과 파쇄를 통해 원소 간 고용과 균질화가 진행되지만, 구성 원소들의 물리적·기계적 특성 차이에 따라 합금화 거동이 달라질 수 있다. 특히 Nb와 Mo는 Ti와 V에 비해 높은 융점과 상대적으로 낮은 확산성으로 인해 기계적 합금화 과정에서 고용 및 균질화가 늦게 진행될 수 있으므로, 밀링 시간에 따른 원소의 고용 및 균질화 거동을 고찰하는 것은 중요하다. 본 연구에서는 기계적 합금화법을 이용하여 Ti-V-Nb-Mo 고엔트로피 합금 분말을 제조하고, 밀링 시간에 따른 분말의 상 형성과 원소별 균질화 거동을 분석하였다. 특히 Nb와 Mo의 고용 및 분포 변화를 중점적으로 고찰하였다. 또한 제조된 합금 분말을 방전 플라즈마 소결법으로 소결하여 벌크 합금을 제조하였으며, 밀링 시간에 따른 합금화 정도가 소결체의 상 형성, 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 상과 미세조직은 X선 회절(XRD), 주사전자현미경(SEM), 에너지 분산형 X선 분광법(EDS), 전자 후방 산란 회절(EBSD)을 통해 분석하였고, 상온 압축시험을 통해 제조된 합금의 기계적 특성을 평가하였다.

[P28-13]

고변형률 속도에서 CrCoNi계 고엔트로피 합금의 동적 변형 메커니즘: 노시언, 이소영, 김현수, 김윤호, 박은수*(서울대학교)

Keywords: 고엔트로피 합금, 고변형률 속도 변형, 변형 메커니즘, 적층 결함 에너지

CrCoNi계 고엔트로피 합금(HEA)은 적층결함에너지(stacking fault energy, SFE) 제어를 통해 변형 기구를 조절할 수 있다는 점에서 내충격 구조용 소재로 주목받고 있다. 본 연구에서는 등원자비 CoCrFeMnNi Cantor alloy와 준안정성 제어를 통해 설계된 TRIP-assisted dual-phase (TADP) 고엔트로피 합금을 비교하여, SFE가 변형률 속도 의존 기계적 거동에 미치는 영향을 규명하였다. 준정적 시험과 홉킨슨 압력봉(split Hopkinson pressure bar, SHPB) 시험을 통해 응력–변형률 거동, 변형률 속도 민감도 및 가공경화 거동을 평가하였으며, Combustion light-gas gun 실험을 이용하여 충격 변형 및 에너지 흡수 특성을 분석하였다. 또한 변형 후 미세조직을 관찰하여 활성화된 변형 기구를 확인하였다. Cantor alloy는 고변형률 속도 조건에서 주로 전위 활주와 적층결함 매개 소성변형을 통해 변형을 수용하였다. 반면, SFE가 조절된 TADP 고엔트로피 합금에서는 변형 유기 마르텐사이트 변태가 추가로 활성화되었다. 이러한 복합 변형 기구는 지속적인 가공경화를 유도하고 변형 국부화를 완화하였으며, 소성변형과 미세조직 진화를 통해 충격 에너지 소산 능력을 향상시켰다. 본 연구 결과는 SFE 제어가 CrCoNi계 고엔트로피 합금의 고변형률 속도 거동과 손상 허용성을 조절하기 위한 효과적인 설계 전략임을 보여준다.

[P28-14]

FeCoNiAlT계 고엔트로피 합금의 석출 및 변태 유기 강화의 계층적 연계를 통한 상온 강도–연성 향상: 이상우(고려대학교), Wei Zhang(Central South University), 백주현(고려대학교, 한국과학기술연구원), 정두효, 김세호(고려대학교), Zhiming Li*(Central South University), 손석수*(고려대학교)

Keywords: 고엔트로피 합금, 마르텐사이트, 나노 석출물, 가공 경화

고엔트로피 합금(high-entropy alloys, HEAs)의 등장으로 높은 강도와 연성을 동시에 확보하기 위한 새로운 합금 설계 전략이 제시되고 있다. 특히 준안정 FCC 합금에서 발생하는 변형 유기 마르텐사이트 변태는 변형 중 새로운 경질상과 상 계면을 지속적으로 형성하여 가공경화능을 향상시킬 수 있다. 그러나 상온에서는 마르텐사이트 변태의 구동력이 제한적이기 때문에, 높은 초기 강도를 제공하는 석출강화와 충분한 변태 유기 소성(transformation-induced plasticity, TRIP)을 동시에 구현하기 어렵다. 본 연구에서는 상온에서 석출강화와 마르텐사이트 변태를 효과적으로 결합하기 위하여 Fe–Co–Ni–Al–Ti계 합금을 설계하고, 서로 다른 시효 조건을 통해 L12 석출 상태와 잔류 FCC 기지의 상 안정성을 조절하였다. 미세하고 높은 분율의 정합 L12 나노석출물을 형성한 합금의 마르텐사이트 변태 민감도가 더욱 높아 상온 인장 변형 초기부터 다수의 얇은 plate 마르텐사이트가 반복적으로 형성되었으며, 변형이 증가함에 따라 마르텐사이트 판의 교차와 충돌을 통해 높은 밀도의 FCC/BCC 상계면이 발달하였다. 이러한 석출강화와 변태 유

기 강화의 결합을 통해 815 MPa의 항복강도, 2141 MPa의 인장강도 및 19.5%의 연신율을 달성하였으며, 항복 이후 약 1.3 GPa에 달하는 현저한 강도 증가를 나타냈다. 반면, 조대한 L12 석출물을 갖는 조건에서는 최종 마르텐사이트 분율이 유사함에도 불구하고 기존 마르텐사이트 plate의 lateral thickening을 통한 성장이 우세하여 상대적으로 낮은 가공경화능을 보였다. 본 연구 결과는 L12 석출물이 단순한 전위 이동 방해물뿐만 아니라 FCC 기지의 상 안정성, 마르텐사이트 변태 속도 및 형상 발달을 조절하는 미세조직적 인자로 활용될 수 있음을 보여준다. 따라서 미세한 정합 석출상과 적절한 FCC 준안정성을 동시에 확보하는 전략을 상온에서 초고강도와 높은 가공경화능을 구현하기 위한 유망한 합금 설계 방안으로써 제시한다.

[P28-15]

Core-shell 구조를 갖는 $L1_2$ 석출강화형 Fe-rich 중엔트로피 합금의 미세조직 및 초극저온 기계적 특성: 권민지(한국재료연구원), 윤성준(한국재료연구원, 고려대학교), 장태진, 나영상*, 김영균*(한국재료연구원)

Keywords: Medium entropy alloy, Core-shell, Heterostructure, Cryogenic, Mechanical properties

$L1_2$ 석출강화형 중엔트로피합금 (Medium-Entropy Alloy, MEA)은 우수한 기계적 특성과 극저온에서의 높은 변형능을 바탕으로 유망한 극저온 구조용 소재로 주목받고 있다. 특히 합금 설계와 열·기계적 공정을 통해 이종구조(heterostructure)를 형성함으로써 미세조직의 불균일성을 활용한 우수한 강도–연성 조합을 확보할 수 있다. 본 연구에서는 CoCrNiAlTi계 합금을 기반으로 Co 함량을 감소시키고 Fe를 첨가한 Fe-rich $L1_2$ MEA를 설계하였다. 제조된 합금에 열간압연 및 시효처리를 적용하여 미세조직 변화를 분석하였으며, 선정된 시효처리 조건에서 상온부터 4.2 K까지의 인장 특성을 평가하였다. 미세조직 분석 결과, 조대한 결정립으로 구성된 core 영역과 이를 둘러싼 미세 결정립의 shell 영역으로 이루어진 core–shell 형태의 이종구조가 형성되었다. 또한 shell 영역 주변에서는 상대적으로 높은 기하학적 필수 전위 (Geometrically Necessary Dislocation, GND) 밀도가 관찰되었으며, 이는 열간압연 과정에서 발생한 불균일한 소성변형과 관련된 것으로 판단된다. 인장시험 결과, 시험온도가 감소함에 따라 항복강도가 증가하였으며, 동시에 연신율 또한 증가하여 극저온에서 우수한 강도–연성 조합을 나타냈다. 추가적으로 인장시험 후 시편의 미세조직을 분석하여 Fe-rich $L1_2$ MEA의 core–shell 이종구조와 시험온도에 따른 변형 거동의 상관관계를 해석하고자 하였다.

[P28-16]

Effects of Cu and Mo Additions on the Corrosion and Surface Oxidation Behavior of CrCoNi-Based Multi-Principal-Element Alloys in Phosphoric Acid Environments: Gunjick Lee, Han Jun Yu, Jae-Hyeok Shim*(Korea Institute of Science and Engineering)

Keywords: Corrosion, Phosphoric acid, Multi-principal-element alloys

CrCoNi-based multi-principal-element alloys (MPEAs) have attracted considerable attention as potential structural materials for aggressive environments owing to their excellent chemical stability and compositional flexibility. In particular, the formation and stability of Cr-rich protective surface films play a critical role in determining their corrosion resistance. However, the effects of additional alloying elements on the corrosion and oxidation behavior of CrCoNi-based MPEAs in phosphoric acid environments remain insufficiently understood. In this study, the effects of Cu and Mo additions on the corrosion behavior and surface stability of CrCoNi-based MPEAs were systematically investigated under phosphoric acid exposure. Particular attention was given to the influence of Cu and Mo on the formation and stability of Cr-containing protective surface films and the resulting resistance to material degradation. The results demonstrated that Cu and Mo additions produced distinct changes in corrosion resistance and surface-film characteristics, indicating that their alloying effects are strongly associated with modifications in the chemistry and stability of Cr-rich surface oxides. The present findings provide insight into the alloying-dependent corrosion mechanisms of CrCoNi-based MPEAs and suggest potential compositional strategies for enhancing their durability in phosphoric acid environments.

[P28-17]

열처리 기반 AlTiVCr 공정 고엔트로피 합금의 미세조직 분석 및 고온 항복 강도 특성 평가: 강원묵, 홍동성, 이규필, Yusupov Dilshodbek, Abbas Mouhammad Aoun, 강결찬, 홍성환, 박혜진, 김기범*(세종대학교)

Keywords: 내열 고엔트로피 합금, 고온 기계적 물성, AlTiVCr 합금 설계, 열처리

공정 고엔트로피 합금(Eutectic High-Entropy Alloy, EHEA)은 공정 조직을 통해 높은 강도와 우수한 연성을 동시에 확보할 수 있어 기존 고엔트로피 합금의 단점을 보완하였으며, 우수한 열적 안정성과 고온 기계적 특성을 지녔기 때문에 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 저밀도 원소인 Al, Ti, V, Cr로 구성된 EHEA 합금계가 제안되었다. 특히 앞서 연구되었던 $Al_{45}Ti_{35}V_{15}Cr_5$ EHEA 합금은 우수한 비강도를 가져 경량 구조재료로서의 가능성이 보고되었다. 그러나 해당 합금은 특정 온도 영역에 도달하면 기계적 물성이 급격히 변화하는 문제를 보였다. 이러한 문제는 합금의 고온 활용성을 제한하는 요인으로 작용한다. 본 연구의 핵심 목표는 열처리를 통해 $Al_{45}Ti_{35}V_{15}Cr_5$ 합금의 온도 증가에 따른 급격한 강도 저하 원인을 규명하고 상 안정성을 상승시켜 합금의 고온 적용 가능성을 확보하는 것이다. 이를 위해 다양한 열처리 온도에서 합금의 상과 미세조직의 변화를 관찰하고 분석하였다. 특히 특정 열처리 온도에서 주조 합금의 공정 조직이 보다 안정한 공정 조직으로 변태하는 데에 주목하였다. 또한 고온 환경에서의 미세조직 변화와 상온 및 고온에서의 기계적 물성 간의 상관관계를 규명하고자 하였다. 본 연구에서는 아크 용해 및 흡입 주조법을 이용하여 제작된 직경 3 mm, 길이 50 mm의 봉상 시편이 사용되었다. 제조된 시편은 Ar 분위기 하의 튜브형 전기로에서 각각 500-900 ºC의 범위에서 열처리하였다. 열처리한 시편은 상온 및 500-900 ºC에서 압축 시험을 수행하였다. 열처리에 따른 상과 미세조직, 기계적 물성의 변화는 UTM, XRD, SEM 및 TEM을 통하여 관찰 및 분석하였다.

[P28-18]

수소 용해 엔탈피와 상안정성을 고려한 Ti–V–Nb–Cr계 BCC 다성분 수소저장합금 설계: 예정원, 박은수*(서울대학교)

Keywords: Hydrogen storage, BCC multicomponent alloys, Metal hydrides, Hydrogen partial molar enthalpy, Thermodynamic phase equilibrium

최근 재생에너지 보급 확대에 따라 변동성 전원을 안정적으로 저장 및 활용하기 위한 수소 기반 에너지 저장 기술의 중요성이 증가하고 있다. 특히 체심입방(Body Centered Cubic, BCC) 구조의 고엔트로피 합금(High entropy alloys, HEAs) 기반 금속수소화물은 넓은 조성 설계 자유도를 바탕으로 수소화물 안정성과 평형압을 조절할 수 있어 차세대 고체 수소저장재로 주목받고 있다. 그러나 방대한 조성 공간에서 BCC 단상 안정성과 가역적 수소 흡·방출 특성을 동시에 만족하는 조성을 실험적으로 탐색하는 데에는 한계가 있다. 본 연구에서는 선행 연구에서 수소 부분 몰 엔탈피가 실험 및 밀도 범함수이론 계산을 통해 매개 변수화 되고, BCC 다성분 합금의 압력-조성-온도(PCT) 예측에 적용된 Ti, V, Cr, Ni, Zr, Nb, Hf 및 Ta를 조성 설계 후보 원소를 포함한 BCC 다성분 합금에 적용 가능성을 제시하였다. 원소별 역할은 선행 연구에 보고된 수소 부분몰 엔탈피를 기준으로 구분하였다. 즉, Ti, Zr 및 Hf는 상대적으로 큰 음의 엔탈피에 따른 수소화물 안정화 원소, V 및 Nb는 BCC 모상 형성과 중간 수준의 수소 친화도를 제공하는 원소, Ta는 BCC 모상을 유지하면서 고수소 농도 수소화물의 안정성을 조절하는 원소, Cr 및 Ni는 상대적으로 높은 엔탈피를 통해 과도한 수소화물 안정성을 완화하고 평형 압을 조절하는 원소로 고려하였다. 이들 원소의 상별 수소 부분 몰 엔탈피는 Ti와 Zr에서 가장 큰 음의 값을 나타내는 반면, Cr과 Ni는 양의 값을 나타내어 서로 상반된 수소화물 안정화 효과를 제공한다. 또한, Ti-V-Nb-Cr 기본 합금계에 Zr, Hf, Ta 및 Ni의 첨가 효과를 포함한 합금계의 열역학적 상평형 계산을 연계하여 BCC 모상 및 경쟁상의 안정성을 평가하고, 적절한 수소화물 안정성 및 가역적 수소 흡·방출 특성을 동시에 확보할 수 있는 조성 후보군을 제시하고자 한다.

[P28-19]

Effect of V on the microstructure and mechanical characteristics of dual phase $(CrFeNiCu)_{100-x}V_x$: Dilshodbek Yusupov*, Muhammad Aoun Abbas, Kiran P. Shinde, Hae Jin Park, Sung Hwan Hong, Ki Buem Kim(Sejong University)

Keywords: High - entropy alloy; Morphology; Nanoprecipitates; Mechanical properties

High-entropy alloys (HEAs) are promising materials for advanced engineering applications due to their excellent mechanical properties. In this study, $(CrFeNiCu)_{100-x}V_x$ HEAs (x = 0–20 at.%) were developed to investigate the effects of V addition on phase evolution, microstructure, and mechanical properties. V addition promotes elemental partitioning and increases the BCC phase fraction, while reducing the FCC phases and promoting Cu-rich segregation. As the V content increases, the yield strength rises from 291 ± 4.1 to 1717.47 ± 8.6 MPa, and hardness increases from 134.3 ± 4.8 to 573.33 ± 7.8 HV. Although ductility decreases from above 45% to 10.65 ± 1.5%, it remains suitable for structural applications. The enhanced strength is mainly attributed to the increased BCC phase fraction and nanoscale precipitates. These findings highlight the potential of V addition for developing high-strength HEAs with tailored microstructures and properties.

P29 : 역학측정
Room 1층 전시홀, 10월 30일

[P29-1]
원자력시스템용 구조재료의 이온조사에 따른 표면 경도 변화 분석: 정회연(UNIST), 전은채(울산대학교), 김주영*(UNIST)
Keywords: 조사취화, He 이온 조사, 나노스케일, 경도

탄소중립 실현과 화석연료 고갈에 대비하기 위한 차세대 에너지원으로 핵융합 발전이 주목받고 있으며, 이를 상용화하기 위한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 핵융합 반응은 중수소와 삼중수소가 융합하여 헬륨과 고속 중성자를 생성하는 과정에서 막대한 에너지를 방출한다. 그러나 핵융합로 내부에서는 약 1억 ℃ 이상의 초고온 플라즈마와 함께 방출된 고에너지 중성자가 구조재료에 지속적으로 충돌하므로, 이러한 극한 환경에서도 안정적으로 사용 가능한 핵융합 구조재료의 개발이 필수적이다. 국내에서는 핵융합 구조재료로 저방사화 페라이트/마르텐사이트강인 Fe-9Cr계 ARAA강(Advanced Reduced-Activation Alloy)이 개발되었으며, 최근에는 상용화를 위해 조사와 온도가 재료의 기계적 특성에 미치는 영향을 정량적으로 규명하려는 연구가 요구되고 있다. 일반적으로 중성자 조사는 결함 형성을 통해 재료를 경화시키고 취성을 증가시키는 반면, 고온 환경은 결함의 회복을 촉진하여 연성을 향상시키는 상반된 영향을 나타낸다. 또한 중성자에 의한 조사손상은 재료 표면으로부터 수 마이크로미터 깊이에 국한되는 반면, 온도의 영향은 시편 전체에 걸쳐 나타나기 때문에 두 환경이 동시에 작용하는 경우 깊이에 따른 기계적 특성의 변화가 발생할 수 있다. 따라서 조사와 고온이 복합적으로 작용하는 환경에서 두 인자의 상호작용과 이에 따른 특성 변화 및 상쇄 효과를 정량적으로 평가하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 나노인덴테이션의 Continuous Stiffness Measurement (CSM) 방법을 활용하여 수 마이크로미터 깊이 범위에서 경도를 평가하고, 다양한 조사손상량 및 온도 조건에 따른 ARAA강의 기계적 특성 변화를 분석하였다. 단일 환경에서는 조사손상량이 증가할수록 경도가 증가하는 반면, 시험 온도가 높아질수록 경도가 감소하는 경향을 확인하였으며, 이를 통해 핵융합 환경을 모사한 실험 조건이 기존 연구 결과와 일치함을 확인하였다. 또한 조사와 고온이 동시에 적용된 복합 환경에서는 두 인자의 영향이 서로 상쇄되는 정도를 경도 변화로 정량화하였으며, 이를 바탕으로 각 환경 인자의 기여도와 조사손상 깊이를 평가하였다.

[P29-2]
인공신경망 기반 나노인덴테이션을 통한 다중 적층 박막 구조 물성 평가: 김광희, 조현욱, 김종형*(국립부경대학교)
Keywords: 나노인덴테이션, FEA, 인공신경망(ANN), Multi-Layer Film

반도체 산업의 발전에 따라 소자 제조 공정은 마이크로미터에서 나노미터 수준으로 미세화되고 있으며, 서로 다른 기계적 물성을 갖는 박막이 다층으로 적층된 구조가 일반화되고 있다. 이러한 박막–기판 시스템에서는 위치와 깊이에 따라 응력 상태와 변형 거동이 달라지므로, 각 박막층의 기계적 물성을 정량적으로 파악하는 것이 소자의 구조 설계 및 신뢰성 평가에 중요하다. 특히 유한요소해석(FEA)을 이용한 구조 해석의 신뢰성을 확보하기 위해서는 각 박막층과 기판의 정확한 기계적 물성이 요구된다. 전통적인 인장시험은 항복강도와 탄성계수 등을 정량적으로 평가하는 대표적인 방법이지만, 나노미터 두께의 박막에서는 시편 제작의 물리적 한계와 시험의 복잡성으로 인해 적용이 어렵다. 이에 계장화 압입시험이 박막의 국부 기계적 특성을 평가하기 위한 대안으로 활용되고 있으나, 단일 압입 응답으로부터 다중 적층 박막의 깊이 방향 물성 변화를 분리하여 해석하는 데에는 한계가 있다. 특히 각 박막층의 탄성계수와 두께를 동시에 추정하기 위해서는 압입 과정에서 획득되는 깊이별 정보를 체계적으로 활용할 수 있는 역해석 기법이 필요하다. 본 연구에서는 단일 나노압입시험의 CSM(continuous stiffness measurement) 모드에서 획득되는 깊이별 stiffness 분포를 활용하여 다중 적층 박막의 층별 기계적 물성을 역산하는 인공신경망(artificial neural network, ANN) 기반 방법을 제안한다. 각진 압입자를 이용한 단일 압입 조건에서 획득한 깊이별 stiffness 정보와 하중–변위 곡선으로부터 추출한 독립 파라미터, 전체 박막 두께 등을 ANN의 입력 변수로 구성하고, 이를 통해 깊이 방향의 탄성계수 변화 및 각 층의 물성을 추정하도록 하였다. 또한 FEA에 multi-unloading 조건을 적용하여 CSM 시험 거동을 모사하고, 다양한 박막 물성 조건에 따른 깊이별 stiffness 응답을 포함하는 학습 데이터를 구축하였다. 이를 기반으로 CSM 단일 압입 응답으로부터 다중 적층 박막의 층별 기계적 물성을 역산할 수 있는 가능성을 검토하였다. 본 연구에서 제안하는 CSM 기반 ANN 역산 방법은 기존의 특정 압입 깊이 또는 최종 stiffness 중심의 분석에서 나아가 압입 과정에서 획득되는 깊이별 강성 정보를 활용한다는 특징이 있다. 이를 통해 나노미터 두께의 다층 박막–기판 시스템에서 개별 박막층의 기계적 물성을 비파괴적으로 추정하기 위한 새로운 평가 방법으로의 적용 가능성을 제시한다.

[P29-3]
L-PBF 적층제조 316L 스테인리스강의 계층적 미세조직 제어 및 멀티스케일 기계적 특성 상관관계 분석: 허재혁, 이준희, 최인철*(국립금오공과대학교)
Keywords: 316L 스테인리스강, L-PBF, 미세조직, 나노압입시험, 인장시험

316L 스테인리스강은 뛰어난 내식성 및 수소 취성 저항성으로 수소·바이오 산업의 핵심 소재나, 전통 공정은 복잡 형상 제작 및 강도-연성 상충 관계 극복에 한계가 있습니다. 이를 해결하는 L-PBF 적층제조 공정은 급속 응고를 통해 융융풀, 결정학적 텍스처, 전위 세포 구조로 이어지는 고유한 계층적 미세조직(Hierarchical microstructure)을 형성하여 우수한 강화 효과를 제공합니다. 그러나 이러한 계층 구조는 국부적 미세조직 불균일성과 이방성을 동반하므로, 나노 스케일부터 벌크 스케일까지 이어지는 멀티스케일 기계적 특성의 미시적-거시적 상관관계 규명이 필수적입니다. 본 연구에서는 L-PBF 공정 변수를 정밀 제어하여 고유한 결정 배향성(Random, <001>, <011>, CLM)을 지닌 4종의 시편을 제조하고, EBSD/OM 분석으로 에피택셜 주상정 성장을 확인하였습니다. 이

후 나노압입시험, 마이크로 비커스 경도시험, 인장시험을 순차 수행하여 멀티스케일 물성을 평가하였습니다. 나노압입 통계 분석(CDF/PDF) 결과, 세포 내부(연질, ~2.8 GPa)와 전위 집적·용질 농축이 나타나는 세포 경계(경질, 3.0–3.1 GPa) 간의 미시적 기계적 대비로 인한 유의미한 양봉 구조(Bimodal distribution)를 확인하였습니다. 마이크로 비커스 경도시험에서는 이러한 미시적 불균일성이 평균화되어, 결정립 미세화 및 Hall-Petch 효과에 의해 주조재 대비 40% 이상 향상된 약 220 HV0.1의 균일한 벌크 경도를 나타냈습니다. 인장 시험 결과, 세포 경계-내부 간 변형 분배 및 이종 변형 유도(HDI) 강화에 의해 강도-연성 상충 관계를 극복하였습니다. 특히 다중 슬립이 활성화된 CLM 및 <011> 시편은 약 90%의 뛰어난 연신율을 달성한 반면, <001> 시편은 변형 국부화로 인한 조기 파단을, Random 시편은 융합 부족(LOF) 기공 결함에 따른 물성 저하를 보였습니다. 본 연구는 L-PBF 316L 소재의 맞춤형 적층제조 부품 설계를 위한 학술적 기전을 제시합니다.

[P29-4]

나노압입시험과 머신러닝을 활용한 듀플렉스 스테인리스강 미세조직 분류: 임준회, 김영천*, 노우람(국립경국대학교)

Keywords: 2205 DSS, 나노인덴테이션, 머신러닝, 미세조직 분류, Random Forest

금속 재료의 미세조직 내 상(phase)을 식별하기 위해서는 일반적으로 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM) 및 EBSD와 같은 미세조직·결정학적 분석 기법이 활용된다. Duplex stainless steel을 구성하는 Austenite와 Ferrite는 결정학적 특성뿐만 아니라 국부 기계적 응답에서도 차이를 나타낼 수 있으므로, 나노압입 시험에서 얻어지는 하중–변위 곡선은 상별 기계적 거동을 반영하는 분석 인자로 활용될 수 있다. 이에 본 연구에서는 나노압입 하중–변위 곡선에서 추출한 curve-based feature와 머신러닝을 결합하여 2205 duplex stainless steel (2205 DSS)의 Austenite/Ferrite 상 분류 가능성을 평가하였다. 나노압입 후 OM 및 SEM 관찰을 통해 압입 위치를 Austenite, Ferrite 및 Boundary 영역으로 labeling하였으며, Austenite와 Ferrite 데이터를 이용하여 Random Forest 기반 이진 분류 모델을 구축하였다. Loading 및 unloading 구간에서 추출한 초기 feature에 대해 feature importance, Pearson correlation 및 feature removal을 수행하여 최종 feature set을 선정하였다. 최종 모델은 independent test set에서 Accuracy 0.8644 및 ROC-AUC 0.9071을 나타냈다. 또한 상별 하중 응답과 상 경계 영역의 국부 기계적 응답을 검토하기 위해 cumulative frequency analysis와 Ferrite-likeness score를 이용한 Boundary 응답 분석을 수행하였다. 이러한 결과는 나노압입 하중–변위 곡선에서 추출한 curve-based feature와 머신러닝을 결합하여 2205 DSS의 Austenite/Ferrite 상 분류 가능성을 평가할 수 있음을 보여준다. 본 연구는2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구일(RS-2024-00409639, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

[P29-5]

유연소자의 굽힘 반복 시간에 따른 굽힘 손상 데이터 신뢰도 분석: 김수현, 김동규, 박태원, 박민지, 조아름, 이정구, 전은채*(울산대학교)

Keywords: 굽힘 반복 시간, 데이터 신뢰도, 유연소자, 굽힘 손상, 반복 굽힘

최근 건강에 관한 관심이 높아지면서 실시간으로 곡면의 신체에 부착하여 건강 상태를 모니터링할 수 있는 유연 소자 형태의 웨어러블 디바이스에 대한 수요가 증가하고 있다. 웨어러블 디바이스는 사용할 때는 곡면의 신체에 부착하고 사용하지 않을 때는 평면 상태로 보관하기 때문에 반복적인 굽힘 변형에도 성능이 저하되지 않는 반복 굽힘 신뢰성을 가져야 한다. 이를 검증하기 위해 웨어러블 디바이스와 같은 유연 소자들이 전자 제품인 것을 감안하여 굽힘 전 저항값을 기준으로 굽힘 회수에 따른 저항 증가량을 굽힘 손상의 지표로 정의하고 측정하는 반복 굽힘 시험이 널리 사용되어 왔다. 반복 굽힘 시험은 평면 상태의 유연 소자를 원하는 곡률 반경까지 굽힌 후 다시 평면 상태로 되돌아오는 것을 하나의 사이클로 정의한다. 그런데 기존에는 사이클이 반복된 후 평면 상태에서의 저항값을 기준으로 저항 증가량을 계산하는데, 유연 소자가 정해진 곡률 반경이 있는 곡면 상태에서 사용되는 것을 감안하면 이러한 시험법은 유연 소자의 실제 사용 환경에서의 저항 증가량을 평가하는 것과 맞지 않다. 이를 개선하기 위해서 유연 소자가 굽혀지는 동안의 저항값을 여러 번 측정하여 곡면 상태의 저항값을 측정하는 연구들도 제시되었다. 그러나 이 경우에도 보통 천 번 이상 사이클을 반복하는 반복 굽힘 시험의 시험 시간을 줄이기 위해 굽힘 반복 시간, 즉 한 사이클당 소요 시간을 짧게 설정하여 시험을 하기 때문에 최대로 굽혀진 상태, 즉 원하는 곡률 반경만큼 굽혀졌을 때의 저항값을 측정하지 못할 가능성이 높다. 이에 본 연구에서는 반복 굽힘 시험에서 한 사이클당 소요 시간에 따른 측정된 저항 증가량의 차이를 비교하여 반복 굽힘 시험에서 얻어진 유연 소자의 굽힘 손상 데이터의 신뢰도를 검증하였다. 유연 소자로 PVA(Polyvinyl Alcohol) 10 wt%를 첨가한 MXene 시편을 PET(Polyethylene Terephthalate) 기판 위에 제작하였고, 굽힘 반복 시간을 300초와 5초로 각각 650사이클의 반복 굽힘 시험을 수행하였다. 굽힘 반복 시간이 300초인 경우에는 첫 번째 사이클에서 저항이 약 45% 증가하고 사이클 수가 증가함에 따라 저항값이 지속적으로 약 75%까지 증가하였으나, 5초인 경우에는 처음부터 끝까지 저항값이 300초에 비해 낮은 값인 약 25% ~ 50% 범위의 값을 가졌으며, 또한 사이클 수가 증가하여도 저항값은 증가와 감소를 반복하는 비정상적인 데이터를 나타내었다. 이는 굽힘 반복 시간이 5초일 때는 최대로 굽혀진 상태에서의 저항값을 측정하지 못해서 300초 대비 낮은 저항값을 나타내었고, 또한 5초에서는 증가와 감소를 반복한 것은 매 사이클마다 저항값이 측정되었을 때의 굽힘 정도가 다르다는 것을 의미한다. 따라서 반복 굽힘 시험을 실시할 때는 충분한 굽힘 반복 시간, 즉 한 사이클당 시간을 확보하여야 신뢰도 있는 데이터를 얻을 수 있음을 확인하였다. (이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-나노 및 소재 기술개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00408180))

[P29-6]

전기화학적 수소장입 시 전해질에 따른 STS304의 국부 변형특성 : 박상민, 이상엽, 김영천*(국립경국대학교 반도체·신소재공학과 청정·에너지소재기술연구센터)

Keywords: 수소취화, 경도시험, 스테인리스강, 전해질

오스테나이트계 스테인리스강인 STS304는 우수한 내식성과 기계적 안정성으로 인해 해양 구조물, 화학 설비 및 수소 에너지 관련 산업 등 다양한 환경에서 구조재로 활용되고 있다. 그러나 부식 반응이나 음극방식과 같은 전기화학적 환경에 노출될 경우, 금속 표면에서 발생한 수소가 소재 내부로 유입되어 기계적 특성에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 수소의 유입은 재료의 변형 거동 및 기계적 특성을 변화시키며, 장기적으로 수소취화 민감도를 증가시킬 수 있다. 특히 금속 표면에서의 수소 발생 반응과 수소 유입 거동은 전해질의 종류, 농도 및 pH와 같은 환경적 요인에 크게 영향을 받는다. 본 연구에서는 H_2SO_4용액과 NaCl 용액을 전해질로 사용하여 전기화학적 수소장입을 수행한 후, Micro-Vickers 경도시험을 통해 전해질 농도, 장입 후 외부 노출 시간 경과 및 압입 하중에 따른 기계적 특성 변화를 분석하였다. 실험 결과, 수소장입 후 STS304의 경도는 미장입 조건에 비해 전반적으로 증가하는 경향을 나타냈으며, 전해질의 종류와 농도에 따라 경도 증가 정도에 차이가 확인되었다. 특히 산성 전해질 환경에서 상대적으로 큰 경도 증가 경향이 나타났으며, 장입 후 외부 노출 시간이 경과함에 따라 경도가 점차 감소하는 거동이 관찰되었다. 또한 압입 하중에 따라서도 경도 변화 정도가 달라져 수소장입에 따른 영향이 표면 인접 영역에서 상대적으로 크게 나타나는 것으로 판단되었다. 장입 직후 및 외부 노출 시간에 따른 시편의 표면 상태를 광학현미경으로 관찰하여 표면 부식 및 부식생성물의 형성 여부를 확인하였으며, 이를 바탕으로 시간 경과에 따른 경도 변화에 표면 부식이 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00409639, 2024년 산업혁신인재성장지원산업)

[P29-7]

전기화학적 수소 장입 조건에서 첨가제 농도 변화에 따른 STS304 용접부 영역의 기계적·전기화학적 특성 평가: 서세덕, 김영천*(국립경국대학교)

Keywords: 첨가제, 양극분극시험, 임피던스 분광법, 용접부, 공식 부식

스테인리스강 304는 우수한 내식성과 기계적 특성으로 인해 수소 저장·운송 설비 및 배관 구조물에 널리 사용되고 있다. 실제 구조물의 제작 과정에서는 용접이 필수적으로 적용되며, 용접부는 모재와 다른 미세조직과 전기화학적 특성을 가지기 때문에 수소 환경에서 국부적인 기계적 특성 변화와 내식성 저하가 발생할 수 있다. 특히 전기화학적 수소 장입 과정에서 사용되는 첨가제의 농도는 금속 표면의 수소 발생 및 침투 거동에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 STS304 용접부를 대상으로 전기화학적 수소 장입 시 첨가제 농도 변화가 모재부와 용접금속부의 기계적 및 전기화학적 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 수소 장입은 3.5 wt% NaCl 수용액에 NH_4SCN을 각각 0, 3 및 10 g/L 첨가한 전해질에서 수행하였다. 수소 장입 전후의 국부 기계적 특성은 나노압입시험을 통해 평가하였으며, 전기화학적 특성은 시간에 따른 장입 전위 변화, 양극 분극시험 및 전기화학적 임피던스 분광법을 이용하여 분석하였다. 실험 결과, 수소 장입된 시편은 미장입 시편에 비해 경도가 증가하였으며, 첨가제 농도에 따라 경도가 증가하였다. 또한 수소 장입 및 NH_4SCN 농도에 따라 부식전위와 공식전위가 변화하고 부식전류밀도가 증가하여 내식성이 변화하는 경향을 보였다. 임피던스 분석에서도 미장입 시편이 가장 높은 부식 저항성을 나타냈으며, 첨가제 농도에 따라 전하이동저항 및 계면 반응 거동이 다르게 나타났다. 본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00409639, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

[P29-8]

전기화학적 수소 장입에 따른 STS304 용접부의 염화물 부식 거동 및 나노압입 특성: 이상엽, 조현학, 김영천*(국립경국대학교)

Keywords: 수소취화, 인장시험, 양극분극시험, Double loop EPR, 열처리

스테인리스강은 우수한 기계적 성질과 내식성을 바탕으로 배관 및 밸브를 비롯한 다양한 산업 설비에 널리 사용되고 있으며, 오스테나이트계 스테인리스강은 상온 수소 환경에서도 비교적 안정적인 특성을 나타내어 수소 저장 및 이송 설비의 후보 재료로 고려되고 있다. 그러나 염화이온(Cl^-)이 존재하는 환경에서는 공식과 같은 국부부식이 발생할 수 있으며, 특히 용접재의 경우 용접 과정에서 발생하는 열적 이력과 용융·응고 과정으로 인해 모재와 상이한 미세조직 및 국부적인 조성 분포가 형성되어 부식 거동에 차이가 나타날 수 있다. 이에 본 연구에서는 STS304 용접재의 모재부와 용접부를 대상으로 전기화학적 수소 장입 조건에 따른 국부 기계적 특성과 부식 거동의 변화를 비교·분석하였다. 수소 장입은 3.5 wt.% NaCl + 3 g/L NH_4SCN 전해질에서 0~50 mA/cm^2의 전류밀도를 인가하여 수행하였다. 왕수 에칭 후 광학적 관찰을 통해 모재부와 용접부의 미세조직적 차이를 확인하였으며, 나노압입시험을 이용하여 수소 장입 조건에 따른 국부 경도 변화를 평가하였다. 그 결과, 수소 장입 전류밀도가 증가함에 따라 국부 경도가 증가하는 경향이 나타났다. 또한 양극분극시험 결과, 수소 장입 전류밀도가 증가할수록 부식전위와 공식전위는 낮아지는 반면 부식전류밀도는 증가하는 경향을 나타내어, 수소 장입 조건이 STS304 용접재의 국부 기계적 특성뿐만 아니라 염화물 환경에서의 전기화학적 부식 거동에도 영향을 미치는 것을 확인하였다. 본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00409639, 2024년 산업혁신인재성장지원사업).

[P29-9]

실시간 나노인장시험을 통한 VNAND용 SiO2 및 SiN 박막의 미세 기계적 물성 평가: 김수정, 곽지윤, 심영주, 김동현, 김주영*(UNIST)

Keywords: 3D NAND 플래시 메모리, 기계적 물성, 실시간 나노인장시험

비휘발성 메모리인 NAND flash memory는 전원이 차단된 이후에도 데이터를 유지할 수 있으며, 낮은 비용으로 대용량 데이터를 저장하는 데 적합하다. 최근에는 제한된 면적에서 저장 용량과 집적도를 향상시키기 위해 메모리 셀을 수직 방향으로 적층하는 3D NAND flash memory 기술이 적용되고 있다. 그러나 적층 단수가 증가함에 따라 서로 다른 재료로 구성된 박막의 반복 증착과 고종횡비 구조 형성 공정이 요구되며, 이 과정에서 웨이퍼 휨, 박막 균열, 계면 박리 및 공정 정렬 오차 등의 기계적 신뢰성 문제가 발생할 수 있다. 특히 박막 증착 과정에서 형성되는 잔류응력은 후속 공정에서의 웨이퍼 변형과 계면 응력 분포에 큰 영향을 미친

다. 따라서 3D NAND 적층 구조의 신뢰성을 확보하기 위해서는 구성 박막의 기계적 물성을 정량적으로 평가하고, 이를 잔류응력 및 구조적 변형 거동과 연계하여 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 3D NAND 공정에 적용되는 박막의 기계적 물성을 평가하기 위해 PECVD를 이용하여 SiO_2 및 SiN 박막을 증착한 후, push-to-pull device 기반의 실시간 나노인장시험을 수행하였다. 평가된 기계적 물성은 적층 박막에서 발생하는 잔류응력, 웨이퍼 휨 및 계면 응력을 해석하기 위한 기초 데이터로 활용될 수 있다. 향후 잔류응력과 계면 접합강도 및 전단강도 간의 상관관계를 규명함으로써 고적층 3D NAND 구조의 기계적 신뢰성 향상을 위한 구조 및 공정 설계 지침을 제시하고자 한다. 본 연구는 (주)삼성전자와의 DS전략산학과제(IO260318-16065-01)를 통해 수행된 연구임.

[P29-10]

적층결함에너지 변화가 CoCrNi 계열 중엔트로피 합금의 수소취화 및 변형 거동에 미치는 영향: 김지현(국립경국대학교), 박태연, 최인철(국립금오공과대학교), 김영천*(국립경국대학교)

Keywords: 수소취화, 적층결함에너지, CoCrNi, 중엔트로피합금, 인장시험

CoCrNi 계열 중엔트로피 합금은 우수한 강도, 연성 및 파괴인성을 동시에 나타내며, 극저온 환경에서도 뛰어난 기계적 특성을 유지하는 것으로 널리 알려져 있다. 이러한 특성으로 인해 액화수소 저장 및 운송 시스템을 포함한 차세대 수소에너지 산업의 구조재료로 주목받고 있다. 그러나 수소 환경에서 재료 내부로 유입된 수소는 전위 이동과 국부 소성변형 거동에 영향을 미치며, 균열의 개시 및 전파를 촉진하여 구조재료의 기계적 신뢰성을 저하시킬 수 있다. CoCrNi 계열 중엔트로피 합금의 변형 및 파괴 거동은 적층결함에너지(Stacking Fault Energy, SFE)에 의해 크게 좌우된다. SFE는 Co/Ni 조성에 따라 달라지며, 크기에 따라 전위 활주, 적층결함 형성, 변형쌍정 및 변형유기상변태와 같은 주요 변형기구의 활성화 양상이 달라진다. 따라서 수소 유입에 따른 기계적 특성 및 변형 거동의 변화를 이해하기 위해서는 Co/Ni 조성에 따른 SFE 차이를 함께 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 CoCrNi 계열 중엔트로피 합금을 대상으로 전기화학적 수소 장입을 수행하고, 인장시험을 통해 수소 유입에 따른 기계적 특성 및 변형 거동의 변화를 평가하였다. Co/Ni 조성을 달리하여 제작한 세 종류의 시편(Co-rich, equiatomic, Ni-rich)을 비교함으로써 조성 변화에 따른 SFE 차이가 수소 환경에서의 인장 변형 및 파괴 거동에 미치는 영향을 검토하였다.

[P29-11]

9 wt% 니켈강의 층상화 열처리를 통한 미세조직 제어 및 극저온 충격 인성 향상: 김영훈, 이소현, 김주영*(UNIST)

Keywords: 니켈 강, 저온충격인성, 샤르피 충격 시험, 임계 간 열처리(intercritical annealing), 나노압입시험(nanoindentation)

화석연료 사용에 따른 환경문제가 심화되면서 전 세계적으로 에너지원을 다변화하려는 움직임이 확대되고 있으며, 이에 따라 액화천연가스(LNG)를 비롯한 극저온 액화가스의 저장 및 운송 수요도 증가하고 있다. 이러한 액화가스 저장 탱크는 극저온 환경에 지속적으로 노출되므로, 탱크용 철강재료에는 저온에서도 우수한 충격인성이 요구된다. 일반적인 철강재료는 온도가 낮아짐에 따라 연성-취성 천이 거동을 나타낼 수 있으나, 니켈강은 충격인성이 우수한 오스테나이트상을 안정화할 수 있어 극저온용 구조재료로 널리 사용되고 있다. 그러나 니켈은 가격이 높고 자원 공급성이 제한적이기 때문에 니켈 함량을 줄이거나 다른 합금원소로 대체하려는 연구가 진행되어 왔다. 일부 대체 합금원소는 결정립계를 약화시키는 등 재료의 저온 인성을 오히려 저하시킬 수 있는 것으로 보고되고 있어, 합금 조성의 변화가 아닌 미세조직 제어를 통해 저온 충격인성을 향상시키는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 열처리를 통한 미세조직 제어에 착안하여, 기존의 퀜칭 및 템퍼링(Quenching and Tempering, Q&T) 공정으로 제조된 9% 니켈강에 임계 간 열처리(Intercritical Annealing)를 추가로 적용하였다. 열처리 단계별로 시편을 제작하고 −196 ℃와 −253 ℃에서 샤르피 충격시험을 수행하여 극저온 충격인성을 평가하였다. 열처리에 따른 충격인성 변화의 원인을 규명하기 위해 미세조직 관찰과 충격 파면 분석을 수행하였으며, 나노압입시험을 통해 각 미세조직 구성상의 국부 기계적 특성이 충격인성에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 바탕으로 임계 간 열처리에 따른 미세조직 변화와 극저온 충격인성 간의 상관관계를 규명하고, 합금 조성의 변화 없이 열처리 공정만으로 9% 니켈강의 극저온 충격인성을 향상시키기 위한 미세조직 설계 방향을 제시하고자 하였다.

[P29-12]

고탄성·고전도성 결정질–비정질 금속 나노적층막의 기계적 신뢰성과 신축성 전자소자: 이찬영(UNIST), 황경석(Harvard University), 김주영*(UNIST)

Keywords: 고탄성, 고전도성, 결정질, 비정질, 신축성

최근 반복적인 인장 변형이 가능한 신축성 전자소자의 개발과 상용화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 높은 성능과 신축성을 동시에 구현하기 위해서는 섬 형태로 배치된 소자들을 전기적 배선으로 연결하고, 배선부가 외부 변형을 수용하도록 하는 구조가 주로 사용된다. 따라서 신축성 전자소자의 장기적인 작동 안정성을 확보하기 위해서는 전기적 연결부에 높은 전기전도도와 기계적 신뢰성을 동시에 갖는 재료를 적용하는 것이 중요하다. 기존 배선 재료로 사용되는 Cu와 같은 결정질 금속은 전기전도도가 우수하지만 탄성 변형한계가 작아 반복적인 신축 과정에서 소성변형과 균열이 누적될 수 있다. 반면 비정질 금속은 비교적 높은 탄성 변형한계를 가지므로, 결정질 금속과 비정질 금속을 적층하여 각 재료의 전기적·기계적 특성을 함께 활용할 수 있다. 본 연구에서는 나노결정질 Cu와 비정질 CuZrTi를 스퍼터링을 통해 교대로 증착하여 결정질–비정질 금속 나노다층막을 형성하였다. 구성층의 두께에 따른 전기전도도와 기계적 특성을 비교하였으며, 서로 다른 전기저항 측정 방법을 이용하여 전기적 특성을 평가하였다. 또한 주사전자현미경 내 실시간 일축 인장시험을 통해 다층막의 탄성변형과 파괴 거동을 분석하고, 결정질층과 비정질층의 두께 및 계면이 변형 거동에 미치는 영향을 확인하였다. 실제 신축성 전자소자에서의 사용 조건을 고려하여 다층막을 신축성 기판과 배선 구조에 적용하고, 반복 인장 과정에서의 저항 변화와 기계적 신뢰성을 평가하였다. 이를 바탕으로 결정질–비정질 금속 나노다층막의 신축성 전자소자용 배선 재료로서의 적용 가능성을 확인하고자 하였다.

[P29-13]

석출경화가 기계적 물성 및 부식거동에 미치는 영향: 우정현*, 박선영, 김가영, 장준혁, 최민재(한국원자력연구원)

Keywords: 석출경화, 부식, 국부부식, 처분용기

석출경화는 금속 기지 내에 미세한 석출상을 형성하여 기계적 강도를 향상시키는 방법으로, 합금의 조성 및 열처리 조건에 따른 석출상의 종류, 크기 및 분포에 따라 그 효과가 달라진다. 한편, 이러한 석출상은 기지와의 전기화학적 특성 차이 및 주변 기지의 조성 변화를 유발하여 미세 갈바닉 반응을 형성할 수 있으며, 이에 따라 합금의 국부부식 거동에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 석출경화형 합금에서는 기계적 물성뿐만 아니라 석출상 형성에 따른 부식거동의 변화도 함께 고려할 필요가 있다.본 연구에서는 Ni-Cu계 합금을 대상으로 조성 및 열처리 조건에 따른 석출 거동와 이에 따른 기계적 특성 및 부식거동의 변화를 평가하고자 하였다. 부식특성은 전기화학적 실험을 통해 평가하였으며, 지하수 환경 및 염화물 이온의 영향을 비교하기 위해 NaCl 첨가 조건에서 추가 실험을 수행하였다. 석출상이 형성되지 않은 합금을 기준재로 설정하고, 석출상 형성 및 분포에 따른 특성 변화를 비교하기 위해 시효처리를 진행하였다. 조성 및 시효처리 여부에 따른 기계적 물성과 부식특성을 비교분석하여 기계적 강도와 국부부식저항성 간의 상관관계를 규명하고, 두 특성을 동시에 고려한 합금 및 열처리 조건을 도출하고자 하였다.

P30 : 인공지능재료과학
Room 1층 전시홀, 10월 30일

[P30-1]
Trajectory-Resolved Reliability Analysis in Cross-Dataset Battery State-of-Health Forecasting: Seongho Lee, Joonhee Kang*(Pusan National Univ.)
Keywords: Reliability Analysis, Cross-Dataset Battery, State-of-Health (SOH)

Reliable state-of-health (SOH) forecasting across battery-aging datasets is hindered by differences in battery chemistry, cycling conditions and experimental protocols. Forecasting performance is commonly summarized using aggregate error metrics, but these metrics reveal little about how prediction reliability varies within an individual degradation path. Here, we investigate the trajectory-level structure of forecasting errors using heterogeneous public battery-aging datasets. Several forecasting architectures were combined with adaptive normalization techniques and evaluated through leave-one-dataset-out validation. Rather than limiting the assessment to overall forecasting errors, residuals were resolved into individual prediction windows. For each cell, windows in the upper tail of its error distribution were designated as high-error windows. Interpretable ranking models were then used to determine whether these windows could be prioritized solely from variables available at the time of prediction. The variables represented the relative location of the window within the cell lifetime, recent SOH evolution and shape characteristics of the predicted SOH horizon. The ranking results were further compared with independently estimated degradation-transition onset and knee positions. Adaptive normalization produced more consistent SOH forecasts across held-out datasets. Nevertheless, the residual errors remained concentrated in particular cells and specific portions of their degradation trajectories. Recent SOH behavior and predicted-horizon characteristics contributed useful ranking information beyond relative trajectory position. Both observed high-error windows and windows assigned higher vulnerability scores occurred more frequently after transition onset and near knee-associated regions. The strength of this relationship differed among sharply bending, gradual, nonmonotonic and protocol-affected trajectories. These results demonstrate that prediction-window-level residual analysis can extend conventional aggregate evaluation by locating trajectory segments where forecast reliability requires additional scrutiny. The proposed approach therefore provides a complementary reliability audit for cross-dataset SOH forecasting.

[P30-2]
Autonomous Schema Induction via Large Language Models for Scientific Knowledge Graph Construction: Hyeonji Shin, Joonhee Kang*(Pusan National University)
Keywords: Knowledge Graph, Large Language Model

Efficient navigation of materials design spaces relies on structured, machine-readable domain knowledge. While published literature contains extensive data regarding chemical compositions, processing conditions, and physical properties, manual construction of knowledge graphs remains time-consuming and difficult to scale. To address this limitation, we present an autonomous schema induction framework using large language models to extract structural concepts and entities directly from unstructured materials science text. Rather than relying on fixed predefined templates, the proposed method identifies context-specific entities and maps multi-step workflows, such as chemical synthesis procedures and operational conditions, into flexible graph representations. By structuring heterogeneous text into linked representations, this approach improves the reliability of graph-augmented language generation systems for scientific reasoning.

[P30-3]
Evidence-Grounded Design of Proton-Conducting Ceramic Electrolytes Using Knowledge Graphs: Gaheun Shin, Joonhee Kang*(Pusan National Univ.)
Keywords: Proton-conducting ceramic electrolytes, Knowledge graph, GraphRAG, Materials informatics, Materials design

The design of proton-conducting ceramic electrolytes requires an integrated understanding of chemical composition, crystal structure, properties, and synthesis processes. However, this knowledge remains fragmented across the scientific literature, while conductivity values are reported under diverse measurement conditions, limiting systematic comparison and materials design. To address these challenges, we construct a domain-specific knowledge graph that captures the relationships among composition, structure, processing, and conductivity in proton-conducting ceramic electrolytes. Literature-derived information is integrated into a unified graph representation, with site-specific information explicitly modeled to capture materials design knowledge at a finer structural level. The knowledge graph is integrated with a graph-based retrieval-augmented generation (GraphRAG) framework, in which hybrid retrieval and graph traversal identify relevant materials and relationships in response to natural-language queries. The retrieved knowledge is subsequently used in a Tree-of-Thoughts reasoning process to explore multiple composition-design pathways and generate candidate electrolytes. Candidate evaluation incorporates literature-derived trends and physicochemical constraints, with supporting materials and relationships retained as traceable evidence. Overall, the proposed framework connects fragmented literature knowledge with evidence-grounded materials reasoning, providing a systematic approach to the design and discovery of proton-conducting ceramic electrolytes.

[P30-4]
LLM 기반 데이터셋 구축을 통한 다상강 미세조직 상 분할: 안희주, 정경재*(성균관대학교)
Keywords: 다상강, 상 분할, LLM, 딥러닝

다상강의 기계적 특성은 페라이트, 마르텐사이트, 오스테나이트 등 구성 상의 분율과 공간적 분포에 크게 영향을 받으므로, 미세조직 내 개별 상을 정확하게 구분하고 정량화하는 것은 미세조직–물성 상관관계 규명과 합금 및 공정 설계에 중요하다. 그러나 주사전자현미경 미세조직 영상에서는 서로 다른 상이 유사한 명암과 형태학적 특징을 나타내는 경우가 많아, 기존의 명암 임계값 기반 영상 분석이나 수작업 분석만으로 개별 상을 일관되게 구분하는 데 한계가 있다. 딥러닝 기반 영상 분할은 미세조직의 명암, 형태 및 질감 정보를 종합적으로 학습하여 개별 상을 효과적으로 구분할 수 있으나, 신뢰성 있는 대규모 학습 데이터의 확보가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 다상강의 주사전자현미경 미세조직으로부터 개별 상을 자동으로 구분하고 상분율을 정량화하기 위해, 대규모 언어모델(large language model, LLM) 에이전트를 활용한 학습 데이터 자동 구축과 딥러닝 기반 상 분할을 연계한 방법을 제안하였다. LLM 에이전트는 학술 문헌과 공개 자료로부터 구성 상에 대한 정보가 명확하게 제시된 미세조직 영상과 대응 상 정보를 자동으로 탐색 및 수집하고, 문헌에 제시된 근거와 영상 정보를 바탕으로 학습 데이터 후보를 선별하였다. 이후 영상 정합과 품질 검증을 통해 미세조직 영상과 상 정보 간의 공간적 일치성과 데이터의 신뢰성을 평가하여 학습 데이터셋을 구축하였다. 구축된 데이터셋을 이용하여 미세조직 영상의 각 화소를 구성 상별로 분류하는 딥러닝 모델을 학습하고, 학습에 포함되지 않은 미세조직에 적용하여 개별 상의 분할 성능과 상분율 예측 정확도를 평가하였다. 본 연구는 LLM을 활용하여 미세조직 학습 데이터의 탐색, 수집 및 검증 과정을 자동화하고 이를 딥러닝 기반 영상 분석과 연계함으로써, 다상강 미세조직의 개별 상 분포와 상분율을 효율적으로 정량화할 수 있는 방법을 제시한다. 제안된 방법은 수작업 데이터 구축에 소요되는 시간과 분석자 의존성을 줄이고, 향후 다양한 철강 미세조직의 정량 분석과 데이터 기반 미세조직–물성 상관관계 규명에 활용될 수 있다.

[P30-5]
머신러닝과 통계 기법을 이용한 Mold Powder 과립 입도와 제조 공정 인자 간 관계 분석: 박재형(영남대학교 신소재공학과), 신민찬(영남대학교 신소재공학부), 박노근*(영남대학교 신소재공학과, 영남대학교 신소재공학부)
Keywords: Mold powder, 과립 입도, 제조공정 인자, 공정 데이터, 머신러닝, 통계적 분석

연속주조에 사용되는 mold powder는 응고 셀과 주형 사이에서 윤활 작용을 하며, 용강의 열방사와 재산화를 억제하고 비금속 개재물을 흡수하는 동시에 열전달을 제어한다. 이러한 역할을 안정적으로 수행하려면 mold powder의 원활한 취급과 투입이 요구되며, 분진 발생을 줄이기 위해 일반적으로 과립화 공정을 거쳐 생산된다. 이때 과립의 크기는 유동 특성과 공급 안정성뿐만 아니라 용융 과정에도 관여하므로, 일정한 제품 품질을 확보하기 위해서는 입도 형성에 관여하는 제조 요인을 규명할 필요가 있다. 본 연구에서는 장기간의 mold powder 생산 과정에서 축적된 제품 및 공정 이력과 과립 입도 측정값을 이용하여 주요 제조 인자를 선별하였다. 먼저 통합 자료와 제품별 자료의 입도분포를 비교하고, 각 공정조건의 작동 범위와 생산 시기에 따른 변화를 조사하여 제품 사이의 입도 수준 차이와 개별 제품의 LOT 간 편차를 구별하였다. 이후 공정조건과 입도 사이의 통계적 연관성 및 입력 인자 간 상관관계를 확인하였으며, 비선형적인 데이터 구조와 인자들의 복합적인 작용을 반영하기 위해 XGBoost 분석을 수행하였다. 분석을 반복하여 중요도 순위의 재현성과 변동 정도를 평가하고, 지속적으로 높은 중요도를 나타내는 인자를 후보군으로 선정하였다. 최종 후보는 머신러닝에서 산출된 중요도만을 기준으로 결정하지 않았다. 통계분석에서 확인된 관계와 반복 분석의 일관성을 함께 검토하고, 각 인자가 실제 제조 단계에서 과립 형성에 관여할 수 있는 물리적 메커니즘을 재료공학적 관점에서 해석하였다. 이와 같은 융합적 접근을 통해 과립 입도 관리에서 우선적으로 살펴볼 제조 인자를 제안하였으며, 향후 공정 운전조건의 조절과 제품 품질 편차 저감을 위한 분석 근거를 마련하고자 한다.

[P30-6]
기계학습을 위한 Al-Zn-Mg-Cu 합금 고경도 조성 탐색용 조합데이터셋 구축: 이경환, 전서연, 천재은, 조기섭, 최현주*(국민대학교)
Keywords: Al-Zn-Mg-Cu 합금, 기계학습, 조합데이터셋, 비커스 경도

Al-Zn-Mg-Cu계 7xxx 알루미늄 합금은 석출강화를 통해 높은 비강도를 나타내어 항공우주 및 수송기기용 구조재료로 널리 활용되고 있으며, 그 기계적 물성은 합금 조성뿐만 아니라 인공 시효 온도 및 시간에 따라 형성되는 석출상의 종류, 크기 및 분포에 크게 좌우된다. 그러나 조성 및 공정 변수가 다수 존재하여 모든 조건을 실험적으로 탐색하는 데에는 상당한 시간과 비용이 요구된다. 최근 기계학습을 활용한 합금 설계 연구가 활발히 진행되고 있으나, 예측 정확도는 학습에 사용되는 데이터의 품질과 범위에 크게 의존하며 문헌 기반 데이터는 실험 환경의 불일치로 인해 신뢰성 확보에 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 실제 실험 데이터만으로 구성된 조합데이터셋을 구축하고, 이를 기계학습에 활용하여 7xxx계 합금의 고경도 조성 및 시효 조건을 도출하였다. Taguchi 실험계획법으로 Zn, Mg, Cu 조성을 주요 변수로 설정하고 인공 시효 온도(100~160 ºC)와 시간을 다변화하여 확보한 초기 실험 데이터를 SSAE 전처리를 통해 저차원 임베딩으로 변환한 후, GPR 기반 능동학습의 입력으로 활용하였다. 모든 시편은 주조 후 균질화 처리(460 ºC, 48 h), 냉간 압연(80% reduction), 용체화 처리(470 ºC, 2 h) 및 인공 시효 공정을 거쳐 제조하였으며, 신속한 데이터 축적을 위해 비커스 경도 시험으로 기계적 물성을 평가하였다. 1차 Query 조건에서는 높은 경도가 확인되었으나 냉간 압연 중 시편 파단이 발생하여 2차 Query부터는 용질 원자 총합을 13 wt.%로 제한하였고, 결정립 미세화를 위한 Ti 및 Zr 미량 첨가 조건과 peak aging이 관찰되지 않은 시편의 시효 시간 확장(최대 120 h) 실험 결과를 조합데이터셋에 반영하였다. 이러한 학습-실험 반복 과정을 통해 총 673건 규모의 조합데이터셋을 확보하였으며, 상위 경도 시편에서 200 HV 이상의 값을 획득하였다. 상위 경도 시편에 대해 XRD, SEM, EBSD 분석을 수행한 결과, Zr이 첨가된 조성에서는 재결정이 억제되어 duplex 구조의 결정립이 형

성된 반면 미첨가 조성에서는 등방성 결정립이 관찰되었고, 결정립 크기와 경도 간의 직접적인 상관관계는 제한적인 것으로 나타났다. 본 연구에서 구축된 조합데이터셋과 기계학습 기반 탐색 전략은 향후 고성능 알루미늄 합금의 조성 및 열처리 조건을 효율적으로 도출하는 데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P30-7]

공정 전주기 데이터 기반 물성 예측 및 소재·공정 최적화 플랫폼: 최준혁, 조기섭*(국민대학교)

Keywords: Process-lifecycle Data, Platform, Data Preprocessing, Machine Learning, Property Prediction, Aluminum Extrusion

최근 금속 소재 산업에서 AI 기반 소재 개발 및 공정 최적화가 확대됨에 따라, 조성, 공정, 물성을 아우르는 전주기 데이터를 실무에서 직접 활용할 수 있는 통합 플랫폼의 필요성이 커지고 있다. 알루미늄 압출은 다단계 공정으로, 공정 간 데이터 연계가 중요하지만, 현장 데이터가 파편화되어 있어 체계적인 축적과 분석에 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 온프레미스 멀티모달 LLM 기반 검증형 데이터 추출 결과를 입력으로 받아, 압출 공정 전주기 데이터를 통합 관리하고 머신러닝 분석으로 연계하는 플랫폼을 구축하였다. 플랫폼은 추출 및 수집된 데이터를 다단계 공정 정보를 기준으로 정합하여 통합 DB에 저장한다. 이후 결측치, 이상치 처리 및 규격 검증을 포함한 전처리와 품질 검증을 수행하여 머신러닝 물성 예측 모델 학습에 활용된다. 정제된 데이터는 특성 선택과 데이터 분할을 거쳐 신경망 기반 물성 예측 모델 학습에 활용된다. 학습된 모델을 통해 조성, 공정 조건으로부터 물성을 예측하고, 목표 물성을 만족하는 최적 조성을 역설계하는 기능을 제공한다. 본 연구는 데이터 추출, 통합, 전처리, 머신러닝을 단일 플랫폼으로 연결함으로써, 산업 현장의 공정 모니터링과 데이터 기반 소재·공정 최적화에 실무적으로 활용될 수 있는 가능성을 확인하였다.

[P30-8]

차원 축소를 이용한 Ni계 초내열합금 DSC 곡선의 열적 상태공간 구축 및 조성 연관성 탐색: 강서연, 최윤석*, 이태주(부산대학교)

Keywords: Ni기 초내열합금, 시차주사열량법, 차원 축소, 인공지능, 기계학습

Ni계 초내열합금은 우수한 고온 기계적 특성을 바탕으로 고온·고압의 극한 환경에서 널리 사용되는 금속재료이다. 합금의 실제 사용 조건에서의 성능을 평가하기 위해서는 고온 조건에서의 직접적인 기계적 시험이 필요하지만, 이러한 시험에는 많은 시간과 비용이 요구된다. 시차주사열량법(Differential Scanning Calorimetry, DSC)은 가열 과정에서 석출, 용해 및 상변태에 의해 발생하는 열유속 변화를 측정하는 기법으로, 합금의 열적 거동을 분석하는 데 널리 활용된다. 이를 통해 Ni계 초내열합금의 온도 변화에 따른 열적 반응을 효율적이고 일관된 방식으로 비교할 수 있다. 그러나 기존의 DSC 분석은 주로 특정 열적 반응이 발생하는 반응 온도나 피크와 같은 개별 특징에 집중되어 있어, 뚜렷한 피크로 구분되지 않는 미세한 변화를 포함한 전체 곡선의 차이를 충분히 반영하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 합금 원소 함량 변화에 따른 열적 거동의 차이를 비교하기 위해 조성을 체계적으로 변화시켜 설계한 62종의 Ni계 합금에 대해 DSC 가열 곡선을 분석하였다. 전체 DSC 곡선에 포함된 시편 간 주요 차이를 소수의 변수로 표현하기 위해 차원 축소 기법을 적용하였으며, 이를 바탕으로 합금의 열적 상태공간을 구축하여 유사한 열적 거동을 보이는 조성과 상이한 거동을 보이는 조성을 구분하였다. 또한 조성 간 열적 거동의 차이가 크게 나타나는 주요 온도 영역을 확인하고, 이를 합금 조성 변화와 비교함으로써 조성에 따른 DSC 곡선의 변화 특성을 분석하였다.

[P30-9]

Closed-Loop Design of Cubic Phase, Low-Resistance Perovskite Air Electrodes: Hyeonggeun Kim, Joonyong Heo, Dongyeon Kim, Seeun Oh(KAIST), Min Young Ha(Kyung Hee University), Kang Taek Lee*(KAIST)

Keywords: Closed-loop design, Cubic phase, Low resistance, Air electrode, Protonic ceramic electrochemical cell

Screening air electrodes for proton-conducting ceramic devices is costly, since every candidate must be powder-synthesized, phase-checked, and assembled into a cell before its resistance becomes known. We describe a workflow that spends this experimental budget deliberately rather than uniformly. Candidate chemistries derived from a cobalt-based barium perovskite are encoded through descriptors reflecting ionic radius, formal charge, and bonding character, and two surrogate models are maintained over that encoding. One estimates the likelihood of recovering a phase-pure cubic product; the other forecasts area-specific resistance together with a credible interval. Only chemistries the first model judges likely to form are passed forward, and among those the second ranks candidates by a criterion rewarding both expected improvement and the prospect of learning something new. Measured outcomes, successful or not, return to both models before the following batch is proposed. Iterating this loop showed that resistance depends jointly on which substituents are combined and at what level, and it located promising chemistries after inspecting a small fraction of the enumerated space, indicating that carefully allocated experiments outperform broad, undirected screening.

[P30-10]

고특성 α+β Ti 합금 설계 전략 구축을 위한 LangChain 기반 대형언어모델 알고리즘 개발: 서기완(서울대학교), 이진우, 이동우(성균관대학교), 박은수*(서울대학교)

Keywords: 대형 언어모델, Olson Flow-Block Diagram, Human-in-the-loop, 타이타늄

현대 산업 수준이 나날이 발전함에 따라 기존 소재를 뛰어넘는 고특성 소재에 대한 수요 또한 함께 증가하는 추세이다. 특히 항공우주 및 생체의료 분야에서 우수한 기계적 특성과 생체적합성을 겸비한 첨단 타이타늄 합금에 대한 수요가 증대됨에 따라 합금계 고유의 복잡성이 그 설계에 있어서 중대한 도전을 야기하고 있다. 이에 따라 공정 변수–미세구조–물성–성능 간 상호작용을 명확히

규명하여 체계적인 합금 설계가 가능하게 하는 방법론을 구축하는 것이 필수적이라고 판단된다. 이를 위해 본 연구에서는 LangChain 기반 대규모 언어모델(LLM) 알고리즘을 개발하였으며, 휴먼 인 더 루프(HITL) 및 프롬프트 엔지니어링 기법을 활용해 고품질 학습 데이터베이스를 구축함으로써 정확성과 신뢰성을 확보하였다. 본 연구에서 개발한 대형 언어모델 알고리즘은 상기 공정-미세구조-물성 (P-S-P)간의 계층적 관계를 Olson flow-block diagram의 형태로 시각화해주어 복잡한 합금계를 이해하고, 합금의 활용처에 적합한 특성 맞춤형 합금 설계를 최적화하는 절차를 크게 단순화할 수 있다. 본 포스터는 상기 알고리즘을 통해 생성된 Olson flow-block diagram에 대한 정밀한 분석을 통해 알고리즘의 운용 능력과 효율성을 입증하며, 특히 실험적인 측면에서 타이타늄 합금 설계의 효율성과 정밀도를 향상시키는 응용 효과를 강조한다.

[P30-11]

7xxx계 알루미늄 합금의 강도 예측을 위한 문헌 기반 Descriptor 탐색: 석왕록, 최윤석*(부산대학교), 김수현, 천현석(한국재료연구원)

Keywords: 7xxx 알루미늄 합금, 검색 증강 생성, 물리 기반 Descriptor, 머신러닝, 인장강도 예측, 설명 가능한 인공지능

알루미늄 합금은 우수한 비강도와 내부식성을 바탕으로 항공우주 및 수송 산업의 경량 구조재로 널리 사용되고 있다. 특히 7xxx계 알루미늄 합금은 석출 강화와 열처리를 통해 높은 강도를 확보할 수 있지만, 조성 및 공정 조건과 인장 특성 사이의 복잡한 비선형 관계를 개별 입력 변수만으로 충분히 표현하는 데에는 한계가 있다. 본 연구에서 RAG(Retrieval-Augmented Generation)을 활용하여 7xxx계 알루미늄 합금의 조성–공정–미세조직–물성 관계에 관한 문헌 근거를 검색하고, 이를 머신러닝에 적용할 수 있는 물리 기반 descriptor로 변환하는 방법론을 구축하고자 한다. 검색된 재료공학적 관계와 적용 조건을 기반으로 학습 데이터에서 계산 가능한 descriptor 후보로 변환한다. 생성된 후보는 재료공학적 타당성과 통계적 유효성을 검토한 후 인장강도 예측 모델에 적용하며, 조성 기반 그룹 분할과 반복 평가를 통해 기준 모델 대비 예측 성능과 안정성을 분석할 예정이다. 이를 통해 RAG가 문헌에 보고된 물리적 관계를 추적 가능한 descriptor로 구체화하고, 합금의 강도 예측과 재료학적 해석을 지원하는 도구로 활용될 가능성을 평가하고자 한다.

[P30-12]

데이터 및 인공지능 모델을 활용한 CrMnFeCoNi 고엔트로피 형상기억합금 설계: 임진수랑, 이제인*(부산대학교), 신동원*(Oak Ridge National Laboratory)

Keywords: High-entropy alloy, Shape memory alloy, Machine learning, Artificial Intelligence

최근 Ni이 적은 CrMnFeCoNi 합금에서 형상기억특성이 보고되면서 차세대 형상기억합금으로 주목받고 있다. 그러나 조성 공간이 매우 넓은 고엔트로피 합금계에서 형상기억합금 조성역에 대한 이해는 제한적인데, 이는 실험적으로 조성을 일일이 탐색하는 데 많은 비용과 시간이 요구되기 때문이다. 이에 본 연구에서는 데이터 및 인공지능 기반 설계 방법론을 개발하여 CrMnFeCoNi 조성 공간을 빠르게 탐색하고, 회복특성이 우수한 신합금 조성을 개발하고자 한다. 본 연구에서는 자체 구축한 155개 형상기억합금의 열기계 분석(TMA) 가열·냉각 거동 데이터를 활용하여 기계학습모델을 학습하였다. 이후, 학습된 모델로 미지의 조성의 가열·냉각 거동 곡선을 예측함으로써 형상기억특성 값을 도출하였다. 이러한 곡선 기반 예측 모델은 동일한 합금 데이터로 형상기억특성 값을 직접 예측하도록 학습한 모델보다 높은 예측 정확도를 나타냈으며, 제한된 수의 합금 데이터로도 형상기억특성을 효과적으로 예측할 수 있음을 확인했다. 이후 개발한 기계학습모델을 이용하여 가상의 합금 조성의 형상기억특성값을 예측하고, 이를 바탕으로 고성능 후보 조성 영역을 선정하였다. 선정된 후보 고성능 합금의 검증 실험을 진행한 결과, 우수한 형상기억특성이 확인되어 본 방법의 유효성을 검증하였다. 본 데이터 및 인공지능 기번 설계 방법론은 CrMnFeCoNi 고엔트로피 합금뿐만 아니라, 다른 다성분계 형상기억합금에도 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

[P30-13]

Multimodal Feature Fusion for Robust Molecular Property Prediction: Jimin Han, Jeong Woo Han*(Seoul National University)

Keywords: Molecular Property Prediction, Multimodal Fusion

Accurate molecular property prediction is central to the discovery of functional molecules and materials such as liquid organic hydrogen carriers. Because molecular properties originate from multiple levels of chemical information, any single representation gives an incomplete description of structure–property relationships: SMILES strings capture sequential chemical patterns, graphs encode atom connectivity and local environments, images describe global two-dimensional arrangements, and conformers provide three-dimensional geometry. The accuracy of each representation is therefore limited and property-dependent, and for bulk or phase-dependent properties none of them describes molecular packing, pairwise contacts, or local bonding networks. We propose a flexible multimodal representation fusion framework that integrates these heterogeneous features within a unified latent space. Each modality — text, image, graph, conformer geometry, and optional interaction-aware features — is encoded separately, projected into a shared feature space, and combined through learnable fusion weights, allowing the fused representation to adaptively emphasize informative modalities for a given target while down-weighting redundant ones. We evaluate the framework across solution-phase, thermodynamic, transport-related, and bulk property tasks, comparing against single-modality baselines and analyzing modality combinations and per-modality contributions to determine which features are informative for which property regimes. Rather than benchmark scores alone, the analysis clarifies when multimodal fusion provides genuinely complementary signal and when it does not.

[P30-14]

협동로봇 기반 능동형 AI 자동화 재료시험 공정개발: 오동현*, 박근혁*, 문종훈*, 안치영*(한국화학융합시험연구원), 이종훈*(테스코(주))

Keywords: 인공지능(AI), 협동로봇, 인장시험, 객체인식, 시험 자동화, 스마트 재료시험

최근 제조업의 디지털 전환과 인공지능(AI) 기술의 발전에 따라 재료시험 분야에서도 시험의 자동화 및 지능화에 대한 요구가 증가하고 있다. 그러나 기존 자동화 인장시험 시스템은 동일 형상의 시험편을 반복적으로 시험하는 수준에 머물러 있어 KS, ASTM 및 ISO 등 국내외 표준에 따른 다양한 형상의 인장시험편을 자동으로 인식하고 시험조건을 설정하는 데 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 협동로봇과 AI 비전인식 기술을 적용한 자율형 인장시험 시스템을 개발하고자 하였다. YOLOv8 기반 객체인식 알고리즘을 이용하여 다양한 형상의 인장시험편을 자동으로 인식하고 형상 분류 및 주요 치수 측정이 가능하도록 구현하고자 하였고, 동일한 AI 객체인식 기법을 인장시험 응력–변형률 그래프에 적용하여 항복강도(Yield Strength)와 항복점(Yield Point)을 자동으로 인식·판정할 수 있는 AI 분석 모델을 개발하였다. 또한 다양한 규격의 인장시험편을 안정적으로 인식하고 자동 분석할 수 있음을 확인하였다. 향후 개발된 AI 기반 자동화 인장시험 시스템은 KTR 시험환경(Test-bed)에서 실증을 수행하여 시험편 장입, 시험 수행 및 결과 분석의 신뢰성과 안전성을 종합적으로 검증할 예정이다. 본 연구는 재료시험의 전 과정을 자율화할 수 있는 AI 기반 스마트 재료시험 시스템 구현을 위한 기반기술을 제시하며, 향후 무인 시험실 구축 및 재료시험의 디지털 전환에 기여할 것으로 기대된다 이 연구는 2024년 정부(중소벤처기업부)의 재원으로 중소기업기술정보진흥원의 지원을 받아 수행한 연구개발 내용입니다. (과제번호 : RS-2024-00488136, 협동로봇 기반 능동형 AI 자동화 재료시험 공정 개발)

[P30-15]

Property-Guided Generative Design of Liquid Organic Hydrogen Carriers: Seoyeon Kim, Jeong Woo Han*(Seoul National Univ.)

Keywords: LOHC, Generative models, screening

Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs) enable hydrogen storage under ambient conditions, but candidate discovery is constrained by conflicting requirements: the dehydrogenation enthalpy must be low enough for mild release yet high enough for stability, while gravimetric capacity, liquid-phase window, and synthetic accessibility must be met simultaneously. Exploration has consequently remained largely limited to derivatives of a few known carriers. Here we report a generative workflow for de novo LOHC design. Two generative models - a conditional variational autoencoder developed in this work and REINVENT 4 - were used in parallel as complementary sources of chemical diversity, each conditioned on multiple target properties and subject to chemistry-informed structural constraints reflecting the reversible hydrogenation requirement. Generated molecules were evaluated using Uni-Mol property predictors and narrowed through a multi-stage screening funnel combining physicochemical filters with Pareto selection over competing objectives. The workflow yielded 78 candidate pairs, 63 of which passed the subsequent screening process. The predicted properties are more favorable than those of commercially deployed LOHCs, providing concrete starting points for experimental evaluation of next-generation hydrogen storage systems.

[P30-16]

합금 조성 및 열간변형 조건에 따른 Al–Mg 합금 응력–변형률 곡선 예측을 위한 2단계 인공지능 모델 설계: 전준협*(한국생산기술연구원)

Keywords: Al–Mg alloy, hot deformation, stress–strain curve, flow stress, machine learning, Zener–Hollomon parameter

Al–Mg계 합금의 열간가공 공정 설계에는 변형온도와 변형률속도에 따른 응력–변형률 곡선이 기초 자료로 요구되나, 곡선 확보에는 조건별 열간압축 시험이 필수적이어서 시험 물량과 비용이 제약으로 작용한다. 본 연구에서는 기확보된 열간변형 데이터베이스를 학습 자료로 활용하여, 합금 조성과 변형조건을 입력하면 응력–변형률 곡선을 예측하는 인공지능 모델의 구조를 설계하고 그 타당성을 검토하였다. 학습 자료는 Mg 함량 6, 8, 8.5 wt%의 Al–Mg 합금 균질화 빌렛을 대상으로 변형온도 300–450 °C 및 변형률속도 0.001–1 s^{-1}에서 진변형률 0.9까지 압축시험을 수행한 총 48조건의 유동곡선이다. 각 곡선은 마찰발열에 의한 온도상승 보정과 평활화를 거쳐 변형률 0.001–0.900 구간에서 900점으로 균일화하였으며, 총 43, 200개의 응력 데이터점으로 구성된다. 모델 설계에 앞서 Mg 함량·변형온도·변형률속도에 따른 최대응력, 피크변형률 및 연화 거동의 변화를 정량 분석하여 입력 인자 구성의 근거를 확보하였다. 제안하는 모델은 2단계 구조를 갖는다. 1단계에서는 합금 조성과 변형조건으로부터 곡선의 대표 특성값인 항복응력, 최대응력 및 피크변형률을 예측하고, 2단계에서는 1단계의 예측값을 조성·변형조건과 함께 입력으로 받아 변형률에 따른 응력을 산출함으로써 곡선 전체를 재구성한다. 곡선을 직접 회귀하는 단일 구조와 달리, 곡선의 형상을 지배하는 특성값을 중간 표현으로 명시함으로써 예측 곡선이 물리적으로 타당한 응력 수준과 가공경화–연화 거동을 유지하도록 제약하고, 학습 자료가 제한적인 조건에서도 안정적인 일반화가 가능하도록 하였다. 물리 정보로서 Zener–Hollomon 파라미터 $Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp(Q/RT)$를 파생 입력 변수로 부가하였다. 활성화에너지 Q는 hyperbolic-sine 구성방정식으로부터 산출한 Mg 함량별 값(약 134–148 kJ/mol)을 적용하였으며, 이를 통해 온도와 변형률속도의 결합 효과를 단일 변수로 압축하여 표현하였다. 모델 검증은 구성방정식 기반 예측치를 기준선으로 설정하여 gradient boosting 및 다층퍼셉트론(MLP) 모델과 비교하고, 학습에 사용되지 않은 변형조건에 대한 외삽 성능을 평가하기 위해 조건 단위 leave-one-out 교차검증을 적용하는 체계로 구성하였다. 아울러 입력 인자별 기여도 분석을 통해 유동응력에 대한 변형온도, 변형률속도 및 Mg 함량의 상대적 영향도를 정량화하고자 하였다.

[P30-17]

Beyond Model-Centric Discovery: An Evidence-Mapped Landscape of Machine-Learning-Driven Materials Design from Screening to Validated Closed Loops: Youngho Sihn*, Min Ku Jeon, Sung Wook Kim, Chan Woo Park, Sungjune Sohn, Bum Kyoung Seo(Korea Atomic Energy Research Institute)

Keywords: Machine-learning-driven materials design, Inverse design, Generative models, Closed-loop discovery, Validation-aware benchmarking

Machine learning (ML) is reshaping materials design by extending property prediction into inverse design, candidate generation, and feedback-guided experimentation. The practical significance of reported advances, however, remains difficult to compare because basic structural and chemical validity, surrogate-predicted stability, density functional theory calculations, experimental confirmation, and closed-loop discovery are often presented as though they constituted equivalent levels of evidence. This technical landscape assessment examines how these approaches are being integrated across inorganic crystals, polymers and soft materials, biomolecular and peptide systems, alloys and mechanical metamaterials, and energy materials. The field is evaluated through a five-layer workflow comprising material representation, model or evaluator, search or proposal generation, validation, and data or policy update. A corresponding validation ladder distinguishes rule-based screening, database or surrogate assessment, physics-based computation, experimental confirmation, and feedback-driven experimental iteration. This separation makes it possible to compare technologies without equating benchmark performance with material discovery or deployment readiness. Three cross-cutting shifts characterize the current landscape. First, material representation has become a primary design variable: invariance, symmetry, formulation, processing conditions, and other domain constraints directly shape both candidate quality and downstream validation cost. Second, generative architectures do not form a universal performance hierarchy. Their practical value depends on conditioning strategy, search budget, evaluator provenance, and compatibility with domain-specific physical and experimental tests. Third, validation is moving upstream from post hoc filtering toward constraint-aware generation, uncertainty-guided selection, and sequential decision making. Nevertheless, reported discovery funnels continue to show substantial attrition between formally valid or surrogate-favorable candidates and materials that are computationally stable, experimentally synthesized, and confirmed to possess the target property. Experimental feedback loops have been demonstrated in several application domains, but many systems remain one-way proposal-validation pipelines. Evidence for long-term durability, safety, manufacturability, scale-up, and deployment is also limited. Large language and foundation models currently show their clearest value as interfaces, planners, search operators, and evaluators rather than as universally validated material generators. The resulting technology landscape indicates that the principal unit of progress is shifting from the isolated model to the domain-aware design pipeline. Meaningful evaluation should therefore emphasize candidate conversion under an explicit computational or experimental budget, evaluator provenance, out-of-distribution robustness, retention of negative results, and validation cost. These criteria provide a more defensible basis for comparing research maturity and for designing reusable benchmarks, data infrastructure, and application-specific validation testbeds.

[P30-18]

Automated DFT Data Generation for Machine-Learning Prediction of Uranyl–Ligand Formation Constants at pH 8.2: Youngho Sihn*, Sung Wook Kim, Min Ku Jeon, Chan Woo Park, Sungjune Sohn, Bum Kyoung Seo(Korea Atomic Energy Research Institute)

Keywords: Uranium in seawater, Machine learning, Density Functional Theory, Auto-calculation, Label data

Density functional theory (DFT) has traditionally been used to investigate selected molecular structures and reaction mechanisms through expert-driven, case-by-case calculations. Although this approach is effective for interpreting individual systems, it is difficult to scale to the volume, chemical diversity, and methodological consistency required for machine-learning model development. This work aims to establish an automated DFT workflow for generating training data to predict uranyl–ligand formation constants (log K) under aqueous conditions at pH 8.2. Predicting uranyl complexation requires more than calculating a single optimized structure for each ligand. Protonation states, tautomers, conformers, coordination modes, hydration structures, and solution-phase thermodynamics can all influence the resulting formation constant. The proposed workflow therefore begins with systematic exploration of chemically relevant ligand states and candidate uranyl–ligand structures. These candidates are processed through standardized geometry generation, quantum-chemical optimization, electronic-energy evaluation, thermochemical correction, and ensemble-based free-energy analysis. The calculated free energies are then assembled into pH-dependent binding thermodynamics and corresponding log K values using consistent reference states and reaction definitions. Automation is combined with quality control and complete calculation history. Intermediate molecular structures, energies, computational conditions, and calculation outcomes are retained throughout the workflow. Molecular identity and charge, structural consistency, computational method, and successful completion of each calculation stage are checked before a result is included in the final dataset. Unsuccessful or incomplete calculations are recorded rather than silently removed, allowing the coverage and limitations of the generated data to be evaluated. This approach reduces manual selection bias and helps ensure that training labels produced for different ligands are chemically and computationally comparable. The workflow is intended to be evaluated using uranyl-binding ligands with available experimental or literature-derived formation constants. Comparison between calculated and reference log K values will be used to assess chemical-space coverage, reproducibility, systematic error, and the suitability of the resulting dataset for machine learning. Once validated, the framework can be extended to a broader ligand space to support predictive models for uranyl complexation under environmentally relevant aqueous conditions. By shifting human effort from preparing individual calculations to defining chemical scope, computational protocols, and validation criteria, this framework connects mechanistic quantum chemistry with scalable data generation. It provides a foundation for constructing reproducible DFT-derived datasets for machine-learning prediction of uranyl–ligand thermodynamics at pH 8.2.

[P30-19]

CatEdit: A Generative Editing Framework for Efficient Dopant Screening in Heterogeneous Catalysts: Igon Kim, Jeong woo Han*(Seoul National Univ.)

Keywords: Generative Editing, Dopant screening, Heterogeneous catalysis, Active site configuration

Generative models have recently attracted growing attention in materials science and catalysis for discovering novel materials with desired properties. In particular, property-conditioned generative models enable the design of materials tailored to specific physicochemical targets. However, structures generated de novo over the entire chemical space often lie far from the families of catalysts that are actually used or considered; consequently, the accumulated experimental and computational knowledge about those systems no longer transfers to them. Instead, designing by shifting a target property only slightly from a known reference keeps the resulting candidates within the neighborhood of established material families, where such prior knowledge remains applicable. Building on this idea, we propose CatEdit, a framework that combines the exploratory diversity of data-driven generative models with conventional dopant-screening strategies, anchored to a reference catalyst and a target property shift rather than to a fixed structural template. CatEdit explores a combinatorial space of approximately 3×10^6 co-doping configurations for each host slab without exhaustive enumeration. By adapting generative editing strategies developed for image generation to CatFlow, a flow-matching generative model trained on OC20, CatEdit modifies existing catalyst structures while preserving their parent lattice and proposes previously unexplored active-site motifs that tune adsorption energetics. We applied CatEdit to dopant screening of transition-metal catalysts for the oxygen reduction reaction (ORR) and hydrogen evolution reaction (HER), targeting OC20-convention adsorption energies. For Ni(111), reaching the O* target requires weakening the adsorption by approximately 1.56 eV relative to the pristine surface, a shift that random substitutional screening of the same search space failed to reach under an identical evaluation protocol. In contrast, about 10% of CatEdit-generated candidates simultaneously fall within 0.1 eV of the target as predicted by the surrogate model and correspond to active-site motifs absent from the OC20 training set. These results highlight CatEdit as a practical generative framework for dopant screening and, more broadly, for precise structural and elemental editing toward targeted catalytic and materials properties.

P31 : 마그네슘
Room 1층 전시홀, 10월 30일

[P31-1]
급속냉각에 따른 생분해성 마그네슘 합금 미세튜브의 기계적 물성과 부식 거동의 변화: 이민서, 황건호(한국재료연구원, 고려대학교), 임창동, 이상은, 김하식(한국재료연구원), 김세호(고려대학교), 서종식*(한국재료연구원)
Keywords: 생분해성 마그네슘 합금, 미세튜브, 급속냉각, 기계적 물성, 부식 거동
혈관질환 치료에 널리 사용되는 금속 스텐트는 시술 후 장기간 체내에 잔존하여 만성 염증 및 혈전 형성 등의 부작용을 유발할 수 있다. 이에 일정 기간 기계적 지지 기능을 수행한 뒤 체내에서 자연스럽게 분해되는 생분해성 소재가 차세대 생체 삽입형 의료기기의 핵심 기술로 주목받고 있다. 마그네슘 합금은 우수한 생체적합성과 생분해성을 지니고 있으나, 과도한 부식 속도와 부족한 기계적 강도로 인해 실제 적용에는 한계가 있다. 본 연구에서는 Mg-Zn-Mn-Sr계 합금을 2단 압출 공정을 통해 생체분해성 스텐트의 전구체인 미세튜브를 제조하였으며, 압출 과정에서 급속냉각을 적용하였다. 급속냉각 적용 여부에 따른 기계적 특성과 부식 거동의 차이를 비교하고, 이를 미세조직 및 집합조직의 변화와 연계하여 급속냉각 공정이 미세튜브의 특성에 미치는 영향을 규명하였다.

[P31-2]
Interfacial microstructure and mechanical properties of pure Mg/AZ91 composites fabricated by segmented-billet co-extrusion: EunHye Kim, SeoungYoun Yu, Sung Hyuk Park*(Kyungpook Univ.)
Keywords: Mg–Mg composite; Segmented billet; Co-extrusion; Interfacial microstructure; Mechanical properties
Mg alloys are attractive candidates for lightweight structural applications owing to their low density and high specific strength. However, achieving a desirable balance between strength and ductility within a single Mg alloy remains challenging. The integration of ductile pure Mg and high-strength AZ91 within a single extrudate offers a promising approach for tailoring the overall mechanical properties through controlled structural heterogeneity. In such heterogeneous Mg-based composites, the formation and integrity of the interfaces between the constituent materials are critical to load transfer and mechanical stability. In this study, pure Mg and AZ91 billets were longitudinally divided into eight 45 ^{o} sector-shaped segments, and four segments of each material were alternately assembled to form a segmented billet. The assembled billet was subsequently co-extruded to fabricate a pure Mg/AZ91 composite with alternating pure Mg and AZ91 regions. The microstructural characteristics of the extruded composite were examined, focusing on interfacial morphology, grain structure, recrystallization behavior, and crystallographic texture. Uniaxial tensile and compression tests were conducted along the extrusion direction, and the mechanical properties were compared with those of separately extruded pure Mg and AZ91. The relationships among the initial billet configuration, interfacial microstructure, and deformation behavior were analyzed to clarify the role of constituent arrangement and interfacial integrity in governing the composite properties.

[P31-3]
Mg-Al 합금의 부식 거동에 미치는 Zn 첨가의 영향: 김명주, 박주희, 유봉선, 배준호, 김재연*(한국재료연구원)
Keywords: 마그네슘 합금, 부식 거동, 미세조직, 내식성
AM60 및 AZ61 마그네슘 합금은 주로 α-Mg 기지와 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 상으로 구성된다. 이들 합금의 부식은 α-Mg 기지와 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 상 사이에서 형성되는 미소 갈바닉 부식에 의해 개시되며, 부식 속도는 두 상 사이의 전위차와 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 상의 크기 및 분포에 따라 달라진다. 일반적으로 Zn은 마그네슘 합금의 고용강화를 위해 첨가되며, 표면 피막의 안정성을 향상시켜 내식성 개선에 기여하는 원소로 알려져 있다. 그러나 이러한 효과가 충분히 발현되기 위해서는 Zn이 α-Mg 기지에 고용되어야 한다. 주조용 AZ61 합금에서는 Zn이 주로 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 상에 분배될 수 있으므로, Zn 첨가에 따른 피막 안정화 및 내식성 향상 효과가 제한될 가능성이 있다. 이에 본 연구에서는 주조용 Mg-Al 합금의 미세조직과 부식 거동에 미치는 Zn 첨가의 영향을 명확하게 규명하고자 하였다. 합금의 부식 속도는 침지 후 무게감소시험을 통해 평가하였으며, 동전위 분극시험과 전기화학 임피던스 분광법을 이용하여 전기화학적 부식 특성을 분석하였다. 또한, 주사전자현미경과 에너지 분산형 X선 분광분석을 이용하여 미세조직을 관찰하고, α-Mg 기지와 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 상의 원소 조성 및 Zn의 분배 거동을 분석하였다.

[P31-4]
열처리 방식에 따른 Mg-Al-Ca 합금의 미세조직 및 열전도 특성 변화: 권용준, 이태경*(부산대학교 기계공학부)
Keywords: 마그네슘 합금, 열처리, 미세조직, 열전도
마그네슘 합금은 낮은 밀도와 높은 비강도를 가지는 대표적인 경량 금속재료로서, 자동차, 항공우주 및 전자산업 등 다양한 분야에서 매력적인 소재로 주목받고 있다. 그러나, 일반적인 마그네슘 합금은 낮은 열전도도와 높은 화학적 반응성으로 인해 고온 및 열관리가 요구되는 환경에서의 적용에 한계가 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해 Al과 Ca를 첨가한 Mg-Al-Ca 합금에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, Mg-Al-Ca 합금은 열처리를 통해 α-Mg 기지 내부에 C15(Al_2Ca) 상이 석출되면서 기지 내 Al 고용 농도가 감소하고, 이에 따라 열전도 특성이 향상될 수 있는 것으로 알려져 있다. furnace heat treatment(FHT)는 이러한 미세조직 변화를 유도할 수 있으나, 비교적 긴 처리 시간이 요구된다. 반면, electropulsing treatment(EPT)를 통한 열처리는 금속에 직접 전류를

가함으로써, 줄 가열 효과 (Joule heating effect)를 활용한 효율적이고 빠른 열처리가 가능하다. 본 연구에서는 Mg-Al-Ca 합금에 EPT와 FHT를 각각 적용하여 열처리 방식에 따른 미세조직과 열전도 특성의 변화를 비교하고, Mg-Al-Ca 합금에 대한 EPT의 단시간 열처리 적용 가능성에 대해 고찰하고자 한다.

[P31-5]

Fabrication and Hydrogen Storage Properties of Porous Mg-Ni Alloys by Space-Holder-Assisted Infiltration casting: Ye-Rin Jang(Korea Institute of Materials Science, Changwon National Univ.), Do-Hyeon Kim(Korea Institute of Materials Science, Kyungpook National Univ.), Hyun Cho, Eun Seon Cho(Korea Advanced Institute of Science and Technology), Young Min Kim, Byeong-Chan Suh*(Korea Institute of Materials Science)

Keywords: Magnesium alloys, Hydrogen storage alloys, Porous structure, Hydrogen absorption, Hydrogen desorption

Magnesium-based alloys have attracted considerable attention as hydrogen storage materials due to their high hydrogen storage capacity, abundant resources, and relatively low cost. However, their practical application is still limited by sluggish hydrogen absorption/desorption reaction and relatively high operating temperatures. To enhance the hydrogen sorption kinetics, efficient heat transfer and refinement of the material structure are essential, and the development of porous nanostructured Mg alloy is therefore considered a promising approach. In this study, a space-holder-assisted infiltration casting process was employed to fabricate porous nanostructured Mg-Ni hydrogen storage alloys. A preform was prepared using a space holder, followed by infiltration with molten Mg-Ni alloy and subsequent dissolution of space holder to generate a porous structure. The resulting Mg-Ni alloys were characterized in terms of their microstructure and hydrogen storage properties to evaluate the effect of the porous nanostructure on hydrogen sorption behavior.

[P31-6]

생체 삽입형 의료 소재 적용을 위한 마그네슘합금의 전기적 특성 및 부식 거동 평가: 김재인, 아루즈, 원윤정, 임창동*(한국재료연구원)

Keywords: 마그네슘 합금; 스퍼터링 타겟; 전기전도도; 생체분해거동

Mg 합금은 우수한 생체적합성과 생체분해성을 지닌 소재로 뇌심부자극기, 인공심박동기, 인공 와우와 같은 생체 삽입형 의료소자용 소재로 주목받고 있다. 이러한 의료 소자에 적용하기 위해서는 체내 환경에 적합한 생체분해속도 제어와 더불어, 유연하고 복잡한 체내 부위에 부착 가능한 박막 제조 기술이 요구된다. 합금 타겟을 이용하여 박막을 제조하는 기술은 타겟 조성과 거의 동일한 박막을 제조할 수 있고 기판 위치에 관계없이 균일한 조성과 품질을 갖는 박막을 제조할 수 있어 요구특성에 부합하는 조성의 박막을 효율적으로 제조할 수 있다. 합금 타겟을 이용하여 제조된 박막의 제반 물성은 합금 타겟 자체의 제반 물성과 밀접한 상관관계를 가질 것으로 예측되나 합금 타겟의 물성과 박막의 물성 사이의 정량적 관계에 대한 규명은 거의 보고되고 있지 않다. 본 연구에서는 Mg-aX계 2원계 합금 타겟의 제반 특성과 Mg-aX계 2원계 합금 타겟을 이용하여 제조한 합금 박막의 제반 특성과의 상관관계를 규명하기 위한 연구의 일환으로 주조 및 압출공정을 통해 제조한 Mg-aX 2원계 합금의 전기전도도와 생체분해거동을 평가하였다. Mg-aX계 2원계 합금의 전기전도도와 생체분해거동은 첨가원소의 종류 및 첨가량, 열처리 유무에 따라 변화하였으며 이러한 변화는 미세조직적 인자의 변화와 밀접한 관계를 나타내었다.

P32 : 나노융합소재
Room 1층 전시홀, 10월 30일

[P32-1]
MXene Converted High-Aspect-Ratio 2D $BiVO_4$ Nanosheets for Photoelectrochemical Water Splitting: Yun Sejin, Kim Beomseon, Kim Jin*(Hanbat National Univ.)
Keywords: 2D BiVO4 Photoanode, Photoelectrochemical Water Splitting, High-Aspect ratio, MXene

In response to the increasingly severe fossil fuel-based energy crisis, the importance of photoelectrochemical (PEC) water-splitting technology, which enables environmentally friendly hydrogen production using solar energy, has been growing. $BiVO_4$ is widely recognized as an efficient and stable photoanode material because it can absorb visible light up to 516 nm and exhibits excellent oxygen evolution reaction (OER) activity, non-toxicity, and high photostability. However, its low charge-carrier mobility and high density of recombination centers cause photogenerated charge carriers to recombine during transport, thereby hindering efficient charge utilization. In this study, high-aspect-ratio two-dimensional (2D) $BiVO_4$ photoanodes were fabricated to address these limitations. V_2CT_x MXene nanosheets were employed as sacrificial templates and dry-mixed with $Bi(NO_3)_3$, followed by simple thermal treatment to produce 2D $BiVO_4$. X-ray diffraction (XRD) and transmission electron microscopy (TEM) confirmed the formation of highly crystalline monoclinic $BiVO_4$ with a 2D morphology. Atomic force microscopy (AFM) revealed $BiVO_4$ flakes with a lateral dimension of approximately 2 μm and a thickness of approximately 6 nm. This 2D $BiVO_4$ structure shortens the transport distance of photogenerated charge carriers, facilitating their migration to the surface. In addition, the large surface area enables light absorption over a broader area, generating more electron–hole pairs and increasing the surface reaction area where holes can participate in the OER. According to linear sweep voltammetry (LSV) measurements, the onset potential shifted in the negative direction from 1.23 V to 1.0 V versus the normal hydrogen electrode (NHE), and the current density at 1.23 V increased from 0.5 mA/cm^2 to 3 mA/cm^2. These results indicate that the same photoelectrochemical reaction can be initiated at a lower externally applied voltage and suggest that charge separation and transfer efficiencies under applied bias were significantly improved. Through this study, we aim to advance renewable energy-based power utilization technologies.

[P32-2]
Decoding Oxide-Dependent Hydrogen Sensing in Pd-Functionalized Nanorod Arrays: Junseok Park, Junho Hwang, HyunSook Lee*, Wooyoung Lee*(Yonsei Univ.)
Keywords: Hydrogen gas sensor, Metal oxide semiconductor, Palladium catalyst, Glancing angle deposition

Lithium-ion batteries used in electric mobility systems release characteristic off-gases before and during thermal runaway, which can serve as early indicators of battery failure. Among these gases, hydrogen is particularly important but remains challenging to quantify rapidly and selectively using conventional off-gas analysis techniques because of its weak infrared activity and high diffusivity. Highly sensitive hydrogen sensors are therefore essential for the early detection of thermal runaway and the prevention of catastrophic battery failure. Metal oxide semiconductor (MOS) sensors offer scalable and cost-effective sensing platforms; however, their performance is strongly governed by catalytic interfaces and the intrinsic electronic properties of the sensing materials. In this study, Pd-functionalized SnO_2, In_2O_3, and WO_3 nanorod arrays were systematically compared to elucidate how oxide band structure, surface depletion, and charge-transport characteristics affect hydrogen-sensing performance. The nanorod arrays were fabricated using glancing-angle deposition and functionalized with Pd layers of identical thickness to ensure comparable catalytic conditions. Despite identical Pd functionalization and operating conditions, the three metal oxides exhibited distinct response magnitudes and response kinetics. These findings highlight oxide-dependent charge-transport and surface-reaction mechanisms and provide practical guidelines for selecting and designing high-performance MOS-based hydrogen sensors for the early detection of lithium-ion battery failure.

[P32-3]
Interface Control of ITO Electrodes for Enhanced Electrochromic Performance: Jaeha Cho, Taehoon Ha, Seung Woo Kim, Hyeonbin Choi, Cheon Woo Moon*(Soonchunhyang Univ.)
Keywords: Reversible Metal Electrodeposition, Transparent Conducting Oxide (TCO), Surface Engineering

With the increasing demand for energy-efficient and optically tunable devices, electrochromic systems have attracted considerable attention for smart windows and transparent optical applications. Their optical states can be reversibly controlled by electrochemical reactions under applied potential, resulting in changes in transmittance or reflectance. Among various electrochromic approaches, electrodeposition-based systems can provide a wide optical modulation range with relatively simple device structures and low operating voltages. However, their performance is highly dependent on the interfacial reactions between the electrode and electrolyte. Because charge transfer and nucleation occur at the electrode-electrolyte interface, the surface properties of the electrode play an important role in determining the electrochemical response. Indium tin Oxide (ITO) is widely used as an electrode in electrochromic devices because it

provides both optical transparency and electrical conductivity. In addition to these basic properties, the surface and interfacial properties of ITO can significantly influence charge transfer and the formation of deposited species at the electrode surface. Therefore, control of the ITO surface is important for achieving uniform and efficient electrodeposition in electrochromic systems. In this study, the surface of ITO electrodes was modified using surface treatment approaches to control surface chemistry and interfacial charge-transfer characteristics. The resulting changes in interfacial electrochemical and deposition behavior were evaluated through spectroelectrochemical analysis. The modified electrodes exhibited improved deposition characteristics and charge utilization compared with bare ITO, demonstrating the importance of surface control in regulating interfacial electrochemical reactions. These results suggest that the surface properties of ITO electrodes significantly influence interfacial charge transfer and electrodeposition. Furthermore, this surface-control approach could be extended to other transparent conducting oxide (TCO) electrodes for improving the electrochemical performance of electrodeposition-based electrochromic systems.

[P32-4]

Passive Cooling-Based Wearable Platform for Real-Time Monitoring of Biofluid Flow: Minwoo Park, Youngjun Kim, Minsu Park*(Dankook Univ.)

Keywords: monitoring of biofluid flow, Calorimetric sensing, Evaporative cooling, Thermo-responsive optical materials, Wearable sensors

Continuous monitoring of biofluid flow provides valuable physiological information relevant to health assessment. Skin-mounted calorimetric flow sensors are particularly attractive for wearable platforms owing to their capabilities of continuously detecting both flow magnitude and direction via on-skin flow-induced thermal anisotropy. Recent studies have improved the energy efficiency of calorimetric sensing by replacing power-consuming electrical heaters with passive cooling and employing thermo-responsive optical materials, such as thermochromic liquid crystals, for direct visual readout [1]. However, the limited thermal modulation generated by existing passive cooling approaches restricts optical contrast and flow sensitivity. Here, we aim to enhance passive cooling performance to further improve optical flow sensitivity through colorimetric or luminescent responses. An evaporative cooling architecture integrates a hydrogel with a wicking layer to ensure continuous water transport to the evaporation interface [2, 3]. Hydrogel thickness, water content, wicking configuration, and evaporation surface area will be systematically examined to increase the evaporation rate, and prolong cooling duration. Enhanced evaporative cooling is expected to generate a larger temperature difference between the upstream and downstream region under fluid flow, yielding higher optical contrast and improved flow sensitivity. Ultimately, this study aims to advance on-skin calorimetric flow sensing capabilities toward a wearable platform capable of continuous and highly sensitive monitoring of biofluid flow. Reference [1] M. Park et al., Biosens. Bioelectron. 278, 117349 (2025). [2] R. Li et al., Adv. Mater. 36, 2209460 (2024). [3] X. Zhang et al., ACS Nano 16, 2188–2197 (2022).

[P32-5]

Phase-Separation-Engineered Conductive Photoresist for High-Resolution Micro-LED Interconnection: Se Hoon Jung, Tae Won Nam*(Pusan National Univ.)

Keywords: Conductive Photoresist, Phase Separation, Metal Infiltration, Photolithography, Micro-LED

Micro-LED displays have attracted significant attention as next-generation display technologies due to their high brightness, long lifetime, and capability for ultra-high-resolution integration. However, the transfer process, which requires the precise alignment and electrical interconnection of millions of micro-LED chips onto a substrate, remains a critical technical challenge. In this study, we propose a conductive photoresist (PR) structure that enables selective vertical electrical conduction while maintaining the intrinsic patterning capability of PR. A micro phase-separated structure was induced within the PR layer by introducing a nonpolar nonsolvent into the PR solution, and conductive pathways were subsequently formed along the phase-separation boundaries through metal deposition. Unlike conventional conductive PR approaches based on conductive filler incorporation, the proposed structure forms conductive pathways through phase separation within the PR matrix. This approach suggests a new design strategy for conductive adhesive materials for ultra-high-resolution micro-LED transfer processes.

[P32-6]

Wearable Muscle Platfrom for Interactive Soft Robotic Systems: ByungHee Kim, ByeongJun Kim, InHo Kim*(Sungkyunkwan University)

Keywords: Liquid Crystal Elastomers, Artificial Muscles, Soft Robotics, Multimodal Sensing, Human–Machine Interfaces

Soft robotic systems aim to achieve adaptive behaviors through the integration of compliant actuation, sensing, and control. However, these functions are often implemented separately, limiting compact integration and real-time human–robot interaction. Here, we present a beetle-inspired soft robotic system enabled by a wearable muscle platform integrating locomotion, manipulation, sensing, and user-guided control. Electrothermally actuated liquid crystal elastomer (LCE) muscles are embedded in modular legs and a mandible-inspired soft gripper, with a flexible circuit enabling independent actuation. The LCE muscles exhibit approximately 45% reversible contraction at 3 V, supporting beetle-scale locomotion and directional turning through sequential activation of antagonistic muscle groups. The soft

gripper combines LCE actuation with capacitive pressure sensing for object manipulation and tactile feedback. A wearable strain-sensing finger patch provides gesture-based wireless control, while onboard vision and pressure sensors provide real-time feedback through a closed-loop interface. This integrated platform demonstrates coordinated navigation, gripping, and bidirectional human–robot interaction, providing a promising framework for multifunctional interactive soft robotic systems.

[P32-7]

In-situ Observation of Gate-Driven Structural Dynamics in Twisted Double Bilayer Graphene: Jaewoo Shim, Byunghyun Kim(Seoul National Univ.), Saea Kim(Sogang Univ.), Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi(National Institute for Materials Science), Sang Mo Yang(Sogang Univ.), Hyobin Yoo*(Seoul National Univ.)

Keywords: Tetralayer Graphene, Ferroic Responses, In-situ TEM, Gate-Driven Structural Dynamics

Recent studies have reported unconventional ferroic responses in dual-gated tetralayer graphene, including resistance hysteresis associated with ferroelectricity and abrupt resistance changes accompanying the emergence of a ferromagnetic phase. However, the microscopic origin of these responses remains unclear, as the structural configurations underlying the observed ferroic behavior have not been directly identified. To understand the structural dynamics of this system, we fabricated dual-gated twisted double bilayer graphene (TDBG) devices. Using dark-field transmission electron microscopy (DF-TEM), we directly resolved the stacking-domain configuration of the tetralayer graphene channel. We found that all three different stacking configurations of tetralayer graphene (Bernal, rhombohedral, and mixed stacking) can coexist within a reconstructed moiré lattice. In both 0 ^{o} and 180 ^{o} TDBG devices, most of the channel was composed of alternating Bernal/rhombohedral domains. Small regions of alternating mixed stacking were occasionally found between these domains, appearing as stacking faults bounded by pairs of intrinsic domain walls. We further tracked the evolution of individual domains and domain walls and constructed a gate-dependent structural map across the dual-gate parameter space using in situ TEM. These results establish a structural framework for interpreting unconventional ferroelectric and ferromagnetic responses in tetralayer graphene by correlating gate-induced structural changes to transport signatures.

[P32-8]

Liquid Crystal Elastomer based Composite for Self-Sensing Artificial Muslce Fibers: BYEONGJUN KIM, BYUNGHEE KIM, INHO KIM*(Sungkyunkwan University)

Keywords: Artificial Muscle, Liquid Crystal Elastomer, Graphene, Reversible Percolation, Self-Sensing

Artificial muscles are key to next-generation robotics that emulate the flexible and complex motions of living organisms. For real-world use, they must achieve a balance of high strain, stress, energy density, and mechanical durability. We present muscle-inspired actuator fibers and bundles that deliver strong, reversible contraction. These systems leverage exfoliated graphene fillers embedded in a uniaxially aligned liquid crystalline matrix to enable fast, photothermal actuation with high work capacity. Notably, thermally driven structural transitions induce reversible graphene percolation, generating contraction-dependent changes in electrical resistance. These changes allow real-time electrical monitoring of actuation through an external readout system without the need for a separate strain sensor. This dynamic network also enhances mechanical strength, especially during contraction, supporting stable, muscle-like performance. Compliant fiber design allows easy bundling and integration into diverse soft robotic systems. By combining high-power, wireless actuation with intrinsic self-sensing, the resulting actuator system can serve as an integrated actuation–sensing platform while reducing the need to integrate separate sensors.

[P32-9]

SAC405 솔더 빌렛에서의 조성 불균일이 기계적 특성에 미치는 영향: 이나경, 이동윤*(부산대학교), 천명호(덕산하이메)

Keywords: SAC405 솔더, 나노인덴테이션, EBSD, 조성 편석, Berkovich, Cube Corner

Sn-Ag-Cu(SAC)계 무연솔더는 응고 과정에서 냉각속도 차이에 따른 성분 편석이 발생하며, 이는 솔더 빌렛 내 위치별로 상이한 기계적 물성을 야기할 수 있다. 본 연구에서는 SAC405 솔더 빌렛의 상부, 중심부, 하부 위치별로 시편을 측정하여 조성 불균일이 미세구조 및 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. OM, SEM 및 EDS 관찰 결과, 주조틀 벽면에 가까운 부분에서는 미세한 조직이, 중심부로 갈수록 수지상 및 등축정 조직이 발달하였으며, 위치별로 Ag, Cu 함량에 미세한 편차가 존재함을 확인하였다. EBSD 분석 결과, 상하부는 조대한 결정립이 넓게 분포하는 반면, 중심부에서는 결정립계가 훨씬 조밀하게 발달하고 결정립 크기 분포가 다양화되는 양상을 보였다. 또한, 중심부에서 Ag_3Sn 및 Cu_6Sn_5 분율이 상대적으로 높게 나타났다. 중심부와 하부에서는 결정립 내부에 국부 변형 흔적이 관찰되어 위치에 따라 결정립계 특성 및 잔류 변형 상태가 상이함을 확인하였다. 나노인덴테이션 측정 결과, Berkovich 및 Cube Corner 압입자 모두에서 탄성계수는 상부에서 하부로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. 경도는 Berkovich 압입자에서는 위치별 편차가 크지 않았던 반면, Cube Corner 압흔자에서는 상부에서 뚜렷이 높은 값을 보이다 하부로 갈수록 감소하여 압입자 형상에 따라 위치별 국부 물성 차이의 검출 민감도가 다르게 나타남을 확인하였다. 이러한 경향은 결정립 크기 효과보다는 국부 IMC 분포 및 잔류 변형 상태와 더 밀접하게 연관되어 있을 가능성을 시사한다. 본 연구 결과는 솔더 빌렛 내 위치에 따른 조성 불균일이 국부 기계적 물성 편차로 이어질 수 있음을 보여주며, 압입자 형상에 따라 이러한 편차의 검출 민감도가 달라질 수 있음을 시사한다.

[P32-10]

Aggregation-Dependent Photoluminescence in Size-Fractionated Graphene Quantum Dots: Donghyun Oh, Taesik Eom, Jina Suh, Yeseul Lim, Minsu Park*(단국대학교)

Keywords: Graphene quantum dots, photoluminescence, aggregation-caused quenching, size dependence

Graphene quantum dots (GQDs), a new class of graphene-based emitters, have emerged as promising alternatives to toxic heavy metal-containing inorganic QDs owing to their low toxicity, cost-effectiveness, and uniquely tunable emission properties. Despite these advantages, GQDs commonly suffer from aggregation-caused quenching (ACQ), where reduced inter-GQD distances promote π–π stacking and photon reabsorption, leading to significant changes in their photoluminescence (PL) characteristics [1, 2]. Several studies have reported concentration-dependent PL in GQDs [2, 3], but the aggregation mechanisms associated with GQD lateral size remain insufficiently understood. Here, we systematically investigate the aggregation-dependent PL characteristics of GQDs with average lateral sizes of 2, 5, and 20 nm, respectively, under varying optical densities. The GQDs were fabricated from graphite intercalation compounds (GICs) without the use of strong acids, which minimize generation of defects in the graphene basal plane [4]. It facilitates the analysis of π–π interaction-driven aggregation states of GQDs with increasing concentration. Preliminary results reveal size-dependent differences in the relative contribution of excitation channels within a similar blue-emission region. This study provides a mechanistic basis for understanding size-dependent aggregation quenching and designing concentration-responsive optical QD systems. Reference [1] M. Park, Y. Jeong, H.S. Kim, W. Lee, S.-H. Nam, S. Lee, H. Yoon, J. Kim, S. Yoo, and S. Jeon, Adv. Funct. Mater. 31, 2102741 (2021) [2] Z. Gan, H. Xu, and Y. Fu, J. Phys. Chem. C 120, 29432–29438 (2016) [3] D. Ozyurt, S. Shafqat, T.T. Pakkanen, R.K. Hocking, A. Mouritz, and B. Fox, Carbon 175, 576–584 (2021) [4] H. Yoon, Y.H. Chang, S.H. Song, E.-S. Lee, S.H. Jin, C. Park, J. Lee, B.H. Kim, H.J. Kang, Y.-H. Kim, and S. Jeon, Adv. Mater. 28, 5255–5261 (2016)

[P32-11]

Multilayer Quantum Dot Architectures via Sequential Interfacial Transfer Printing: JeongHun Shin, TaeWon Nam*(Pusan National University)

Keywords: Quantum dots (QD), Multilayer stacking, 3D nanostructure, Immersion transfer printing

The ability to organize Colloidal quantum dots (QDs) into vertically stacked architectures offers opportunities for constructing three-dimensional nanostructures that enable enhanced light–matter interactions and new optical functionalities. However, despite these advantages, achieving controllable multilayer stacking of patterned QD layers while preserving structural integrity remains challenging. Here, we present a strategy for constructing multilayer QD architectures based on a via Sequential Interfacial Transfer Printing approach. This method enables the sequential stacking of patterned QD layers and allows the formation of threedimensional structures while maintaining the structural fidelity of the nanoparticle patterns. After multilayer assembly, an immersion-assisted release step enables the stacked structures to be separated from the template without damaging the patterned layers. This strategy provides a versatile platform for assembling multilayer QD nanostructures and enables the construction of three-dimensional QD architectures through solution-compatible processes. The proposed approach may open new opportunities for advanced photonic and optoelectronic applications based on multilayer quantum dot structures.

[P32-12]

Early Safety Monitoring for Energy Storage Systems via Ultra-Low Methane Detection Using Bi-Layer Catalyst-Functionalized SnO_2 Nanorod Arrays Gas Sensor: Jongbeom Park, Kyung-Ho Park, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee*(Yonsei Univ.)

Keywords: Metal oxide semiconductor, Methane gas sensor, SnO_2 nanorod arrays, Catalysts, Bi-Layer, ESS safety

Energy storage systems (ESS) require reliable early safety monitoring because abnormal battery reactions and thermal failure can release low-concentration methane (CH_4). Among the gases released during battery fault conditions and thermal runaway, methane (CH_4) is considered an important early warning indicator gas. Accordingly, rapid and sensitive methane detection is essential for ESS. Metal oxide semiconductor (MOS) gas sensors are widely used due to their sensitivity and cost efficiency. However, conventional MOS sensors show low response CH_4 because the C–H bond energy of methane (415.5 kJ/mol) makes it difficult to react on the sensing surface. In this study, Pd/Pt bi-layer catalysts with controlled thickness ratios were applied to SnO_2 nanorod array gas sensors to improve methane sensing capability. The bi-layer catalyst structure enhances methane reaction activity and sensing response under low-concentration conditions relevant to battery abnormal reactions. The optimized configuration (Pd:Pt = 4:1) showed a sensor response of ~0.084 at an ultra-low concentration of 0.15 ppm CH_4, and stable operation under varying humidity conditions and repeated sensing cycles. These results indicate that this sensor approach is suitable for early ESS safety monitoring and supports safe operation of energy storage systems.

[P32-13]

Solution-based Transfer Printing of Au Nanoparticles on Quantum Dot Photoconductors for Plasmonic Resonance Enhancement: Minjeong Kim, Taewon Nam*(Pusan National Univ.)

Keywords: Quantum Dot, Au Nanoparticles, Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR), Immersion Transfer Printing

Colloidal quantum dot (QD) photoconductors have emerged as promising candidates for next-generation, low-cost, solution-processed photodetectors due to their tunable bandgap, facile solution processability, and compatibility with large-area, flexible substrates. However, conventional QD photoconductors often suffer from limited light absorption efficiency and modest photoresponsivity, primarily due to the intrinsically low absorption cross-section of QD thin films. To address this limitation, we propose a plasmonically enhanced QD photoconductor architecture in which gold (Au) nanoparticles are integrated directly onto the QD active layer via an immersion transfer printing technique. This solution-based transfer method enables uniform, damage-free deposition of pre-synthesized Au nanoparticle arrays onto the QD surface without disrupting the underlying QD film morphology or introducing thermal/mechanical stress associated with conventional lithographic patterning. The localized surface plasmon resonance (LSPR) generated by the Au nanoparticles is expected to enhance the local electromagnetic field near the QD layer, thereby increasing light absorption and promoting more efficient exciton generation. Devices integrating Au nanoparticles onto the QD photoconductor are currently being fabricated and characterized, with ongoing evaluation of their optical and electrical properties. Quantitative comparisons of photoresponsivity, specific detectivity, and response speed relative to bare QD photoconductors are underway. This work aims to demonstrate that immersion transfer-printed plasmonic nanostructures offer a scalable, low-temperature, and process-compatible strategy for overcoming the intrinsic absorption limitations of solution-processed QD photodetectors, paving the way toward high-performance, flexible optoelectronic applications.

[P32-14]

Battery Breathomics: Hydrogen-Evolution Fingerprinting for Crack Diagnosis in Cylindrical Lithium-Ion Batteries: Kyung-Ho Park, Yeonhong Kim, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee*(Yonsei Univ.)

Keywords: Battery safety, Mechanical crack diagnosis, Hydrogen evolution, Cylindrical lithium-ion batteries, Gas sensor, Machine learning

As cylindrical lithium-ion batteries are increasingly used in electric vehicles (EV), electrically silent mechanical cracks without internal short circuits pose a critical diagnostic challenge for conventional voltage- and temperature-based battery management systems. Here, we present a gas-sensing approach that interprets real-time hydrogen-evolution signals to classify crack and cycling conditions in 5 Ah NCMA 2170 cells. A Pd-decorated SnO_2 nanorod sensor monitored H_2 evolution in an explosion-proof chamber. Three features—magnitude (peak signature, C_{max}), evolution rate (kinetic signature, $C_{max}/\Delta t_{max}$), and detectability (onset signature, $1/\Delta t_{1ppm}$)—were integrated into a 3D feature space. H_2 was detected immediately after crack formation, and the response reflected both gas generation and transport through the leakage pathway, supporting multi-feature diagnosis beyond single-threshold alarms. During cycling, H_2 evolution was stronger during discharge, particularly under rapid cycling, consistent with coupled electrochemical and thermally activated side reactions. After an initial transient stage, the signal stabilized into a repetitive, cycle-synchronized pattern, enabling feature extraction. Three-dimensional mapping separated combined crack/cycling conditions rather than crack geometry alone, because the discharge H_2 signature depended on both crack geometry and cycling protocol. Interpretable machine-learning classifiers and an end-to-end 1D-CNN trained on raw H_2 signals achieved at least 96% leave-one-out accuracy. Because the samples were repeated cycles from a limited number of physical cells, this accuracy reflects condition separability within the tested dataset rather than generalization to unseen cells. The dual-track approach therefore provides a proof of concept for BMS-compatible crack diagnosis requiring validation on independent cells in future studies.

[P32-15]

Dual-Responsive Smart Windows: Integrating Thermochromic VO_2 and Mechanochromic Optical Tunability in SiO_2/VO_2/PDMS Flexible Composites: Suyeon Kim, Dohyeon Ryu, Jin Kim*(국립한밭대학교)

Keywords: Smart windows, Vanadium dioxide (VO_2), SiO_2/VO_2 core-shell, Polydimethylsiloxane(PDMS), Thermochromism, Mechanochromism

The increasing global average temperature caused by climate change, along with the growing energy consumption for building cooling, has highlighted the need for smart window technologies capable of effectively regulating solar radiation and thermal energy. In particular, solar heat gain through windows is a major contributor to building cooling loads, leading to growing interest in materials with tunable optical properties in response to external environmental conditions. Vanadium dioxide (VO_2) exhibits an insulator-to-metal transition at approximately 68 °C and has attracted considerable attention as a representative thermochromic smart window material owing to its ability to autonomously modulate near-infrared (NIR) transmittance in response to temperature changes. However, the thermochromic behavior of VO_2 relies on passive temperature-dependent switching without external electrical input, limiting its active optical controllability. Therefore, additional strategies for actively modulating optical properties are required. In this study, a SiO_2/VO_2 core-shell nanoparticle-based polydimethylsiloxane (PDMS) hybrid film was fabricated to simultaneously achieve the thermochromic properties of VO_2 and mechanically induced optical modulation. The vanadium precursor content relative to the SiO_2 nanoparticles was controlled to investigate the effect of the V/Si ratio on VO_2 formation and optical properties, and the optimal composition was determined based on the resulting transmittance characteristics. The crystal structure and morphology of the synthesized VO_2 were characterized using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). Subsequently, the prepared SiO_2/VO_2

nanoparticles were deposited onto a PDMS matrix via a spray process to fabricate a flexible hybrid film. Comparison of the transmittance characteristics at different vanadium precursor-to-SiO_2 ratios revealed that the sample with a V/Si ratio of 1:4 exhibited a decrease of up to approximately 50% in visible transmittance under tensile strain, demonstrating excellent mechanochromic behavior. In addition, the intrinsic thermochromic properties of VO_2 were evaluated, and a decrease in NIR transmittance was observed at temperatures above the phase-transition temperature. These results demonstrate that the optical properties of SiO_2/VO_2 core-shell structures can be optimized by controlling their composition and the degree of VO_2 shell formation. Furthermore, the integration of the thermochromic properties of VO_2 with the mechanical deformation characteristics of PDMS enables optical transmittance modulation in response to both thermal and mechanical stimuli. This study presents a novel material design strategy for next-generation smart windows and flexible optoelectronic devices capable of active and tunable optical and thermal regulation.

[P32-16]

Thermal and Electrical Reliability of Sn–58Bi Solder Joints with $Ti_3C_2T_x$ MXene Addition: CHANSIK YOON, JAEJEONG LEE(Department of Materials Science and Engineering, Dankook Univ.), YOONSEOB SHIM, YOONCHUL SOHN(Department of Welding and Joining Science Engineering, Chosun Univ.), YUNSUNG WOO*(Department of Materials Science and Engineering, Dankook Univ.)

Keywords: Sn–58Bi, $Ti_3C_2T_x$ MXene, Electromigration, Isothermal aging, Intermetallic compound

Sn–58Bi solder is a representative low-temperature solder with a melting point of approximately 139 ºC and has attracted considerable attention as a bonding material for thermally sensitive electronic devices and low-temperature semiconductor packaging applications. However, prolonged exposure to thermal and electrical loading can induce coarsening of the Sn-rich and Bi-rich phases, growth of interfacial intermetallic compounds (IMCs), and atomic migration, thereby degrading the reliability of solder joints. In particular, as semiconductor packages become increasingly integrated and miniaturized, reductions in joint size and the accompanying increase in current density make it increasingly important to ensure the thermal and electrical reliability of low-temperature solder joints. $Ti_3C_2T_x$ MXene is a two-dimensional transition-metal carbide with high electrical and thermal conductivity, a large specific surface area, and a layered structure. $Ti_3C_2T_x$ MXene was introduced into Sn–58Bi solder to refine the eutectic microstructure, improve the mechanical properties, and mitigate interfacial IMC formation, with the aim of enhancing the thermal and electrical durability of the solder joints. In our previous work, Sn–58Bi composite powders with $Ti_3C_2T_x$ MXene attached to their surfaces were fabricated through a ball-milling-based solid-state mixing process. Bulk specimens and solder joints on ENIG-finished substrates were subsequently prepared through sintering and reflow processes, respectively. $Ti_3C_2T_x$ MXene addition refined the Sn–58Bi eutectic microstructure, improved the mechanical properties, and reduced the thicknesses of both types of interfacial IMCs formed at the ENIG/Sn–58Bi interface. These findings suggest that $Ti_3C_2T_x$ MXene addition can improve the mechanical properties of Sn–58Bi solder and potentially enhance the thermal and electrical durability of the resulting solder joints. In this study, the thermal and electrical reliability of Sn–58Bi solder joints containing $Ti_3C_2T_x$ MXene was evaluated. In the isothermal aging tests, changes in interfacial IMC thickness with aging time were quantitatively analyzed, and the activation energy for IMC growth was calculated using the growth constants and the Arrhenius relationship. In the electromigration tests, the real-time resistance change of the solder joints was monitored during current stressing, and changes in the distributions of the Sn-rich and Bi-rich phases, interfacial reactions, and the formation of voids and cracks were analyzed. These analyses were used to clarify the effects of $Ti_3C_2T_x$ MXene content on interfacial IMC growth, electrical degradation behavior, and the thermal and electrical reliability of Sn–58Bi solder joints.

[P32-17]

Unseeded Diamond Growth on Liquid Copper by Hot-Filament Chemical Vapor Deposition: Alisher Sultangaziyev, Yongqiang Meng, Sun Hwa Lee(Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Won Kyung Seong*(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff*(Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

Keywords: Diamond, Liquid metal, Chemical vapor deposition, Nucleation, Copper

D iamonds have recently been grown in a liquid metal at 1 atm, in a melt that dissolves carbon and promotes nucleation beneath the liquid surface. We report the unseeded growth of diamond on liquid copper at 1100 ºC, a metal that neither forms a carbide nor dissolves significant amounts of carbon. A copper plate on a tungsten support was melted in H_2 within a hot-filament chemical vapor deposition reactor. CH_4 was introduced only after the copper spread into a flat pool, and no diamond seed particles were used at any stage. After 2 hours, isolated cubo-octahedral microcrystals appeared, identified as diamond via transmission electron microscopy and electron energy-loss spectroscopy. After 20 hours, a continuous polycrystalline film was formed, verified by Raman spectroscopy and X-ray diffraction. Because copper dissolves negligible carbon, nucleation likely occurs at the vapor-liquid interface, making liquid copper a useful system for studying how a free liquid surface influences diamond nucleation. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

[P32-18] [Canceled]
CN-MAX의 C/N 비율 조정에 따른 결정구조 제어 및 마일드 에칭 거동 평가: 김은채, 이도연, 장민서, 송재민, 권한중*(전북대학교)

[P32-19]
Layer-by-Layer Fabrication of Graphene-Fullerene Nanostructures: Korlan Duisenova, Madi Arsakay, Sunghwan Kim(Institute for Basic Science (IBS; located at the UNIST campus)), Rodney S. Ruoff, Sun Hwa Lee*(Institute for Basic Science (IBS; located at the UNIST campus), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))
Keywords: Graphene; polyhydroxylated fullerene; Layer-by-layer assembly; hybrid materials;

One method for integrating graphene with other materials is Layer-by-Layer (LbL) assembly, which enables precise control over layered structures. We assembled graphene-polyhydroxylated fullerene (PHF) films using LbL deposition on ozone-plasma-treated Si/SiO_2 substrates. Graphene was exfoliated via ball milling with polyethyleneimine (PEI), yielding a positively charged aqueous suspension A (pH 6.50, +38.3 mV), while PHF formed a negatively charged suspension B (pH 7.79, -36.7 mV). Films were assembled using a robotic arm, with alternating 30-minute immersions in suspension A then suspension B, followed by Milli-Q water rinses. Preliminary results show a linear increase in film thickness with the number of bilayers. AFM confirms graphene deposition with PHF clusters (~2 nm) on its surface, while SEM images of thicker films (>50 bilayers) reveal a well-defined layered morphology. Since residual PEI may facilitate hydrogen bonding between PHF and graphene, heat treatment was done to remove PEI. Raman spectroscopy of treated films showed the characteristic PHF peak at 1590 cm^{-1}. The zero-bias resistance of the graphene-PEI/PHF heterostructure decreases from approximately 48.8 TΩ in the as-assembled state to approximately 95 Ω in the reverse sweep after heat treatment at 650 °C, consistent with a transition from insulating to near-ohmic transport.

[P32-20] [Canceled]
방전 플라즈마 소결(SPS)을 이용한 Ti계 ($Ti_{n+1}Al(CN)_n$ (n=2, 3) 및 V계 ($V_{n+1}Al(CN)_n$ (n=1, 3) MAX 상의 C/N 비율 제어 합성 및 미세조직·기계적 특성 평가: 장민서, 송재민, 이정연, 김은채, 권한중*(전북대학교)

[P32-21]
Freestanding, Ultrasmooth Diamond Membranes by Simple Delamination via HF(aq) Etching: VIJAY GUPTA(Institute for Basic Science (IBS)), Ken Haenen*(Hasselt University, IMOMEC, IMEC vzw), Rodney S. Ruoff*(Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))
Keywords: Nanocrystalline diamond, Delamination

Ultrathin diamond membranes offer mechanical robustness, high thermal conductivity, optical transparency, chemical stability, and compatibility with quantum defects. After their growth by CVD methods, mechanical exfoliation, including adhesive tape-based methods and laser lift-off, often induces substrate damage, leaves interfacial and/or surface residues, or requires highly controlled environments. We report a simple and general route to freestanding, transferable nanocrystalline diamond membranes enabled by aqueous HF etching of the underlying SiO_2-Si wafer piece (the substrate) on which the diamond film was grown (by microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition, (MPCVD)). Building on well-established sacrificial SiO_2 release chemistry in microfabrication and diamond MEMS/NEMS release flows that employ HF vapor for oxide under-etching, we demonstrate controlled delamination of ultrathin diamond films into intact membranes, followed by deterministic transfer to target substrates. The resulting membranes exhibit ultrasmooth surfaces (RMS roughness less than 1 nm), while preserving diamond phase purity and mechanical integrity. Owing to its simplicity and reliance on mature oxide-etch chemistry, this approach is readily compatible with large-area diamond films and provides a scalable pathway toward diamond membrane integration in photonic, mechanical, and quantum devices. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

[P32-22]
열플라즈마를 이용한 Ni/BN나노튜브 하이브리드 구조 합성 및 NH_3 전환 특성 : 유희일, 문세연*(전북대고온플라즈마연구센터)
Keywords: BN나노튜브, Ni나노파티클

Ni 나노입자가 표면에 증착된 BN나노튜브 하이브리드 소재를 열플라즈마 공정을 이용하여 합성하였다. 개별 Ni나노입자들은 BN 나노튜브 지지체 표면에 높은 분산 상태로 존재하였으며, 분석 결과 평균 직경 6 nm 이하의 고결정성 Ni나노촉매가 BN나노튜브 표면에 형성되어 전체 부피 농도의 약 30%를 차지하는 것으로 확인되었다. 이와 같은 나노 하이브리드 구조에 분산된 Ni나노촉매를 이용하여 NH_3 가스 분해 반응 실험을 수행하였다. 기체 시공간속도(GHSV) 12, 820 mL g^{-1} h^{-1}, 750 °C 조건에서 NH_3를 100% 전환하였으며, 이때의 활성화에너지는 71.4 kJ mol^{-1}로 계산되었다. 또한 100시간 동안의 장기 NH_3 분해 실험에서도 Ni나노입자의 응집이나 촉매 성능 저하 없이 우수한 열적 안정성을 유지하였다. 본 연구는 BN 나노튜브를 높은 열적 안정성, 소결 저항

성, 그리고 우수한 분산 특성을 제공하는 촉매 지지체로 활용함으로써, 고온 촉매 응용에 적합한 금속 나노입자/BN 나노튜브 하이브리드 소재의 효과적인 합성 방법을 제시한다.

[P32-23]

Co-deposition of Carbon and Nitrogen for Well-Ordered N-Doped Carbon Nanowalls (CNWs) on Cu(111) via Molten Salt Electrolysis: Dongwoo Kim(Institute for Basic Science (IBS)), Minhyeok Kim(Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Sunghwan Kim, Moo Young Jung, Won Kyung Seong(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff*, Sun Hwa Lee*(Institute for Basic Science (IBS), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

Keywords: Carbon nanowalls; Cu(111) foil; electrochemistry; nitrogen doping; ordered structure

We demonstrate the co-deposition of carbon and nitrogen to synthesize well-ordered, nitrogen-doped carbon nanowalls (N-CNWs) on Cu(111) foil via molten salt electrolysis. In this process, melamine was utilized as a dual source of carbon and nitrogen alongside Li_2CO_3 which served as the primary carbon precursor. A crucial prerequisite for N-CNW formation is the presence of a protective Cu_2O layer on the Cu(111) substrate. This oxide layer mitigates surface corrosion induced by melamine while preserving the underlying substrate morphology required for oriented nanowall growth. This mechanism fundamentally contrasts with undoped CNW synthesis, where the removal of Cu_2O under H_2 atmosphere is preferred. The resulting N-CNWs contain approximately 4 at% nitrogen and exhibit characteristic three-fold orientations inherited from the Cu(111) crystallography. Current efforts are focused on elucidating the nitrogen-incorporation mechanism using cyclic voltammetry (CV) and potential-dependent electrochemical impedance spectroscopy (EIS). These electrochemical analyses reveal multiple potential-dependent interfacial processes, the specific reaction assignments of which are under ongoing investigation. Overall, this study aims to clarify the controllable parameters for simultaneous carbon deposition and nitrogen doping while maintaining an ordered CNW morphology. This work is supported by Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

[P32-24]

Electrochemical Co-Intercalation of Lithium and Organic Precursors for Interlayer-Confined Synthesis of Layer-Controlled 2D Covalent Organic Frameworks: Mi-Jeong Kim, Yongqiang Meng, Madi Arsakay, Korlan Duisenova, Sunghwan Kim, Jin Hong Kim, Moo Young Jung, Dongwoo Kim(Institute for Basic Science), Rodney S. Ruoff*(Institute for Basic Science, Ulsan National Institute of Science and Technology), Sun Hwa Lee*(Institute for Basic Science)

Keywords: Electrochemical Co-Intercalation, Lithium, 2D COF, Confined Synthesis

Two-dimensional covalent organic frameworks (2D COFs) have attracted considerable attention owing to their ordered porous structures, tunable chemical functionalities, and extended in-plane π-conjugated networks. However, conventional synthetic ruote often results in uncontrolled out-of-plane growth and structural disorder, posing significant challenges to the precise control over COF thickness and crystalline stacking. Here, we present an electrochemical co-intercalation strategy using lithium and organic precursors to establish a spatially confined reaction environment between atomically thin 2D materials. Graphene or hexagonal boron nitride (hBN) layers are employed as confinement templates. During electrochemical intercalation, lithium and organic COF precursors are simultaneously driven into the interlayer galleries, where lithium acts as a metallic intercalant to modulate the interlayer spacing and local chemical environment. Systematically optimizing the applied potential, passed charge, and intercalation kinetics enables precise tailoring of the interlayer dimensions. Following co-intercalation process, the confined interlayer space serves as a nanoscale reaction chamber for subsequent COF formation under suitable chemical or thermal conditions. This spatial confinement facilitates preferential lateral network propagation while effectively suppressing random out-of-plane growth. Consequently, the resulting layer-controlled graphene–COF–graphene and hBN–COF–hBN heterostructures are expected to exhibit well-defined thickness, tailored stacking orders, and sharp interfaces. This strategy combining electrochemical co-intercalation with nanoscale confinement presents a promising platform for the bottom-up, controlled synthesis of 2D framework materials.

[P32-25]

Mechanically Robust and Absorption-Dominated MXene/CNF Composite Films for Advanced Electromagnetic Interference Shielding : XUE HAN, Yun Sung Woo*(Dankook Univ.)

Keywords: MXenes, CNF, Spray coating, EMI shielding

Two-dimensional (2D) transition metal carbides, nitrides, or carbonitrides (MXenes) have garnered significant attention owing to their exceptional intrinsic electrical conductivity, favorable processing flexibility, and unique ultra-thin, high-aspect-ratio geometric morphology (featuring nanoscale thickness and microscale lateral dimensions). Traditional metallic electromagnetic interference (EMI) shielding materials suffer from inherent deficiencies, such as susceptibility to corrosion and high density; furthermore, their excessively high electrical conductivity often dictates a reflection-dominated shielding mechanism, which inadvertently induces secondary electromagnetic pollution to surrounding precision electronic components. In contrast, MXene-based films are envisioned as promising candidates to supplant conventional metals, credited to their versatile processing adaptability, engineering feasibility, and abundant porous architectures. Nevertheless, the intrinsic mechanical brittleness of pristine MXene films severely impedes their practical

deployment in demanding and extreme service environments, such as flexible robotic joints and aerospace applications. To address this limitation, eco-friendly nanofibers (CNFs) were incorporated into the matrix. The abundant hydroxyl groups on the CNF surfaces facilitate strong hydrogen-bonding interactions with the active surface terminations of MXenes, thereby constructing highly robust heterointerfaces. Concurrently, the unique one-dimensional (1D) linear morphology of CNFs weaves a dense interconnected network within the interstitial spaces of the 2D MXene sheets, which efficiently promotes stress transfer and dissipation. This architectural design not only substantially augments the mechanical properties of the resulting composites but also enhances the electrostatic repulsion and colloidal dispersion stability of MXenes in aqueous media. Furthermore, while preserving exceptional EMI shielding effectiveness (EMI SE), the incorporation of CNFs moderately modulates the overly high electrical conductivity of pristine MXenes to optimize impedance matching. Consequently, this effectively suppresses the intense interface reflection and significantly enhances the internal absorption attenuation of incident electromagnetic waves. In this work, MXene/CNF composite films and nanocoating with thicknesses spanning the nano- to microscale were successfully fabricated via vacuum-assisted filtration self-assembly and spray-coating techniques, respectively. Systematic evaluations of their mechanical strength and EMI SE convincingly demonstrate the immense potential of these composite materials for high-performance and highly reliable electromagnetic shielding applications.

[P32-26]

Hydrogen as an Early Precursor to Battery Thermal Runaway: Full-Scale Validation in an Electric Vehicle: MinJae Kim, Min-Gi Kim, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee*(Yonsei Univ.)

Keywords: Thermal runaway, Electric vehicle fire, hydrogen detection, Underground parking, Gas sensors, Full-scale test, Early-warning system

Battery thermal runaway (TR) in electric vehicles (EVs) poses a serious fire hazard in semi-enclosed spaces such as underground parking facilities. However, most studies rely on laboratory-scale tests, leaving early-warning performance under realistic conditions unclear. This study evaluates a non-invasive multi-gas detection approach through a full-scale experiment using a commercial RAY EV in a simulated underground parking environment. TR was induced by externally heating a single lithium-ion pouch cell in Module #6. Sensors for H_2, CO, CH_4, and CO_2 were installed inside the battery pack and beneath the vehicle, with signals synchronized to voltage, temperature, thermal imaging, and optical data. The internal sensor detected hydrogen at 7234 s, about 13.5 min before the voltage drop at 8047 s and the external gas sensor response at 8041 s. Visible gas venting appeared later at 8405 s. Internal hydrogen sensing therefore provided a clear temporal advantage over electrical and visual indicators. The underbody sensor also detected off-gassing without direct access to the battery pack, although its response occurred near voltage collapse. Overall, hydrogen was the earliest and most reliable precursor, supporting externally mounted gas sensors as a practical early-warning option for EV fires in underground parking facilities.

[P32-27]

MOF-derived Binary Nanophases of Metal Oxides and Oxidized Carbon for Highly Selective and Long-Lived Gas Sensing: Jihyun Lee, Wooyoung Lee*(Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Republic of Korea)

Keywords: Translator MOF-derived SnO_2, oxidized carbon, binary nanophase, stability, sensors

Translator Highly selective and durable chemiresistive gas sensing demands architectures that enable rapid analyte transport, strong interfacial reactivity, and stable charge transduction over prolonged operation. Here we report a sensing layer derived from a Sn-based metal organic framework (Sn-MOF), in which oxidative conversion transforms the Sn-MOF into a nanometer-scale binary nanophase of rutile SnO_2 and oxidized carbon within an open, web-like, junction-rich mesoporous network. In this architecture, ultrafine SnO_2 nanodomains are intimately integrated with a retained oxidized carbon binary nanophase, co-engineering gas accessibility, surface redox activity, and electrical transport continuity in a single layer. The resulting binary nanophase enables highly selective and quantitative formaldehyde (HCHO) detection, achieving a limit of detection as low as 0.43 ppb and an electrical response on the order of 2.8×10^4 at 10 ppm HCHO, with rapid response/recovery times of 5.4/27.4 s at 350 °C. The sensing characteristics surpass the performance of reported nanomaterials such as SnO_2 nanoparticle and MOF-derived HCHO sensors. Notably, the sensor is stable over 14 weeks of continuous operation preserved its rutile SnO_2/oxidized-carbon nanophase and even in humid conditions.

[P32-28]

Bifunctional, Reversibly Thermochromic Phase Change Microcapsules for Visual Temperature Indication: Youngjun Kim, Minsu Park*(Dankook Univ.)

Keywords: Phase change materials, thermal management, thermochromic materials, microencapsulation

Phase change materials (PCMs) have garnered great interest in thermal management due to their high latent heat storage capacity. However, conventional PCMs have limitations in visually indicating their thermal state, restricting the direct monitoring of temperature changes. Here, we present bifunctional thermochromic phase change microcapsules (T-PCMs) that simultaneously enable high latent heat storage and visual temperature indication. The T-PCMs were fabricated by encapsulating a T-PCM core composed of crystal violet

lactone, bisphenol A, and tetradecanol within a silica shell via a sol–gel process [1]. The fabricated T-PCMs exhibited reversible thermochromic behavior associated with the solid-liquid phase transition, while simultaneously absorbing and releasing latent heat during heating and cooling processes. This coupled thermal and optical response enables the thermal state of PCMs to be directly visualized without the need for external sensors. In addition, the silica shell allows structural stability and physical confinement of the T-PCM core, effectively preventing the core leakage during the phase transition. These bifunctional T-PCMs promise a passive platform for visual thermal management by combining thermal energy storage and intuitive temperature indication capabilities within a single material system. Reference [1] Y. Zhou and R. Duan, ACS Appl. Energy Mater. 7, 5944–5956 (2024)

[P32-29]

The effect of heat treatment on FAU zeolite templated carbon: Madi Arsakay(Institute for Basic Science (IBS; located at the UNIST campus)), Korlan Duisenova, Alisher Sultangaziyev, Sun Hwa Lee(Institute for Basic Science (IBS; located at the UNIST campus), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), Won Kyung Seong(Institute for Basic Science (IBS; located at the UNIST campus)), Rodney S. Ruoff*(Institute for Basic Science (IBS; located at the UNIST campus), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST))

Keywords: Zeolite, carbon, zeolite-templated carbon; acetylene

Extensive research on zeolite-templated carbons (ZTCs) has been conducted since the late 1990s, and a wide range of zeolite templates, carbon precursors, and synthesis parameters have been reported. We investigated the effect of heat treatment on Ca-exchanged Y-zeolite-templated carbon using acetylene gas as the carbon source. Heat-treatment temperatures were varied in 25 ^{o}C increments from 800 to 1000 ^{o}C. The resulting C@FAU composite materials and the etched final ZTC products were characterized by TEM, SEM-EDS, PXRD, TGA, Raman spectroscopy, gas adsorption, XPS, elemental analysis (EA), and zeta potential measurements. Preliminary SEM studies indicate no observable changes in morphology for samples heat treated in the 800 to 1000 ^{o}C range, for either the C@FAU composites or after etching away the FAU, which we refer to as "ZTC". For the ZTC samples, SEM-EDS indicates the presence of carbon and oxygen while elemental analysis and XPS show carbon, oxygen, and hydrogen. TGA and DTG analyses of the C@FAU samples indicate the presence of carbonaceous material, with varying ratios of carbonaceous material to zeolite observed for samples heat-treated at different temperatures. PXRD patterns show a decrease in the intensity of zeolite peaks because of heat treatment. The ZTC products exhibit a broad peak around $2\theta \approx 6.5^{o}$, with no peaks at $2\theta \approx 26.4–26.6^{o}$ or $42.3–44.5^{o}$ (which are typically associated with graphitic carbon). Additional studies to expand the dataset are underway, as well as extended gas adsorption measurements to determine surface areas, pore volumes, and pore size distributions. Further Raman spectroscopy and XPS analyses will also be conducted to clarify the structural, bonding, and chemical-state characteristics of these ZTC and C@FAU materials. This research is supported by IBS-R019-D1

[P32-30]

Fabrication and Gas Sensing of Chemoselective Structurally Colored Polymer Nanopatterns for Gas Sensing via Gas Induced Morphological Collapse: Su Min Lee, Nam Tae Won*(Pusan National University)

Keywords: Structural color, Responsive polymers, Polymer nanopatterns

Structurally colored nanomaterials provide a promising platform for visual chemical sensing by converting nanoscale structural changes into directly observable optical signals without external power sources. In this study, chemically responsive polymer nanopatterns were developed for selective visual detection of hazardous chemical vapors through stimulus-induced structural color changes. Poly(2-vinylpyridine) (P2VP), poly(acrylic acid) (PAA), and polystyrene (PS) were employed as stimuli-responsive polymers toward acidic gases, basic gases, and benzene vapor, respectively, and RGB structural-color nanopatterns were fabricated using binary-solvent-based selective patterning and immersion transfer printing. Upon exposure to target analytes, chemical interactions between the analytes and responsive polymers induced swelling and structural rearrangement, progressively disrupting the continuity and periodicity of the nanopatterns and consequently weakening or eliminating the structural color. Time resolved morphological and optical analyses revealed a close correlation between nanostructural collapse and color variation, as quantitatively evaluated by endpoint density and color difference (ΔE). Furthermore, incorporation of a three dimensional PS particle scaffold provided additional interstitial diffusion pathways and resulted in faster optical responses than planar structures, particularly at low analyte concentrations. These results demonstrate that chemically responsive polymer nanopatterns can effectively translate analyte-induced nanoscale structural deformation into visible optical signals and suggest their potential as a power-free, structurally colored platform for visual chemical sensing.

[P32-31]

Surface Modification-Driven Growth of Dense Single-Crystal CoSi Nanowires: Eugene Cho(Sungshin Women's Univ.), Gwangsik Mun, Yeon Sik Jung*(Korea Advanced Institute of Science and Technology), Hyeuk Jin Han*(Sungshin Women's Univ.)

Keywords: Cobalt silicide, topological semimetal, nanowire synthesis, plasma surface treatment, VLS growth, substrate engineering

Cobalt monosilicide (CoSi), a B20-structured chiral topological semimetal, is a promising candidate for nanoscale interconnects. However, conventional growth typically yields low-density, randomly oriented nanowires. We achieved high-density growth of single-

crystal CoSi nanowires on Si substrates via Ar/SF_6 plasma pretreatment prior to CVD. This approach resulted in dense arrays (~22.6 wires/μm^2)—a hundredfold increase over untreated Si. Characterization confirms phase-pure B20 CoSi with a preferential [2 1 1] growth direction. Our findings provide a scalable route to integrate chiral topological materials into next-generation electronic devices. Acknowledgements This research was supported by the Nano & Material Technology Development Program (RS-2024-00407291) through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT), Republic of Korea. Also, this research was supported by a grant from the INNOPOLIS Foundation funded by the Ministry of Science and ICT, Republic of Korea (Grant number: RS-2025-02222063).

[P32-32]

Heating-Rate-Aware Early Warning of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway via Quantitative Hydrogen Diagnostics: Mingi Kim, Min-jae Kim, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee*(Yonsei Univ.)

Keywords: Lithium-ion battery safety, Thermal runaway, Hydrogen evolution, Early warning, Battery management system

Thermal runaway (TR) remains a critical safety concern in lithium-ion batteries (LIBs), yet reliable early-warning indicators suitable for integration into battery management systems (BMS) are still lacking under variable heating conditions. Although hydrogen (H_2) evolution has been proposed as an early indicator of TR, a quantitative framework correlating H_2 generation with TR onset across different heating rates has not yet been established. Here, we demonstrate real-time, ppm-level H_2 monitoring using a Pd-decorated SnO_2 nanorod chemiresistive sensor and evaluate its applicability to the predictive diagnosis of TR under controlled heating rates of 5, 7, 10, and 15 $^oC\ min^{-1}$. H_2 evolution was consistently detected at approximately 100 ^oC, well before the onset of TR at approximately 180 ^oC, thereby providing a measurable warning window prior to catastrophic failure. An H_2 threshold of approximately 10 ppm provided warning lead times ranging from 5 to 24 min, depending on the heating rate. Moreover, the peak H_2 concentration and rate of concentration increase exhibited distinct heating-rate-dependent behavior, which correlated with the shortening of the available warning window under accelerated heating. These findings demonstrate that dynamic H_2 features provide more informative safety metrics than a single concentration threshold. In situ mass spectrometry further confirmed that H_2 evolution preceded the release of other gaseous species, supporting its use as a robust precursor of TR. This study establishes a heating-rate-aware, hydrogen-based early-warning framework and provides a practical basis for integrating low-ppm H_2 sensing into next-generation BMS for proactive thermal-runaway mitigation.

[P32-33]

Geometric Engineering of Serpentine Pd Nanocracks for Enhanced Hydrogen Sensing: Joonho Lee, Jongwoon Shin, Chanwoo Lee, Dongjun Cho, Wooyoung Lee*(Yonsei Univ.)

Keywords: Hydrogen sensor, Palladium, Nanocrack, Serpentine structure, Transistor-integrated sensor

Palladium (Pd)-based hydrogen sensors exhibit resistance changes upon hydrogen absorption, with their sensing characteristics strongly governed by the morphology and electrical connectivity of the Pd layer. In this study, we developed serpentine Pd nanocrack structures in which the pattern geometry, Pd thickness, and sonication conditions were systematically varied to control nanocrack formation and the resulting electrical characteristics. Serpentine Pd patterns with line widths of 40, 120, and 320 μm were fabricated on Si/PDMS substrates, and Pd thicknesses of 18, 20, 22, and 25 nm were investigated. Nanocracks were generated by sonication, and the effects of pattern geometry, Pd thickness, and sonication duration on the crack morphology and baseline resistance were systematically evaluated. Preliminary results indicate that narrower serpentine patterns exhibit more pronounced crack-mediated electrical characteristics, whereas wider patterns show lower baseline resistance and more continuous film-like conduction. These findings demonstrate that the combined optimization of pattern geometry and nanoscale Pd thickness enables the resistance modulation to be tailored while preserving electrical continuity. The optimized Pd nanocrack sensor is further designed for integration with a transistor-based readout circuit, in which hydrogen-induced resistance changes are converted into gate-voltage variations. By combining geometry-controlled nanocrack formation with transistor-assisted signal amplification, the proposed approach provides a promising platform for highly sensitive hydrogen detection.

[P32-34]

Efficient Room-Temperature Phosphorescence of Graphene Quantum Dots by Urea-Assisted Surface Modulation and Siloxane–Borate Confinement: Taesik Eom, Minsu park*(Dankook Univ.)

Keywords: Room-temperature phosphorescence, graphene quantum dots, afterglow, optoelectronics

Room-temperature phosphorescence (RTP) has attracted considerable interest in its long-lived emission and potential applications in optical security and information storage. However, many conventional RTP systems rely on heavy-metal complexes or highly crystalline matrices, raising concerns regarding toxicity, cost, and processability. Graphene quantum dots (GQDs) are attractive alternatives because of their solution processability, low toxicity, and tunable surface chemistry. Nevertheless, achieving efficient RTP in GQDs remains challenging as triplet excited states are easily deactivated by molecular motion, vibrational relaxation, and oxygen quenching. Here, we investigate a sequential strategy that combines modulation of N-containing surface species and surface states with siloxane–borate

confinement. Urea-assisted thermal treatment is used to modulate surface-related excited states and examine their contribution to triplet-state formation. A siloxane network provides a rigid host environment [1], while borate interactions further restrict the motion of GQD surface functional groups. As a result, their synergistic interplay effectively suppresses non-radiative relaxation and stabilizes triplet excited states. This study provides a mechanism-guided strategy for designing GQDs with enhanced RTP for next-generation optoelectronic applications. Reference [1] A. Rani, J. Jeong, S. Park, K. Cho, G. Yun, S.Y. Kim, and S. Jeon, ACS Appl. Opt. Mater. 4, 1873–1884 (2026).

P33 : 전산재료과학
Room 1층 전시홀, 10월 30일

[P33-1]
Ti-V-Al-C계 MAX 상 설계를 위한 열역학 데이터베이스 구축: 정훈, 정경재*(성균관대학교)
Keywords: MXene, MAX 상, CALPHAD, 제일원리, 열역학 데이터베이스

Ti–V계 고용체 MXene은 M 자리의 Ti/V 조성에 따라 전자구조와 전기·광학적 특성을 폭넓게 조절할 수 있어, 전이금속 조성이 물성 설계의 주요 변수로 작용한다. 이러한 조성 자유도를 구현하려면 전구체인 $(Ti, V)_{n+1}AlC_n$ MAX 상의 형성 조건과 M 부격자 조성을 정밀하게 제어하는 것이 중요하다. 그러나 MAX 상의 Ti/V 조성은 단순한 원료의 전이금속 비뿐만 아니라 Al 및 C 함량, 경쟁상의 형성, 상간 원소 분배 등에 의해 달라질 수 있다. 따라서 목표 조성의 MAX 상을 설계하려면 Ti–V–Al–C 4원계의 상평형을 일관되게 기술할 수 있는 열역학 데이터베이스가 필요하다. 본 연구에서는 Ti–V–Al–C계 MAX 상의 안정성과 M 부격자 조성을 예측하기 위한 4원계 열역학 데이터베이스 구축을 목표로 하였다. 이를 위해 Ti–V–C 및 V–Al–C 하위 3원계를 CALPHAD와 제일원리 계산을 기반으로 재평가하였다. Ti–V–C계에서는 기존 실험 자료의 정합성을 검토하고 열역학 파라미터를 재최적화하여 주요 상경계의 재현성을 개선하였다. V–Al–C계에서는 MAX 상의 탄소 결핍을 열역학적으로 기술하기 위해 탄소 공공을 고려한 부격자 모델을 적용하고, 제일원리 계산으로 얻은 에너지 정보를 반영하였다. 이를 통해 평형 탄소 공공 농도와 이에 따른 MAX 상의 안정성을 기술하고, 실험적으로 보고된 조성 및 반응 온도와의 정합성을 개선하였다. 이후 기존 및 재평가된 하위계를 일관된 열역학 기술을 바탕으로 결합하고, MAX 상의 M 부격자에서 Ti와 V의 혼합을 고려하여 Ti–V–Al–C 4원계로 확장하였다. 본 연구에서 구축하는 열역학 데이터베이스는 MAX 상의 안정 영역과 M 부격자 조성을 동시에 고려한 조성–온도 설계 윈도우를 도출할 수 있게 하며, 목표 조성의 Ti–V계 고용체 MXene 전구체를 체계적으로 설계하기 위한 열역학적 기반을 제공한다.

[P33-2]
Atomistic Simulation Study of Tramp Element Effects on Liquid Metal Penetration in Fe–Cu–X Systems: Jong-Hoon Park, Hye Ji Jo(Korea University), Hye-Hyun Ahn(Inha University), Dong-Hwi Kim, Minwoo Kang(Hyundai Motor Company), Youngjae Kim(Hyundai Motor Company, Seoul National University), Won-Seok Ko*(Korea University)
Keywords: Molecular dynamics simulation, Recycled steels, Fe–Cu–X ternary system, Grain boundary penetration, Liquid metal embrittlement

Liquid metal embrittlement during hot rolling of recycled steels, caused by tramp elements accumulated through repeated scrap recycling, represents a critical challenge for sustainable steel production. Here we develop interatomic potentials for Fe–Cu–X (X = Sn, Sb, As, Pb, and Bi) ternary systems and employ molecular dynamics simulations to elucidate atomistic mechanisms governing grain boundary penetration of liquid metals. Systematic investigation of binary Fe–X and Cu–X systems establishes that penetration is controlled by wetting thermodynamics depending on both the mixing enthalpy and the solute concentration dissolved in the liquid phase. Extension to ternary systems reveals three distinct penetration regimes determined by the disparity in mixing enthalpies between binary pairs relative to entropic stabilization: (i) Sn and Sb promote cooperative penetration where tramp elements lead Cu into grain boundaries, with penetration efficiency increasing systematically with tramp element concentration in the liquid; (ii) Pb and Bi suppress penetration as their unfavorable Fe interactions exclude them from the solid–liquid interface, maintaining baseline Fe–Cu behavior; and (iii) As exhibits decoupled penetration where its extreme Fe affinity induces liquid phase separation, suppressing Cu penetration despite independent As infiltration. These findings establish a thermodynamic framework based on the difference between binary mixing enthalpies that enables prediction of tramp element effects on grain boundary penetration and provides guidance for prioritization of elements for industrial control.

[P33-3]
Composition-Dependent Li-Ion Transport in Sulfide Solid-State Electrolytes Studied by Machine-Learning Molecular Dynamics: Hwan Seung Heo, Dong Yeon Kim*(Jeonbuk National University)
Keywords: Sulfide solid-state electrolyte, Machine-learning interatomic potential, Li-ion conduction mechanism

Sulfide solid-state electrolytes (SSEs) such as argyrodite Li_6PS_5Cl (LPSC) and $Li_{10}GeP_2S_{12}$ (LGPS) deliver ionic conductivities comparable to those of liquid electrolytes. Ab initio molecular dynamics (AIMD), the standard tool for elucidating their conduction mechanisms, is limited by computational cost to systems of a few hundred atoms over tens of picoseconds, and therefore cannot adequately capture the long-range Li-ion migration and collective ionic motion occurring in realistic structures. Here, we fine-tune a CHGNet-based machine-learning interatomic potential1 on AIMD trajectories to extend the accessible time and length scales, and employ it to determine how Li content governs the structure and ion transport of sulfide SSEs. In the LPSC system, S^{2-}/Cl^- substitution preserves charge neutrality while varying the Li content per formula unit across 5, 6, and 7 ($Li_5PS_4Cl_2$, Li_6PS_5Cl, Li_7PS_6); in the LGPS system, Ge^{4+}/P^{5+} substitution varies the Li content across 9.5, 10, and 11. Vacancy-mediated diffusion is expected to dominate in the Li-deficient compositions and interstitial-mediated diffusion in the Li-excess compositions, allowing the compositional transition in

migration mechanism to be observed directly. Diffusion coefficients, ionic conductivities, and activation energies are then extracted from mean-squared-displacement and Van Hove correlation function analyses of the resulting machine-learning molecular dynamics trajectories. This work is expected to establish a quantitative link between Li stoichiometry, local structure, and the dominant migration mechanism, thereby providing design guidelines for the compositional optimization of sulfide SSEs and demonstrating a transferable framework for the atomistic study of solid electrolytes.

[P33-4]

Phase-Field Modeling of Asymmetric Grain Growth under Intrinsic Stress in Thin Films: doyoon kim, Yongwoo Gwon*(Hongik Univ.)

Keywords: Phase-field modeling, Thin film, Grain growth, Intrinsic stress

Intrinsic stress generated during thin-film processing strongly influences grain-growth kinetics. To the best of our knowledge, the experimentally observed asymmetry in grain-growth kinetics under tensile and compressive intrinsic stress has not been reproduced by existing phase-field grain-growth models. We present a phase-field framework for simulating grain growth under prescribed intrinsic stress, in which grain-specific orientation-dependent strain energy serves as the driving force for microstructural evolution. The model successfully reproduces faster grain growth under compressive stress than under tensile stress, as well as the progressive reduction of this kinetic asymmetry during grain coarsening. These results demonstrate that the proposed framework captures the essential physics governing stress-driven grain growth and provides an efficient, physics-based tool for predicting microstructural evolution in polycrystalline thin films.

[P33-5]

물리정보 신경연산자를 이용한 Allen–Cahn 계면 이동 및 상분리 예측: 이은재, 차필령*, 방진현, Sandeep Sugathan (국민대학교)

Keywords: 상분리, PINO, 계면

Allen-Cahn 방정식으로 상분리와 계면 이동을 계산하려면 아주 작은 시간 간격을 수천 번 계산해야 해서, 물성 조건을 바꿔가며 반복하는 작업의 속도가 이 계산에 의해 결정된다. 물리정보 신경망(PINN)이 조건마다 다시 학습해야 하는 것과 달리 신경 연산자는 조건에서 해로 가는 함수를 토대로 새로운 조건을 한 번의 순전파로 처리한다. 본 연구는 Fourier Neural Operator 기반 PINO로 φ(t)에서 φ(t+Δt)로 가는 시간전개 연산자를 만들고, 1차원 모델을 기반으로 2차원까지 확장시켜 나간다. 1차원은 구동력 H가 계면에 등속으로 작용한다(256점 격자). 학습 조건을 고정한 채 좌표 표현만 바꾸어 정해진 격자 내에서만 계산되는 절대 표현을 해결하고자 계면을 중앙에 맞춘 상대 표현을 견주었다. 학습 범위 안에서는 rollout RMSE가 5.1×10^{-3}과 8.3×10^{-3}으로 비슷했다. 상대 표현에 자기 출력을 입력값으로 받는 push-forward를 더하면 R^2 0.999988, 위치 오차 0.018–0.61 격자로 학습 범위 안팎의 차이가 사라진다. 학습에 5.3시간이 한 번 들고, 그 뒤로는 한 조건의 시간 변화를 예측하는 데 1.7 ms면 된다. 직접 수치 계산으로 같은 결과를 얻으려면 19.4 ms가 걸려 11배 차이의 시간이득을 보았다. 이 작업은 학습된 H 범위 안에서 진행하였으며, 이후 H 외삽에 관련한 연구도 진행 예정이다. 2차원은 $[0, 64]^2$ 영역 128×128 격자의 스피노달 분해로, 궤적 5, 000개를 만들고 계면에너지 σ ~ U(0.5, 2.0)를 변화시켰다. 조건으로 준 σ가 신경망 내부에서 소실되던 문제를 해결하여 단일 스텝 RMSE를 0.1450에서 0.0489로 낮췄다. 또한, 물리 손실로 흔히 쓰는 PDE 잔차가 스냅샷 간격 Δt=2.0에서 정답 해마저 만족시키지 못하는 문제를 해결하기 위해, Δt와 무관하게 성립하는 자유에너지 감소와 최대원리로 대체하였다. 여기에 1차원에서 중요하게 작용했던 push-forward를 함께 적용하여 자기회귀 예측이 상분리에 실패하는 비율을 46%에서 0.2%로 줄였다. 다만, 첫 스텝의 작은 오차가 불안정 파수 대역에서 성장하여 계면 오차가 발생하는 문제가 남아있다. 이에 평가 축을 화소 단위 오차에서 미세조직 통계로 옮기고 결과를 좌우하는 초기 스텝의 정확도를 높이는 작업을 진행 중이며, 조건 축을 형태가 바뀌는 파라미터로 넓히는 일과 학습 범위 밖 외삽은 후속 과제로 남는다.

[P33-6]

데이터 마이닝의 비지도 학습을 응용한 재료의 지각 성질에 관한 연관 규칙 분석: 최재호*, 이원재(강원대학교)

Keywords: 재료 지각, 데이터 마이닝, 디지털 논리, 비지도 학습, 연관 규칙

데이터 마이닝의 비지도학습을 응용한 재료의 지각성질에 관한 연관규칙분석 이원재, 최재호* 강원대학교 공과대학 *교신저자: cjh@kangwon.ac.kr 재료는 두 종류의 성질로 설명되는데, 하나는 유형의(tangible) 성질로서 구성원자의 구조와 그 원 자들의 결합 방식에 따라 주된 부분이 결정되며, 기계적, 열적, 전기적, 자기적 성질 등이 있다. 다 른 하나는 무형의(intangible) 성질인데, 이는 감각기관을 통해 두뇌로 들어온 감각정보가 인간의 경험과 지식을 바탕으로 판단하는 지각과정을 거치고, 이러한 과정을 거친 지각정보들은 군집화 (clustering)와 연관성(association) 등을 통해서 조직화되며 언어를 통해서 저장, 소통된다. 인간은 지각을 통하여 마주친 물건, 재료에 대한 사전 정보를 알아내며, 자신의 행동을 대처함으 로써 생활을 보다 편리하고 안전하게 영위할 수 있다. 재료지각은 주관적이고 직관적이라 개인과 환경에 따라 변화하는 특성을 가지고 있어 측정하기도 어렵고, 수식으로 표현되기는 거의 불가능 한 것으로 판단된다. 그러나 재료지각은 인간 개개인으로 보면 서로 다를 수 있지만, 집단으로 보 면, 어떤 경향이 존재한다. 그 경향을 연구하기 위해 재료종류(material class)에 따른 설문조사를 통한 통계적 분석을 실시한다. 재료에 대한 지각성질은 명사나 동사보다는 형용사로 잘 표현될 수 있다. 서로 의미가 반대인 양극성 형용사 쌍(bipolar adjective pair)을 사용하면 지각성질을 보 다 명확하게 표현할 수 있다. 현실 세계의 물리적 작동원리를 이해하고 스스로 추론하여 모든 상황에 대처할 수 있는 AI agent 를 구현하기 위한 world model 연구가 활발히 진행되고 있다. 이를 위해서는 정확한 감각 입력 데이터 획득, 이를 처리하는 지각과정, 그리고 전체적인 틀에 적합 시키는 방식에 대한 연구가 필 요하다. 또한 부분적인 하나하나의 지각성질 뿐만 아니라 서로 연관된 지각성질을 이해하면 여러 상황에 대

처할 수 있는 능력이 생길 것이다. 본 연구에서는 지각의 전체적인 틀을 이해하고 응용하기 위해서 지각대상인 재료종류에 따른 지 각 성질과 그들 간의 연관성, 상관성을 통하여 지각성질들의 의미적 유사성을 탐구한다. 구체적으 로, 4개의 재료종류, 즉 metal, ceramic, polymer, wood 각각의 재료종류에 대한 지각성질과 그들의 연관관계를 Association Rule Mining(ARM)을 이용하여 연구하였다. 본 연구에서는 명확한 지식으 로 규정하거나 확정하기 힘든 사변적 사안에 대한 과학적 탐구가 실시된다.

[P33-7]

Magnetism-Driven Surface Energetics in TiFe: Implications for Hydrogen Storage: Park Jeongeun(Korea Institute of Science & Tech), Krishnamohan Thekkepat(Sunchon National University), Jinwoo Kim, Jin-Yoo Suh*(Korea Institute of Science & Tech), Seung-Cheol Lee*(Sunchon National University)

Keywords: Surface magnetism, Hydrogen storage, First-principles calculations

TiFe alloys are widely studied as hydrogen storage materials. Since these processes are governed by surface structure and energetics, a detailed understanding of TiFe surfaces is essential. Previous theoretical studies have largely focused on idealized surface models and have paid limited attention to surface termination effects. In this work, we systematically investigate TiFe surfaces with different terminations using first-principles calculations and demonstrate that surface magnetism plays a critical role in determining surface energetics, equilibrium nanoparticle morphology. First-principles calculations were performed within density functional theory using the Vienna Ab initio Simulation Package (VASP). Spin polarization was included in all calculations. Spin-polarized, termination-resolved calculations reveal pronounced differences between Ti-terminated and Fe-terminated TiFe surfaces. While the Ti-terminated surface remains nearly non-magnetic, the Fe-terminated surface develops spin polarization with ferrimagnetic ordering. Using magnetism-consistent surface energies, we construct the Wulff shape of TiFe nanoparticles and find a substantial stabilization of high-index facets compared to previously reported morphologies. Our results demonstrate that the combined treatment of surface asymmetry and magnetism is essential for accurately predicting surface properties. This computational framework including magnetism provides a reliable approach for other alloys containing magnetic elements.

[P33-8]

Controlling Reaction Pathways for Selective CO-to-C2+ Conversion: Mechanistic Insights and Catalyst Design Principles: Hyun Dong Jung(Sogang Univ.), Seoin Back*(KoreaUniv.)

Keywords: CO2RR, DFT, Reaction Mechanism, C2+

Electrochemical CO2 reduction reaction (CO2RR) to energy-dense C2+ products involves complex, highly branched reaction networks that remain incompletely understood. While many studies have focused on thermodynamic analyses of predefined selectivity-determining intermediates (e.g., *CHCOH or *CH2CHO), a comprehensive mechanistic picture is still lacking. Here, we employ constant-potential ab initio molecular dynamics simulations with explicit solvation to elucidate the CO-to-C2+ reaction mechanisms on Cu surfaces. Our dynamic simulations reveal a strong facet and a geometric configurcation dependence in product selectivity. While major route for C2+ production is the CHCOH pathway, by capturing dynamic solvation and potential effects, we proposed a design strategy to steer the reaction pathway.

[P33-9] [Canceled]

기계학습 원자간 포텐셜을 이용한 $CsPbI_3$ 준안정상 제어 연구: 최성호, 장윤석, 홍기하*(국립한밭대학교)

[P33-10]

Rylene Imide Dopants for Interfacial Passivation of ZnO Electron Transport Layers in Non-Fullerene Inverted Organic Solar Cells: Hyeonsu Son, Sang Wook Park, Tae Kyung Lee*(한양대학교)

Keywords: Non-fullerene inverted-type solar cells, Electron-transport layers, Small molecules, Density functional theory, Molecular dynamics

Oxygen vacancy defects at ZnO electron transport layer (ETL) interfaces trap photogenerated carriers, degrading charge extraction in non-fullerene inverted organic solar cells (iOSCs). This study investigates two rylene imide dopants, PDIN-Br and NDIN-Br, introduced onto ZnO surfaces under single-dopant and mixed-dopant conditions. Density functional theory calculations characterize dopant electrostatics, binding energetics, and vacancy formation energy. Both dopants exhibit exothermic adsorption on the ZnO surface and increase the vacancy formation energy relative to pristine ZnO, indicating suppressed vacancy generation and a stabilized interfacial structure. Molecular dynamics simulations examine the spatial distribution of each dopant near the interface. Individual dopants form a dome-shaped concentration profile near the surface, whereas mixed doping produces a plateau-shaped distribution across the interfacial region, indicating a more uniform arrangement. This difference suggests that co-doping alters molecular packing and interfacial coverage. Together, the DFT and MD results establish a computational framework linking dopant electronic structure and interfacial distribution to defect passivation in non-fullerene iOSCs.

[P33-11]

제일원리 계산 및 기계학습 기반 니켈기 치환형 고용체의 용질 확산 예측과 메커니즘 규명: 권진영, 나질라 줄피카, 김경덕*(포항공과대학교 친환경소재대학원)

Keywords: 제일원리, 기계학습, 확산

니켈기 초내열합금에서 고용원소의 확산 거동은 합금의 미세조직 변화와 고온 크리프 거동을 결정하는 핵심 인자이다. 기존 연구는 주로 단일 용질 원자의 확산에 초점이 맞추어 왔으나, 실제 니켈기 초내열합금에는 다양한 합금 원소가 공존하므로 용질 원소 간 상호작용을 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 fcc Ni 격자 내 Al, Ti, Co, Mo를 포함하는 다양한 용질 조합이 공공 매개 불순물 확산에 미치는 영향을 분석하였다. 제일원리 계산과 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하고, 5-주기 및 14-주기 모델을 적용하여 확산 거동을 정량적으로 평가하였다. 용질 조합에 따른 확산계수를 비교한 결과, 확산 촉진 효과는 Ti-X>Al-X>Mo-X>Co-X 며, 이는 Ti를 포함하는 용질 조합이 공공 매개 불순물 확산을 가장 효과적으로 촉진함을 의미한다. 이러한 차이는 주로 용질 및 불순물 원자의 원자 부피 차이에 따른 격자 변형 효과가 반영된 활성화 에너지와, 용질–공공 간 화학 결합의 방향성이 반영된 선지수 인자의 변화에 의해 결정되는 것으로 나타났다. 또한 전이금속 원소의 d 오비탈 전자 채움 정도가 확산 거동에 미치는 영향을 규명하였으며, 제일원리 계산을 통해 확보한 에너지 및 결정구조 정보를 활용하여 결정 그래프 합성곱 신경망(CGCNN, Crystal Graph Convolutional Neural Network)을 학습하고, 이를 기반으로 다양한 원소 조합에 대한 확산 특성을 예측하였다. 최종적으로 구축된 확산계수 데이터베이스는 향후 니켈기 초내열합금의 크리프 거동을 모델링하는 데 필요한 동역학 매개변수로 활용될 것으로 기대된다.

[P33-12]

결정소성-딥러닝 연계 모델을 이용한 미세조직 기반 기계적 거동 예측: 최우섭, 정경재*(성균관대학교)

Keywords: 미세조직, 결정소성, 딥러닝, 대표 체적 요소, 기계적 거동

재료의 기계적 거동은 결정립 크기, 형상, 결정방위 및 이웃관계와 같은 미세조직 특성에 크게 영향을 받는다. 따라서 조직 정보로부터 소재의 유효 거동을 정량적으로 추정하는 것은 미세조직–물성 상관관계의 이해뿐만 아니라, 실험적 물성 평가의 한계를 보완하고 재료 및 구조 부품의 성능을 예측하는 데 중요하다. 특히 용접부와 같이 국부적인 조직 변화가 기계적 특성에 큰 영향을 미치는 영역에서는 표준 기계 시험을 통한 위치별 물성 측정이 제한적이므로, 관찰 가능한 미세조직으로부터 해당 영역의 기계적 응답을 추정할 수 있는 방법이 요구된다. 그러나 일반적인 미세조직 분석은 주로 2차원 단면에 기반하므로, 깊이 방향의 결정립 형상과 공간적 연결성에 관한 정보를 충분히 확보하기 어렵다. 본 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 2차원에서 획득 가능한 통계적 특성과 정합하는 다양한 3차원 대표 체적 요소를 구성하고, 결정소성 시뮬레이션을 통해 각각에 대응하는 응력–변형률 응답을 산출하였다. 이를 바탕으로 미세조직 특성 인자와 이에 대응하는 기계적 물성으로 구성된 데이터셋을 구축하고, 딥러닝을 활용하여 제한된 관측 정보로부터 소재의 유효 기계적 특성을 추정하는 모델을 개발하였다. 이러한 접근은 다결정 재료의 3차원 구조적 특성을 반영하는 물리 기반 해석과 높은 계산 효율을 갖는 데이터 기반 모델링을 결합한다. 개발된 모델은 독립적인 미세조직에 적용하여 성능을 검증하고, 조직 특성 및 하중 방향에 따른 응력–변형률의 차이를 분석하였다. 또한 동일한 2차원 통계 특성에 대응하는 복수의 3차원 미세조직을 고려함으로써, 관찰되지 않은 공간 정보가 예측 결과의 변동에 미치는 영향을 정량화하였다. 본 연구는 제한된 2차원 관측에 내재된 3차원 구조의 비유일성을 고려함으로써, 다결정 소재의 미세조직–물성 관계를 정량적으로 규명하기 위한 새로운 방법론을 제공한다.

[P33-13]

Efficient Phase-Field Modeling of Thin-Film Texture Evolution via Interface-Selective Anisotropy: Yunsu Choi, Yongwoo Kwon*(홍익대학교)

Keywords: Phase field method, Preferred orientation, Thin Film, Grain growth

Preferred crystallographic orientation (texture) in polycrystalline thin films on amorphous substrates strongly influences carrier transport in advanced devices such as 3D NAND channels, DRAM capacitors, and interconnect metals. Conventional phase-field models that incorporate orientation-dependent anisotropy at all interfaces are computationally expensive. Here, we present a simplified multi-order-parameter phase-field framework in which anisotropy is applied only at the film-substrate interface, while grain boundaries are treated as isotropic. Because the film-substrate interface primarily governs texture evolution, the proposed model captures the essential texture development induced by interfacial energy anisotropy while significantly reducing computational complexity. This streamlined framework provides an efficient and predictive approach for simulating texture evolution and guiding the design of textured thin films for semiconductor applications.

[P33-14]

Microscopic Origin of Intrinsic Hole Conduction in Oxygen-Deficient Amorphous Tellurium Oxides: First-Principles Analysis Over Machine-Learned Amorphous Ensembles: Wonzee Jung(Dongguk University), Youngho Kang*(Incheon National University)

Keywords: Amorphous oxide semiconductor and carrier transport

Amorphous oxide semiconductors underpin large-area electronics because they can be deposited uniformly at low temperature, as exemplified by a-IGZO. Their p-type counterparts, however, have proven far harder to realize, largely because the valence-band maximum of most oxides lies deep and is derived from strongly localized O 2p states. Oxygen-deficient amorphous tellurium oxides (a-

TeOx, x ≈ 1.2–2) stand out as a rare exception, showing intrinsic p-type conduction, comparatively high hole mobility, and transistor characteristics that can be tuned by alloying, for example with Se [1]. Despite this promise, the microscopic mechanism behind the p-type behavior, and the structural motifs that give rise to intrinsic acceptors, remain a matter of debate. Here, we address this question by examining the origin of intrinsic p-type conduction in a-TeOx using first-principles electronic-structure analysis combined with electron- and hole-doping calculations. Tracking how charge localizes, how bonds rearrange, and which local motifs respond upon carrier injection allows us to pinpoint the atomic-scale features that generate acceptor states, together with the competing donor-like responses that offset them. Because a single amorphous cell cannot faithfully represent a disordered network, we further compare a set of independently generated configurations obtained with a machine-learned interatomic potential, thereby quantifying the configurational uncertainty of these conclusions. The resulting picture clarifies the microscopic origin of hole conduction in a-TeOx and points to design principles both for optimizing this material and for identifying new p-type amorphous oxide semiconductors. [1] Liu, A. et al. Selenium-alloyed tellurium oxide for amorphous p-channel transistors. Nature 629, 798–802 (2024).

[P33-15]

Theoretical Insights into Vanadium Nitride-Catalyzed Bidirectional Polysulfide Redox in Sodium–Sulfur Batteries: SEONGWON LEE(Hanyang University), HUN-SEONG KIM(Gyeongsang National University), JUNSU SON(Hanyang University), HYUN YOUNG JUNG(Gyeongsang National University), TAE KYUNG LEE*(Hanyang University)

Keywords: Sodium–sulfur batteries, Vanadium nitride, Bidirectional catalysis, Polysulfide conversion, Density functional theory calculation

Sodium–sulfur batteries offer high theoretical capacity and low material cost, but polysulfide shuttling and the sluggish conversion of solid discharge products limit their electrochemical reversibility. To understand how these limitations can be mitigated, we performed density functional theory calculations to elucidate the catalytic role of vanadium nitride (VN) through comparison with graphene and N-doped graphene. VN exhibited stronger affinity for sulfur and sodium polysulfide intermediates than the graphene-based surfaces, enabling effective anchoring at the cathode interface. Electronic-structure analyses attributed this behavior to strong V–S bonding and orbital coupling between VN and polysulfides. Reaction pathway calculations further demonstrated that VN facilitated both the reduction of soluble polysulfides during discharge and the decomposition of Na_2S during charge. In particular, VN lowered the kinetic barriers of the rate-determining conversion steps and promoted Na–S bond activation in solid discharge products. These results indicate that VN serves as a bidirectional catalyst by integrating strong polysulfide confinement with accelerated forward and reverse sulfur redox reactions. Our study provides molecular-level insight into VN-based catalytic interfaces for suppressing polysulfide shuttling and improving sulfur redox reversibility in sodium–sulfur batteries.

[P33-16]

DFT Investigation of Oxygen-Containing Adsorption Characteristics on Metal-Incorporated C_{60}: HWIWON KIM, Kihyun Shin*, Soyun Park(Hanbat National University)

Keywords: Density Functional Theory(DFT), Oxygen Adsorption, Metal Incorporation, Catalytic

The adsorption of oxygen-containing species plays an important role in catalytic reactions, as the interaction between oxygen and catalyst surfaces can strongly influence catalytic behavior. Carbon-based materials combined with metal elements have attracted considerable interest as potential catalytic materials due to their tunable structural and electronic properties. C_{60}, a carbon nanomaterial with a stable molecular structure, has also been investigated for catalytic applications. In this study, the effects of metal incorporation on the oxygen adsorption behavior of C_{60} were investigated using density functional theory (DFT). Ni, Pd, Pt, and Au atoms were incorporated into C_{60} to examine how different metal elements influence oxygen adsorption. The structures were optimized after placing O, OH, and OOH adsorbates at different adsorption sites. The adsorption energies, interatomic distances, and structural changes were analyzed to compare the adsorption characteristics of the metal-incorporated C_{60} systems. In particular, the differences in adsorption behavior depending on the type of metal element were examined to understand the interactions between metal atoms and oxygen-containing adsorbates. The results are expected to provide insight into the relationship between metal incorporation and oxygen adsorption behavior in C_{60}. This study is also expected to provide fundamental information for the design and development of C_{60}-based catalytic materials with improved adsorption properties.

[P33-17]

Rethinking OER Activity on Doped IrO_2(110) through SCAN Insight: eujin Kim, kihyun Shin*, girim Park, younghyun Choi(Hanbat National University)

Keywords: Oxygen Evolution Reaction, IrO_2 Catalyst, Dopant Engineering, DFT Calculation, OER Intermediates

The Oxygen Evolution Reaction (OER) is a critical electrochemical process in water electrolysis for sustainable hydrogen production. However, its multi-step proton–electron transfer mechanism leads to sluggish kinetics, making OER the primary bottleneck in overall water-splitting efficiency. Among various electrocatalysts, iridium dioxide (IrO2) is widely recognized for its high catalytic activity and stability under acidic conditions. Understanding how surface modifications influence reaction intermediates on IrO_2 surfaces is therefore

essential for improving catalyst performance. In this study, the effects of dopant incorporation on the adsorption behavior of key OER intermediates on the IrO_2 (110) surface were investigated. Dopant atoms were introduced into the surface structure to examine how local electronic environments influence the stability of reaction intermediates. Changes in surface electronic structure and adsorption energetics were systematically analyzed to understand how dopant engineering can modify catalytic properties. To evaluate methodological sensitivity in computational catalysis, adsorption energies were calculated using two widely used exchange–correlation functionals, RPBE and SCAN. These functionals often yield different adsorption energy predictions, and comparing their results provides insight into the reliability of theoretical descriptions of catalytic systems. The adsorption energies of the key OER intermediates O*, OH*, and OOH* were examined on doped IrO_2(110) surfaces. These intermediates play essential roles in the OER reaction pathway, and their relative adsorption energies serve as important descriptors for catalytic activity. The results reveal how both dopant incorporation and the choice of exchange–correlation functional influence the adsorption energetics of OER intermediates on IrO_2 surfaces, providing guidance for the rational design of improved OER catalysts.

[P33-18]

Analysis of the Adsorption Properties of $Pt_6@C_{60}$ through N Doping: soyun park, kihyun Shin*, Hwiwon Kim(Hanbat National University)

Keywords: DFT Calculation, Carbon Ring Structure, N-Doped Carbon, Adsorption Properties, O Adsorption

The adsorption of reactants on $Pt_6@C_{60}$ is an important factor that determines reaction characteristics on catalyst surfaces. When reactants are strongly adsorbed, subsequent reactions can be hindered. Therefore, it is important to identify a structure with appropriate adsorption properties. In this study, some C atoms in C_{60} were substituted with N to modify the electronic structure and thereby control the adsorption properties of $Pt_6@C_{60}$. Considering the hexagonal and pentagonal structures constituting C_{60}, N_1-doped structures were constructed by substituting one C atom with N. O was adsorbed considering the structural characteristics of C_{60}, and density functional theory (DFT) calculations were performed to optimize the structures and compare the adsorption energies of O. The adsorption properties were found to vary significantly depending on the O adsorption site. These results indicate that N doping changes the electronic structure and bonding environment of C_{60}, resulting in different adsorption properties depending on the adsorption site. Furthermore, the different adsorption properties observed according to the C_{60} structure suggest that the structure itself also influences O adsorption. This study demonstrates the potential of N_1 doping for controlling the adsorption properties of $Pt_6@C_{60}$. Based on the N_1-doped structure, future work will extend the calculations to OH and OOH adsorption to further compare the changes in adsorption properties induced by N doping.

[P33-19]

Catalytic Enhancement of Core–Shell Pt Nanoparticles through Elemental Substitution: Seohee Jang, Janghyeon Oh, Yeonwoo Do, Seokho Lee, Kihyun Shin*(Hanbat National University)

Keywords: DFT, Nanoparticle, Fuel Cell, Pt, Core-shell

Platinum (Pt) is one of the most active catalysts for the oxygen reduction reaction (ORR) in fuel cells. However, its high cost and scarcity hinder large-scale applications. In this study, we aim to enhance catalytic activity while reducing Pt usage by designing core–shell Pt nanoparticles with smaller elements such as Ir and Rh incorporated into the core. Density functional theory (DFT) calculations were performed to evaluate the adsorption energies of key ORR intermediates (O*, OH*, and OOH*) on Pt, Ir@Pt, and Rh@Pt nanoparticles at various surface sites, including vertex, edge, and face. The results show that introducing smaller core atoms induces compressive strain in the Pt shell, leading to shortened Pt–Pt bond lengths and modified adsorption behavior. Among the investigated structures, Rh@Pt exhibits the weakest adsorption energies for OH* and OOH*, which facilitates intermediate desorption and promotes faster reaction kinetics. Gibbs free energy analysis further reveals that Rh@Pt provides the flattest energy profile across the four elementary ORR steps, indicating a thermodynamically favorable reaction pathway. The theoretical onset potential of Rh@Pt was calculated to be 0.49 V, which is significantly higher than that of Ir@Pt (0.38 V) and pure Pt (0.14 V). In addition, volcano plot analysis based on OH* adsorption energy shows that the face site of Rh@Pt is located near the peak of catalytic activity. These findings demonstrate that core substitution with smaller atoms is an effective strategy for tuning the electronic and geometric properties of Pt-based catalysts, enabling the development of cost-efficient and high-performance ORR catalysts. In particular, Rh@Pt emerges as a promising candidate for next-generation fuel cell applications.

[P33-20]

Optimization of Strain-Induced OER Activity in IrO2 Catalysts via Gaussian Process Regression: younghyun choi, Kihyun Shin*, Eujin Kim, Girim Park(Hanbat National Univ)

Keywords: OER, Gaussian Process Regression, strain, IrO_2

This research presents a strategic framework for optimizing the Oxygen Evolution Reaction (OER) activity and structural stability of iridium oxide (IrO_2) catalysts by integrating Gaussian Process Regression (GPR) and Active Learning . Moving beyond simple adsorption energy predictions, we systematically evaluated the adsorption energies of key OER intermediates (O, OH and OOH) across

a multi-dimensional strain space, ultimately constructing a high-resolution map of OER overpotentials. To maximize computational efficiency, an uncertainty-driven active learning algorithm was employed to balance exploration and exploitation. This approach effectively mitigated overfitting in data-sparse environments and ensured robust predictive performance across the entire strain range (-10 % to +10 %). Notably, by quantifying the shift in the d-band center and identifying the thresholds for atomic rearrangement under strain, we identified the optimal "Optimal Design Window" where maximum OER activity coincides with superior catalyst durability. This research demonstrates that data-driven catalytic screening significantly reduces the reliance on extensive DFT resources while providing high-fidelity guidelines for catalyst design. The synergy between strain engineering and machine learning established in this work offers a transformative pathway for designing high-performance oxide catalysts for next-generation water electrolysis and fuel cell applications.

[P33-21]

Effects of Core-driven Strain on ORR Activity in Pd(100) Nanocube Catalysts: Yeonwoo Do, Janghyeon Oh, Seokho Lee, Seohee Jang, Kihyun Shin*(Hanbat National University)

Keywords: DFT, ORR, Pd, Strain, Reconstruction

This research investigates the effects of strain and surface reconstruction on the adsorption properties of Pd-based nanocubes with (100) facets using density functional theory (DFT) calculations, with the aim of improving the catalytic activity of oxygen reduction reaction (ORR) catalysts for fuel cells. To induce lattice strain, various core elements, including Ru, Ir, Au, Ag, Ni, Pt, Cu, and their intermetallic compounds, were introduced beneath the Pd shell. The stable adsorption sites and adsorption energies of reaction intermediates such as O, OH, and OOH were systematically compared. In addition, strain analysis and Bader charge analysis were performed to examine the changes in lattice parameters induced by different core elements and the redistribution of charge during the adsorption process. The results showed that the strain induced by the core elements significantly altered the adsorption energies of the intermediates. In some compositions, the Pd(100) surface was reconstructed into a mixed (100)/(111) facet structure. Notably, changes in surface structure and electronic structure directly influenced the adsorption strength and catalytic activity. In particular, Ni based systems exhibited relatively weak OH adsorption and a higher onset potential, indicating their potential as promising ORR catalysts. This research demonstrates that the interplay between strain, charge redistribution, and surface reconstruction plays a crucial role in determining the catalytic performance of Pd-based nanocubes and provides theoretical insights for the design of high-efficiency fuel cell catalysts.

[P33-22]

Active learning for Efficient Exploration of M-N-C Single Atom Catalyst Design Space: JANG HYEON OH, Yeonwoo Do, Seokho Lee, Seohee Jang, Kihyun Shin*(Hanbat National University)

Keywords: Machine Learning, Gaussian Process Regression, Single atom catalysts, Adsorption Energy, Active Learning

The oxygen reduction reaction (ORR) is a major kinetic bottleneck in fuel cells, and OH binding strength is widely used as a key descriptor to rationalize ORR activity trends. M–N–C single atom catalysts (SACs) are an attractive platform because their active sites are well defined and can be tuned by varying the metal center and the local coordination environment. However, systematic exploration of catalyst design variables using exhaustive density functional theory (DFT) calculations is often impractical due to the computational cost associated with geometry relaxations, adsorbate optimizations, and convergence sensitivity across diverse coordination motifs. Here, we present a computational design framework that combines DFT with Gaussian Process Regression (GPR) based active learning to efficiently identify SAC motifs with ORR relevant OH adsorption energetics under a limited DFT budget. The candidate space is constructed by combining six metal centers (Fe, Co, Ni, Ir, Pd, and Rh), seven ligand environments (N_4, N_3P, N_3S, N_3Si, N_3B, N_3F, and N_3Cl), and two carbon motifs (pyridinic and pyrrolic), yielding 84 candidate combinations. To reflect the volcano type dependence of ORR activity on OH binding, we formulate the active learning objective as a target seeking problem with a target adsorption energy. At each iteration, the GPR model provides both predicted means and uncertainties, and the next candidates are selected using an expected improvement (EI) acquisition function. The active learning driven workflow improves discovery efficiency relative to random selection by reducing the number of DFT evaluations required to reach the target region and by increasing the number of hits identified under the same computational budget. Overall, this study demonstrates that GPR based active learning can serve as a practical strategy to accelerate the rational design of M–N–C SACs by systematically navigating coordination and motif variations with a limited number of DFT calculations.

[P33-23]

Effect of Coordination Number and Hydrogen Variation on the Adsorption Energies of Pb-Labeled DOTA Complexes: seokho lee, Seohee Jang, Yeonwoo Do, Janghyeon Oh, Kihyun Shin*(Hanbat National University)

Keywords: DOTA, Chelator, Radiometal Complexation, DFT, Theranostics, TRT

Stable chelation of metallic radioisotopes is essential in targeted radionuclide therapy (TRT) to ensure effective delivery to molecular targets and reliable in vivo imaging performance. Among various chelators, DOTA is one of the most widely utilized due to its strong metal-binding affinity and high kinetic stability under physiological conditions. In particular, Pb-based radioisotopes have attracted

considerable attention for TRT applications, and Pb is widely known to form an eight-coordinate complex with DOTA. Conventional coordination models generally assume that Pb strongly interacts with four oxygen donor atoms within the DOTA framework. However, the possibility has also been suggested that coordination environments involving fewer Pb–oxygen interactions may significantly influence complex stability and electronic structure. In this study, density functional theory (DFT) calculations were performed to investigate the coordination behavior and structural properties of Pb–DOTA complexes. To systematically examine the effect of the local coordination environment, an additional hydrogen atom was introduced into the Pb–DOTA complex, inducing variations in the coordination structure around the Pb center and modifying the Pb–oxygen interaction environment. The results revealed significant differences in adsorption energies and metal–ligand interactions depending on the hydrogen-induced coordination configuration. In particular, coordination environments involving reduced Pb–oxygen interactions exhibited energetically favorable characteristics, suggesting that the conventional understanding of Pb coordination in DOTA complexes may require further reconsideration. These findings provide molecular-level insights into the coordination mechanism of Pb–DOTA complexes rather than simply identifying the most stable structure. Furthermore, the mechanistic understanding obtained in this study may offer transferable design principles applicable to other radiometal isotopes and chelator systems for future theranostic applications.

[P33-24]

상장 모델 기반 소자 시뮬레이션을 이용한 양극성 저항 메모리의 전도성 필라멘트 거동 해석: 오진우, 권용우*(홍익대학교), 정동명(한국표준과학연구원)

Keywords: 상장 모델, 저항 메모리, 전도성 필라멘트

저항메모리 연구에서 가장 도전적인 부분은 전도성 필라멘트의 거동을 해석하는 것이다. 특히 원자가 변화 메커니즘(Valence Change Mechanism, VCM) 저항 메모리의 경우 필라멘트의 진화는 보통 스위칭 소재 내 음이온 공공(vacancy)의 형성, 소멸 및 이동에 의해 결정되기 때문에 필라멘트 동작의 관측에 있어 어려움이 존재한다. 따라서 저항 메모리의 전기적 특성뿐만 아니라 전도성 필라멘트의 거동까지도 계산할 수 있는 시뮬레이션 모델의 개발이 필요하다. 본 연구는 서로 다른 소자 아키텍처들에 대해 forming, reset, set 전체 사이클을 시뮬레이션하여 실험 데이터와 비교해 분석한다. 상장 모델 방정식인 칸-힐리어드(Cahn-Hiliard) 방정식과 전기-열 방정식을 유한요소 해석 소프트웨어를 활용하여 완전 연계 수치 해석을 진행하였다. 본 발표에서는 두 가지 선행 연구에서 보고된 저항메모리 소자의 동작 특성을 상장 모델 기반 시뮬레이션을 통해 해석하였다. 첫째, 스위칭 소재의 형성 영역을 공간적으로 제한함으로써 소자의 변동성이 감소하는 현상을 실험적으로 보고한 연구를 모사하고, 구조적 제한이 전도성 필라멘트의 형성 및 소자 간 변동성에 미치는 영향을 분석하였다. 둘째, VO_2 멤리스터에서 공공 채널의 형성과 단절이 반복되면서 나타나는 주기적 저항 변화와 오실레이션 동작을 구현하고, 이에 따른 전도 경로의 동적 거동을 해석하였다. 시뮬레이션 결과, 각 소자 구조에서 나타나는 전도성 필라멘트의 형성 및 변화 양상이 선행 연구에서 보고된 실제 소자의 전기적 특성과 거동 경향에 잘 부합함을 확인하였다. 이를 통해 상장 모델 기반 다중물리 시뮬레이션이 서로 다른 저항메모리 소자에서 전도성 필라멘트의 동적 거동과 이에 따른 소자 특성을 해석하는 데 유효하게 활용될 수 있음을 보였다.

[P33-25]

Oxygen Evolution Reaction on Clean, Stepped, and Kinked IrO2 (110) Surface: girim park, Younghyun Choi, Eujin Kim, Kihyun Shin*(Hanbat national univ.)

Keywords: Keywords s: Oxygen Evolution Reaction (OER), Rutile IrO_2 (110), Density Functional Theory (DFT+U), Surface Defects, Low-Coordination Sites, Adsorption Energetics, Electrocatalysis

The oxygen evolution reaction (OER) is a key electrochemical process for sustainable hydrogen production through water electrolysis. Among various electrocatalysts, rutile IrO_2 has been widely recognized as one of the most active and stable materials under acidic conditions. However, many theoretical studies rely on idealized flat surfaces, which do not fully capture the structural complexity of real catalytic systems where surface defects are commonly present. In this work, we investigated how different surface morphologies influence OER-related adsorption energetics on the rutile IrO_2 (110) surface. Density functional theory calculations with a Hubbard U correction (DFT+U) were performed to evaluate the adsorption energies of key reaction intermediates, particularly O* and OH*. Three representative surface models were considered: a clean terrace surface, a stepped surface, and a kink structure. These models allow us to examine how changes in local coordination environments affect adsorption behavior and catalytic properties. By comparing adsorption energies across different surface sites, we aim to examine how variations in local coordination environments influence adsorption energetics. In particular, sites located near step and kink structures are considered to explore how such defect features may affect adsorption behavior and catalytic properties. This approach highlights the importance of incorporating realistic surface morphologies in computational studies of electrocatalysis and provides insight into the potential role of surface defects in determining the catalytic behavior of IrO_2 based OER catalysts.

[P33-26]

적층제조 응고 텍스처를 고려한 단결정 금속 격자구조의 Phase-field 위상최적화: 한창현, 김동욱, 차필령*(국민대학교 / Kookmin Univ.)

Keywords: 위상최적화, PFM, 결정학적 이방성, 응고 텍스처, 균질화, 적층제조, 금속

적층제조(AM) 금속 격자구조에서 미세조직은 설계자가 자유롭게 선택하는 변수가 아니라 응고 열이력이 결정하는 공정의 출력이

며, 특히 주상정 응고 텍스처는 부재 수준의 강한 결정학적 이방성을 유발한다. 그러나 기존 격자 위상최적화는 대부분 등방 물성을 가정하거나 미세조직을 자유 설계변수로 취급하여 이 물리적 제약을 반영하지 못한다. 본 연구에서는 페이즈필드 위상최적화의 탄성 해석을 Hu–Chen(2001) 계열의 푸리에 스펙트럴 미시탄성으로 대체하고, 참조매질 Green 연산자를 전처리기로 하는 공액구배법으로 공극–고체 간 고콘트라스트 문제를 해결한 단결정 금속 격자 설계 프레임워크를 제시한다. 해석해·유한요소 교차검증을 포함한 다중 검증 게이트로 응력장과 균질화 강성의 신뢰성을 확립하였다. Al, Ni, Cu, 316L 네 합금과 세 결정 방위에 대한 64^3 주기셀 3축 전단 캠페인 결과, 최적 위상은 방위에 대해 강건한 반면(형상 유사도 Dice ≥ 0.89) 균질화 전단강성은 방위에 따라 최대 2.4배 변화하였으며, 이 성능 스윙은 구조 재배치가 아닌 고체의 방향강성 몫으로 정량 분해되었다(구조효율 변동 ±10% 이내). 이는 격자 성능의 일차 결정 요인이 위상 설계가 아니라 재료와 텍스처의 선택·제어임을 시사한다. 나아가 방위분포 평균 유효강성을 통해 섬유 텍스처의 세기와 성분(<001>/<110>)이 최적 설계와 성능에 미치는 영향을 정량화하고, 2상 유효강성 및 공간가변 텍스처장, 정합 미스핏 채널로의 확장 가능성을 논의한다.

[P33-27]

Computational Study of Conductive Binder Architecture for High-Loading $LiFePO_4$ Cathodes: Seongeun Oh(Sookmyung Women's University), 노은환(Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), 강혜리, 이은지(Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)), 강석주(Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)), 주세훈*(Sookmyung Women's University)

Keywords: $LiFePO_4$, Conductive Binder, PEDOT, Interfacial Interaction, Density Functional Theory

$LiFePO_4$ (LFP) is a promising cathode material for lithium-ion batteries owing to its low cost and excellent thermal stability. However, its low energy density remains a major limitation. Increasing the active material content offers a potential route to higher energy density, but reducing the amounts of binder and conductive additive often compromise electrode adhesion and electronic conductivity. Here, we introduce a bifunctional conductive binder composed of PEDOT:PSS and single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) for high-loading LFP cathodes. Density functional theory calculations reveal that both PEDOT and PSS interact more strongly with LFP than conventional PVDF, with PSS exhibiting the strongest binding through electrostatic interactions and Fe–O coordination. The resulting PEDOT:PSS-SWCNT binder architecture enables high active material loading with low inactive material content, while maintaining rate capability and cycling stability. This work provides atomistic insights into the design of conductive binders for high-energy-density electrodes.

[P33-28]

Co-doping을 이용한 Sb_2Se_3의 보상성 결함억제에 대한 제일원리 계산 연구: 김민준, 홍기하*(국립한밭대학교)

Keywords: 태양전지, Sb2Se3, 친환경 소재, 결함, 효율

안티모니 셀레나이드(Sb_2Se_3)는 비교적 풍부하고 독성이 낮은 원소로 구성되어 있으며, 적절한 밴드갭과 단순한 이원계 조성을 갖기 때문에 박막 태양전지용 광흡수체로 주목받아 왔다. 그러나 p형 도핑을 구현하기 어렵다는 점이 Sb_2Se_3 개발의 지속적인 장애물로 남아 있다. 억셉터 도펀트를 첨가하더라도 Se 공공(V_{Se})과 같은 도너형 고유 결함이 의도한 정공을 보상하는 경향이 있다. 이에 따라 기존의 Sb_2Se_3 도핑 연구 대부분은 이러한 자기 보상 현상을 우회하거나 억제하는 데 초점을 맞춰 왔다. 본 연구에서는 제일원리 결함 계산을 이용하여 일시적 Co-doping 방식으로 carrier 농도를 계산하였다. 여기서 보조 Co-dopant는 영구적인 도펀트로 작용하는 것이 아니라, 열처리 과정에서만 존재한다. 열처리 중 보조 Co-dopant는 결함 형성의 균형을 변화시켜 보상성 도너 결함의 생성을 억제하는 역할을 한다. 이후 냉각 및 후처리 과정에서 보조 Co-dopant가 제거되고, 억셉터 도펀트만 재료 내에 남는 상황을 가정하였다. 계산 결과, 일반적으로 p형 특성을 제한하는 Se 공공의 보상 효과가 Co-dopant의 존재하에서 감소하는 것으로 나타났다. 이 상태에서 Co-dopant를 제거하면, 단일 도핑의 경우보다 재료가 더 강한 p형 특성을 나타낸다. 다만 이 결과는 Co-dopant가 완전히 제거된다는 가정하에서 얻어진 상한값에 해당한다. 이처럼 Co-dopant를 일시적으로 사용하는 방법은 Sb_2Se_3에서 억셉터를 활성화하기 위한 방법으로 활용될 수 있다.

P34 : 소프트소재
Room 1층 전시홀, 10월 30일

[P34-1]
정전용량 결합 제어를 통한 압타머 개질 확장 게이트 FET 바이오센서의 신호 전달: 박성현, 김자영*(연세대학교)
Keywords: 압타머, 소프트 바이오인터페이스, 바이오센서, FET

압타머는 유연한 분자 구조와 음전하를 띠는 인산 골격을 가지며, 표적 분자와의 결합에 따라 구조적 재배열과 계면 전하 분포 변화를 유도할 수 있는 동적 소프트 바이오인터페이스이다. 이러한 압타머 기반 계면 변화는 전계효과트랜지스터(FET) 바이오센서에서 전기적 신호로 변환될 수 있으나, 신호의 크기는 표적 결합 자체뿐 아니라 계면에서 발생한 미세한 전하 및 정전용량 변화가 소자에 얼마나 효과적으로 전달되는지에 의해 결정된다. 특히 생리학적으로 유의한 높은 이온강도 환경에서는 디바이 차폐(Debye screening)로 인해 전하 변화(ΔQ)에 기반한 신호 전달이 제한된다. 이러한 한계는 코티솔(cortisol)과 같이 크기가 작고 전기적으로 중성인 생체분자에서 더욱 두드러질 수 있으며, 이 경우 표적 결합에 따른 순전하 변화보다 압타머의 구조 재배열에 의해 발생하는 공간적 전하 분포, 계면 형태 및 유효 정전용량(ΔC)의 변화가 주요 신호 발생 인자로 작용할 가능성이 있다. 본 연구에서는 이러한 압타머 기반 소프트 인터페이스의 미세한 계면 변화를 효과적으로 전기적 신호로 전달하기 위해, 압타머가 개질된 확장 게이트 전극과 FET가 결합된 확장 게이트 FET 구조를 활용하였다. 확장 게이트 전극의 기하학적 크기를 조절하여 계면과 트랜지스터 사이의 정전용량 결합을 변화시키고, 이에 따른 센싱 응답 및 감도 변화를 비교하였다. 그 결과, 확장 게이트 구조에 의해 형성되는 정전용량 결합이 압타머 기반 계면에서 발생한 미세한 물리화학적 변화를 FET 채널로 전달하는 데 중요한 역할을 하며, 소자의 센싱 특성과 감도에 유의한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 본 연구는 구조적으로 유연한 압타머 기반 바이오인터페이스의 계면 변화를 정전용량 결합을 통해 효과적으로 읽어내는 신호 전달 전략을 제시하며, 향후 소프트 바이오인터페이스 기반 고감도 바이오센서의 구조 설계를 위한 방향성을 제공한다.

[P34-2]
Waste-derived cross-economy hydrovoltaic energy generator with environmental sustainability: Minji Kwon, Jonggun Jung, Chanyeong Jeon, Woojoong Kim, Jioh Yoo, Seungjun Lee, changhoe Lee(연세대학교), Dongho Kang*, Eunae Shin*(한국생산기술연구원), Cheolmin Park*(연세대학교)
Keywords: Hydrovoltaic Energy Generator (HEG), Moisture-Driven Electricity Generator (MEG), Biomass Upcycling, Cross-Economy, Self-Powered Soil pH Sensor, Life Cycle Assessment (LCA)

Sustainable self-powered systems require a harmonized integration of efficient energy harvesting, material circularity, biodegradability, and reduced environmental footprints. However, high-performance hydrovoltaic energy generators (HEGs) still heavily rely on synthetic nanomaterials with high operational and environmental burdens. Here, we report a cross-economy hydrovoltaic energy generator (CHEG) platform fabricated entirely from waste- and biomass-derived materials, integrating wastepaper-derived cellulose paper (WP), rice husk-derived activated carbon (AC), and brown algae-derived sodium alginate (SA) hydrogel within a bilayer device architecture. Among various wastepaper sources (scrap paper, newspaper, cardboard box, and egg tray), scrap paper-derived WP exhibited superior structural integrity and ionic characteristics, delivering a maximum open-circuit voltage of 0.881 V, a short-circuit current density of 900 μA cm^{-2}, and a peak power density of 185.8 μW cm^{-2}, outperforming previously reported biomaterial-based HEGs. A 12-unit series array successfully achieved an output voltage of ~10 V to power commercial electronics. Furthermore, the CHEG platform was demonstrated as a biodegradable agricultural soil acidity/alkalinity warning system, converting pH-dependent current variations into threshold LED visual signals. A cradle-to-gate life cycle assessment (LCA) quantified a Global Warming Potential (GWP) of 0.0515 kg CO_2 eq per 1 cm^2 device, offering quantitative evidence that functional quality retention during repeated recycling governs environmental benefits. This work establishes a cross-economy strategy by unifying waste upcycling, biomass utilization, biodegradability, and quantitative environmental analysis for environmentally responsible self-powered electronics.

[P34-3]
Janus Photonic–Phosphorescent Polymer Encodes Environmental States and Optical Histories: Jonggun Jung, Woojoong Kim, Jioh Yoo, Chanyeong Jeon, Minji Kwon, Seung Jun Lee, Changhoe Lee, Cheolmin Park*(Yonsei Univ.)
Keywords: Janus-type Polymer, Room temperature phosphorescence, Photonic crystal, Structural color, Complementary optical responsiveness, Block copolymer, Optical encryption, Optical synapse

Stimuli-responsive optical materials typically visualize instantaneous environmental changes, while their ability to retain and process temporal information remains limited. Here, we develop a free-standing Janus polymer film that integrates a block copolymer photonic crystal with an ion-doped room-temperature phosphorescent (RTP) gel to combine environmental responsiveness with history-dependent optical dynamics. Hygroscopic LiTFSI serves as a common ionic mediator in both layers, enabling reversible humidity-induced modulation of structural color through lamellar swelling and temperature-dependent recovery of RTP through reorganization of

the hydrogen-bonded phosphorescent microenvironment. The two optical modes thereby provide complementary stimulus-dependent readouts under ambient and dark conditions. Beyond instantaneous optical responses, persistent triplet-state dynamics generate pulse-dependent potentiation and fading memory, allowing temporal UV inputs to be encoded into distinct afterglow states. This dynamic response enables physical reservoir computing for human-motion recognition with 89.25% accuracy and pulse-gated multilevel optical encryption. The Janus architecture thus provides a materials platform that couples stimuli-responsive visualization with temporal optical information processing.

[P34-4]

BSP 필름의 열-기계적 물성과 Si 웨이퍼 Warpage 거동의 상관관계 분석: 문준혁(서울대학교), 장준호, 류채우*(홍익대학교)

Keywords: 후면 보호 필름(BSP film), 웨이퍼 휨(Warpage), 열-기계적 물성, 열팽창계수(CTE), 저장탄성률(Storage modulus)

반도체 패키징 공정에서 발생하는 웨이퍼 warpage는 공정 안정성과 소자의 신뢰성에 영향을 미치는 주요 요인 중 하나이다. Si 웨이퍼에 라미네이션되는 back side protection (BSP) 필름은 온도에 따라 열팽창 및 기계적 특성이 변화하므로, BSP 필름의 열-기계적 물성을 이해하고 이들이 웨이퍼 warpage에 미치는 영향을 규명하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 BSP 필름의 열팽창계수(coefficient of thermal expansion, CTE), 저장 탄성률(storage modulus), 유리 천이 온도(glass transition temperature, Tg) 등의 열-기계적 물성을 측정하고, 이를 가열 및 냉각 과정에서 나타나는 Si 웨이퍼의 warpage 변화와 비교함으로써 각 물성과 warpage 거동 간의 상관관계를 분석하였다. 또한 열-기계적 물성의 온도 의존성과 BSP 필름과 Si 웨이퍼 사이의 변형 불일치를 함께 고려하여 각 물성 인자가 warpage의 발생 및 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 분석을 바탕으로 BSP 필름의 열-기계적 물성과 Si 웨이퍼 warpage 사이의 관계를 규명하고, warpage에 영향을 미치는 주요 물성 인자를 도출함으로써 반도체 패키징 공정에서의 warpage 저감을 위한 BSP 필름의 물성 설계 방향을 제시하고자 한다.

[P34-5]

결함 유도 2H-to-1T′ 상전이 기반 $MoTe_{xx}/Ni(OH)_2$ 이종구조의 하이드라진 보조 수전해 촉매 설계: 백승진, 이원규*(홍익대학교)

Keywords: 하이드라진 산화반응, 수소발생반응, 상전이, 이종구조 촉매, 텔루륨 결함

친환경 수소 생산을 위한 수전해 기술에서 산소 발생 반응은 높은 반응 에너지와 느린 반응 속도로 인해 전체 에너지 효율을 제한하는 주요 요인이다. 이를 개선하기 위해 상대적으로 낮은 산화 전위에서 구동 가능한 하이드라진 산화반응을 산소 발생 반응과 대체하는 하이드라진 보조 수전해가 주목받고 있다. 본 연구에서는 결함 및 상경계 제어를 기반으로 $MoTe_x$ 및 $MoTe_x/Ni(OH)_2$ 전기촉매를 설계하고, 각각 수소 발생반응과 하이드라진 산화반응에 적용하여 고효율 하이드라진 보조 수전해 시스템을 구현하고자 하였다. 기계적으로 박리한 2H-$MoTe_2$에 전기화학적 Te 용출을 유도하여 Te 공공을 형성하였으며, 이 과정에서 발생한 국소적인 격자 왜곡을 통해 반도체성 2H 상과 금속성 1T′ 상이 공존하는 $MoTe_x$를 형성하였다. 이후 Ni 전구체 용액에 침지하여 Te 공공을 중심으로 $Ni(OH)_2$가 자발적으로 핵생성 및 성장하도록 유도함으로써 $MoTe_x/Ni(OH)_2$ 이종구조를 구현하였다. XPS 및 EDS 분석을 통해 약 10–12% 수준의 Te 공공 형성을 확인하였으며, HRTEM 분석에서는 2H/1T′ 상경계와 함께 2H-$MoTe_x/Ni(OH)_2$ 및 1T′-$MoTe_x/Ni(OH)_2$ 계면이 형성된 것을 확인하였다. 형성된 2H/1T′ 상경계는 $MoTe_x$ 내 전하 이동을 촉진하여 수소 발생반응의 반응 속도를 향상시켰으며, $MoTe_x$는 낮은 과전압에서 우수한 수소 발생 활성을 나타냈다. 한편, $MoTe_x/Ni(OH)_2$ 이종구조에서 $Ni(OH)_2$는 하이드라진 산화반응 과정에서 계면의 전자구조를 조절하고 전자 전달을 촉진함으로써 향상된 산화 활성을 유도하였다. 또한 in-situ Raman 분석을 통해 낮은 전위에서는 단계적인 N–H 탈수소화가 우세하고, 전위가 증가함에 따라 N–N 결합 절단 경로가 활성화되는 전위 의존적 하이드라진 산화 메커니즘을 확인하였다. 최종적으로 $MoTe_x$를 수소 발생 전극으로, $MoTe_x/Ni(OH)_2$를 하이드라진 산화 전극으로 구성한 전해조를 통해 기존 수전해 대비 낮은 셀 전압에서 구동되는 하이드라진 보조 수전해를 구현하였다. 이러한 결과는 결함, 상경계 및 이종계면의 복합적인 제어가 수소 발생반응과 하이드라진 산화반응을 동시에 향상시킬 수 있음을 보여주며, 저에너지 수소 생산을 위한 효과적인 전기촉매 설계 전략을 제시한다.

[P34-6]

Temperature-Responsive Multispectral and Temporal Luminescence in Dual-Guest Metal-Organic Frameworks: Chanyeong Jeon(Yonsei Univ.), Jong Woong Park(Massachusetts Institute of Technology), Woojoong Kim, Jonggun Jung, Changhoe Lee, Jioh Yoo, Minji Kwon, Seung Jun Lee, Cheolmin Park*(Yonsei Univ.)

Keywords: Dual-guest confinement, Metal-organic frameworks, Multispectral luminescence, Temporal luminescence, Temperature-responsive luminescence

Integrating spectrally and temporally distinct emission channels within a single material remains challenging. Here, we report a dual-guest confined metal-organic framework (MOF) in which $MAPbBr_3$ perovskite nanocrystals (NCs) and cyanuric acid (CA) molecules are co-confined within a europium-based MOF host. The resulting material, denoted as $MAPbBr_3$&CA@Eu-MOFs (MACE), exhibits three spectrally and temporally distinct emission channels. Upon 365 nm excitation, green fluorescence (FL) is generated from the confined $MAPbBr_3$ NCs, whereas 254 nm excitation produces red FL from Eu^{3+} centers through the antenna effect. Following removal of the 254 nm excitation source, long-lived blue phosphorescence (PH) emerges from the framework ligands through host-guest interactions with CA. Consequently, the three emission channels operate across nanosecond, millisecond, and second timescales within a single material platform. Furthermore, both the emission color and temporal behavior can be tuned by excitation wavelength and temperature. In particular, temperature variation modulates the relative contributions of the green and red FL channels while inducing

distinct changes in the lifetimes of the three emission pathways. These results demonstrate dual-guest confinement as an effective strategy for integrating spectrally and temporally tunable luminescence within a single material and highlight the potential of perovskite-MOF hybrid systems as stimuli-responsive optical materials.

[P34-7]

Plasticity-tunable artificial synapse enabling history-dependent temporal neuromorphic spiking system: Changhoe Lee, Woojoong Kim, Jioh Yoo, Minji Kwon, Jonggun Jung, Chanyeong Jeon, Seung Jun Lee, Cheolmin Park*(Yonsei Univ.)

Keywords: Artificial Synapse, Artificial Neuron, Neuromorphic Device

Despite substantial progress in developing artificial synapses suitable for spiking neural networks, which offer energy-efficient computation through event-driven and temporally sparse operation, a neuron spiking system in which firing frequency is modulated according to the retention of previously imposed events by capturing such history-dependent plasticity is rarely demonstrated. Here we present a plasticity-tunable organic synaptic transistor that enables history-adaptive neuromorphic spiking. The device is a side-gated organic synaptic transistor comprising a solid-state ion-gel electrolyte, a p-type organic semiconductor channel, and a side gate coated with a different p-type organic semiconductor layer. The characteristic long-term plasticity exhibited by the transistor under consecutive gate pulses transitions toward short-term plasticity when a molecular dopant is incorporated into the gate-side organic semiconductor layer. This transition originates from a dopant-induced shift in the gate-side Fermi level that modifies the zero-bias band alignment between the gate and channel. By varying the dopant concentration, the retention time can be tuned over more than an order of magnitude, from 1368 s to 125 s, while maintaining the potentiated channel conductance. By integrating the synaptic transistor with a comparator, a simple neuromorphic spiking circuit is developed in which the output spike frequency is quantitatively controlled by the plasticity of the synapse. More importantly, because the system retains plasticity-dependent memory states, identical inputs generate different firing responses depending on the preceding stimulation history. This enables either rapid recall of retained information or resettable processing of transient or noisy inputs for spiking-neural-network operation, providing a new approach toward history-adaptive neuromorphic temporal coding systems.

[P34-8]

혈장 TIMP-1의 현장진단 검출을 위한 전기화학 면역 바이오센서: 이경은, 이동욱, 김자영*(연세대학교)

Keywords: 섬유화, 면역분석법, 현장진단형, 면역 바이오센서, 전기화학 센서

섬유화는 지속적인 장기 손상으로 인해 염증반응이 지속적으로 일어나 정상 조직이 섬유화 조직으로 바뀌는 기전을 말한다. 섬유화는 간, 폐, 신장 및 심장 등 다양한 장기에 영향을 미치는 만성 질환에서 공통적으로 나타나는 병리학적 진행 과정이다. 초기 섬유화 변화는 뚜렷한 증상 없이 진행되는 경우가 많기 때문에, 비가역적인 장기 손상이 발생할 때까지 질환의 진행을 인지하지 못할 수 있다. 이러한 임상적 한계는 섬유화 진행을 지속적이고 단계별로 모니터링할 수 있는 기술의 필요성을 강조한다. Tissue inhibitor of metalloproteinases-1 (TIMP-1)은 matrix metalloproteinases (MMPs)의 활성을 억제함으로써 세포외기질(ECM)의 증식을 조절하는 핵심 인자로 일컫는다. 이에 임상 연구에서는 혈중 TIMP-1 농도와 섬유화 중증도 사이에 강한 연관성이 보고되어 왔으며, 이는 TIMP-1이 질환의 단계를 평가할 수 있는 정량적 바이오마커로 활용될 수 있음을 뒷받침한다. 따라서 TIMP-1의 측정은 최소침습적인 방법으로 섬유화 진행을 추적할 수 있는 유용한 접근법이 될 수 있다. 현재 혈장 내 TIMP-1 농도는 주로 ELISA(enzyme-linked immunosorbent assay) 또는 액체크로마토그래피-질량분석법(LC-MS)을 통해 측정된다. 그러나 이러한 분석법은 고가의 장비와 전문적인 실험실 분석 절차를 필요로 하기 때문에 현장진단(PoC) 환경에 적용하는 데 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 별도의 시료 전처리나 전문적인 실험실 장비 없이 임상 혈장 샘플에서 TIMP-1을 직접 정량하는 전기화학 면역센서를 개발하였다. 본 센서는 내부 레독스 층을 도입하여 외부 레독스 프로브 없이 항원–항체 결합에 따른 변화를 직접적인 전기화학 신호로 변환한다. 또한 항오염 인터페이스를 적용함으로써 복잡한 혈장 매트릭스에서도 신뢰성 있는 분석이 가능하도록 설계하였다. 본 센싱 플랫폼은 항체 기반 면역분석법의 높은 특이성을 유지하면서도 휴대성과 분석의 간편성을 제공한다. 또한 다양한 섬유화 관련 바이오마커의 다중 검출(multiplex detection)로 쉽게 확장할 수 있어 섬유화 진행 상태를 종합적으로 모니터링할 수 있으며, 나아가 다양한 질환의 진단에 적용할 수 있는 범용 센싱 플랫폼으로 확장될 가능성을 가진다.

[P34-9]

Locally-Amorphized Layered $PtTe_2$ for Efficient Ethanol Oxidation: jihun Yim, Won-Kyu Lee*(hongik Univ.)

Keywords: TMDs, $PtTe_2$, Amorphous, Ethanol oxidation, Heterophase

Developing highly active, CO-tolerant, and stable electrocatalysts for the ethanol oxidation reaction (EOR) is important for direct ethanol fuel cells, but conventional Pt-based catalysts remain limited by an overarching problem of low selectivity toward the C1 pathway, which restricts the full oxidation process through complete 12-electron transfer. Here, we report a simple strategy using a single-step O_2 plasma treatment on multilayer $PtTe_2$ to induce local surface amorphization and form amorphous-crystalline interfaces. The resulting catalysts exhibit lower onset potentials, the areal activity of 30.27 mA\cm^2, the ratio of forward to backward peak current densities of ~7.38, and 28.64% current retention after 1000 seconds, representing a sixfold increase in CO tolerance and a sevenfold enhancement in stability compared to pristine Pt. Atomic force microscopy (AFM), transmission electron microscopy (TEM), ultraviolet photoelectron spectroscopy (UPS), and Raman spectroscopy verify that the plasma treatment induces local amorphization on the basal

plane of the layered chalcogenides. The spatial distributions of the resulting interfacial boundaries increased the global work function of the reconstructed surfaces, facilitating surface oxidative reactions through continuous electron extraction. Furthermore, X-ray absorption spectroscopy (XAS) analysis reveals an elevated oxidation state of the partially amorphized $PtTe_2$ and local coordination distortions that favor EOR, demonstrating that a multiscale surface reconstruction has occurred. In situ Raman spectroscopy, combined with NMR analysis, detects the key reaction intermediates and reveals that the engineered amorphous-crystalline interface exhibits high selectivity toward the C1 pathway

[P34-10]

MXene-Enabled Low Voltage Operating Neuromorphic Memristor Based on PVDF-MXene Nanosheet Blends: Seungjae Choi*, Beomjin Jeong*(Pusan National Univ.)

Keywords: MXene, neuromorphic memristor, low voltage operating, self-rectifying

Emulating biological synaptic functions is considered a promising strategy for addressing the von Neumann bottleneck and memory-wall limitations of conventional computing architectures. In this context, neuromorphic memristors have attracted considerable interest owing to their efficient data-storage capability and rapid response; however, achieving low-energy operation remains a significant challenge. Herein, we demonstrate a resistive switching memory based on a heterostructured active layer composed of $Ti_3C_2T_X$ MXene nanosheets incorporated into polyvinylidene fluoride (PVDF). The device was prepared through a simple solution-based process involving spin-coating and subsequent mild thermal treatment. The resulting device exhibited stable resistive switching within an exceptionally low operating voltage range of −0.12 to 0.42 V, together with a high ON/OFF ratio and a rectification ratio of 10^8. Nonvolatile memory behavior was further verified by retention exceeding 10^4 s and reliable switching endurance over repeated cycles. Furthermore, the device successfully reproduced synaptic plasticity, and neuromorphic simulations using experimentally obtained device characteristics achieved an MNIST recognition accuracy of approximately 94%.

[P34-11]

Enzyme-Recyclable Moisture-Enabled Energy Generator Based on a CNF/CNT/Citric Acid Aerogel: Hojoon Park, Ka Eun Lee, Dongho Kang, EunAe Shin*(Korea Institute of Industrial Technology)

Moisture-enabled energy generators (MEGs) have attracted increasing attention as sustainable energy-harvesting technologies because they can convert ubiquitous moisture into electricity without relying on conventional external power sources. However, the development of MEGs with both stable electrical performance and improved recyclability remains challenging. In this study, a CNF/CNT/citric acid (CCA) aerogel-based MEG was developed by integrating a porous CCA aerogel with an ionic organohydrogel. The CCA aerogel was prepared using cellulose nanofibers (CNFs), carbon nanotubes (CNTs), and citric acid through heat treatment and freeze-drying, while the ionic organohydrogel was fabricated by crosslinking polyacrylamide followed by solvent exchange. The resulting CCA-MEG exhibited stable electrical output, generating an open-circuit voltage of approximately 0.54 V and maintaining its output for more than 350 h under continuous operation. The effects of the aerogel composition on MEG performance were further investigated by replacing the conductive component of the CCA system with graphene oxide (GO) or MXene. The resulting MEGs exhibited distinct voltage generation behaviors depending on the incorporated carbon-based or two-dimensional conductive materials, demonstrating the important role of material composition and interfacial characteristics in moisture-induced electricity generation. In addition, the CCA-MEG showed substantially higher and more stable voltage output than the pristine CNF/CNT aerogel-based MEG. Importantly, enzyme-assisted degradation enabled recovery of the CCA-based component while retaining 98.8% of the initial voltage and 91.3% of the initial current after treatment. These results demonstrate that the CCA aerogel provides an effective platform for stable and potentially recyclable MEGs, while the material-dependent electrical responses provide useful insights into the design of sustainable moisture-driven energy-harvesting systems.

[P34-12]

Stretching-Induced Structural Engineering of PETG Composite Films Incorporating Hybrid h-BN/Al_2O_3 Fillers for Improved Thermal and Mechanical Properties: Yoonhye Han, Minyoung Kwak, EunAe Shin*(Korea Institute of Industrial Technology)

Lightweight, electrically insulating polymer composites are promising candidates for thermal management; however, their inherently low thermal conductivity typically necessitates high ceramic-filler contents, which can compromise mechanical properties and melt processability. Herein, biaxially stretched glycol-modified polyethylene terephthalate (PETG) composite films incorporating hybrid hexagonal boron nitride (h-BN) and aluminum oxide (Al_2O_3) fillers were developed to improve in-plane thermal transport through controlled structural rearrangement. The films were fabricated via melt compounding followed by biaxial stretching at various draw ratios. Stretching induced preferential alignment of the h-BN platelets along the film plane and enhanced the formation of interconnected filler networks. Al_2O_3 particles were positioned between neighboring h-BN domains, indicating a potential bridging role in establishing interparticle thermal pathways within the hybrid filler network. For the BN15/AO30 composition, increasing the draw ratio from 1× to 3× resulted in an increase in in-plane thermal conductivity from 2.266 to 7.434 W/m·K, representing an approximately 15-fold improvement over neat PETG. Tensile strength exhibited an overall increasing trend with increasing draw ratio, while elongation

at break varied nonlinearly and showed an increase at an intermediate draw ratio. Statistical analysis of the experimental data identified draw ratio and h-BN content as the primary parameters influencing thermal conductivity, whereas the effect of Al_2O_3 content was comparatively limited within the examined composition range. These findings demonstrate that biaxial stretching can effectively regulate the internal filler structure of PETG-based hybrid composites, enabling substantial enhancement of in-plane thermal conductivity while maintaining control over their mechanical characteristics.

[P34-13]

Amine-Functionalized Graphene Oxide Reinforced Crosslinked P(VDF-TrFE) Hybrid Dielectrics for Solution-Processed MoS_2 Ferroelectric Synaptic Transistors: SEONGBO JANG, BEOMJIN JEONG*(Pusan National Univ.)

Keywords: Ferroelectric, Cross-linking, MoS_2 channel Synaptic Transisotrs, Neuromorphic Computing

Crosslinked P(VDF-TrFE) hybrid dielectrics reinforced by amine-functionalized graphene oxide (AGO) were developed for solution-processed MoS_2 ferroelectric field-effect transistors (FeFETs) in hardware artificial synapses. While PEG diamine cross-linking enhances solvent resistance and structural stability, it constrains polymer chain mobility and lowers remnant polarization. Incorporating AGO nanosheets mitigates this trade-off; strong interfacial hydrogen bonding between AGO functional groups and P(VDF-TrFE) fluorine atoms promotes polar β -phase crystallization and dipole alignment. The optimized 0.03 wt% AGO hybrid dielectric exhibited high remnant polarization, low leakage current, 10^4 cycle switching endurance, and 10^5 s polarization retention. Integrated with a solution-processed 5-layer 2H- MoS_2 channel in a bottom-contact top-gate FeFET, the hybrid dielectric suppressed off-state current and achieved high I_{ON}/I_{OFF} ratios with reliable non-volatile memory behavior. Furthermore, the FeFET demonstrated highly linear, symmetric long-term potentiation/depression with robust state retention. Neuromorphic simulation using these synaptic parameters achieved 92.79% accuracy in MNIST digit recognition. This hybrid engineering offers a versatile platform for low-power, large-area hardware neuromorphic systems.

P35 : 항공재료
Room 1층 전시홀, 10월 30일

[P35-1]
일방향응고 IN792 초내열합금에서 Zr 편석이 고–액 계면에너지와 고온균열 민감도에 미치는영향: 김민석(국립창원대학교), 구지호(한화에어로스페이스), 진혜승(경동나비엔), 이재현*(국립창원대학교)
Keywords: 초내열합금, 일방향 응고, 고온균열

응고균열은 니켈기 초내열합금의 주조 과정에서 여전히 중요한 문제이며, 특히 IN792 합금에서 심각하게 나타난다. 지르코늄(Zr)의 편석이 고온균열 민감도와 경험적으로 관련되어 있다고 알려져 있지만, 이러한 관계를 지배하는 원자 수준의 기구는 아직 명확하게 밝혀지지 않았다. 본 연구에서는 IN792+0.8wt%Hf 합금을 대상으로 일방향 응고 실험과 M3GNet 머신러닝 포텐셜을 이용한 분자동역학(MD) 시뮬레이션을 수행하여, Zr 함량이 고–액 계면에너지와 고온균열 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 일방향 응고 시험 결과, Zr 함량이 120 ppm에서 700 ppm으로 증가함에 따라 전체 균열 길이는 0 mm에서 87.58 mm로 급격하게 증가하였다.입계 강화 원소의 함량을 감소시킨 대조 합금에서는 응고균열과는 다른 응고 후 균열 기구에 의해 50.38 mm 길이의 응력 완화 균열이 발생하였다. 이는 Zr 함량을 변화시킨 합금 조성에서 관찰된 응고균열과 구별되는 현상이었다. 전자후방산란회절 분석 결과, 과도한 Zr 함량인 700 ppm에서는 저경각 입계에서도 균열이 발생한 반면, 낮은 Zr 함량에서는 균열이 주로 고경각 입계에서만 발생하였다. 분자동역학 시뮬레이션을 통해 Zr 함량 증가에 따라 고–액 계면에너지가 0.288 J/m^{2}에서 0.212 J/m^{2}로 감소하는 것을 정량적으로 확인하였다. 이러한 결과는 Zr 편석이 고–액 계면에너지를 감소시켜 입계 액막을 안정화하고 고온균열 민감도를 증가시킨다는 것을 보여준다. 약 120 ppm의 Zr 함량은 입계 강화 효과를 유지하면서 Zr 편석을 최소화할 수 있는 최적 조건으로 판단되며, 이는 일방향 응고 니켈기 초내열합금의 주조성을 향상시키기 위한 기준을 제공한다.

[P35-2]
Ni 초합금 열역학 데이터베이스 개발: Ni-Co-Ta 시스템의 열역학 모델링: 박준서(한국과학기술원), 곽다희, 조원옥, 정인호*(서울대학교)
Keywords: Superalloys, Phase equilibria, CALPHAD

최근 3세대 이상의 니켈 초합금에서 Ta은 고온강도와 내구성을 극대화하기 위해서 주요한 합금원소로 사용되고 있다. 본 연구에서는 Ni-Co-Ta 삼원계 시스템에 대한 열역학 모델링과 데이터 베이스 개발을 수행하였다. 특히 최근 발표된 모든 실험데이터를 평가하여, Ni-Ta, Co-Ta 이원계 시스템에 대해서 정확한 열역학 모델링을 수행하고 또한 이를 확장하여 삼원계 Ni-Co-Ta 시스템에 대한 열역학 모델링을 수행하였다. 특히 본 3원계 시스템에는 다양한 고상용액상들이 존재하는데 그 각각의 상들의 안정성을 정확히 평가하여 실험적으로 보고된 상태도를 모두 잘 설명하고 또한 3원계의 액상에 대한 예측도 수행할수 있었다. 본 연구는 니켈 초합금의 열역학 데이터베이스 개발의 일환으로 진행되었다.

[P35-3]
HIP 처리가 Inconel 718 주조재의 미세조직 및 수소 취성 저항성에 미치는 영향: 한수빈, 김동혁, 조용재, 장진석, 최창영, 김지욱, 정유현, 송혜진*(한국생산기술연구원)
Keywords: Ni-based Superalloy, Inconel 718, Hydrogen Embrittlement, Hot Isostatic Pressing, Microstructure

Inconel 718 합금은 우수한 기계적 특성 및 내식성을 갖는 Ni 기반 초내열합금으로, 항공우주, 해양 및 수소 에너지 산업 등 다양한 분야에서 핵심 재료로 활용되고 있다. 그러나 주조 공정에서 발생하는 기공 및 수축 결함은 기계적 특성을 저하시킬 뿐만 아니라, 수소 환경에서 수소 취성을 촉진하는 요인으로 작용할 수 있다. 이러한 내부 결함을 제거하고, 연신율을 향상시키기 위한 후처리 공정으로 HIP(Hot Isostatic Pressing)이 널리 적용되고 있으나, HIP 처리 유무에 따른 미세조직 변화와 수소 취성 거동의 상관관계에 대한 연구는 아직 부족하다. 이에 본 연구에서는 Inconel 718 주조재를 대상으로 HIP 처리 전·후의 미세조직 변화와 수소 취성 거동을 비교 분석하였다. HIP 처리에 따른 미세조직 변화를 OM, SEM 및 EBSD 등을 이용하여 분석하였고, 수소 장입 전·후 인장시험과 파면 분석을 통해 기계적 특성 변화와 수소 취성 정도를 평가하였다. 이를 통해 HIP 공정이 Inconel 718 주조재의 미세조직과 수소취성 저항성 향상에 미치는 영향을 규명하였으며, 수소 환경에서 사용되는 고신뢰성 Ni 기반 초내열합금 부품의 후처리 공정 적용을 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

[P35-4]
레늄이 포함된 니켈계 초합금 열역학 데이터베이스 개발: 레늄-나이오븀, 레늄-몰리브덴 이원계 시스템의 열역학 모델링: 서정민, 방지호, 정인호*(서울대학교)
Keywords: 레늄, 레늄-나이오븀, 레늄-몰리브덴, 열역학 모델링

니켈 기반 초합금(Nickel superalloys)은 고온에서의 기계적 물성이 매우 중요하게 요구되는 소재이다. 특히 레늄(Re)은 고온 피로 및 크리프(creep) 저항성을 크게 향상시키는 특성이 있어 2세대 초합금부터 도입되기 시작했으며, 최근에는 레늄 함량이 5%를 초과하는 고합금화 초합금도 활발히 개발되고 있다. 따라서 신규 초합금 설계 시 레늄의 함량을 최적화하기 위해서는, 레늄 첨가가 합금 내의 상변태(phase transformation) 및 상평형에 미치는 영향을 명확하게 이해하는 것이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 니켈 초합금의 주요 합금 원소인 나이오븀(Nb) 및 몰리브덴(Mo)이 레늄과 형성하는 상거동을 규명하고자 Re-Nb 및 Re-Mo 이원계(binary

system)에 대한 열역학 데이터베이스를 구축하였다. 이들 시스템에는 액상을 비롯한 다양한 고용체 상(solid solution phase)이 존재한다. 문헌에 보고된 모든 상태도(phase diagram) 및 열역학 데이터를 수집하여 신뢰성을 평가한 후, 이를 바탕으로 해당 이원계 시스템의 열역학 모델링을 수행하였다. 특히, 기존의 열역학 모델링 연구들에서 잘못 평가되었던 상안정성(phase stability) 오류를 바로잡아 보다 정교하고 정확한 평가를 수행하였다. 본 연구는 향후 고성능 니켈 초합금 설계를 위한 통합 열역학 데이터베이스 개발의 일환으로 수행되었다.

[P35-5]

Inconel 718 주조품의 열처리 조건에 따른 미세조직 변화 및 마모 특성 분석: 김동혁*, 한수빈, 송혜진(한국생산기술연구원)

Keywords: Ni-based Superalloy, Inconel 718, Heat Treatment, Wear Resistance, Microstructure

Ni 기반 초내열합금은 우수한 고온 강도, 피로 저항성, 산화 및 부식 저항성을 바탕으로 항공우주, 발전 및 원자력 등 다양한 고온 환경에서 사용되는 핵심 재료이다. 특히 가스터빈과 항공기 엔진은 고온, 고압 및 고속 회전이 동시에 작용하는 극한 환경에서 장시간 사용되므로, 반복적인 마찰과 마모로 인해 부품의 성능 저하 및 수명 감소가 발생할 수 있다. 따라서 이러한 환경에서 안정적인 성능을 확보하기 위해서는 우수한 내마모성을 갖는 소재의 적용이 필수적이다. Inconel 718 합금은 석출상을 통해 강화되는 대표적인 Ni 기반 초내열합금으로, 높은 고온 강도와 우수한 피로 및 크리프 특성으로 인해 고온 터빈 부품에 널리 적용되고 있다. 그러나 주조 공정을 통해 제조된 Inconel 718 합금은 응고 과정에서 형성되는 다양한 미세조직적 불균일성으로 인해 기계적 특성과 마모 특성이 저하될 수 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해서는 적절한 열처리를 통한 미세조직 제어가 요구된다. 본 연구에서는 Inconel 718 주조재를 사용하여 열처리 조건에 따른 미세조직 변화와 이에 따른 마모 특성의 변화를 평가하였다. 미세조직은 SEM, EPMA 및 EBSD 등을 이용하여 분석하고, 마모시험과 마모면 관찰을 통해 열처리 조건에 따른 마모 메커니즘의 변화를 고찰하였다. 미세조직 변화와 마모 특성의 상관관계를 분석함으로써 열처리가 Inconel 718 합금의 내마모성 향상에 미치는 영향을 확인하고, 고온 구조부품의 성능 향상을 위한 열처리 적용 가능성을 제시하였다.

[P35-6]

국산 항공기 유압 피팅의 품질 인증을 위한 개발 시험 평가 체계 연구: 이동건*, 김순재, 김병재, 이행선(디케이락(주))

Keywords: 항공기 유압 피팅, 국산화 개발, 시험 절차, NADCAP 인정

항공기 유압시스템은 유압펌프를 통해 기계적 에너지를 유체의 압력 에너지로 변환한 뒤, 압력·유량·방향 제어를 거쳐 액추에이터를 구동함으로써 선회 및 제어력을 얻는 핵심 계통이다. 이러한 유압기기 간 결합을 담당하는 유압용 피팅(Fitting)은 높은 동작 압력과 가혹한 운용 환경을 견뎌야 하므로, 해외 선진업체의 독점성이 높고 NADCAP 인정 및 QPL 등재 등 진입 장벽이 매우 높다. 본 연구에서는 항공기 유압시스템용 피팅 부품의 국산화 개발을 목표로, 국제 항공 표준에 부합하는 종합 시험 절차를 수립하고 검증을 수행하였다. 특히 SAE AS4459 및 AS85421 규격에 따른 상세 시험 절차를 분석하고 세부 조건을 정립하였다. 본 연구 결과는 국산 항공기 유압 피팅의 신뢰성 검증 체계 구축 및 해외 인증(QPL/NADCAP) 대응을 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다. 사사의 글: 본 연구는 산업통상부와 한국산업기술진흥원의 “지역혁신클러스터육성(R&D, P0025288)”사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

[P35-7]

항공기 유압시스템용 빔씰 피팅의 형상 설계 및 성능 검증 연구: 이행선*, 김순재, 김병재, 이동건(디케이락(주))

Keywords: 빔씰 피팅, 플레어 타입 피팅, 형상 검증, 국산화 개발

항공기 유압시스템용 피팅(Fitting)은 유압기기와 튜빙(Tubing)을 결합하여 유체의 흐름을 전달하는 핵심 부품으로, 고온·고압 및 진동 등 극한의 운용 환경에서도 기밀성을 유지해야 하므로 항공기의 신뢰성과 비행 안전에 직접적인 영향을 미친다. 그러나 현재 국내 항공 유압 피팅 시장은 대부분 해외 수입 제품에 의존하고 있어 기술 자립 및 국산화 개발이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 국내 최초로 항공기 유압시스템용 플레어 타입(Flared type) 피팅을 개발한 디케이락(DK-Lok)의 기술력을 바탕으로, 항공기 유압 빔씰(Beam Seal) 피팅의 형상 설계 및 성능 검증을 수행하였다. 해외 항공 규격서(SAE 등) 및 선진사 제품에 대한 비교 분석을 통해 형상 설계를 완성하였으며, 주요 치수공차 및 실링 메커니즘을 검증하였다. 본 연구 성과는 수입 의존도가 높은 국내 항공 유압 피팅 기술의 자립 기반을 확보하고, 향후 국산 항공 부품의 해외 인증(QPL/NADCAP) 대응 및 산업 경쟁력 강화에 기여할 것으로 기대된다. 사사의 글: 본 연구는 산업통상부와 한국산업기술진흥원의 “지역혁신클러스터육성(R&D, P0025288)”사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

P36 : 집합조직
Room 1층 전시홀, 10월 30일

[P36-1]
Tailoring Intermetallic Connectivity of Al-Si-Coated 22MnB5 Steel through Solid-State Interfacial Diffusion Control: Hee Geon Lee, Hyun-Hak Kang, Seong Jeon(Incheon National Univ.), Si-Mo Yeon(Korea Institute of Industrial Technology), Hyun-sung Son(POSCO Steel Solution Research Lab), Tea-Sung Jun*(Incheon National Univ.)
Keywords: Hot stamping, Al-Si coating, Intermetallic connectivity, Surface integrity, Solid-state diffusion

Intermetallic connectivity in aluminium-silicon (Al-Si) coated press-hardening steel governs load transfer at the tool interface but is set during the heat treatment process. A pre-treatment at 500 ºC, below the Al-Si eutectic, conditions the pre-existing τ_5 (Fe_2Al_8Si) interfacial layer before an identical 900 ºC austenitization, so the routes differ only in the state entering it. No element is added and no new layer forms, and what changes is the distribution of the existing silicon (Si) between the Al-Si matrix and that layer, the Si held within it rising by 20 %. The η (Fe_2Al_5) matrix grows with [001] along the interface normal in every condition including the untreated one, so the pre-treatment changes not the growth direction but how much of the coating follows it. The area fraction of η with [001] within 30 º of that direction rises from 65.5 to 87.9 % and the maximum inverse pole figure intensity from 9.93 to 13.09, by depletion of large deviations rather than by any sharpening of the maximum. The low-aluminium zone (LAZ) changes from dispersed islands to a laterally continuous band, its banded fraction rising from 0 to 81.1 %. Measured by energy-dispersive spectrometry, the condition forming no band holds 19 % more iron (Fe) per unit area of interface than the banded one. By the Hart effective-diffusion framework, the architecture follows how uniformly Fe enters based on the Si accumulation within the layer obstructing the boundary paths that deliver it at discrete positions.

[P36-2]
극저온 처리가 6061-T6 알루미늄 합금의 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향: 전태민, 강현학, 전태성*(인천대학교)
Keywords: 알루미늄, 극저온처리

알루미늄 합금의 판금 성형을 통한 자동차 구조물 제조에는 높은 강도, 높은 연신율, 낮은 항복 강도 및 소성 변형 중 안정적인 가공 경화 거동이 필수적이다. 본 연구에서는 판금 성형성 향상을 위한 잠재적 접근법으로 6061-T6 알루미늄 합금 시트에 심층 극저온 처리(DCT)를 적용했다. X선 회절 분석 결과, 액체 질소 침지 중 DCT에 의해 유도된 부피 수축으로 인해 미세 변형이 발생하고 전위 밀도가 증가했다. DCT에 의해 유도된 미세 변형은 슬립 활성화를 촉진하여 <110> 방향의 {111} 면을 따라 우선적인 슬립을 유발했다. 이는 용체화 열처리-심층 극저온 처리-시효(SCA) 처리된 시편에서 T6 시편에 비해 결정 조직이 약화된 이유를 설명한다. 증가된 전위 밀도는 결정립계 이동에 추가적인 구동력을 제공하여 결정립 성장을 약 36.30% 증가시켰다. T6 시편에서 관찰되었던 바늘 모양의 β′ 석출물이 사라지고, SCA 시편에서는 미세하게 분산된 β″ 석출물이 형성되었다. 단축 인장 시험 결과, SCA 공정 후 이러한 미세구조 변화로 인해 최대 인장 강도(8.61%)와 연신율(50.41%)이 증가한 반면, 항복 강도는 T6 시편에 비해 4.38% 감소했다. 디지털 이미지 상관 분석(DIC) 결과는 SCA 시편에서 더욱 균일한 변형 분포가 나타나 안정적인 소성 변형이 가능함을 보여주었다. 이러한 결과는 심층 극저온 처리가 Al-Mg-Si 합금에서 강도-연성 균형을 향상시키는 효과적인 방법이며, 첨단 판금 성형 응용 분야에 유망한 가공 경로를 제공함을 입증한다.

[P36-3]
나노인덴테이션 기반 순수 Al 및 6061 Al 합금의 결정방위 연계 표면 응답 평가: 김보규, 한성희, 김대현, 한준희, 윤수빈, 이준한, 유은서, 김건호, 신중호*(강원대학교)
Keywords: EBSD, 나노압입, 알루미늄

제어된 압입 조건에서 순수 Al 및 6061 Al 합금의 국소 기계적 응답과 압입 후 표면 변형 거동을 비교하기 위해 나노인덴테이션 시험을 수행한다. 본 연구에서는 순수 Al, 용체화 처리된 6061 Al(SHT 6061), 그리고 열처리 조건이 다른 6061 Al 시편을 대상으로 경도, 환산 탄성계수, 겉보기 변형속도 민감도, 압입 크기 효과, pile-up 거동을 평가한다. 또한 가능한 경우 결정방위 정보를 함께 고려하여, 결정방위 및 시편 조건에 따른 국소 압입 응답 차이를 검토하고자 한다. Single indentation 및 continuous stiffness measurement(CSM) 기법을 활용하여 선정된 깊이 및 변형속도 범위에서 압입 응답을 비교하고, 환산 탄성계수의 안정성, 면적함수 민감도, 측정 산포, 접촉면적 불확실성을 함께 검토한다. 본 연구는 나노인덴테이션 결과를 단일 물성값으로 해석하기보다, 시편 조건과 결정방위 정보에 연계된 표면 응답 차이를 보수적으로 비교하고, 향후 EBSD 기반 결정방위 분석 또는 표면 형상 정량 분석이 필요한 조건을 식별하는 데 목적이 있다.

[P36-4]
Pt seed 층 패터닝과 CVD를 이용한 $PtSe_2$ 기반 MSM 구조 형성 및 특성 평가: 위신혜(동아대학교), 송유진(한국기초과학지원연구원), 김여진, 신한균(동아대학교), 한상섭*(한국기초과학지원연구원), 김정한*(동아대학교)
Keywords: 2D Material, CVD, $PtSe_2$, MSM

2차원 전이금속 칼코겐 화합물(transition metal dichalcogenides, TMD)은 원자 수준의 두께에서도 우수한 전기적·광학적 특성을

나타내어 차세대 전자소자 및 광전자 소자 분야에서 활발히 연구되고 있다. 그중 $PtSe_2$는 층수에 따라 반도체–반금속 전이 특성과 밴드갭 변화를 함께 나타내고 화학적 안정성이 우수하여, 별도의 도핑이나 이종 물질과의 접합 없이 단일 박막 내에서 전극과 채널을 형성할 수 있는 소재로 주목받고 있다. 본 연구에서는 이러한 특성을 이용하여 단일 $PtSe_2$ 박막 내에 금속–반도체–금속(Metal–Semiconductor–Metal, MSM) 구조를 형성하고, 구조적·전기적 특성을 확인하고자 한다. SiO_2/Si 기판 위에 E-beam evaporator로 Pt seed 층을 패터닝하고, 영역별 두께를 달리하여 증착한다. 이후 화학 기상 증착법(Chemical Vapor Deposition, CVD) 기반 selenization을 통해 $PtSe_2$를 합성하여, 하나의 박막 내에 금속성 영역과 반도체 영역이 공존하는 구조를 형성한다. 형성된 구조는 X-선 회절(XRD)과 투과전자현미경(TEM)을 통해 결정 구조 및 성장 방향을 분석하고, 에너지 분산형 X-선 분광(EDS)을 이용하여 화학적 조성 및 원소 분포를 확인하며, Raman 분광 분석을 통해 영역별 층수 및 결합 상태 변화를 평가한다. 이후 전류–전압 특성 측정을 통해 MSM 구조의 형성 여부와 전기적 거동을 확인하고, 광조사에 따른 응답 특성을 함께 평가한다. 이러한 결과는 단일 물질 기반 MSM 구조의 구현 가능성과 2차원 $PtSe_2$의 소자 응용을 위한 기초 자료를 제공할 것으로 기대된다.

[P36-5]

2.1D 반도체 패키지 기판 미세 비아의 상용 유기첨가제 기반 전해도금 구리 미세조직 분석: 김도현, 오은기, 신한균, 박 현, 김정한*(동아대학교)

Keywords: 반도체 패키지 기판, 구리 전해도금, 상용 유기첨가제, 구리 비아 충진, 미세조직

반도체 패키지 기판 내 미세 비아의 안정적인 전기적 연결을 위해서는 내부 결함이 없고 미세조직이 제어된 구리 도금층의 형성이 요구된다. 본 연구에서는 직경 20 μm, 깊이 10 μm의 비아 패턴이 형성된 유기 절연체 기판에 상용 유기첨가제를 적용하여 구리 전해도금을 수행하고, 첨가제 조건에 따른 충진 거동 및 도금 후 미세조직 변화를 분석하였다. 광학현미경과 집속이온빔(focused ion beam, FIB) 단면 분석을 통해 비아 내부 구리 도금층의 충진 형상과 결함 발생 여부를 평가하였다. 전자후방산란회절(electron backscatter diffraction, EBSD) 분석을 통해 구리 도금층의 결정립 크기와 형상, 결정방위 및 결정립 크기별 면적 분율을 비교하였다. 그 결과, 가속제와 억제제로 구성된 2원계 유기첨가제 조합 도금 시 농도 조건에 따라 컨포멀 증착 (conformal deposition) 또는 바텀-업 충진 (bottom-up filling)이 일어났다. 평활제를 추가적으로 첨가한 3원계 첨가 조건에서는 모든 조건에서 바텀-업 충진이 이루어졌으며, 평활제 농도가 증가함에 따라 오버필(overfill) 높이가 감소하는 경향을 확인하였다. 바텀-업 충진이 일어난 조건에서는 결정립 크기별 면적 분율이 미세 결정립과 조대한 결정립이 함께 존재하는 양봉 (bimodal) 분포가 확인되었다. 시간 경과에 따른 면저항 감소를 4-탐침(4-point probe)으로 분석한 결과, 조대한 결정립의 형성은 도금 초기의 0.1 μm 미만의 미세결정립이 상온 재결정에 기인한 것으로 판단되었다. 또한, 2원계 유기첨가제 기반 바텀-업 충진 조건에서는 [111] 방향의 집합조직이, 3원계 조건에서는 [110] 방향의 집합조직이 발달함을 확인하였다. 이를 통해, 도금 시 억제제와 가속제 조합에서 최적화를 통해 바텀-업 충진과 오버필 감소를 구현할 수 있으며, 바텀-업 도금 후 상온 재결정 및 결정립 성장이 결정립 크기 분포와 집합조직의 발달에 영향을 미치는 것으로 확인할 수 있었다.

발표자 색인



ㄱ

강규병 P15-4,수소1-2
강민욱 학생2-2
강민재 고온2-3
강민혁 집합1-4
강병진 P1-1
강서연 P30-8
강석형 피로3-4
강석훈 행융합2-5
강성규 피로1-4
강수성 적층6-4
강승민 생체2-3,역학1-1
강승연 상변태1-5,P5-10
강신욱 P9-4
강원묵 P28-17
강재영 P21-4,적층2-5
강재욱 철강B3-1
강전연 철강B3-5,미세1-2
강정구 학생심포2-1
강주원 알루미늄2-4
강찬 수소4-1
강채영 소프트2-4
강태연 학생4-1,여성2-2
강태욱 P11-16
고경민 철강B2-5
고덕황 항공3-3
고도열 P11-8
고신범 비철3-3
고은찬 P9-11
고의준 이차전지4-3
고태영 인공3-2
곽다희 P35-2
곽륜호 수소1-4
곽선영 P1-35
곽소민 P1-12
곽종현 철강B1-7
구권빈 P1-65
구본준 표면계면3-1
구준형 전산2-2
구혜영 행융합2-2
권다미 P18-15
권동일 피로3-1
권민지 P28-15
권민철 P25-3
권성진 행융합1-1
권시은 적층3-3
권완건 P1-14
권용남 재료가공1-4
권용준 P31-4
권제영 P14-3
권주민 P17-10
권지선 P13-6
권진영 P33-11
권홍기 표면2-1,P2-5
금대호 P1-75
김가영 P7-15
김가은 P12-7
김강산 P19-1
김경식 재료분석3-1, 수소경제1-3
김경택 마그네슘2-3
김광균 P27-2
김광희 P29-2
김규낙 P12-14
김규헌 P14-1
김근채 P24-12
김기수 재료가공1-1
김기원 철강A2-3
김기현 이차전지4-1
김나영 이차전지3-2, P11-4
김대식 P7-3
김대영 P9-22
김대한 P1-47
김대현 원자력1-2
김덕 저탄소1-2
김도경 P24-2
김도원 P11-27,여성2-6
김도현 학생1-4,P36-5
김동규 P17-15
김동우 P8-11,P13-9
김동은 P1-59
김동익 미세1-1
김동진 P1-39
김동하 에너지3-3
김동혁 P35-5
김동현 P1-25
김두연 P12-21
김두원 적층2-3
김래언 용접1-3,고엔4-1, 적층4-6
김려현 P11-18
김명주 P31-3
김문조 저탄소3-2
김미림 반도체1-5
김미소 여성1-2
김미애 P4-9
김민균 재료분석4-2
김민석 P1-74,P35-1
김민수 복합1-1
김민종 고엔3-5
김민준 P33-28
김민중 청정2-2
김민지 P4-2
김민철 집합1-3,P7-19
김민혜 표면계면3-5
김민희 P16-7
김보규 P36-3
김보민 P1-6
김서사랑 P28-2
김서연 P28-9
김선진 P5-14,상변태1-6
김성곤 항공엔진4-5
김성원 항공1-4
김성윤 P15-13,P22-3
김성제 마그네슘1-4
김성진 철강A2-1
김성환 용접1-2,수소4-4
김성훈 표면1-3
김송이 P4-8,P12-20
김송현 P17-5
김수민 P20-11
김수빈 P11-25
김수정 P29-9,P17-1
김수현 P29-5
김수환 P18-5
김승규 P1-41
김승용 P19-4
김승윤 생체2-4
김승현 열처리1-4
김시현 P1-71
김양균 피로4-3
김여빈 P4-7
김여진 P1-77
김영규 반도체1-6
김영근 철강A2-5
김영민 AW2-2
김영서 알루미늄2-3
김영석 P2-4
김영순 피로1-3, 항공엔진3-5
김영우 항공1-1
김영찬 피로4-4
김영태 P1-27
김영환 P28-1
김영훈 학생2-1,역학3-4, P29-11
김예본 P11-10
김완 상변태3-1
김용유 P18-13
김용진 철강기술3-2
김우진 열처리2-3
김유리 학생3-2
김유빈 P20-5
김유섭 P17-16
김유진 P25-8,여성1-4
김윤진 P13-16
김윤하 P13-14
김윤호 소프트1-5
김은성 항공엔진2-3
김은영 항공엔진1-1
김은찬 고온3-5
김은채 P32-18
김재성 용접2-3
김재인 P31-6
김재형 P11-2
김정기 터빈2-3
김정민 P15-10,P15-11, 마그넷2-3
김정석 원자력1-5, 저탄소2-3
김정한 재료가공2-3
김종훈 P1-19,고온2-2, 고온3-6
김주안 P1-46
김주영 재료가공3-1
김주현 P7-1
김주훈 철강A4-3
김준엽 P13-8
김준하 표면1-4
김준혁 P15-3,타이타늄1-2
김중훈 P7-6
김중휘 P1-16
김지민 P15-5
김지은 P23-6
김지현 P29-10
김지훈 철강B2-1
김진모 P24-3
김진용 항공엔진2-2
김진우 적층5-5
김진원 P1-23
김찬 P11-11
김채원 항공2-2
김철민 P14-11
김태균 P7-2
김태연 P9-10
김태엽 P8-4
김태영 P17-17
김태웅 P24-4
김태윤 P20-2,타이타늄3-3
김하늘 알루미늄1-5
김하진 P1-72
김한중 P8-5
김현 P9-16,철강B2-3
김현길 원자력2-1
김현영 P15-1
김현웅 소성2-1
김현일 P8-12
김현중 P10-8
김현진 P15-6
김형일 P22-4
김형준 알루미늄3-4, 전산2-1
김혜진 수소경제1-5
김호병 P12-18
김홍민 타이타늄3-1
김희은 용접2-2,P8-15

ㄴ

나찬수 P7-8
남정훈 수소2-6
남지민 수소3-5
남충희 마그넷1-5
남현지 재료강도2-3
노시언 P28-13,고엔3-2
노주림 학생4-2
노준혁 P27-7
노흥렬 비철4-1

ㄹ

류진호 원자력1-3
류채우 상변태2-1
류호진 미래원자력2-2

ㅁ
명건우 P1–43
목동현 전산1–4
목승민 재료강도4–2
문광현 P28–7
문승현 재료강도1–3
문제현 차세대디플1–1
문준혁 상변태3–7,P34–4
문지성 P13–13
문천우 나노1–2
문태영 P14–2
문하영 비철3–2
민성구 철강A1–1
민현기 P1–18
ㅂ
박건우 P14–10
박광석 원자력2–5
박규민 항공엔진4–1
박규완 P1–2
박기덕 신뢰성2–3
박나현 P17–18
박노근 타이타늄동향1–4
박령주 타이타늄1–1
박루빈 표면계면2–2
박민수 적층4–1
박봉천 신뢰성1–1
박상규 P7–13
박상민 P25–10,P29–6
박상선 피로1–1
박상욱 P11–24
박상채 수소환원1–4
박성민 P7–4
박성현 P12–11,P34–1, 재료분석1–2, 항공1–6
박성환 이차전지2–2
박세진 피로2–3
박소연 생체3–4,적층3–5
박수정 P28–4
박시현 역학4–2
박예린 알루미늄2–2
박용욱 전산2–5
박용준 타이타늄동향3–2
박용진 신뢰성2–2
박용하 신뢰성3–1
박이호 신뢰성1–2
박재범 이차전지1–1
박재영 수소경제1–2
박재혁 타이타늄동향1–2
박재현 재료강도2–4
박재형 인공3–3,P30–5
박정빈 P15–9
박정섭 철강A3–6
박정현 용접1–4,P11–14
박종건 P14–7
박종성 표면계면3–2
박종인 P13–17
박종찬 P1–9
박종형 P13–7
박종훈 전산3–4
박주영 피로1–2
박주현 P14–5
박준서 재료강도2–2
박준영 재료강도4–1
박준용 이차전지3–1
박지언 재료가공3–2
박지욱 알루미늄1–3
박지환 타이타늄동향1–3
박진모 P1–5
박태연 역학3–2
박하음 P11–3
박현 미세3–2
박현재 복합3–3
박현준 용접3–4
박훈영 상변태1–2
방일호 수소경제1–4
방종원 용접1–1
방지호 P35–4
방진현 학생1–2
방현식 P9–27
배가현 생체1–1
배민혁 용접2–4
배병진 P9–20
배상현 청정1–2
배성욱 비철4–3
배소영 재료강도3–2
배영훈 P17–11
배재한 P19–6
배주은 P11–6
배준우 P1–26
백건우 적층4–4
백민아 P27–13
백민재 항공3–2
백승진 P34–5
백시은 P7–20
백용현 항공엔진2–1
백인섭 재료강도4–3, P17–2
백재영 고온1–2
백정연 용접3–2
변영훈 인공2–3
변지우 P9–13
ㅅ
서기완 P30–10,타이타늄2–2
서민서 적층5–3
서보운 P18–16
서세덕 P29–7
서승원 학생1–3
서예진 적층1–2
서위걸 마그네슘1–2
서유빈 P1–60
서재완 수소2–4
서진유 AW2–1
석왕록 P30–11
선현덕 P27–10,수소1–3
성동건 P1–67
성용훈 P27–4
성준호 타이타늄동향4–1
성효진 P14–8
소성민 표면계면3–4
손광태 수소3–4
손성빈 P4–4
손성하 철강B1–5
손영욱 철강기술1–2
손은지 알루미늄3–3
손현우 알루미늄2–1
송기욱 학생1–5
송덕용 항공엔진1–4
송민철 타이타늄4–2
송병준 미래원자력1–2
송상우 행융합1–2, 철강기술2–1
송상윤 수소4–2
송영준 P1–40
송원택 상변태3–5,P5–2
신기로 P1–13
신병수 P9–23
신선웅 P18–2
신수빈 NeXS2–5
신승환 고온3–2
신우승 상변태2–2
신윤우 항공2–4
신윤재 철강A4–1
신윤지 P27–5
신재원 철강A3–7
신재혁 항공엔진1–2
신좌영 수소2–5
신주원 P1–38
신찬선 원자력1–4
신현우 철강A1–4
심승현 철강A3–5
심영민 P1–49
심이준 수소4–6
ㅇ
안동혁 고온1–1
안동현 P7–11
안민호 소성2–4
안성민 반도체1–4
안정수 P7–22
안종빈 마그넷2–1
안지영 P12–13
안효주 P13–1
안효진 P7–14
안희주 P30–4
양세웅 P1–22
양수미 소성2–2
양승우 열처리1–5
양원석 P9–15
양원존 신뢰성1–3
양하영 학생2–3,P5–1
양현석 P2–6,P9–19
어윤경 P18–3
엄호용 철강B3–6
엄희진 피로4–2
여승민 P1–42
여인혁 고엔1–5
여준기 고온2–1
예정원 P28–18,철강B3–3
오동규 철강B2–2
오동현 생체1–3,P30–14, 신뢰성2–1
오사랑 P1–21
오상준 P28–3
오선근 타이타늄4–3
오성민 생체4–4
오성탁 철강B4–4
오승철 타이타늄동향2–1
오은기 집합1–1
오재석 P1–7
오정민 P8–14,용접1–5
오지윤 P1–8,P11–26
오진우 P33–24
오혜민 P13–10
왕은찬 철강B4–7
우정현 P29–13
원윤정 마그네슘2–1
위신혜 P36–4
위태규 철강A1–5
유민 P1–53
유상현 수소2–3
유승원 P3–7
유시원 복합4–3
유윤재 철강A4–7
유재홍 열처리2–4
유정민 P27–6
유태현 P25–1
유한준 복합1–2
유현용 P11–1
유희일 P32–22
윤교식 고엔2–3
윤국노 P1–79,P1–80, 상변태1–1
윤대위 P23–5
윤성민 열처리1–1,P8–10
윤성준 P17–3
윤소연 P1–11
윤연희 P9–3
윤영식 P8–3
윤영준 P9–5
윤재원 수소3–1
윤정민 P1–48
윤제인 상변태2–4,P5–5
윤주희 고엔1–1
윤준원 원자력2–4
윤지상 P11–20
윤지용 P17–4
윤지현 P7–17
윤태경 P1–61
윤혜진 P12–9
윤호균 복합3–1
윤희수 수소2–2
이강진 고엔4–2
이강현 적층6–3
이경은 P34–8
이경환 P30–6,여성2–3
이광석 재료가공2–1
이규필 P5–15
이금미 고엔2–5
이기안 재료가공1–3
이나경 P32–9
이도연 나노1–5
이동건 P35–6
이동규 P11–12
이동석 철강기술2–3
이동욱 소프트2–2
이동혁 P8–7
이동현 역학4–1
이동화 학생심포2–1
이동희 P28–5,P12–1
이락규 P18–10
이명준 상변태3–6
이미영 알루미늄1–2
이민서 P31–1
이민제 적층3–1
이병덕 저탄소2–2
이병수 P12–24
이병찬 행융합2–3
이병현 피로2–4
이상곤 항공엔진3–3
이상관 마그넷2–6
이상림 고온2–4
이상민 P25–9
이상엽 P29–8
이상우 P28–14
이상익 알루미늄3–1

이상현 P1–24,용접3–3, P25–11,P10–3
이서진 P11–5
이석규 철강B3–2
이선영 철강A4–5
이성 마그네슘1–1
이성민 원자력1–6
이성호 타이타늄1–3
이성희 철강A4–4
이소명 철강A3–1
이소영 비철1–1
이수연 열처리2–2
이수현 P8–8
이수형 생체2–1
이수환 수소환원1–2
이승익 항공엔진3–1
이승준 열처리1–2
이승호 철강B3–7
이승희 P13–11
이시우 타이타늄3–2
이아름 재료강도3–3, P17–9
이언진 P17–8
이영석 수소환원1–1
이영인 P17–20
이영주 철강B2–6
이원재 P33–6
이원진 저탄소3–3
이원찬 원자력1–7
이원희 원자력2–2
이유진 에너지4–1,적층1–5
이윤서 P28–12
이윤선 P11–23
이윤진 P21–1
이윤호 알루미늄2–5
이은세 적층6–2
이은재 P33–5
이의재 P9–1
이의종 적층3–2
이인영 P20–9
이재관 타이타늄2–3
이재민 철강B4–6
이재용 수소1–5
이재현 터빈1–1
이재형 알루미늄1–1
이재훈 P8–1,P17–7
이재흥 고엔2–6
이정림 P11–21
이정민 학생3–1,적층4–2
이정우 P17–6
이정재 P27–3
이정훈 상변태2–7,청정1–1, 항공엔진3–4
이제명 수소경제1–1
이종범 P20–12,P18–9
이종언 타이타늄4–4
이종혁 열처리2–1, 인공3–4
이주영 P11–22
이준민 P27–1
이준섭 재료분석2–3
이준영 철강B4–1
이준호 마그네슘1–3, 철강기술1–1
이지원 P20–13
이지윤 P20–6
이지혁 P13–5
이진규 수소2–1
이진우 P24–6
이진원 P6–1
이찬영 역학4–3,P29–12
이찬준 철강A1–6
이창수 청정2–4
이초롱 타이타늄동향2–2
이태규 터빈2–4
이태현 학생4–4
이태호 복합2–2,재료분석1–3
이택 소성1–3
이푸른 P22–5
이하훈 고엔1–3
이학현 전산4–3
이행선 P35–7
이현석 재료가공2–2
이현수 표면2–4
이현주 P12–8
이현준 비철1–4,역학3–3
이현채 P4–1
이형수 터빈3–3
이호원 인공1–5
이홍철 피로4–1
이효연 P12–3
이희상 상변태1–4
임가람 터빈1–3
임광영 미래원자력1–1
임광혁 수소3–3
임규석 P12–2
임기찬 P13–12
임민혁 P1–32
임상엽 P7–23,P7–25
임성진 P5–4
임용수 철강B1–3
임정현 P1–17
임종섭 타이타늄1–4
임준휘 P29–4
임지수 철강A3–2
임지해 P1–71
임지호 적층3–4
임진수랑 상변태2–6,P30–12
임진환 P24–10
임태민 P1–30
임현빈 고엔1–6
임효정 WISET1–2

ㅈ

장광후 P27–12
장대건 P24–11, 타이타늄동향3–1
장동민 P11–9
장민관 철강A2–6
장민서 P32–20
장서현 역학2–2
장성문 P5–11
장성혁 고엔2–1
장세윤 학생심포1–1
장정아 비철2–4,P12–15
장준혁 P7–16
장준호 상변태1–3
장태석 마그넷2–5
장형욱 전산4–6
장호연 전산2–3
전민수 적층5–4
전민우 항공엔진2–5
전상현 이차전지2–3
전세훈 나노2–4
전소희 학생3–3
전순혁 P3–8
전정민 알루미늄3–2,P9–7
전종배 재료가공3–3, 항공엔진4–3
전준협 P30–16
전찬혁 P11–15
전태민 P36–2
전한솔 역학2–4
전혜원 P1–50
정경재 역학3–1,전산4–1, 미세3–1
정다운 P20–3
정대호 항공3–1
정민섭 철강B1–4
정민재 항공1–5
정상우 타이타늄동향4–3
정설빈 소성1–2
정소영 차세대디플1–3
정용석 수소환원2–3
정우철 P12–17
정유인 타이타늄동향1–1
정윤종 고엔3–6
정은진 학생심포1–2
정이화 비철2–3
정인호 AW1–2
정재원 재료분석4–1
정재윤 P9–28
정준모 P12–4
정중은 재료가공3–4 ,터빈2–2, 항공엔진4–4
정지석 P9–14
정찬우 재료분석2–2
정창우 표면계면3–3
정현 수소4–5
정현우 비철2–2
정현종 P10–6
정현준 P5–3
정회연 역학1–2,P29–1
정훈 P33–1
정휘윤 P28–8,상변태2–5
정희재 고엔4–4
조규민 학생4–6
조덕현 고온1–4
조모현 여성2–4
조민식 P12–10
조병일 신뢰성3–2
조상현 열처리2–5
조서연 타이타늄1–5, 항공엔진3–2
조수용 P7–21
조예진 P7–10
조용희 항공엔진2–4
조우빈 P9–21
조원준 P18–1
조윤지 항공3–4
조은서 P4–6,복합1–3
조은준 항공2–5
조인식 피로2–2,저탄소3–1
조재동 철강기술2–4
조재우 표면2–2
조준영 수소3–6
조중욱 행융합2–1
조해주 적층6–1
조현석 철강B2–4
조현욱 역학1–3
조호근 적층1–3
조효민 여성2–1
조휘재 전산4–2
좌리노 P19–3
주수빈 적층5–1
주신형 P12–5
주재성 타이타늄2–1
주정희 철강A4–2
진봉민 철강A1–2
진시원 P27–9

ㅊ

차다은 적층2–2
차성철 청정1–3
차은빈 P16–1
차은환 P13–4
채동현 마그넷1–4
채민석 철강기술3–1
천세호 인공1–3
천영범 미래원자력2–1, 타이타늄동향3–3
천재용 적층3–7,P13–2
천해영 P24–9
최광수 P21–5
최국선 타이타늄동향2–3
최권훈 청정2–3
최동기 P17–13
최동현 수소4–3
최문수 비철3–1
최민호 적층3–6
최병철 P27–8
최봉재 P12–25
최상구 P15–8
최성규 저탄소1–1
최성호 P33–9
최성훈 P1–45
최수환 P14–6
최순원 고엔3–1
최승규 P9–24
최시우 P1–37
최언준 소성2–3
최영원 항공3–5
최용훈 항공엔진1–3
최우섭 P33–12
최우솔 P1–33
최윤석 터빈1–2
최윤실 저탄소1–3
최은비 복합2–1
최은선 P24–1
최재영 P15–2,열처리1–3
최재혁 역학2–1
최정묵 타이타늄동향4–2
최정석 P11–13
최정현 수소3–7
최정훈 P28–10
최종범 P1–73
최종성 피로3–2
최주미 고엔2–2
최준성 이차전지1–2
최준혁 알루미늄1–4, P30–7
최지연 P1–29
최지원 P1–10,철강A3–3
최진솔 타이타늄4–1
최진주 P9–26
최호준 철강B4–5

ㅎ
하륜 이차전지3-3
하수빈 고엔1-2
하원 P9-17
하재민 P1-15
하주영 철강A3-4
하준서 학생1-6
하태권 재료가공1-2
한규미 고엔3-4,여성1-3
한도경 용접2-1
한무호 수소환원1-5
한상윤 학생4-3,P28-6
한선구 상변태3-4, 여성2-5
한성경 철강기술2-5
한성희 집합1-2
한수빈 P35-3
한수지 용접3-1
한승전 학생심포2-2
한예진 P21-2
한재연 P17-14,P17-19, P11-19,적층1-4
한정훈 철강B1-2
한지민 적층5-2
한지혜 철강B4-3
한창현 P33-26
한철웅 P16-8,P6-3
한효주 P9-31
한흥남 행융합1-3
한희주 복합3-2,P20-4
허민아 고엔3-3
허상현 P19-5
허성규 P12-16
허성준 고온2-5,P25-7
허윤제 P1-52
허재혁 P29-3
허홍 P1-44
현명우 P5-17
현세미 재료강도3-1
홍다준 P1-51
홍민우 P1-4
홍성준 표면2-3
홍영오 학생3-4
홍정화 역학2-3
홍지우 P21-3
홍현욱 터빈2-1
황건호 마그네슘3-2
황건희 P11-7
황동현 P8-9,P25-4
황병철 철강기술2-2
황승환 P8-2
황예나 P1-3
황예민 P1-20
황의정 P5-12
황재윤 수소3-2
황종일 저탄소2-1
황지인 비철2-1
A
Addisu Boshe Botto 터빈1-4
Alisher Sultangaziyev P32-17
Amir Aghababaei 적층2-1
Ana Paula Nolasco Aguilera 고엔2-4
B
Bo Hyun Park 타이타늄2-4
Bohyun Yoon 전산4-5
Bokyeong Kim 인공3-1
BOKYEONG SOHN P23-7
boyoung yoon P3-4
Burhan Febrinawarta 비철1-2
BYEONGJUN KIM P32-8
ByeongKwon LEE P9-6
Byung-Gil Yoo 재료강도1-2
ByungHee Kim P32-6
Byunghyun Kim 나노2-6
Byungki Ryu 전산3-1
Byungrok Moon NeXS2-3
C
Chaeyoun Kim P20-7
Chaeyun Jin P1-63
Chan Hee Lee 고온3-4
Chan Jeong 고엔4-3
CHAN YOUNG LEE P6-4
Chang Geun Lee 철강B4-2
Chang-Gi Lee P18-7
Changhoe Lee P34-7
CHANSIK YOON P32-16
Chanyeong Jeon P34-6
Chanyoung Choi P26-6
Cheon Woo Moon EML1-2
Chien-Lung Liang EASSR1-3
Chihun Kim 전산1-5
Chinmai Bhat AMPM2-1
Chun-Hao Chen EASSR2-2
D
Dadong Jie 표면1-2
Dae-Seo Kwon 적층1-1
Dahee Gwak 철강A2-4
Dahye Han 학생4-5
Dahyun Lee 소프트3-1
Dayoung Kang P23-3
Dilshodbek Yusupov P28-19
Do-Hyeon Kim 마그네슘1-5
Dong Hyun Lee P10-1
Dong Keun Han 복합4-2
Dong-Sung Won 생체4-3
Dong-Uk Kim 전산4-4
Donghee Ryu P25-6
Donghee Shin 소프트4-4
DongHyun KIM P1-28
Donghyun Oh P32-10
dongjun Shin P12-23
dongsoo lee P3-5
Dongwoo Kim P32-23
Doo-Hyo Jeong 재료분석4-3
doyoon kim P33-4
Du Hyeon Woo 마그네슘2-4
E
Elif Nur ADALI P17-12
Eom Hee Seung P3-3
Eugene Cho P32-31
eujin Kim P33-17
EunAe Shin P34-12, P34-11
EunHye Kim P31-2
F
Francesco Grazzi NeXS1-1
G
Gaheun Shin P30-3
Gahyun Choi P3-9
Gang Ho Lee P14-9
GANGALA ANIL KUMAR 적층2-4
Geongyun Bong 전산3-5
Gi-Hyun Lim P2-3,P9-8
gihoon kwon P2-7
girim Park P33-25
Go Eun Kim 상변태3-2, P9-18
Goum Min 소프트2-5
Gun Woong An 마그네슘3-4
Gunjick Lee P28-16
GwangJoo Jang P14-12
Gyeongrok Oh 고온2-6
GYOKHANG PARK 철강A4-6
GYOO RIN KIM WISET1-1
GyunTae Kim P7-9
Gyuri Shin 생체1-5
H
Hae Jin Park P5-13
Hail Park P22-7
Han Kim 나노1-1
Hanul Jeon 항공1-2
Hanwool Yeon EASSR2-4
Haroon Kamal 비철1-3
HaSeong Baek P24-8, 항공1-3
Hayeon Jeong 소프트2-3
Hee Geon Lee P36-1
Hee-Tae Jeong P15-7, 에너지1-4
Heeju Kim 이차전지1-3
Heewon Kang P16-4
Hidemi KATO KJ1-3
Himchan Cho 차세대디플2-3
Ho Jae Kwak NeXS1-3
Ho-Jeong Kim 마그넷1-2
HOANG CUONG PHAN 인공2-2
Hoang Hai Nam Nguyen 인공3-6
HOON-HWE CHO 미세1-3
Hosea Simanjuntak P13-3
HUIYEOL LEE 전산2-4
Hun-Min Jo 전산3-2
Huseung Lee P18-4
Hwan Seung Heo P33-3
Hwangsun Kim 재료분석3-2
Hwasung Yeom 원자력1-1
HWIWON KIM P33-16
Hye Ji Jo P33-2
Hye Jin Hwang P1-66
Hyeokju Kwon 소프트1-2
Hyeon-jun Heo P9-9,P9-2
Hyeon-Seo Lee P3-2
Hyeonggeun Kim 인공1-2, P30-9
Hyeongmin Yu 에너지2-3
Hyeonji Shin P30-2
Hyeonsu Park 인공4-1
Hyeonsu Son P33-10
HyeSu Kim P10-9
Hyeuk Jin Han 나노1-3
Hyo joo Lee 타이타늄3-4
Hyoju Son P22-1
Hyojung Kim 나노2-1
HyoSang Yoo P9-29
Hyoung Chan Kim 행융합1-4
Hyuk Choi 전산1-1
Hyun Dong Jung 전산1-2, P33-8
Hyun Su Kim 에너지1-3
Hyungdoo Lee P3-1
Hyungi Min P5-7, 인공2-5
I
Igon Kim P30-19
Ill Ryu EASSR2-1
Ito Daisuke NeXS1-2
J
Jae Bok Seol KJ2-1
Jae Eun Jin P4-5
Jae Ho Kim EML2-2
Jae Hur 수소1-1
Jae Woong Bae KJ2-3
Jae-Yeon Kim 생체3-2
Jaeha Cho P32-3
JAEHEUNG LEE NeXS2-4
Jaehyuk Kim P23-2
Jaehyung Cho 미세2-2
Jaejun Jeong 항공2-3
Jaemin Wang 적층6-5
Jaewoo Shim P32-7
Jalal Kangazian Kangazi 적층4-3
JANG HYEON OH P33-22
Jangjung Kim 철강B1-6
Je Hyeong An 마그네슘3-1
Je In Lee KJ2-5
Jenn-Ming Song EASSR2-3
Jeong-Han Lee P15-12
Jeonghoon Lim 청정2-1
JeongHun Shin P32-11
Jeonghwan Kim P16-9
Jeongwoo Kim P16-5
JeongYeol Park 표면계면1-1
Jewoong Lee 차세대디플2-2
Ji Hoon Park 반도체1-1
Ji Won Kim P26-4
Ji Young Kim P20-10
Jia Hanbing P25-12
Jieun Lee 나노1-4, P5-8
Jieun Ryu 철강A2-2
Jieun Seo 학생4-7
jiho kim 원자력2-6
Jihoon Huh 표면계면2-3
Jihui Son P22-6
jihun Yim P34-9, 에너지4-3
Jihyeon Song 생체1-2
Jihyun Lee P32-27
Jimin Han P30-13
Jin Kim 나노2-2
JINGYA WANG P16-3
Jinhyun Kim EML1-3
Jinsoo Na 소프트4-6
Jinuk Moon 인공1-1
Jinwoo Seok P11-17
Jioh Yoo 소프트1-3
Jisu Kim P8-13
Jiyeon Kim P13-15
Jong Oh Jo 수소환원2-2
Jong-Hyeok Kwon 재료강도2-1
Jong-hyoung Kim EASSR1-4
Jong-Oh HAM 신뢰성2-4
Jongbeom Park P32-12
JONGDAE HONG 미래원자력1-3
Jonggun Jung P34-3
Jongil Lee P10-5

jongtae kim P28–11
Jongwon Park 학생1–1
Joo Hyun Park 수소환원2–4
Jooho Park P13–18
Joon Sung CHOI 이차전지2–1
Joonhee Kang 인공2–1
Joonho Lee P32–33
Jueun Kim P25–2, 생체2–5
Jun Mok Ha P6–5
Jun–Hyeong Seo 에너지2–1
JuneYoung Lee P5–9
Jungho Shin 역학1–4, 피로3–3
Jungjin Cho P7–7
Jungmin Lee P7–18
Jungyu Kim 철강A1–3
Junho Hwang 복합4–1
Junoh Jung 에너지1–2
Junseok Park P32–2
Junsoo Lee 전산2–6
Junyeong Jo 수소2–7
JunYoung Kim 에너지2–2
junyoung son NeXS1–5
Juwon Hwang P1–57

K

Kang Rae Cho P18–12
Kazuya Z. SUZUKI KJ1–5
Keehoon Kang 차세대디플1–4
Kenta Yamanaka AMPM1–3
Keonwook Kang 행융합2–4
Kihyun Kim P26–3
Kim Dong–Kyu P9–30
KIM HYUN MIN P1–55
KIM JAEHYUN 표면계면1–3
Kiran Shinde P18–8
kiwon yang 인공4–4
Koichi TSUCHIYA KJ2–4
Korlan Duisenova P32–19
Krishnamohan Thekkepat 전산3–3
Kunmo Koo 재료분석2–1
Kwangil Seo 상변태2–3
Kwangsik Kwak 재료강도1–1
Kwanwoo Jeon P16–6
kyeongmi lee P26–5
Kyo–Min Kwon 알루미늄3–5
Kyoung Il Moon 표면1–5
Kyung–Ho Park P32–14
Kyungmi Lee 마그넷1–3

L

LEE CHUNGWON 나노2–3
LEE GWANGHEON 소프트4–2
Lee Hyungdoh P23–4
Lee Yohan 표면계면1–4
Lia Saptini Handriani 반도체1–2

M

Ma Qian AMPM1–1
Madi Arsakay P32–29
MERDAN FARHADOV P1–34
Mi–Jeong Kim P32–24
Min Jik Kim P19–2
Min Jun Ko 생체4–1
Min–Jae Choi 차세대디플1–2
Min–Su Lee P7–12
Mingi Kim P32–32
Mingyo Jeong P10–7
Minh Tien Tran 인공4–2
Minhun Kim P1–58
MinJae Kim P32–26
Minjeong Kim P32–13
Minji Kwon P34–2
minjun cheon 반도체1–3
Minjune Park P8–6
Minkyung Kwak 상변태1–7
minwoo Park P32–4
Minyeong Cheon WISET1–4
Mohammadmilad Jafarzadshayan 철강B1–1
Moo Young Jung P6–6
Moon Kee Choi 여성1–1
MUGEUN SON 인공1–4
Muhammad Akmal 고온3–1
Myoung Hoon Song 차세대디플2–4
Myoung–Gyu Lee 피로2–1

N

Narae Lee 표면계면1–2
Nguyen Viet P12–6
Nokeun Park KJ1–2
Nu Ri Shin 재료분석3–3

O

OnYu Ha P27–11

P

Park Jeongeun P33–7
PARK TAECHANG 철강B3–8
PYOCHAN KIM 에너지1–1

R

R. Lakshmi Narayan AMPM1–2
Rehman Izaz Ur 고엔1–4
Renlong Xiong AMPM2–3

S

Sang Hun Shin 철강B3–4
Sang Hwan Son 수소환원1–3
SANGHUN KIM P7–5
SangJun Ma 소프트3–6
Sangwon Lee 터빈3–1
Sangwoo Ryu EML2–3
Se Hoon Jung P32–5
Se–Hun Kwon 청정1–4
Seeun Jang P1–54
Seeun Oh 에너지2–4
Sejin An P18–6
SEO YUN CHOI P1–69
Seo–Hui Park 인공4–3
Seogyeong Park P1–64
Seohee Jang P33–19
Seok–Woo Hong 항공2–1
seokho lee P33–23
Seong Ju Han P4–3
Seong Min Choi 마그넷1–1
Seong–yu Choi 소프트1–1
SEONGBO JANG P34–13
Seongeun Oh P33–27
Seongho Lee P30–1
seongjun kim P10–2
SEONGWON LEE P33–15
Seoung–yooun Yu 마그네슘2–5
Seoyeon Bak 원자력2–7
Seoyeon Kim P30–15
Seoyeon Park P20–1
Seung Jin Eo P26–7
Seung Jun Lee 소프트4–1
Seung Min Jane Han EASSR1–2
Seung Woo Kim P1–70
Seung Zeon Han AW1–1
Seung–Ho Lee P12–12, 비철4–4
Seungchang Han 전산1–3
Seungeui Hong P10–4
Seunghun Shin 소프트4–5
Seungjae Choi P34–10
SEUNGJI LO 표면계면2–1
Seungjin Baek 에너지4–2
Seungkyun Yim AMPM2–2
Seungmin Jeon 철강B4–8
Seungmin Lee P18–14
Seungyeon Lee 인공2–4
Shaik Mahammad Ali 터빈3–2
Sheng Yu 고온3–3
Shi–Hoon Choi 미세2–1
Shuhei YOSHIDA KJ2–2
Siheon Lee 소프트3–4
Siwi Setya Utami 생체1–4
Sohyun Suk P1–62
Song Hee Kim P26–2
Soohyun Joo KJ1–4
Soomin Jung 소프트3–3
Soyeon An P3–10
soyun Park P33–18
Steven E. Naleway AW2–3
Su Min Lee P32–30
Su Rin Cho 복합2–3
Subin Ahn 상변태3–3, P5–6
Sueun Choi WISET1–3
Suhee Jang 인공3–5
Suhyeon Woo P22–2
Sujin Jo P1–76
Sumin Kim 마그넷2–4
Sung Hwan Hong P12–19
Sung–Yong Kim 수소환원2–1
Sungbin Shin 소프트3–5
Sunmi Shin EASSR1–1
Suyeon Kim P32–15
Syed Manzar Abbas Kirmani 표면1–1

T

Tae Gyeong Kim 고온1–5, 적층4–5
Tae Hyeon Hwang P14–4
Tae Jeong Kim P1–56
Tae–Hyeok Kang P18–11
Taehoon Ha P1–68
Taesik Eom P32–34
TaeYeon Lee P6–2
Tea–Sung Jun 미세3–3, 항공엔진4–2
Thiri Shwe Sin 상변태3–8, P5–16
To Hai Ha Nguyen 마그네슘3–3

U

Ui Hyun Baek P9–12
Uk Sim EML2–1
UN HWAN LEE 전산1–6

V

VIJAY GUPTA P32–21
Vladimir Luzin NeXS2–1

W

Won hyo Yoo 재료강도1–4
Won Pyo Hong 마그네슘2–2
Won–Hyoung Lee P24–5
Wonjong Jeong 원자력2–3
Wonyong Kwon P1–36
Wonzee Jung 인공4–5, P33–14
Woo Jin Kim 소성1–1
Woo Yeong Jeong 에너지3–1
Woocheol Shin P2–2
WooChul Jung EML2–4
Woojoong Kim 소프트2–1
WORAKAN TONGPRAPAI NeXS2–2

X

XUE HAN P32–25

Y

Ye–Rin Jang P31–5
Yeji Lee 생체2–2
YEJIN KANG 이차전지4–2, P16–2
Yeon Ha Jo 표면계면2–4
Yeonhong Kim 인공4–6
Yeonju Noh P24–7
Yeonwoo Do P33–21
yerin Ha P26–1
Yeseul Mun P1–31
Yewon Do P3–6
YeWon Han P2–1
Yijie Ban 비철4–2
YoHan Lee 복합2–4
Yong Eun Cho 소프트3–2
Yongho Kim P9–25
Yongjin Kim 소프트4–3
Yongqiang Meng 나노2–5
Yoo Jeongmin 생체3–3
Yoon Seok Ko 미세1–4
Yoonseok Park 생체4–2
YOORIM KIM P1–78
Youn–Kyoung Baek 마그넷2–2
Young–Hoon Kim EML1–1
Youngeun Kim 생체3–1
Youngho Sihn P30–18, P30–17
Younghoon Kim 차세대디플2–1
younghyun choi P33–20
Youngju Kim P7–24, NeXS1–4
Youngjun Kim P32–28
Youngmin Kim P20–8
Youngung Jeong 미세2–3
Yu–Na Lee 에너지3–2
Yubeen Park 생체4–5
Yubin Kim 소프트1–4
Yubin Lee P23–1
YUHAN LU P25–5
Yuichiro KOIZUMI KJ1–1
Yun Sejin P32–1
Yunhui Kim 고온1–3
Yunju Lee P12–22
Yunsu Choi P33–13

Z

Zaigham Saeed Toor 재료분석1–1

2026년도 추계 학회상 수상자



1. 금속 · 재료상
◆ 장인화 (포스코)

2. 특별공로상
◆ 이재현 (국립창원대학교)
◆ 최철진 (한국재료연구원)

3. 현대제철학술상
◆ 한승전 (한국재료연구원)

4. 세아해암학술상
◆ 정인호 (서울대학교)

5. 동국송원학술상
◆ 서진유 (한국과학기술연구원)

6. 송천학술상
◆ 김영민 (한국재료연구원)

7. 장영원학술상
◆ 김주영 (울산과학기술원)
◆ 박지언 (포스코 기술연구원)

8. 첨단소재학술상
◆ 홍기하 (국립한밭대학교)

9. 친환경소재혁신상
◆ 조민호 (포스코 기술연구원)

10. 현대제철 신진학술상
◆ 한정호 (한양대학교)

11. 윤동석상
◆ 고원석 (고려대학교)

12. 청웅상
◆ 정영웅 (국립창원대학교)

13. 철재상
◆ 주형돈 (포스코 기술연구원)

14. 서정상
◆ 김명균 (포항산업과학연구원)

2026년도 추계 학회상 수상자



15. 김용진상
◆ 전은채 (울산대학교)

16. 최호영상
◆ 김효정 (세종대학교)

17. 두산에너빌리티 젊은연구자상
◆박효진 (포항공과대학교)
◆이재홍 (포항공과대학교)
◆임태협 (난양공과대학교)
◆전승민 (한국재료연구원)
◆정희태 (홍익대학교)

18. Springer 논문상
◆ MMI Gold – 김정기 (경상국립대학교)
◆ MMI Silver – 강남현 (부산대학교)
◆ MMI Bronze – 주수현 (단국대학교)
◆ EML Gold – 김효정 (세종대학교)
◆ EML Silver – 김사라은경 (서울과학기술대학교)
◆ EML Bronze – 김진현 (경희대학교)

19. KOFWST · KIM 젊은연구자상
◆ KJMM – 김유진 (충남대학교)
◆ MMI – 한규미 (포항공과대학교)
◆ EML – 조효민 (서울대학교)

20. International Scholar Award
◆ Steven E. Naleway (University of Utah)

21. 테스코 장학금
◆ 이태주 (부산대학교)

포스터배치



10월 28일(수) 포스터발표 (Poster-I)



P9 알루미늄 (16~31) / P10 마그넷 (1~9)

포스터 발표 보드(4)

P9 알루미늄 (1~15) / P8 용접 및 접합 (6~15)

P7 원자력재료 (5~25) / P8 용접 및 접합 (1~5)

포스터 발표 보드(3)

P7 원자력재료 (1~4) / P6 표면계면 (1~6) / P5 상변태 (1~17)

P2 표면처리 (1~7) / P3 에너지재료 (1~10) / P4 반도체 (1~9)

포스터 발표 보드(2)

P1 학부생세션 (55~80)

P1 학부생세션 (28~54)

포스터 발표 보드(1)

P1 학부생세션 (1~27)

포스터배치



10월 29일(목) 포스터발표 (Poster-II)



P23 디스플레이재료 (6~7) / P24 타이타늄 (1~12) / P25 고온재료 (1~12)

포스터 발표 보드(4)

P23 디스플레이재료 (1~5) / P22 열전 (1~7) / P21 주조 및 응고 (1~5) / P20 복합재료 (4~13)

P17 재료강도 (19~20) / P18 재료분석 (1~16) / P19 소성가공 (1~6)) / P20 복합재료 (1~3)

포스터 발표 보드(3)

P17 재료강도 (1-18) / P16 이차전지 원료소재 (1~9)

P14 철강-압연, 강종개발, 후처리 (1-12) / P15 열처리 (1~13)

포스터 발표 보드(2)

P13 철강-제선, 제강, 환경, 에너지 (1~18)

P12 비철금속 (1~25)

포스터 발표 보드(1)

P11 적층제조 및 분말 (1~27)

포스터배치



10월 30일(금) 포스터발표 (Poster-III)



포스터 발표 보드(4)

P36 집합조직 (1~5) / P35 항공재료 (1~7) P34 소프트소재 (1~13)

P33 전산재료과학 (6~28)

포스터 발표 보드(3)

P33 전산재료과학 (1~5) / P32 나노융합소재 (16~34)

P30 인공지능재료과학 (14~19) / P31 마그네슘 (1~6) / P32 나노융합소재 (1~15)

포스터 발표 보드(2)

P30 인공지능재료과학 (1~13) / P29 역학측정 (1~13)

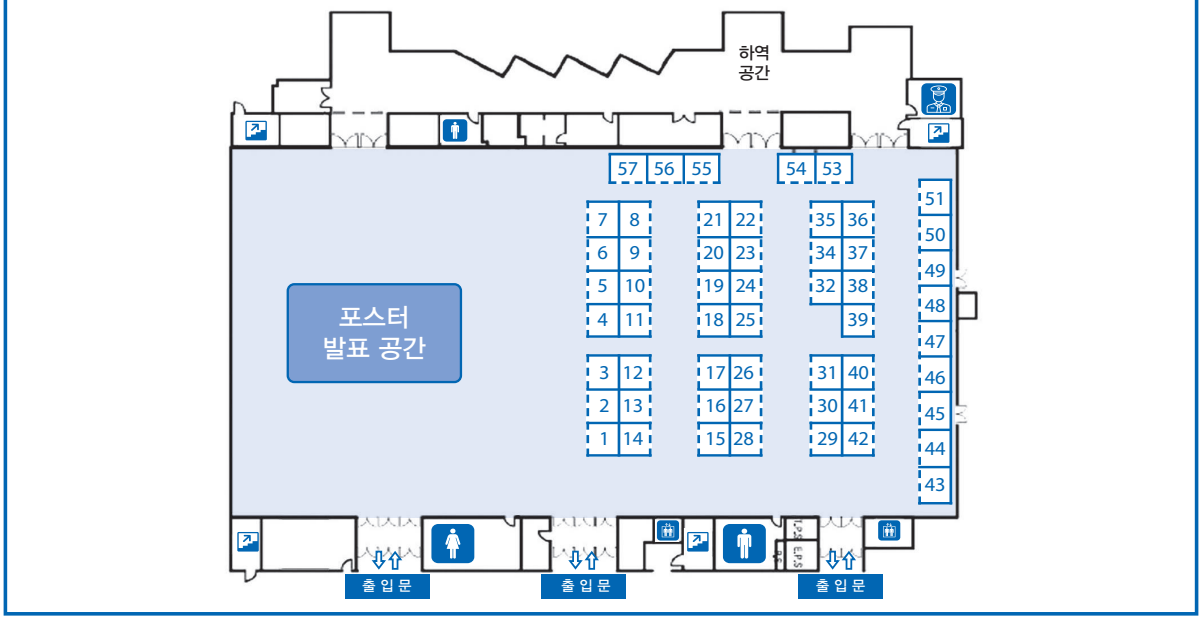
P28 고엔트로피 합금 (1~19)

포스터 발표 보드(1)

P27 수소재료 (1~13) / P26 생체재료 (1~6)

부스배치

대전컨벤션센터



학회 부스 참가회사

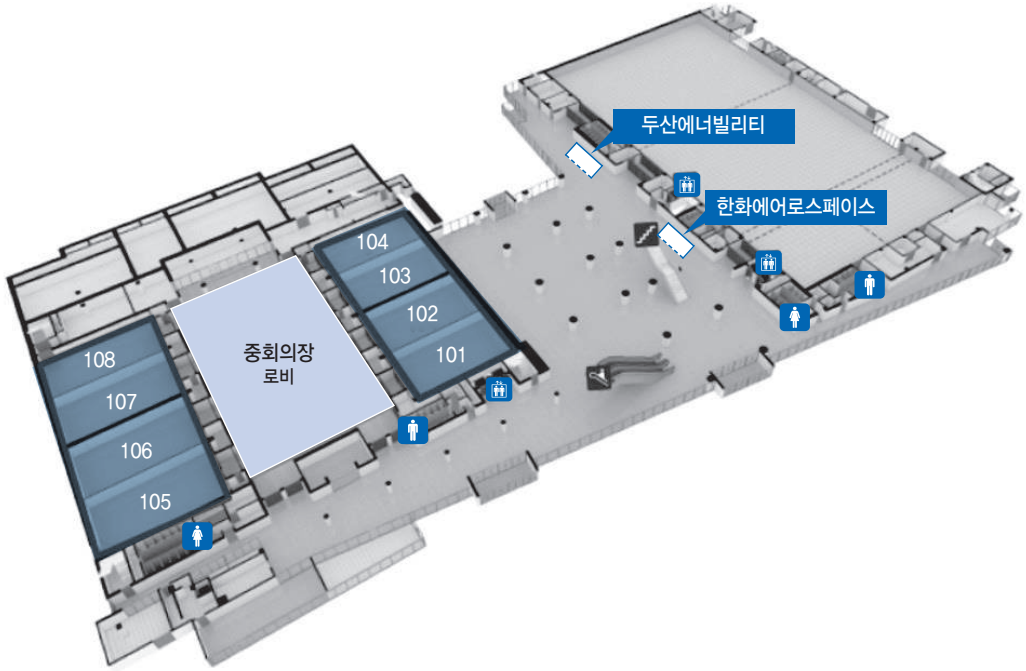
1,2,13,14	테스코(주)
3	주식회사 루안
4,5	(주)만진교역
6,7	(주)진우테크
8	프론틱스
9	한국요꼬가와전기(주)
10,11	포항산업과학연구원
12	(주)이공교역
15,16	(주)에이치엠에스코리아
17	태명과학(주)
18,19	국가과학기술인력개발원
20	(주)버추얼랩
21	비전플러스(주)
22	Quantum Design
23	(주)인이지
24	에스티키원(주)
25	에스피사이언스
26	(주)다원엔지니어링
27	(주)제이에프엠
28	(주)알앤비
29	옥스포드 인스트루먼츠
30	(주)신영사이언스
31	자이스코리아
32	영인에이티
34	(주)아이넥서스
35	비포스
36	VISHAY M-M
37	리코코리아(주)
38	주식회사 이엠엘
39	한국재료연구원 극한소재실증연구기반조성사업단
40	(주)케이에스이엠
41	(주)인스텍
42	솔루션랩
43	(주)웨이브센스
44	(주)솔룸신소재
45	한국재료연구원 신뢰성기반활용지원사업
46	(주)팜테크
47	오엠에이곰 유한회사
48	(주)하이록스코리아
49,50	대한금속 · 재료학회 커피
51	파이로테크
53	(주)에스티아이씨앤디
54	(주)한스코리아
55	오상자이엘(주)
56	(주)지올코리아
57	주식회사 지에스이엠

※ 학회에서 준비한 커피는 49 · 50번 부스에서 제공됩니다. (커피 소진 시까지)

부스배치-인력채용 특별 부스

대전컨벤션센터

인력채용 특별 부스



경품 추첨 안내



◆ 학술대회 전시부스 18곳 이상을 순회하여, 도장(18개)을 받으셔서 응모함에 응모하시면 추첨을 통하여 아래 경품을 드립니다.

◆ **경품 추첨 일시 : 10월 29일(목) 12:40~13:00 / 10월 30일(금) 12:40~13:00**

◆ **경품 추첨 장소 : 1층 로비**

	10월 29일 (목)	10월 30일 (금)
1등 (1명)	 [Apple] 아이패드 미니 7세대 (스페이스 그레이)	 [Galaxy] 폴드 8 (화이트)
2등 (1명)	 [Galazy] 워치 9 (40mm, 화이트)	 [Galaxy] 워치 9 (44mm, 그라파이트)
3등 (5명/3명)	 [신세계] 상품권 (20만원, 5명)	 [신세계] 상품권 (20만원, 3명)

TESTCOR

www.testcor.co.kr

Beyond Testing, Delivering Global Reliability.

테스코(주)는 시험기 개발 및 제조와 시험 평가 서비스, 항공기 하드웨어 부품 제조 분야에서 우수한 기술과 신뢰할 수 있는 품질을 제공하는 전문 기업입니다.

시험기 개발·제조부터 시험 서비스까지 One-Stop으로, 한 번에 편리하게

KOLAS · Nadcap ACCREDITED · kfq · KOSRE ISO 9001 CERTIFIED

01. 시험기 개발 제조

Key Testing Equipment



시편전처리

고속 절단기
정밀 절단기
자동 성형기
자동 연마기

소모품

Cutting 소모품
Mounting 소모품
Polishing 소모품
Grinding 소모품

재료시험기

만능재료시험기
크리프시험기
저속응력부식시험기
챔버&퍼니스

신율계

국내 공식 인증 대리점
Epsilon technology corp

마찰마모시험기

Pin(ball) on Disk
직선왕복동시험기
마찰교반시험기
고온나선마모시험기

주문형시험기

고객의 필요사양에 맞춰 제작되는 특수시험용 시험기

02. 시험 서비스

Materials Testing Capabilities

· 재료 또는 구조물에 대한 피로 및 파괴시험 전문
· 재료 입고 시험, 규격 요구도에 따른 정기적인 평가
· 고온 및 저온, 부식 환경에서 피로시험 전문
· 소재와 부품의 손상원인분석 수행

손상원인분석 · 피로균열전파 · 파괴인성 · 피로 · 응력부식균열 · 크립 · 부식

인장 · 압축 · 굽힘 · 충격 · 경도 · 조직관찰 · 3차원 측정

03. 항공용 하드웨어

Aerospace Hardware

최첨단 기술과 품질을 바탕으로 항공우주 패스너 제조 분야에서 글로벌 선도 기업으로 자리 매김 하였습니다.
*초음속 전투기용 패스너(KF-21, KF-16, TA-50/KUH) 국내 최초로 국산화에 성공한 니켈계 고강도 볼트, 너트 등을 안정적으로 생산 및 공급합니다.



TENNINE FASTENER - Bolt · Nut · Bonded Nut Plate · Customizing

대전 본사
시험기 개발 및 판매
T. 042.934.8877
F. 042.933.1199

시험평가·개발센터
시험 서비스
T. 055.757.8233
F. 055.757.8234

진주 공장
항공용 하드웨어
T. 055.752.6737
F. 055.757.8234

sales@testcor.co.kr

Struers





Axitom-5/-400
대형 절단기

X,Y,Z축 방향 이송으로 대형 및 복잡한 형상 시편 절단
직관적인 인터페이스로 매우 간단한 조작
ExciCut 모드로 단단한 시편 절단 및 휠 소모 절감
AutoStop 모드로 샘플 절단 완료시 자동정지

Xmatic
전자동 연마기

연마천 자동교체
8개의 홀더 로봇암 캐비닛











Tegramin
자동 연마기

전체 커버와 이중축 구조 헤드
완벽한 EBSD샘플을 위한
진동및 뒤틀림 방지

정기 세미나 개최

본사에서 직접 교육
연 2회 세미나 개최 (7월, 10월)
세미나 신청 문의 환영





㈜ 만진교역
MANJIN TRADING CO., LTD
시편가공장비, 경도기 및 소모품

서울시 마포구 동교로 16길 27(만진교역 빌딩) / Tel : (02)324-5145(代) Fax : (02)324-0935
E-mail : info@manjin.co.kr http://www.manjin.co.kr