

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

# 2026 대한금속·재료학회 춘계학술대회 초록집



2026.4.28 TUE - 30 THU

제주국제컨벤션센터

주최 : (사)대한금속·재료학회

후원 : POSCO, 현대제철, (재)현송교육문화재단,

LS MnM, 아모그룹,



제주관광공사  
JEJU TOURISM ORGANIZATION

# 2026 Spring Conference of the Korean Institute of Metals and Materials

## 초록집 목차

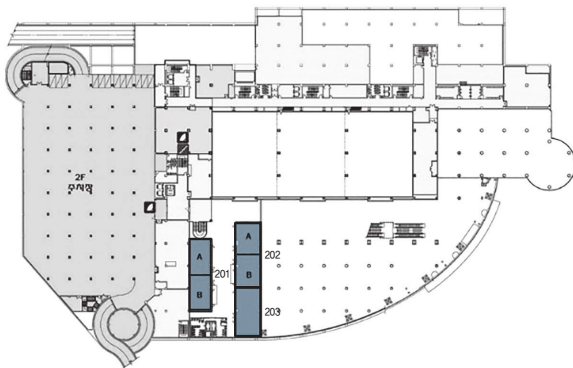
|                           |     |
|---------------------------|-----|
| + 발표장 안내도 .....           | 2   |
| + 행사 및 발표 진행 안내 .....     | 3   |
| + 춘계학술행사 행사 일정 .....      | 5   |
| + 구두 발표일정 .....           | 11  |
| + 포스터 발표일정 .....          | 58  |
| + 구두 발표 .....             | 85  |
| + 포스터 발표 .....            | 363 |
| + 발표자 색인 .....            | 539 |
| + 2026년도 춘계 학회상 수상자 ..... | 545 |
| + 포스터배치 .....             | 548 |
| + 부스배치 .....              | 551 |
| + 경품 추첨 안내 .....          | 553 |

# 발표장 안내도

제주국제컨벤션센터

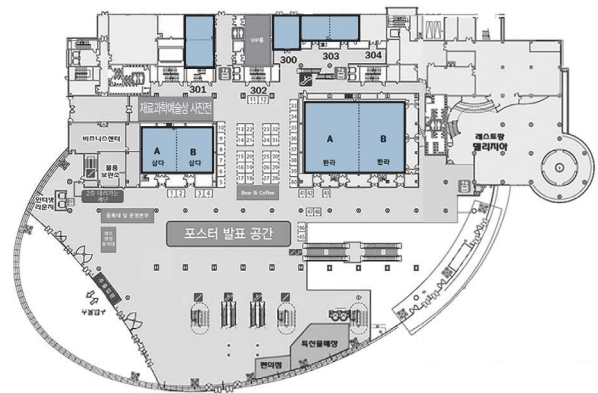
2F

201, 202, 203호



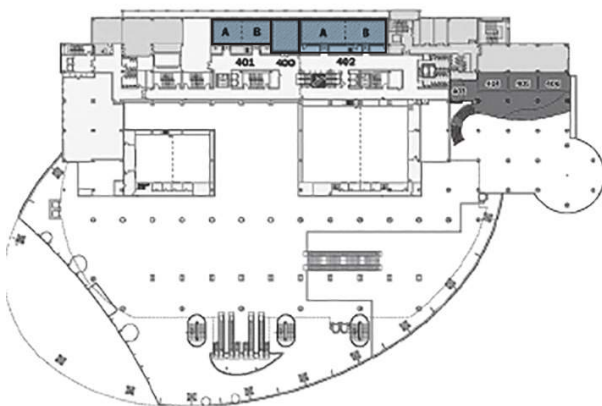
3F

300, 301, 303, 삼다, 한라홀,  
JEJU Gallery(재료과학예술상 사진전),  
로비(등록 및 운영지원, 셀프 체크인(명찰),  
포스터발표, 전시부스, 경품추첨)



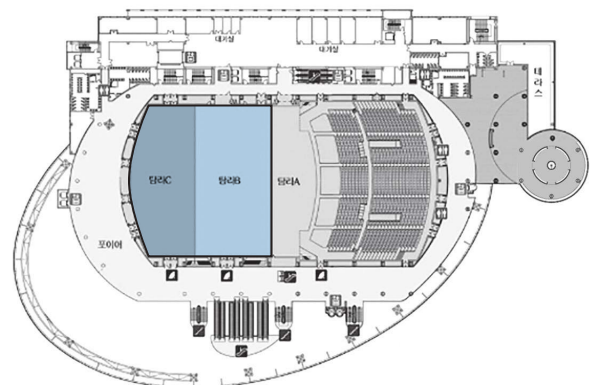
4F

400, 401, 402호



5F

탐라홀(중식, 임시총회/학회상 시상식/  
총회만찬)



# 행사 및 발표 진행 안내

- ❖ 대회 기간 : 2026년 4월 28일 화요일 ~ 4월 30일 목요일, 3일간
- ❖ 대회 장소 : 제주 국제컨벤션센터(ICC JEJU)
- ❖ 등록 기간 : 2026년 3월 3일(화) ~ 4월 17일(금) 17:00
  - 위의 등록 기간 안에 신청 및 납부까지 완료 되셔야 합니다. 미납부 시 신청 내역은 삭제 됩니다.
  - 2차 등록 마감일 이후에는 등록비 28만원 단일가로 적용 됩니다.(온라인 등록만 진행합니다.)

## ❖ 학술대회 등록비

| 구분 | 1차등록<br>(3월 4일~4월 4일) |       | 2차등록<br>(4월 7일~4월 17일) |       |
|----|-----------------------|-------|------------------------|-------|
|    | 회원                    | 비회원   | 회원                     | 비회원   |
| 일반 | 18만 원                 | 25만 원 | 21만 원                  | 28만 원 |
| 학생 | 12만 원                 | 17만 원 | 15만 원                  | 20만 원 |

- ※ 등록 취소 및 환불은 4월 20일(월)까지 가능합니다.
- ※ 4월 28일(화)~30일(목) 중식 및 4월 29일(수) 총회 석식 만찬이 포함되어 있습니다.
- ※ 주차비는 지원되지 않으며, 할인권도 제공되지 않으므로 개별 정산 부탁드립니다.
- ※ 만 65세 이상 정회원의 경우 등록비가 면제되오니, 참가를 희망하시는 분께서는 4월 17일까지 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 마킹이 되어 있으므로 해당 포스터 번호에 포스터 발표 부착물을 부착해주시기 바랍니다. 부착은 반드시 투명테이프로만 할 수 있으며, 부착 도구는 행사장 내에 비치된 부착 물품을 이용해 주시기 바랍니다.
- 포스터 발표 부착물은 첫 장에(또는 서두에) 발표제목, 발표자 성명, 발표자 재직처가 명시될 수 있도록 준비 바랍니다.
- 포스터 질의 및 응답시간에는 본인 발표 포스터 앞에 정위치 하여야 합니다.
- 포스터 발표시간이 종료된 이후는 종료 후 10분 이내에 부착물을 탈착 하여야 하며 15분 이후 부착된 발표물은 학회 진행 요원에 의하여 임의 탈착되어 임의 처리됩니다.
- 포스터 발표자 출석체크는 오전 10시 30분에 포스터판에 부착된 발표자료로 출석을 체크합니다.

## 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 3층 포스터 운영 부스로 오셔서 출석을 확인 해 주시기 바랍니다.



# 행사 및 발표 진행 안내

## 무인 셀프 명찰출력 데스크 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(4월 27일, 월) 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



# 춘계학술행사 행사 일정

## 4월 28일 화요일

| 시간          | 행사 일정                | 비고           |
|-------------|----------------------|--------------|
| 08:30-18:00 | 참가자 셀프 체크인(셀프 명찰 출력) | 3층 등록대       |
| 08:30-18:00 | 아이돌봄 서비스 접수          | 3층 등록대       |
| 08:30-09:30 | Coffee Break         | 3층 로비        |
| 09:00-12:00 | 구두세션 발표              | 각 발표장        |
| 10:00-17:00 | 포스터세션 발표             | 3층 로비        |
| 09:00-18:00 | 전시부스 홍보 진행           | 3층 로비        |
| 09:00-18:00 | 재료과학예술상 사진전          | JEJU Gallery |
| 11:30-13:00 | 점심시간                 | 5층 탐라홀       |
| 12:00-13:00 | Coffee Break         | 3층 로비        |
| 13:00-13:50 | 포스터 세션 질의 및 응답시간     | 3층 로비        |
| 14:00-18:00 | 구두세션 발표              | 각 발표장        |
| 18:30-20:00 | 학회상 수상자 및 역대회장 초청만찬  | 5층 오션뷰       |

## 4월 29일 수요일

| 시간          | 행사 일정                | 비고           |
|-------------|----------------------|--------------|
| 08:30-18:00 | 참가자 명찰수령(셀프 출력)      | 3층 등록대       |
| 08:30-18:00 | 아이돌봄 서비스 접수          | 3층 등록대       |
| 08:30-09:30 | Coffee Break         | 3층 로비        |
| 09:00-12:00 | 구두세션 발표              | 각 발표장        |
| 09:00-18:00 | 전시부스 홍보 진행           | 3층 로비        |
| 10:00-17:00 | 포스터 세션 발표            | 3층 로비        |
| 09:00-18:00 | 재료과학예술상 사진전          | JEJU Gallery |
| 11:30-13:00 | 점심시간                 | 5층 탐라홀       |
| 12:00-13:00 | Coffee Break         | 3층 로비        |
| 12:30-13:00 | 경품 추첨                | 3층 로비        |
| 13:00-13:50 | 포스터 세션 질의 및 응답시간     | 3층 로비        |
| 14:00-17:50 | 구두세션 발표              | 각 발표장        |
| 18:00-23:00 | Students' Beer Night | 퍼블릭수제맥주펍(중문) |
| 18:00-18:50 | 총회 및 학회상 시상식         | 5층 탐라홀       |
| 18:50-20:00 | 총회 만찬                | 5층 탐라홀       |

## 4월 30일 목요일

| 시간          | 행사 일정            | 비고           |
|-------------|------------------|--------------|
| 08:30-11:00 | 참가자 명찰수령(셀프 출력)  | 3층 등록대       |
| 08:30-09:30 | Coffee Break     | 3층 로비        |
| 09:00-12:00 | 구두세션 발표          | 각 발표장        |
| 09:00-12:30 | 포스터 세션 발표        | 3층 로비        |
| 09:00-12:40 | 전시부스 홍보 진행       | 3층 로비        |
| 09:00-12:40 | 재료과학예술상 사진전      | JEJU Gallery |
| 12:00-12:30 | 포스터 세션 질의 및 응답시간 | 3층 로비        |
| 12:30-13:30 | 점심 식사            | 5층 탐라홀       |
| 13:30-14:00 | 경품추첨             | 3층 로비        |

# 발표일정

## 4월 28일(화) 발표 일정

- ◆ 총 진행: 이기안, 이선영 학술부회장
- ◆ 구두 및 포스터세션 진행위원: 김세훈, 김주영, 안병민 학술이사
- ◆ 학생구두발표 우수상 및 학생포스터발표 우수상 선정위원: 김세훈, 김주영, 안병민 학술이사, 손석수, 허윤옥, 전태성 위원
- ◆ 튜토리얼 진행위원: 허윤옥, 안병민 학술이사

| 발표장<br>시간       | 201A                                 | 201B        | 202A                               | 202B              | 203                 | 삼다A  | 삼다B       | 300                         | 301                                                        | 303                                          | 한라A                                                 | 한라B             | 400                          | 401                          | 402A       | 402B                        |
|-----------------|--------------------------------------|-------------|------------------------------------|-------------------|---------------------|------|-----------|-----------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|------------|-----------------------------|
| 08:30<br>~18:00 | 행사 등록                                |             |                                    |                   |                     |      |           |                             |                                                            |                                              |                                                     |                 |                              |                              |            |                             |
| 09:00<br>~12:00 | 알루미늄                                 | 고엔트로피<br>합금 | 제13<br>회 첨단<br>융복합<br>분석기술<br>심포지엄 | 적층제조<br>및 분말<br>I | 저탄소<br>알루미늄<br>심포지엄 | 학생세션 | 에너지<br>재료 | 비철금속                        | [N.H]<br>소프트<br>반도체<br>응용<br>센서리<br>디스플레이<br>소재 기술<br>심포지엄 | 수소재료<br>I                                    |                                                     | 전산재료<br>과학<br>I | 집합조직                         | 철강A<br>-제선,제강,<br>환경,<br>에너지 | 튜토리얼<br>세션 | 철강B-<br>압연,<br>강종개발,<br>후처리 |
| 11:30<br>~13:00 | 점심 식사(5층 탐라홀)                        |             |                                    |                   |                     |      |           |                             |                                                            |                                              |                                                     |                 |                              |                              |            |                             |
| 13:00<br>~13:50 | 포스터 발표 질의 및 응답시간(3층 로비)              |             |                                    |                   |                     |      |           |                             |                                                            |                                              |                                                     |                 |                              |                              |            |                             |
| 14:00<br>~18:00 | 알루미늄<br><br>(15:00~)<br>이차전지<br>원료소재 | 고엔트로피<br>합금 | 제13<br>회 첨단<br>융복합<br>분석기술<br>심포지엄 | 적층제조<br>및 분말<br>I | 저탄소<br>알루미늄<br>심포지엄 | 학생세션 | 여성세션      | 비철금속<br><br>(16:20~)<br>반도체 | [N.H]<br>소프트<br>반도체<br>응용<br>센서리<br>디스플레이<br>소재 기술<br>심포지엄 | 수소경제<br>구현을<br>위한 수소<br>운송 및<br>저장소재<br>심포지엄 | [N.H]<br>Next<br>Generation<br>AI 바이오<br>융합<br>심포지엄 | 전산재료<br>과학<br>I | 집합조직<br><br>(16:30~)<br>소성가공 | 철강A<br>-제선,제강,<br>환경,<br>에너지 | 마그네슘       | 철강B-<br>압연,<br>강종개발,<br>후처리 |

# 발표일정

## 4월 29일(수) 발표일정

- ◆ 총 진행: 이기안, 이선영 학술부회장
- ◆ 구두 및 포스터세션 진행위원: 박원일, 박은수, 정연식 학술이사
- ◆ 학생구두발표 우수상 및 학생포스터발표 우수상 선정위원: 박원일, 박은수, 정연식 학술이사, 김용주, 이기영, 성효경 위원

| 발표장<br>시간       | 201A                                      | 201B            | 202A                             | 202B               | 203                                                    | 삼다A                                                  | 삼다B              | 300  | 301                  | 303                                                      | 한라A                                         | 한라B                   | 400  | 401          | 402A                                   | 402B                                             |
|-----------------|-------------------------------------------|-----------------|----------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------|------|----------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------|------|--------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 08:30<br>~18:00 | 행사 등록                                     |                 |                                  |                    |                                                        |                                                      |                  |      |                      |                                                          |                                             |                       |      |              |                                        |                                                  |
| 09:00<br>~12:00 | 대형<br>일체형<br>차체부품<br>알루미늄<br>주조기술<br>심포지엄 | 용접 및<br>접합<br>I | 차세대<br>메모리<br>소재 및<br>공정<br>심포지엄 | 적층제조<br>및 분말<br>II | 제4회 가공<br>심포지엄:<br>소형모듈원<br>전용<br>구조재료<br>가공기술<br>심포지엄 | [N.H-I]<br>KIM-JIMM<br>Joint<br>Women's<br>Symposium | 전산재료<br>과학<br>II | 역학측정 | [N.H]<br>희토류<br>심포지엄 | [N.H-I]<br>Nano<br>Convergence<br>Materials<br>Symposium | [N.H]<br>첨단항공<br>엔진<br>소재·부품<br>자립화<br>심포지엄 | 제103회<br>철강기술<br>심포지엄 | 재료강도 | 인공지능<br>재료과학 | 극한소재<br>실증연구<br>기반 및<br>R&D 전략<br>심포지엄 | 고신뢰성<br>소재 시<br>험산:<br>공정-<br>소재상태<br>디지털화<br>통합 |
| 11:30<br>~13:00 | 점심 식사(5층 탐라홀), 경품 추첨(12:30, 3층 로비)        |                 |                                  |                    |                                                        |                                                      |                  |      |                      |                                                          |                                             |                       |      |              |                                        |                                                  |
| 13:00<br>~13:50 | 포스터 발표 질의 및 응답시간                          |                 |                                  |                    |                                                        |                                                      |                  |      |                      |                                                          |                                             |                       |      |              |                                        |                                                  |
| 14:00~<br>17:50 | 대형<br>일체형<br>차체부품<br>알루미늄<br>주조기술<br>심포지엄 | 용접 및<br>접합<br>I | 수소재료<br>II                       | 적층제조<br>및 분말<br>II | 제4회 가공<br>심포지엄:<br>소형모듈원<br>전용<br>구조재료<br>가공기술<br>심포지엄 | 학회상<br>수상<br>기념강연<br><br><br>(16:00~)<br>표면계면        | 학생분과<br>심포지엄     | 표면처리 | [N.H]<br>희토류<br>심포지엄 | [N.H-I]<br>Nano<br>Convergence<br>Materials<br>Symposium | [N.H]<br>첨단항공<br>엔진<br>소재·부품<br>자립화<br>심포지엄 | 제103회<br>철강기술<br>심포지엄 | 재료강도 | 인공지능<br>재료과학 | 극한소재<br>실증연구<br>기반 및<br>R&D 전략<br>심포지엄 | 고신뢰성<br>소재 시<br>험산:<br>공정-<br>소재상태<br>디지털화<br>통합 |
| 18:00<br>~18:50 | 총회 및 학회상 시상식(5층 탐라홀)                      |                 |                                  |                    |                                                        |                                                      |                  |      |                      |                                                          |                                             |                       |      |              |                                        |                                                  |
| 18:50<br>~20:00 | 총회 만찬(5층 탐라홀)                             |                 |                                  |                    |                                                        |                                                      |                  |      |                      |                                                          |                                             |                       |      |              |                                        |                                                  |

# 발표일정

## 4월 30일(목) 발표 일정

- ◆ 총 진행: 이기안, 이선영 학술부회장
- ◆ 구두 및 포스터세션 진행위원: 박현순, 심재혁, 정은진 학술이사
- ◆ 학생구두발표 우수상 및 학생포스터발표 우수상 선정위원: 박현순, 심재혁, 정은진 학술이사, 남대현, 이미경, 류육하 위원

| 발표장<br>시간       | 201A                  | 201B | 202A | 202B | 203  | 삼다A                              | 삼다B                                 | 300                                     | 301                 | 303               | 한라A                      | 한라B                                            | 400                                         | 401                         | 402A | 402B |
|-----------------|-----------------------|------|------|------|------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|------|------|
| 08:30<br>~14:10 |                       |      |      |      |      |                                  |                                     |                                         |                     |                   |                          |                                                |                                             |                             |      |      |
| 09:00<br>~12:00 | 나노융합<br>소재            | 재료분석 | 생체재료 | 항공재료 | 복합재료 | 금속역사<br>————<br>(10:20~)<br>타이타늄 | 적층제조<br>활용<br>경사기능형<br>내열소재<br>심포지엄 | 용접 및<br>접합II<br>————<br>(10:40~)<br>열처리 | 적층제조<br>및 분말<br>III | Spark<br>ENGE2026 | 차세대<br>에너지<br>재료<br>심포지엄 | 미래<br>모빌리티<br>경량금속<br>소재<br>데이터<br>플랫폼<br>심포지엄 | 제3회<br>RIST-<br>KICET<br>고도분석<br>기술<br>심포지엄 | 이차전지용<br>니켈<br>원료소재<br>심포지엄 | 상변태  | 고온재료 |
| 12:00<br>~12:30 | 포스터 발표 질의 및 응답(3층 로비) |      |      |      |      |                                  |                                     |                                         |                     |                   |                          |                                                |                                             |                             |      |      |
| 12:30<br>~13:30 | 점심 식사(5층 탐라홀)         |      |      |      |      |                                  |                                     |                                         |                     |                   |                          |                                                |                                             |                             |      |      |
| 13:30<br>~14:00 | 경품 추첨(3층 로비)          |      |      |      |      |                                  |                                     |                                         |                     |                   |                          |                                                |                                             |                             |      |      |

# 발표일정

## 포스터 발표 일정

\*포스터 배치는 일정집 103페이지 참고(발표장: 3층 로비)

| 날짜<br>시간                | 4월 28일 화요일                                                                                                   | 4월 29일 수요일                                                                                                                                                           | 날짜<br>시간                | 4월 30일 목요일                                                                                                                                   |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 발표시간<br>10:00<br>~17:00 | P1. 학생세션(학부생)<br>P2. 에너지재료<br>P3. 고엔트로피합금<br>P4. 디스플레이재료<br>P5. 마그네슘<br>P6. 알루미늄<br>P7. 철강A-제선,제강,<br>환경,에너지 | P15. 수소재료<br>P16. 전산재료과학<br>P17. 적층제조 및 분말<br>P18. 재료강도<br>P19. 역학측정<br>P20. 가공-용접 및 접합<br>P21. 마그넷<br>P22. 가공-표면처리<br>P23. 인공지능재료과학<br>P24. 표면계면<br>P25. 가공-주조 및 응고 | 발표시간<br>09:00<br>~12:30 | P26. 상변태<br>P27. 나노융합소재<br>P28. 재료분석<br>P29. 생체재료<br>P30. 가공-열처리<br>P31. 고온재료<br>P32. 열전<br>P33. 금속역사<br>P34. 복합재료<br>P35. 타이타늄<br>P36. 항공재료 |
| 질의응답<br>13:00<br>~13:50 | P8. 비철금속<br>P9. 철강B-압연,<br>강종개발,후처리<br>P10. 이차전지 원료소재<br>P11. 반도체<br>P12. 소프트소재<br>P13. 집합조직<br>P14. 가공-소성가공 |                                                                                                                                                                      | 질의응답<br>12:00<br>~12:30 |                                                                                                                                              |



# 튜토리얼 세션

## 수소취성의 이해와 평가 방법

4월 28일 (화) 9:30-11:30, 402A호

수소 환경에서 금속 재료의 안전성과 신뢰성 확보는 수소경제 시대의 핵심 과제입니다. 본 튜토리얼 세션에서는 수소취성의 기본 원리와 발생 메커니즘을 체계적으로 정리하고, 다양한 수소취성 평가 방법과 주요 영향 인자를 실제 사례 중심으로 소개합니다. 수소 관련 구조재, 배관, 볼트 및 고강도 강재 연구에 관심 있는 연구자와 실무자를 위한 기초-응용 연계형 튜토리얼입니다.

좌장: 허윤옥 (포항공과대학교), 안병민 (아주대학교)

| 시간          | 주제                                         | 강연자             |
|-------------|--------------------------------------------|-----------------|
| 9:30-10:30  | 수소취성의 발생 메커니즘과 파괴 사례 및 파 · 단면 분석에 의한 원인 분석 | 강남현 (부산대학교)     |
| 10:30-11:30 | 수소취성 시험법, 평가 및 표준                          | 황병철 (서울과학기술대학교) |

### 강연 1 – 수소취성의 발생 메커니즘과 파괴 사례 및 파 · 단면 분석에 의한 원인 분석



**강남현 교수 (부산대학교)**

#### 학력사항

1995 : 부산대학교 학사  
1997 : Colorado School of Mines 석사  
2003 : Pennsylvania State University 박사

#### 경력사항

2003-2006 : 한국생산기술연구원  
2006-현재 : 부산대학교 재료공학과 교수

### 강연 2 – 수소취성 시험법, 평가 및 표준



**황병철 교수 (서울과학기술대학교)**

#### 학력 사항

1999 : 연세대학교 금속공학과 학사  
2001 : 포항공과대학교 신소재공학과 석사  
2004 : 포항공과대학교 신소재공학과 박사

#### 경력 사항

2005-2006 : Brown University 박사후연구원  
2006-2013 : 한국재료연구원 선임연구원  
2013-현재 : 서울과학기술대학교 교수

◆ 본 튜토리얼 세션은 춘계 학술대회 등록과 별도로 튜토리얼 세션에 사전등록(유료) 하신 분에 한하여 수강이 가능합니다. 자세한 사항은 우리 학회 홈페이지를 참고해 주시기 바랍니다.

## 알루미늄

위원장: 현승균(인하대학교)  
총무간사: 김명균(RIST), 김세훈(한국자동차연구원),  
박현순(인하대학교), 조영희(KIMS)  
Room 2층 201A, 4월28일

좌장 : 조용희(전남대학교)

### 알루미늄1-1 | 09:00

비열처리형 Al-Si HPDC 주조 합금의 미세조직, 인장 특성 및 열전도도 간 상관관계 연구

강창아, 이윤호(한국재료연구원), 박하음, 박정민(한국재료연구원, 고려대학교), Tian Zhanfeng(Lizhong Alloy Group), 노종석, 박성락(한주라이트메탈), 조영희, 조용희\*(한국재료연구원)

### 알루미늄1-2 | 09:15

스파크 플라즈마 소결 및 열처리에 따른 Al-Mg-Zn-Cu Crossover 합금의 동시 석출 거동과 기계적·내식 특성

안다영(국립순천대학교), 김세훈(한국자동차연구원), 신세은\*(국립순천대학교)

### 알루미늄1-3 | 09:30

Zn 함량 변화에 따른 Al-Zn-Mg-Cu 합금의 재결정·석출 미세조직 진화와 전기화학 부식/SSRT 환경 민감성의 연계 분석

정혜지, 신선호, 유재성(국민대학교), 조용희(한국재료연구원), 김재현(국민대학교), 김형욱(한국재료연구원), 성효경\*(국민대학교)

### 알루미늄1-4 | 09:45

Al<sub>50</sub>Mg<sub>30</sub>Si<sub>10</sub>Cu<sub>5</sub>Zn<sub>5</sub> 합금의 미세조직, 석출거동, 기계적 특성 평가

전정민, 박성현(전북대학교), 신은주(한국원자력연구원), 정재길\*(전북대학교)

### 알루미늄1-5 | 10:00

저전도 냉각수 환경에서 유속에 따른 알루미늄 합금의 부식 메커니즘

김건일, 이근재(성균관대학교), 송주승(현대자동차), 김정구\*(성균관대학교)

### 알루미늄1-6 | 10:15

Mn 첨가에 따른 6XXX계 알루미늄 합금의 응고 중 미세구조 진화 및 열균열 거동에 대한 in situ X-ray 이미징 연구

조원준, 한인성\*(경북대학교)

### Break Time | 10:30

좌장 : 김대영(한국자동차연구원)

### 알루미늄2-1 | 10:40

초음파 인가로 제작된 A6008 합금 연속주조재의 균질화 처리 조건에 따른 미세조직 변화

최희은, 송람\*, 조훈, 신재식, 김태형, 정재현, 조대연(한국생산기술연구원)

### 알루미늄2-2 | 10:55

재활용 스크랩을 사용한 6xxx계 합금에서 산화철이 기계적 물성과 미세 조직에 미치는 영향

김하늘, 장병록\*, 김희국(인하대학교)

### 알루미늄2-3 | 11:10

펠렛형 Al-Zn-In 합금 음극의 알루미늄-공기 전지 성능 향상 및 집전체 소재 영향

손경호, 이근재, 김정구\*(성균관대학교)

### 알루미늄2-4 | 11:25

재설계 RRA가 적용된 Al-Zn-Mg-Cu 소결합금의 원자단위 석출구조와 기계적 특성

이준호, 이석재\*(전북대학교)

### 알루미늄2-5 | 11:40

3차원 X-선 토모그래피를 이용한 Al-Cu 주조 합금에서 Fe 첨가 유무에 따른 수축 결함 거동의 실시간 분석

조우빈, 한인성\*(경북대학교)

### 알루미늄2-6 | 11:55

미량 원소 첨가가 Al-0.3Fe 합금의 미세조직 및 온도별 전기적·기계적 특성에 미치는 영향

윤연희(한국재료연구원, 한양대학교), 김형준(한국재료연구원, 부산대학교), 안지혁, 오영석(한국재료연구원), 장재일\*(한양대학교), 이윤수\*(한국재료연구원)

좌장 : 김재황(한국생산기술연구원)

### 알루미늄3-1 | 14:00

Effect of Cu/Mg Ratio on Age-Hardening Behavior in Al-Cu-Mg Alloys

Yujin Rhee(Kyung Hee Univ.), Calin D. Marioara(SINTEF Industry), Bin Lee(Kyung Hee Univ.), Equo Kobayashi\*(Institute of Science Tokyo)

### 알루미늄3-2 | 14:15

냉각채널 일체형 무선충전 시스템 하우징 개발

이명호\*(현대자동차)



#### 고엔2-5 | 11:25

TiHfNb계 BCC 중엔트로피 합금의 냉간 압연에 따른 미세조직 발달 및 기계적특성 변화

박태연, 최인철\*(국립금오공과대학교)

#### Break Time | 11:40

좌장 : 김영균(한국재료연구원)

#### 고엔3-1 | 14:00

고엔트로피 합금에 대한 다양한 인공지능 처리 기법

최윤석\*, 장리빈(부산대학교)

#### 고엔3-2 | 14:15

Accelerated Discovery of Refractory High-Entropy Alloys through Machine Learning and Uncertainty-Guided Design

Ki-Seong Park, Chang-Seok Oh, Hyo-Sun Jang(KIMS), Sujung Son, Shi Woo Lee, Hyeong Seop Kim(POSTECH), Jiwon Park\*(KIMS)

#### 고엔3-3 | 14:30

Multi-Functional Properties of Superconducting and Hydrogen Storage in TaNb<sub>2</sub>HfZrTi High Entropy Alloy

Rahmatul Hidayati, Jae Hyun Yun\*, Woo Jin Jo(Kyung Hee University), Sujin Kim, Woochul Kim(Yonsei University), Hyeon Ha, Hyeon Seop Kim(POSTECH), Beongki Cho(GIST), Jin-Hee Kim\*, Jong-Soo Rhyee\*(Kyung Hee University)

#### 고엔3-4 | 14:45

단 · 장범위 화학적 질서 제어를 통한 중엔트로피 합금의 강도-연성 균형 향상

소영섭(국립부경대학교), 박현영(국민대학교), 이준석(국립부경대학교), 이초현, 설재복\*(국민대학교), 배재웅\*(국립부경대학교)

#### 고엔3-5 | 15:00

Cu 석출 기반 SFE 제어에 따른 Fe-Cr-Ni-Mn-Mo-Cu 합금의 상온 및 극저온 물성 향상

성민영, 장태진, 이하훈(고려대학교), 이건직(한국과학기술연구원), 남송진, 박규민(고려대학교), Siyuan Zhang(Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH), 김세호, 손석수\*(고려대학교)

#### 고엔3-6 | 15:15

초고강도 및 저열팽창 특성 동시 구현을 위한 Super Invar 합금에서의 금속간화합물 석출 거동 제어

이상원, 정현, 오화윤(고려대학교), 홍석환, 서동우(포항공과대학교), 김정환, 이태호(한국재료연구원), 김세호, 손석수\*(고려대학교)

#### Break Time | 15:30

좌장 : 손석수(고려대학교)

#### 고엔4-1 | 15:40

Tailoring mechanical properties of an Fe-Ni-rich complex concentrated alloy by controlled lamellar precipitation

Dong Whan KIM\*, Jae Kwon KIM, Eun Soo Park(Seoul National University)

#### 고엔4-2 | 15:55

Hot rolling-direct aging 기반 L1<sub>2</sub> 석출강화에 따른 FeCoNiV 등원자 중엔트로피 합금의 상온 및 극저온 기계적 특성

하수빈, 이시우, 이재홍, 김진우, 김형섭\*(포항공과대학교)

#### 고엔4-3 | 16:10

Co-free L1<sub>2</sub> 강화형 고엔트로피합금에서의 계층적 미세조직 기반 강도-연성 최적화

정희재(포항공과대학교), 권현석(University of Cambridge), 허윤욱, 이재홍, 이시우, 김형섭\*(포항공과대학교)

#### 고엔4-4 | 16:25

L1<sub>2</sub> 석출을 통한 우수한 극저온 기계적 물성을 갖는 지속가능 합금 설계

김진섭, 김진경\*(한양대학교)

#### 고엔4-5 | 16:40

4.2 K에서 변형 불안정성이 완화된 L1<sub>2</sub> 강화형 중엔트로피 합금

이준석, 신필욱, 소영섭, 이민호(국립부경대학교), 김영균, 나영상(한국재료연구원), 김형섭(포항공과대학교), 설재복(국민대학교), 배재웅\*(국립부경대학교)

#### 고엔4-6 | 16:55

초극저온 불연속 소성 거동과 전위 하부구조 진화에 대한 적층결함에너지의 영향

신필욱(국립부경대학교), 김영균(한국재료연구원), 이준석(국립부경대학교), 나영상(한국재료연구원), 김형섭(포항공과대학교), 이수빈\*(Karlsruhe Institute of Technology), 배재웅\*(국립부경대학교)

### 제13회 첨단 융복합 분석기술 심포지엄

위원장 : 이수열(충남대학교)

실무위원 : 강전연(한국재료연구원), 송기안(공주대학교),

채호병(한국원자력연구원)

Room 2층 202A, 4월28일

좌장 : 송기안(공주대학교)

#### 융복합1-1 | 10:00

초청강연(튜토리얼)

Revisiting the basal plane stacking faults in hexagonal structure 4H-SiC and its application to metallic system

Soon-Ku Hong\*(Chungnam National Univ.)

#### Break Time | 12:00

좌장 : 채호병(한국원자력연구원)

#### 융복합2-1 | 14:00

초청강연

적층제조용 금속분말제조 및 응용기술개발

홍순직\*(국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터(CAMP2))

#### 융복합2-2 | 14:30

초청강연

SMR(Small Modular Reactor) 주기기 제작을 위한 혁신제작기술 개발 현황

김정길\*, 김동수, 안세환(두산에너지빌리티)

응복합2-3 | 15:00

초청강연

이온조사 기반 핵융합 소재 중성자 손상 메커니즘 모사 및 예측  
강석훈\*, 박선영, 천영범, 진형하, 이승현, 이동원(한국원자력연구원)

Break Time | 15:30

좌장 : 강전연(한국재료연구원)

응복합3-1 | 15:40

초청강연

내열성과 내식성을 동시에 만족하는 신개념 페라이트계 합금 설계  
임가람\*, 심상훈, 권현준(한국재료연구원), 정재길(전북대학교), 송기안(공주대  
학교), 장혜정(한국과학기술연구원), 이호원(한국재료연구원)

응복합3-2 | 16:10

초청강연

주요 용접 공정의 장단점과 용접부 미세조직 및 기계적 특성  
박철호\*(조선대학교)

응복합3-3 | 16:40

초청강연

액체수소저장 금속용접부의 수소취성 평가  
이수열\*(충남대학교)

## 적층제조 및 분말 I

위원장: 홍순직(국립공주대학교)

총무간사: 강민철(3D프린팅연구조합), 김정기(경상국립대학교),

문종연(국립공주대학교)

Room 2층 202B, 4월28일

좌장 : 김효섭(한국생산기술연구원)

적층1-1 | 09:00

다양한 용체화 열처리 조건 적용 후 로냉한 L-DED 적층제조 IN939 합  
금의 미세구조 및 석출물 거동

백하은, 최정원, 오규민, 정성원(영남대학교), 박기덕(주식회사 갯테크), 김도  
형\*(영남대학교)

적층1-2 | 09:15

Strengthening by B2 ordering and delayed TRIP in low-Mn  
Fe-Mn-Al-C lightweight steels: In the DED as-built state  
JeongWoong Park, Kwang Kyu Ko, Seong Hyeon Yang, Min Yu  
Kang(Kookmin University), Haeum Park, Jeong Min Park(KIMS), Hyun  
Joo Choi(Kookmin University), Hyoung Seop Kim(POSTECH), Jae Bok  
Seol\*(Kookmin University)

적층1-3 | 09:30

L-DED 통해 제작한 Co-Cr-Fe-Mn 고엔트로피 합금의 FCC/HCP  
상분율에 따른 수소 취성 거동

박민수, 김민기, 이육진\*(부산대학교)

적층1-4 | 09:45

900°C 및 1100°C에서 LPBF Inconel 625 합금의 장기 산화 거동  
고도열, 이서진(한국생산기술연구원, 성균관대학교), 최민호(한국생산기술연구  
원, 서울대학교), 이해진(한국생산기술연구원), 한혁수(성균관대학교, 한양대학  
교), 한성국, 김동수(CSCAM), 이병수\*(한국생산기술연구원)

적층1-5 | 10:00

텅스텐 산화물을 활용한 나노 텅스텐 분말 제조 및 고밀도 소결 특성 연  
구

신하진, 박민수, 박정우, 하국현\*(한국재료연구원)

Break Time | 10:15

좌장 : 채홍준(고등기술연구원)

적층2-1 | 10:25

직접용융증착으로 제조된 15-5 PH 스테인리스 강의 직접 시효에 따른  
기계적 특성 및 미세구조 변화

주수빈, 김정기\*(경상국립대학교)

적층2-2 | 10:40

Directed energy deposition(DED)를 활용한 철계 중엔트로피 합금의  
최적 조성 탐색 및 시험

구분우, 이재홍, 이지영(포항공과대학교), 김대검(한국생산기술연구원), 이정완,  
김은성, 하효정(포항공과대학교), 김택수(한국생산기술연구원), 김형섭\*(포항공  
과대학교)

적층2-3 | 10:55

LPBF로 제조된 Ti-6Al-4V 격자 구조에서 열처리에 따른 미세조직 변  
화와 압축 거동의 상관관계

김영훈, 성효경\*, 박현영(국민대학교)

적층2-4 | 11:10

L-PBF로 제조된 Inconel 718 합금에서 온도 별 hot isostatic pressing  
공정을 통한 불안정한 결함 거동에서 안정적인 석출 제어형 거동으로의  
전환

강경록, 함승준(한국생산기술연구원, 성균관대학교), 김원래, 김건희(한국생산  
기술연구원), 송승욱(성균관대학교), 안성철(한화에어로스페이스), 한혁수(한양  
대학교), 강현수\*(한국생산기술연구원, 한양대학교), 이택우\*(한국생산기술연구  
원), 김형균\*(한화에어로스페이스)

적층2-5 | 11:25

L-PBF 공정에서의 Non-contact support 설계 및 성능 검증

김오섭, 김민수, 김정호\*(인하대학교)

좌장 : 박정민(한국재료연구원)

적층3-1 | 14:00

LPBF를 통해 제조한 Al-Fe 기지 복합재의 미세조직 및 기계적 성능  
분석

최중호(한국재료연구원, 포항공과대학교), 김정태\*, 박정민, 유지훈(한국재료연  
구원), 김형섭(포항공과대학교)

적층3-2 | 14:15

직접용융증착법을 활용한 NiCr/IN738LC경사기능재료의 미세조직 및  
기계적 특성 변화

정민재, 유현용, 강호성, 김정기\*(경상국립대학교)

적층3-3 | 14:30

DED로 제작한 CoCr-SUS316L Heterogenic structure의 미세조직과  
기계적 물성에 미치는 체적 에너지 밀도의 영향

최민호(한국생산기술연구원, 서울대학교), 안정환, 이해진, 이병수\*(한국생산기  
술연구원), 한홍남(서울대학교)



#### 적층3-4 | 14:45

L-DED로 제작한 AISI 316L 스테인리스강의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 초음파 인가의 영향

장도현, 김태윤, 정종욱, 박민수, 이옥진\*(부산대학교)

#### 적층3-5 | 15:00

Laser powder bed fusion으로 제조된 Inconel 625 합금의 후열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화

이민호(국립부경대학교), 윤지상(국립부경대학교, 한국재료연구원), 조현빈(국립부경대학교), 배기창(한국세라믹기술원), 문종연(국립공주대학교), 이정훈, 배재웅\*(국립부경대학교)

#### 적층3-6 | 15:15

Laser Powder Bed Fusion of SAF 3207 hyper duplex stainless steel: Processing window, microstructure, and tensile behavior

Jalal Kangazian Kangazi, Soung Yeoul Ahn, Bon Woo Koo, Jae Heung Lee, Hyoung Seop Kim\*(POSTECH)

#### 적층3-7 | 15:30

Process Optimization of L-PBF for Cost-Effective, High-Performance Manufacturing Using SiO<sub>2</sub> Nanoparticle-Coated Non-Spherical Ti Powder

Taehu Kang, Jongik Lee, Jimin Han, Bin Lee\*(Kyunghee Univ.)

#### Break Time | 15:45

좌장 : 배재웅(부경대학교)

#### 적층4-1 | 15:55

Wire Arc Additive Manufacturing으로 제조된 Al-5356 합금의 피로 및 충격 물성의 이방성

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

#### 적층4-2 | 16:10

Simulation-assisted fabrication process optimization of HEAs by laser cladding: heat flow, porosity, microstructure

Dadong Jie, Do Won Lee, Hyoung Seop Kim\*(POSTECH)

#### 적층4-3 | 16:25

레이저 기반 적층제조 전위 셀 및 저에너지 전위 구조 형성에 대한 편석과 열사이클 유도 소성 변형의 정량적 분리

안성열(포항공과대학교), 정상국(한화에어로스페이스), 권지혜(포항공과대학교), Renhao Wu(Tohoku University), G.M. Karthik(Indian Institute of Technology (BHU)), 김은성, 이정아, Jalal Kangazian, 구본우, 이재홍(포항공과대학교), 최중호(한국재료연구원), Takayoshi Nakano(Osaka University), 홍순익(충남대학교), 김형섭\*(포항공과대학교)

#### 적층4-4 | 16:40

직접응용증착법으로 제조된 IN939 합금의 비평형 미세조직을 고려한 열처리 최적화

김영운, 강호성, 성예찬, 김범준, 김정기\*(경상국립대학교)

#### 적층4-5 | 16:55

L-DED로 제작된 Fe-24Mn-4Cr-0.4C 고망간강의 Hf 및 Ce의 첨가에 의한 미세조직 및 기계적 특성의 변화

김민기, 박지영, 조해주, 이옥진\*(부산대학교)

#### 적층4-6 | 17:10

LPBF-Based Optimization of In Situ Alloying for Low-Cost  $\beta$ -Ti Alloys Targeting Biomechanical Compatibility

Sehun Kim, Ukju Gim, Bin Lee\*(Kyunghee Univ.)

#### 적층4-7 | 17:25

L-PBF 316L 스테인리스강의 초기 산화 거동에 미치는 잔류응력 완화 열처리의 영향

정창현(국립순천대학교), 배기창(한국세라믹기술원), 김도형(영남대학교), 조의제\*(국립순천대학교)

### 저탄소 알루미늄 심포지엄

위원장 : 현승균(인하대학교)

실무위원 : 김명균(포항산업과학연구원),

김세훈(한국자동차연구원), 조영희(한국재료연구원)

Room 2층 203, 4월28일

좌장 : 김명균(포항산업과학연구원)

#### 저탄소1-1 | 09:20

초청강연

재생원료 기반 탄소 저감 알루미늄 소재 개발 현황

강희삼\*(현대자동차)

#### 저탄소1-2 | 09:45

초청강연

친환경 xEV에 필요한 알루미늄 소재 기술

성시영\*(케이에이랩스)

#### 저탄소1-3 | 10:10

초청강연

저탄소 알루미늄 제조를 위한 스크랩 활용 확대 및 공정 대응 기술

송람\*, 이영기, 조훈(한국생산기술연구원)

#### Break Time | 10:35

좌장 : 김세훈(한국자동차연구원)

#### 저탄소2-1 | 10:45

초청강연

글로벌 탄소중립 규제에 따른 다이캐스팅 산업의 제조 전략 및 대응 사례 분석

윤상일\*, 최지석, 송호섭, 나규제, 유한결(삼기)

#### 저탄소2-2 | 11:10

초청강연

저탄소 알루미늄 리사이클과 신속용해로(furnace) 기술

장병록\*(인하대학교 제조혁신전문대학원)

#### 저탄소2-3 | 11:35

초청강연

저탄소 열교환기용 알루미늄 클래드재 국산화 개발

김민중\*((주)한국클래드텍)

좌장 : 어광준(한국재료연구원)

#### 저탄소3-1 | 14:00

초청강연

Car to Car 재활용 대응 크로스오버 알루미늄 합금 특성 연구

김세훈\*, 권교민, 김동규, 김대영(한국자동차연구원)

## 저탄소3-2 | 14:25 초청강연

LiMCA 기반 알루미눔 스크랩 50%이상 고비용 합금 전처리기술 및 소재특성평가  
김수원\*((주) 알멕)

## 저탄소3-3 | 14:50 초청강연

재활용의 한계를 넘어 : 알루미늄 순환경제를 위한 새로운 길과 제언  
/ Rethinking Aluminum Recycling : New Pathways and Strategic  
Insights for a Circular Economy  
김병철\*, 김경수(주)디에스리퀴드

## 저탄소3-4 | 15:15 초청강연

알루미늄 스크랩 용탕 최적 제어방안 및 이에 따른 비금속개재물 정량  
평가 방법  
김덕\*, 김명균, 하원(포항산업과학연구원)

**Break Time | 15:40**

좌장 : 김덕(포항산업과학연구원)

## 저탄소4-1 | 16:00 초청강연

저열팽창계수(Low Thermal Expansion Coefficient)를 갖는 알루미늄 합금 개발  
허용강\*, 박호준, 박대범(현대제철 기술연구소), 최현주, 이건배(국민대학교)

## 저탄소4-2 | 16:25 초청강연

알루미늄 용탕 내 개재물의 양을 예측하는 방법  
박종욱\*(PSS(주))

## 저탄소4-3 | 16:50 초청강연

자동차 소재/부품 탄소배출계수 산정 방법론  
주정균, 김세열, 김창주(FIT시험연구원), 한경훈(트레스웍스)

## 저탄소4-4 | 17:15 초청강연

주조용 알루미늄 합금에서 Fe 원소가 부식성에 미치는 영향  
이병덕\*, 정재윤, 신병수(고등기술연구원)

## 학생세션

위원장: 신세은(국립순천대학교)  
총무간사: 박진웅(국립한밭대학교)  
Room 3층 삼다A, 4월28일

좌장 : 박진웅(한밭대학교), 서기완(서울대학교)

학생1-1 | 09:00

**트랩프 원소 함유상의 고온 취성 균열 거동에 대한 정량적 평가: 평가법 개발 및 기구적 고찰**  
**김유진**(한국재료연구원, 부산대학교), 김성훈, 이정민, 유지성, 이창훈(한국재료연구원), 권순환, 민명철, 조종오(현대제철 R&D 연구센터), 박형권\*(한국재료연구원), **간남현**\*(부산대학교)

학생1-2 | 09:15

Al<sub>0.75</sub>VCrZrNb 내화 고엔트로피 합금의 상대적 산화 구동력 차이에 따른 복합 산화 거동 연구  
윤교식, 이용건, 이윤진, 강민욱, 안병민\*(아주대학교)

학생1-3 | 09:30

적층제조 기반 스테인리스 강-구리 복합재의 격자 구조 설계에 따른 열·기계적 거동 분석  
김강산, 정경재\*(성균관대학교), 최동인(서울대학교)

학생1-4 | 09:45

Al-Zn-Mg-Cu 합금에서의 결정립계 석출물이 피로 균열 전파거동에 미치는 영향  
신선호, 정혜지, 하재민(국민대학교), 하상렬(명지대학교), 성호경\*(국민대학교)

학생1-5 | 10:00

LPBF 제조 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금의 <100> 및 <110> 경쟁 성장 거동 규명 및 미세조직 제어  
김려현(국민대학교), 박하을, 박정민(한국재료연구원), 성효경\*(국민대학교)

학생1-6 | 10:15

비금속 원자를 활용한 Al-Zn-Mg-Cu-O 합금의 MWCNT 첨가에 따른 석출 거동 및 미세조직 변화와 기계적 특성 분석  
박현우(국립순천대학교), 이진원, 배동현(연세대학교), 신세은\*(국립순천대학교)

**Break Time | 10:30**

좌장 : 임진수랑(부산대학교), 김효건(한양대학교)

학생2-1 | 10:40

레이저 분말 적응 융합으로 제조된 인코넬718 격자 구조의 압축 거동  
및 미세조직과의 상관관계 분석

정다은(국민대학교), 강성민, 이경준(가천대학교), 강성규(경상국립대학교), 성  
효경\*(국민대학교)

학생2-2 | 10:55

결정립 크기 제어와 석출강화 기반 Fe-Mn-Si 형상기억합금의 회복  
응력 향상 전략  
윤제인, 김지영, 박은수\* (서울대학교)

학생2-3 | 11:10

Evaluating the Mechanical Behavior of Electro-deposited Invar Thin Films for High-Resolution FMM Applications  
Krittichok Rattanakodsakun, Zion Lee, JungHun Park(Korea Advanced Institute of Science and Technology), In-Gyeong Kim(Sunchon National University), Gi-Dong Sim\*(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

학생2-4 | 11:25

Effect of the Saccharin Concentration on Electrodeposition of the Fe-Ni Alloy  
김선민, 김인경, 박용범, 신세은\*(국립순천대학교)

**Break Time | 11:40**

좌장 : 임진수랑(부산대학교), 김효건(한양대학교)

학생3-1 | 14:00

Conversion-Based Integration of Topological Metal MoP for Liner-Free Nanoscale Via Interconnects  
Seoyeon Jeong, Gwangsik Mun, Yeon Sik Jeong\*(KAIST), Hyeuk Jin Han(성신여자대학교)

### 학생3-2 | 14:15

미세 피치 인터커넥션을 위한 구형 h-BN 충전 비전도성 필름을 적용한 레이저 기반 압착 접합 공정

김성철(한국전자통신연구원, 국립한밭대학교), 주지호\*, 엄용성, 최광문, 신정호, 장기석, 오진혁, 이찬미(한국전자통신연구원), 이가은, 윤미리(한국전자통신연구원, 국립한밭대학교), 이승윤(국립한밭대학교)

### 학생3-3 | 14:30

분자접합처리를 통한 반도체 패키징용 저온 Cu-Cu 접합 공정 연구

안성민, 김미림, 한병준, 김정환\*(국립한밭대학교)

### Break Time | 14:45

좌장 : 김하은(고려대학교), 김지호(경희대학교)

### 학생4-1 | 14:55

Al-Si-Mg-Fe-Mn계 주조합금의 갈바닉 부식 예측을 위한 미세조직 단위 전기화학 전위 매핑

김도현, 장형욱, 김동욱(국민대학교), 이효종(주) 이캠코아, 김정한(동아대학교), 차필령\*(국민대학교)

### 학생4-2 | 15:10

기계학습을 위한 7xxx계 알루미늄 합금 조합데이터셋 구축

이경환, 전서연, 천재은, 조기섭, 최현주\*(국민대학교)

### 학생4-3 | 15:25

니켈 도금 배터리 케이스의 공식저항성 평가 및 예측 모델 개발

이정민, 권완건, 송기안, 이지운(국립공주대학교), 홍순직, 문종언\*(국립공주대학교)

### 학생4-4 | 15:40

통계적·기하학적 휘도 분석 지표 기반의 고광택 성형품 표면 결함 탐지용 조명 광학계 최적화 연구

권용남, 이동준, 석우영, 박한일, 최현성\*, 김도현, 유경호(한국재료연구원)

### 학생4-5 | 15:55

Life Cycle Assessment-based Optimization of EAF Processes: A Shapley-value Approach to interdependent Process

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

### 학생4-6 | 16:10

수소 및 암모니아 환원제에 따른 직접환원철(DRI)의 환원 특성 및 배기 가스 거동 분석

민성구(한국에너지기술연구원, 서울시립대학교), 박성진, 임호태, 문태영\*(한국에너지기술연구원), 서명원\*(서울시립대학교)

### 학생4-7 | 16:25

CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaF<sub>2</sub>-MgO 슬래그 조건에서의 스테인리스강 탈황 거동

박동민(한양대학교), 이희재(세아창원특수강), 박주현\*(한양대학교)

### 학생위원 위촉식 | 16:40

### 시상식 | 17:00

## 에너지재료

위원장: 신병하(KAIST)

부위원장: 박찬진(전남대학교)

총무간사: 남대현(고려대학교), 오지훈(KAIST),

유상우(경기대학교)

Room 3층 삼다B, 4월28일

좌장 : 남대현(고려대학교)

### 에너지1-1 | 09:00

알루미늄 음극 합금 설계를 통한 알루미늄-공기 전지의 고에너지 밀도화

박은하, 이원도, 박준엽, 김정구\*(성균관대학교)

### 에너지1-2 | 09:15

Aluminum foil anodes for lithium-ion batteries overcoming the energy-durability trade-off via microstructure engineering

정희태, 김우진\*(홍익대학교)

### 에너지1-3 | 09:30

주유형 알루미늄-공기전지 성능 및 효율에 대한 음극 pellet의 크기 및 적층 구조 영향 평가

김용원, 손경호, 박은하, 김정구\*(성균관대학교)

### Break Time | 09:45

좌장 : 남대현(고려대학교)

### 에너지2-1 | 09:50

전고체전지용 저비용·고성능·대면적·고체전해질 제조 기술 연구

김화정, 최민서(한국표준과학연구원), 박혁준(고려대학교), 이석희(한국세라믹기술원), 김정현(한밭대학교), 신호선, 백승욱\*(한국표준과학연구원)

### 에너지2-2 | 10:05

Enhanced Electrochemical Properties of NCM811 Cathodes with MWCNTs in Solid Polymer Electrolyte-Based Batteries

Wu-young Goh, Chan-jin Park\*(Chonnam National University)

### 에너지2-3 | 10:20

전구체 상태 제어를 통한 고성능 가넷형 Li<sub>7</sub>La<sub>3</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>12</sub> 고체전해질의 저온 합성

최민서(한국표준과학연구원, 충남대학교), 김화정, 신호선, 백승욱\*(한국표준과학연구원)

### Break Time | 10:35

좌장 : 유상우(경기대학교)

### 에너지3-1 | 10:40

TRU핵연료 공정수율 향상을 위한 신소재 세라믹 도가니의 제조공정조건에 따른 열충격저항성 평가

박상균, 안정수\*, 심영호, 국승우, 김준환, 안정수(한국원자력연구원)

### 에너지3-2 | 10:55

블로커 보조 증착법을 이용한 유연 헬리컬 적층 안테나 제작: 스마트 컨택트 렌즈용 OLED에서의 고효율 무선 전력 전송

장규백, 전건후, 오성민, 박진우\*(연세대학교)



#### 에너지3-3 | 11:10

Enhancement of Thermoelectric Performance by Anion-Cation Co-Doping In Bismuth Tellurides And Cost-Effective & Mechanically Robust Thermoelectric Module Fabrication Process  
Saurabh Thoravat, Jae Hyun Yun <sup>\*</sup>(Kyung Hee University), Anil Kumar<sup>\*</sup>(Texas Tech University), Junyoung Park, Hyungyu Jin(POSTECH), Changsun Pak, Young-Kwang Kim(R-Materials Co. Ltd.), Jin Hee Kim, Jong-Soo Rhyee<sup>\*</sup>(Kyung Hee University)

#### Break Time | 11:25

좌장 : 유상우(경기대학교)

#### 에너지4-1 | 11:30

Heterostructure Engineering in Transition Metal Compounds for Multi-Electron Electrocatalysis  
Seunghun Shin, Sun Kyung Han, Junhwi Han, Hotae Jeon, Won-Kyu Lee<sup>\*</sup>(Hongik Univ.)

#### 에너지4-2 | 11:45

Cu-doped Sn-TiO<sub>2</sub> nanofibers with improved charge separation for efficient CO<sub>2</sub> photoreduction under UV-Vis light  
Hazina Charles, Plassidius J. Chengula, Jiyeon Seo, Caroline Sunyong Lee<sup>\*</sup>(Hanyang University ERICA)

#### 에너지4-3 | 12:00

Intimate contact-driven CO<sub>2</sub> photoreduction in Cu<sub>3</sub>SnS<sub>4</sub>/ZnTiO<sub>3</sub> heterojunction for solar driven methanol production  
Plassidius Chengula, Hazina Charles, JiYeon Seo, Caroline Sunyong Lee<sup>\*</sup>(Hanyang University)

### 여성세션

위원장: 정은진(RIST), 최현주(국민대학교)  
총무간사: 김세호(고려대학교), 신세은(국립순천대학교)  
Room 3층 삼다B, 4월28일

좌장 : 정은진((재)포항산업과학연구원)

#### 여성1-1 | 14:00 초청강연

과학기술의 미래, 여성 인재의 힘으로: WISET 전주기 성장 자원 체계  
송은경<sup>\*</sup>(한국여성과학기술인육성재단)

#### 여성1-2 | 14:25

우연의 파편들이 만든 하나의 흐름  
류채우<sup>\*</sup>(홍익대학교)

#### 여성1-3 | 14:40

선택의 과정에서 만들어진 정답  
김수민, 최현주<sup>\*</sup>(국민대학교)

#### 여성1-4 | 14:55

지속 가능한 미래를 위한 재료공학: 내가 이 길을 선택한 이유와 연구자로서의 지속 가능성  
이정아<sup>\*</sup>(포항공과대학교)

#### 여성1-5 | 15:10

세상에 쓸모없는 경험은 없었습니다: 알바생에서 연구자가 되기까지  
이효정, 최현주<sup>\*</sup>(국민대학교)

#### Break Time | 15:25

좌장 : 김세호(고려대학교)

#### 여성2-1 | 15:35

Do we really need to be superhuman to pursue a career in materials science?  
Aleksander Albrecht<sup>\*</sup>, Se-Ho Kim(Korea University)

#### 여성2-2 | 15:50

희소금속 신제련법 연구의 시행착오 및 해결사례  
송영준, 강정신<sup>\*</sup>(서울대학교)

#### 여성2-3 | 16:05

질문으로 만들어간 초보 연구자의 첫걸음  
이지원, 최현주<sup>\*</sup>(국민대학교)

#### 여성2-4 | 16:20

알루미늄 연구실의 일상  
전서연, 최현주<sup>\*</sup>(국민대학교)

### 비철금속

위원장: 김수경(KIGAM)  
총무간사: 강정신(서울대학교)  
Room 3층 300, 4월28일

좌장 : 이태혁(한국지질자원연구원)

#### 비철1-1 | 09:00

국내 저품질 타이타늄 정광으로부터 고순도 이산화타이타늄 제조 공정 개발  
이태혁, Shakib Benyamin, 강희남, 이진영(한국지질자원연구원), 강정신<sup>\*</sup>(서울대학교)

#### 비철1-2 | 09:15

MoO<sub>3</sub> 생산을 위한 MoS<sub>2</sub> 산화 거동 및 로터리 킬른 공정 최적화 연구  
허정호<sup>\*</sup>, 한성수(한국지질자원연구원, 과학기술연합대학원대학교)

#### 비철1-3 | 09:30

싸이클론 전해 공정을 이용한 폐 LFP 배터리 내 희소금속의 친환경 선택적 분리 및 회수 거동 연구  
이현준(과학기술연합대학원대학교, 한국지질자원연구원), 최영중, 이현주, 배무기, 최종원(한국지질자원연구원), 김수경<sup>\*</sup>(과학기술연합대학원대학교, 한국지질자원연구원)

#### 비철1-4 | 09:45

A Study of Acidic - Neutral Solvent Extraction Systems for Enhanced Nickel Selectivity from Electroplating Sludge

Burhan Febrinawarta(Korea Institute of Industrial Technology, University of Science and Technology), Myungsuk Kim(Korea Institute of Industrial Technology, Korea University), Kyoung-Tae Park, Jae Hong Shin\*(Korea Institute of Industrial Technology, University of Science and Technology)

#### 비철1-5 | 10:00

알루미늄 합금 재자원화를 위한 염 플럭스 기반 Fe 제거 및 용융염 물성 평가

이자성(인하대학교), 김영재, 강민우, 이지용(현대자동차), 김영재\*(인하대학교)

#### Break Time | 10:15

좌장 : 신재홍(한국생산기술연구원)

#### 비철2-1 | 10:25

구리-스테인리스강 이중 접합을 위한 저온·무플럭스 브레이징 용가제의 조성 설계 및 접합 거동

이찬양, 마은호, 오민철, 김건홍\*(고등기술연구원)

#### 비철2-2 | 10:40

전기차 고전압 릴레이용 동합금의 기계적 특성이 미세조직에 미치는 영향에 대한 연구

남효문\*, 박철민, 최영철, 문선영((주)풍산)

#### 비철2-3 | 10:55

Contact-Killing Performance of Copper Alloys Against Multidrug-Resistant Bacteria on High-Touch Surfaces

MUN SUNYOUNG\*, PARK CHEOL MIN, NAM HYU MOON, Choi Young-cheol, Kim Jun-hyeong, Park Seung-hoon(Poongsan R&D)

#### 비철2-4 | 11:10

불균일 핵생성상 제어를 통한 Cu-Ni-Si계 합금의 강도 향상

정현우, 신지용(한국재료연구원, 부산대학교), 정일석, 최은애(한국재료연구원), 권세훈(부산대학교), 한승전\*(한국재료연구원)

#### 비철2-5 | 11:25

시효 처리에 따른 Cu-Ni-Si 합금의 연속 및 불연속 석출 거동 분석

장정아(경상국립대학교), 김규낙(경상국립대학교, 한국재료연구원), 안지혁(한국재료연구원), 강성규\*(경상국립대학교)

#### Break Time | 11:40

좌장 : 이지운(국립공주대학교)

#### 비철3-1 | 14:00

Cu-Ni-Co-Si-Cr-Sn 합금의 가공 경화 및 시효 거동에 미치는 용체화 처리 온도의 영향

황지인(한국재료연구원), 정현우(한국재료연구원, 부산대학교), 최문수, 최은애\*, 한승전\*(한국재료연구원)

#### 비철3-2 | 14:15

Enhanced strength and electrical conductivity in Cu-Ni-Co-Si alloys by manipulating chemical composition and thermomechanical treatment

Alireza Derakhshandeh, Hamed Shahmir\*(Tarbiat Modares University, ), Farsad Forghani(Alloyed Ltd), Shi Woo Lee(POSTECH), Hyoung Seop Kim(POSTECH)

#### 비철3-3 | 14:30

통전 처리에 따른 Cu-4.5Ni-0.95Si 합금의 석출 거동 및 기계적 특성 변화

정이화(경상국립대학교), 김규낙(경상국립대학교, 한국재료연구원), 안지혁(한국재료연구원), 최동인, 한홍남(서울대학교), 강성규\*(경상국립대학교)

#### 비철3-4 | 14:45

저온 용사 가스 압축 온도 및 후열처리 조건이 구리 적층재 물성 및 알루미늄과의 접합강도에 미치는 영향

안지영(한국재료연구원, 경북대학교), 김형준, 김규낙(한국재료연구원), 조현욱(SHKOREA), 최돈현(현대모비스), 민경문(한국재료연구원), 박성혁\*(경북대학교), 안지혁\*(한국재료연구원)

#### Break Time | 15:00

좌장 : 최상훈(고등기술연구원)

#### 비철4-1 | 15:05

Cu-Cr alloy - based Shield-Cans with High Thermal Conductivity for Enhanced Thermal Performance of Smartphones

EUNJIN PARK, JUNWOO GA, JINHWAN JUNG, JIHYEON SON, MIN PARK\*(Samsung electronics)

#### 비철4-2 | 15:20

The copper alloy achieves excellent mechanical properties through the construction of a multiscale microstructure

Yijie Ban(POSTECH), Shi Woo Lee(POSTECH), Hyoung Seop Kim\*(POSTECH)

#### 비철4-3 | 15:35

Si계 무연 황동의 열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화

김규낙(한국재료연구원, 경상국립대학교), 민경문, 안지영, 김형준(한국재료연구원), 이진수((주) 대창), 오영석, 이윤수(한국재료연구원), 강성규\*(경상국립대학교), 안지혁\*(한국재료연구원)

#### 비철4-4 | 15:50

Al-Zn-Cu-Mg 합금의 기계적 및 마모 특성에 미치는 용체화 및 시효 처리의 영향

신지용, 정현우(한국재료연구원, 부산대학교), 정일석, 최은애(한국재료연구원), 권세훈(부산대학교), 한승전\*(한국재료연구원)

## 반도체

위원장: 최창환(한양대학교)  
총무간사: 이기영(홍익대학교)  
Room 3층 300, 4월28일

좌장 : 유찬영(홍익대학교)

### 반도체1-1 | 16:20

2차원 p형 MoTe<sub>2</sub> 채널과 강유전 고분자를 활용한 저전압 비휘발성 메모리

박지훈\*(국립부경대학교)

### 반도체1-2 | 16:35

Rare-Earth Oxides Doped ZrO<sub>2</sub> Charge Trap Layer to Mitigate Lateral Charge Loss for NAND Flash Memory

Gyumin Hwang, Dohyun Lee, Jisu Park, Hoon Pyo(Hanyang University), Hansol Oh, Yongjoo Park(SK trichem, ), Changhwan Choi\*(Hanyang University)

### 반도체1-3 | 16:50

Interfacial Metal Nitride Layers for Improved Dielectric and Reliability Properties of Hf1-xZrxO2 Morphotropic Phase Boundary  
Jaewon Chung, Sangkuk Han, Wonjae Choi, Haesoo Jang, Kyungwook Park, Sangmyun Lim, Soyoung Park, Sangwoo Jeong, Changhwan Choi\*(Hanyang University)

### 반도체1-4 | 17:05

양면 방열 파워모듈 적용을 위한 다층 Cu 소결 스페이서 개발  
백준하(한국생산기술연구원, 서울대학교), 김병찬(한국생산기술연구원, 고려대학교), 유하영(한국생산기술연구원, 서울대학교), 김동진\*(한국생산기술연구원)

좌장 : 김동진(한국생산기술연구원)

### 반도체2-1 | 17:20

Threshold Voltage Shift Enabled by ALD CoN Metal Gate for Advanced Logic Devices

Jang HaeSoo, Choi Changhwan\*, Han Sangkuk, Choi Wonjae, Chung Jaewon, Lim Sangmyun, Park Kyungwook, Jeong Sangwoo, Park Soyoung(Hanyang University)

### 반도체2-2 | 17:35

Balancing Interfacial Defect Suppression and Capacitance Coupling via MoOx Interfacial Layer in HZO-based Devices

TAESUK KIM, KYUNGSOO PARK, CHANGHWAN CHOI\*(Hanyang Univ.)

### 반도체2-3 | 17:50

Ag-Al-Mn 합금 기반 나노다공성 마이크로 Ag의 탈합금 공정에 따른 미세조직 변화와 소결 접합 특성

나인성, 성재욱\*, 현승균\*(인하대학교)

### 반도체2-4 | 18:05

Top Chuck의 기하학적 형상 변화가 Die 접촉 계면 특성에 미치는 영향에 관한 시뮬레이션 분석

유한준, 장병록\*(인하대학교)

## NEW-HORIZON: 소프트 반도체 응용 센서리 디스플레이 소재 기술 심포지엄

위원장 : 이태우(서울대학교), 박철민(연세대학교)  
실무위원 : 선정윤(서울대학교), 조성용(한양대학교)  
Room 3층 301, 4월28일

좌장 : 선정윤(서울대학교)

### 소반1-1 | 10:00

초청강연

Soft Iontronics for sensors and energy generators

Hyunhyub Ko\*(Ulsan National Institute of Science and Technology)

### 소반1-2 | 10:25

초청강연

Liquid-Metal and Conductive-Polymer Platforms for Stretchable Sensory Platform

Steve Park\*(KAIST)

### 소반1-3 | 10:50

초청강연

Light-driven Computing enabling Low-power Classification, Motion Recognition, and Multi-tasking

Gunuk Wang\*(Korea University)

### 소반1-4 | 11:15

초청강연

Freestanding Single-crystalline Membranes in Chemical Sensor Application

Jun Min Suh\*(Seoul National University)

### Break Time | 11:40

좌장 : 조성용(한양대학교)

### 소반2-1 | 14:00

초청강연

Neuromorphic e-SKIN and Microdisplay for Physical AI

Do Hwan Kim\*(한양대학교)

### 소반2-2 | 14:25

초청강연

Toward Practical Hardware Neural Networks with Organic Synaptic Devices

Hea-Lim Park\*(Seoul National University of Science and Technology)

### 소반2-3 | 14:50

초청강연

A Paradigm Shift in OLED Design: Leveraging Generative and Predictive AI Models

Jae-Min Kim\*(중앙대학교)

### 소반2-4 | 15:15

초청강연

Measurement Techniques for Inkjet Based Flexible Electronics

Kyung-Tae Kang\*(Korea Institute of Industrial Technology)

### Break Time | 15:40

좌장 : 김재민(중앙대학교)

### 소반3-1 | 16:05

초청강연

GaN 나노막대 기반 다파장 집적 마이크로 LED 제작 및 RGB 디스플레이 응용  
GaN 나노막대 기반 다파장 집적 마이크로 LED 제작 및 RGB 디스플레이 응용

류상완\*(전남대학교)

소반3-2 | 16:30 초청강연

Directional emission from full color hybrid GaN LEDs for AR glasses

Jaesang Lee\*(Seoul National University)

소반3-3 | 16:55 초청강연

AI-Assisted Screening and Binder-Free Formation of Color Conversion Layers via Solvent-Tuned Plasticity in Lead-Free Manganese Halides

Won Bin Im\*(Hanyang University)

소반3-4 | 17:20 초청강연

Nanomaterials simulations in the era of foundation AI models

Sungwoo Kang\*(KIST)

소반3-5 | 17:45 초청강연

머신러닝 가이드 2차원 페로브스카이트 합성 및 특성 예측 모델 (Machine Learning Guided Predictive Model for 2D Perovskites: Synthesis and Properties)

Junsang Cho\*(Sungshin Women's University)

수소재료1

위원장: 강남현(부산대학교)

총무간사: 김명민(KIMS), 박형기(KITECH), 손석수(고려대학교),

천동원(POSTECH)

Room 3층 303, 4월28일

좌장 : 박형기(한국생산기술연구원)

수소1-1 | 09:00

이온 조사에 따른 RAFT 강 표면의 수소 트랩 특성 변화 및 국부 변형 거동 분석

최단웅(한국재료연구원, 부산대학교), 유지성, 이승용(한국재료연구원), 신찬선(명지대학교), 박형권, 이창훈\*(한국재료연구원), 최윤석\*(부산대학교)

수소1-2 | 09:15

Unveiling the Role of Local Lattice Distortion in Regulating Hydrogen-Induced Phase Transformation of PdAg Nanoalloys

Jinseok Koh(KAIST), Hyunjeong Kim(AIST), Daiju Matsumura(JAEA), Kouji Sakaki(AIST), Eun Seon Cho\*(KAIST)

수소1-4 | 09:30

Microstructural evolution of 304 Stainless Steel in High Temperature Ammonia Environments

Doowon Jeong(Pohang University of Science and Technology), Hyungjun Ahn(포스코 NEX.T Hub), Hwasung Yeom\*(Pohang University of Science and Technology)

수소1-5 | 09:45

기체 투과도 측정 기술

정재갑\*, 이지훈(한국표준과학연구원)

수소1-6 | 10:00

냉간 압연에 따른 Pure V의 미세조직 변화와 수소 흡·방출 동역학 거동

최병철(한국생산기술연구원, 강원대학교), 강규병, 백민아, 석경찬, 홍성찬(한국생산기술연구원, 고려대학교), 엄수진(한국생산기술연구원), 신중호\*(강원대학교), 나태욱\*(한국생산기술연구원)

Break Time | 10:15

좌장 : 고원석(고려대학교)

수소2-1 | 10:25

수소 저속 주입 준평형 조건에서 금속수소화물 베드의 수소 저장 거동 및 열 출입 특성 해석

하태준\*(한국생산기술연구원), 배상환(한국생산기술연구원), 선현덕(한국생산기술연구원)

수소2-2 | 10:40

머신러닝 기반 AB<sub>2</sub> 수소저장합금의 저압·저비용 조성 설계 전략

진시원(한국과학기술연구원, 서울대학교), 하태준(한국생산기술연구원), 이영국(연세대학교), 박은수(서울대학교), 심재혁\*(한국과학기술연구원)

수소2-3 | 10:55

저가 원소재를 활용한 AB<sub>2</sub> 수소저장합금의 효율적인 비용 설계

배상환(한국생산기술연구원, 서울과학기술대학교), 진시원(서울대학교, 한국과학기술연구원 수소에너지소재센터), 선현덕(한국생산기술연구원, 고려대학교), 변종민(서울과학기술대학교), 심재혁\*(한국과학기술연구원, 성균관대학교), 하태준\*(한국생산기술연구원)

수소2-4 | 11:10

Interfacial Surface Bulging in AB-Type Hydrogen Storage Alloys during Hydrogenation

SuMin Lee(Sungkyunkwan University), Jin Hyeong Choi(Korea Institute of Science and Technology), Kyubin Hwang(Sungkyunkwan University, Korea Institute of Science and Technology), Jinyoung You, Changhyo Sun(Sungkyunkwan University), Taejun Ha(Korea Institute of Science and Technology, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)), Jae-Hyeok Shim\*(Sungkyunkwan University, Korea Institute of Science and Technology), Hye Jung Chang\*(Korea Institute of Science and Technology), Yunseok Kim\*(Sungkyunkwan University, Korea Institute of Science and Technology)

수소2-5 | 11:25

Mg-20Ni 합금의 수소저장 특성에 대한 공정조작의 영향

최태열(한국재료연구원, 부산대학교), 김도현, 서병찬(한국재료연구원), 이제인(부산대학교 재료공학과), 김영민\*(한국재료연구원)

수소2-6 | 11:40

산소 안정화 금속간 화합물 Ti<sub>2</sub>FeO<sub>x</sub>의 Ni, Cr, Mn, V 치환 효과

윤영철(한국과학기술연구원, 서울대학교), 박은수\*(서울대학교), 김진우\*(한국과학기술연구원)

## 수소경제 구현을 위한 수소 운송 및 저장소재 심포지엄

위원장 : 강남현(부산대학교)  
실무위원 : 천동원(KIST), 박형기(생산기술연구원),  
김영민(재료연구소), 손석수(고려대학교)  
Room 3층 303, 4월28일

좌장 : 강남현(부산대학교산대학교)

저장1-1 | 14:00 초청강연

화학적 수소저장과 금속·재료  
남석우\*(한국과학기술연구원)

저장1-2 | 14:30 초청강연

Ti계 AB2계열 저온 저압형 수소저장합금 제조공정 연구  
이기영\*, 금보경, 권용혁((주)케이피씨엠)

저장1-3 | 15:00 초청강연

고압수소 이송을 위한 100기압급 배관용 소재/강관 제조기술 개발 및  
실증  
이동호\*, 정환교(포스코)

저장1-4 | 15:30 초청강연

4D-STEM 다차원 데이터 분석으로 규명하는 MgNi 기반 수소저장합금  
수소화 메커니즘  
강상준\*(Karlsruhe institute of technology (KIT))

Break Time | 16:00

좌장 : 서진유(KIST)

저장2-1 | 16:10 초청강연

액체수소 모빌리티용 핵심소재 개발 및 실증  
나영상\*, 김영균, 장태진, 권현준(한국재료연구원), 손석수(고려대학교), 정덕현  
(충남대학교), 박태훈, 이승건(한국재료연구원)

저장2-2 | 16:40 초청강연

How Ab-Initio Calculations Advance Our Understanding of Water  
Electrolysis  
Soonho Kwon\*(POSTECH)

저장2-3 | 17:10 초청강연

Effects of Bake-Hardening(BH) Heat Treatment on Hydrogen  
Embrittlement(HE) in automotive UHSS : Atomic-Scale  
Microstructural Analysis  
Yeon Seung Jung\*(POSCO Technical Research Lab.), Pang-Yu Liu,  
Chun Chen, Ranming Niu, Julie Cairney\*(The university of Sydney), Ain  
Hwang, Younghoon Jin, Honggee Kim(POSCO Technical Research Lab.)

## NEW-HORIZON: Next Generation AI 바이오 융합 심포지엄

위원장 : 김유찬(KIST), 이승철(KAIST)  
실무위원 : 김용주 (고려대학교), 이준민 (POSTECH),  
이주현 (한양대학교)  
Room 3층 한라A, 4월28일

Opening Remark | 14:00

좌장 : 이주현(한양대학교)

AI바이오1-1 | 14:10 초청강연

Accelerating Multiphysics Modeling via GNNs and PINNs: A  
Journey from Ferroelectrics to Biodegradable Materials  
Pil Ryung Cha\*(국민대학교)

AI바이오1-2 | 14:35 초청강연

Engineered Tissue and Bone-on-a-Chip Platforms Toward  
AI-Driven Regenerative Medicine  
Junmin Lee\*(포항공과대학교)

AI바이오1-3 | 15:00 초청강연

Active learning approach in designing energy materials  
김용주\*(고려대학교)

AI바이오1-4 | 15:25 초청강연

Artificial Molecular Recognition and Machine Learning for  
Multidimensional Biochemical information Decoding  
Sooyeon Cho\*(Sungkyunkwan University)

AI바이오1-5 | 15:50 초청강연

MetaFlow: 3D NodeSpace 기반 연구자 중심 소재 개발 AI 플랫폼  
박세진, 최준혁, 원예지(국민대학교), 어광준(한국재료연구원), 조기섭\*(국민대  
학교)

Break Time | 16:15

좌장 : 조수연(성균관대학교)

AI바이오2-1 | 16:25 초청강연

Integrating AI into Bioinspired Bionanomaterial Engineering  
Ju Hun Lee\*(Hanyang University, ERICA)

AI바이오2-2 | 16:50 초청강연

Application of Artificial Intelligence for Property Control of  
Biomedical Polymers  
Hyun-Do Jung\*(Hanyang University)

AI바이오2-3 | 17:15 초청강연

생분해성 바이오 의료소재에서의 AI 응용 전략  
강승균\*(서울대학교)

## 전산재료과학

위원장: 이동화(POSTECH)

부위원장: 김현유(충남대학교)

총무간사: 김병현(한양대학교ERICA), 서동화(KAIST),

신정호(KRICT)

Room 3층 한라B, 4월28일

좌장 : 장우선(연세대학교)

전산1-1 | 09:00

초청강연

Computational investigation of anionic redox chemistry for sustainable high-energy Li-ion batteries

Eun Ryeol LEE\*(충북대학교)

전산1-2 | 09:25

이중 도핑 기반 과리튬 망간 층상 구조 양극재의 전자 구조와 전기화학적 성능 연구

주용하(포항공과대학교), 신용진(단국대학교), 김경덕\*(포항공과대학교)

전산1-3 | 09:40

Effects of Hydrophobic Layer on Layered Transition Metal Oxide Cathodes for Ultrafast-Charging Aqueous Li-Ion Batteries: A First-Principles Study

Suim Lim(Korea Institute of Energy Research, Sogang University), Eunjin Choi, Hyunjeong Oh, Hye Ryung Byon\*(Korea Advanced Institute of Science and Technology), Kanghoon Yim\*(Korea Institute of Energy Research)

전산1-4 | 09:55

Self-Healing Strategy for Seawater Electrolysis: The Role of  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$  in Stabilizing NiFe-LDH Anodes

Bogeun Park(Hanyang University ERICA), Won-Chul Cho\*(Seoul National University of Science and Technology), Byung-Hyun Kim\*(Hanyang University ERICA)

전산1-5 | 10:10

First-Principles Insights into the Enhanced Catalytic Activity of Mg-Doped Prussian Blue for Hydrogen Peroxide Decomposition

PRITAM DAS(Kookmin University), Yu-Chan Kim(Korea Institute of Science & Technology), Pil-Ryung Cha\*(Kookmin University)

Break Time | 10:25

좌장 : 김용주(고려대학교)

전산2-1 | 10:35

초청강연

Developing universal algorithms for decomposing ionic transport into interpretable mechanisms

KyuJung Jun\*(Korea University)

전산2-2 | 11:00

Revealing the Origin of Enhanced Li-ion Conductivity in  $\text{BH}_4^-$ -Substituted Li-Argyrodites

Jung Woo Kang, Sang Uck Lee\*(Sungkyunkwan University)

전산2-3 | 11:15

Origin of Optimal Composition and Density for Li-Ion Diffusion in Amorphous Li-P-S Electrolytes

Chihun Kim(Korea Institute of Science and Technology, Korea Univ.), Hyun-Jae Lee(Korea Institute of Science and Technology), Byungju Lee\*(Korea Institute of Science and Technology, University of Science & Technology)

전산2-4 | 11:30

Effect of lattice distortion and hydrogen affinity on hydrogen diffusion in hydrogen storage alloys : An atomistic simulation study

Ji-Su Lee, Byeong-Joo Lee\*(POSTECH)

전산2-5 | 11:45

상장 모델을 활용한 소성 중 미드니켈 층상 양극활물질의 단결정화 메커니즘 분석

박현호(포항공과대학교), 김상범, 김영진(강원대학교), 김경덕\*(포항공과대학교)

좌장 : 신기현(한밭대학교)

전산3-1 | 14:00

초청강연

Deep learning of short-range order formation kinetics in multicomponent alloys

Hoje Chun\*(국민대학교)

전산3-2 | 14:25

Revealing Li staging Reactions in Graphite via a Genetic Algorithm Coupled with a Machine-Learning Interatomic Potential

YONG HUI KIM, Sang Uck Lee\*(SungKyunKwan University)

전산3-3 | 14:40

Efficient Exploration of PtZn-Based Ammonia Catalysts Using Universal Machine Learning Potentials

Hayoung Jeong, Jeong Woo Han\*(Seoul National University)

전산3-4 | 14:55

제일원리계산 및 기계학습 기반  $\gamma$ -Fe 결정립계 편석 예측과 분자동역학 규모 확장

이호, 김상태\*(한양대학교)

전산3-5 | 15:10

Construction and Validation of a Machine-Learning Interatomic Potential for Liquid Metal Simulations: A Case Study of Pb-Bi-Ni Alloys with Oxygen Impurities

Jimin Lee(Seoul National Univ.), Atsushi Komatsu, Takahiro Igarashi(JAEA), Takuji Oda\*(Seoul National Univ.)

Break Time | 15:25

좌장 : 김현유(충남대학교)

전산4-1 | 15:35

초청강연

Engineering Metastable Phases: What Can Theory Predict and Where Does It Fail?

홍기하\*(국립한밭대학교)



#### 전산4-2 | 16:00

CALPHAD-Coupled Phase-Field Modeling of Multi-Component Aluminum Alloys: Overcoming Data Scarcity in AI-Driven Design  
Dong-Uk Kim, Seong Gyoon Kim, Hyung-Uk Jang, Hwijae Cho, Pil-Ryung Cha\*(Kookmin University)

#### 전산4-3 | 16:15

Microstructural Evolution and Oxidation Kinetics of Zirconium Cladding under LOCA Conditions: A Phase-Field Study  
jiho kim, Kunok Chang\*(Kyung Hee University)

#### 전산4-4 | 16:30

Phase-Field Modeling of Ternary Systems with Stoichiometric Phases and a Solution phase  
Jeonghwan Lee, Kunok Chang\*(Kyung Hee University)

#### Break Time | 16:45

좌장 : 김병현(한양대학교 ERICA)

#### 전산5-1 | 16:55

초청강연

Toward Accelerated Quantum Mechanical Property Prediction via Deep Learning  
Yang Jeong Park\*(울산과학기술원)

#### 전산5-2 | 17:20

Shifting the Volcano Relationship in Ammonia Decomposition through Interfacial Cooperation  
Jungwoo Choi(KIST), Byung Chul Yeo\*(Pukyong National University), Donghun Kim\*(KAIST)

#### 전산5-3 | 17:35

Vacancy-Induced Dynamic Evolution of Cu Dual-Atom Sites Enables C-C Coupling for Electrochemical CO<sub>2</sub>/CO Reduction  
Hyun Dong Jung(Sogang Univ.), Seoin Back\*(Korea Univ.)

#### 전산5-4 | 17:50

Exploring binary-alloyed RuO<sub>2</sub> for enhanced activity and stability under acidic OER  
Soonsung So, Sang Soo Han\*(Korea Institute of Science and Technology)

### 집합조직

위원장: 김동익(KIST)  
총무간사: 전태성(인천대학교)  
Room 4층 400, 4월28일

좌장 : 김진우(한국과학기술연구원)

#### 집합1-1 | 09:00

Low-cycle fatigue behavior of bi-textured magnesium alloys  
Du Hyeon Woo, Hyung Jun Kim, Je Hyeong An, Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National Univ.)

#### 집합1-2 | 09:15

적층제조 다상조직강의 비대칭 압연에 따른 불안정 오스테나이트 거동의 미세조직적, 기계적 분석  
강민성, 신중호\*(강원대학교), 최인석, 김재우(서울대학교), 정효태, 조유연(솔루션소재), 김보규, 한준희, 김대현, 한성희, 서태현, 신승우, 윤수빈, 장지훈, 이류경(강원대학교)

#### 집합1-3 | 09:30

초청강연

Modeling of Plane-Strain Texture Evolution in Polycrystalline Aluminum Alloys Incorporating Statistically Stored and Geometrically Necessary  
Preetham Alluri, Wi-Geol Seo, Shi-Hoon Choi\*(Sunchon National University)

#### 집합1-4 | 09:55

고속 탄도 충돌 하 AZ31 판재의 방향 의존적 파손 메커니즘 규명  
이정훈, 유진영(부산대학교), 김윤호(서울대학교), 이정훈(경북대학교), 이태경\*(부산대학교)

#### 집합1-5 | 10:10

Investigating deformation mechanism of AZ31 alloy in the temperature range of 25°C ~ 200°C  
Dain Choi, Ha seong Baek, Tea-Sung Jun\*(Department of Mechanical Engineering, Incheon National University, Incheon 22012, Republic of Korea)

#### 집합1-6 | 10:25

ZX합금의 박판압연에 따른 집합조직의 거동  
김성제, 이상봉\*(국립금오공과대학교)

#### Break Time | 10:40

좌장 : 신중호(강원대학교)

#### 집합2-1 | 10:50

다마신 공정을 위한 구리 전해 도금에서의 저농도 PEG의 흡착 거동 및 도금층의 미세조직에 관한 연구  
최재훈(동아대학교), 이한근(포항공과대학교), 신한균(동아대학교), 이효종(주식회사 이켄코아), 송재용(포항공과대학교), 김정환\*(동아대학교)

#### 집합2-2 | 11:05

반도체 패키지 기반 마이크로 비아의 PEG-SPS 유기첨가제 조합 기반 구리 전해도금 시 충전 거동과 미세조직/집합조직 분석  
오은기, 최재훈, 신한균, 박 현, 김정환\*(동아대학교)

#### 집합2-3 | 11:20

결정학적 정합성에 따른 타이타늄 내 입계 수소화물 석출 거동 분석  
전초록(한국과학기술연구원, 서울대학교), 정원석(로렌스리버모어국립연구소), 김태연, 윤영철, 강재동(한국과학기술연구원), 박은수\*(서울대학교), 허태욱(로렌스리버모어국립연구소), 김진우\*(서울대학교)

#### 집합2-4 | 11:35

Accelerated Screening of Corrosion-Resistant Coating Materials for Molten Chlorides via Computational Phase-Stability Diagrams  
함성원, 김상태\*(한양대학교)

## 집합2-5 | 11:50

Divergent Density Trends Driven by Oxygen Speciation in Uranium-Bearing Molten Chlorides

hyeonwoo Kim, Heejin Park, Sangtae Kim\*(한양대학교)

좌장 : 김상태(한양대학교)

## 집합3-1 | 14:00

Data-driven Investigation into Twinning Behavior of Magnesium Alloys

Jaehyung Cho\*, Murugesan Mohanraj, Jang Hyo-sun, Lee Geon-young(한국재료연구원)

## 집합3-2 | 14:15

인공신경망을 활용한 복합조직강의 물성과 미세조직 분석

강전연\*(한국재료연구원), 강민우, 권순우, 김동휘(현대자동차그룹)

## 집합3-3 | 14:30

Fe-3%Si 전기강판에서 탄소가 집합조직에 미치는 영향

한규석\*, 문현우, 주형돈(주) 포스코

## 집합3-4 | 14:45

1차 재결정 조직에서 Goss 방위 결정립의 크기 이상 및 인접립 집합조직 특성

이세일\*(포스코 기술연구원)

## Break Time | 15:00

좌장 : 전태성(인천대학교)

## 집합4-1 | 15:10

Impact of Recrystallization on Hydrogen-Sensitive Creep in Zirconium Alloy Cladding

Sangtae Kim\*, Sungjun Choi, Ho-A Kim(Hanyang University)

## 집합4-2 | 15:25

In-situ SEM-EBSD-DIC investigation of intragranular deformation and lattice rotation in 316L austenitic stainless steel

Min-Su Lee(한국생산기술연구원), Jun Won Yoon(한국생산기술연구원, 고려대학교), Taeyang Kwak, Taejin Lee(루안), Seok Su Sohn(고려대학교), Jungho Shin\*(강원대학교), Chang-Soo Park\*(한국생산기술연구원)

## 집합4-3 | 15:40

적층제조 다상조직강의 단계별 인장에 따른 상별 나노역학적 특성 분석

한성희(국립강원대학교), 김재우(국립서울대학교), 김대현, 김보규, 한준희, 강민성(국립강원대학교), 최인석(국립서울대학교), 신중호\*(국립강원대학교)

## 집합4-4 | 15:55

Dwell-Fatigue Behaviour of Ti6242 alloy Manufactured via Electron Beam Powder Bed Fusion

A. Rajesh Kannan, Ha-Seong Baek(인천대학교), S. Maheshwaran, N. Siva Shanmugam(National Institute of Technology, Tiruchirappalli), Jae H. Kim(한국재료연구원), Tea-Sung Jun\*(인천대학교)

## 가공-소성가공

위원장: 이광석(KIMS)

총무간사: 강용준(KIMS), 김준호(한국생산기술연구원), 성효경(국민대학교), 오세권(KITECH), 이제인(부산대학교)

Room 4층 400, 4월28일

좌장 : 성효경(국민대학교)

## 소성1-1 | 16:30

아연도금 초고강도강재의 전단면 수소취성에 미치는 미세조직적 영향  
박형권\*, 유지성(한국재료연구원), 조용희(전남대학교), 이진종, 김경원, 이창훈(한국재료연구원), 김지영, 정승필, 박영철(현대제철)

## 소성1-2 | 16:45

저온 열처리에 따른 초고강도강 전단면 수소취성 저항성 거동 및 향상  
유지성\*, 이진종, 박형권, 이태호, 이창훈(한국재료연구원)

## 소성1-3 | 17:00

탄소배출 및 원가 저감을 위한 핫스탬핑 냉간트림 기술 연구  
손성국\*, 이창욱(현대자동차), 박재명, 윤승(현대제철)

## 소성1-4 | 17:15

다단 신선 및 열처리 공정에 따른 펄라이트 강선의 미세조직 변화와 기계적 물성 간 상관관계 분석  
이승희, 박주현(동아대학교), 김보미, 제환승(고려제강), 강신곤\*(동아대학교)

## 철강A-제선,제강,환경,에너지

위원장: 엄경근(포스코 기술연구원)

총무간사: 박경수(포스코 기술연구원), 박주현(한양대학교), 황병철(서울과학기술대학교)

Room 4층 401, 4월28일

좌장 : 김선중(조선대학교)

## 철강A1-1 | 09:00

Effect of Temperature on Multi-stage Hydrogen Reduction of Iron Ore

Seong-Jin Kim(포항공과대학교), Seongkyu Cho(포스코기술연구원), Sung-Mo Jung\*(포항공과대학교)

## 철강A1-2 | 09:15

Design of a New Iron Ore Sinter with Quasi-particles – Part 1. Fluidity Test

Haeun Kim, In-kook Suh, Joonho Lee\*(Korea University)

## 철강A1-3 | 09:30

딥러닝 기반 차수 축소 모델을 이용한 기포 유동층의 동역학적 거동 예측 가속화 연구

진봉민, 서승원, 심승현, 양현진\*(인하대학교)

## 철강A1-4 | 09:45

고로 레이스웨이 형상에 따른 연소 및 입자 거동 특성에 대한 전산해석 연구

이정호, 남준영, 류창국\*(성균관대학교), 이승문, 신민수(포스코)

#### 철강A1-5 | 10:00

EAF형 수 모델 내 저취 유동의 레이놀즈 수에 따른 영역별 특성 고찰  
박지현, 김선중\*(조선대학교)

#### 철강A1-6 | 10:15

철강 슬라브 연속주조 몰드내 토출류 거동과 탕면 변화 현상 모델링  
박정섭, 신재원, 김나영, 조성목\*(국립부경대학교)

#### Break Time | 10:30

좌장 : 김영재(인하대학교)

#### 철강A2-1 | 10:40

메탄 열분해 반응 중 용융 금속 촉매의 피독 현상을 활용한 용철 내 황 흡착 계수 측정  
원태균(포항공과대학교), 이은도(한국생산기술연구원), 강윤배\*(포항공과대학교)

#### 철강A2-2 | 10:55

합철 부산물 및 Al 부산물 활용 환원 반응에 따른 환원철 제조 및 Al, Si 환원 거동  
김윤한, 김선중\*(조선대학교)

#### 철강A2-3 | 11:10

맥석 조성과 탄소 함량 차이에 따른 HBI의 잔탕 내 용해거동 모사  
이민주(한양대학교), 조재섭(한양대학교, 메탈젠텍), 박주현\*(한양대학교)

#### 철강A2-4 | 11:25

자선분광 분사연마 공정내 분광베드 형성 및 연마 현상 전산모델링  
신재원(국립부경대학교), 조성구(포항산업과학연구원), 조성목\*(국립부경대학교)

#### 철강A2-5 | 11:40

전기강판용 Fe-Si 합금의 고온 열물성 평가  
박지우(고려대학교), Hideo Higashi, Hiroyuki Fukuyama(Tohoku University, Institute of Multidisciplinary Materials Science), Jürgen Brillo(German Aerospace Center (DLR), Institute of Material Physics in Space), 이준호\*(고려대학교)

#### 철강A2-6 | 11:55

Determination of the Adsorption Coefficient of Phosphorus on Liquid Iron from Surface Tension Data within an Ideal Adsorption Framework  
Chan-Jun Lee, Tae-Gyu Wi, Youn-Bae Kang\*(POSTECH)

좌장 : 조성목(부경대학교)

#### 철강A3-1 | 14:00

고로 연화·용착대 실시간 가시화 기술 개발 현황과 탈탄소 공정 활용 방안  
이성희\*, 이상대, 권민락, 류진호(포스코)

#### 철강A3-2 | 14:15

HBI 장입 고로의 조업 안정성 확보를 위한 MgO 함량별 펠렛의 환원 및 연화응용 특성 평가  
김리주, 박준범, 권재홍, 오한상, 이종협\*(현대제철)

#### 철강A3-3 | 14:30

Fe의 탄소 석출에 미치는 표면 조도 및  $\text{CH}_4\text{-CO-H}_2$  혼합 가스 조성의 영향성 평가  
조다한, 김영재\*(인하대학교), 이유빈(현대제철)

#### 철강A3-4 | 14:45

Effect of Gas Composition and Temperature on Direct Reduction of Iron Ore Pellets: A Novel Resistance Analysis for Kinetic Modelling  
Ahmad Raza Javed\*(POSTECH (GIFT))

#### 철강A3-5 | 15:00

DRP 원료 환원 특성 평가  
박태준\*(한국지질자원연구원, 과학기술연합대학원대학교), 이동수, 김혁(현대제철)

#### 철강A3-6 | 15:15

Comparative Carbothermal Reduction of DRI with Steelmaking By-Products via Vertical Furnace & Microwave Heating  
Dahye Han, Seojin Lee, Il Sohn\*(Yonsei Univ.)

#### Break Time | 15:30

좌장 : 정은주(포스코 기술연구원)

#### 철강A4-1 | 15:35

Auto-SEM 활용한 Clean Steel DB 시스템 개발  
채수관, 서성모, 송민호\*, 조승현(포스코 기술연구원)

#### 철강A4-2 | 15:50

Mechanism of Sulfur-Induced Changes in Nitrogen Absorption  
Heeju Kim, Il Sohn\*(Yonsei University)

#### 철강A4-3 | 16:05

2차연소 조건에서  $\text{MgO-C}$  내화재의 열화거동  
김기원(한국공학대학교), 정지훈(한국공학대학교), 박찬근, 김민철, 정용석\*(한국공학대학교)

#### 철강A4-4 | 16:20

제강-연주공정 연속 버블링 설비의 상태 모니터링 기술  
김성줄\*(포스코)

#### 철강A4-5 | 16:35

Computational and Experimental Investigation of Two-phase Gas-liquid Flows in Ladle Shroud on Tundish Hydrodynamic Performance During Continuous Casting  
Subham Ranjan\*, Joonho Lee\*(Korea University)

#### Break Time | 16:50

좌장 : 강영조(동아대학교)

#### 철강A5-1 | 16:55

철스크랩 고급화 기술 국내외 현황 및 향후 기술 과제  
황성두, 강동훈\*, 이창호\*(현대제철 기술연구소), 김대성\*, 차지훈\*(현대제철)

## 철강A5-2 | 17:10

중성자 분석을 활용한 국내 철스크랩 선별 공정 최적화 및 품질 평가 기술 개발

이창호, 강동훈\*, 황성두\*(현대제철 기술연구소), 이동은\*, 차지훈\*, 김대성\*(현대제철)

## 철강A5-3 | 17:25

이중 입경-다상유동모델 기반 상운유동층 모사 및 입도 효과 분석

심승현, 진봉민, 양현진\*(인하대학교)

## 철강A5-4 | 17:40

스테인리스 AOD 정련 자동화 기술 개발

정은주\*, 한승민, 정태인(포스코)

## 철강A5-5 | 17:55

전기용융로 내 슬래그/용선 계면에서의 SiO<sub>2</sub> 환원 및 Si pick up 반응의 속도론 및 반응 메커니즘에 관한 연구

박성환, 박주현\*(한양대학교)

## 철강A5-6 | 18:10

용강 내 산소 저취 마그카본 퍼징 플러그의 열화 거동

명재우, 김기원, 박찬근, 정용석\*(한국공학대학교)

## 마그네슘

위원장: 박성수(UNIST)

총무간사: 서병찬(KIMS)

Room 4층 402A, 4월28일

좌장 : 박성수(울산과학기술원)

## 마그네슘1-1 | 14:00

초청강연

싱크로트론 X-선 회절을 이용한 마그네슘 합금의 변형기구 해석

이상봉\*(국립금오공과대학교), 김명민(한국재료연구원), Gaoming Zhu(Helmholtz-Zentrum Hereon), Ulrich Lienert(Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)), Dietmar Letzig(Helmholtz-Zentrum Hereon)

## 마그네슘1-2 | 14:25

냉간 압연된 마그네슘 이상 합금의 변형과 집합조직 변화 나노압입시험 및 유한요소 연계 분석

서위걸, 고경민, 이승철, Khushahal Thool, 최시훈\*(국립순천대학교)

## 마그네슘1-3 | 14:40

Mg-9wt%Ag 합금의 고온 평면변형 압축 중 초기 집합조직에 따른 재결정 및 미세조직 발달에 미친 영향

윤지민(국립부경대학교), 김기범(The University of Tokyo), 김권후\*(국립부경대학교)

## 마그네슘1-4 | 14:55

Interfacial Characteristics and Mechanical Properties of Mg-Core and Al-Sleeve Clad Rods Fabricated by Compound Casting and Extrusion

Seoung-yoon Yu, Gun Woong An, Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National University)

## Break Time | 15:10

좌장 : 배준호(한국재료연구원)

## 마그네슘2-1 | 15:20

금속 냉각 공정이 생분해성 마그네슘 미세튜브의 기계적 특성 및 생분해 거동에 미치는 영향

김재성(한국재료연구원), 황건호(한국재료연구원, 고려대학교), 김하식, 이상은, 김재연, 임창동, 서병찬, 서종식\*(한국재료연구원)

## 마그네슘2-2 | 15:35

Mg 합금 부식속도 예측을 위한 기계학습 회귀 알고리즘 비교 연구

원윤정, 임창동\*(한국재료연구원)

## 마그네슘2-3 | 15:50

Core-shell 입자 설계를 통한 마그네슘 합금 내식성 향상

김정기, 민두원, 권재호, 박성수\*(울산과학기술원)

## 마그네슘2-4 | 16:05

기지 합금이 Mg-SiC 복합재의 부식 특성에 미치는 영향

강동현(한국재료연구원, 경북대학교), 김영민, 문영훈(한국재료연구원), 박성혁(경북대학교), 김재연\*, 배준호\*(한국재료연구원)

## 마그네슘2-5 | 16:20

Effect of  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> morphology and composition on corrosion behavior of AZ-based cast alloys

Hongxiu Liu(한국재료연구원, 창원대학교), Bae Jun-ho, Moon Young-Hoon, Lee Sang-eun, Kim Jae-yeon\*, You Bong-sun\*(한국재료연구원)

## Break Time | 16:35

좌장 : 원윤정(한국재료연구원)

## 마그네슘3-1 | 16:45

마그네슘 합금에서 관찰된 intra-precipitation 현상

권재호, 김정기, 박성수\*(울산과학기술원)

## 마그네슘3-2 | 17:00

Effect of Sn Addition on Microstructural Evolution and Hydrogen Storage Properties of Mg-Mg<sub>2</sub>Ni Alloy

Do-Hyeon Kim(Korea Institute of Materials Science, Kyungpook National Univ.), Tae-Yeol Choi(Korea Institute of Materials Science, Pusan National Univ.), Da-Young Choi, Young Min Kim(Korea Institute of Materials Science), Sung Hyuk Park(Kyungpook National Univ.), Byeong-Chan Suh\*(Korea Institute of Materials Science)

## 마그네슘3-3 | 17:15

마그네슘 합금 판재의 미세조직 제어에 따른 전자기파 차폐 거동 및 중성자 차폐 효과 방안

김경택, 김성제, 강민혁, 이상봉\*(금오공과대학교)

## 마그네슘3-4 | 17:30

Zn 함량 및 압출 온도가 Mg-Al-Zn-Mn-Ca-Y 합금 압출재의 물성에 미치는 영향

황건호(한국재료연구원, 고려대학교), 김재성, 김재연, 서병찬, 이상은, 문병기(한국재료연구원), 김세호(고려대학교), 서종식\*(한국재료연구원)

## 철강B-압연,강종개발,후처리

위원장: 엄경근(포스코 기술연구원)

총무간사: 박경수(포스코 기술연구원), 박주현(한양대학교),  
황병철(서울과학기술대학교)  
Room 4층 402B, 4월28일

좌장 : 김지훈(부산대학교)

### 철강B1-1 | 09:00

AI 계 코팅된 핫프레스포밍강의 상온 수소 탈착거동에 대한 코팅층 미세공극의 영향 분석

고성민, 강대인(연세대학교), 감성우, 오진근(포스코 기술연구소), 이영국\*(연세대학교, 포항공과대학교)

### 철강B1-2 | 09:15

22MnB5 강의 내마모성능 분석

김현, 김혜진, 이승준\*(한국공학대학교)

### 철강B1-3 | 09:30

Effect of Al on Hydrogen Absorption and Embrittlement in 34MnB5 Hot-Stamping Steels

Dae-In Kang, Jin-Young Lee, Woo-Joong Lee, Young-Kook Lee\*(Yonsei Univ.)

### 철강B1-4 | 09:45

API X60강의 마모 거동 및 메커니즘 분석

한지혜, 이승준\*(한국공학대학교)

### 철강B1-5 | 10:00

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

예정원, 김민석, 박은수\*(서울대학교)

### 철강B1-6 | 10:15

위성 구조체용 인바/마르텐사이트강 클래드 합금 개발

송건호, 김재영, 정윤문, 나종범, 한정호\*(한양대학교)

### Break Time | 10:30

좌장 : 김혜진(한국공학대학교)

### 철강B2-1 | 10:40

초청강연

화학적 불균일 기반 차세대 철강재료 미세조직 설계

김지훈\*(부산대학교), 서동우(포항공과대학교)

### 철강B2-2 | 11:05

고강도 보론강의 Al, Ti, Nb 복합 첨가에 따른 석출 거동과 충격인성

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

### 철강B2-3 | 11:20

Arrhenius식 동적 재료 모델을 사용한 S355NL 저합금강의 고온 변형 거동 해석

이성호, 유진영, 천세호, 이정훈(부산대학교), 이채훈, 이진모(태웅), 이태경\*(부산대학교)

### 철강B2-4 | 11:35

가스터빈 압축기용 3.5NiCrMoV 강의 템퍼 취성 거동

김중훈(한국생산기술연구원, 울산과학기술원), 강수성(한국생산기술연구원, 부경대학교), 김형찬, 김병준(한국생산기술연구원), 박성수\*(울산과학기술원), 김병구\*(한국생산기술연구원)

### 철강B2-5 | 11:50

열처리 조건에 따른 SA350 강의 수소 취성 회복 특성 비교

이진균, 이선(부산대학교), 이정훈(경북대학교), 허상현, 이채훈, 김남용, 이진모(태웅), 이태경\*(부산대학교)

좌장 : 강신곤(동아대학교)

### 철강B3-1 | 14:00

극저탄소강 극표면부의 석출 및 재결정 거동 규명

하유미\*, 송태진, 한성호, 김성일(포스코 기술연구원)

### 철강B3-2 | 14:15

Development of High-Toughness 2.0 GPa-Class Martensitic Hot Stamping Steel

Byung-Gil Yoo\*, Jewoosoo Kim, Jae Wook Kang(Hyundai Steel R&D Center)

### 철강B3-3 | 14:30

Zn-Al-Mg 도금강판 냉간압연 시 압하율 변화에 따른 기계적 특성 및 응용 연구

이계만\*, 박종원, 유윤하, 조재동(포스코)

### 철강B3-4 | 14:45

Zn-Mg-Al 도금층에서 열처리에 의한 Mg-Zn계 결정상의 변화 및 내식성 평가

유윤재\*, 소성민, 이윤정, 강훈철(현대제철)

### 철강B3-5 | 15:00

초고강도 냉연 마르텐사이트(MS) 강의 첨가 원소에 따른 기계적 성질 및 내수소취성 평가

최강현\*, 류주현, 공종판, 방찬우, 정연승, 진영훈, 황아인(포스코)

### 철강B3-6 | 15:15

수소취성 저항성이 강화된 마르텐사이트 강판 개발

박봉준\*, 장민호, 이수민, 정승필, 신희권(현대제철연구소), 김성대(국립부경대학교)

### 철강B3-7 | 15:30

Effect of defects on hydrogen induced cracking in normalizing steel plates

Dae Woo Kim\*(POSCO)

### Break Time | 15:45

좌장 : 강지현(영남대학교)

### 철강B4-1 | 15:55

설명 가능한 인공지능을 활용한 데이터 효율적인 핫스탬핑강 응력-변형률 곡선 예측

서혜진, 이정아, 최주미(포항공과대학교), 서민홍, 오경석(포스코), 김형섭\*(포항공과대학교)

**철강B4-2 | 16:10**

**배터리케이스용 강재의 단면 특성에 따른 부식 영향성 상관관계 연구**  
홍수직\*(포스코)

**철강B4-3 | 16:25**

**지중 고압송전 전자파 차폐용 고내식 연자성 소재 개발**  
권윤익\*, 한민수, 주형돈, 권문재, 유윤하(포스코 기술연구원), 나상준, 김재희(포스코), 최무성, 소준영(한국전력공사 전력연구원)

**철강B4-4 | 16:40**

**Fe-Ni-Ti계 마레이징 강에서 Mo 첨가에 따른 입계석출물의 상변태 거동 변화 연구**  
김동현(포항공과대학교), 윤건영(한국재료연구원), 주용하, 김경덕, 허윤욱\*(포항공과대학교)

**철강B4-5 | 16:55**

**극저온 인성이 우수한 액화수소용 고강도 오스테나이트계 스테인리스강 개발 연구**  
송석원\*, 김광민, 이봉근, 채동철(포스코)

**철강B4-6 | 17:10**

**Ferritic Stainless Steel의 주조조직 미세화에 따른 기계적 성질 및 가공성 향상 연구**  
최가영\*, 박성배(포스코)

**철강B4-7 | 17:25**

**초고강도 고인성 주철 개발을 위한 사형주조 냉각공법 개발**  
이형국\*(현대자동차), 조용재(한국생산기술연구원)



# ORAL SESSION II

4월 29일

## 대형 일체형 차체부품 알루미늄 주조기술 심포지엄

위원장 : 현승균(인하대학교)  
 실무위원 : 윤상일(삼기), 김명균(포항산업과학연구원)  
 Room 2층 201A, 4월29일

좌장 : 윤상일(삼기)

### 차체1-1 | 09:00 초청강연

대형 · 박육 차체부품 일체화를 위한 주조압력 저감 공정 기술개발  
 유한결, 최지석, 나규제, 송호섭, 윤상일\*(삼기)

### 차체1-2 | 09:20 초청강연

대형 차체부품 알루미늄 주조 공정에서 진공밸브 공기 배출 단면적 변화에 대한 실험 및 시뮬레이션 검토  
 최경한\*(한국신소재산업(주))

### 차체1-3 | 09:40 초청강연

대형 다이캐스팅 공정에서 Load-cell 센서 기반 사출 및 금형 압력 데이터의 신뢰성 확보 기술에 관한 연구  
 이광희\*, 최형규((주)세미코)

### 차체1-4 | 10:00 초청강연

대형 · 박육 차체부품용 금형의 열표면처리 조건에 따른 열피로 및 용손 특성 평가  
 윤국태\*, 김주엽, 이락규, 홍창완, 김용유(대구기계부품연구원), 양상규(대국정공(주)), 윤상일((주)삼기), 김형신(세아창원특수강)

### Break Time | 10:20

좌장 : 윤국태(대구기계부품연구원)

### 차체2-1 | 10:40 초청강연

대형주조품 대쉬카울판넬 주조 해석을 통한 주조 방안 선정  
 고건호, 임영택\*(서울대학교)

### 차체2-2 | 11:00 초청강연

온도 시계열 데이터를 이용한 다이캐스팅 공정 불량 예측 모델 개발  
 민항기, 정준희, 박준희, 한도석, 김낙수\*(서강대학교)

### 차체2-3 | 11:20 초청강연

대형 다이캐스팅 금형 코팅을 위한 대면적용 원형 아크소스 및 고출력 이온스퍼터링 소스를 활용한 하이브리드 코팅 시스템  
 이수용\*((주)이노센테크)

### Break Time | 11:40

좌장 : 임영택(서울대학교)

### 차체3-1 | 14:00 초청강연

컴팩트 가압주조용 고유동 · 고강도 알루미늄 제조기술 개발  
 서판기\*, 유기량(삼보오토주식회사)

### 차체3-2 | 14:20 초청강연

대형 · 박육 차체부품용 금속복합소재 적용 AI 합금 설계 기술 개발  
 최승균(한국자동차연구원, 전북대학교), 방현식, 김진평\*(한국자동차연구원)

### 차체3-3 | 14:40 초청강연

자이언트 캐스팅 기반 대형 · 일체형 셀 프레임 언더바디 부품 개발 및 주조 특성 평가  
 최지석, 나규제, 송호섭, 유한결, 윤상일\*(주식회사 삼기)

### 차체3-4 | 15:00 초청강연

Assessment for the Sustainable Giant-HPDC Processes with Die-Casting Mold Components Manufactured by using Hot-Rolled Diffusion Bonding Materials  
 Sang Soo Shin\*, Tae Han Kim, Seong Ho Hwang(R&D Center, Oh-Sung Co. Ltd., )

### Break Time | 15:20

좌장 : 김효섭(한국생산기술연구원)

### 차체4-1 | 15:40 초청강연

주조해석을 통한 자이언트 캐스팅 초대형 금형의 주조방안 및 공정조건 영향 분석  
 윤종목\*, 조민호(애니캐스팅소프트웨어)

### 차체4-2 | 16:00 초청강연

자이언트 캐스팅 환경에서의 서보 실린더 기반 실시간 교정 알고리즘 개발  
 이광원\*(디라이트파트너)

### 차체4-3 | 16:20 초청강연

2D 및 3D 멀티모달 데이터를 활용한 다이캐스팅 외관 결함 검사 알고리즘 개발  
 변영훈(한국생산기술연구원, UST), 윤준석, 조수혜, 서예찬, 김석진, 원홍인, 김동웅, 김문조(한국생산기술연구원), 윤종필\*(한국생산기술연구원, UST)

### 차체4-4 | 16:40 초청강연

현장 변동에 강한한 홀 치수 변형 인식 및 결함 판정 파이프라인 개발  
 문정민\*, 김주희(한국광기술원)

## 가공-용접 및 접합 I

위원장: 이광석(KIMS)

총무간사: 강용준(KIMS), 김준호(한국생산기술연구원),  
성효경(국민대학교), 오세권(KITECH), 이제인(부산대학교)

Room 2층 201B, 4월29일

좌장 : 박철호(조선대학교)

### 용접1-1 | 09:00

사용후핵연료 심층처분용기 무산소동 마찰교반용접부 특성 연구  
김정민\*, 김남규, 고신범, 송상우(한국재료연구원)

### 용접1-2 | 09:15

오스테나이트계 스테인리스강 배관 용접 시 발생하는 열 변색부 내식성  
검증에 관한 연구  
이창민\*, 유진석, 김진호, 김중배, 이재희(HD한국조선해양)

### 용접1-3 | 09:30

SUS304 seam Tube의 TIG 용접부의 인장과 조직 변화  
박은혜(한국폴리텍2대학, 인하대학교), 이종혁, 장병록\*(인하대학교)

### 용접1-4 | 09:45

다공성 316L 스테인리스강 소결체 펄스 TIG 용접부 미세조직 및 기계  
적 성질에 대한 연구  
이건희, 문준오\*(국립창원대학교), 김세현(유니락)

### 용접1-5 | 10:00

Relieving Residual Stress in Heterogeneous Joints of C/C-SiC  
Composites and 410B Stainless Steel via Composite Interlayer  
Engineering  
Haitao Zhu(Harbin Institute of Technology (HIT)), Sujung Son\*(POSTECH),  
Yanyu Song, Duo Liu, Xiaoguo Song(Harbin Institute of Technology  
(HIT)), Hyoung Seop Kim\*(POSTECH)

### 용접1-6 | 10:15

고상접합된 SS 304에서 결정립계 석출상이 수소취성에 미치는 영향  
최동현(부산대학교), 손영훈, 김현준(동화엔텍), 강남현\*(부산대학교)

### 용접1-7 | 10:30

철 분말의 DED 방식 3D 프린팅 적층품질에 미치는 공정변수의 영향에  
관한 연구  
이목영\*, 배규열, 홍석현(포스코)

좌장 : 박상원(포항소재산업진흥원)

### 용접2-1 | 10:45

Active Metal Brazing 이중접합 방열기판의 미세조직 비교 분석  
권홍기(포항소재산업진흥원), 김준태, 이경훈(주식회사 코웰), 박상원\*(포항소  
재산업진흥원)

### 용접2-2 | 11:00

저용점 다성분 비정질 삽입재를 이용한 Ti 브레이징 접합부 계면의 미세  
조직 및 기계적 특성  
노주림, 김동우, 이윤서, 이진규\*(국립공주대학교)

### 용접2-3 | 11:15

Semi-solid brazing via CoCrFeNiCu<sub>x</sub> high-entropy alloy fillers:  
interfacial microstructure, mechanical properties, and joining  
mechanism of C/C-SiC composites and TZM alloy  
Wenlong Zhou(Harbin Institute of Technology), Sujung Son\*(POSTECH),  
Shengpeng Hu, Xiaoguo Song(Harbin Institute of Technology), Hyoung  
Seop Kim\*(POSTECH)

### 용접2-4 | 11:30

압력 조건 및 고온 열처리에 따른 일방향 다공성 구리 삽입 Cu-Sn계  
천이액상확산접합부의 미세조직 및 기계적 특성  
이수현(인하대학교), 김근수(호서대학교), 현승균\*(인하대학교)

### 용접2-5 | 11:45

복합진동 초음파 용접에서 혼입 널 형상에 따른 접합 특성 비교  
신지영\*, 박성범, 이재민, 김도형(비엠에스엔지니어링), Jun Mitsuyuki(Link-  
us CO., Ltd.)

### 용접2-6 | 12:00

마찰교반용접과 전자빔용접 무산소동 용접부의 미세조직 및 황화물 ·  
연화물 환경에서의 부식 거동 비교  
고신범(한국재료연구원, 국립부경대학교), 김승현\*(한국재료연구원), 채관일(서  
울대학교), 김정민, 송상우(한국재료연구원), 노상훈(국립부경대학교)

### 용접2-7 | 12:15

리필마찰교반점용접공정을 활용한 구리 버스바 접합부의 부식 거동  
유하영(한국생산기술연구원, 서울대학교), 김동진\*(한국생산기술연구원)

좌장 : 박형권(한국재료연구원)

### 용접3-1 | 14:00

규제샌드박스 제도를 활용한 고방간강 액화수소 탱크의 육상 실증 및  
선박 적용성 연구  
윤재석(한화오션, 부산대학교), 윤광희, 박종민(한화오션), 남지민, 최동현, 강남  
현\*(부산대학교)

### 용접3-2 | 14:15

오스테나이트계 스테인리스 강 전자빔 용접부의 수소취화 거동  
남지민(부산대학교), 이승건(한국재료연구원), 강남현\*(부산대학교)

### 용접3-3 | 14:30

극저온 특성 향상을 위한 준안정 철계 중엔트로피 합금 용접부의 공정-  
구조-특성 상관관계 연구  
이유나(부산대학교), 박정민(한국재료연구원), 강남현\*(부산대학교)

### 용접3-4 | 14:45

Laser beam welding된 이중 고엔트로피합금 접합부에서 후열처리를  
통한 강도 - 연성 조화  
정하희, 정희찬, 이상원, 이진직(고려대학교), Hadiseh Esmaeilpoor, 김정환(  
국립한밭대학교), 손석수\*(고려대학교)

### 용접3-5 | 15:00

다이오드 레이저 클래딩 공정 변수에 따른 압력용기용 SA508 Gr.3  
합금강 클래딩부 미세조직 및 기계적 특성 변화에 대한 연구  
김재성, 김정훈, 문준오\*(국립창원대학교), 조성우, 구남기, 윤강준(두산에너지  
리티)

#### 용접3-6 | 15:15

고강도 오스테나이트계 스테인리스강(XM-19) 용접부의 고온균열 민감도 및 기계적 특성에 미치는 미세조직의 영향  
정혜은(한국재료연구원, 국립부경대학교), 강용준\*, 박기태, 송상우(한국재료연구원), 천은준(국립부경대학교)

#### 용접3-7 | 15:30

냉간 기가스틸용 고성능 및 저원가 용접솔루션 개발  
한도경\*, 홍석현, 배규열(포스코 기술연구원)

#### Break Time | 15:45

좌장 : 한도경(포스코 기술연구원)

#### 용접4-1 | 15:55

자동차 샤시 부품의 내구 성능 향상을 위한 아크용접 보강비드 효과  
김대원, 박시영((주)현대자동차), 박영도\*, 전현도(동의대학교)

#### 용접4-2 | 16:10

클래드 메탈(Steel/Al/Steel)의 공정별 용접성 비교 및 기초 특성 평가  
Comparative Weldability and Fundamental Property Evaluation of Steel/Al/Steel Clad Metal by Welding Process  
신승철, 김용\*(고등기술연구원)

#### 용접4-3 | 16:25

철계 중엔트로피 합금 GTAW 용접부의 수소취화 거동 분석  
최정현, 남지민(부산대학교), 이승건(한국재료연구원), 강남현\*(부산대학교)

#### 용접4-4 | 16:40

레이저 와블 용접된 알루미늄/구리 박판 겹치기 용접부의 피로특성 분석  
윤성민, 유재은(부산대학교), 김용(고등기술연구원), 이제인\*(부산대학교)

#### 용접4-5 | 16:55

Al-Zn 개발 도금강의 저항 점용접 연속타점 시 도금 부착량에 따른 전극 합금화 거동 연구  
장여진(한국재료연구원), Nelikode Savyasachi, 황순기(동의대학교), 강남현(부산대학교), 엄상호(포스코 글로벌 R&D 센터), 이석규(포스코 기술연구원), 백두진(포스코 홀딩스), 박영도\*(동의대학교)

#### 용접4-6 | 17:10

알루미늄과 핫스탬핑강판의 강건한 이종접합을 위한 Friction Element Welding 연구  
고세진\*(현대자동차)

## 차세대메모리 소재 및 공정 심포지엄

위원장 : 최창환(한양대학교)  
실무위원 : 이기영(홍익대학교)  
Room 2층 202A, 4월29일

좌장 : 최창환(한양대학교)

#### 메모리1-1 | 09:00

초청강연

차세대 DRAM용 3차원 Capacitorless 2T 메모리 소자와 공정에 관한 연구

강대환\*(포항공과대학교)

#### 메모리1-2 | 09:25

초청강연

차세대 MRAM을 위한 소재 및 공정 기술 동향과 과제  
백승현\*(한국과학기술연구원)

#### 메모리1-3 | 09:50

초청강연

Beyond the Cu Interconnect Era: Material Strategies for Sub-10-nm Scaling

KEUN WOOK SHIN\*(Samsung Advanced Institute of Technology)

#### Break Time | 10:15

좌장 : 이기영(홍익대학교)

#### 메모리2-1 | 10:25

초청강연

초미세 3차원 반도체 소자 제작을 위한 열화학 반응 기반의 원자층 식각 공정  
남태욱\*(세종대학교)

#### 메모리2-2 | 10:50

초청강연

Electronic Devices for Neuromorphic Computing  
Joon Young Kwak\*(이화여자대학교)

#### 메모리2-3 | 11:15

초청강연

Sacrificial Atomic Layer Deposition for Nanostructured Chalcogenide Materials  
Chanyoung Yoo\*(홍익대학교)

#### 메모리2-4 | 11:40

초청강연

계면층 제어를 통한 초미세 규격 차세대 디램 커패시터 물질 연구  
권대선\*(숙명여자대학교)

## 수소재료 II

위원장: 강남현(부산대학교)  
총무간사: 김영민(KIMS), 박형기(KITECH),  
손석수(고려대학교), 천동원(POSTECH)  
Room 2층 202A, 4월29일

좌장 : 박진홍(서울과학기술대학교)

### 수소3-1 | 14:00

인텐테이션 기반 소성변형 거동 분석을 통한 오스테나이트계 스테인리스강의 수소취성 평가

이승건\*, 이종석, 신희철, 박준호, 이시환(한국재료연구원)

### 수소3-2 | 14:15

잠호아크용접된 파이프라인강의 In-situ 내수소취성 분석

서재완, 이승준\*(한국공학대학교), 김성웅(세아제강)

### 수소3-3 | 14:30

Investigation of Hot Stamped 1.5 GPa High Performance Ultra High Strength Steels (UHSS) for Effects of (Nb + Mo) Alloying on Mechanical Properties and Hydrogen Embrittlement (HE).

EI-JOON SHIM(Tech University of Korea (TU Korea)), Tae-Yang Kwak(RUAN co., Ltd.), Hye-Jin Kim\*(Tech University of Korea (TU Korea))

### 수소3-4 | 14:45

STS 347 스테인리스강 및 용접부의 수소취화와 확산 거동 평가

손시운, 최동현(부산대학교), 김현준, 손영훈(동화엔텍), 강남현\*(부산대학교)

### 수소3-5 | 15:00

스테인리스강(316L, 310S)의 수소 장입량에 따른 수소 취화 거동 분석  
조준영, 염화성\*(POSTECH)

### 수소3-6 | 15:15

Laser powder bed fusion으로 제작된 CoCrFeNi 중엔트로피 합금에서 열처리에 따른 Boron 편석이 수소취성에 미치는 영향

정현(충남대학교), Yakai Zhao(A\*STAR FEAT), 이창기, 김세호(고려대학교), 이동현\*(충남대학교)

### Break Time | 15:30

좌장 : 김혜진(한국공학대학교)

### 수소4-1 | 15:30

TRIP 강의 수소-미세조직 상호작용 규명을 위한 결정소성 기반 수치 해석 모델 개발

박진홍(서울과학기술대학교), 송상윤(고려대학교), 신건진(서울대학교), 손석수\*(고려대학교), 이명규\*(서울대학교)

### 수소4-2 | 15:45

수소환경에서 배관강의 내수소취성 스크리닝을 위한 외주노치 도입 중 공시험편 SSRT를 이용한 상대노치인장강도(RNTS) 연구

신형섭\*, Richard Pascua(국립경국대학교), 김기석(포스코)

### 수소4-3 | 16:00

Comparative Evaluation of Small Punch Test (SPT) and Hollow Specimen SSRT for Hydrogen Compatibility Assessment of Austenitic Stainless Steel STS316L under External Hydrogen Environment Across a Wide Temperature Range

Richard Pascua, Hyng-Seop Shin\*, Sang-Heon Lee(Gyeongbuk National University)

### 수소4-4 | 16:15

In-situ Reassessment of Hydrogen Embrittlement in CrCoNi Medium-Entropy Alloy

Yoonmoon Chung, Seung Jae Lee, Jeongho Han\*(Hanyang University)

### 수소4-5 | 16:30

A study for alloying effect on hydrogen embrittlement of Al alloys

Sokyun Hong(한양대학교), Jae Hur, Won-Seok Ko(고려대학교), Jeongho Han\*(한양대학교)

좌장 : 김지훈(부산대학교)

### 수소5-1 | 16:45

액화수소 온도에서 오스테나이트 스테인레스 강의 충격물성 측정에 관한 고찰

백운봉\*, 박재영(한국표준과학연구원)

### 수소5-2 | 17:00

고망간강 주조재의 상온과 극저온에서의 수소취성 메커니즘 비교 연구

이시환, 신희철, 박준호, 이종석, 이승건\*(한국재료연구원)

### 수소5-3 | 17:15

SA-372 Gr. J Class 70 강의 저온 파괴인성 평가와 수소환경을 고려한 최소허용온도(MAT) 산정

김정환\*, 이화영, 이민경, 하기역, 정성원(한국가스안전공사)

### 수소5-4 | 17:30

극저온용 316LH 스테인리스강의 상온 및 극저온 수소취성 거동 연구

이재호(한국재료연구원, 부산대학교), 윤성준, 이준호, 김영균, 나영상\*(한국재료연구원)

### 수소5-5 | 17:45

고압비틀림 공정을 통한 Ti-Nb-Cr-Mn-V 고엔트로피합금의 미세조직 제어 및 수소화 속도 향상

하효정, 하수빈, 구강희, 천동원(포항공과대학교), Kaveh Edalati(Kyushu University), 김형섭\*(포항공과대학교)

## 적층제조 및 분말

위원장: 홍순직(국립공주대학교)  
총무간사: 강민철 (3D프린팅연구조합), 김정기(경상국립대학교),  
문준연(국립공주대학교)  
Room 2층 202B, 4월29일

좌장: 김정기(경상국립대학교)

### 적층5-1 | 09:00

Directed Energy Deposition 공정으로 제조된 Nb-added Stainless Steel의 공정 변수에 따른 미세조직 및 기계적 특성 분석  
한수빈, 이유리, 김동혁, 조용재, 장진석, 박동용, 이호진, 송혜진\*(한국생산기술연구원)

### 적층5-2 | 09:15

LPBF 공법으로 적층제조된 스테인리스강 316L 합금의 전위 셀 미세구조가 4.2 K 초저온 환경 인장 거동에 미치는 영향  
박하음(한국재료연구원, 고려대학교), 정희찬(고려대학교), 김영균(한국재료연구원), 정재면(한국재료연구원), 이유나, 강남현(부산대학교), 김경태(한국재료연구원), 나영상(한국재료연구원), 손석수\*(고려대학교), 박정민\*(고려대학교, 한국재료연구원)

### 적층5-3 | 09:30

GPR을 활용한 IN718의 DED 공정 분석 및 실험설계  
김성원, 유진영(부산대학교), 김정기(경상국립대학교), 이태경\*(부산대학교)

### 적층5-4 | 09:45

SiO<sub>2</sub> 나노입자 기반 유동 특성 개선 및 구형/HDH Ti-6Al-4V 혼합분말의 L-PBF 공정 최적화  
한지민, 이종익, 이빈\*(경희대학교)

### 적층5-5 | 10:00

"Influence of Atmospheric Environments on Spark Plasma Sintering Kinetics, Densification, and Microstructural Evolution in Inconel 718 and 316L Stainless Steel Alloys"  
Seong Gyu Chung(POSTECH-DANE), Jung Wook Cho\*(POSTECH-GIFT), Hwasung Yeom\*(POSTECH-DANE)

### Break Time | 10:15

좌장: 김영균(한국재료연구원)

### 적층6-1 | 10:25

직접용융증착법 기반 IN738LC/CM247LC 접합 시 균열 형성 및 성장 기구 분석  
성예찬, 강호성(경상국립대학교), 이형수, 서성문(한국재료연구원), 김정기\*(경상국립대학교)

### 적층6-2 | 10:40

후속 열처리 없이 직접 에너지 증착 공정으로 제조된 마레이징 중엔트로피 합금의 초고강도 특성  
김진우, 이재홍, 안성열, 구본우, 이시우, 이정아, 하윤욱(포항공과대학교), 홍순익(충남대학교), 김형섭\*(포항공과대학교)

### 적층6-3 | 10:55

Plate-assist Kelvin type Inconel 718 격자 구조체의 후열처리를 통한 기계적 특성 향상  
박소연, 오주환(인하대학교), 송영원, 고찬영(인천항공우주산업(주)), 이기안\*(인하대학교)

### 적층6-4 | 11:10

균열 저항성을 고려한 인코넬 939 계열 적층 제조 내열합금 조성 최적화 전략  
김동환, 김민석, 김재권, 민현기(서울대학교), 정희찬(한화에어로스페이스), 박은수\*(서울대학교)

### 적층6-5 | 11:25

LPBF 공정으로 제조된 AISi10Mg 합금의 적층 높이에 따른 기계적 특성과 미세조직 변화의 상관관계  
이승연, 박하음, 이승용, 유지훈\*(한국재료연구원), 박정민\*(한국재료연구원, 고려대학교)

### 적층6-6 | 11:40

Interstitially Stabilized Lattice Modulation and Gum-Metal-Like Plasticity in Additively Manufactured Ti-Zr-Nb  $\beta$ -Titanium Alloy  
Muhammad Akmal, Ho Jin Ryu \*(KAIST)

좌장: 김도형(영남대학교)

### 적층7-1 | 14:00

운항 선박 내 유지 보수 부품 제작을 위한 PBF용 탄소강 분말 개발 및 해상 실증에 관한 연구  
이영재\*, 김진호, 이재희(HD한국조선해양), 여형성(주식회사 창성)

### 적층7-2 | 14:15

레이저 클래딩 공정 변수에 따른 Cu 기판의 Ni 합금 코팅층 특성 분석  
최정민, 최진원, 김정환(JAYTECH), 이운해\*(경성대학교)

### 적층7-3 | 14:30

적층 각도에 따른 LPBF Inconel 718 합금의 Micro-blasting 표면 강화 메커니즘 분석  
이서진, 고도열(한국생산기술연구원, 성균관대학교), 최민호(한국생산기술연구원, 서울대학교), 김가형(한화에어로스페이스), 이해진(한국생산기술연구원), 한혁수(성균관대학교, 한양대학교), 김건우, 김다혜, 성지현(한국생산기술연구원), 이병수\*(한국생산기술연구원)

### 적층7-4 | 14:45

Canceled

Directed Energy Deposition로 제작된 고강도 중방간강의 변형 메커니즘 규명  
이민영, 조원희(국민대학교), 김형중(공주대학교), 강민유(국민대학교), 김은성(포항공과대학교), 최현주, 성효경(국민대학교), 홍순직(공주대학교), 김형섭(포항공과대학교), 설재복\*(국민대학교)

### 적층7-5 | 15:00

와이어 아크 적층제조 Alloy 718의 Laves 상 Dissolution kinetics 기반 열처리 설계 및 고온 기계적 특성 평가  
임시은(한국재료연구원, 부산대학교), 오동진, 강용준, 송상우(한국재료연구원), 강남현(부산대학교), 박기태\*(한국재료연구원)



**적층7-6 | 15:15**

Understanding the Role of Nanoparticles in Suppressing Gravity-Driven Deflection in thermal de-binding and sintering of 3D Printed Cantilevers beams.

Nelson Bayi, Taehyob Im, Minjong Kim, Kanghyun lee, Caroline S. Lee\*(Hanyang University – ERICA Campus)

**적층7-7 | 15:30**

레이저 분말 용융법으로 제조된 순구리 조형체의 두께별 미세조직 및 물성 분석

박찬호(한국재료연구원), 박하음(한국재료연구원, 고려대학교), 김연우(한국재료연구원), 박기철, 김예림(파트너스랩(주)), 김상권, 신인선(현대자동차), 박정민\*(한국재료연구원, 고려대학교)

**Break Time | 15:45**

좌장 : 김대겸(한국생산기술연구원)

**적층8-1 | 15:55**

가스터빈 고온부품용 금속 AM 소재 공정기술 개발

박상은, 이재웅, 조현철\*(두산에너지리티)

**적층8-2 | 16:10**

EIGA로 제조된 ODS 강 분말의 HIP 조건에 따른 산화물 형성 거동 영향

서보성, 강장원, 차은빈, 박광석\*(한국생산기술연구원)

**적층8-3 | 16:25**

적층제조 ODS 합금의 반정합 Y-Ti-O 산화물의 형성 거동과 미세조직 제어 연구

서주원(한국원자력연구원, 서울대학교), 정원중(한국기계연구원), 정승문(한국원자력연구원), 한홍남(서울대학교), 류호진(카이스트), 정희석, 한상섭(한국기초과학지원연구원), 김성환(Thermo-Calc Software Korea), 강석훈\*(한국원자력연구원)

**적층8-4 | 16:40**

HfC 강화재로 강화된 Inconel 718의 적층제조 샘플의 고온 크리프 특성

Wonjong Jeong(한국기계연구원), Suh Joo Won, Kang Suk Hoon(한국원자력연구원), Ryu Ho Jin\*(KAIST)

**적층8-5 | 16:55**

Process-Induced Acceleration of Martensitic Transformation and Twinning during Cryogenic Deformation of LPBF SS304L

Kwangtae Son, 윤성준, 김영균, 나영상\*(한국재료연구원)

**적층8-6 | 17:10**

WAAM 공정 조건이 Al7A48 합금의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향

장동민, 황원구(인하대학교), 감동혁(한국생산기술연구원), 이기안\*(인하대학교)

**적층8-7 | 17:25**

레이저 분말 베드 용융법으로 제조된 Nd-Fe-B 영구자석의 공정 매개 변수에 따른 미세조직 변화와 자기적 특성의 상관관계

김연우(한국재료연구원, 부산대학교), 이수진(한국재료연구원), 이유나(부산대학교), 설재복(국민대학교), 강남현, 최윤석(부산대학교), 유지훈, 이정구, 김태훈(한국재료연구원), 박정민\*(한국재료연구원, 고려대학교)

**제4회 가공심포지엄: 소형모듈원전용 구조재료 가공기술 심포지엄**

위원장 : 마영화(두산에너지리티)

실무위원 : 송전영, 정재석(두산에너지리티),

이권영(세아창원특수강), 진형하(한국원자력연구원),

강용준(한국재료연구원), 성효경(국민대학교)

Room 2층 203, 4월29일

좌장 : 송전영(두산에너지리티)

**원전1-1 | 09:00**

**초청강연**

XM19 강재의 무결점 열간성형을 위한 고온 변형 거동 모델링 및 공정 지도 최적화

정재석\*(두산에너지리티), 박성준\*(한국재료연구원), 김국철(두산에너지리티), 김성환(Thermo-Calc Software LLC), 문준오(국립창원대학교)

**원전1-2 | 09:20**

**초청강연**

고질소 스테인리스강의 고온 변형 거동에 대한 연구

문승현, 김정훈, 문준오\*(국립창원대학교), 정재석(두산에너지리티)

**원전1-3 | 09:40**

**초청강연**

고질소 오스테나이트계 스테인리스강의 어닐링에 따른 미세조직 변화 전상형, 서동우\*(포항공과대학교)

**원전1-4 | 10:00**

**초청강연**

고질소 오스테나이트계 강재의 석출거동 해석

이태호\*, 김성훈\*, 유지성, 하현영, 김승현, 이진종, 조호행(한국재료연구원), 손광석(동아대학교), 정재석(두산에너지리티)

**Break Time | 10:20**

좌장 : 배재웅(부경대학교)

**원전2-1 | 10:40**

**초청강연**

Thermodynamics of slag design for producing heat-resistance steels and Ni-base alloys by electro-slag remelting (ESR) process  
JOO HYUN PARK\*(Hanyang University)

**원전2-2 | 11:00**

**초청강연**

Evolution from Clusters to Precipitates in Niobium Micro-Alloyed Ferritic Steel

Sung-Dae Kim\*(Pukyong National University)

**원전2-3 | 11:20**

**초청강연**

열간 변형 중 고엔트로피 합금의 동적 재결정 및 동적 Sigma상 석출거동

이윤해\*(경성대학교), 박노근(영남대학교)

**원전2-4 | 11:40**

**초청강연**

SMR 주기기 제작을 위한 초대형 HIP 기술 개발 전략

김동수\*(두산에너지리티)

좌장 : 이윤해(경성대학교)

**원전3-1 | 14:00**

**초청강연**

한국형 소형모듈원전(SMR) 개발동향 및 로드맵

마영화\*(두산에너지리티)



원전3-2 | 14:20

초청강연

PM-HIP으로 제작된 고질소 오스테나이트계 스테인리스강 미세조직 및 기계적 특성 연구

김정길\*, 김동수, 안세환(두산에너지리티), 문준오(국립창원대학교)

원전3-3 | 14:40

초청강연

SMR 주기가용 PM-HIP SA508 소재 개발에 관한 연구

안세환\*, 김정길, 김동수(두산에너지리티)

원전3-4 | 15:00

초청강연

소형모듈원전(SMR) 압력용기 적용을 위한 마르텐사이트계 스테인리스강의 저온균열 이해 및 대응기술

강남현\*, 최정현, 손시우(부산대학교), 이윤상(두산에너지리티), 강용준(한국재료연구원)

Break Time | 15:20

좌장 : 김성환(Thermo-Calc Software Korea LLC)

원전4-1 | 15:30

초청강연

SMR용 고강도 오스테나이트계 스테인리스강의 용접성 평가

강용준\*(한국재료연구원), 정혜은(한국재료연구원, 국립부경대학교), 박기태, 송상우(한국재료연구원), 천은준(국립부경대학교)

원전4-2 | 15:50

초청강연

용접방법에 따른 XM-19 용융부 및 열영향부 특성평가

장창희\*, 권예진, 김홍덕(KAIST)

원전4-3 | 16:10

초청강연

FXM-19 소재 SAW/GTAW 용접부 미세조직에 따른 기계적 특성

서형석\*, 임동용(두산에너지리티)

Break Time | 16:30

좌장 : 김성대(부경대학교)

원전5-1 | 16:40

초청강연

고강도 오스테나이트 내식강 대상 조사경화 모사재 제작 및 특성분석

진형하\*, 김성우, 김민철(한국원자력연구원), 김용근((주)에이치비이엠)

원전5-2 | 17:00

초청강연

원자로용 구조소재의 용접영역별 조사경화 민감도 평가

신중호\*, 김대현, 한성희, 강민성, 진형하(강원대학교)

원전5-3 | 17:20

초청강연

SMR용 고강도 오스테나이트 내식강의 미세조직 변화에 미치는 장기 열시효 효과

김성준, 함준혁, 김지현\*(울산과학기술원)

## NEW-HORIZON Inter.: KIM – JIMM Joint Women's Symposium

위원장 : 정은진 (RIST), 최현주 (국민대학교)

실무위원 : 김세호 (고려대학교), 신세은 (순천대학교)

Room 3층 삼다A, 4월29일

Opening Remarks | 09:00

Opening remarks & Introduction to Female Membership & GE Committee Activities (JIMM – ISIJ)

Chair : Hyunjo Choi (Kookmin University)

KJ1-1 | 09:20

Invited Talk

Electronic state observation for half-metallic ferromagnets at NanoTerasu —New synchrotron facility in Japan—

Rie Umetsu (Tohoku University)

KJ1-2 | 09:45

Invited Talk

Thermokinetic Study of High Entropy Alloy Produced by Green Process

Sun-Young Lee (Hanyang University)

KJ1-3 | 10:10

Invited Talk

Quench-Induced Precipitation in 7000 Series Aluminum Alloys: Cluster and GP Zone Formation during Cooling

Mami Mihara-Narita(Nagoya Institute of Technology)

Break Time | 10:35

Chair : Eun Jin Jung (RIST)

KJ2-1 | 10:55

Invited Talk

Bridging Materials and Borders

Hye Jung Chang\*(Korea Institute of Science and Technology)

KJ2-2 | 11:20

Invited Talk

Effect of mechanical deformation on hydrogen diffusion in steels

Saya Ajito(National Institute for Materials Science)

KJ2-3 | 11:45

Invited Talk

A new strategy for developing interfacial bonding using non-metallic atoms in carbon nanotube-reinforced aluminum composites

Se Eun Shin\*(Sunchon National University)

## 학회상 수상기념 강연

Room 3층 삼다A, 4월29일

좌장 : 이기안(인하대학교)

AW1-1 | 14:00

POSCO학술상 수상기념강연

미세조직에서 성능으로: 금속재료 연구의 여정과 비전 — 소성가공과 고온변형, 초소성 설계, 그리고 에너지소재로의 확장

김우진\*(홍익대학교)

AW1-2 | 14:25

현송공학상 수상기념강연

모빌리티용 고비강도 알루미늄 합금 판재 개발

김형욱\*(한국재료연구원)

좌장 : 이선영(한양대학교)

AW2-1 | 14:50

아모공학상 수상기념강연

Innovative multi-material additive manufacturing and its fundamental technological components

Huisuk Yun\*(Korea Institute of Materials Science)

AW2-2 | 15:15

International Scholar Award Lecture

Ubiquitous short-range order in multi-principal element alloys and its impact on the mechanical behaviors

Yang Yang\*(The Pennsylvania State University), Penghui Cao, Andrew Minor, Mark Asta(University of California), Wen Chen(University of Massachusetts)

## 표면계면

위원장: 박창규 (서울과학기술대학교)

총무간사 : 조지웅 (홍익대학교), 함명관 (인하대학교)

Room 3층 삼다A, 4월29일

좌장 : 박창규(서울과학기술대학교)

표면계면1-1 | 16:00

표면조건별 스테인리스강의 중성 수용액환경내 국부부식 특성연구

김영호\*(포스코)

표면계면1-2 | 16:15

in situ X선 나노토포그래피를 통해 관찰한 용융염 환경에서의 NiCr<sub>20</sub> 합금의 방사선 유도 부식 거동 전이

한인성\*(경북대학교)

표면계면1-3 | 16:30

자동차용 열연강판의 인산염 처리성에 미치는 Cr영향성

박중철\*(포스코), 김동현(포항공과대학교), 송연균(포스코)

표면계면1-4 | 16:45

건식 방식의 디지털 프린팅 컬러 이미지 강판 제조 기술

박순홍\*, 김수현, 박경남, 지해근, 전영도\*(주) 옴니코트)

표면계면1-5 | 17:00

초상자성 산화철 나노입자 표면개질을 활용한 효과적인 정수 방법

박형원\*(중앙대학교)

표면계면1-6 | 17:15

레이저 텍스처링 및 열/가압 시스템 활용 금속-복합재 접합기술 연구

정준영\*, 권혁민, 김호동, 정연일(현대자동차), 최원호((주)엔트)

표면계면1-7 | 17:30

레이저 리멜팅과 열처리를 통한 SLM 제작 SS316L의 표면 조도 제어 및 NaCl 환경 부식 거동 평가

정세윤, 박창규\*, 김민혜, 김창민, 구본준, 김유신(서울과학기술대학교)

## 전산재료과학II

위원장: 이동화 (포항공과대학교)

총무간사 : 김현유 (충남대학교), 김병현 (한양대학교ERICA),

서동화 (KAIST), 신정호 (한국화학연구원)

Room 3층 삼다B, 4월29일

좌장 : 신혜영(경희대학교)

전산6-1 | 09:00

초청강연

Rational Design of Support Materials for Durable Electrocatalysis

Doosun Hong\*(University of Seoul)

전산6-2 | 09:25

Quantum Machine Learning for Superalloy Phase Screening: A Benchmark Study

KEUNSU CHOI\*, Daihyun Kwon, Jungmin Bak(Quantum Intelligence Corp.)

전산6-3 | 09:40

Predicting CO<sub>2</sub> Reduction Selectivity on Large-scale Cu-Pd Nanoparticles via a Multi-scale Machine Learning Framework

Wooseok Lee(Sogang Univ.), Seoin Back\*(Korea Univ.)

전산6-4 | 09:55

A Multi-stage Screening Framework for the Accelerated Discovery of Multinary Ferroelectrics

Sang Woo Park, Donghwa Lee\*(POSTECH), Ki-Ha Hong\*(Hankuk National University)

전산6-5 | 10:10

Context-Preserving Device-Level Extraction and Consistency Analysis in ReRAM Literature

Hyeonbin Park, Hyeon Kim, Youngjun Park, Junhyeong Gu, Donghwa Lee\*(POSTECH)

Break Time | 10:25

좌장 : 전호제(국민대학교)

전산7-1 | 10:35

Multiflake Phase Field Modeling of 2D Materials

HASSAAN, Yongwoo Kwon\*(Hongik Univ.)



좌장 : 김영천(국립경국대학교)

**역학3-1 | 11:20**

Fe-Si 합금 최종 열처리 분위기에 따른 표면 미세구조 형성 메커니즘 규명  
전지현, 이소현(UNIST), 유성현, 안용근, 강춘구(현대제철), 김주영\*(UNIST)

**역학3-2 | 11:35**

전자빔 용접된 XM-19 재질의 용접 조직에 따른 양상자 조사 효과  
김대현, 한성희, 김보규, 한준희, 강민성(강원대학교), 진형하(한국원자력연구원), 신중호\*(강원대학교)

**역학3-3 | 11:50**

압입시험 기반 ANN 모델을 통한 박막 기계적 물성 평가  
조현욱, 박태현, 석일현(국립부경대학교), 황경석(하버드대학교), 이우진, 강승균(서울대학교), 김종형\*(국립부경대학교)

**가공-표면처리**

위원장: 이광석 (한국재료연구원)  
총무간사: 강용준 (한국재료연구원),  
김준호(한국생산기술연구원), 성효경(국민대학교),  
오세권(한국생산기술연구원), 이재인(부산대학교)  
Room 3층 300, 4월29일

좌장 : 이창수(충남대학교)

**표면처리1-1 | 14:00**

착화제 종류에 따른 니켈 치환 도금을 이용한 알루미늄 분말 발열특성 향상 연구  
안서영, 손인준\*(경북대학교)

**표면처리1-2 | 14:15**

Development of Zn-Ni Hot-Dip Coatings with Enhanced High-Temperature Stability for Hot-Stamping  
Wang EunChan(Korea Institute of Industrial Technology, Chonnam Univ.), Yun-Il Choi\*(Korea Institute of Industrial Technology), Chan-Jin Park(Chonnam Univ.)

**표면처리1-3 | 14:30**

다중물리모형을 활용한 금속 표면 건식 정전스프레이 공정 디지털화(DX)  
서승원, 양현진\*(인하대학교)

**표면처리1-4 | 14:45**

마이크로-나노 다공성 산화층 기반의 C2680 합금과 폴리프로필렌의 이중 접합 기술 개발  
양수미(한국재료연구원, 부산대학교), 박상민(부산대학교), 한병준, 김정환\*(한밭대학교), 신다슬\*(한국재료연구원)

**표면처리1-5 | 15:00**

**Canceled**

티타늄 금속의 플라즈마 전해산화 표면코팅에 산화세륨 마이크로 입자 첨가 효과  
이도경\*(대구가톨릭대학교)

**표면처리1-6 | 15:15**

레이저 표면처리를 이용한 탄소코팅 타이타늄 연료전지 분리판의 표면 특성 개선  
김성욱\*, 장경현, 천창근(RIST), 이동준(디에스피), 김대성(테라릭스)

**Break Time 15:30**

좌장 : 정찬원(부경대학교)

**표면처리2-1 | 15:40**

압력과 온도에 따른 황동의 탈합금 거동  
최문수, 황지인, 최은애(한국재료연구원), 주수현(단국대학교), 한승전\*(한국재료연구원)

**표면처리2-2 | 15:55**

Defect Analysis of Nickel-Plated Steel via Hyperspectral Imaging  
MinGyun Kim(POSTECH), KiSu Kim, SeungHee Roh, DongHwan Roh(DeepAI), HwaSung Yeom\*(POSTECH)

**표면처리2-3 | 16:10**

자동차 구동 샤프트 스플라인 내구수명 향상을 위한 피닝공법 연구  
김민규\*(현대자동차), 반원규(서한이노빌리티)

**표면처리2-4 | 16:25**

고엔트로피 합금의 역 그라디언트 구조를 통한 미세구조 차폐를 통한 우수한 고강도-수소 취성 저항성 획득 전략  
김래일, 이호형, 김재훈, 서동우, Zaigham Saeed Toor(포항공과대학교), 정차희, 손석수(고려대학교), 김형섭\*(포항공과대학교)

**표면처리2-5 | 16:40**

X70 파이프라인 강재에서의 수소 취성 방지를 위한 금속과 유기 화합물 간의 결합 분석  
신좌영, 최동현, 강남현\*(부산대학교)

**표면처리2-6 | 16:55**

레이저 클래딩 공정으로 제조된 NiAl-WC 코팅의 고온 마모 거동  
홍성준(한국생산기술연구원, 국립순천대학교), 신우철, 김태범(한국생산기술연구원), 이동근(국립순천대학교), 조균택\*(한국생산기술연구원)

**NEW-HORIZON: 히토류 심포지엄**

위원장 : 이우영 (연세대학교)  
실무위원 : 이정구 (재료연구원), 임혜인 (숙명여자대학교),  
이현숙 (연세대학교), 김대훈 (재료연구원)  
Room 3층 301, 4월29일

좌장 : 이정구(한국재료연구원)

**히토류1-1 | 10:00**

**초청강연**

미·중 기술패권 시대, 히토류 영구자석의 전략적 전환  
이우영\*(연세대학교)

**히토류1-2 | 10:40**

**초청강연**

히토자원 효율적 활용 & 안정적 히토자석 공급망 구축을 위한 3R 기술 개발 전략  
김동환\*(성림첨단산업(주))

히토류1-3 | 11:10 초청강연

Predictive Modeling of Hard/Soft Nanocomposite Magnets: A Mass Fraction Approach

Jihoon Park\*(Korea Institute of Materials Science)

Break Time | 11:40

좌장 : 박지훈(한국재료연구원)

히토류2-1 | 14:00 초청강연

히토류 선광/제련 기술

정경오\*(한국지질자원연구원, 과학기술연합대학원대학교), 최준현, 이수경, 신동주, 서주범(한국지질자원연구원)

히토류2-2 | 14:30 초청강연

차량 모터용 영구자석 적용 현황

하석\*(현대자동차)

히토류2-3 | 15:00 초청강연

고속 전동기용 영구자석의 포화 착자 거동과 자기회로 통합 설계

김효준\*, 배준영((주)맥스막), 윤명환(한국전자기술연구원)

히토류2-4 | 15:30 초청강연

Can we realize high-coercivity in Nd-Fe-B sintered magnets without using heavy rare-earth?

Ji-Hyeon An, Sujin Lee, Seol-mi Lee(Korea Institute of Materials Science), Ganghui Kim(Ulsan National Institute of Science and Technology), Su-min Kim, Tae-Hoon Kim\*(Korea Institute of Materials Science), Kyoung-Hoon Bae, Dong-Hwan Kim(Star Group Industry), Ki-Suk Lee(Ulsan National Institute of Science and Technology), Jung-Goo Lee(Korea Institute of Materials Science)

히토류2-5 | 16:00 초청강연

Development of a Knowledge-Driven Platform for the Design of Next-Generation Permanent Magnet Materials

Woosun Jang\*(Yonsei University)

NEW-HORIZON Inter.:  
Nano Convergence Materials Symposium

위원장 : 김수영(고려대학교)  
실무위원 : 이주현 (한양대학교 ERICA), 김현호 (GIST),  
이미경 (인천대학교)  
Room 3층 303, 4월29일

Chair : 김수영(고려대학교)

NCM1-1 | 10:00 Invited Talk

New ways to (try to) grow diamond and cubic boron nitride

Rodney Ruoff\*(UNIST)

NCM1-2 | 10:25 Invited Talk

New Insights into Ultrathin Carbides and Carbide-Dichalcogenide Heterostructures: Synthesis, Superconductivity, Electrocatalysis and more

Mauricio Terrones\*(The Pennsylvania State University)

Break Time | 10:50

Chair : 오승주(고려대학교)

NCM2-1 | 11:00 Invited Talk

Vapor-Liquid-Solid Synthesis of one-dimensional nanomaterials via Rapid Joule Heating

Yan Li\*(Peking University)

NCM2-2 | 11:25 Invited Talk

Liquid Metal-Mediated Growth and Properties of Multidimensional Carbon Crystals

Won Kyung Seong\*(Institute for Basic Science)

NCM2-3 | 11:50 Invited Talk

Using MLFFs to Search for Low Pressure c-BN Growth Modes in Liquid Metals.

Izaak Mitchell, Daniel Hedman(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST)

좌장 : 이철호(서울대학교)

NCM3-1 | 14:00 Invited Talk

Inside and Outside Modifications of Single Walled Carbon Nanotubes

Shigeo Maruyama\*(Zhejiang University, The University of Tokyo, Nagoya University), Abid(Zhejiang University), Wanyu Dai, Chingmei Hu(The University of Tokyo), Chunxia Yang(Zhejiang University), Yongjia Zheng, Rong Xiang(Zhejiang University, The University of Tokyo)

NCM3-2 | 14:25 Invited Talk

Strain-Defect Engineered Layered Chalcogenide Electrocatalysts

Won-Kyu Lee\*(홍익대학교)

NCM3-3 | 14:50 Invited Talk

Blending “interesting” and “important”, theory insights on carbon, borophene, and... ceramics

Boris I. Yakobson(Rice University)

Break Time | 15:15

좌장 : 박범철(고려대학교)

NCM4-1 | 15:30 Invited Talk

Van der Waals gate stack engineering for high-performance 2D electronics

Chul-Ho Lee(Seoul National University)

NCM4-2 | 15:55 Invited Talk

Future Technologies Based on Mimicking Nature with Control of Charge, Spin, and Heat

Paul S. Weiss(University of California, )

NCM4-3 | 16:20 Invited Talk

Electrochemical Synthesis and Modification of Carbon-Based Materials

Sun Hwa Lee\*(Institute for Basic Science)

## NEW-HORIZON: 첨단항공엔진 소재 · 부품 자립화 심포지엄

위원장 : 이흥철 (한화에어로스페이스)  
실무위원 : 김정기 (경상국립대학교),  
김영무 (한화에어로스페이스)  
Room 3층 한라A, 4월29일

좌장 : 최윤석(부산대학교)

Opening remarks | 10:00

첨단1-1 | 10:20 초청강연

첨단항공엔진 소재부품 기술개발 추진계획  
이선혜(산업부)

첨단1-2 | 10:45 초청강연

국내 항공 산업 육성 위한 소재부품 개발 추진계획  
이광병(우주항공청)

Break Time | 11:10

첨단1-3 | 11:15 초청강연

항공기용 소재부품 국산화 실적과 소재시장 활성화를 위한 제언  
정요인\*(한국항공우주산업)

첨단1-4 | 11:35 초청강연

항공엔진 기술 발전과 소재 및 부품 개발의 전략적 중요성  
이흥철\*(한화에어로스페이스)

좌장 : 이명규(서울대학교)

첨단2-1 | 14:00 초청강연

첨단 항공엔진 소재부품 국산화 개발 로드맵 및 상생 전략  
손인수\*(한화에어로스페이스)

첨단2-2 | 14:20 초청강연

항공용 대형 구조재 및 엔진 소재 국산화 성과와 자립화 비전  
신정호\*(세아창원특수강), 김수택\*(세아창원특수강), 장창범\*(세아항공방산소재)

첨단2-3 | 14:40 초청강연

항공엔진용 고온소재 개발 현황  
최백규\*, 도정현, 정중은, 이상원, 김인수(한국재료연구원)

첨단2-4 | 15:00 초청강연

항공 산업용 타이타늄합금 개발 현황 및 발전 방향  
홍재근\*, 김재혁, 양준하, 이상원, 박찬희, 염종택(한국재료연구원)

Break Time | 15:20

좌장 : 김정기(경상국립대학교)

첨단3-1 | 15:40 초청강연

첨단항공엔진용 고충정 모함금 개발기술 현황 및 발전방안  
김홍규\*, 권혁주, 최규창, 정창근((주)한스코)

첨단3-2 | 16:00 초청강연

첨단 항공엔진 가스터빈 고온부품 기술개발 현황  
정의석\*, 권석환(한국로스트웍스(주))

첨단3-3 | 16:20 초청강연

첨단 항공엔진 초내열합금 형단조품 개발현황  
이기영\*, 권용혁, 주경준, 김종식((주)케이피씨엠)

첨단3-4 | 16:40 초청강연

첨단 항공엔진 경량 초고온내열 세라믹 복합재 개발과 성과  
김정일\*, 임동원((주)테크카본)

첨단3-5 | 17:00 초청강연

첨단 항공엔진 적용을 위한 열차폐코팅 공정 기술  
최현중\*, 박정남, 박창연((주)단단), 김진형, 김기근(국방과학연구소)

## 제103회 철강기술심포지엄

위원장 : 엄경근 (포스코)  
실무위원 : 이동조 (포스코)  
Room 3층 한라B, 4월29일

Opening Remarks | 09:30

엄경근 원장(포스코 기술연구원)

좌장 : 김인중(한동대학교)

기술1-1 | 09:40 Keynote

국가인공지능 전략과 제조 AI: 철강 산업의 미래  
최재식\*(주)인이지, KAIST)

기술1-2 | 10:20 Keynote

비디오로부터 학습하는 휴머노이드: VLA 모델의 물리세계 적응과 온디바이스 가속화  
임화섭\*(한국과학기술연구원)

기술1-3 | 11:00 Keynote

Physical AI 시대, 로봇은 어떻게 산업을 재정의하는가  
정현준\*(한국로봇융합연구원)

좌장 : 권태우(현대제철)

기술2-1 | 14:00 초청강연

제조 AI 모델 학습에서의 데이터 한계와 대응 방법  
이종석\*(KAIST)

기술2-2 | 14:30 초청강연

제조 도메인의 품질/생산성/안전 특화 AI 개발 사례와 시사점  
김기훈\*(부산대학교)

기술2-3 | 15:00 초청강연

제조 AI 기술의 한계점과 극복 방향  
윤종필\*(한국생산기술연구원)



기술2-4 | 15:20 초청강연

구매하는 AI와 직접 개발하는 AI

이창선\*(인하대학교), 이상철(주)캠지컨설팅

기술2-5 | 15:40 초청강연

철강제조기업의 디지털 전환(DX)과 Physical AI: 8년의 혁신 여정과 본질적 대응 전략

채민석\*(세아창원특수강)

Break Time | 16:00

좌장 : 정제숙(포스코 기술연구원)

기술3-1 | 16:10 초청강연

열연 품질, 공정연계 제조AI 기술개발 방향

이중형(포스코)

기술3-2 | 16:30 초청강연

Decision AI를 활용한 철강 물류 혁신: 수학적최적화 기반의 슬라브 아드 관제 자동화

신규현\*, 이명호, 김학용, 김주찬(엘지씨엔에스), 노지성, 소현진(포스코홀딩스)

기술3-3 | 16:50 초청강연

선석 스케줄링 최적화

박재우\*(현대제철)

기술3-4 | 17:10 초청강연

연속 도금 공정의 AI 자율제조 구현

심경태\*(KG스틸)

기술3-5 | 17:30 초청강연

용선 운반 기관차 자율주행 기술 개발

이형웅\*(포스코)

## 재료강도

위원장: 김정환 (국립한밭대학교)

총무간사: 배규열 (포스코 기술연구원)

Room 4층 400, 4월29일

좌장 : 손석수(고려대학교)

재료강도1-1 | 09:00

Cu 첨가와 다단계 시효 조건이 6xxx계 Al 합금의 기계적 특성 및 부식·석출 거동에 미치는 영향

홍현빈, Raj Narayan Hajra(국립한밭대학교), 신은주(한국원자력연구원), 김정한(국립한밭대학교), 김재황(한국생산기술연구원), 조훈휘\*(국립한밭대학교)

재료강도1-2 | 09:15

Effect of Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification on Precipitation Behavior and Mechanical Properties of Rolled AZ91 Magnesium Alloy

Won Pyo Hong, Gun Woong An(Kyungpook National Univ.), Jongbin Go(Tsukuba Univ.), Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National Univ.)

재료강도1-3 | 09:30

Enhanced fatigue properties of extruded SEN6 magnesium alloy via ultrasonic nanocrystalline surface modification

Hyung Jun Kim, Du Hyeon Woo(Kyungpook National Univ.), Jun Ho Bae(Korea Institute of Materials Science), Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National Univ.)

재료강도1-4 | 09:45

Improvement in high-cycle fatigue properties of extruded SEN10 magnesium alloy through post-extrusion heat treatment

Je Hyeong An(Kyungpook National University), Joung Sik Suh, Jun Ho Bae(Korea Institute of Materials Science), Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National University)

재료강도1-5 | 10:00

Effect of Bi content on microstructure and mechanical properties of Mg-Bi-Al alloys extruded at high temperature and high speed

To Hai Ha Nguyen, Gun Woong An(Kyungpook National Univ.), Jeonghong Ha(Korea Institute of Industrial Technology), Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National Univ.)

재료강도1-6 | 10:15

Significant Improvement in Ductility of High-Speed-Extruded Mg-Bi Alloys through Al Addition and Its Underlying Mechanisms

Gunwoong An, Seoung-yooun Yu, To Hai Ha Nguyen(Kyungpook National University), Jeong Hong Ha(Korea Institute of Industrial Technology), Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National University)

Break Time | 10:30

좌장 : 홍현욱(국립창원대학교)

재료강도2-1 | 10:40 초청강연

1.5GPa급 강재 용접금속의 내식성 및 수소취화 저항성에 미치는 합금 설계와 미세조직 특성의 상관성 연구

배규열\*, 한도경, 홍석현, 유윤하, 홍수직, 정연승, 황아인(포스코 기술연구원)

재료강도2-2 | 11:05

Effects of Alloying Elements on the Microstructure and Mechanical Properties of Weld Metal in Overlap Joints of 1.0 GPa-Grade Complex Phase Steels

Seok-Hyun Hong, Gyueol Bae\*(포스코)

재료강도2-3 | 11:20

고강도 라인파이프강의 내수소취성에 미치는 Nb 및 V 첨가의 영향

오동균, 정민섭(서울과학기술대학교), 이정훈, 이창희(포항산업과학연구원), 황병철\*(서울과학기술대학교)

재료강도2-4 | 11:35

Fe-Mn-Al-C 경량철강 주조재의 Ni 첨가에 따른 시효경화 거동

김치원(한국재료연구원), 홍현욱\*(국립창원대학교), 이창훈\*, 박성준(한국재료연구원)

재료강도2-5 | 11:50

고질소 오스테나이트계 스테인리스강의 고온 변형 중 동적 재결정 거동 분석

문승현, 문준오\*(국립창원대학교), 정재석(두산에너지리티)

좌장 : 성효경(국민대학교)

**재료강도3-1 | 14:00**

전류가열 기반 시효처리에 따른 따른 Inconel 718 합금의 석출 거동 및 기계적 물성 연구

김이재, 이종호, 최동인(서울대학교), 이시환(한국재료연구원), 한홍남\*(서울대학교)

**재료강도3-2 | 14:15**

알루미늄 아노다이징층에 대한 펄스 레이저 클리닝이 용접부 강도에 미치는 영향

이찬표, 박창규\*, 이준재, 강현식, 김해탄, 성연수(서울과학기술대학교)

**재료강도3-3 | 14:30**

Investigation of Microstructure and Mechanical Properties in Pure Tantalum Processed by Friction Stir Spot Welding

Hyo joo Lee, Min-Ho Kim(Hanbat National University), Van Cong Phan(University of Ulsan), Min Cheol Jo, Keunho Lee, Leeju Park(Agency for Defense Development), Sung-Tae Hong(University of Ulsan), Hoon-Hwe Cho\*(Hanbat National University)

**재료강도3-4 | 14:45**

Mn-Cu 합금의 부식 피로 거동에 미치는 해수환경 영향 분석

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

**재료강도3-5 | 15:00**

화학적 절단 공정으로 종횡비가 균일한 SUS316L 단섬유 제조

염진석, 김권후\*(국립부경대학교)

**재료강도3-6 | 15:15**

선재(Wire rod)용 탄소강 (0.2~0.6Cwt%)의 고온 압축 거동 및 열간압연 미세조직 분석

홍창완\*, 윤국태, 이락규, 김주업, 서창희, 전효원(대구기계부품연구원), 손동민(주세아창원원특수강)

**Break Time | 15:30**

좌장 : 문준오(국립창원대학교)

**재료강도4-1 | 15:40**

Physics-informed machine learning for stress-strain reconstruction from indentation via Kocks-Mecking-Estrin approach

Tae Young Go, Jeong Ah Lee, Jihye Kwon, Renhao Wu, Hyoung Seop Kim\*(POSTECH)

**재료강도4-2 | 15:55**

적층 제조 AISi10Mg 합금의 열처리 조건에 따른 석출 거동과 강화 기여 메커니즘 분석

한재연, 김준혁(국립창원대학교), 이지원, 조현철(두산에너지리티), 홍현욱\*(국립창원대학교)

**재료강도4-3 | 16:10**

적층제조 Ni-Cr-Co-Fe-Al-Ti계 합금에서 공정 고유 석출상 셀 네트워크 기반 인장 변형 거동

박효진, 렌하우, 이재홍, 허윤욱, 이도원, 이지수, 김선규(포항공과대학교), 파라나즈 하프트라(Northwestern University), 정상국, 이병주, 이동화, 김형섭\*(포항공과대학교)

**재료강도4-4 | 16:25**

열적 및 기계적 조건에 따른 나노다공성 금 리가먼트 재부착 거동과 기계적 물성 분석

홍석원, 김영훈(UNIST), 전한솔(계명대학교), 김주영\*(UNIST)

**재료강도4-5 | 16:40**

고밀도 센서 배열을 위한 최소침습형 전자소자의 구조 최적화

김수민, 조지현(UNIST), 황경석(Harvard University), 배재영, 강승균\*(서울대학교), 김주영\*(UNIST)

**재료강도4-6 | 16:55**

변형에너지 제어를 이용한 구리 결정 방향 제어 기술

곽지윤, 심영주, 김동현, 김수정, 김주영\*(UNIST)

**인공지능재료과학**

위원장: 윤종필(한국생산기술연구원)

부위원장 : 김동훈(한국과학기술연구원),

김문조(한국생산기술연구원)

총무간사 : 김용주(고려대학교), 조기섭(국민대학교),

강준희(부산대학교), 정재면(한국재료연구원)

Room 4층 401, 4월29일

좌장 : 김세종(한국재료연구원)

**인공1-1 | 09:00**

딥러닝을 이용한 철강 소재 열처리 공정-미세조직-기계적 물성 연계 모델링 기법 개발

김호현, 오세혁, 정재면, 김세종, 이호원, 강성훈\*(한국재료연구원)

**인공1-2 | 09:12**

데이터 기반 실시간 열연코일 냉각 거동 예측 및 최적 배치 추천 시스템

이치현\*, 이호원, 오세혁, 김호현, 정재면, 김세종(한국재료연구원)

**인공1-3 | 09:24**

이방성 스테인리스강 용접부의 초음파 전파 예측을 위한 Softmin-Fremat Time-of-Flight 손실 기반 물리정보 딥러닝

김현준, 박익근, 강동찬\*(서울과학기술대학교)

**인공1-4 | 09:36**

Prediction of Mechanical Properties in Automotive Steel Coils Using a Machine Learning Approach

JUNHO PARK\*, JAEHYUN CHOI, DAEGEON LEE, TAEKYO HAN, SUNGKYU KIM, SUNGIL KIM(포스코)

**인공1-5 | 09:48**

오스테나이트 탄소 변화를 반영한 철강의 경로 의존적 상변태 예측을 위한 물리 기반 순환 신경망 모델

이혁재, 정든봄, 한홍남\*(서울대학교)

**인공1-6 | 10:00**

기계학습모델을 활용한 CrMnFeCoNi 고엔트로피합금의 형상기억특성 예측

임진수랑, 이제인\*(부산대학교), 신동원\*(Oak Ridge National Laboratory)

**Break Time | 10:12**

좌장 : 윤종필(한국생산기술연구원)

#### 인공2-1 | 10:22

물리규약 기반 ZK60 공형압연재의 Voce 경화모델 계수 식별  
유진영, 천세호, 이성호(부산대학교), 이재성, 정영웅(국립창원대학교), 이태경\*(부산대학교)

#### 인공2-2 | 10:34

Physics-Guided Diffusion Model for EBSD Pattern Quality Improvement

Chi-hun Lee(Korea Institute of Materials Science), Hoang Hai Nam Nguyen, Ho Won Lee\*(Korea Institute of Materials Science, University of Science and Technology)

#### 인공2-3 | 10:46

Toward Real-Time Conversational Control of Digital Mechanical Metamaterials

Jun Kyu Choe\*, Heekyu Kim, Junhyeong Lee(KAIST), Minjeong Kim(UNIST), Donggeun Park, Seunghwa Ryu\*(KAIST), Jiyun Kim\*(UNIST)

#### 인공2-4 | 10:58

Transformer-enabled surrogate model for efficient prediction of mechanical behavior under complex loading paths

Joo Mooyeong(University of Science and Technology, Korea Institute of Materials Science), Minh Tien Tran(Korea Institute of Materials Science), Sehyeok Oh(University of Science and Technology, Korea Institute of Materials Science), Seongjun Bae(Korea Institute of Materials Science), Howon Lee\*(University of Science and Technology, Korea Institute of Materials Science)

#### 인공2-5 | 11:10

데이터와 인공지능 기법을 활용한 초내열 신합금 설계

이태주, 이재인, 임진수량(부산대학교), 정희원, 윤대원(한국재료연구원), 이병주(포항공과대학교), 최벽파(KAIST), 설재복(국민대학교), 전중배(동아대학교), 박노근(영남대학교), 홍현욱(국립창원대학교), 최윤석\*(부산대학교)

#### 인공2-6 | 11:22

EBSD 파라미터 기반 기계학습 모델을 이용한 AZ31 마그네슘 합금의 재결정 거동 분석

천세호, 유진영, 이정훈, 이태경\*(부산대학교)

#### 인공2-7 | 11:34

Token-Level Parameter Encoding in Stable Diffusion for Process-Conditioned Microstructure Synthesis

HOANG CUONG PHAN(University of Science and Technology, Korea Institute of Materials Science), Chihun Lee, Hoheok Kim(Korea Institute of Materials Science), Ho Won Lee\*(University of Science and Technology, Korea Institute of Materials Science)

#### Break Time | 11:46

좌장 : 조기섭(국민대학교)

#### 인공3-1 | 14:00

AWLab: Autonomous Multi-Agent Closed-Loop Inverse Design Framework for Hybrid Architected Metamaterials

Nguyen Duc Hieu Phan, Ho Won Lee\*(University of Science and Technology, Korea Institute of Materials Science)

#### 인공3-2 | 14:12

Self-driving Lab as an Interpreter for Scientific Language

NAYEON KIM(한국과학기술연구원, 고려대학교), Sang Soo Han\*(한국과학기술연구원)

#### 인공3-3 | 14:24

Autonomous Multi-Objective Optimization of Cost-Effective and Durable OER Catalysts for PEM Water Electrolysis

Daeho Kim(Korea Institute of Science and Technology, Korea Univ.), Hyobin Nam, Sae Yane Paek(Korea Institute of Science and Technology), Nayeon Kim, Heeseung Lee, Hyuk Jun Yoo(Korea Institute of Science and Technology, Korea Univ.), Sang Kyu Kwak\*(Korea Univ.), Jong Min Kim\*, Seung Yong Lee\*, Sang Soo Han\*(Korea Institute of Science and Technology)

#### 인공3-4 | 14:36

Design of High-Capacity NASICON-Type Cathode Materials through an Element Mapping-Based Bayesian Optimization Framework

Sanghyeon Park, Yoonsu Shim, Junpyo Hur, Sanghyeon Ji(KAIST), Dongmin Jeon(KIER), Jong Min Yuk\*(KAIST), Chan-Woo Lee\*(KIER)

#### 인공3-5 | 14:48

Physics-Latent Representational Alignment for Uncertainty Quantification and Active Learning in High-Entropy Alloy Catalysis

Wongyu Park, Jeong Woo Han\*(Seoul National University)

#### Break Time | 15:00

좌장 : 김용주(고려대학교)

#### 인공4-1 | 15:10

Machine-Learning Interatomic Potential-Enabled Exploration of  $\text{Li}_7\text{M}_3\text{X}_2\text{O}_{12}$  Garnet-Type Oxides for Solid-State Electrolyte

Mingyu Jeon(KIST), Donghun Kim\*(KAIST), Jung-Hoon Lee\*(KIST, Korea University)

#### 인공4-2 | 15:22

Universal MLIPs in Practice for Realistic Modeling of Energy Materials: Cross-Domain Validation and Potential-Aware Simulations

Jinwoong Chae, Hyeseung Kim, Hyun-Jae Lee, Sojeong Yang(KIST), Yang-Jun Lee(Seoul National University), Jungwoo Choi(KIST), Byung Chul Yeo(Pukyong National University), Donghun Kim(KAIST), Byungju Lee\*(KIST, University of Science and Technology (UST)), Stefan Ringe\*(Korea University), Sungwoo Kang\*(KIST, University of Science and Technology (UST))

#### 인공4-3 | 15:34

Distilling Machine Learning Interatomic Potentials for Scalable Catalyst Discovery

Seokhyun Choung, Hyukjun Lim, Jeong Woo Han\*(Seoul National Univ.)

#### 인공4-4 | 15:46

Quantum Computing Based Design of Multivariate Porous Materials

Shinyoung Kang, Jihan Kim\*(KAIST)

인공4-5 | 15:58

Synergistic Effect of Oxygen Evolution Mechanism and Interfacial Water Dynamics Revealed by Large Scale Simulation  
Jinuk Moon(Seoul National Univ.), Hyunwoo Jun, Jinwoo Lee\*(KAIST), Jeong Woo Han\*(Seoul National Univ.)

인공4-6 | 16:10

Physics-guided Graph Neural Networks for Data-efficient Prediction of Structure-property Relationship in Polycrystal Metals  
Minh Tien Tran, Jaimyun Jung, Se-Jong Kim, Seong-Hoon Kang(Korea Institute of Materials Science), Ho Won Lee\*(Korea Institute of Materials Science, University of Science and Technology)

Break Time | 16:24

좌장 : 김동훈(KAIST)

인공5-1 | 16:32

Analysis of Diffusion Models for Inorganic Materials Discovery  
Gihyeon Jeon\*(KIST), Sanghyun Kim(Kumho Petrochemical), Seungwoo Hwang, Jiho Lee(Seoul National University), Jisu Jung(Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology (KICET)), Seungwu Han(Seoul National University, Korea Institute of Advanced Study (KIAS)), Sungwoo Kang(KIST, University of Science and Technology (UST))

인공5-2 | 16:44

Toward Inverse Materials Design via Reinforcement Learning Approach  
Hyochan Ahn, Hsu Myat Noe, Joo-Hyoung Lee\*(Gwangju Institute of Science and Technology)

인공5-3 | 16:56

과학기술 R&D 특화 초거대 인공지능 기술 개발: 대규모 과학 문헌 데이터베이스 및 시각-언어 파운데이션 모델 구축  
나주원\*(한국재료연구원)

인공5-4 | 17:08

OPSI: An On-premises LLM-based Schema-Inductive Framework for CPSP Database Construction of Ni-based Superalloys  
Sejin Park, Yeji Won(Kookmin Univ.), Youngbeum Song, Daewoong Kim(Agency for Defense Development), Kisub Cho\*(Kookmin Univ.)

인공5-5 | 17:20

Solomon: Toward an AI Co-Scientist for Materials Science  
Jisu Kim, Hyunsung Cho, Seyong Im, Euitae Lee, Haekwan Jeon, Seungwu Han\*(Seoul National Univ.)

인공5-6 | 17:32

AGNES: An Agentic Framework for Automated Reconstruction of Numerical Data from Scientific Figures  
Eui Tae Lee\*, Haekwan Jeon, Hyunsung Cho, Jisu Kim(Seoul National University), Seungwu Han(Seoul National University, Korea Institute of Advanced Study)

극한소재 실증연구 기반 및 R&D 전략 심포지엄

위원장 : 류호진(KAIST)

실무위원 : 이영선(한국재료연구원)

Room 4층 402A, 4월29일

Opening Remarks | 09:00

극한소재실증연구기반조성사업 사업 소개 및 인사말  
이영선 사업단장(한국재료연구원)

좌장 : 최백규(한국재료연구원)

극한1-0 | 09:20

초고온 실증연구기반 구축내용 소개  
최백규(한국재료연구원)

극한1-1 | 09:30

초청강연

발전용 가스터빈 터빈 고온부품 소재개발  
이의종\*(두산에너지리티)

극한1-2 | 10:00

초청강연

우주항공 및 국방분야 극한환경세라믹 소재기술  
오윤석\*, 김성원, 김종일(한국세라믹기술원)

극한1-3 | 10:30

초청강연

초고온 환경에서의 극한소재 국산화 개발 현황과 한국재료연구원 협력  
손인수\*(한화에어로스페이스)

극한1-4 | 11:00

초청강연

Advancing High-Temperature Materials and Coatings for Gas Turbine Applications: Overview of NRC R&D Capabilities  
Dongyi Seo(Canada NRC)

좌장 : 나영상(한국재료연구원)

극한2-0 | 14:00

극저온 실증연구기반 구축내용 소개  
나영상(한국재료연구원)

극한2-1 | 14:10

초청강연

극저온용 고Mn강 제품개발 현황  
이순기\*(포스코), 한일욱(포스웰딩), 이상철, 소태일, 김상석(포스코)

극한2-2 | 14:40

초청강연

액체수소 저장용 금속 소재의 초극저온 기계적 신뢰성 평가  
이수열\*(충남대학교)

극한2-3 | 15:10

초청강연

국제 환경 변화 대응을 위한 친환경 선박용 소재  
이동주\*, 이창민, 김범철, 김진호(HD한국조선해양)

Break Time | 15:40

좌장 : 권준범(한국재료연구원)

극한3-0 | 15:50

특정극한 실증연구기반 구축내용 소개  
권준범(한국재료연구원)





# ORAL SESSION III

4월 30일

## 나노융합소재

위원장 : 김수영 (고려대학교)  
부위원장 : 이주현(한양대학교)

총무간사 : 김현호 (국립금오공과대학교), 이미경(인천대학교)  
Room 2층 201A, 4월30일

좌장 : 남태원(부산대학교)

나노융합1-1 | 09:00

초청강연

Non-destructive dispersion of SWCNT and its application in Si-CNT Binary Component Li-battery anode  
Jungmo Kim(Electrotechnology Research Institute)

나노융합1-2 | 09:25

Coherency-Driven Stabilization of Metastable oxide Interfaces for Highly Selective Gas Sensing  
Hyeuk Jin Han\*(Sungshin Women's University)

나노융합1-3 | 09:40

Investigation of  $\pi$ -Conjugated Anions at  $\text{SnO}_2$ /Perovskite Interfaces in Perovskite Solar Cells  
Wonjin Jang, Soo Young Kim\*(Korea University)

나노융합1-4 | 09:55

High-Sensitivity Acetone Sensor Based on  $\text{CeO}_2$ -Decorated NiO Nanodomes: The Effect of  $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$  Ratio  
Junho Hwang(Yonsei Univ.), Young-Seok Shim\*(Koreatech Univ.), Wooyong Lee\*(Yonsei Univ.)

나노융합1-5 | 10:10

Abnormal Melting and Thermal Properties of Spiky Gold Mesoparticles: Effects of Complex Dimensions and Morphology  
Jieun Lee, Jiyoung Kim, Minkyung Kwak, Hyungi Min, Eunsoo Park\*(Seoul National University)

Break Time | 10:25

좌장 : 박태준(고려대학교)

나노융합2-1 | 10:35

초청강연

Efficient Photoelectrochemical System for the Production of Green Hydrogen and High Value-Added Chemicals  
Sanghan Lee\*(광주과학기술원)

나노융합2-2 | 11:00

초청강연

Two-dimensional materials for electronic devices  
Min Sup Choi\*(Chungnam National University)

나노융합2-3 | 11:25

주사열탐침현미경(SThM)을 사용한 나노스케일 열물성 측정 및 정량화 기술  
구승희(한국표준과학연구원), 신효선\*(한국표준과학연구원, 과학기술연합대학원대학교)

나노융합2-4 | 11:40

Freestanding, Ultrasooth Diamond Membranes by Simple Delamination via  $\text{HF}(\text{aq})$  Etching  
VIJAY GUPTA, Anirban kundu(Institute for Basic Science (IBS)), Paulius Pobedinskas, Ken Haenen\*(Hasselt University), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science(IBM), UNIST)

## 재료분석

위원장 : 허윤욱 (포항공과대학교)  
총무간사 : 김성대 (국립부경대학교)  
Room 2층 201B, 4월30일

좌장 : 허윤욱(포항공과대학교)

분석1-1 | 09:00

EBSD-EDS 분석을 활용한 이중 금속 계면 금속간화합물(IMC)의 정량적 해석  
강주희\*, 김민성(웨이브센스)

분석1-2 | 09:15

3D Surface Reconstruction from Multiple BSE Images for Microstructure Visualization  
Hoon Kang, Haewon Jung, In-Yong Park\*(한국표준과학연구원)

분석1-3 | 09:30

Practical considerations for In-Situ and Cryo-TEM applications  
Seungmin Lee, Yunseong Jeon, Choongbog Kim, Sung Kang, Yoon Huh, Jungjae Park\*(Research Institute of Industrial Science & Technology)

분석1-4 | 09:45

Overview of cryogenic atom probe tomography for hydrogen analysis  
GUNYOUNG YOON, JI-SUNG YOO, TAE-HYEON JEONG, IH-HO PARK\*(Korea Institute of Materials Science)

분석1-5 | 10:00

열간단조 후 조질열처리 삭제를 위한 열간단조 후 조질열처리 삭제를 위한 강종별 기계적 특성 및 미세조직 비교 연구  
한춘수\*(에이치엘만도)



#### 분석1-6 | 10:15

Comparative Analysis of Atom Probe Tomography for SiC: Impact of Laser Wavelength

Won-Hyoung LEE, Chang-Gi Lee, Yeon Ha Jo, Se-Ho Kim\*(Korea University)

#### 분석1-7 | 10:30

Atomic-Scale Characterization of Electrolyte-Induced Corrosion in 316 Stainless Steel

CHANGGI LEE, Won-Hyoung Lee, Se-Ho Kim\*(Korea University)

#### Break Time | 10:45

좌장 : 김성대(부경대학교)

#### 분석2-1 | 10:50

TEM 회절패턴 자동해석 프로그램 (REDI, RIST Electron Diffraction Interpreter)

강성\*(포항산업과학연구원)

#### 분석2-2 | 11:05

국내 소재산업 경쟁력 강화를 위한 표준물질 개발 및 활용

김성남\*(포항산업과학연구원)

#### 분석2-3 | 11:20

마르텐사이트 강의 템퍼링 시 연신을 변화의 미세조직적 원인 분석

이재원, 이승호, 이혁재, 이도형(서울대학교), 이일철, 김성일(포스코), 한흥남\*(서울대학교)

#### 분석2-4 | 11:35

0.15mm 방향성 전기강판의 표면 에너지 선택적 결정립 성장 및 자구 거동에 관한 연구

안종현, 이귀영, 이한술(한양대학교), 유성현(한양대학교, 현대제철연구소), 안용근, 강춘구(현대제철연구소), 김종렬\*(한양대학교)

#### 분석2-5 | 11:50

나노압입시험과 딥러닝을 활용한 Q&P강의 복합 저온 변태 미세조직 자동화 분석 방법

박태창\*(현대제철), 임용수, 김진경\*(한양대학교), 강훈철(현대제철)

#### 분석2-6 | 12:05

Quantitative XRD Analysis and JMAK-based Prediction of Isothermal Bainitic Transformation

Jangjung Kim, Kisub Cho\*(Kookmin Univ.)

#### 분석2-7 | 12:20

Evaluating stretch-flangeability of AA7075 through integrated mechanical testing and validated finite element simulations

Zaigham Saeed Toor(POSTECH), Kali Prasad(Indian Institute of Technology Madras), Jaehun Kim, Hyoung Seop Kim\*(POSTECH)

## 생체재료

위원장 : 김유찬 (한국과학기술연구원)

총무간사 : 이주현 (한양대학교), 이준민 (포항공과대학교)

Room 2층 202A, 4월30일

좌장 : 정현도(한양대학교)

#### 생체1-1 | 09:00

초청강연

첨단 Laser-driven HA/PEEK 기술의 검증 및 임상 적용

이강식\*, 채민성(서울아산병원), 전호정, 김유찬(KAIST), 정화철, 구동규(시지메드텍), 이동호\*(서울아산병원)

#### 생체1-2 | 09:25

초청강연

CMOS 칩 기반 신경망 모니터링을 통한 시냅스 지도화

정우빈\*(포항공과대학교)

#### 생체1-3 | 09:50

초청강연

Thermo-Responsive Bioelectricity in Engineered M13 Viruses

Han Kim\*(Tech University of Korea)

#### Break Time | 10:15

좌장 : 박범철(고려대학교)

#### 생체2-1 | 10:25

Bioinspired Active Encapsulation for Implantable Electronics

Myung-kyun Choi, Yi-Jeong Choi, Woo Mi Ryu, Seungha Lee(Seoul National Univ.), Seongu Kim(Kwangwoon Univ.), Yeon-Gyu Kim, Jun-Hyeok Jeon, Young-Seo Kim, Se-bin Park, Yong-Wu Kim, Jae-Hwan Lee(Seoul National Univ.), Jeonghyun Kim\*(Kwangwoon Univ.), Seongjun Park\*, Ho-Young Kim\*, Sung Jae Kim\*, Seung-Kyun Kang\*(Seoul National Univ.)

#### 생체2-2 | 10:40

Ring-Structured Hybrid Antibacterial Contact Lenses Fabricated Using a Sol-Gel Methods Antibacterial Solution and Nephrite Powder

BYEONGSEON KIM, DongHee Hong, WoongBi Park, Tae-Sik Jang\*(Pusan National Univ.)

#### 생체2-3 | 10:55

Enzyme-regulated extended swelling of hydrogels for dehiscence-less tissue expansions

Byung Ik Park, Jeong-Yun Sun\*(Seoul National Univ.)

#### 생체2-4 | 11:10

GelMA-Based Electroconductive Hydrogel Nanocomposite for Accelerating Diabetic Wound Regeneration

Gyungmin Ryu, Hyeong Seok Kang, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

#### 생체2-5 | 11:25

체내삽입형 이온트로닉스를 위한 초저팽윤 생분해성 이온다이드

한지은, 최이정, 강승균\*(서울대학교)

생체2-6 | 11:40

Gyroid-Structured WE43 Magnesium Scaffolds with Surface Functionalization for Bone Regeneration

Nayoung Lee(Hanyang Univ.), Hyun Lee(Korea Institute of Industrial Technology), Jin-Yeong Kim, Junhyung Kim(Kangwon National Univ.), Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

항공재료

위원장 : 이흥철 (한화에어로스페이스)  
총무간사 : 석무영 (한국재료연구원),  
오석근 (한국항공우주산업), 이병현(공군 항공기술연구소)  
Room 2층 202B, 4월30일

좌장 : 박현일(한국재료연구원)

항공1-1 | 09:00

항공기 주요부위의 반복 검사주기 최적화를 위한 비파괴검사 탐지능력 연구

유건아\*, 전일, 이호용(한국항공우주산업), 이두열(부산대학교)

항공1-2 | 09:15

직접응용증착법으로 제조된 Inconel 625 /  $Al_2O_3$  경사기능재의 단열 및 기계적 특성

유현용(경상국립대학교), 유진영(부산대학교), 김태현, 이진수(경남대학교), 안성열(포항공과대학교), 이태경(부산대학교), 김세윤(경남대학교), 김형섭(포항공과대학교), 김정기\*(경상국립대학교)

항공1-3 | 09:30

직접응용증착법으로 제조된 항복강도 1.5 GPa급 IN718 합금 특성 평가

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

Break Time | 09:45

좌장 : 강성규(경상국립대학교)

항공2-1 | 09:55

Al 기반 Al-Zn-Mg-Cu 합금 주조공정 최적화를 위한 해석 DB 구축 및 DOE 활용

신윤우, 최현성, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남\*(한국재료연구원)

항공2-2 | 10:10

기계가공 해석을 위한 파단 물성 평가 및 역해석 기반 내부 파단변형을 정량화

심현보(한국재료연구원), 정찬욱((주) 동양에이케이코리아), 오석근(한국항공우주산업), 박현일, 석무영, 이동준, 권용남, 최현성\*(한국재료연구원)

Break Time | 10:25

좌장 : 석무영(한국재료연구원)

항공3-1 | 10:35

적층 가공 기술을 활용한 가스터빈 엔진부품 수리기법 개발

이병현, 김시호\*, 권혁준(공군 항공기술연구소), 이흥철(한화에어로스페이스)

항공3-2 | 10:50

IOD에 의한 J85 엔진 압축기 파손 사례

김홍성, 권혁준, 김영찬(공군 항공기술연구소), 이두열\*(부산대학교)

항공3-3 | 11:05

전투기 캐노피 제작 기술 개발

정대호, 김덕성, 정유인\*(한국항공우주산업)

Break Time | 11:20

좌장 : 성효경(국민대학교)

항공4-1 | 11:30

항공부품 적층제조 사례 및 품질인증 발전방향

전병철\*, 김용세, 박종민(공군 항공기술연구소), 이동훈(공군 항공자원관리단)

항공4-2 | 11:45

항공기 구성품 마모 발생유형 및 메커니즘

김영찬, 정희성, 김용세(공군 항공기술연구소)

복합재료

위원장 : 조승찬 (한국재료연구원)  
총무간사 : 김정환 (한국재료연구원)  
Room 2층 203, 4월30일

좌장 : 조승찬(한국재료연구원)

복합1-1 | 09:00

Microstructural control and hardness enhancement of bicontinuous Mg-Ti composites through liquid metal dealloying in AZ31 alloy melt

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

복합1-2 | 09:15

Effect of immersion time on microstructure and mechanical properties of bicontinuous Mg-Ti composites fabricated by liquid metal dealloying

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

복합1-3 | 09:30

입방정 질화붕소 강화 마그네슘 기지 금속복합소재의 열처리에 따른 미세조직-특성 상관관계 분석

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

복합1-4 | 09:45

Al-BNNB(Boron nitride Nano Barb) 복합재의 공정-미세조직-물성 상관관계에 관한 연구

이효정, 한주영(국민대학교), 구자연, 박은수(주식회사이엠엘), 최현주\*(국민대학교)

#### 복합1-5 | 10:00

TiC/Fe 복합재료의 (Ti,Mo)<sub>C</sub> 형성 거동과 기계적 특성에 미치는 Mo 함량의 영향

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

#### 복합1-6 | 10:15

연성-취성 천이온도(DBTT) 및 산화저항성이 향상된 핵융합로 플라즈마 대면부품용 3차원 네트워크 구조 W-Cr 복합재 개발

이성민, 김정석, 박노준, 한홍남\*(서울대학교)

#### 복합1-7 | 10:30

Cu-Ti 합금의 In-situ 산화를 이용한 복합재료 제조 및 물성 연구

문하영(한국재료연구원, 과학기술연합대학원대학교), 정현우, 황지인, 최은애\*, 한승전\*(한국재료연구원)

#### 복합1-8 | 10:45

Ti-6Al-4V/CFRP 접합 강도 향상을 위한 Liquid Metal Dealloying 공정 최적화 및 계면 미세조직 제어

권혁민(단국대학교), 와다 타케시, 카토 히데미(도호쿠대학), 박성혁(경북대학교), 주수현\*(단국대학교)

#### 복합1-9 | 11:00

금속복합소재 기반 차세대 고성능 반도체용 고방열, 고내구성 baseplate-heatsink 일체형 소재 연구

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

#### 복합1-10 | 11:15

코어-셸 구조를 통한 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 자기차폐 억제 및 B<sub>4</sub>C-Al 복합재료 성능 향상 연구

강민우, 조승찬\*, 이동현, 조은서, 김정환, 이상복, 이상관(한국재료연구원), 권한상(부경대학교), 이태규(한밭대학교)

### 금속역사

위원장 : 조남철 (국립공주대학교)

총무간사 : 이재성 (국립문화유산연구원)

Room 3층 삼다A, 4월30일

좌장 : 조남철(국립공주대학교)

#### 역사1-1 | 09:00

전라북도 지리산 인근 제철유적 출토 슬래그의 재료학적 특성

조남철\*, 정희수(국립공주대학교)

#### 역사1-2 | 09:15

청동거울의 제작에 사용된 재료와 기술의 변화

김소진\*, 홍주현(국립문화유산연구원)

#### 역사1-3 | 09:30

해안 환경에서 야외 청동 조형물의 부식 거동 연구

권희홍(한국전통문화대학교), 조남철\*(국립공주대학교)

#### 역사1-4 | 09:45

양양 선림원지 출토 금동보살입상의 수은 아말감 도금층 미세구조 및 재질 특성

이재성\*, 윤혜성(국립문화유산연구원)

### 타이타늄

위원장 : 송영석 (세아창원특수강)

총무간사 : 김경민 (세아창원특수강), 노윤경 (동아특수강),

박찬희 (한국재료연구원), 최미선 (포항산업과학연구원)

Room 3층 삼다A, 4월30일

좌장 : 최미선(포항산업과학연구원)

#### 타이타늄1-1 | 10:20

Grade 1 순수 티타늄 판재의 소성 거동 중 집합조직 변화에 대한 결정 소성 모델 기반 접근

유제현, 이명규\*(서울대학교), 봉혁중(경상국립대학교), 홍종화, 민경문(한국재료연구원)

#### 타이타늄1-2 | 10:35

Ti-6Al-4V의 반복 열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화와 hot-dip 알루미늄아징을 통한 산화 억제 효과

이종현, 장병록\*(인하대학교)

#### 타이타늄1-3 | 10:50

Investigating cold creep behaviour and mechanism for Near-α Ti-6242

HaSeong Baek(Incheon National University), Yong-Taek Hyun(Korea Institute of Materials Science), Tea-Sung Jun\*(Incheon National University)

#### 타이타늄1-4 | 11:05

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

서기완, 김도향, 박은수\*(서울대학교)

#### 타이타늄1-5 | 11:20

부분재결정 미세조직을 통한 우수한 강도-연성 특성을 갖는 경량 Ti 기반 중엔트로피 합금

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

#### Break Time | 11:35

좌장 : 이욱진(부산대학교)

#### 타이타늄2-1 | 11:40

Effect of precursor composition ratio on elastic modulus and biological properties of porous Ti fabricated by liquid metal dealloying

Bo Hyun Park, Hyun Jun Youn, Jeong Hun Lee(Kyungpook National University), In-Chul Choi(Kumoh National Institute of Technology), Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National University)

타이타늄2-2 | 11:55

Evaluation of Mechanical Properties and Anisotropy of Ti-6Al-4V Alloy Fabricated by Laser Wire Directed Energy Deposition (LW-DED)

이종익, 김세훈(Kyunghee Univ.), 최준혁, 장연하, 주효문(Hyundai Motor Group), 이빈\*(Kyunghee Univ.)

타이타늄2-3 | 12:10

사용후핵연료 저장용 타이타늄계 중성자흡수 구조재의 기계적특성과 임계제어성능

천영범\*, 강지훈, 박선영, 정승문(한국원자력연구원)

타이타늄2-4 | 12:25

초고내식 Zr702 합금의 고온 변형 거동 및 가공 공정 지도 분석

이현석, 최미선, 장경현(포항산업과학연구원)

적층제조 활용 경사기능형 내열소재 심포지엄

위원장 : 조중욱(포항공과대학교)

실무위원 : 김정기(경상국립대학교), 김경덕(포항공과대학교), 이태경(부산대학교)  
Room 3층 삼다B, 4월30일

좌장 : 이태경(부산대학교)

내열1-1 | 09:00

초청강연

PBF로 제조된 IN738 alloy에서의 응고크랙 발생거동 및 방지대책  
조중욱\*, 이승훈, 전하늘(포항공과대학교)

내열1-2 | 09:25

초청강연

금속 3D 프린팅 기반 고강도 IN738 초내열 합금의 공정 최적화 및 열처리 제어 기술 개발

안성열, 서혜진, 김형섭\*(포항공과대학교)

내열1-3 | 09:50

초청강연

레이저 기반 직접응용증착법을 활용한 경사기능형 금속-세라믹 내열소재 제조

김정기\*, 유현용(경상국립대학교), 유진영(부산대학교), 김태현, 이진수(경남대학교), 안성열(포항공과대학교), 김형섭(포항공과대학교, Tohoku University), 이태경(부산대학교), 김세윤(경남대학교)

내열1-4 | 10:15

초청강연

상장모델링과 평균장 이론 모델링을 활용한 L-PBF IN738LC 상변화 미세조직 분석

김경덕\*, 사일렌드라 쿠마르 베르마, 안성열, 김형섭(포항공과대학교)

Break Time | 10:40

좌장 : 김정기(경상국립대학교)

내열2-1 | 10:50

초청강연

화염 분사에 노출된 내열·열방호 합금의 소재성능 변화

이태경\*, 유진영, 김성원, 천세호, 이정훈(부산대학교), 김정기(경상국립대학교)

내열2-2 | 11:15

초청강연

이종소재 DED-LB 활용 국방 보수부품 품질평가 방법 표준화 연구  
어두림\*, 이현, 손용(한국생산기술연구원)

내열2-3 | 11:30

초청강연

항공엔진 MRO 적용을 위한 IN718 적층재 특성 데이터베이스 구축  
김가형, 김영무\*, 윤종진, 한정민, 김진영, 김광년(한화에어로스페이스)

내열2-4 | 11:45

초청강연

항공엔진 부품 제작을 위한 적층제조 공정 파라미터 영향

한정민, 김가형, 윤종진, 김진영, 김광년, 김영무\*(한화에어로스페이스)

내열2-5 | 12:00

초청강연

적층제조 공정의 항공기 적용 사례 및 확대 전략

박주영, 정유인\*(한국항공우주산업)

가공-용접 및 접합 II

위원장 : 이광석 (한국재료연구원)

총무간사 : 강용준 (한국재료연구원),

김준호 (한국생산기술연구원), 성효경 (국민대학교),

오세권 (한국생산기술연구원), 이재인 (부산대학교)

Room 3층 300, 4월30일

좌장 : 강용준(한국재료연구원)

용접5-1 | 09:00

계층적 미세조직을 통한 GTAW 용접 STS 316L의 극저온 강도-연성  
동시 향상

전승민, 손광태, 김영균, 나영상\*(한국재료연구원)

용접5-2 | 09:15

Nb이 저탄소강의 대입용접 열영향부의 미세조직과 저온 충격인성에 미치는 영향

박현준, 유성훈(부산대학교), 서인식(H2C), 강남현\*(부산대학교)

용접5-3 | 09:30

핵융합로 구조용 저방사화강의 Ti 첨가에 따른 탄화물 석출 거동과 용접 공정별 HAZ 폭 차이가 고온 기계적 특성 및 크리프-피로 거동에 미치는 영향

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

용접5-4 | 09:45

Canceled

머신 러닝을 활용한 고강도 특수강(Armox® 500T)의 기계적 물성, 미세조직 및 용접부 특성 간 상관관계 분석

전소희\*(국립한밭대학교)

용접5-5 | 10:00

API X70 파이프라인강 용접부의 미세조직 이질성이 SSRT 기반 응력부식균열 거동에 미치는 영향

곽종현, 설재복, 성효경\*(국민대학교)

용접5-6 | 10:15

Threshold-tree coupled k-means clustering 모델을 활용한 대입용접 열영향부 국부취성영역의 기하학적 특성과 인성 열화 메커니즘 규명

유성훈, 최정현, 박현준, 강남현\*(부산대학교)

Break Time | 10:30

## 가공-열처리

위원장 : 이광석 (한국재료연구원)  
총무간사 : 강용준 (한국재료연구원),  
김준호 (한국생산기술연구원), 성효경 (국민대학교),  
오세권 (한국생산기술연구원), 이제인 (부산대학교)  
Room 3층 300, 4월30일

좌장 : 김규식(국방과학연구소)

### 열처리1-1 | 10:40

FCD800 합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 Q/T 열처리 영향  
김성진, 이준호, 최승혁, 이석재\*(전북대학교)

### 열처리1-2 | 10:55

Effects of Solute Atoms on Recrystallization Behavior of Platinum Alloys

Gaeun Song(Seoul National Univ.), Young-Kyun Kwon(Kyung Hee Univ.), So-Yeon Lee(Inha Univ.), In-Suk Choi\*(Seoul National Univ.)

### 열처리1-3 | 11:10

고질소 오스테나이트계 스테인리스강의 시효 시 석출 거동 및 기계적 물성 분석

김승현(한국재료연구원, 동아대학교), 김성훈\*, 이태호, 이진중, 조효행(한국재료연구원), 정재석(두산에너지빌리티), 전종배\*(동아대학교)

### 열처리1-4 | 11:25

냉간가공된 AISI 316L의 고용화 열처리 시간에 따른 회복 및 재결정이 저온침탄에 미치는 영향

김현진(한국생산기술연구원, 부산대학교), 김준호\*(한국생산기술연구원)

### 열처리1-5 | 11:40

SOFC interconnect용 Nb 첨가 페라이트계 스테인리스강의 고온 cyclic 및 static 산화 거동

서성지, 김성준\*(포항공과대학교)

### 열처리1-6 | 11:55

이동 경계조건을 적용한 모터코어의 연속가열 해석  
복현호\*(포스코)

## 적층제조 및 분말 III

위원장 : 홍순직 (국립공주대학교)  
총무간사 : 강민철 (3D프린팅연구조합),  
김정기 (경상국립대학교), 문종언 (국립공주대학교)  
Room 3층 301, 4월30일

좌장 : 문종언(공주대학교)

### 적층9-1 | 09:00

Elucidation of the Mechanisms of Enhanced Cryogenic Strength in Additively Manufactured 316L Stainless Steel

Chohyeon Lee, Won Hui Jo, Hyeong Jin Park(Kookmin Univ.), Haeum Park(Korea Institute of Materials Science, Korea Univ.), Hyun Joong Kim(Kongju National Univ.), Jaimyun Jung(Korea Institute of Materials Science), Jeong Min Park(Korea Institute of Materials Science, Korea Univ.), Soom-Jik Hong(Kongju National Univ.), Jae Bok Seol\*(Kookmin Univ.)

### 적층9-2 | 09:15

MSR용 고내부식성 Ni계 합금 설계를 위한 SMART 및 DED 기반 신속 소재 개발 및 입계 부식 제어 전략

이태규\*, 정성훈, 이재훈, 이민제(국립한밭대학교)

### 적층9-3 | 09:30

레이저 분말 베드 용융법으로 적층제조된 Fe-6.5Si 합금의 미세조직 및 자성 특성에 미치는 공정 변수의 영향

윤지상(한국재료연구원, 국립부경대학교), 김연우(한국재료연구원), 박규현(한국재료연구원), 배재웅\*(국립부경대학교), 정재원(한국재료연구원), 박정민\*(한국재료연구원, 고려대학교)

### 적층9-4 | 09:45

Ti-6Al-4V 옥텟트리스 격자구조체의 미세조직 제어 및 압축 변형 안정성 연구

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

### 적층9-5 | 10:00

Directed energy deposition 공정으로 제조한 TiC 첨가된 316L 스테인리스강의 극저온 미세조직 및 기계적 특성 평가

한규미, Levin Sebastian Cahyaputra, 김진우(포항공과대학교), 김정기(경상국립대학교), 김형섭\*(포항공과대학교)

### 적층9-6 | 10:15

이종 분말 동시분사 레이저 직접 적층 공정을 통한 Al/Ni 경사기능재료의 설계 및 제조

조해준, 정종욱, 이주영, 이육진\*(부산대학교)

### 적층9-7 | 10:30

High-Strength L-PBF Ti-6Al-4V via Mechanofusion-Based Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Dispersion Strengthening

Sanghee Jeong, Sehun Kim, Bin Lee\*(Kyunghee University)

### 적층9-8 | 10:45

Binder jetting 적층 제조 공정으로 제조된 Modified 17-4PH 스테인리스강의 미세조직과 인장 및 충격 특성

강민재, 황원구(인하대학교), 전호성(자이브솔루션즈), 이기안\*(인하대학교)



적층9-9 | 11:00

### Mechanical Behavior of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V: Experimental Observations

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

## Spark ENGE2026

위원장 : 장호원 (서울대학교)

실무위원 : 김수영 (고려대학교), 강종훈 (포항공과대학교)

Room 3층 303, 4월30일

좌장 : 장호원(서울대학교)

ENGE1-1 | 09:00

초청강연

### Vapor-Deposited Perovskite Solar Cells

Jin-Wook Lee\*(Seoul National University)

ENGE1-2 | 09:25

초청강연

### Development of Sodium-ion Battery Cathodes for Sustainable Energy Storage

Se Young Kim\*(Korea Institute of Science and Technology, University of Science & Technology)

ENGE1-3 | 09:50

초청강연

### 차세대 페로브스카이트 태양전지 및 LED의 광분석 및 설계

조창순\*(포항공과대학교)

Break Time | 10:15

좌장 : 김수영(고려대학교)

ENGE2-1 | 10:25

초청강연

### Operando TEM investigation of polar domain dynamics in sliding ferroelectrics

Hyobin Yoo\*(Seoul National University)

ENGE2-2 | 10:50

초청강연

### Scalable Electronics from Solution-Processed Low-Dimensional Materials

Dongjoon Rhee\*(Kookmin Univ.)

Break Time | 11:15

좌장 : 이주현(한양대학교)

ENGE3-1 | 11:25

초청강연

### Enhanced Triboelectric Nanogenerator via Polarization and Discharge Technologies

Jihye Kim\*(Ajou University)

ENGE3-2 | 11:50

초청강연

### Ion-Motion-Driven Memristors: Deterministic and Stochastic Switching for Emerging Computing Applications

Jung Ho Yoon\*(Sungkyunkwan Univ.)

## 차세대 에너지재료 심포지엄

위원장 : 신병하(KAIST)

실무위원 : 박찬진(전남대학교), 오지훈(KAIST),

유상우(경기대학교), 남대현(고려대학교)

Room 3층 한라A, 4월30일

좌장 : 유상우(경기대학교)

차세대1-1 | 09:00

초청강연

### Interfacial Chemistry-Governed Reaction Dynamics and Microstructural Evolution in All-Solid-State Batteries

Sung-Kyun Jung\*(Seoul National University)

차세대1-2 | 09:20

초청강연

### Calcination process design for layered oxide cathodes toward advanced lithium ion batteries

Hyeokjun Park\*(Korea University)

차세대1-3 | 09:40

초청강연

### 무음극 전고체전지 다공성 전극에서 리튬 금속의 creep 흐름 분석

Se Hwan Park\*(Kookmin Univ.)

차세대1-4 | 10:00

초청강연

### Towards energy-efficient and stable blue and near-infrared OLEDs

Hwan-Hee Cho\*(Yonsei Univ.)

좌장 : 오지훈(한국과학기술원)

차세대2-1 | 10:30

초청강연

### 머신러닝 기반 촉매소재 개발 가속화

김동훈\*(KAIST)

차세대2-2 | 10:50

초청강연

### In Silico Analysis of Surface Reactions on Energy Materials

Soonho Kwon\*(POSTECH)

차세대2-3 | 11:10

초청강연

### Low-Iridium Based Electrocatalysts and Electrodes for High-Performance PEMWE

HyukSu Han\*(Hanyang Univ.)

차세대2-4 | 11:30

초청강연

### Advanced Electrochemical Systems for Environmental Remediation and Green Chemical Synthesis

Jeonghoon Lim\*(Chungnam National Univ.)

차세대2-5 | 11:50

초청강연

### Surface Engineering: Controlling Surface Enrichment of Cations in Complex Oxides towards Carbon-Neutral Society

Jun Kyu Kim\*(Ajou Univ.)



## 미래 모빌리티 경량고속 소재 데이터 플랫폼 심포지엄

위원장 : 현세균(인하대학교)  
실무위원 : 김세훈(한국자동차연구원)  
Room 3층 한라B, 4월30일

좌장 : 김세훈(한국자동차연구원)

**모빌1-1 | 09:00** 초청강연

경량고속 소재 데이터 허브 구축  
어광준\*(한국재료연구원)

**모빌1-2 | 09:20** 초청강연

문헌 기반 알루미늄 합금 미세조직 이미지의 자동 정제 및 열역학 제약  
세그멘테이션을 통한 정량 분석  
전준협\*, 이근호, 이정훈, 김문조, 김동웅(한국생산기술연구원)

**모빌1-3 | 09:40** 초청강연

APT 기반 미세 석출물 3D 원자수준 정량분석과 강화 메커니즘 규명  
김세호\*, 이원형, 노이준, 조모현, 박규민(고려대학교)

**모빌1-4 | 10:00** 초청강연

소재 데이터 고속 생성을 위한 미니머쳐 인장 시험법  
정혜지, 신선호, 박윤지, 정다운, 성효경\*(국민대학교)

**Break Time | 10:20**

좌장 : 어광준(한국재료연구원)

**모빌2-1 | 10:30** 초청강연

Al-Si 고유동성 합금 설계 및 부식성 평가  
이병덕\*, 백의현, 이찬기(고등기술연구원)

**모빌2-2 | 10:50** 초청강연

경량고속 소재 열간성형 공정 데이터 확보 방안  
정영길\*, 김세훈, 신재혁, 김진평, 권교민, 김동규(한국자동차연구원)

**모빌2-3 | 11:10** 초청강연

고강도 알루미늄 합금의 기계적 특성 향상을 위한 열처리 기술  
조용희\*(한국재료연구원, 전남대학교), 이동윤, 황효진(한국재료연구원), 김세  
호(고려대학교), 이제인, 강남현(부산대학교), 김형욱, 어광준(한국재료연구원)

**모빌2-4 | 11:30** 초청강연

AI 기반 문헌 데이터 자동추출 및 후처리를 통한 소재 설계 프레임워크  
천재은, 박세진(국민대학교), 어광준, 조용희(한국재료연구원), 조기섭\*(국민대  
학교)

## 제3회 RIST-KICET 고도분석기술 심포지엄

위원장 : 허윤옥 (포항공과대학교)  
실무위원 : 강성((재)포항산업과학연구원)  
Room 4층 400, 4월30일

**Opening Remarks | 09:00**

박상혁(RIST)

좌장 : 이정훈((재)포항산업과학연구원)

**RK1-1 | 09:05** 초청강연

나노인덴테이션의 원리와 응용  
김주영\*(UNIST)

**RK1-2 | 09:25** 초청강연

Graphite oxidation in water ingress accidental conditions of high  
temperature gas-cooled reactors  
Yi Je Cho\*(Sunchon National University)

**RK1-3 | 09:45** 초청강연

Investigating the Water-Forming Catalytic Reaction with Gas-  
Phase Transmission Electron Microscopy  
Kunmo Koo\*(Pusan National University)

**RK1-4 | 10:05** 초청강연

첨단세라믹의 파손저항성 측정 방법: 파괴저항성과 파괴인성 비교  
손경식\*, 김동현\*(한국세라믹기술원)

**Break Time | 10:25**

좌장 : 김동현(한국세라믹기술원)

**RK2-1 | 10:40** 초청강연

수소 생산용 Ni-Cr-Al 다공체의 구조 및 기계적 특성  
강태훈(포항산업과학연구원, 인하대학교), 김규식(인하대학교), 박만호((주)에너  
리치), 윤중열(한국재료연구원), 공만식(고등기술연구원), 안지혜((주)에코프로),  
이기안\*(인하대학교)

**RK2-2 | 11:00** 초청강연

통계학적 방법을 통한 Nb-Mo based thin film의 공정변수-다중 특성  
연관성 분석  
이경훈, 김준태, 성창원\*(주식회사 코웰)

**RK2-3 | 11:20** 초청강연

Utilizing Graphene Nanoribbons to Identify Molecular States of  
Isomers through Electrical Interactions  
Shinyoung Choi\*(포항산업과학연구원)

**RK2-4 | 11:40** 초청강연

Enhancing Structural Stability and Mechanical Performance of  
Boron Carbide via Si/B Co-Doping for Amorphization Suppression  
이재화\*(한국세라믹기술원)

## 이차전지용 니켈 원료소재 심포지엄

위원장 : 박진균(RIST)  
실무위원 : 신동주(KIGAM)  
Room 4층 401, 4월30일

좌장 : 김종호(포항산업과학연구원)

### 니켈1-1 | 09:00 초청강연

순수 수소 분위기에서 사프로라이트 니켈 광석의 광물학적 특성 및 환원 거동

박태준\*, 한성수(한국지질자원연구원, 과학기술연합대학원대학교), 이원재, 정인철, 서주범, 노기민(한국지질자원연구원)

### 니켈1-2 | 09:15 초청강연

Top Submerged Lance Furnace pilot 설비 활용 Ni matte 제조  
서민석\*, 박진균, 김종호, 우광선, 김영우(포항산업과학연구원)

### 니켈1-3 | 09:30 초청강연

니켈 선철의 산화에 따른 미세조직 변화  
박광석\*, 서보성, 차은빈(한국생산기술연구원)

### 니켈1-4 | 09:45 초청강연

니켈 금속 분말의 철(III) 이온 함유 황산 용액 침출에 대한 실험 인자들의 영향 연구  
김민석\*, 이혜미, 이원재, 장윤재, 이수경, 이돈우, 정경우(한국지질자원연구원)

### Break Time | 10:00

좌장 : 서민석(포항산업과학연구원)

### 니켈2-1 | 10:10 초청강연

니켈매트 제조기술 동향 및 황화 원료소재 영향성 연구  
김종호\*, 서민석, 최준성, 박진균(포항산업과학연구원)

### 니켈2-2 | 10:25 초청강연

니켈 회수 용매추출 공정 후 여액 내 탈염기술 연구  
송준근, 이재령\*, 김승현, 친박하(강원대학교)

### 니켈2-3 | 10:40 초청강연

니켈 슬러지 내 크롬 선 회수를 위한 알칼리 로스팅 공정 최적화  
신재홍\*, 김명석, 페브리나와르타 부르한(한국생산기술연구원)

### 니켈2-4 | 10:55 초청강연

니켈슬러지로부터 황산니켈 회수 공정 연구  
이수현, 최인혁\*, 구본우, 이환수, 양지수(주에스쓰리알)

## 상변태

위원장 : 박은수 (서울대학교)  
총무간사 : 류옥하 (국립금오공과대학교),  
임가람 (한국재료연구원), 최현주 (국민대학교)  
Room 4층 402A, 4월30일

좌장 : 류옥하(국립금오공과대학교)

### 상변태1-1 | 08:30 초청강연

Self-Constructed Bi-continuous RHEA-Cu Composites via LMD process for Nuclear Reactors

Kooknoh Yoon(Seoul National University, UC Berkeley, Hanbat National University), Il hwan Kim, Ji Young Kim(Seoul National University), Peter Hosemann(UC Berkeley), Eun Soo Park\*(Seoul National University)

### 상변태1-2 | 08:55

탄소 첨가 CrMnFeCo 고엔트로피 합금의 형상기억 특성  
정희윤, 이제인\*(부산대학교)

### 상변태1-3 | 09:10

C 및 Ti 첨가가 CrMnFeCoNi 고엔트로피 합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향  
장성현, 박성현, 정재길\*(전북대학교)

### 상변태1-4 | 09:25

CoCrNi계 중엔트로피 합금에서의 전위 밀도 기반 다상 석출 거동 정량적 분석  
한상윤, 박은수\*(서울대학교), 류채우\*(홍익대학교)

### 상변태1-5 | 09:40

CoCrNi계 중엔트로피 합금의 석출물 크기와 부식 특성 간의 상관관계 분석  
강승연, 류채우\*(홍익대학교)

### Break Time | 9:55

좌장 : 김완(서울대학교)

### 상변태2-1 | 10:00 초청강연

Nano-Coring-Engineered Functionally Graded Ti-Based Shape Memory Alloy

Wook Ha Ryu(Kumoh National Institute of Technology), Eun Soo Park\*(Seoul National University)

### 상변태2-2 | 10:25

압연율과 열처리 조건 변화에 따른 Invar 합금의 미세조직 및 물성 거동  
장준호, 류채우\*(홍익대학교)

### 상변태2-3 | 10:40

냉각속도에 따른 Cu-15Fe 합금의 응고 거동 이해  
김정웅(포항공과대학교), 이재현(국립창원대학교), 김성준\*(포항공과대학교)

### 상변태2-4 | 10:55

DC 마그네트론 스퍼터링 기반 타겟 공정 변수에 따른 AlCrFeNi 고엔트로피 합금 코팅의 미세조직 및 기계적 물성 분석  
현명운, 이유진, 서진오, 정민섭, 강결찬, 박해진, 홍성환, 김기범\*(세종대학교)

#### 상변태2-5 | 11:10

Si 확산 코팅된 HfMoNbTaTi 고엔트로피 합금의 내산화성 고찰 및 속도론적 분석

김선진, 김성진, 최지성(국립한밭대학교), 박지니(고등기술연구원), 박준식\*(국립한밭대학교)

#### Break Time | 11:25

좌장 : 윤국노(한밭대학교)

#### 상변태3-1 | 11:30

핵생성동역학 연구 기반 급속가열을 통한 Fe-B 연자성 합금의 초미세 BCC-Fe 나노결정화

김완(서울대학교, University of Wisconsin-Madison), 박은수\*(서울대학교), John. H. Perepezko\*(University of Wisconsin-Madison)

#### 상변태3-2 | 11:45

Hidden Liquid-liquid phase separation in Pd-Au-Si MG

Minkyung Kwak(Seoul National University, ETH Zurich), Robin E. Schaeublin, Juerger E.K. Schawe(ETH Zurich), Eun Soo Park\*(Seoul National University), Joerg F. Loeffler\*(ETH Zurich)

#### 상변태3-3 | 12:00

Al-Si 공정계를 통한 비정질 실리콘 형성

문준혁, 박은수\*(서울대학교), 류재우\*(홍익대학교)

#### 상변태3-4 | 12:15

Grain Size Control of Quasicrystals in Ti-Ni-Zr alloy and Their Impact on Mechanical Properties

Thiri Shwe Sin, Geunhee Yoo, Wan Kim, Eun Soo Park\*(서울대학교)

### 고온재료

위원장 : 서성문 (한국재료연구원)

총무간사 : 김진우 (한국과학기술연구원),

윤대원 (한국재료연구원), 전종배 (동아대학교)

Room 4층 402B, 4월30일

좌장 : 정중은(한국재료연구원)

#### 고온1-1 | 09:00

A Unique Deformation Behavior of Novel Cost-Reduced and Crack-free High  $\gamma'$  Superalloy for AM

Kim Tae Gyeong, Lee A Reum, Hong Hyun Uk\*(Changwon National University), Lee Chan Hee(KAIST), Lee Byoung Soo(KITECH)

#### 고온1-2 | 09:15

열처리 조건에 따른 재결정 거동 변화가 L-PBF 공정으로 제조된 IN718 합금의 크리프 특성에 미치는 영향

심영래(한국재료연구원, 동아대학교), 도정현, 이상원, 최백규, 김인수(한국재료연구원), 전종배\*(동아대학교), 정중은\*(한국재료연구원)

#### 고온1-3 | 09:30

Mo 첨가에 따른 Ni기 초내열합금의  $\gamma'$  형상 변화 및  $\gamma/\gamma'$  격자 불일치 거동 고찰

김종훈, 백종민, 심예훈(국립창원대학교), 윤대원(한국재료연구원), 최윤석(부산대학교), 홍현욱\*(국립창원대학교)

#### 고온1-4 | 09:45

Positive misfit 기반 Reverse residual stress 유도 설계 전략: 고온 In-situ HRXRD 측정을 통한 Ni기 초내열합금의  $\gamma/\gamma'$  lattice misfit 거동 분석

이아를, 김태경(국립창원대학교), 김명세(아우라테크), 김정선, 김형섭(한국원자력연구원), 홍현욱\*(국립창원대학교)

#### 고온1-5 | 10:00

유연운전 환경에서 운전된 가스터빈 고온부품의 수명평가 및 열화 특성 분석

김영대, 송인환, 신동익, 정진성\*(한국전력공사)

#### 고온1-6 | 10:15

용융염 환경에서 순수 니켈의 결정학적 방향 의존적 부식 거동: 미량 철 불순물의 역할

이원찬, 김정환\*, 김대환(국립한밭대학교), 윤지현(한국원자력연구원)

#### 고온1-7 | 10:30

제조 공정 및 합금 원소에 따른 Ni계 합금의 고온 산화 거동에 미치는 영향

김대현, 심재혁, 백건우, 메리리카 르린, 이지운(국립공주대학교), 류호진(KAIST), 김형섭(포항공과대학교), 홍순직\*(국립공주대학교)

#### Break Time | 10:45

좌장 : 윤대원(한국재료연구원)

#### 고온2-1 | 10:55

물리 모델 기반 신경망(PINN)과 XGBoost 스택킹 앙상블을 이용한 니켈기 초합금의 하이브리드 크리프 거동 예측

공병욱\*, 전승목(주)에이스이앤지, 현철호(한화에어로스페이스), 안상규(주)에이스이앤지)

#### 고온2-2 | 11:10

Effect of carbon content on dynamic recrystallization of modified Nimonic 80A under creep deformation.

Shaik Mahammad Ali\*, Hyungsoo Lee, Dae Won Yun, Young-Soo Yoo, Seong-Moon Seo, Hi Won Jeong(Korea Institute of Materials Science)

#### 고온2-3 | 11:25

LPBF 및 Wrought 공정으로 제조된 Inconel 625 합금의 고온 허용응력 설계를 위한 크리프 응력 민감도 비교

석우영(한국재료연구원, 국립창원대학교), 이형수, 서성문(한국재료연구원), 홍현욱\*(국립창원대학교)

#### 고온2-4 | 11:40

Canceled

Remarkable improvement of high-temperature oxidation resistance in 25Cr-20Ni austenitic stainless steel by Cu precipitate formation  
Gunick Lee, Han Jun Yu(KIST), Seok Su Sohn(Korea Univ.), Jae-Hyeok Shim\*(KIST)

#### 고온2-5 | 11:55

Cr-Ni합금 적용 연소실 부품의 응축수 유도 응력부식 균열에 관한 재현 평가

김가연, 김성윤\*(현대차)

고온2-6 | 12:10

Canceled

변형 경로 분할 및 패스 간 대기시간에 따른 Inconel 718 2-pass 압축 미세조직 분석

여승현, 안지섭, 허수빈(한국생산기술연구원, 부산대학교), 이상곤, 정명식(한국생산기술연구원), 김종식(KPCM), 황선광\*(한국생산기술연구원)

고온2-7 | 12:25

시뮬레이션 기반 항공엔진용 PQ IN718 소재 수침 PAUT 결함 분해능 비교 분석

유일현, 이승우, 박익근, 강동찬\*(서울과학기술대학교)

# POSTER SESSIONS I 4월 28일



## P1 : 학생세션

Room 3층 로비, 4월 28일

### P1-1

Atomic-Scale Characterization of Elemental Distribution in Ru Catalyst for OER reaction

DooHyo Jeong, Se-Ho KIM\*(Korea Univ.)

### P1-2

Canceled

극저온 처리가 AA6061-T6에 미치는 기계적 물성 및 미세조직 변화  
전태민, 강현학, 전태성\*(인천대학교)

### P1-3

Al-7Si 합금에서 Mn 첨가에 따른 금속간화합물의 형태학적 변화가 주조 특성에 미치는 영향  
손동환, 한인성\*(경북대학교)

### P1-4

A356 합금에서 용체화 시간에 따른 기공률과 저주기 피로 특성과의 상관관계 분석

이연진, 윤영준, 정창열\*(동국대학교 WISE캠퍼스)

### P1-5

Cu 함량 및 초음파 처리에 따른 Fe 기반 연자성 합금 리본의 미세조직 및 자성특성

강태연, 한선구, 이연주, 최현주\*(국민대학교)

### P1-6

Micro-cone 형상 도금을 통한 HBM용 저온 Cu-Cu 확산 접합

김미림, 안성민, 김정환\*(국립한밭대학교)

### P1-7

인공지능 조성 설계를 통한 철계 연자성 합금의 보자력-포화자화 특성 최적화

한선구, 강태연, 이연주, 박세진, 조기섭, 최현주\*(국민대학교)

### P1-8

인공지능 기반 재료 압출식 프린팅-소결 공정 조건 최적화 시스템 개발

오예지, 이민정, 양재우, 김민중, 이선영\*(한양대학교 ERICA)

### P1-9

마신러닝을 활용한 열처리 공정 변수 제어 기반 CoCrFeMnNi 합금 인장 물성 예측 및 최적화

황예민, 이준석, 신필욱, 배재웅\*(부경대학교)

### P1-10

마신 러닝을 활용한 고강도 특수강(Armox®500T)의 기계적 물성, 미세조직 및 용접부 특성 간 상관관계 분석

전소희\*(국립한밭대학교)

### P1-11

WE43 마그네슘 기반 B<sub>4</sub>C 및 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 강화 금속기지복합재의 우주 방사선 차폐 성능에 대한 몬테카를로 시뮬레이션 연구

이태규, 정성훈, 이재훈, 이민서\*, 이민제(국립한밭대학교)

### P1-12

DED 기반 Nb-Si계 초고내열 합금의 합금 원소 첨가에 따른 미세조직 및 산화·기계적 특성 평가

이태규\*, 정성훈, 이재훈, 이민제(국립한밭대학교)

### P1-13

ZrC 첨가에 따른 DED 기반 니켈계 초합금의 균열 저감 연구

이태규\*, 이민제, 정성훈, 이재훈(국립한밭대학교)

### P1-14

디퓨전저플을 활용한 Fe-XNi 마르텐사이트강의 하이스루트 데이터 추출

주성환, 장하량, 이태경, 김지훈\*(부산대학교)

### P1-15

전기저항용접된 파이프라인강의 In-situ 내수소취성 분석

원태호, 이승준\*(한국공학대학교)

### P1-16

Nano-speckle  $\mu$ -DIC을 이용한 2상 조직 재료의 국부 변형 거동 분석

박홍빈, 김태형(부경대학교), 조원희, 양성현, 설재복\*(국민대학교), 배재웅\*(부경대학교)

### P1-17

Cu 및 Ni 첨가에 따른 Al-Sn 합금의 수지상 파편화 및 CET 메커니즘에 대한 in situ X선 관찰

윤영아\*, 한인성\*(경북대학교)

### P1-18

석출강화형 중엔트로피 합금의 Mo함량 변화에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화

임지혜, 이준석, 소영섭, 배재웅\*(부경대학교)

### P1-19

잠호아크용접 공정을 적용한 API X60강의 마모 거동

강민서, 김승겸, 한지혜, 이승준\*(한국공학대학교)

### P1-20

원전 배관용 저탄소강의 용접 열영향부 후열처리에 의한 부식거동 비교

김대환, 이원찬, 김정환\*(국립한밭대학교), 문성인(한국원자력연구원)

### P1-21

Mn/Sr 첨가에 따른 결정립계 석출 거동과 전기적 특성 향상 및 구조-특성 상관관계 분석

차명준, 강태경, 오세민(국립부경대학교), 손지희, 김봉서(한국전기연구원), 홍두선(서울시립대학교), 박이호(한국재료연구원), 정찬원\*(국립부경대학교)

## P1-22

유한요소해석을 이용한 탄소성 파괴인성 시험 재현 및 예측  
하재민, 신선호(국민대학교), 박상은(두산에너지빌리티), 성효경\*(국민대학교)

## P1-23

초 단위 응답 특성을 갖는 솔젤법 기반 WO<sub>3</sub> 투명 세그먼트형 전기변색  
헤드업 디스플레이의 개발  
강정환, 편규민, 최아란, 김지선, 김민석, 이선영\*(한양대학교)

## P2 : 에너지재료

Room 3층 로비, 4월 28일

## P2-1

펠릿형 알루미늄 공기 전지의 지지체로서의 특성 평가  
호종웅, 손경호, 김정규\*(성균관대학교)

## P2-2

무봉산 i-SMR 수산화 환경에서 pH 및 pH 조절제가 Alloy 690의 균일  
부식 거동에 미치는 영향  
김도연(한국원자력연구원, 고려대학교), 심희상(한국원자력연구원), 손석수(고려  
대학교), 전순혁\*(한국원자력연구원)

## P2-3

휴관 원전 습분분리재열기 배수탱크 인출시료 및 감시시편을 이용한 재  
료 건전성 평가  
김도연(한국원자력연구원, 고려대학교), 하성준(한국원자력연구원), 권혁철(한국  
수력원자력), 손석수(고려대학교), 전순혁\*(한국원자력연구원)

## P2-4

Impact of Na<sub>3.3</sub>Zr<sub>1.7</sub>La<sub>0.3</sub>Si<sub>2</sub>PO<sub>12</sub> Filler Morphology on Ion Transport  
and Electrochemical Performance of Composite Solid Electrolytes  
for Sodium Batteries  
Jeong-Min Kim, Chan-Jin Park\*(전남대학교)

## P2-5

Accelerating Sodium-Ion Transport in Na<sub>3</sub>Zr<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>PO<sub>12</sub> Solid  
Electrolytes via Compositional Tuning and Grain-Boundary Phase  
Modification for Solid-State Sodium Metal Batteries  
Hyun Su Kim, Chan Jin Park\*(전남대학교)

## P2-6

Facilitating Lithium-Ion Transport via mPEG-Grafted LLZO  
Composite Solid Polymer Electrolytes for Enhanced All-Solid-  
State Lithium-Oxygen Battery Performance  
Jun-Hyeong Seo, Chan-Jin Park\*(Chonnam National Univ.)

## P2-7

Nanostructured ZnP<sub>2</sub>/Carbon Composite Anode for High-Rate  
Sodium-Ion Batteries Synthesized via Mechanochemistry  
Pyochan Kim, Chanjin Park\*(Chonnam National University)

## P2-8

Li-Mg/Mg-Li bilayer foil as an integrated anode and current  
collector for Li-metal batteries with extended cycle Life  
정준오, 정희태, 김우진\*(홍익대학교)

## P2-9

Fine-grained Li-Sn composite foil anodes for high-rate Li-metal  
batteries  
김준영, 정희태, 김우진\*(홍익대학교)

## P2-10

Accelerated Formation of Corrosion Oxide Layers on Stainless  
Steels Using Na-EDTA  
Sang-Hun Lee, Wang-Kyu Choi, Seonbyeong Kim, Byung-Seon Choi,  
Seung Joo Lim\*(Korea Atomic Energy Research Institute)

## P2-11

Effect of Powder Filling Conditions on Fuel Meat Homogeneity of  
Plate-Type Nuclear Fuel  
Kyeongmin Park\*, Hwayoung Song, Myeonglip Heo, Dongjun Park,  
Yongjin Jeong(Korea Atomic Energy Research Institute)

## P2-12

방사선 및 방호 응용을 위한 금속 및 카바이드 기반 기능성 재료의 기계  
적 물성 및 차폐·방탄 성능 평가  
손영호, 김범규\*, 송근동, 조재선((주)미래와도전)

## P2-13

용융 염화물 환경에서 SS316H에 레이저 클래딩 된 Alloy 625의 부식  
및 기계적 거동  
홍민성\*, 이승보, 황성식, 구경희 (한국원자력연구원)

## P2-14

국산 개발 수소 연소기의 고온 노출에 따른 수소 영향 검토 연구  
이화영\*, 이원빈, 문혜리, 오정석(한국가스안전공사)

## P2-15

A Case Study on a Methodology for Analyzing the Composition  
and Identifying Unknown Radioactive Materials Using a Shielded  
EPMA  
Gahyun Choi\*, Yang Hong Jung(Korea atomic energy research institute)

## P2-16

Canceled

Ultra-Low Pt-Loaded Pt-Ce-Ni Catalyst for High-Performance  
and Economical AEM Water Electrolyzers and PVEC Devices  
Bee Ivong Yang\*, Ahmad Shahbaz, Sk Samim Akhter, Mallappa  
Mahanthapa(Kumoh National Institute of Technology, GHS Co., Ltd), Soon  
Yong Kweon(GHS Co., Ltd, Korea transportation University)

## P2-17

가축 대기부식 조건에서 형성된 SA106 Gr.B 탄소강 부식생성물의 미  
세구조 분석  
임상열, 하성준, 전순혁\*(한국원자력연구원)

## P2-18

TEM-EELS Plasmon을 활용한 CRUD 부착 지르코늄 피복관 산화막  
및 수소화물에 대한 미세구조 분석  
임상열\*, 서민교, 심희상, 허도행, 전순혁(한국원자력연구원)

## P2-19

크러드 열전달 모델링 기반 핵연료 피복관 열적 건전성 평가 연구  
하성준\*, 전순혁, 임상열, 허도행, 심희상(한국원자력연구원), 김도연(한국원자  
력연구원, 고려대학교), 안동현(한국원자력연구원)



## P2-20

Size-Dependent Antimicrobial Properties of Copper Sulfide Nanoparticles via Integrated Photothermal and Photodynamic Synergy

Hee Yeon Jeon, Jeong Hyun Kim(Seoul National University of Science and Technology)

## P2-21

열화상 카메라를 이용한 믹싱 공정 실시간 혼합 거동 평가

이주영, 최연지, 이준호\*(고려대학교)

## P2-22

차세대 금속연료 제조방법론에 대한 비교 분석 연구

안정수\*, 박상규, 김준환(한국원자력연구원)

## P2-23

Canceled

LiOH 및 KOH 제어 PWR 1차냉각수에서 304 스테인리스강 일반부식 평가 및 속도론 모델링

하성준, 김희원, 홍민성, 전순혁, 심희상\*(한국원자력연구원)

## P2-24

Canceled

Cobalt-Driven Structural Modulation of CrOx Electrocatalysts toward Advanced AEM Water Splitting

Bee lyong Yang\*, Akhter Sk Samim, Mallappa Mahanthapa, Ahmad Shahbaz(Kumoh National Institute of Technology,GHS Co, Ltd),Soon Yong Kweon(GHS Co, Ltd,Korea Transportation University)

# P3 : 고엔트로피합금

Room 3층 로비, 4월 28일

## P3-1

냉각 속도 제어에 따른 철계 L12 석출강화 합금의 연속 석출물 형성과 기계적 물성

문광현, 김진경\*(한양대학교)

## P3-2

고항복강도를 갖는 NiCr(Co, Al) 중엔트로피 합금의 수소취성 거동

정희윤, 윤성민, 이제인\*(부산대학교)

## P3-3

고엔트로피 합금 설계를 통한 사용 합금의 고온 특성 강화

정주리, 김종태, 석진우, 이미혜, 한슬기, 한준희, 강이승\*(한국생산기술연구원)

## P3-4

Loading conditions and geometric constraint effects on the mechanical behavior of Complex Concentrated Alloys

예정원, 민현기, 김동환, 이명규, 박은수\*(서울대학교)

## P3-5

Al-Cr-Fe-Ni-Ti 철계 고엔트로피 합금의 석출상의 구조가 아결정립 형성 및 초소성 거동에 미치는 영향

박상민, 최순원, 박강현(공주대학교),임가람(한국재료연구원),송기안\*(공주대학교)

## P3-6

고변형률 속도 조건에서 내화 고엔트로피 합금의 파괴 거동 및 에너지 방출 특성

노시연, 김재권, 박은수\*(서울대학교)

## P3-7

Homogeneous Cantor Nanoparticles Synthesis via Ultrasonic Spray Pyrolysis and Consolidation Maintaining Particle Size by Spark Plasma Sintering

Seo Sa Rang Kim, Young-In Lee\*, Jeong Hyun Kim, Hee Yeon Jeon, Kyung Shik Yoon, Hyeon Seong Kim, Jae min Park(Seoul National University of Science and Technology)

## P3-8

Shape Memory Effect in CoCrNi System.

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

## P3-9

고엔트로피 효과 극대화를 통한 Cu-Si계 고엔트로피 합금의 단순 고용체 형성 및 전기화학적 이산화탄소 환원 촉매가능성 연구

이유진, 이용건, 안병민\*(아주대학교)

## P3-10

हे테로구조와 불연속 나노석출물을 통한 CrCoNi 기반 중엔트로피 합금의 우수한 초저온 기계적 물성 연구

이하훈(고려대학교),Wei Zhang(Central South University),성민영, 남승진, 정두효(고려대학교),백주현(고려대학교,한국과학기술연구원),서진유(한국과학기술연구원),장태진, 이준호, 김영균, 나영상(한국재료연구원),김세호(고려대학교),Zhiming Li(Central South University),손석수\*(고려대학교)

## P3-11

탄소 첨가 L12 석출강화 철계 다성분계 합금의 미세조직 및 기계적 물성

윤주희, 김진경\*(한양대학교)

## P3-12

Design and Theoretical Characterization of a Dual-Alloy System Comprising Fe-based MEA Container and Cu-based HEA Filler via Upcycling Nuclear Decommissioning Waste

dongjun Shin\*, hwanseo park(Korea Atomic Energy Research Institute )

## P3-13

CALPHAD-Guided Design of Eutectic High-Entropy Alloys: Microstructural Evolution and Mechanical Properties

VIKAS SHIVAM\*, Eun Soo Park(Seoul National University, Republic of Korea)

## P3-14

B 첨가에 따른 석출강화형 철계 고엔트로피 합금의 크리프 특성 변화

최순원, 박상민, 박강현(공주대학교),권현준, 심상훈, 임가람(한국재료연구원),송기안(공주대학교)

## P3-15

UNSM 처리가 Co-Cr-Fe-Ni-Mo 고엔트로피 합금의 초극저온 미세조직 진화 및 기계적 거동에 미치는 영향

임현빈(국립공주대학교),이재홍, 하수빈(포항공과대학교),김영균, 나영상(한국재료연구원),김형섭(포항공과대학교),문종언\*(국립공주대학교)

## P4 : 디스플레이재료

Room 3층 로비, 4월 28일

### P4-1

Data-Driven Analysis of Chain Degradation Reaction in Organic Light-Emitting Diodes through Numerical Modeling

GONI HAN, JAE-MIN KIM\*(Chung-Ang University)

### P4-2

Quantum Dot Multispectral Photodetectors through Optical Cavity Engineering

Seung Won Shin, Ji Hyeon Woo, Seong-Yong Cho\*(Hanyang Univ.)

### P4-3

Monolithic Fabrication of Hierarchical Transmissive Color Routers toward Next-Generation Image Sensors with High-Refractive-Index Inorganic Materials

Sehyeon Park, Samuel Kim, Myungjae Lee\*(Seoul National University)

### P4-4

Cation exchanges in Ag-(In,Ga)-S nanocrystals for color-pure and stable photon emission

Jong Ah Chae, Seongbin Im, Sejong Min, Jaeseung Lee, Dongju Jung, Wan Ki Bae\*(Sungkyunkwan University)

### P4-5

Pure-Blue Colloidal Europium Halide Nanocrystals through Coordination Tailoring

Jaeyeong Ha, Seongkyu Maeng, Jaewon Kim, Jaejun Lee, Young-Hoon Cho, Himchan Cho\*(KAIST)

### P4-6

A TiO<sub>2</sub> Photonic Crystal Cavity Platform with Tunable Optical Chirality Density for Polarization-Selective Nanophotonic Interactions

Eunsun Kim, Myungjae Lee\*(서울대학교)

### P4-7

3D Silica Nanostructures Fabricated by Two-Photon Polymerization for Polarization Control in Next-Generation Displays

Eunyoung Ahn, Youngjun Chung, Myungjae Lee\*(Seoul National Univ.)

### P4-8

Capacitance Path Finder: Design Space Mapping for Capacitance Reduction in Organic Light-Emitting Diodes Using Large Scale Drift Diffusion Impedance Simulations

NaHee Kim, Jae-Min Kim\*(Chung-Ang Univ.)

### P4-9

Predicting Exciton Utilization Efficiency via Kinetic Modeling in Phosphor-Sensitized Fluorescent Organic Light-Emitting Diodes

Jae-Min KIM\*, KYOUNG HWAN KIM(Chung-Ang Univ.)

### P4-10

내재적 신축성 소재 기반 탠덤 OLED 구현: 은(Ag) 삽입층을 통한 전자 생성 효율 최적화

전건후, 김태훈, 박진우\*(연세대학교)

### P4-11

Elucidating the Impact of Metal Halide Treatment on InP Quantum Dots

BOKYEONG SOHN, HIMCHAN CHO\*(KAIST)

### P4-12

Interdielectric Layer Engineering for Reliable Monolithic Integration of ITZO TFT Backplanes and InP QLEDs

반현승, 정의석, 김재균\*, 조성용\*(한양대학교)

### P4-13

Solution-Sheared Micrometer-Thick Pure Perovskite Nanocrystal Films Enabling High-Efficiency Color Conversion Layer

Jun-Seo Lee, Himchan Cho\*(KAIST)

### P4-14

Kinetically Controlled Direct in situ Photolithography of Perovskite Color Conversion Layers

Mingyu Hwang, Himchan Cho\*(Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))

## P5 : 마그네슘

Room 3층 로비, 4월 28일

### P5-1

Mg-Li계 합금 판재의  $\beta$ -Li 상 분율이 집합조직과 기계적 특성에 미치는 영향

이준호(한국재료연구원, 고려대학교), 서병찬(한국재료연구원), 손석수\*(고려대학교), 김영민\*(한국재료연구원)

### P5-2

이중 구조 입자를 형성하는 고내식성 마그네슘 합금

김정기, 민두원, 박성수\*(울산과학기술원)

### P5-3

Influence of Bismuth (Bi) Addition on Phase Fraction Control and Mechanical Properties of Dual-phase Mg-8Li Extruded Alloys

BYEONGKWON LEE, EunChan Ko(Korea Institute of Industrial Technology, Chonnam National University), YongHo Kim, HyoSang Yoo, HyeonTaek Son\*(Korea Institute of Industrial Technology), TaeHoon Kim(Chonnam National University)

### P5-4

마찰교반가공 중 열-기계적 거동 해석을 기반으로 한 LZ91 Mg 합금의 표면 강화 및 경도 분포 특성 연구

고경민, 서위결, 유태현, 최시훈\*(국립순천대학교)

### P5-5

초기 집합조직이 Mg-3wt%Ag 합금의 고온 변형 시 집합조직 형성에 미치는 영향

박정빈, 윤지민, 최상구, 김권후\*(국립부경대학교)

### P5-6

고온 평면변형 압축 시 마그네슘 합금의 집합조직 발달에 미치는 Pb 첨가의 영향

장성모, 염진석, 김권후\*(국립부경대학교)

#### P5-7

평면 변형 압축 중 Mg-Ag 합금의 집합조직 발달 거동의 Ag 첨가가 미치는 영향

최상근, 윤지민, 박정빈, 김권후\*(국립부경대학교)

#### P5-8

마그네슘 전해제련 공정에서  $\text{LiF}-\text{MgF}_2$ 계 전해질과 산화물 도가니 소재 간 반응 거동 연구

김가민, 이세영, 박선영, 김완규\*((주)케이에스엠테크놀로지)

#### P5-9

초경량 Mg-Li 합금의 열처리에 따른 상 변화를 통한 미세조직 및 기계적 특성 연구

김용호\*, 유효상, 이병권, 고은찬, 손현택(한국생산기술연구원)

#### P5-10

페네트레이션로부터 제조한 MgO를 사용하여 용융염 전해제련 공정으로 1 kg · Mg/batch CuMg 합금 제조

이병건, Ri Vladislav, 우화영, 구광모, 김현우\*((주)케이에스엠테크놀로지)

#### P5-11

합금원소 및 열처리에 따른 Mg 합금의 비강도-열전도도 특성 변화와 상관관계 연구

오태웅, 김재연\*, 임창동\*(한국재료연구원 경량재료연구본부)

## P6 : 알루미늄

Room 3층 로비, 4월 28일

#### P6-1

6XXX계 알루미늄 압출재의 미세조직에 미치는 Fe 함량의 영향

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

#### P6-2

Al-0.6%Mg-0.6%Si 합금에서 예비시효가 나노클러스터 형성과 이단 시효 거동에 미치는 영향

송태현(한국생산기술연구원, 전북대학교), 박지욱, 이미영(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교), 조상현(한국생산기술연구원), 류대성(한국생산기술연구원, 경북대학교), 이창민(한국생산기술연구원, 전북대학교), 김재황\*(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교, 한국과학기술연구원)

#### P6-3

지속가능한 알루미늄-공기 전지 음극에 적용할 전기차 부품의 업사이클링

이원도, 박은하, 박준엽, 김정구\*(성균관대학교)

#### P6-4

Mn 첨가 및 냉각 속도가 비열처리형 Al-7Si-Mg 주조용 합금의 미세조직 및 전기전도도에 미치는 영향

강주원(한국재료연구원, 한양대학교), 강청아(한국재료연구원), 이윤호(한국재료연구원, 한양대학교), 장재일\*(한양대학교), 조영희\*(한국재료연구원)

#### P6-5

알루미늄 클래드재의 브레이징 조건 및 회토류 첨가에 따른 미세조직 변화 연구

고은찬\*, 이병권(전남대학교, 한국생산기술연구원), 유효상, 김용호, 손현택\*(한국생산기술연구원), 김태훈(전남대학교)

#### P6-6

Si, Cu 함량 변화에 따른 Al-Si-Cu계 알루미늄 합금의 유동성 및 기계적 특성 평가

방현식, 최승규, 김진평\*(한국자동차연구원)

#### P6-7

Zn 함량 제어에 따른 Al-Zn-Mg-Cu 계 합금의 고온 거동 분석

임재필, 민병현, 박현순\*(인하대학교)

#### P6-8

다이캐스팅용 알루미늄 합금계의 후속 열처리 제어를 위한 L1<sub>2</sub> 결정구조상 형성 유발 미량합금원소 첨가의 영향

김용윤\*, 이락규, 윤국태((재)대구기계부품연구원), 이수안((주)유림테크)

#### P6-9

Mn 최소화 및 고온 열처리를 통한 EOL 스크랩 기반 6000계 합금의 물성 향상

손은지, 손현우\*(한국재료연구원)

#### P6-10

용체화 처리 후 지연·칭시킨 Al-7Si-0.4Mg 합금에서 예비시효가 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향

박보현(한국재료연구원, 아주대학교), 조영희, 손현우, 이정무\*(한국재료연구원)

#### P6-11

Mg 첨가량 변화에 따른 고강도 Al-Li계 합금의 미세조직 및 기계적 특성 평가

유효상\*, 김용호, 김철우, 이병권, 고은찬, 손현택(한국생산기술연구원)

#### P6-12

7xxx계 Al합금의 데이터 연구를 위한 석출물 고속분석방법 연구

이우영, 전서연, 이경환, 최현주\*(국민대학교)

## P7 : 철강A-제선,제강,환경,에너지

Room 3층 로비, 4월 28일

#### P7-1

$\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$  분위기에서의 코크스 가스화 거동 : 온도, 가스 조성 및 코크스 강도의 영향

정현주, 정성모\*(포항공과대학교)

#### P7-2

유동로 수소환원으로 제조한 환원철 성형체의 열전도도 특성 분석

하윤철, 김리주, 서인국, 이준호\*(고려대학교)

#### P7-3

바이오매스 환원제 활용 스테인리스강 더스트의 Ni 및 Cr 환원 거동

박종형, 김선중\*(조선대학교)

## P7-4

부산물 재활용 Flux가 탈황에 미치는 영향 및 반응기구 제시  
차은환, 김기원, 정용석\*(한국공학대학교)

## P7-5

산소분압 및 조성에 따른 액상 구리 합금의 표면장력 평가  
조민서, 이준호\*(고려대학교)

## P7-6

개방형 재순환 냉각 시스템에서의 노즐 막힘 유발 이물질 형성 메커니즘 규명  
조하영, 김용원(성균관대학교), 김우철(한국지역난방공사), 김정구\*(성균관대학교)

## P7-7

Ni-Ca/Ni-Mg계 탈황제를 이용한 용융 FeNi의 탈황 거동 및 극저 탈황제에 관한 연구  
김두연, 금창훈, 전상혁, 강영조\*(동아대학교)

## P7-8

복합산화방지제 첨가에 따른 MgO-C 내화물의 압축강도 특성 평가  
이지현, 박찬근, 정용석\*(한국공학대학교)

## P7-9

산업부산물 기반 복합 산화물 Flux의 조성 설계 및 철강 정련 특성 평가  
김인아, 정은진\*(포항산업과학연구원)

## P7-10

전기용융로의 아크 거동 예측 가속화를 위한 차수 축소 모델 개발  
김재식, 심승현, 서승원, 양현진\*(인하대학교)

## P7-11

FePO<sub>4</sub> 탄소환원에 의한 수소발생 음극재용 Fe<sub>3</sub>P 회수 가능성 평가  
명재욱, 김선중\*(조선대학교)

## P7-12

전기화학 실험과 수치해석 모델링 병행을 통한 매설 열수송관 용접부 갈바닉 부식 속도 평가  
임정민, 김용원, 김정구\*(성균관대학교)

## P8 : 비철금속

Room 3층 로비, 4월 28일

## P8-1

An Experimental Investigation of Oxygen Dissolution and Interfacial Reactivity between Molten Nickel Alloy and Refractories under Reduced Pressure for Developing Aerospace Nickel-Based Superalloy Refining Process  
seung ho Lee, Hyun-Jae Kim, Youn-Bae Kang\*(포항공과대학교), Yoon Seok Ko(국방과학연구소)

## P8-2

통전처리에 따른 Cu-6Ni-1.26Si 합금의 석출 거동 가속화  
김가은, 정이화(경상국립대학교), 김규낙(경상국립대학교, 한국재료연구원), 최동인(서울대학교), 안지현(한국재료연구원), 한홍남(서울대학교), 강성규\*(경상국립대학교)

## P8-3

NCM계 Black Mass의 CO<sub>2</sub>에 의한 탄산화 배소 거동  
소지영, 손호상\*(경북대학교)

## P8-4

Ni-Cr 함유 스크랩 재활용 부산물 내 니켈 화합물로부터 건식 환원공정을 활용한 금속 니켈 회수 공정 연구  
김호병, 소윤지, 최상훈\*(고등기술연구원)

## P8-5

Effect of Bi Content Control on Zn Flake Refinement and Elongation Improvement in Sn-Bi-Zn Low-temperature Solders  
Eunho Ma, Chanyang Lee, Minchul Oh, Geonhong Kim\*(Institute for Advanced Engineering)

## P8-6

팔라듐 합금 스크랩 재활용을 위한 전처리 공정 개발  
소윤지, 이지은, 김호병, 최상훈\*(고등기술연구원)

## P8-7

분할형 구조 사형 몰드를 이용한 알루미늄 청동 프로펠러의 주조결함 제어에 관한 연구  
김영찬\*, 최세원, 김철우, 강창석(한국생산기술연구원)

## P8-8

Al-Mg-Si 합금에서 실리콘 함량 및 열처리가 석출 거동과 열전도도에 미치는 영향  
최세원\*, 김영찬, 김철우(한국생산기술연구원)

## P8-9

대기 및 진공 주조 공정으로 제조된 Cu-Ti 합금의 시효 열처리에 따른 기계적 특성과 전기전도도  
최광수, 양현석, 정항철, 공만식\*(고등기술연구원)

## P8-10

Evaluation of Microstructural Evolution in Friction Stir Welded Thick Oxygen-Free Copper for the Korean Reference Disposal System  
Jae-Deuk Kim\*, Young-Ho Lee, To Kang, Jeong-Mok Oh, Jin-Seop Kim(Korea Atomic Energy Research Institute)

## P8-11

연속 진공중류 공정을 이용한 고순도 마그네슘 잉곳 회수 기술 개발  
소윤지, 김호병, 최상훈\*(고등기술연구원)

## P9 : 철강B-압연, 강종개발, 후처리

Room 3층 로비, 4월 28일

## P9-1

초고강도강에서의 트램프 원소 입계편석이 수소취성 거동에 미치는 영향  
이정민(한국재료연구원, 동아대학교), 이진중, 박형권(한국재료연구원), 정승필(현대제철), 전종배\*(동아대학교), 유지성\*(한국재료연구원)

## P9-2

보론강의 기계적 특성에 미치는 Ti 함량 및 템퍼링 처리의 영향  
황예나, 정민섭, 황병철\*(서울과학기술대학교)

### P9-3

Fe-Mn-C 고망간강의 잔존 주조조직이 어닐링 후 불균일 미세조직 형성 및 기계적 특성에 미치는 영향  
문태영, 문광현, 김진경\*(한양대학교)

### P9-4

빅데이터 기반 고성능 내화강 설계 및 고온 기계적 물성 메커니즘 규명  
이영주, Salmi Salsabila Syifa, Zargarani Alireza(포항공과대학교), 김지훈\*(부산대학교), 김경덕\*(포항공과대학교)

### P9-5

바나듐 첨가 열간압연 고망간강의 열처리 온도에 따른 미세조직 및 기계적 물성 변화  
양승우, 송호정(동아대학교), 박시욱, 김용진(국방과학연구소), 박건우(울산과학기술원), 소태일(포스코), 장재훈, 전종배\*(동아대학교)

### P9-6

고망간강 주조재와 단조재의 인장 중 파괴 거동 및 국부 변형 특성 분석  
박주현, 이승희, 강신곤\*(동아대학교)

### P9-7

316L 스테인리스강 환봉의 위치별 물성 편차 저감을 위한 Two-Step 열처리 공정 최적화  
이승현, 서호성, 김가연, 심예훈, 권인영, 문준오\*, 홍현욱(국립창원대학교), 강덕수(세아창원특수강)

### P9-8

Batch annealing 공정이 3Mn Q&P강의 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향  
김규현, 임용수, 김진경\*(한양대학교)

### P9-9

3Mn TRIP steel의 냉간 압연 이전 batch annealing이 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향  
임용수, 김진경\*(한양대학교)

### P9-10

초고경도 마르텐사이트 강의 냉각 조건에 따른 미세조직 및 충격인성 변화  
박건우(울산과학기술원), 김용우, 장우길, 고성웅(포스코 기술연구원), 박성수\*(울산과학기술원), 전종배\*(동아대학교)

### P9-11

Influence of Titanium Content on Recrystallization and Precipitation Behavior in Ti-Nb Alloyed Cold-Rolled Ultra-High Strength Low Alloy Steels  
Sang Hun Shin, Jong Myeong Kim, Changgeun Lee(Hyundai Steel R&D Center), Asmaa Albeltagy, Alexander Gramlich(Steel Institute, RWTH Aachen University), Kyu Tae Kim(Hyundai Steel R&D Center)

## P10 : 이차전지 원료소재

Room 3층 로비, 4월 28일

### P10-1

건식 재활용 공정 슬래그의 보조 시멘트계 결합재(Supplementary Cementitious Materials)로서의 2차 자원화 가능성 평가  
남세현, 박성환(한양대학교), Anton Andersson(Lulea University of Technology), 박주현\*(한양대학교)

### P10-2

니켈 선철(NPI) 분말의 산화 거동에 미치는 Si 영향  
차은빈(한국생산기술연구원, 고려대학교), 서보성(한국생산기술연구원), 김동희(고려대학교), 박광석\*(한국생산기술연구원)

### P10-3

EoL LIB 황산 침출액 중 유기금속의 전해 회수 및 증착 거동 연구  
하륜, 신한균, 강영조\*(동아대학교), 류지훈(에바사이클)

### P10-4

스프레이로부터 친환경 리튬 침출에 관한 연구  
이종락, 신선명, 신동주\*(한국지질자원연구원, 과학기술연합대학원대학교)

### P10-5

공간분해능 증상자 회절법을 이용한 원통형 2차전지 LiC6/LiC12 공간 분포 정량화 기술 개발  
채호병\*, 우완축(한국원자력연구원)

### P10-6

건식 및 습식 혼합공정을 통한 리튬의 선택적 회수  
박연우\*, 정은진(포항산업과학연구원), 조용민, 한상우, 김완이(포스코홀딩스)

### P10-7

Supercritical CO<sub>2</sub>-Assisted PVDF Binder Extraction and Cathode Delamination for Sustainable Lithium-Ion Battery Recycling  
won-wook SEO\*(RIST), Joon-Hyuk Yim(Sogang Univ), Jae won Lee(Dankook Univ), Jong sung Lim(Sogang Univ)

### P10-8

리튬이온 배터리를 케이스용 스테인리스 적용 연구  
정양진\*(포스코 기술연구원)

### P10-9

조건별 농도비에 따른 회수 수산화니켈 전구체로부터의 니켈화합물 분말 제조 거동 연구  
주소영, 임병용, 김대근\*(고등기술연구원)

### P10-10

탄소 중립을 위한 사프로라이트 제련 공정의 수소환원 연구  
김민희\*, 이병필, 서민석, 우강주(포항산업과학연구원)

### P10-11

Flotation-Inspired Black Powder Purification and Selective Recovery of Cathode Active Material  
Cheol Kang, Min-ho Kim, Hyun-seok Lee\*(Korea Battery Industry Association)

## P11 : 반도체

Room 3층 로비, 4월 28일

### P11-1

ZrO<sub>2</sub> - based antiferroelectric tunnel junction neuron for energy-efficient physical reservoir computing

Taegyu Kwon, Moonseek Jeong, Joonyong Kim, Hyojun Choi, Hyeong Seok Choi, Geun Hyeong Park, Min Hyuk Park\*(Seoul National Univ.)

### P11-2

Field-Induced Crystallization of Amorphous Hf<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.5</sub>O<sub>2</sub> Thin Films Incorporating a MoO<sub>3</sub> Interlayer

Moonseek Jeong, Hyun Woo Jeong, Taegyu Kwon, Jaewook Lee, Min Hyuk Park\*(Seoul National Univ.)

### P11-3

TGV 적용을 위한 대기 중 산화 없는 Cu-Cu 다이렉트 본딩의 압력에 따른 미세구조 및 기계적 특성 평가

안가람, 유하영, 김동진\*(한국생산기술연구원)

### P11-4

열처리 온도에 따른 Cu-SiO<sub>2</sub> Wafer-to-Wafer Hybrid Bonding 계면 미세구조 분석

문수현, 차호일\*(나노종합기술원), 김중훈(충남대학교), 박경진, 박윤창, 정태성, 하승연, 김희연(나노종합기술원)

### P11-5

XRD Rocking curve 및 TEM 분석을 통한 Epitaxial 박막 구조 정밀 평가

오윤주, 권다미(나노종합기술원), 천은아(아이브이웍스), 김영현(충남대학교), 김경태, 유정호, 김태건, 서윤경, 박윤창\*(나노종합기술원)

### P11-6

고전력 파워 모듈용 다이아태치 구리 소결 접합부의 고온 안정성

추성권(한국생산기술연구원), 김병찬(한국생산기술연구원, 고려대학교), 김동진\*(한국생산기술연구원)

### P11-7

Catalytically Engineered Silicon Nanomembranes for High-Performance Flexible NO<sub>2</sub> Sensing

Choi yoonhyeong, jongwoon Shin, Doohyun Lee, Kijun Yu, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

### P11-8

Leakage Current Reduction via Trap Level Modulation in ZrO<sub>2</sub>

Gyumin Hwang, Dohyun Lee, Jisu Park(Hanyang University), Hansol Oh, Yongjoo Park(SK trichem.), Changhwan Choi\*(Hanyang University)

### P11-9

Ag hillock 형성에 대한 기판 사이즈 의존성과 barrier 층의 역할

김민수(한국생산기술연구원), 김예리(한국생산기술연구원, 고려대학교), 김동진\*(한국생산기술연구원)

## P12 : 소프트소재

Room 3층 로비, 4월 28일

### P12-1

Mechanically Induced Nanogap Engineering in Transparent Ag/PDMS Films for Backside-Excited SERS Platforms

Seung Hyun Lee(Yonsei University), Min Ki Kim(Korea University), Joon Ho Lee, Yeon Hong Kim(Yonsei University), Jun Seong Ahn\*(Korea University), Woo Young Lee\*(Yonsei University)

### P12-2

Magnetic Stimuli Responsive Soft Robotic Display System Enabled by Quantum Dot Light Emitting Diode

Jioh Yoo, Minji Kwon, Suhan Kim, Jonggun Jung, Kyumin Huh, Shengyou Li, Cheolmin Park\*(Yonsei University)

### P12-3

Liquid metal-enabled energy generators for self-powered soft bioelectronics

Shengyou Li, Cheolmin Park\*(Yonsei Univ.)

### P12-4

Block Copolymer-Mediated Liquid Metal Dispersions in Elastomeric Matrices for Resilient Joule Heating electrodes

SEONGWOOK MOON, Beomjin Jeong\*(Pusan National Univ.)

### P12-5

Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene-Polymer Composites for Thermal Management: Electrothermal Heating & Heat Dissipation

Jihwan Ju, Beomjin Jeong\*(Pusan National Univ.)

### P12-6

High-Performance and Environmentally Robust MXene Aerogel-Based Moisture-Driven Energy Generators

권민지, Kaiying Zhao, Shengyou Li, 정종건, 김수한, 유지오, 허규민, 박철민\*(연세대학교)

### P12-7

Decontamination of Radioactively Contaminated Surfaces Using Polyvinyl Alcohol-Borax Hydrogel

Sung-Wook Kim\*, Hee-Man Yang, Hyung-Ju Kim(Korea Atomic Energy Research Institute)

### P12-8

MXene-Encapsulated Magnetic Liquid Metal for Shape-Morphing and Locomotive 3D Neuromorphic Synapses

Kyumin Huh, Hyeon Kim, Jioh Yoo, Jonggun Jung, Minji Kwon, Shengyou Li, Suhan Kim, Cheolmin Park\*(Yonsei University)

### P12-9

Orthogonal Control of Fluorescence and Structural Color for Interference-Free Multimodal Sensing

김수한(연세대학교), 이선주(한국과학기술연구원), 정종건, 권민지, 유지오, 허규민, 박철민\*(연세대학교)





# POSTER SESSIONS II 4월 29일

## P15 : 수소재료

Room 3층 로비, 4월 29일

### P15-1

Role of Crystallographic Defects in Governing Hydrogen Sorption Kinetics of Pd-Sn Alloy Nanowires

Byungmoon Yoo, Jinseok Koh, Eun Seon Cho\*(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

### P15-2

AA5083 알루미늄 합금의 수소취성에 미치는 어닐링 온도의 영향

김중현, 정민섭, 황병철\*(서울과학기술대학교)

### P15-3

2.0GPa 마르텐사이트강의 Sn 첨가에 따른 수소취성 저항성 분석

남정훈, 한정훈, 성민영, 노이준(고려대학교), 백주현(고려대학교, 한국과학기술연구원), 이창욱, 오욱진(현대자동차), 유병길(현대제철), 김세호, 손석수\*(고려대학교)

### P15-4

가중치 기법을 적용한 TDS 기반 수소 트랩 사이트 정량 분석에 관한 연구

신희철(한국재료연구원, 영남대학교), 이종석, 김두원, 이시환(한국재료연구원), 박노근(영남대학교), 이승건\*(한국재료연구원)

### P15-5

수소 플라즈마 환원을 통한 페리튬배터리 업사이클링 연구

노이준, 김세호, 이창기\*, 이원형, 정두효, 홍석우, 김세호(고려대학교)

### P15-6

고압수소 및 액화수소 환경에서 SP(Small Punch)시험을 통한 오스테나이트계 스테인리스강의 수소취성 평가

박준호, 신희철(한국재료연구원, 영남대학교), 이종석, 이시환, 이승건\*(한국재료연구원), 강시현(영남대학교)

### P15-7

수소 흡장에 따른 수소저장합금 입자 팽윤과 용기 내부 거동 시뮬레이션

배상환(한국생산기술연구원, 서울과학기술대학교), 선현덕(한국생산기술연구원, 고려대학교), 변종민\*(서울과학기술대학교), 하태준\*(한국생산기술연구원)

### P15-8

Fabrication of Durable Nanoframe-Structured Porous Mg-Based Alloys via Vapor-Phase Dealloying for Hydrogen Storage

HyeonJi Kim(KAIST), Byeong-Chan Suh(KIMS), Eun Seon Cho\*(KAIST)

### P15-9

SSRT 및 TDS 분석을 이용한 QP980강과 DP980강의 수소취성 거동 및 파단 메커니즘 비교

박규완, 김혜진\*(한국공학대학교)

### P15-10

템퍼드 마르텐사이트강의 수소취성에 미치는 Nb와 Ti 첨가의 영향

최수환, 정민섭, 김상규, 황병철\*(서울과학기술대학교)

### P15-11

TiFe계 수소저장합금의 초기수소화 개선을 위한 바나듐 및 란타넘 복합 첨가의 시너지 메커니즘 연구

이재용(한국과학기술연구원, 성균관대학교), 김윤석(성균관대학교), 심재혁\*(한국과학기술연구원)

### P15-12

열처리에 따른 이중상 V-Cu-Ni-Al 합금의 미세조직 제어 및 수소 투과 특성 분석

한정훈, 송상윤(고려대학교), 백주현(고려대학교, 한국과학기술연구원), 남정훈, 이건직(고려대학교), 서진유(한국과학기술연구원), 손석수\*(고려대학교)

### P15-13

Hydrogen Diffusion and Trapping Behavior in Bainite Microstructure of Ferritic steel

JinHo Park\*(KAERI)

### P15-14

Impurity-Resistant Metal Hydride Enabled by Uniform Amorphous Carbon Coatings via Solid-Vapor Synthesis

Daeun Jung(KAIST), Kouji Sakaki(AIST), Eun Seon Cho\*(KAIST)

### P15-15

Zn 도금된 자동차용 초고강도 마르텐사이트강의 부식 거동

최호준(한국공학대학교), 광태양(RUAN co., Ltd.), 김혜진\*(한국공학대학교)

### P15-16

수소 투과 실험과 TDS를 통해 DP강과 QP강의 수소 확산 및 트랩 메커니즘 비교

김혜진\*, 김유리(한국공학대학교)

### P15-17

수소 환경 모사 방식에 따른 SA372 강 J<sub>1C</sub> 파괴 거동 평가

정수진, 배동화, 강태훈, 이창희, 이정훈\*(포항산업과학연구원)

### P15-18

배관용 탄소강관 재료의 수소 환경에서 물성 변화 확인을 위한 스크리닝 평가

이민경\*, 김부승, 강승규(한국가스안전공사)

### P15-19

AB2 Laves 상 합금의 기계적 특성과 히스테리시스 및 초기 수소화 속도의 상관관계

이도성, 이영수\*(한국과학기술연구원)

**P15-20**

유도 가열 방식을 적용한 금속수소화물 반응기의 수소화 거동 특성 연구

김희상, 지성화\* ((주)펄스터)

**P15-21**

SUS304 오스테나이트계 강의 수소에 의한 취성 거동 및 EPT를 통한 물성 회복

윤재원, 이진규, 이태경\* (부산대학교)

**P15-22**

수소 배관용 탄소 강관 재료의 1차 스크리닝 분석을 통한 기준 마련 기초 연구

김부승, 이민경\* (한국가스안전공사)

**P15-23**

Canceled

Surface-Engineered CoNiFe Integrated with Stabilized  $Ti_3C_2$  MXene for High-Performance and Cost-Efficient AEM Water Electrolysis

Bee lyong Yang\*, Mallappa Mahanthapa, Sk Samim Akhter, Ahmad Shahbaz (Kumoh National Institute of Technology, GHS Co., Ltd), Soon Yong Kweon (GHS Co., Ltd, Korea Transportation University)

**P15-24**

Improved Poisoning Tolerance of Metal Hydrides via Facile Surface Nitriding Modification for Practical Hydrogen Storage

Yujin Moon, Hyun Cho (KAIST), Kouji Sakaki (AIST), Eun Seon Cho\* (KAIST)

## P16 : 전산재료과학

Room 3층 로비, 4월 29일

**P16-1**

Unraveling the Synergistic Stability and Activity of  $MnMoO_4$  via Vacancy-Mediated Anion Engineering: A Density Functional Theory Study

Chaeun Lim, Byung Hyun Kim\* (Hanyang University ERICA)

**P16-2**

Structural evolution for porous zeolite-templated carbon (ZTC)

ALISHER FATKHULLOEVI (IBS, UNIST), Daniel Hedman\* (IBS), Madi Arsakay, Rodney S. Ruoff\* (IBS, UNIST)

**P16-3**

Gelation Kinetics of Block Copolymer Systems Tracked by Self-Diffusivity in DPD Simulations

JIN HOON KIM, 서범준\* (서울과학기술대학교)

**P16-4**

Two-Dimensional Electrides as Promising Anode Materials for Sodium-Ion Batteries: A First-Principles Study

SEULBI KIM, Bo Gyu Jang\* (Kyung hee Univ.)

**P16-5**

딥러닝(U-Net) 기반 초내열합금 석출 미세조직 분석 및 FEM 연동 기계적 물성 예측 연구

이지혁, 백재영, 진훈, 김수환, 김은아, 이학성\* (동아대학교)

**P16-6**

머신러닝 포텐셜을 이용한  $CsPbI_3$  페로브스카이트의 상안정성 및 상전이에 관한 열역학적 분석

최성호, 홍기하\* (국립한밭대학교)

**P16-7**

밀도범함수 이론을 이용한  $Sb_2Se_3$ 의 p형 도핑 후보 물질 탐색

김민준, 홍기하\* (국립한밭대학교)

**P16-8**

Role of Boron at Austenite/Ferrite Interface in Mitigating Hydrogen Embrittlement Using First-Principles Study

Seungyoun Jo, Changhun Kim, Shin hyun Kim, Seon-gyu Kim, Donghwa Lee\* (POSTECH)

**P16-9**

Machine Learning-Assisted Crystal Structure Prediction of Solid-State Electrolytes Reveals Superior Ionic Conductivity in Metastable Edge-Sharing Phases

Kim Ji Hoon, Jun Ho Seok, Jae Hun Seol, Sang Uck Lee\* (성균관대학교)

**P16-10**

니켈 도금 알루미늄-구리 레이저 용접부의 인공신경망 기반 접합 거동 모델링

송기욱 (성균관대학교), 성현민 (현대자동차), 정경재\* (성균관대학교)

**P16-11**

Computational Analysis of Bond Dissociation and Radical Stabilization in Recyclable Polymers

ByeongJun Jeon, Bumjoon Seo\* (서울과학기술대학교)

**P16-12**

Unraveling the Enhanced Alkaline Hydrogen Evolution of  $Co_4N$  via Al-Mediated Vacancy Healing: A Density Functional Theory Study

Minhyeok Choi (Hanyang University ERICA), Myeongjin Kim\* (Kyungpook National University), Byung-Hyun Kim\* (Hanyang University ERICA)

**P16-13**

Designing Pt/Ag Bilayer Collectors for Zero-Excess Lithium Metal Batteries

Seojin Jeon, Woosun Jang\* (Yonsei University)

**P16-14**

First-principles Investigation of  $Ti_2CT_x$ /Black Phosphorus Heterostructures as Anodes for Lithium-ion Batteries

Chae Hyun Kim, Woosun Jang\* (Yonsei University)

**P16-15**

Integrating CALPHAD/PFM Based Data Augmentation for Al Casting Alloys Property Prediction

CHANGHYEON HAN, HYUNGUK JANG, DONGUK KIM, PILRYUNG CHA\* (국민대학교)

**P16-16**

Mechanistic Insights into Interfacial Li-ion Dynamics on Oxygen-Functionalized Nanodiamonds: A Density Functional Theory Study

DONGKYUNG KIM, Byung-Hyun KIM\* (Hanyang University ERICA)

# P16-17

## Atomic-Scale Understanding of Lithium-ion Migration Mechanisms in Crystalline and Amorphous LiTaCl6 for ASSLBs

Hyomin Hong(POSTECH), Matthew Bergschneider (The University of Texas at Dallas), Hyo Gyeong Shin, Suyun Chae(POSTECH), Kyeongjae Cho\*(The University of Texas at Dallas), Donghwa Lee\*(POSTECH)

# P16-18

## Designing Coke-Resistant Ni/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts for DRM and DRE with DFT Evaluation of the Best Motif under Mixed-Feed Conditions

Chaehyeon Moon(Hanyang University ERICA), Heeyeon Kim\*(Korea Institute of Energy Research), Byung-Hyun Kim\*(Hanyang University ERICA)

# P16-19

## Alloy-State-Dependent Interfacial Evolution at Li<sub>x</sub>Si/Argyrodite Interfaces from Machine-Learned Molecular Dynamics

Ji Seon Kim, Sang Uck Lee\*(Sungkyunkwan University)

# P16-20

## Al-Si-Fe-Mn계 합금 응고 시뮬레이션 데이터의 형태학적 정량화를 적용한 미세조직 이미지 분석 연구

장형욱, 조휘재, 김동욱, 차필령\*(국민대학교)

# P16-21

## Phase-Field Model을 활용한 Q&P강의 탄소 분배 거동 및 미세조직 변화 예측

조휘재, 장형욱, 김동욱, 김성균, 차필령\*(국민대학교)

# P16-22

## Mg-Ca-Zn 합금의 Phase-field 모델링을 위한 Laves 상의 열역학적 단순화 기법

박용욱, 김근우, 김동욱, 장형욱, 차필령\*(국민대학교)

# P16-23

## Graph Neural Network-Based Surrogate Model for Accelerated Phase-Field-Modeling of Ferroelectric HZO Thin Films

방진현, 슈가탄 산디프, 차필령\*(국민대학교)

# P16-24

## 결정소성유한요소법(CPFEM)을 활용한 조사된 원자로 내부 구조물 재료의 다중 규모 파괴 거동 예측 모델링

안동현\*, 김지수, 김종민(한국원자력연구원)

# P16-25

## DFT 기반 우라늄-리간드 착물의 결합 상수 계산

성현우\*, 신영호, 김성욱, 전민구, 박찬우, 손성준(한국원자력연구원)

# P16-26

## A methodology for calculating the thermal conductivity of molten salt using molecular dynamics simulations

LEE SANGHEON, SEO BUMJOON\*(서울과학기술대학교)

# P16-27

## Electronic Delocalization Governs Carbon Bonding in Liquid Metals

Yongchul Kim(CMCM, IBS), Rodney S. Ruoff\*(CMCM, IBS, UNIST)

# P16-28

## Density Functional Theory Study on the Stability and Magnetic Properties of i-MAX Phases Depending on Composition and Atomic Ordering

Ji Soo Byun, Si Hyung Lee, Sang Uck Lee\*(Sungkyunkwan Univ.)

## P17 : 적층제조 및 분말

Room 3층 로비, 4월 29일

# P17-1

## DED 기반 P21-ST316L 경사기능재료의 조성 구배에 따른 미세조직 발달 및 기계적 거동 분석

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

# P17-2

## 재료 압출(MEX) 적층 제조 공정을 이용한 Fe-36Ni 인바 합금의 제조 및 그 미세조직, 열팽창 계수와 기계적 특성

조용훈, 박소연(인하대학교), 김주용(리프로텍), 김정환, 윤종열(한국재료연구원), 서동우(포항공과대학교), 이기안\*(인하대학교)

# P17-3

## 선택적 레이저 용융으로 제조된 IN718 합금의 저온 응력 완화 열처리에 따른 Laves network 기반 δ상 석출 거동 및 미세조직-기계적 특성 변화 효과

한승준, 강경록(한국생산기술연구원, 성균관대학교), 이택우, 김건희, 김원래(한국생산기술연구원), 안성철(한화에너지스페이스), 정재기(성균관대학교), 한혁수(한양대학교), 강현수\*(한국생산기술연구원, 한양대학교), 김형균\*(한국생산기술연구원)

# P17-4

## L-DED로 제작된 Fe-24Mn-4Cr-0.4C 고망간강의 수소취성 거동 분석

김찬, 김민기, 박민수, 이욱진\*(부산대학교)

# P17-5

## High-Strength Bimetallic Bonding for Aluminum alloy and Stainless Steels using Cold-Spray Deposition Technology

Minjune Park, Jinwook Choi, Doowon Jung, Ganghyeon Bae, Hwasung Yeom\*(POSTECH)

# P17-6

## Ti-6Al-4V 합금의 열처리 기반 TiO<sub>2</sub> 결정상 분율 제어에 따른 표면 친수성 및 경도 특성 연구

강민욱, 윤교식, 이유진, 이용건, 안병민\*(아주대학교)

# P17-7

## L-PBF로 제조된 Ti-6Al-4V 벌크 및 격자 구조의 미세조직-기계적 특성 상관관계 연구

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

#### P17-8

**다성분계 합금 스크리닝을 위한 DED 방식 금속 3D프린터의 bead 적층 조건 최적화**  
윤영철(한국과학기술연구원, 서울대학교), 김태엽(한국과학기술연구원), 박은수\*(서울대학교), 김진우\*(한국과학기술연구원)

#### P17-9

**Structure characterization of the oxide layer and non-metallic inclusions in steel powder with various particle sizes**  
Su Yao, Park Sunghwan(Hanyang university), Kim Dongsoo(Doosan Enerbility), Park Joohyun\*(Hanyang university)

#### P17-10

**WAAM 공정을 이용한 Hastelloy C276 합금의 제조 및 그 미세조직과 기계적 특성**  
이의종, 박소연(인하대학교), 박형우((주)비에이티 파트너스), 이기안\*(인하대학교)

#### P17-11

**셀 구조 조절을 통한 초고강도 · 고연성 적층제조 마레이징 중엔트로피 합금 개발**  
김은찬, 이재홍(포항공과대학교), 권현석\*(케임브리지대학교), 구분우(포항공과대학교), 정상국(한화에너지), 왕재민(경북대학교), 안성열, 이정애(포항공과대학교), 조성재(공주대학교), Stefanus Harjo, Wu gong(J-PARC), 이성보(서울대학교), 홍순직(공주대학교), 홍순익(충남대학교), 김형섭\*(포항공과대학교)

#### P17-12

**LPBF로 제조한 Fe-6.5Si 연자성 Axial 코어의 구조 설계 및 전자기 성능**  
박규현, 윤지상, 김연우(한국재료연구원), 이상현((주)삼현), 김육진(현대자동차), 정재원(한국재료연구원), 박정민\*(한국재료연구원, 고려대학교)

#### P17-13

**Ni-W2C 분말을 이용한 DED 공정 기반 내마모 코팅의 미세조직분석 정량화 및 TC-PRISMA 연계 공정 최적화 연구**  
이은세, Rohit Roj, Khushahal Thool, 서위걸, Aman Gupta, 최시훈\*(국립순천대학교)

#### P17-14

**Investigation of Hot Cracking Behavior in Additively Manufactured Maraging Steel**  
jongtae kim(Korea Institute of Industrial Technology), Philip Grimm(Leibniz Institute for Solid State and Materials Research Dresden), Seoul-Ki. Han, MI HYE, LEE, Junhee, Han, Leeseung, Kang\*(Korea Institute of Industrial Technology)

#### P17-15

**알루미늄-세라믹 복합재료의 DED 적층 특성 평가 및 강화 메커니즘 분석**  
김재형, 최윤석\*, 김수민(부산대학교)

#### P17-16

**EIGA 공정 변수가 적층제조 및 전자부품용 미세 구리 분말의 입도 분포와 산소 함량에 미치는 영향**  
전창우\*, 김충수, 이주호, 박은수(주식회사 이엠엘), 박상하(대구기계부품연구원), 김가희, 허은진(한국나노기술원)

#### P17-17

**Wear resistance and microstructure of laser cladding layer on directly nitrided Ti alloy substrate**  
Sang-Ha Park\*(Daegu Mechatronics and Materials Institute), Woo-seok Jung(TESTCOR), Seung-ik Lee(KPC)

#### P17-18

**DED로 제조된 316L 스테인리스강의 극저온 변형거동 분석**  
박정현, Muhammad Ishtiaq, 강성규\*(경상국립대학교), 김영균(한국재료연구원)

#### P17-19

**고상대밀도(0.4~0.6) 적층 제조 Ti-6Al-4V 격자 구조체의 변형 및 에너지 흡수 거동 연구**  
김규식\*(국방과학연구소), 김준혁(국립창원대학교), 김대웅, 박정호(국방과학연구소), 정성택, 권영삼((주)세타텍), 홍현욱(국립창원대학교)

#### P17-20

**항공용 부품 제조를 위한 레이저 DED 기반 Ti-6Al-4V 적층재의 미세 조직 및 고온 변형 거동 연구**  
장경현\*, 김성욱, 이현석, 천창근(포항산업과학연구원)

#### P17-21

**순수구리 소재 기반의 PBF 공정으로 제조된 부품의 표면 조도 개선을 위한 Post-Polishing 공정 연구**  
윤성호\*, 김수현, 김예림(파트너스랩 주식회사)

#### P17-22

**Strategic Application of Metal Additive Manufacturing for Defense Materials and Process Innovation**  
Jeesoo Sim\*(Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement)

#### P17-23

**Effect of Sintering Temperature on the Tribological Behavior of Binder Jet Printed STS316L and Cu-Infiltrated Composites**  
Han Jung Kim, Na Young Kim (Korea Institute of Industrial Technology), Kee-Ahn Lee(Inha University), Hyuksoo Han(Hanyang University), Kyung Il Kim\*(Korea Institute of Industrial Technology)

#### P17-24

**기계학습 기반 적층제조용 알루미늄 합금의 강도-전도도 상반 관계 분석**  
김도원, 전서연, 안성빈, 박수원, 송용욱, 최현주\*(국민대학교)

#### P17-25

**Microstructural, Mechanical, and Corrosion Characteristics of L-PBF Processed 304L Stainless Steel for SMR Applications**  
Jiyun Oh, Junhyuk Ham, Ji Hyun Kim\*(Ulsan National Institute of Science and Technology)

#### P17-26

**Wire-based laser additive manufacturing 방식으로 제조된 Ti-6Al-4V 합금의 CREEP 저항성 및 변형거동**  
송노권, 박정현(인하대학교), 김대중((주) 에이엠솔루션즈), 이기안\*(인하대학교)



P17-27

Direct energy deposition 적층 공정으로 제조한 중탄소 공구강의 조성 설계에 따른 미세조직 및 충격·마모 특성  
박정현, 전민수, 강민재(인하대학교), 김대중((주)에이엠솔루션즈), 전종배(동아대학교), 구용모((주)창성), 이기안\*(인하대학교)

P18 : 재료강도

Room 3층 로비, 4월 29일

P18-1

고압수소 수송용 API X65강의 수소취화거동연구  
이아영, 김정우, 김동규, 박나현, 정세인, 박시형(울산대학교), 조성규, 주형건(현대제철 기술연구소), 신상용\*(울산대학교)

P18-2

고출력 DED 공정으로 제작된 후열처리 미적용 Ti-6242 합금의 미세조직과 변형 거동 고찰  
한재연, 김준현(국립창원대학교), 권영삼((주)씨타텍), 박정호, 김규식, 김대웅(국방과학연구소), 홍현욱\*(국립창원대학교)

P18-3

해양구조물용 H형강 FCAW 용접부의 저주기 피로 특성과 국부 변형 집중에 따른 손상 거동 고찰  
한재연, 박정현(국립창원대학교), 김재성(조선선재), 박형권, 이창훈(한국재료연구원), 정준호(현대제철), 홍현욱\*(국립창원대학교)

P18-4

고강도 원자로압력용기강 후판 전자빔용접부의 Pre-tempering 조건에 따른 미세조직 분석  
배소영(고려대학교, 한국원자력연구원), 현세미, 김민철\*, 홍석민, 김홍덕(한국원자력연구원), 손석수(고려대학교)

P18-5

유한요소해석을 활용한 최소침습 능동전개형 생분해성 전자소자의 기계적 설계  
조지현, 김수민(UNIST), 황경석(Harvard University), 배재영, 강승균(서울대학교), 김주영\*(UNIST)

P18-6

Heat Transfer Analysis of System-on-Chip: Finite Element Modeling and Neural Network-based Temperature Prediction  
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)

P18-7

보론강의 경도와 충격인성에 미치는 제조 공정의 영향  
오재성, 정민섭, 황병철\*(서울과학기술대학교)

P18-8

L-PBF로 제조된 316L 스테인리스강의 적층 방향에 따른 미세조직 및 이방성 특성 평가  
허재혁, 최인철\*(국립금오공과대학교)

P18-9

해수 분위기에서 Mn-Cu 합금의 응력부식균열 거동 연구  
목승민, 박준영, 이준민(경상국립대학교), 김대경(한화오션), 김상식, 강성규\*(경상국립대학교)

P18-10

후열처리 조건 제어에 따른 SLM 적층 Ti-6Al-4V 합금의  $\alpha'$  martensite 분해 거동과 강도-연성 균형 최적화  
이아름, 한재연(국립창원대학교), 김치원(한국재료연구원), 이지원, 최용혁(두산에너지리티), 홍현욱\*(국립창원대학교)

P18-11

나노인덴테이션을 이용한 Cu 실리콘 관통 전극(TSV) 응력 영향 영역의 표면 잔류응력 평가  
김동현, 김한글, 김주영\*(UNIST)

P18-12

비정상 결정립 성장을 통한 (111) 단결정 구리 박막 형성  
김수정, 박지윤, 심영주, 김동현, 김주영\*(UNIST)

P18-13

Cr, Mo, V 함량 변화에 따른 AISI D2 Steel의 미세조직 및 경도 변화 상관관계  
김정운, 이아영, 김동규, 박나현, 정세인, 박시형, 김진천, 신상용\*(울산대학교)

P18-14

오스테나이트계 경량철강의 저주기 피로에서 온도에 따른 전위 거동과 피로수명 간의 상관 관계 고찰  
황동현, 주하연, 김시연(국립창원대학교), 고익석(현대스틸파이프), 김치원, 박성준(한국재료연구원), 홍현욱\*(국립창원대학교)

P18-15

아연 분말의 입도에 따른 고온 산화 거동 연구  
정세인, 김동규, 박나현(울산대학교), 고광우(울산소방본부), 신상용\*(울산대학교)

P18-16

A356 알루미늄 합금의 열처리에 따른 미세조직과 기계적 성질 간 상관관계  
김동규, 이아영, 김정우, 정세인, 박나현, 한재은, 박시형, 신상용\*(울산대학교), 정영복, 이장근, 신병철(태원금속)

P18-17

미케노 발광형 디지털 이미지 상관 기법을 이용한 2 차 전지 소재 균열 가시화 연구  
윤지용(경북대학교), 좌레오, 티밀시나 수만, 김지식\*(경북대학교)

P18-18

표면막에 의해 생성된 잔류응력과 Fe-Si계 합금의 철순간의 상관관계  
전지현, 이소현(UNIST), 유성현, 안용근, 강춘구(현대제철), 김주영\*(UNIST)

P18-19

원자로압력용기용 SA508 Gr.3 및 Gr.4N 저합금강 전자빔용접부 특성 비교  
현세미, 권준엽, 김민철\*, 홍석민, 김중민(한국원자력연구원)

P18-20

잠수함용 초고강도강 용접부의 기계적 물성, 파괴 특성 및 폭파변형 특성  
김유섭\*, 양성호, 함진희, 김용진, 송정규, 박시욱(국방과학연구소)



## P18-21

원자로압력용기용 Mn-Mo-Ni계 저합금강 전자빔용접부의 용접후열처리 시간에 따른 천이특성 평가  
김민철\*, 현세미, 권준엽, 홍석민, 이봉상, 김종민(한국원자력연구원)

## P19 : 역학측정

Room 3층 로비, 4월 29일

### P19-1

CrCoNi 기반 3원계 중엔트로피 합금의 조성 기반 SFE에 따른 기계적 특성 평가  
김지현(국립경국대학교), 박태연, 최인철(국립금오공과대학교), 김영천\*(국립경국대학교)

### P19-2

Al-Si-Mg계 합금의 조성 및 열처리 조건에 따른 미세조직 변화 및 상별 국부기계적 물성 측정  
한준희, 한성희, 김대현, 김보규, 강민성, 신종호\*(강원대학교)

### P19-3

AA6061 합금 마이크로필라의 나노 및 마이크로 단위 변형거동에 대한 크기효과 및 변형속도 효과  
백인섭(경상국립대학교), 이근호(국방과학연구소), 강성규\*(경상국립대학교)

### P19-4

Fabrication of Fe and Zr based bulk metallic glass blades and evaluation of sharpness via BSI Model  
Sejin Jang, Seong Hoon Yi\*(Kyungpook National University)

### P19-5

Quantifying local deformation and strength in L-PBF processed multi-layered medium-entropy alloy via nanoindentation and micro-DIC  
Zhe Gao(Hanyang University), Dong-Hyun Lee(Chungnam National University), Yakai Zhao(A\*STAR), Hyoung Seop Kim(POSTECH), Upadrasta Ramamurthy(Nanyang Technological University), Jae-il Jang\*(Hanyang University)

### P19-6

나노압입시험 기반 머신러닝을 활용한 듀플렉스 스테인리스강 미세조직 분류  
임준휘, 김영천\*(국립경국대학교)

### P19-7

수소 장입 중 STS304 용접부 위치별 첨가제 양에 따른 전기화학적 거동 및 기계적 특성 변화  
서세덕, 최승현, 함주빈, 이상엽, 박상민, 김영천\*(국립경국대학교)

### P19-8

변형유기 마르텐사이트를 포함한 STS304의 해수 환경 내 수소취화 및 부식 거동 분석  
이상엽, 박상민, 김영천\*(국립경국대학교)

### P19-9

수소장입 시 전해질에 따른 STS304의 나노압입특성 평가  
박상민, 이상엽, 김영천\*(국립경국대학교)

## P19-10

압입 하중-변위 곡선의 하부면적 평가를 통한 SiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 하이브리드 본딩 계면 접착특성 평가  
남서운, 장현식, 김영천\*(국립경국대학교)

## P19-11

음의 포아송비 구조를 이용한 이축 변형 제어 신축 기판 제조  
곽지윤(UNIST), 전은재(울산대학교), 김주영\*(UNIST)

## P19-12

국부 트랜치 기반 접힘 구조를 적용한 자가 전개형 전자소자의 구조 설계  
김수민(UNIST), 황경석(Harvard University), 조지현(UNIST), 배재영, 강승균\*(서울대학교), 김주영\*(UNIST)

## P19-13

고수명 생체분해성 전극 활용을 위한 몰리브데늄 박막 증착 공정  
이찬영, 조지현, 김주영\*(UNIST)

## P19-14

상온 조건에서의 기계적 보조 냉간용접에 의한 나노다공성 금의 자가치유 거동과 기계적 물성 회복  
홍석원, 김영훈(UNIST), 박은지(한국기계연구원), 김주영\*(UNIST)

## P19-15

준안정 베타 Ti-Fe-Cr 합금의 조성 변화에 따른 오메가상 형성과 역학적 거동 분석  
박선영\*, 천영범(한국원자력연구원)

## P19-16

단일구조 사용후핵연료 처분용기 신소재 개발  
우정현\*, 박선영, 김가영, 장준혁(한국원자력연구원)

## P20 : 가공-용접 및 접합

Room 3층 로비, 4월 29일

### P20-1

무가압 소 결을 이용한 일방향 다공성 구리와 벌크 구리 기판 간의 접합 계면 특성  
백정연(인하대학교), 김근수(호서대학교), 현승균\*(인하대학교)

### P20-2

17-4PH 스테인리스강 단조-적층제조 이중 용접부의 열영향부 연화 제어 및 강도 회복에 미치는 나노 석출물의 영향  
심예훈, 주하연, 김중훈(국립창원대학교), 이지원(두산에너지리티), 최용혁(두산에너지리티), 홍현욱\*(국립창원대학교)

### P20-3

해양 환경 노출에 의한 표면 부식이 H 형강 용접부의 저주기 피로 수명에 끼치는 영향  
이상현, 한재연, 박정현(국립창원대학교), 이창훈(한국재료연구원), 정준호(현대제철), 김재성(조선선재), 홍현욱\*(국립창원대학교)

#### P20-4

EBW 용접 듀플렉스 스테인리스강의 FSP 적용에 따른 용접부 CISC 저항성 개선

이재훈, 백종민, 이아름(국립창원대학교), 하중문(두산에너지리티), 홍현욱\*(국립창원대학교)

#### P20-5

Autocatalytic 베이나이트 변태 기반 900 MPa급 carbide-free 용접금속의 강도-인성 발현 메커니즘 고찰

백종민, 김중훈(국립창원대학교), 손명락(고려융합부), 한규태(포스코), 김용진, 박시욱(국방과학연구소), 홍현욱\*(국립창원대학교)

#### P20-6

비정질 삽입재 및 다층 중간재가 Ti/SUS 브레이징 접합부의 계면 반응 거동 및 기계적 특성에 미치는 영향

노주림, 김동우, 이윤서, 이진규\*(국립공주대학교)

#### P20-7

열-기계적 응력 완화를 위한 UPM Cu/Mo 복합 스페이서 설계 및 접합 특성 연구

조아설(인하대학교), 김근수(호서대학교), 현승균\*(인하대학교)

#### P20-8

고망간강 다층 SAW 용접부 및 열영향부에서의 균열 발생 거동 분석

양희평, 송호정(동아대학교), 박건우(울산과학기술원), 한일욱(포항특수용접부), 전종배\*(동아대학교)

#### P20-9

고강도 저합금강 다층 용접금속 열영향부의 미세조직 및 기계적 특성

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

#### P20-10

BA 처리 스테인리스 스틸 316L 전해연마 심리스 튜브의 용접 접합부 인장 파단 특성 및 개재물 분석

이수연, 이종혁, 장병록\*(인하대학교), 박은혜(인하대학교, 한국폴리텍대학)

#### P20-11

Canceled

ML-Thermodynamics 계산을 이용한 VC 석출강화형 고망간강 용접금속의 항복강도 향상을 위한 합금설계 연구

박정빈(부산대학교), 한일욱(포항특수용접부), 강남현\*(부산대학교)

#### P20-12

경량 Mg 합금 압출재의 용접 공정별 용접부 특성

윤병현\*(충남대학교)

#### P20-13

그라플 헤드 용접 공정 조건 검증 및 최적화

김종환\*, 도정민, 소원재, 신진건, 정용진(한국원자력연구원)

#### P20-14

Ag-Cu계 브레이징 필러 조성 변화에 따른 Cr-Mo-Cu계 접점 접합부의 미세조직 및 확산 거동

신현정, 이영민, 유가영, 김동배\*(대구기계부품연구원), 이주현, 우수열(효성중공업)

#### P20-15

전류 인가를 통한 304 스테인리스 용접부의 미세조직 및 기계적 물성 제어

방종원\*, 오연준, 정현도, 문종식(한국화학융합시험연구원), 배장현, 김문조(한국생산기술연구원)

#### P20-16

사용후핵연료 처분용기 밀봉을 위한 전자빔 용접의 디포커싱 효과 적용성 평가

이영호\*, 김재득, 김진섭(한국원자력연구원)

#### P20-17

M2 분말을 이용한 기반 예열 레이저 클래딩 기반 고압 다이캐스팅 금형 표면 강화 기술

김철우\*, 최세원, 김영찬, 유효상(한국생산기술연구원)

### P21 : 마그넷

Room 3층 로비, 4월 29일

#### P21-1

Pr,Nd-Fe-B계 영구자석의 초기 REE 함량이 입계 확산 공정 후 미세조직 및 자기적 특성에 미치는 영향

김현중, Madavali Babu, 홍순직\*(국립공주대학교)

#### P21-2

3D 프린팅 기반 고강도 Fe-Si 연자성 AFM stator 코어의 금속-절연-금속 구조 설계 및 시뮬레이션을 통한 공정 변수와 전자기 특성의 상관관계 규명

이강현(한양대학교), 임태협(한양대학교, Nanyang Technological University), 김민중, Bayi Nelson M, 이선영\*(한양대학교)

#### P21-3

Fabrication of High-Density Fe-based Nanocrystalline Cores with Enhanced Soft Magnetic Properties via Controlled Crystallization

Seongjun Kim, Juhyeok Lee, Seonghoon Yi\*(Kyungpook National University)

#### P21-4

Heat Treatment Optimization of Cu-Added Fe-Based Amorphous Soft Magnetic Ribbon

Jongil Lee, Seonghoon Yi\*(Kyungpook National University)

#### P21-5

Single-Phase  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N by De-nitridation: A Scalable Precursor for Iron Nitride Phase Control

Ho-Jeong Kim, Hyojin Choi, Seung Yong Lee(Yonsei University), Jung-Suk Lee, Jisung Lee, Taegwan Heo, Dohoon Kim(Hyundai Motor Company), Kyu Hyoung Lee, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

#### P21-6

Enhancing Coercivity of Nd-Fe-B Magnets via Zn-Assisted two-step Pr<sub>70</sub>Cu<sub>20</sub>Al<sub>10</sub> Grain Boundary Diffusion

Jaehyuk Kim, Seong Min Kim, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

#### P21-7

Low-Temperature Hydrogenation Pre-Treatment for Enhanced Diffusion Efficiency in Pr-Based HRE-Free Grain Boundary Diffusion Process

Seong Min Choi, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

#### P21-8

Effect of Heat Treatment on Soft Magnetic Properties of High-C Amorphous Alloys

Mingyo Jeong, Seonghoon Yi\*(Kyungpook National Univ.)

#### P21-9

Grain Boundary Engineering via La-Assisted Diffusion Channel Design in Nd-Lean Ce-Fe-B Hot-deformed Magnets

Kyungmi Lee, Ye Ryeong Jang, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

#### P21-10

레이저 3D 프린팅 Fe-Si 합금의 열처리가 미세조직 및 자기특성에 미치는 영향

이한솔, 안종혁, 이귀영, 김종렬\*(한양대학교)

#### P21-11

표면 거칠기 변화에 따른 Fe-6.5%Si 전기강판 자기특성 분석

김태영, 박언병, 진현욱, 권기혁\*(포항산업과학연구원)

#### P21-12

Low-Temperature High-Density Sintering of  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$  Powders with Low-Melting Metals

HyeSu Kim, Jaehyuk Kim, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

## P22 : 가공-표면처리

Room 3층 로비, 4월 29일

#### P22-1

NaOCl 환경에서의 마찰이 304 스테인리스강 표면 특성 및 내식성에 미치는 영향

이현수, 최윤석\*(부산대학교), 이정훈\*, 조현빈(부경대학교), 강승주(부산대학교)

#### P22-2

Electrochemical Behavior of Organic Additives in TSV Cu Filling

Nayoung Kim, 신지윤, 손인준\*(Kyungpook National Univ.)

#### P22-3

유기첨가제를 이용하여 TSV Ni 전해도금 거동 분석 및 무결함 충전 구현에 관한 연구

신지윤, 김나영, 손인준\*(경북대학교)

#### P22-4

스퍼터링 공정을 이용한 Cr-Al-N/SiOx 나노복합구조 코팅의 기계적, 구조적 특성 분석에 관한 연구

허성보\*, 이범무, 박인욱, 김왕렬(한국생산기술연구원)

#### P22-5

Ni-Cr-Mo계 합금 전해연마에서 전해액 조성 최적화와 표면 품질 지배인자 분석

양현선, 정우철, 최광수, 공만식\*(고등기술연구원)

#### P22-6

V 및 Si 첨가가 Ti-Al/Cr-Al 기반 다층 나노 복합 코팅막의 미세조직과 자가유합 특성에 미치는 영향

허성보\*, 박인욱(한국생산기술연구원), 이학철(화신볼트산업), 김왕렬(한국생산기술연구원)

#### P22-7

A study on the development of zinc flake pigments for Fe-based corrosion protection via wet ball milling method.

Seong ho Hwang, Sang Soo Shin\*(오성테크), Sang yong Shin(울산대학교)

#### P22-8

Residual Stress Evolution in CFRP-Zn Bond Coat-Ceramic Top Coat Thermal Spray Coatings

Eui Pyo Kwon\*, Seungmin Song(Korea Institute of Industrial Technology), Jongkweon Lee(Sewon Hardfacing CO., Ltd)

#### P22-9

Inhibition of Galvanic Corrosion between Copper and Gold on PCB Substrate Using a Cathodic Inhibitor

YeWon Han(KITECH, Hanyang Univ.), CheaHyun Jeong, SeKwon Oh\*(KITECH)

#### P22-10

Study on the Influence of  $\text{Cl}^-$  and Acetic Acid Concentrations on the Corrosion Behavior of Al1070 in SWAAT Environments

OnYu Ha(Korea Institute of Industrial Technology, Sungkyunkwan University), Myeongjin Kim(Korea Institute of Industrial Technology, Hanyang University), Sekwon Oh\*(Korea Institute of Industrial Technology)

#### P22-11

저전류 G-EIS로 LSV 과전압을 추정하는 Zn 용융도금 기반 Raney Ni 전극의 임피던스-성능 상관관계

김형안, 왕은찬, 최윤일\*(한국생산기술연구원)

#### P22-12

용사 클래딩된 용융염 원자로 재료의 부식 저항성 평가

윤지현\*, 김채원(한국원자력연구원), 이원찬, 김정환(국립한밭대학교)

## P23 : 인공지능재료과학

Room 3층 로비, 4월 29일

#### P23-1

인공지능 기반 7xxx계 알루미늄 합금 탐색 기법 설계

석왕록, 안영조, 이혜인, 최윤석\*(부산대학교), 김수현, 천현석(한국재료연구원)

### P23-2

#### A Comparative Study of Machine Learning Approaches for Predicting MAX Phase Exfoliation Energy

JANGHWAN CHOI, EUGENE JANG, CHANGWOOK JEONG\*(UNIST)

### P23-3

인공지능을 이용한 파단면 분류 및 자동 보고서 생성 모델에 관한 연구  
진훈, 이지혁(동아대학교), 김수환(동아대학교, 한국재료연구원), 김은아, 백재영, 장재훈(동아대학교), 박이호, 양원준(한국재료연구원), 이학성\*(동아대학교)

### P23-4

#### 온프레미스 환경에서의 LLM 기반 표 데이터 추출 자동화 및 프롬프트 자기개선 연구

원예지, 박세진(국민대학교), 송영범, 김대웅(국방과학연구소), 조기섭\*(국민대학교)

### P23-5

#### 대규모 언어 모델을 활용한 페로브스카이트 태양전지 물성 파라미터 추출 및 데이터 분석

신은하, 홍기하\*(국립한밭대학교)

### P23-6

#### 고특성 $\alpha+\beta$ Ti 합금 설계 전략 구축을 위한 LangChain 기반 대형언어 모델 알고리즘 개발

서기완(서울대학교), 이진우, 이동우(성균관대학교), 박은수\*(서울대학교)

### P23-7

#### KAN-QEq: An Interpretable and Parameter-Efficient Charge Equilibration Model for Long-Range Electrostatic Interactions in MLIPs

Junsoo Lee, Hyungjun Kim\*(Korea Institute of Science and Technology)

### P23-8

#### Dataset strategies for transfer learning based machine learning potentials: Structural optimization of high entropy Na<sub>3</sub>V<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> cathodes

Wonjun Choi, Sanghyeon Park(KAIST), Chan-Woo Lee\*(Dongguk University), Jong Min Yuk\*(KAIST)

### P23-9

#### 기계학습을 활용한 경량철강의 기계적 성질에 대한 데이터 기반 예측

홍영오(한국재료연구원, 부산대학교), 박성준\*, 박형권, 유지성(한국재료연구원), 최윤석\*(부산대학교)

### P23-10

#### Hierarchical Partitioning and Stratified Sampling of PubChem-Scale Chemical Space for Bias-Controlled Training Data in Molecular Design

Youngho Sohn\*, Hyunwoo Seong, Min Ku Jeon, Sung-Wook Kim, Sungjune Sohn, Chan Woo Park(Korea Atomic Energy Research Institute)

## P24 : 표면계면

Room 3층 로비, 4월 29일

### P24-1

#### Dissolution of Diamond in Molten La, and Ce flux

SUDIPTA BAG(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), GUPTA Vijay, LEE Sun Hwa(Institute for Basic Science (IBS)), SULTANGAZIYEV Alisher, JEON Dongho(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), KIM Sunghwan, KUNDU Anirban, SEONG Won Kyung(Institute for Basic Science (IBS)), RUOFF Rodney S. \*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST)

### P24-2

#### Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Polymer 복합 분말 정전 코팅기술 개발을 통한 건식 캐스크 저장 시스템에서의 중성자 차폐율 향상

김수현, 박준호(옵니코트), 양유진, 염화성\*(포항공과대학교), 전영도\*, 박순홍\*(옵니코트)

### P24-3

#### Enhancement of wear resistance in AlCrN-coated SKH55 punches via nitrogen-ion hot implantation for automobile brake hydraulic piston manufacturing

CHAN YOUNG LEE\*, Jun Mok Ha, Sunmog Yeo(KAERI)

### P24-4

#### Effects of Al-Si Coating Quantity on Tribological Behavior of 22MnB5 in Hot Stamping

Hee Geon Lee(Incheon Univ.), Min-Ki Ji(Korea Institute of Industrial Technology), Hyun-Hak Kang(Incheon Univ.), Hyun-sung Son(POSCO), Tea-Sung Jun\*(Incheon Univ.)

### P24-5

#### Effects of Organic Additives on Initial Stages of Zn Electrodeposition Process

JooYul LEE\*, Bung-Uk Yoo, Da-jung Park, Ju-yeong Lee, Kyu-hwan Lee(한국재료연구원)

## P25 : 가공-주조 및 응고

Room 3층 로비, 4월 29일

### P25-1

#### 냉각속도가 GCD700 구상흑연주철의 미세조직 형성 및 기계적 특성에 미치는 영향

홍지운, 김지욱, 최창영, 장진석, 정유현, 조용재\*(한국생산기술연구원)

### P25-2

#### 감압 응고 시험법을 이용한 버진 잉곳과 100% 스크랩의 용탕 품질 평가 연구

장호성, 강호정, 윤필환, 이규훈, 박진영, 신선미\*(한국생산기술연구원)

# POSTER SESSIONS III 4월 30일

## P26 : 상변태

Room 3층 로비, 4월 30일

### P26-1

알루미늄 첨가에 따른 AISI 4340 강의 상변태 거동 및 마르텐사이트 조직 특성 분석

김상승(동아대학교), 김은아(현대제철), 이승희, 강신곤\*(동아대학교)

### P26-2

열처리 분위기에 따른 바나듐 첨가 열간압연 고망간강의 표면 산화 및 표면-심부 미세조직 변화 분석

송호정, 양승우(동아대학교), 박시욱, 김용진(국방과학연구소), 박건우(울산과학기술원), 소태일(포스코), 장재훈, 전종배\*(동아대학교)

### P26-3

냉각 속도 구배에 따른 심리스 수소 강관의 위치별 미세조직 분석 및 수소취성 거동

임성진, 정윤중, 권민철, 신윤지, 송기안\*(국립공주대학교)

### P26-4

나노 VC 석출 기반 다차원 결합 제어를 통한 Fe-Mn-Si계 형상기억 합금의 회복특성 최적화

윤제인, 김지영, 박은수\*(서울대학교)

### P26-5

Invar 합금에서 미량 불순물의 미세구조 및 열·기계적 특성에 대한 영향

이희상, 장준호, 류재우\*(홍익대학교)

### P26-6

Ni-38Cr-3.8Al 합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 V 첨가의 영향

윤성민, 김가영, 유채은, 이제인\*(부산대학교)

### P26-7

AB<sub>2</sub>계 수소저장합금의 라베스상 형성 거동 및 미세구조 분석

이소영, 박은수\*(서울대학교)

### P26-8

Scalable Production of Fe<sub>4</sub>N by a Controlled De-Nitridation Route  
Hyojin Choi, Hyunwoo Seo, Ho-jeong Kim, Wooyoung Lee(Yonsei University), Seung Yong Lee(Kongju National University), Kyu Hyoung Lee\*(Yonsei University)

### P26-9

Superheating Above the Liquidus Does Not Restore Chemical Homogeneity in an Oxidation-Sensitive Metallic Glass

Minkyung Kwak(Seoul National University), Chae Woo Ryu(Hongik University), Eun Soo Park\*(Seoul National University)

### P26-10

Design and Characterization of High-Density Fe-Based Amorphous Sintered Alloys Containing High Boron and Gadolinium  
CHOI HYESEONG, JEONGKYU KIM, SEONGHOON YI\*(Kyungpook National Univ.)

### P26-11

Effect of Phosphorus Content on HER Activity and Stability of Fe-based Amorphous Ribbons in Acidic Seawater

JuneYoung Lee, Moosung Kim, Seonghoon Yi\*(Kyungpook National University)

### P26-12

공정 합금계에서의 급속 응고에 따른 공유결합 원소의 비정질 상 형성

문준현, 박은수\*(서울대학교), 류재우\*(홍익대학교)

### P26-13

달 레굴리스 모사 Lunar Glass의 물성 평가 및 위치 기반 물성지도 구축

송원택, 이명준, 박은수\*(서울대학교)

### P26-14

나노 다공성 은 분말의 제조 및 미세조직 제어

김영균, 성재욱\*, 현승균\*(인하대학교)

### P26-15

Orientation-Dependent Mechanical Properties of Al-Cu-Fe Quasicrystals

Go Eun Kim, Wan Kim, Eun Soo Park\*(Seoul National University)

### P26-16

Cu-X 컬러합금의 첨가 원소 제어를 통한 미세조직 변화 및 기계적·광학적 특성 연구

장성문, 조가은, 황의정, 강결찬, SHINDE KIRAN PRAKASH, 박혜진, 홍성환, 김기범\*(세종대학교)

### P26-17

제 2상 분산을 통한 Cu-Ge 기반 고강도 컬러 합금의 특성 연구

황의정, 장성문, 조가은, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범\*(세종대학교)

### P26-18

Cu-Al-Zn-Sn 합금의 첨가 원소 제어 기반 적층 결합 에너지 제어를 통한 열간 압연에 따른 기계적 특성 거동 연구

강결찬, 조가은, 장성문, 이유진, 홍동성, 현명우, SHINDE KIRAN PRAKASH, 박혜진, 홍성환, 김기범\*(세종대학교)

### P26-19

From Cu-Zn-Pb to Lead-Free Alternatives: Phase Transformation, Precipitation, and Microstructure in Brass

Jieun Lee, Jaekwon Kim(Seoul National University), Siyeon Lee(WONJIN Metal), Eunsoo Park\*(Seoul National University)



#### P26-20

석출강화형 중엔트로피 합금에서  $\gamma'$  석출 · 재석출 거동의 정량적 분석  
한상윤, 박은수\*(서울대학교), 류채우\*(홍익대학교)

#### P26-21

V 첨가에 따른 CoCuFeNi 기반 고엔트로피 합금의 미세구조 분석 및  
기계적 물성 향상에 대한 연구

이규필, Yusupov Dilshodbek, Abbas Muhammad Aoun, 강결찬, 홍동성,  
강원목, 김기범\*, 홍성환, 박혜진(세종대학교)

#### P26-22

Si 함량과 열처리 조건에 따른 초경량 AlTiVCrSi 고엔트로피 합금의 상  
형상 제어를 통한 기계적 특성 분석

강원목, 홍동성, Yusupov Dilshodbek, Abbas Muhammad Aoun, 강결찬,  
홍성환, 박혜진, 김기범\*(세종대학교)

#### P26-23

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

#### P26-24

결정립 조대화를 이용한 CrMnFeCoNi계 고엔트로피합금의 형상기억특  
성 향상

임진수량, 정휘윤, 이제인\*(부산대학교)

#### P26-25

Silicide Coating Formation and Diffusion Behavior in MoNbTaV  
Medium-Entropy Alloy during Si Pack Cementation process

Jini Park, Daeguen Kim\*(고등기술연구원), Joonsik Park(국립한밭대학교)

#### P26-26

FDS (Flow Drill Screw)의 Pack cementation 코팅 후 열처리를 통한  
기계적 특성 고찰

정소영, 양하영, 김선진(국립한밭대학교), 최정묵(진합), 박준식\*(국립한밭대학  
교)

#### P26-27

Effects of Alloying Elements on Phase Formation during Nitriding of  
Fe-Based Materials

Hyun Woo Seo, Hyojin Choi, Hojeong Kim, Wooyoung Lee\*, Seungyong  
Lee\*, Kyuhyoung Lee\*(Yonsei University)

#### P26-28

철강 소재의 보론 확산 코팅에 따른 코팅층 성장 거동 및 표면 특성 고  
찰

김성진, 최지성, 정소영, 김선진, 박준식\*(국립한밭대학교)

#### P26-29

Suppression of  $\delta$ -Phase Nucleation by Elastic Energy Penalty  
Enables Room-Temperature Stabilization of  $\gamma$ -CsPbI<sub>3</sub> Thin Films

Tariq Ali\*, Pil-Ryung Cha\*(Kookmin University)

## P27 : 나노융합소재

Room 3층 로비, 4월 30일

#### P27-1

Three-Dimensional Nanomaterial Superlattice Assembly with  
Cymatics-Driven Periodic Patterning

SUNGJUN AHN, Wooyoung Shim\*(Yonsei Univ.)

#### P27-2

Improving Sodium Wetting on  $\beta$ "-Alumina Using Bismuth  
Interlayers

Junwoo Ko, Wooyoung Shim\*(Yonsei Univ.)

#### P27-3

A phenomenological model for cation-eutaxy structures based on  
ABX compounds

Eunmin Hong, Wooyoung Shim\*(Yonsei Univ.)

#### P27-4

Enhancing the Long-Term Stability of SnO<sub>2</sub>-Based Hydrogen  
Sensors via Thermal Aging of Noble-Metal Catalysts

Sungjae Cho, Junho Hwang, Junseok Park, Hyun-Sook Lee\*,  
Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

#### P27-5

Comparative Hydrogen Sensing Analysis of Metal-Catalyzed MOS  
Nanorod Arrays Using a Gas Sensor Inspection System

Junseok Park, Junho Hwang, Sungjae Cho, HyunSook Lee\*, Wooyoung  
Lee\*(Yonsei Univ.)

#### P27-6

Near-field photolithography for nano scale patterning on non-  
planar substrate using Elastomeric photomask

Jaehyeok Seo, Wooyoung Shim\*(Yonsei Univ.)

#### P27-7

Silicon Anode with Achieving Structural and Electrochemical  
Stability Enabled by Si-C Interfacial Bonding

Junho Shin(KERI, UNIST), Jungeun Lee(KERI), Sangyong Lee(KERI,  
UNIST), Jungmo Kim\*(KERI)

#### P27-8

Multi Gas Sensor Module Based Early Detection of Thermal  
Runaway in EV Batteries in Semi-Enclosed Parking Facilities

MinJae Kim, Min-Gi Kim, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

#### P27-9

Wet-spun synthesis of Cu-seeded SWCNT core for fabrication of  
uniform SWCNT-Cu hybrid fiber

SangYong Lee(KERI), Junho Shin(KERI, UNIST), Jungeun Lee, Jungmo  
Kim\*(KERI)

#### P27-10

Quantitative Safety Diagnostics of Lithium-Ion Batteries via Early  
Hydrogen Evolution under Variable Heating Conditions

Mingi Kim, Min-Jae Kim, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)



**P27-11****Solubility and Solution Thermodynamics ( $\Delta H$ ,  $\Delta S$ ) of Carbon in Liquid Co–Sn, Ni–Sn, Co–Ge, and Ni–Ge Systems**

Adnan Yousaf(UNIST), Vijay Gupta(Institute for Basic Science), Md Mahbul Alam(UNIST), Won Kyung Seong\*, Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science)

**P27-12****Angstrom-flat and Large-area Single-crystal Monolayer Graphene on Ni(111) by an Ultrafast Cyclic Synthesis Method**

Yongqiang Meng(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Meihui Wang, Anirban Kundu, Yongchul Kim(Institute for Basic Science (IBS)), Minhyeok Kim(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Dongwook Kwak(Institute for Basic Science (IBS)), Alisher Sultangaziyev(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Da Luo, Won Kyung Seong\*(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST)

**P27-13****Solid-State Carbon Isotope Fractionation via Electromigration**

Alisher Sultangaziyev(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Yongchul Kim(Institute for Basic Science (IBS)), Yongqiang Meng, Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Won Kyung Seong\*(Institute for Basic Science (IBS))

**P27-14****Layer-by-Layer Fabrication of Graphene-Fullerene Nanostructures**

Korlan Duisenova(Institute for Basic Science, UNIST), Madi Arsayay(Institute for Basic Science), Bekbolat Mamyrbekov(UNIST), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science, UNIST), Sun Hwa Lee\*(Institute for Basic Science, UNIST)

**P27-15****Sonication-Assisted Pd Nanogap Networks with Serpentine Geometry for Stable Hydrogen Cycling**

Joonho Lee, Sang-kil Lee, Jiwoo Hong, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

**P27-16****Early Safety Monitoring for Energy Storage Systems via Ultra-Low Methane Detection Using Bi-Layer Catalyst-Functionalized SnO<sub>2</sub> Nanorod Arrays Gas Sensor**

Jongbeom Park, Kyung-Ho Park, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

**P27-17****Hydrogen Emission Feature Mapping for Quantitative Diagnosis of Mechanical Crack Severity in Cylindrical Lithium-Ion Batteries**

Kyung-Ho Park, Kwang-young Yoo, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

**P27-18****Additive Assisted Stoichiometric Growth of Phase Pure CsPbBr<sub>3</sub> Single Crystals for Perovskite Light Emitting Diodes**

Sol Lee, Soo Young Kim(고려대학교)

**P27-19****Chemical-Free and Fully Dry Patterning of Graphene Quantum Dots via Ion-Beam-Assisted Thermal Processing**

Jun Mok Ha\*, Sunmog Yeo, Junhyeok Seo, Jun Kue Park, Chan Young Lee, Yong Seok Hwang, Jae Kwon Suk, In Mok Yang, Hye Ran Jeon, Cho Rong Kim, Myung-Hwan Jung(Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI))

**P27-20****One-Step Fabrication of Porous Laser-Scribed Graphene for Self-Powered NO<sub>2</sub> Gas Sensing Applications**

Chil-Hyoung Lee, Sungmin Youn, Min-Joon Park\*(Korea Institute of Industrial Technology(KITECH))

**P27-21****Time-dependent Nucleation of hBN Layers on Liquid Copper**

Sungwhan Kim(Institute for Basic Science (IBS)), Yongqiang Meng(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Sun Hwa Lee, Won Kyong Seong\*(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST)

**P27-22****The effect of heat treatment on FAU zeolite templated carbon**

Madi Arsayay(Institute for Basic Science (IBS)), Korlan Duisenova, Alisher Sultangaziyev(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Sun Hwa Lee, Won Kyung Seon(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST)

**P27-23****Fabrication of Isotropic Thermal Composites with Segregated Filler Networks of MWCNT-based Core-shell Fillers**

Jungeun Lee(KERI), Junho Shin(KERI, UNIST), Sangyong Lee, Jungmo Kim\*(KERI)

**P27-24****Macroscale Mechanical Properties of Single-Crystal Graphene**

ANIRBAN KUNDU(Institute for Basic Science (IBS)), Seyed Kamal Jalali(University of Trento, Queen Mary University of London), Minhyeok Kim(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Meihui Wang, Da Luo, Sun Hwa Lee(Institute for Basic Science (IBS)), Nicola M. Pugno(University of Trento, Queen Mary University of London), Won Kyung Seong\*(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST)

**P27-25****Phosphorus Vacancy Engineering of P-terminated MoP for Selective Hydrogen Peroxide Electrosynthesis**

Jieun Seo, Hyeuk Jin Han\*(Sungshin Women's Univ.)

**P27-26****해수 환경 하 전기화학적 CO<sub>2</sub> 환원 촉매의 거동 분석**

이미경\*, 전우진(인천대학교)

**P27-27****Controlled Growth of Single-Crystal CoSi Nanowires on Plasma-Treated Si Substrates**

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.)

## P28 : 재료분석

Room 3층 로비, 4월 30일

### P28-1

Atom probe tomography for molecular-level food chemistry: structural and chemical analysis of monosodium glutamate

Seok-Woo Hong, I-Jun Ro, Won-Hyoung Lee, Se-Ho Kim\*(Korea Univ.)

### P28-2

Bias-free Electrostatic Force Separation and Visualization via F-D Curve Analysis

Yeyeong Kim, Junseong Seo, Changhyo Sun, Minyoung Yoon, Minseung Park, Hongseok Kim, Owoong Kwon, Junoh Shim, Sunkook Kim(Sungkyunkwan Univ.), Yunseok Kim\*(Sungkyunkwan Univ.)

### P28-3

Geometry of a Non-Centrosymmetric 'Truncated Octahedron' Diamond Particle

Md Mahbul Alam(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Yongjin Choi(KAIST), Adnan Yousaf(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Won Kyung Seong(Institute for Basic Science (IBS)), Seunghwa Ryu(KAIST), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST)

### P28-4

APT를 이용한 Ni/NiO계면에서의 새로운 산화상 형성 가능성 분석  
조모현, 김세호\*(Korea Univ.)

### P28-5

Current challenges in atom probe tomography and its outlook for SrTiO<sub>3</sub> perovskites

Christian Krug, Se-Ho Kim\*, Yeon-Ha Jo(Korea Univ.)

### P28-6

Real-Time Observation of Skyrmion Dynamics in Fe<sub>3</sub>GaTe<sub>2</sub> under External Stimuli

Sejin An(Seoul National Univ.), Beom Tak Kang, Jun Sung Kim(POSTECH), Hyobin Yoo\*(Seoul National Univ.)

### P28-7

In-situ TEM Analysis of Ferro-rotational Order Switching in 1T-TaS<sub>2</sub>

Huseung Lee, Hyobin Yoo\*(Seoul National University)

### P28-8

하나로(HANARO) 중성자 회절 연구: 잔류응력측정장치(RSI) 및 빔타임 이용 방법

강태욱, 채호병\*, 우완축(한국원자력연구원)

### P28-10

고주파 열처리에 따른 중탄소강의 표면 경도, 미세조직 및 잔류응력 간의 상관관계 연구

김안나\*(에이치엘만도)

### P28-11

글로우 방전 발광 분광 분석법(GD-OES)을 이용한 비금속 주철의 화학 성분 정량 분석 표준화 연구

김재학\*, 김현정, 김동인, 이종민(한국화학융합시험연구원), 추성진\*(유로사이언스)

### P28-12

Second-Layer Graphene Growth Atop Graphene/Cu(111)

NIKETA AVINASH KUMAR(Institute for Basic Science (IBS)), Yongqiang Meng(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Lee Sun Hwa, Pavel Bakharev(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST)

### P28-13

저손상 TEM 분석플랫폼을 활용한 CsPbBr<sub>3</sub>의 미세구조 특성 고찰

권다미, 박경진, 문수현, 서윤경, 유정호, 박윤창\*(나노종합기술원), Zeeshan Tahir, 김용수(울산대학교)

### P28-14

사용후핵연료 심층처분 혐기성 Sulfide 지하수 환경에서 Ni-Cu 합금의 부식저항 특성평가

장준혁\*, 김가영, 박선영, 우정현(한국원자력연구원)

### P28-15

Enhancement of TEM Analysis for Air-Sensitive Metallic Materials using a Portable Vacuum Transfer System with In-situ Plasma Cleaning and Thermal Control

Jaeyoung Eo, Hee-Suk Chung,, JaeHyuck Jang \*(한국기초과학지원연구원)

### P28-16

고강도 고탄소 강의 구오스테나이트 결정립계 현출 및 관찰방법

김학현, 이정훈\*(포항산업과학연구원)

### P28-17

FIB를 이용한 Si기반 P/N 접합소자의 STEM-EBIC 시편준비 방법

박경진, 차호일, 이명근, 권다미(나노종합기술원), 권지희, 안병선(한국에너지기술연구원), 배태성(한국기초과학지원연구원), 박윤창\*(나노종합기술원)

### P28-18

5% Cr Hot Work Die Steel의 V 및 Mo 합금원소에 따른 미세조직 제어와 표면처리에 따른 내열피로 특성 거동

김주엽, 윤국태\*, 홍창완, 이락규(대구기계부품연구원), 윤상일, 최지석(삼기), 손동민(세아창원특수강)

### P28-19

표면처리에 따른 알루미늄 용탕과 다이캐스팅용 공구강의 반응성 연구

이락규\*, 윤국태, 김주엽, 김용유, 김봉고(대구기계부품연구원), 이수안(유림테크)

### P28-20

Phase-Resolved Redox Hysteresis Dynamics on Carbon Steel Probed by Operando FORC-ESM

SuMin Lee, Chenxi Wang, Hyekyung Choi, Seungjae Heo, Yunseok Kim\*(Sungkyunkwan Univ.)

## P29 : 생체재료

Room 3층 로비, 4월 30일

### P29-1

3D-Printed Functional Hydrogels for Hemostatic Diabetic Wound Healing

Kimin Park, Sejoon Bang, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

### P29-2

Sundew-Inspired 4D Platform for Minimally Invasive Bone Cancer Therapy and Bioadhesive Bone Regeneration

Seo Jong Hwa, Sejoon Bang, Hyeong Seok Kang, Chan Ho Moon, Ju Yeong Gwon, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

### P29-3

3D-printed multifunctional hydrogel implant with human nail-derived keratin for anticancer treatment and promoting chronic wound healing through photothermal therapy

Sejoon Bang, Hyeong Seok Kang, Chan Ho Moon, Jong Hwa Seo, Ju Yeong Gwon, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

### P29-4

3D-Printed Biofunctional GelMA-Based Layered Scaffolds for Cartilage Defect Repair

SUNHWA LEE, Ju Yeong Gwon, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

### P29-5

GelMA-Based Electroconductive Hydrogel Nanocomposite for Accelerating Bone regeneration

Gyungmin Ryu, Hyeong Seok Kang, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

### P29-6

All-3D-Printed Soft and Biodegradable Electronics via Porous-Structured Composite

Joo-Hyeon Park(Seoul National Univ.), Ju-Yong Lee\*(Seoul National Univ., Stanford Univ.), Min-Seong Chae(Seoul National Univ., Asan Medical Center), Se-Hun Kang, Jae-Young Bae, Seung-Kyun Kang\*(Seoul National Univ.)

### P29-7

Strategies to Improve Stability of PEDOT:PSS-Coated Neural Interfaces in Physiological Environments

Minki Hong, Gilmo Kim, Seunghun Han, Jahyun Koo\*(고려대학교)

### P29-8

Conductive biomaterials and bioelectronic strategies for peripheral nerve repair

Jun Yeong Hwang, Yerim Lee, Eunsoo Kim, Jahyun Koo\*(고려대학교)

### P29-9

금속 3D 프린팅 Ti-6Al-4V 임플란트에서 TIPS 기반 탄탈륨 나노 구조 형성과 골세포 반응 개선 연구

최시은, 김수영, 장태식\*(부산대학교)

### P29-10

A Lung-on-a-Chip Platform for Real-Time, Label-Free Monitoring of Tissue Stiffness under Breathing-Mimetic Cyclic Strain

Junmin Lee\*, Giheon Ha(POSTECH)

### P29-11

Functionalized In-Bath 3D Printed PDMS via Sputtering-Based Plasma Immersion Ion Implantation for Soft Tissue Regeneration

Sebin Lee, Tae-sik Jang\*, Byoung Soo Kim\*, Jae-seong Lee(Pusan National University), Won-pyo Lee(Chosun University)

### P29-12

AI-Optimized DNA-Guided Siliceous Microgels Inspired by Marine Organisms for Rapid Hemostasis and Chronic Wound Healing

Chan Ho Moon(Hanyang Univ.), Hyun Lee(Kitech), Sejoon Bang, Hyeong Seok Kang, Ju Yeong Gwon, Jong Hwa Seo, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

### P29-13

DLP-Printed Inorganic Nanoparticle-Integrated Hydrogel for Melanoma Treatment and Skin Regeneration

Hyun-Do Jung\*, Geonwoo Kim, Jong Hwa Seo(Hanyang University)

### P29-14

Theragenerative and 3D printed Hydrogel scaffold for Osteosarcoma

Hyeong Seok Kang, Sejoon Bang, Chan Ho Moon, Ju Yeong Gwon, Jong Hwa Seo, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

### P29-15

Soft, conformal tissue-electrode interfaces for bioelectronic devices

SUJIN LEE, Sungeun Kim, Jahyun Koo\*(Korea Univ.)

### P29-16

Bile Duct Inner Structure-Inspired Tantalum Nanopatterned Nitinol Stent for Photothermal and Drug-Responsive Modulation of the Biliary Microenvironment

Nayoung Lee(Hanyang Univ.), Yubeen Park(Asan Medical Center), Chan Ho Moon(Hanyang Univ.), Jung-Hoon Park\*(Asan Medical Center, Ulsan Univ.), Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

### P29-17

A Multifunctional Hydrogel Platform Enabling ROS-Mediated Photodynamic Cancer Therapy

Juyeong Gwon, Sejoon Bang, Hyeong Seok Kang, Chan Ho Moon, Jong Hwa Seo, Heungssoo Shin, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

### P29-18

Customizable Drug-Loaded dECM-GelMA Microneedle Patch for Modulating Pathological ECM Remodeling in Fibrotic Skin

Geonho Lee, Junmin Lee\*(POSTECH)

## P30 : 가공-열처리

Room 3층 로비, 4월 30일

### P30-1

Directed Energy Deposition으로 제조된 Inconel 625의 열처리 영향에 따른 조직 및 인장 특성 연구

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

#### P30-2

열처리 온도에 따른 Zr-702 열간압연재의 미세구조 및 기계적 특성 변화 연구

허민아, 신승환, 이강진, 박선영, 송기안\*(국립공주대학교)

#### P30-3

극저온 압연된 CoCrFeMn 엔트로피 합금에서 열처리가 기계적 물성 및 미세조직에 미치는 영향에 관한 연구

송동현(충남대학교, 국방기술진흥연구소), 정 현, 최정훈, 이동현\*(충남대학교)

#### P30-4

고탄소강의 아이계 및 상간 구상화 열처리에 따른 미세조직 변화 거동 연구

강지인, 이승희, 강신곤\*(동아대학교)

#### P30-5

열처리 후 헬릭컬 기어의 깊이별 상 분포 정량화 및 혼재상(Multi-phase)의 기계적 물성 평가

이인복, 이명규\*(서울대학교), 이경민, 이신영(현대모비스)

#### P30-6

열처리 조건이 구상화처리 된 0.95 wt.%C 고탄소강 (SK95)의 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향

김규범, 이승찬, 한재준, 김도형\*(영남대학교)

#### P30-7

Mechanical Property Evaluation of Ti-low Maraging Steel 300 Fabricated via Scrap Recycling Process

Jini Park, Jiwon Choi, Byoungyong Im, Jaelyang Park\*(고등기술연구원)

#### P30-8

고망간강(High-Mn Steel) 체결류의 열처리 조건 최적화 및 제조방식에 따른 특성 평가

허성보\*(한국생산기술연구원), 박영민(화신하이테크), 박인욱, 김왕렬, 김준호(한국생산기술연구원)

#### P30-9

다양한 미량 합금원소가 첨가된 슈퍼 듀플렉스 내식강의 부식특성 조율, 김정민\*(한밭대학교)

#### P30-10

Influence of Cleanliness Variation Induced by Ingot Processing on Microstructural Homogeneity and Temper Embrittlement Resistance in 3.5NiCrMoV Steel

Gayoung Yoo, Dongbae Kim\*, Hyewon Choi, Youngmin Lee, Hyunjeong Shin(대구기계부품연구원)

#### P30-11

열간 단조 금형 STD61의 질화 열처리 두께 예측 모델 개발 전동술\*(한국생산기술연구원)

#### P30-12

Al-Mg-Si계 합금의 미세조직과 경도에 미치는 열처리의 영향 김선진(한밭대학교), 신경식(세림티앤디), 김정민\*(한밭대학교)

#### P30-13

Reactive spark plasma sintering of in-situ synthesized TaSi<sub>2</sub>-SiC composites: Densification behavior and phase evolution Lee Jeong Han\*(한국생산기술연구원)

#### P30-14

Pd-Ag-Cu 합금의 미세조직과 기계·전기적 물성에 미치는 용체화 및 시효 열처리의 영향

이병수\*, 최민호(한국생산기술연구원), 김상권, 송람, 조훈(한국생산기술연구원), 박정웅, 박형진, 설재복(국민대학교), 이석연, 문정탁(MKE전자)

### P31 : 고온재료

Room 3층 로비, 4월 30일

#### P31-1

Haynes 282 초합금 Laser 용접부의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 용접후열처리 효과

백재영, 양희평, 조덕현, 이학성, 전종배\*(동아대학교)

#### P31-2

Alloy Design of a Novel Positive-Misfit Superalloy for AM: Enhanced Crack Resistance and Unique Deformation Behavior

Kim Tae Gyeong, Lee A Reum, Hong Hyun Uk\*(Changwon National University)

#### P31-3

적층제조용 Ni기 초내열합금 설계와 열처리 설계

이찬희, 노현빈, 진민수(한국과학기술원), 김태경, 홍현욱(국립창원대학교), 최벽파(한국과학기술원)

#### P31-4

인코넬 939 계열 니켈계 내열합금의 석출상 구성 원소 분율 제어를 통한 기계적 특성 최적화 전략

김동환, 김민석, 김재권, 민현기(서울대학교), 정희찬(한화에어로스페이스), 박은수\*(서울대학교)

#### P31-5

고내식·고청정 Ni-Cr-Mo-W계 초내열합금의 열역학 기반 스크리닝을 통한 성분계 최적화

김종훈, 주하연, 이상현(국립창원대학교), 김덕령(세아창원특수강), 홍현욱\*(국립창원대학교)

#### P31-6

석출물 제어 미세조직이 Inconel 718의 인장 균열 특성에 미치는 영향

허수빈(한국생산기술연구원, 부산대학교), 안지섭(두산에너지빌리티), 여승현, 조아라, 이나경(한국생산기술연구원, 부산대학교), 김종식(KPCM), 황선광\*(한국생산기술연구원)

#### P31-7

Creep Behavior at 630°C of Ferritic/Martensitic Heat-Resistant Steel with Cu Addition

Duhyun Kim, Byeong-Hyeon Lee(Korea Institute of Science and Technology), Seong Hoon Kim(Korea Institute of Materials Science), Woo-Sang Jung, Dong-Ik Kim, Gyeong Ho Kim(Korea Institute of Science and Technology), Seoung-Ho Lim(Korea Advanced Institute of Science and Technology), Jin-Yoo Suh\*(Korea Institute of Science and Technology), Seok Su Sohn\*(Korea University), Pyuck-Pa Choi\*(Korea Advanced Institute of Science and Technology), Jong-Ho Shin(Doosan Enerbility Co., Ltd.), Tae-Ho Lee\*(Korea Institute of Materials Science)

#### P31-8

HIP 공정으로 제조된 Zr 피복관용 Cr-Al 타겟의 Zr 첨가에 따른 미세조직 및 산화거동에 미치는 영향

심재현, 김대현, 이준구, 박상하, 홍순직\*(국립공주대학교)

#### P31-9

열간 등압 성형을 통해 제조된 초내열합금 분말 성형체의 자연 냉각 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성

김대웅\*, 김동훈, 김연태, 김규식, 고윤석, 양성호(국방과학연구소)

#### P31-10

분말야금법으로 제작된 고강도 초내열합금의 미세조직 제어를 위한 단조 성형 연구

김규식\*, 송영범, 이성호, 김동훈, 김대웅, 고윤석(국방과학연구소), 조재현(케이에스피), 김정기(경상국립대학교)

#### P31-11

니켈계 단결정 합금의 고용화 열처리 조건에 따른 미세조직 변화

고윤석, 김대웅, 김규식, 김연태, 김동훈, 송영범, 이성호, 양성호\*(국방과학연구소)

#### P31-12

TZM 합금의 Si 및 B 기반 확산 코팅 공정에 따른 미세구조 및 고온 산화 거동 비교 분석

최지성, 김성진, 정소영, 김선진, 박준식\*(국립한밭대학교)

#### P31-13

니켈 초합금의 조성 변화에 따른 나노 석출물 및 탄화물의 에칭 기법 연구

홍승균, 이초현, 양성현, 강민우, 강다원, 박형진(국민대학교), 윤대원(한국재료연구원), 박노근(영남대학교), 홍현욱\*(국립창원대학교), 설재복\*(국민대학교)

#### P31-14

유동 반응에 의한 텅스텐 산화물의 환원 및 W 입자 제어에 대한 연구

하국현\*, 박민수\*, 신하진, 박정우(한국재료연구원)

## P32 : 열전

Room 3층 로비, 4월 30일

#### P32-1

Se 치환에 따른 Wittichenite  $\text{Cu}_3\text{BiS}_{3-y}\text{Se}_y$  고용체의 열전특성

이푸른, 이도현, 김일호\*(국립한국교통대학교)

#### P32-2

Cu 비화학양론 결핍에 의해 제어된 보르나이트  $\text{Cu}_{4-x}\text{FeS}_4$ 의 전하수송 및 열전성능

오혜민, 김형일, 김일호\*(국립한국교통대학교)

#### P32-3

Sn 도핑된 위티체나이트  $\text{Cu}_3\text{Bi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{S}_3$ 의 열전 특성

이도현, 이푸른, 김일호\*(국립한국교통대학교)

#### P32-4

기계적 합금화와 열간 압축 공정으로 준비된  $\text{Cu}_4\text{Bi}_4\text{S}_9$ 의 열전 특성

추규성, 김성윤, 김일호\*(국립한국교통대학교)

#### P32-5

Cu 결핍에 의해 유도된 Cu-Bi-Se계 파보나이트 구조군 화합물의 합성 및 열전 수송 특성

김성윤, 추규성, 김일호\*(국립한국교통대학교)

#### P32-6

비화학양론적 보르나이트  $\text{Cu}_{5+x}\text{Fe}_{1+y}\text{S}_4$ 의 전하 수송 및 열전 특성

김형일, 오혜민, 이승민, 오현식, 김일호\*(국립한국교통대학교)

#### P32-7

Effect of Ag-content Variation on the Microstructure and Thermoelectric Properties of  $\text{AgSbTe}_2$ -based Materials

Hyoju Son, Suhyeon Woo, Joseph Ngugi Kahiu, Samuel Kimani Kihoi, Jihwan Im, Ho Seong Lee\*(Kyungpook National Univ.)

#### P32-8

Microstructural Analysis of (TiCr)FeSb Double Half-Heusler Thermoelectric Material

Suhyeon Woo, Ho Seong Lee\*, Hyoju Son, Jihwan Im, Joseph Ngugi Kahiu, Samuel Kimani Kihoi (Kyungpook National Univ.)

#### P32-9

Utilization of Electroplated Metal Layers for Enhancing Performance of Bismuth Telluride-Based Thermoelectric Modules

NGA LINH VU, Van-Ninh Tran, Tien-Anh Doan, Cuong-Tung Do, Injoon Son\*(경북대학교)

#### P32-10

Measurement of In-plane Thermal Conductivity of Two-dimensional van der Waals Ferromagnets

Minseok Choi(KRISS, Yonsei Univ.), Jae Yeon Seo(Yonsei Univ.), Seunghoe Koo, Young Jai Choi(KRISS), Hosun Shin\*(Yonsei Univ.)

#### P32-11

Fabrication of Dimension-Reduced and Bond-Distorted ZnSb via Li Intercalation

Ji Hee Pi, Chul Oh Park(Yonsei University), Yong Hoon Kim(University of Seoul), Ga Yeong Koo, Ki Wook Bae(Yonsei University), Sang Hyun Ji(Sogang University), Ik Seon Kwon(Kunsan National University), Hyun Sik Kim\*(University of Seoul), Kyu Hyung Lee\*(Yonsei University)

#### P32-12

용매열 합성 기반 SnSe microplate 소결체의 결정립 크기와 전기적 특성간의 상관관계 규명

강태경, 오세민(부경대학교), 손지희, 김봉서(한국전기연구원), 정찬원\*(부경대학교)

#### P32-13

Predicting Thermoelectric Performance via Magnetic Interactions in  $\text{NiCl}_{2-x}\text{Br}_x$  and  $\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Sb}$ .

Yunseok Shin, Taesu Park(POSTECH), Won-Joon Son (North Carolina State University), Ji Hoon Shim(POSTECH), Changhoon Lee (POSTECH), Myung-Hwan Whangbo(North Carolina State University)

#### P32-14

An Interactive Phonon Scattering Simulator Based on the Debye-Callaway Model

Joseph Ngugi Kahiu, Samuel Kimani Kihoi, Hyoju Son, SuHyeon Woo, Jihwan Im, Ho Seong Lee\*(Kyungpook National University)



### P32-15

#### Synergistic Effect of Ag/Mn Co-doping on the High-Temperature Thermoelectric Properties of $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$

Ye-Ji Shin, Eun-Ji Meang(Kyungpook National Univ., DAEYANG Co., Ltd.), Joseph Ngugi Kahiu, Hyoju Son(Kyungpook National Univ.), Kwan-Ho Park, Jaehan Chung(DAEYANG Co., Ltd.), Ho Seong Lee\*(Kyungpook National Univ.)

### P32-16

#### Monolithic All-ZnO Tandem Thermoelectric Generators for High Voltage and Output Power

Hyunjin Joh, Seong Min Park, WooJun Seol(GIST), Gopinathan Anoop(Amritha Vishwa Vidyapeetham), Hyeon Jun Lee\*(Kangwon National Univ.), Ji Young Jo\*(GIST)

## P33 : 금속역사

Room 3층 로비, 4월 30일

### P33-1

#### X-선 CT를 활용한 총통의 주조기법 연구

김재연(국립공주대학교), 김라미(더한문화유산연구원), 조남철\*(국립공주대학교)

### P33-2

#### 황남대총 출토 철기의 미세조직 분석을 통한 신라시대 철기 제작기술 연구

김소진, 홍주현\*(국립문화유산연구원)

## P34 : 복합재료

Room 3층 로비, 4월 30일

### P34-1

#### Enhanced electrical property of triboelectric energy harvesting using Ni-W-based inorganic-organic composites via insulation assisted interfacial charge engineering

Wooseong Jeong, Gihyeon Han, Kyuhyoung Lee\*(Yonsei University)

### P34-2

#### 주조 기반 알루미늄 복합소재의 기계적 및 열적 특성 연구

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

### P34-3

#### cBN 강화재 입도 제어 및 $\text{Gd}_2\text{O}_3$ 코팅을 통한 고열전도도 중성자 흡수 AI 복합재료 개발

조은서, 강민우, 김민수, 이동현, 김정환\*, 이상복(한국재료연구원), 김양도(부산대학교), 조승찬\*(한국재료연구원)

### P34-4

#### Ni-P 무전해도금을 통한 cBN/AI 복합재의 표면 특성 향상 연구

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

### P34-5

#### 나노인덴테이션 데이터 기반 유한요소해석을 통한 HP 및 SPS로 제조된 Al/B<sub>4</sub>C 복합재료의 강화기구 분석

권택균, 조의제\*(국립순천대학교)

### P34-6

#### Effect of carbon content on the microstructure and mechanical properties of WC-Mo<sub>2</sub>C-Co strengthened by $\eta$ -phase

Jinwoo Seok(한국생산기술연구원, 경희대학교), Juree Jung, Jongtae Kim, JeSun On, Seul-Ki Han (한국생산기술연구원), Bin Lee(경희대학교), Junhee Han, Leeseung Kang\*(한국생산기술연구원)

## P35 : 타이타늄

Room 3층 로비, 4월 30일

### P35-1

#### Titanium Grade 7의 제조 공정에 따른 미세조직 및 부식특성 평가

이진우, 강신곤\*(동아대학교)

### P35-2

#### 열간 및 상온 압축 변형이 Ti-5Mo-4Fe 합금의 slip/twin 거동에 미치는 영향

이재관, 박정연, 이동근\*(순천대학교)

### P35-3

#### Omega Phase Formation during DED and Its Role in Strength-Ductility Synergy of Ti-Cr Alloys

Yeonju Noh, Yejun Park, Donghyeon Chae(Korea Advanced Institute of Science and Technology), Young-hwan Cha, Hyub Lee(Korea Institute of Industrial Technology), Pyuck-Pa Choi\*(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

### P35-4

#### 항공기 엔진 부품용 TiAl 잉곳의 화학성분 균질도 제어기술개발

임연민, 이민숙(에이치브이엠), 강성훈(한국재료연구원), 나혜성\*(에이치브이엠)

### P35-5

#### Ti-6Al-4V 판재 전자빔 용접부의 Focusing Current 변화 및 후열처리에 따른 미세조직과 경도 특성

이수정, 이성호, 윤재원(부산대학교), 김상훈(국방과학연구소), 이태경\*(부산대학교)

### P35-6

#### Ti-Nb-Zr-X-O 합금에서 X 원소 및 산소 함량 변화에 따른 Gum metal 거동 평가

김근채, 이혜미, 김재일\*(동아대학교)



## P36 : 항공재료

Room 3층 로비, 4월 30일

### P36-1

저궤도 인공위성용 소재 개발을 위한 원자산소와 재료 간 상호작용 연구

조연하, 이원형, 김세호\*(고려대학교)

### P36-2

단결정 니켈기 초내열합금의 크리프 거동에 미치는 HIP 공정의 영향  
조대현(국립창원대학교), 구지호(한화에어로스페이스), 이재현\*, 진혜승, 장익제  
(국립창원대학교)

## 알루미늄 Room 2층 201A, 4월 28일

### [알루미늄 1-1 | 09:00]

**비열처리형 Al-Si HPDC 주조 합금의 미세조직, 인장 특성 및 열전도도 간 상관관계 연구:** 강창안, 이윤호(한국재료연구원), 박하음, 박정민(한국재료연구원, 고려대학교), Tian Zhanfeng(Lizhong Alloy Group), 노중석, 박성락(한주라이트메탈), 조영희, 조윤희\*(한국재료연구원)

**Keywords:** HPDC, Al-Si, 비열처리, 미세조직 분석, 기계적 특성, 열전도도

본 연구에서는 고압다이캐스팅(HPDC) 공정으로 제조된 비열처리형 Al-Si계 주조 합금을 대상으로, 합금 원소에 따른 미세조직 변화와 인장 특성 및 열전도도 간의 상관관계를 분석하였다. 다양한 합금 원소가 첨가된 Al-Si계 합금들을 체계적으로 비교하였으며, 열역학 시뮬레이션을 통해 금속간화합물(IMCs)의 형성을 예측하고 이를 실제 미세조직 분석 결과와 검증하였다. 열전도도는 주로 기지 내 고용 원소 함량에 의해 결정되었으며, 계산 결과와 실험값 사이에서 일관된 경향이 확인되었다. Mg와 Cu 함량 증가에 따라 열전도도는 감소하였다. 기계적 특성에서 고용강화와 석출강화 효과는 기지 경도와 유사한 거동을 보였으나, 전체 경도와 항복강도는 상이하여 IMCs의 항복강도 기여를 함께 고려할 필요가 있었다. IMCs 주변의 전위 밀도(GNDs) 증가는 역응력(back stress)을 유발하고 HDI(Hetero-Deformation Induced) 강화 거동을 활성화시켜 항복강도와 가공경화능을 향상시켰다. 반면, 취성 Fe-IMCs 분율의 증가는 연신율을 저하시켰으나, 유사한 Fe-IMCs 양에서도 전체 IMCs 체적분율이 높은 합금에서는 가공경화능 향상에 의해 연신율이 개선되었다. 기존 연구들이 제한된 합금 원소의 영향에 주로 집중한 것과 달리, 본 연구는 다양한 합금 원소의 복합적 상호작용이 HPDC 합금의 열적·기계적 특성에 미치는 영향을 종합적으로 규명하였다.

### [알루미늄 1-2 | 09:15]

**스파크 플라즈마 소결 및 열처리에 따른 Al-Mg-Zn-Cu Crossover 합금의 동시 석출 거동과 기계적·내식 특성:** 안다영(국립순천대학교), 김세훈(한국자동차연구원), 신세은\*(국립순천대학교)

**Keywords:** Al crossover 합금, 분말야금, 소결, 미세조직

본 연구에서는 5xxx계의 성형성과 7xxx계의 강도를 동시에 확보하기 위해 Al-5.5 wt.% Mg-5.5 wt.% Zn-0.5 wt.% Cu 조성을 설계하였으며, Spark Plasma Sintering (SPS) 공정을 통해 치밀화된 시편을 제조하였다. 소결 후 T6를 수행하여 합금의 석출 거동과 기계적 성질을 분석하였다. 미세조직 관찰 결과, 소결 직후 결정립계에 편석되었던 Mg-Zn-Cu 성분들이 T6 열처리 후 미세하고 균일한 입내 석출물로 분포함을 확인하였다. 특히 Zn/Mg 비의 정밀 제어를 통해  $T'(Mg_{32}(Al, Zn)_{49})$ 상의 형성을 유도하고  $\eta'$  상을 동시 석출시켰다. 이러한 석출상 조합은 강화 효과를 향상시키는 동시에 결정립계의 갈바니 부식을 완화하여 내식성 저하를 방지하였다. 기계적 특성 평가 결과, crossover 합금은 상용 7xxx 합금 대비 우수한 경도, 탄성계수 및 압축 강도를 나타냈다. 이는 T'상에 의한 전단 강화와  $\eta'$ 상에 의한 Orowan 강화 메커니즘이 동시에 작용한 결과이며, SPS 공정으로 확보된 균일한 조직이 주요 요인으로 작용하였다. 본 연구는 조성 제어와 SPS 공정을 통해 고강도·내식성 알루미늄 설계를 위한 효과적인 접근법을 제시한다.

### [알루미늄 1-3 | 09:30]

**Zn 함량 변화에 따른 Al-Zn-Mg-Cu 합금의 재결정·석출 미세조직 진화와 전기화학 부식/SSRT 환경 민감성의 연계 분석:** 정혜지, 신선호, 유재성(국민대학교), 조윤희(한국재료연구원), 김재현(국민대학교), 김형욱(한국재료연구원), 성효경\*(국민대학교)

**Keywords:** Al-Zn-Mg-Cu 합금, Zn 함량, 재결정, 석출상, 응력 부식 균열

Al-Zn-Mg-Cu 계 고강도 합금은  $\eta'$  석출 강화로 항공·수송 구조재에 널리 적용되지만, 석출상 및 grain boundary 미세조직에 의해 전기화학적 이질성이 증가하여 국부 부식과 환경 취화(SSRT) 민감성이 함께 커지는 trade-off를 갖는다. 특히 재결정 조직과 결정립 크기 변화는 변형·균열 거동뿐 아니라 부식 개시 경로에도 영향을 주어 강도와 내환경 신뢰성을 동시에 좌우한다. 그러나 기존 연구는 Zn/Mg ratio, Cu 함량, 미량원소 및 열처리 조건이 함께 변하는 경우가 많아, Zn 함량의 독립적 영향을 분리하여 해석하기 어렵다. 본 연구는 Mg와 Cu를 유지한 상태에서 Zn 함량만 단계적으로 변화시킨 AA7075(5.6 wt.% Zn)/AA7050(6.2 wt.% Zn)/AA7068(7.8 wt.% Zn)을 동일 공정 및 동일 T6 조건에서 비교하여, Zn 변화가 재결정-석출-부식/환경 민감성으로 연동되는 양상을 체계적으로 정리하였다. EBSD 정량 결과, Zn 증가는 전반적으로 재결정을 촉진하며 결정립 미세화 경향을 보였으나, AA7050에서 선형 법칙이 깨지는 비선형 응답이 확인되었다. SEM에서는 AA7050에서 조대한 2차상의 높은 분율/분포가 관찰되어, 특정 Zn 구간에서 재결정 경로와 grain boundary 전기화학 경로를 동시에 재편하는 미세조직 스위치로 작동할 가능성을 시사하였다. TEM에서는 Zn-Mg(일부 Cu) 농화 석출상이 확인되어, Zn 증가가  $\eta'/\eta$  계열 석출 강화에 기여하는 동시에 전기화학적 이질성을 키워 부식 개시를 촉진할 수 있음을 뒷받침한다. 전기화학 평가에서 Zn이 가장 높은 AA7068은 OCP가 가장 음전위(-0.786 V)를 보였고, polarization 결과 부식 속도 지표(icorr)가  $1.91 \times 10^{-6}$  (7075)  $\rightarrow$   $3.41 \times 10^{-6}$  (7050)  $\rightarrow$   $5.47 \times 10^{-6}$  A·cm<sup>2</sup> (7068)로 증가하여, Zn 증가에 따라 부식 저항이 저하되는 경향이 정량적으로 확인되었다. 또한 SSRT에서 공기 대비 NaCl +0.1 V(양극 분극) 조건에서 초기 파단 및 연성 저하가 관찰되어, 전기화학적 활성화가 기계적 열화를 직접 유도함을 보여준다. 본 연구는 Zn-only 조성 변화를 통해 재결정, 석출 미세조직, 전기화학 지표 및 SSRT 응답의 연동 관계를 정리함으로써, 고강도 Al-Zn-Mg-Cu 합금의 강도-내환경 신뢰성 동시 설계를 위한 기초 자료와 해석 근거를 제공한다.

**[알루미늄 1-4 | 09:45]**

**Al<sub>50</sub>Mg<sub>30</sub>Si<sub>10</sub>Cu<sub>5</sub>Zn<sub>5</sub> 합금의 미세조직, 석출거동, 기계적 특성 평가:** 전정민, 박성현(전북대학교 신소재공학부), 신은주(한국원자력연구원 중성자과학부), 정재길\*(전북대학교 신소재공학부, 전북대학교 신소재개발연구센터)

**Keywords:** Al-Mg<sub>2</sub>Si alloy, Multicomponent Al alloy, Transmission electron microscopy, Atom probe tomography, Small-angle neutron scattering

Al-Mg<sub>2</sub>Si계 합금은 낮은 밀도와 우수한 기계적 특성으로 경량 구조재료로서 활용 가능성이 높은 소재이다. 최근에는 다량의 합금 원소를 포함하는 다성분합금 설계를 통해 강화 2차상의 형성을 유도함으로써 기계적 특성을 향상시키는 동시에 시효 열처리를 통한 석출강화를 유도하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 합금은 응고 과정에서 조대한 초정 Mg<sub>2</sub>Si상과 높은 분율의 2차상이 형성되며, 이는 응력 집중을 유발하여 연성 및 파괴 저항성을 저하시킨다는 한계를 가진다. 상들은 응력 집중을 유발하여 연성 및 파괴 저항성을 저하시킨다는 한계를 가진다. 따라서 기계적 특성 향상을 위해 초정 Mg<sub>2</sub>Si상을 미세화 시키고자 하는 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 이를 위해 미량 원소를 첨가하여 Mg<sub>2</sub>Si상의 형상과 크기를 제어하려는 다양한 시도가 이루어지고 있다. 특히 P 첨가는 Mg<sub>3</sub>P<sub>2</sub>상을 형성하여 초정 Mg<sub>2</sub>Si의 이중 핵생성을 촉진함으로써 Mg<sub>2</sub>Si상의 미세화를 유도하는 효과적인 방법으로 보고되고 있다. 그러나 고품량의 Mg를 포함하는 다성분계 Al-Mg<sub>2</sub>Si 합금에서 P첨가에 따른 초정 Mg<sub>2</sub>Si상의 변화와 기지 내 나노 석출물에 대한 정량적 분석 연구는 아직 부족하다. 따라서 본 연구에서는 Al<sub>50</sub>Mg<sub>30</sub>Si<sub>10</sub>Cu<sub>5</sub>Zn<sub>5</sub> 합금을 대상으로 P 첨가/미첨가 조건에서 450 °C에서 용체화 처리 후 초정 Mg<sub>2</sub>Si상과 2차상의 미세구조를 X선 회절 분석 (X-ray diffraction, XRD), 주사전자현미경 (Scanning electron microscopy, SEM)을 통해 분석하였다. 또한 25 °C와 120 °C에서 경도 및 전기전도도 측정을 수행하여 시효 거동을 조사하였다. 더불어 T6 열처리 후 압축강도 측정하고, 열처리 전/후의 기계적 특성을 비교 평가하였으며, 투과전자현미경 (Transmission electron microscopy, TEM), 원자 탐침 단층 촬영 (Atom probe tomography, APT), 소각 중성자 산란 (Small-angle neutron scattering, SANS)을 활용하여 기지 내 나노 석출상의 크기와 분율을 정량적으로 분석함으로써 합금의 석출거동을 규명하고자 하였다.

**[알루미늄 1-5 | 10:00]**

**저전도 냉각수 환경에서 유속에 따른 알루미늄 합금의 부식 메커니즘:** 김건일, 이근재(성균관대학교 신소재공학과), 송주승(현대자동차 표면처리재료개발팀), 김정구\*(성균관대학교 신소재공학과)

**Keywords:** 알루미늄 합금, 저전도 냉각수, 유기 부식 방지제, 유동 가속 부식

알루미늄 합금은 우수한 열전도도와 경량성으로 인해 자동차 열관리 시스템의 핵심 소재로 활용되고 있다. 전기자동차의 경우, 냉각수 누수로 인한 단락 및 화재 위험을 방지하기 위해 냉각수의 전기전도도가 엄격히 제한되며, 이에 따라 기존 무기계 부식 방지제 대신 비이온성 유기 부식 방지제가 주로 사용된다. 그러나 전도도 제약으로 인해 부식 방지제의 첨가 농도가 제한된다. 이러한 저농도 냉각수 환경에서 발생할 수 있는 유동 조건에서 알루미늄 부품의 부식 메커니즘을 분석하였다. 본 연구에서는 냉각수가 흐르는 열교환기 튜브용 Al-Mn 합금 및 Al-Mn-Zr 개발 합금에 대해 저전도 냉각수 환경에서 유속 변화가 부식 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 유속을 증가하기 위해 회전 원통 전극을 이용한 동전위 분극 시험 및 전기화학 임피던스 분석 결과, 일반적인 유동 가속 부식과 달리 유속이 증가할수록 부식 속도가 감소하고 보호성 피막의 저항이 증가하는 거동을 확인하였다. 이러한 거동은 유속 증가에 따라 분자량이 크고 농도가 낮은 유기 부식 방지제의 물질 전달이 촉진되어, 확산 지배 조건보다 빠르게 금속 표면에 흡착되기 때문으로 해석된다. X선 광전자 분광법 분석을 통해 유동 조건에서 유기산계 부식 방지제 유래 보호성 피막 형성이 촉진됨을 확인하였다. 또한, 켈빈 탐침 힘 현미경 분석 결과, 형성된 보호성 피막은 알루미늄 기지와 석출상 사이의 표면 전위차를 감소시켜 마이크로 갈바니 부식을 효과적으로 억제하는 것으로 나타났다. 본 연구는 저전도 냉각수 환경에서 유속이 부식을 가속하는 인자가 아니라, 오히려 유기 부식 방지제의 흡착을 촉진하여 치밀한 보호성 피막 형성을 유도하고 알루미늄 합금의 내식성을 향상시키는 메커니즘을 규명하였다.

**[알루미늄 1-6 | 10:15]**

**Mn 첨가에 따른 6XXX계 알루미늄 합금의 응고 중 미세구조 진화 및 열균열 거동에 대한 in situ X-ray 이미징 연구:** 조원준, 한인성\*(경북대학교)

**Keywords:** Hot tearing, 6XXX alloy, recycling, in situ X-ray radiography, Mn addition

재활용 알루미늄 합금은 에너지 절감 및 탄소 배출 저감 측면에서 효과적이나, 재활용 과정 중 혼입되는 철(Fe)은 응고 시 판상 형태의 β-AlFeSi 금속간화합물을 형성하여 액체 유동을 저해하고, 열균열(hot tearing)을 악화시키는 요인으로 작용한다. 이를 완화하기 위한 방법으로 망간(Mn)첨가를 통해 상대적으로 덜 해로운 α-Al(Fe, Mn)Si 금속간화합물로의 상변화를 유도할 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 자동차용 구조재료로 널리 사용되는 6XXX계 합금에 Mn을 첨가하고, 응고 과정 중 미세구조 진화와 hot tear 생성·전파 거동을 방사광가속기 기반 in situ radiography를 활용하여 실시간으로 관찰하였다. 분석 결과, Mn 첨가는 응고 중 생성되는 결정립의 크기와 금속간화합물의 상에 영향을 끼치며, 이에 따라 hot tear 발생 경향에도 유의미한 영향이 나타나는 것으로 관찰되었다. 특히 Mn이 첨가되지 않은 조건에서 hot tear의 면적 분율이 가장 크게 나타났으며 이는 β-AlFeSi 금속간화합물이 응고 말기 액체 공급 경로를 차단하기 때문으로 해석된다. 본 연구 결과는 Mn 첨가에 따른 미세구조 제어가 6xxx계 재활용 알루미늄 합금의 열균열 저감에 중요한 역할을 함을 실시간 이미징을 통해 시각적으로 확인하였으며, 향후 미세구조 설계를 통한 구조 건전성 향상 전략 수립에 기초 자료를 제공한다.

**[알루미늄2-1 | 10:40]**

**초음파 인가로 제작된 A6008 합금 연속주조재의 균질화 처리 조건에 따른 미세조직 변화:** 최희은, 송람\*, 조훈, 신제식, 김태형, 정재현, 조대연(한국생산기술연구원)

**Keywords:** A6008 합금, 균질화 처리, 초음파 처리, 미세조직, 결정립 미세화

연속주조 공정으로 제조된 알루미늄 합금 빌렛은 응고 과정에서 형성되는 조대한 정출물과 불균일한 응고조직으로 인해 후속 공정에서 품질 저하를 초래할 수 있다. 이를 개선하고자 공업적으로는 응고조직 미세화를 위해 Al-Ti-B계 미세화제를 첨가하는 것이 일반적이거나, 과침가 시에 응집체를 형성할 수 있어 제품 불량률의 원인이 되기도 한다. 한편, 용탕 초음파 처리(Ultrasonic melt treatment)는 용탕 내 고-액 공존 영역에 초음파를 인가하여 cavitation 및 acoustic streaming에 따른 Dendrite fragmentation을 유도함으로써 보다 균일하고 미세한 응고조직 형성이 가능하다. 이를 통해 정출물의 분산 및 용질 원소의 균일한 분포를 기대할 수 있다. 이처럼 응고 단계에서 조직이 미세하고 균일하게 형성될 경우, 이후 균질화 처리 과정에서 정출물의 변화 및 용질 원소의 균질화 거동 제어에 효과적이다. 이는 후속 압출 공정에서 요구되는 고온 변형 특성 확보에도 유리하게 적용할 수 있다. 따라서, 이러한 초기 응고조직의 특성을 고려한 균질화 처리 조건 최적화가 중요하다. 본 연구에서는 연속주조 중 초음파를 인가하여 A6008 직경 8인치(약 200 mm) 알루미늄 빌렛을 제작하여 균질화 처리를 진행했다. 균질화 처리는 승온 후 540°C 및 560°C에서 각각 1, 2, 4, 8, 12시간 유지한 뒤 냉각 조건으로 진행하였다. 이후 균질화 처리 조건에 따른 정출물 및 석출물 형성 거동과 고온 변형 특성을 비교 분석하여 고온가공성 향상에 유리한 열처리 조건을 평가하였다.

**[알루미늄2-2 | 10:55]**

**재활용 스크랩을 사용한 6xxx계 합금에서 산화철이 기계적 물성과 미세 조직에 미치는 영향:** 김하늘, 장병록\*, 김희국(인하대학교)

**Keywords:** 재활용, 주조, 미세조직, 석출물, 열처리

세계적으로 탄소 배출량 감소에 대한 요구가 증가하고 있으며, 알루미늄 산업계에서도 이를 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. 이 중 스크랩을 재활용하는 방법은 기존 알루미늄 정련에 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 스크랩 분류 과정에서 분리하기 힘든 산화철이 알루미늄 용탕에 혼입될 경우를 가정하여 산화철이 알루미늄 합금의 최종 품질에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 알루미늄 용탕 제조 과정에서 산화철을 최대 5%까지 투입한 후 냉각 속도에 따른 미세 조직 차이와 물성을 확인하였으며, 균질화 처리 과정에서 석출물의 변화 거동을 조사하였다. 이를 통해 혼입된 산화철이 유발할 수 있는 알루미늄 합금 내부의 Oxide film과 석출상에 의한 영향을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 알루미늄 재활용을 보다 활성화하여 통한 탄소 배출 감소에 기여하고자 한다.

**[알루미늄2-3 | 11:10]**

**펠렛형 Al-Zn-In 합금 음극의 알루미늄-공기 전지 성능 향상 및 집전체 소재 영향:** 손경호, 이근재, 김정구\*(성균관대학교)

**Keywords:** 알루미늄, 알루미늄-공기 전지, 펠렛형 음극, 알루미늄 합금, 집전체

알루미늄-공기 전지는 이론 에너지 밀도가 8, 100 Wh/kg에 달하는 고에너지 밀도 전원 시스템으로 주목받고 있으나, 강염기성 전해질 환경에서 알루미늄 음극의 자가부식 및 기생적인 수소 발생 반응으로 인해 음극 활용률이 저하되는 한계를 가진다. 특히 주유형 알루미늄-공기 전지를 위한 펠렛형 음극 구조에서는 전기적 연결을 위한 집전체와의 접촉이 필수적이며, 이중 금속 간 갈바닉 부식이 음극 열화를 가속하는 주요 요인으로 작용할 수 있다. 본 연구에서는 고순도 4N Al 펠렛과 Al-Zn-In 합금 펠렛 음극을 대상으로, 알루미늄-공기 전지 환경에서의 부식 거동과 방전 성능을 비교·분석하였다. 침지 시험 및 수소 발생 실험 결과, Al-Zn-In 합금 펠렛은 Zn 기반 부식 생성물의 형성으로 인해 4N Al 대비 낮은 중량 감소와 수소 발생 속도를 나타내어 우수한 자가부식 억제 특성을 보였다. 그러나 스테인리스강(SS) 메쉬 집전체와의 접촉 시, 알루미늄과 SS 간의 전위 차로 인해 갈바닉 부식이 유발되어 음극 소모와 수소 발생이 현저히 증가함을 확인하였다. 전기화학적 분석 결과, Al-Zn-In 합금 펠렛은 SS 메쉬와 결합된 조건에서도 4N Al 대비 더 음의 부식 전위와 낮은 부식 전류 밀도를 나타내어 상대적으로 안정적인 전기화학적 거동을 보였다. 방전 시험에서는 Al-Zn-In 합금 펠렛이 모든 전류 조건에서 4N Al 대비 높은 에너지 밀도와 긴 방전 지속 시간을 나타냈다. 또한 집전체 소재를 Ti 메쉬로 대체할 경우 갈바닉 전류가 크게 감소하여, 음극 중량 감소와 수소 발생이 억제되고 방전 성능이 향상됨을 확인하였다. 본 연구 결과는 펠렛형 알루미늄 음극의 합금 설계와 집전체 소재 선택이 알루미늄-공기 전지 시스템 성능에 결정적인 영향을 미침을 보여주며, 주유형 알루미늄-공기 전지의 실용화를 위한 음극-집전체 설계 지침을 제시하고자 한다.

**[알루미늄2-4 | 11:25]**

**재설계 RRA가 적용된 Al-Zn-Mg-Cu 소결합금의 원자단위 석출구조와 기계적 특성:** 이준호, 이석재\*(전북대학교)

**Keywords:** Al-Zn-Mg-Cu 합금, 역행-재시효처리(RRA), 고각환영암상주사투과전자현미경(HAADF-STEM), 방전플라스마소결(SPS)

Al-Zn-Mg-Cu계 합금은 가볍고 기계적 특성과 부식 특성이 우수하여, 항공·운송 분야에서 폭넓게 활용되고 있다. 위 합금의 높은 강도는  $\eta'$  준안정 석출물에 기인하며, 이들의 분포와 안정성은 열처리 조건에 따라 크게 달라진다. 특히 강도와 내식성의 균형을 확보하기 위한 역행-재시효(RRA) 열처리가 제안되어 왔으나, 기존 RRA 공정은 다단 열처리 제어의 복잡성으로 인해 산업적 적용에 한계가 있다. 본 연구에서는 기존 RRA 공정을 재설계하고, 역행 온도에 따른 원자단위 석출거동 변화를 규명하였다. 방전플라스마소결(PS)로 제조된 Al-Zn-Mg-Cu 소결합금에 재설계 RRA 공정을 적용하고, 170°C-200°C 범위에서 역행 온도에 따른 미세조직 변화를 고각환영암상주사투과전자현미경(HAADF-STEM)을 통해 분석하였다. 소결 직후 합금은  $\eta$ (MgZn<sub>2</sub>),  $\theta$ (Al<sub>2</sub>Cu) 상 및 MgO 산화물을 포함하는 미세조직을 형성하였다. 역행 온도 170°C-180°C 조건에서는 미세한  $\eta'$  석출물과 Guinier-Preston(GP) 클러스터

가 Al 기지 내에 분산된 상태를 유지하였다. 반면 역행 온도 190°C에서는  $\eta'$  석출물이  $\eta$  상으로 전이되는 거동이 관찰되었으며, 200°C에서는  $\theta$ 계 석출물의 성장 및 조대화가 우세하게 나타나 강화 석출물의 밀도가 감소하였다. 역행온도에 따른 각 열처리 조건 별 경도 및 전기전도도와 미세조직 변화와의 상관관계를 고찰하였다.

### [알루미늄2-5 | 11:40]

**3차원 X선 토모그래피를 이용한 Al-Cu 주조 합금에서 Fe 첨가 유무에 따른 수축 결함 거동의 실시간 분석:** 조우빈, 한인성\*(경북대학교)  
**Keywords:** Shrinkage-induced porosity, Al-Cu alloy, recycling, X-ray Tomography, Fe impurity

알루미늄 합금의 재활용은 탄소 중립 및 자원 순환 측면에서 필수적이나, 재활용 과정에서 혼입되는 불순물 원소인 철(Fe)의 제어는 여전히 중요한 공정 과제로 남아 있다. 특히 대표적인 주조용 알루미늄 합금인 Al-Cu계 합금에서 Fe는 응고 과정 중 금속간 화합물을 형성하여 주조재의 품질을 저하시킨다고 알려져 있다. 본 연구에서는 in situ X-ray tomography를 활용하여 Fe의 첨가 유무에 따른 Al-Cu 합금의 수축 결함 형성 및 진화 거동을 정밀하게 분석하였다. In situ X-ray Tomography 기법을 활용해 기존 2차원 단면 관찰의 한계를 넘어 수축 결함의 3차원적 전과 경로와 복잡한 형상을 입체적으로 분석할 수 있었다. 분석 결과, Fe가 첨가될 경우 Fe가 포함되지 않은 합금에 비하여 낮은 고체 분율에서부터 수축 결함이 형성되는 것을 확인하였으며, 최종 수축 결함의 부피 분율이 증가하는 경향성 또한 관찰할 수 있었다. 개별 금속간 화합물과 수축 결함 형성 위치 간의 직접적인 공간적 상관관계는 국부적으로 상이하게 나타났다. 이는 수축 결함의 형성이 응고 말기 액상의 유동성 저하 및 결정립계의 기하학적 배치 등 복합적인 요인에 의해 결정됨을 시사한다. 본 연구에서 도출된 수축 결함의 부피 및 연결성(Connectivity) 데이터는 Fe 첨가가 수축 결함의 심각도를 가중시킨다는 정량적인 근거를 제시한다. 토모그래피 시각화 데이터를 바탕으로 Fe 첨가가 응고 거동에 미치는 영향과 수축 결함 발생 메커니즘에 대해 심도 있게 논의하고자 하며, 이는 향후 알루미늄 재활용 공정의 불순물 허용 범위 설정 및 고품질 알루미늄 합금설계를 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

### [알루미늄2-6 | 11:55]

**미량 원소 첨가가 Al-0.3Fe 합금의 미세조직 및 온도별 전기적·기계적 특성에 미치는 영향:** 윤연희(한국재료연구원, 한양대학교), 김형준(한국재료연구원, 부산대학교), 안지혁, 오영석(한국재료연구원), 장재일\*(한양대학교), 이윤수\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 알루미늄 합금, 미량 원소 첨가, 미세조직, 전기 전도도, 기계적 특성

글로벌 탄소중립 기조에 따라 에너지 효율이 높은 경량 전력 전송 소재에 대한 수요가 급증하고 있다. 특히 전기차 및 에너지 저장 장치 시장의 급격한 성장으로 기존 구리를 대체할 경제성과 경량성을 겸비한 알루미늄 도전재가 주목받고 있다. 하지만 순 알루미늄은 기계적 특성이 취약할 뿐만 아니라, Fe 및 Si와 같은 불가피한 불순물 원소가 전기적 특성을 저해한다는 한계가 있다. 특히 전기적 특성과 기계적 특성 간의 역상관 관계(Trade-off) 극복이 핵심적인 기술적 과제이다. 따라서 고효율 시스템 구현을 위해 전기적·기계적 특성을 동시에 만족하는 고성능 알루미늄 소재에 대한 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 Al-0.3Fe 합금을 기반으로 Ce, Y, Zr 등의 미량 원소 첨가에 따른 전기적·기계적 특성 변화를 분석하였다. 특히 전기차의 실제 주행 및 충전 환경을 반영하여, 상온부터 80°C 범위에서의 특성 변화를 검토하였다. 알루미늄 합금의 전기적·기계적 특성은 기지 내 원소의 고용 상태 및 석출-분산 강화 등 다양한 미세조직적 제어 기구와 밀접하게 연관되어 있다. 따라서 광학 현미경과 전자 현미경 등을 활용하여 미세조직 관찰을 수행하였으며, 열역학 계산을 병행하여 실험 결과를 검증하였다. 실험 결과, Ce 및 Y이 첨가된 합금은 기지 내 Fe 고용도 감소와 이차상 분율 증가에 따라 전기 전도도와 강도가 동시에 향상되었다. 반면, Zr이 추가된 합금은 강도가 크게 개선되었으나 Zr 고용량의 증가로 인해 전기 전도도는 감소하였다. 다만, 온도 상승에 따른 전기 전도도 및 강도 저하율은 가장 낮아 우수한 열적 안정성을 나타내었다. 이러한 분석 결과들을 바탕으로 미량 원소의 첨가가 Al-0.3Fe 합금의 온도별 전기 전도도 및 기계적 특성 변화에 미치는 메커니즘을 규명하고자 하였다. (감사의 글) 본 연구는 2024년도 산업통상자원부(MOTIE) 및 산업기술기획평가원(KEIT)의 소재부품기술개발사업(RS-2024-00421212)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### [알루미늄3-1 | 14:00]

**Effect of Cu/Mg Ratio on Age-Hardening Behavior in Al-Cu-Mg Alloys:** Yujin Rhee(Kyung Hee Univ.), Calin D. Marioara(SINTEF Industry), Bin Lee(Kyung Hee Univ.), Equo Kobayashi\*(Institute of Science Tokyo)

**Keywords:** Aluminum alloy, HAADF-STEM, Cu/Mg ratio, Precipitation hardening

This study investigates the design of Al-Cu-Mg alloys with varying Cu/Mg ratios and evaluates the influence of these ratios on precipitation behavior during artificial aging at 190 °C. The microstructural evolution and mechanical properties were characterized using Vickers hardness testing, differential scanning calorimetry (DSC), and high-angle annular dark-field scanning transmission electron microscopy (HAADF-STEM). The Cu/Mg ratio is an important role in determining the aging kinetics and peak strength of the alloys. Alloys with a higher Cu/Mg ratio exhibited a higher age-hardening response resulting in higher peak hardness compared to those with lower ratios. In the under-aged state, Guinier-Preston-Bagaryatsky (GPB) zones, which nucleate homogeneously within the matrix, served as the primary strengthening agents in all compositions. At peak hardness, the strengthening phases consisted of a mixture of GPB<sup>(n)</sup> zones and S phases, which were nucleated on dislocations. While the types of strengthening phases remained consistent across different Cu/Mg ratios. DSC analysis revealed that the exothermic peak associated with GPB<sup>(n)</sup> zone formation was more pronounced in the high Cu/Mg ratio alloy. The enhanced age-hardening response in the high Cu/Mg ratio alloy can be attributed to a higher number density of fine precipitates, which contribute significantly to precipitation strengthening.

**[알루미늄3-2 | 14:15]****냉각채널 일체형 무선충전 시스템 하우징 개발: 이명호\*(현대자동차)****Keywords:** 알루미늄, 저압주조, 냉각 채널, 무선충전

1. 서론 최근 전동화 차량의 보급이 확대됨에 따라 충전 관련 연구의 중요성이 증가하고 있다. 그 중에서 무선충전 시스템에 대한 연구는 최우선 과제이며, 충전 효율 향상, 원가절감을 위한 시스템 최적화 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 과제에서는 무선충전 시스템 하우징의 원가절감을 위해 저압주조 공법을 활용한 하우징 일체형 주조기술 개발, 판재 프레스 공법을 적용한 박육화 개발을 진행하였으며, 본론에서 상세히 내용을 설명하고자 한다. 2. 본론 무선충전이 진행될 경우 하우징 내 PCB 및 리츠 와이어에서 발열이 발생하고, 하우징 내 냉각수 순환을 통해 시스템 온도를 일정 수준 이하로 유지하여야 한다. 내부 온도가 높아질수록 충전 효율이 저하되기 때문에 하우징 내부에 냉각 채널이 형성되어야 한다. 기존 모델의 경우 Main body 부품에 Cooling plate를 별도 조립하여 유로부 구성을 하였으며, 체결 부위에 리크 방지를 위해 전체 실란트 도포 및 볼팅 체결을 하였다. 본 과제에서는 저압주조 공법을 활용해 Main body와 Cooling plate를 일체형으로 제작하는 원가절감 개발을 진행하였다. 유로부는 사형 중자를 활용해 구현하였고, 저압주조를 적용하기 위한 설계 최적화를 진행하였다. 기존 모델의 경우 최저 살두께가 약 3t 수준이며, 고압주조를 위한 하우징 형상이 적용되어 있었다. 개발 모델에서는 중량 증가 최소화를 위해 최저 살두께 3.5t 구현을 목표로 하였으며, 저압주조 공법 적용을 위해 불필요한 보스부 삭제, R부 보강 및 세레이션을 추가하였다. Lower case의 경우 형상이 단순하지만 차량 하부에 위치하기 때문에 고내식성이 요구된다. 기존 모델의 경우 ADC12 고압주조에 방청 처리를 하는 사양이며, 개발 모델에서는 경량화 및 원가절감을 위해 A5000계 판재 프레스로 공법을 대체하고 방청액을 삭제하는 개발을 진행하였다. 3. 결론 본 개발을 통해 무선충전 시스템 하우징의 공법 최적화를 진행할 수 있었으며, 전동화 차량의 무선충전 보급화를 위해 향후에도 이에 대한 연구를 계속 진행할 예정이다.



## 이차전지 원료소재

Room 2층 201A, 4월 28일

### [이차전지1-1 | 15:00]

**LiB리사이클링 기술 현황과 개발 방향 제언:** 한상우, 김완이\*, 이주승, 이한주(포스코홀딩스)

**Keywords:** 전기차배터리, 리사이클링, 니켈, 리튬

리튬이온배터리의 리사이클링은 희소금속과 유가자원의 순환으로 배터리 산업에 필수불가결하다. 하지만 리사이클링 기술 개발 방향은 공정상 발생하는 화재와 폭발 위험, 폐기물 발생과 공정 비용에 대한 고려가 되어야 한다. Black Mass 제조 공정도 습식방전을 통한 제조법에서 전기방전을 통한 건식제조법으로 변화하고 있다. 그리고 리사이클링 원료 물질에 따른 특성을 고려하여 기술 개발 방향이 변화되어야 한다. 본 연구에서는 리사이클링 원료 물질의 특성에 따라 최종 제품까지 제조하는 관점에서 Black Mass를 제조하는 상공정의 기술 개발 방향과 Black Mass를 습식정제의 공정 간소화와 비용 감소 측면에서의 방향, 그리고 리사이클링재를 활용한 전구체 생략 공정에 대한 기술 개발 방향을 제언하였다.

### [이차전지1-2 | 15:15]

**탈철 공정 배출 슬래그 내 NiO 환원 촉진 방안 도출:** 신현우(동아대학교), 강영조\*(동아대학교)

**Keywords:** 탈철 슬래그, NiO 회수, 유가금속 회수, 환원

최근 환경오염이 심각해짐에 따라 친환경적인 전기차 시장이 급격히 성장하고 있다. 이에 따라 리튬 이온 배터리(LIB)의 수요가 증가하였으며, LIB 내 NCM 계열 양극재의 주요 원소인 Ni의 제련 및 전제 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. Ni의 제련 과정에서 배출되는 탈철 슬래그에는 환원되지 못한 NiO가 존재하며, 이는 유가금속 자원으로서 회수 가치가 크지만 슬래그 내 잔류하는 NiO의 환원 거동에 대한 연구는 현재까지 충분하지 않다. 본 연구에서는 Ni 건식 제련 중 탈철 공정인 PSC 공정의 FeO-SiO<sub>2</sub>계 슬래그를 모사하여 다양한 FeO/SiO<sub>2</sub> ratio 조건에 따른 환원 반응의 열역학적 가능성 및 환원제 종류에 따른 NiO 환원 효율을 평가하였다. 실험은 Ar 분위기 하에 1400°C에서 유도용해로에서 진행되었다. 환원제 투입 후 시간에 따른 샘플링을 진행하고, ICP-OES(Inductively Coupled Plasma)분석을 통해 NiO 환원 거동을 검토하였다. 이러한 연구는 Ni 건식 제련 공정 중 NiO 환원을 통한 유가금속 회수 및 공정 최적화 조건 도출에 중요한 기초 자료를 제공할 것으로 기대된다.

### [이차전지1-3 | 15:30]

**블랙파우더와 부생 망초를 이용한 Li 선침출 기반 황화리튬 합성:** 이주혁, 김영재\*(인하대학교)

**Keywords:** 페리튬이온 배터리 리사이클링, 습식제련, 선택적 침출, 황산나트륨, 황화리튬

기존 사용후 리튬이차전지(LIBs)의 습식 제련은 Li를 최종 단계에서 회수하는 구조로 공정 중 Li의 손실에 따른 회수율의 한계가 단점으로 지목되어 왔다. 또한, 습식 제련의 중화 공정 중 발생하게 되는 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(망초) 부산물의 처리 역시 주요한 환경적 문제로 주목받고 있다. 본 연구에서는 위와 같은 문제들을 해결하기 위해 블랙파우더(BP)와 부생 망초(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)의 고온 환원 반응을 통해 Li를 고부가가치의 Li<sub>2</sub>S 형태로 선침출하는 공정을 제시한다. 공정 조건 설정을 위해 열역학 계산을 수행하였으며, 이를 통해 Li<sub>2</sub>S 합성 반응에 필요한 온도 및 산소 분압 범위를 도출하였다. 또한, 공정 중 발생하는 반응가스 분석을 통해 시료 혼합 비율에 따른 반응 거동 및 합성 메커니즘을 도출하였다. 합성된 Li<sub>2</sub>S는 XRD 및 SEM분석을 통해 결정상과 형상을 확인하였고, ICP 분석을 통해 Li 및 기타 유가금속의 회수율을 정량적으로 평가하였다. 이를 바탕으로 Li<sub>2</sub>S 합성에 필요한 최적 반응온도와 시료 혼합 비율을 도출하였으며, Li<sub>2</sub>S 내 주요 불순물인 Na의 분리, 회수를 위한 처리 조건을 제안하였다.

### [이차전지2-1 | 15:55] 조정강연

**이차전지 케미스트리 변화 트렌드 및 이차전지용 핵심 원료 시장 전망:** 박재범\*(포스코경영연구원)

**Keywords:** 이차전지 원료, 리튬, 니켈, ESS, 로봇, 자율주행차, 전고체전지, 나트륨전지

최근 산업 전반의 메가트렌드가 전기/전력이며, 이로 인해 배터리 사용처가 급격히 확산되고 있다. 배터리 수요처가 전방위로 확대되는 이유는 ① 전기화(Electrification) 제품의 확산 ② 전력의 비동기성(생산과 소비 시점의 불일치) ③ Automation에서 Autonomy로의 진화 등 크게 세 가지 메가트렌드에 기인한다고 볼 수 있다. 특히 최근 전기차를 잇는 새로운 성장 시장으로 ESS가 각광 받고 있으며, 배터리의 차세대 애플리케이션인 로봇 시장도 주목을 받고 있다. 아울러 자율주행차/로보택시의 확산은 배터리 수요와 케미스트리 변화의 전환점이 될 전망이다. 이에 현재 주력으로 사용 중인 리튬이온배터리도 LFP 중심에서 하이니켈계의 중요성 부각과 함께 전고체배터리, 나트륨배터리 등으로 다양화 될 가능성도 높아지고 있다. 본 발표에서는 배터리의 현재 및 미래 수요처에 대한 전망과 함께 ESS, 로봇, 자율주행차용 배터리 등 각 애플리케이션별 소재 케미스트리 변화에 대해 분석해보는 시간을 갖도록 하겠다. 아울러 배터리 케미스트리 변화에 따라 핵심 원료인 리튬, 니켈 등에는 어떤 영향이 있을지를 살펴보고자 한다.

### [이차전지2-2 | 16:20]

**리튬이온·전고체 배터리 핵심소재 개발과 산업폐기물·폐배터리 기반 전지소재 업사이클링 기술:** 고민성\*(국립부경대학교)

**Keywords:** 리튬이온전지, 전고체전지, 폐배터리 재활용, 흑연 음극, 실리콘-탄소 복합소재, 실리콘 산화물-탄소 복합소재, 수침출, 화학기상증착법  
전기차(EV) 및 에너지저장시스템(ESS)의 확산으로 고성능·고안전성 이차전지 수요가 급증하는 동시에, 양/음극재 핵심 원료의 공급

망 부족과 사용 후 배터리 산업 폐기물의 처리 문제가 함께 부상하고 있다. 본 발표에서는 리튬이온·전고체 배터리 핵심소재 개발과 산업 폐기물·폐배터리 기반 양·음극재 업사이클링을 연계한 연구 흐름을 중심으로, 흑연·실리콘 기반 음극 소재 설계부터 양극/음극 재활용 공정까지의 연구 포트폴리오를 소개한다. 먼저 리튬이온전지 음극의 주력 소재인 천연흑연을 대상으로 순도, 입형(원형도) 및 탭밀도 등 산업 적용 관점의 품질 인자를 비교·평가하고, 흑연계 소재의 보다 친환경적이고 경제적인 정제 기술 적용 사례를 제시한다. 또한 흑연 내화물/도가니 제조 과정에서 발생하는 인조 흑연 waste와 같은 산업 부산물의 특성을 고려하여, 다양한 전지 소재(활물질, 조립구상흑연, 도전재)로의 전환 가능성을 검토하는 방향을 함께 다룬다. 다음으로 고에너지밀도형 Si/다공성 탄소(PC) 복합 음극에서는 기공 구조(기공 크기·부피·비표면적)에 따른 Si 증착 거동과 Si 도메인 크기 변화를 분석하여, 고용량과 구조 안정성의 동시 확보를 위한 설계 변수 및 연구 결과를 제시한다. 특히, 고온 탄소 코팅 공정에서 문제가 되는 SiC 형성을 억제하기 위해 SiOx를 다공성 탄소 내에 도입하는 전략을 소개하며, Si-O 결합 형성의 열역학적 우위를 활용해 SiC 형성을 억제함으로써 비가역적 용량 저하를 완화하고, 초기 쿨롱 효율 및 전기전도 특성 개선 연구 결과를 제시한다. 자원순환 연구 결과에서는 폐전지로부터 양극재와 음극재를 각각 업사이클링하는 공정을 다룬다. 양극재의 경우, 폐전지 내 도전재·바인더를 활용하는 직접 탄소열환원(Direct carbothermic reduction) 개념을 기반으로 공정 단순화 및 에너지/탄소배출 저감 연구결과를 제시하고, 수침출을 통해  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  및 Co 화합물의 선택적 회수 방향을 제시한다. 아울러 LCO/NCM 계열의 direct recycling/upcycling 접근과 함께, 음극 활물질 재활용 측면에서는 Si-C 나노복합체(SCN) 및  $\text{FeSi}_2\text{@Si}$  등 재활용 기반 고안정성-고율속향 음극 소재 개발 방향 및 연구 결과를 소개한다. 마지막으로 황화물 고체전해질 기반 전고체전지(ASSB) 적용을 위해 CVD 기반 Si-코팅 흑연 음극을 제시하여 황화물계 고체전해질-흑연 사이의 계면 반응을 효과적으로 저감한 연구결과를 제시하며, 흑연 형태(판상/구상/무정형)에 따른 전극 팽창 거동 및  $\sim 3.7\text{--}3.8\text{ mAh/cm}^2$  면적용량에서의 적용 가능성을 비교하여 전고체 환경에서의 실용 설계 인자를 논의한다.

### [이차전지2-3 | 16:35]

니켈 카보닐 생성 반응의 속도론적 연구: 전상현, 김영재\*(인하대학교)

Keywords: 니켈 카보닐

니켈은 내열 합금, 스테인리스강, 전기 도금, 이차전지 양극재료 등 현대 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 활용되고 있으며, 이차전지 사용량 증가에 따라 니켈 리사이클링 기술의 중요성이 증대되고 있다. 몬드 프로세스(Mond Process)는 니켈 금속을 일산화탄소(CO) 가스와 반응시켜 니켈 카보닐( $\text{Ni}(\text{CO})_4$ )을 형성한 후, 이를 열분해하여 고순도의 니켈을 회수하는 대표적인 정련 공정이다. 본 연구에서는 니켈과 CO 가스의 반응을 통한 니켈 카보닐 생성 반응 속도를 규명하기 위해 반응 온도, 압력, 니켈 입도, 열처리 조건, 그리고 고-액 분리 조건을 변화시키며 실험을 수행하였다. 니켈 카보닐화 반응의 반응 메커니즘을 분석하였으며, 니켈 표면 형상과 전위 밀도가 카보닐화 반응속도에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 반응 중 생성되는 액상의 니켈 카보닐 분리에 따른 반응 속도의 개선을 실험적으로 확인하였다. 다양한 실험 변수 조건에 대하여 열역학적 반응 구동력 변화와 이에 따른 반응 속도 변화를 확인하였으며, 최적의 반응 공정 조건을 도출하였다.

### [이차전지3-1 | 17:00]

Lithium Recovery and Selective Separation for Recycling of Spent LFP Batteries: 정은진\*, 서원욱, 박연우(포항산업과학연구원), 조용민, 한상우, 김완이(포스코홀딩스)

Keywords: LFP, 사용후 배터리, 재활용, 배소

최근 전기자동차 및 사용후 배터리 재활용 시장은 일시적인 침체기를 겪고 있지만, 폐배터리 시장은 향후 2040년까지 크게 확대될 것으로 전망된다. 이에 따라 폐리튬이온배터리의 효율적인 재활용 기술 개발이 더욱 중요한 과제가 되고 있다. 특히, 리튬철인산(LFP) 배터리의 재활용에 있어 기존의 습식 공정을 통한 전통 제조 방식 외에, 고부가가치의 반응 제품을 생산할 수 있는 새로운 기술이 요구된다. 본 연구에서는 염화공정을 활용하여 사용후 LFP 배터리의 리튬 회수 및 선택분리 방법에 대해 이론적 접근과 실험적 분석을 병행하여 연구하였다. 염화공정은 기존의 습식 방법에 비해 환경적 영향을 줄이고, 원료 내 불순물 제거를 보다 효과적으로 수행할 수 있는 장점이 있다. 또한, LFP 배터리의 특성에 맞춘 선택적 분리를 통해 리튬을 고효율로 회수하며, 동시에  $\text{FePO}_4$ 와 같은 고부가가치 화합물을 별도로 생산할 수 있는 가능성을 제시하고자 한다. 연구에서는 다양한 염화 반응 조건을 최적화하고, LFP 원료의 특성에 따른 반응 효율성을 분석하였다. 이를 통해 얻은 결과는, 향후 고품위 혼합 원료 기반 재활용 공정 설계에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 본 연구는 사용후 배터리 재활용의 효율성을 높이고, 순환경제 구축에 기여할 수 있는 기술적 기반을 마련하는 데 중점을 두고 있다.

### [이차전지3-2 | 17:15]

용매추출-믹서-세틀러 공정 내 다상유동 전산모델링: 김나연, 박정섭, 신재원(국립부경대학교), 김병준, 송시정, 한상우, 김완이(포스코홀딩스), 조성묵\*(국립부경대학교)

Keywords: 리튬이온 배터리, 리사이클링, 습식정제, 용매추출기, 다상유동, 전산모사

리튬이온 배터리 리사이클링을 위한 습식정제 용매추출 공정은 폐배터리내 니켈, 코발트, 구리 등의 유가금속을 높은 순도로 회수할 수 있는 대표적인 공정으로 금속 이온이 용해되어 있는 수상과 추출제가 포함된 유기상을 혼합하여 상간 접촉 영역에서 이온 교환 반응을 통해 유가금속 이온을 선택적으로 유기상에 이동시킨 뒤 밀도 차이에 의해 두 상을 분리시켜 유가금속을 정제하는 원리를 이용한다. 본 연구에서는 용매추출-믹서-세틀러 공정 내 수상, 유기상, 공기 3상 간의 혼합 및 분리 현상에 관한 다상유동 현상을 예측할 수 있는 전산모사 모델을 개발하고, 랩스케일모델 실험과 비교하여 정확성을 검증하였다. 이를 통해 믹서 영역에서의 난류 강도에 따른 수상과 유기상의 혼합현상과 세틀러 영역에서의 유기상/수상 계면 거동 및 에멀전의 형성과 분리 현상을 시계열적으로 분석하여, 믹서-세틀러 공정내 혼합 및 분리 현상에 대해서 정량적으로 고찰하였다.

**[이차전지]3-3 | 17:30]**

Modeling time-dependent compaction of cathode materials for electrode manufacturing using a viscoplastic Drucker-Prager/Cap framework: [Taehyun Kim](#), Myoung-Gyu Lee\*(Seoul Univ.)

**Keywords:** Rate-dependent behavior, Viscoplastic model, Drucker-Prager/Cap plasticity, Cathode material, granular material, Electrode calendaring

In this study, we propose a viscoplastic Drucker-Prager/Cap (DPC) constitutive framework to reproduce the time-dependent mechanical response of granular media under uniaxial compaction, with a particular focus on electrode manufacturing processes. The model integrates three key components: (i) a DPC plasticity formulation to capture pressure-sensitive yielding and cap hardening under densification, (ii) a Perzyna-type viscoplastic flow rule to represent rate effects, and (iii) a volumetric plastic strain-dependent linear elasticity to describe the evolution of elastic stiffness with compaction-induced microstructural changes. The viscoplastic strain rate is governed by an overstress function, enabling the model to distinguish loading-rate-dependent responses via a small set of interpretable material parameters. This unified framework is able to quantify stress relaxation and the progressive accumulation of plastic deformation during cyclic loading, which are critical for understanding process-induced history effects. Model calibration is performed through a sequential procedure: first, DPC hardening parameters are identified from uniaxial compaction tests with digital image correlation (DIC) measurements, which enable accurate determination of the stress state evolution during densification; subsequently, viscoplastic model parameters are calibrated using stress relaxation tests under sustained loading conditions. To assess predictive capability, the calibrated model is validated against independent experimental observations relevant to electrode calendaring, including time-dependent stress decay and densification behavior under repeated compaction cycles. The results demonstrate that the model captures both instantaneous and delayed deformation mechanisms and provides a practical tool for process optimization under complex cyclic loading conditions, supporting robust parameter design for improved electrode quality and performance.

## 고엔트로피합금

Room 2층 201B, 4월 28일

### [고엔1-1 | 09:00]

**열처리 기반 미세조직 제어에 따른 AlTiCrVFe 다상 고엔트로피 합금의 마모 특성 변화:** 이윤건, 안병민\*(아주대학교)

**Keywords:** high-entropy alloys, wear, heat treatment, multiphase, microstructure

자동차, 우주항공 및 제조 분야에서는 접촉면의 반복 상대운동에 따른 손상 누적이 부품 수명 단축으로 직결되기 때문에 내마모 특성 확보가 중요해지고 있다. 마모는 접촉면의 국부 변형과 균열, 산화 생성물의 형성 및 파편 개입이 함께 작동하는 복합 현상이며, 합금의 상 구성과 미세조직에 따라 손상 거동이 달라진다. 특히 다상 구조에서는 균질한 경질상이 접촉 변형을 완화하고 하중을 효과적으로 분산시켜, 마찰 안정성과 내마모 특성 향상에 유리하다. 고엔트로피 합금(high-entropy alloys, HEAs)은 다원소 조합을 바탕으로 다양한 상과 미세조직을 얻을 수 있으며, 최근에는 다상 구조 설계를 통해 마모 물성 향상을 위한 관심이 커지고 있다. 그러나 열처리에 의한 미세조직 변화가 마찰 안정성 및 마모 손실에 미치는 영향에 대해서는 정량적 연계가 충분히 제시되지 않았다. 본 연구에서는 다상 HEAs에서 열처리 온도에 따른 미세조직 변화를 비교하고, 그 결과가 마찰계수(coefficient of friction, COF), 마모율, 마모 트랙 및 파편 특성에 미치는 영향을 분석하였다. AlTiCrV<sub>0.5</sub>Fe<sub>0.5</sub> 다상 HEAs는 기계적 합금화로 제조한 뒤 방전 플라즈마 소결(spark plasma sintering, SPS)로 치밀화하였다. 이후 750, 900, 1050°C에서 열처리를 수행하여 열처리 온도에 따른 미세조직의 변화를 유도하였다. 상 분석은 X선 회절 분석(X-ray diffraction, XRD)으로, 미세조직은 주사 전자 현미경(scanning electron microscope, SEM)으로 평가하였다. 마모 특성은 건식 왕복 마모시험으로 분석하였으며, WC ball을 상대재로 사용하였다. 이후 마모 트랙과 파편을 관찰하고, 마모율은 질량 감소를 기반으로 계산하였다. 열처리 이후 XRD 분석에서는 모든 조건에서 C14 Laves와 BCC계 상이 주요 상으로 확인되었고,  $\sigma$  상과 소량의 산화물 상이 함께 관찰되었다. 또한 열처리 조건에 따라 BCC 계 피크의 위치 변화가 나타나, 확산에 따른 원소 재분배가 격자 수준의 변화로 반영됨을 의미하였다. SEM/EDS 관찰에서는 C14 Laves 매트릭스 내부에 미세 BCC1 석출상이 분산된 영역과 함께 Ti-rich BCC2 및 Cr-rich  $\sigma$  편석상이 국부적으로 존재하였으며, 열처리 이후 편석상의 거동이 달라졌다. 특히 Ti가 주변 상으로 확산되고 조성 구배가 완화되어 Ti-rich 편석상의 구동력이 감소한다. 그 결과 900°C 이상의 조건에서 Ti-rich 편석 영역은 크기와 분율이 감소하여 소멸하는 방향으로 관찰되었다. 마모시험에서는 평균 COF와 마모율이 항상 비례하는 결과를 보이지 않았다. 평균 COF는 900°C에서 약 0.13으로 가장 낮게 나타난 반면 마모율은 750°C에서  $20 \times 10^{-5}(\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m})$ 로 최소였다. 이는 COF가 접촉면의 순간적인 전단저항 및 지배적인 마모 메커니즘에 영향을 받고, 마모율은 균열의 누적과 박리에 크게 영향을 받음을 의미한다. 마모 트랙과 파편 관찰 결과, 열처리 조건에 따라 연마 마모가 우세한 손상 양상에서 산화 생성물과 박리가 동반되는 복합 마모 양상으로 변화하는 경향이 확인되었으며, 복합 마모 양상이 커질수록 산화물 기반 파편 축적과 조대한 박리 파편이 증가하는 양상이 나타났다. 본 연구에서는 열처리에 따른 편석상 분포 변화가 접촉면에서의 손상 누적 방식을 변화시켜 마찰 변동과 마모 손실의 차이로 이어짐을 확인하였다. 이를 통해 조성 제어 없이 열처리 설계를 통해 다상 HEAs의 마찰 안정성과 내마모 특성을 조절할 수 있음을 보여준다.

### [고엔1-2 | 09:15]

**레이저 기반 전처리를 통한 고엔트로피 합금의 stretch-flangeability 향상:** 김재훈, 최연택, 김래언, 박효진, 이시우, 구본우, 김형섭\*(포항공과대학교)

**Keywords:** Stretch-flangeability, Hole expansion test (HET), Laser surface treatment, High-entropy alloy (HEA), Finite element analysis (FEA)

본 연구는 equiatomic CoCrFeMnNi high entropy alloy (HEA)를 기반으로, 펀칭 이후의 저성형성 문제를 해결하기 위해 선택적 레이저 처리 방식이 hole expansion 성형성에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 다른 레이저 스캔 경로를 적용한 두 종류의 시편(L-zigzag, L-circle)과 As-punched 시편을 제작하였으며, 각각에 대해 hole expansion test(HET)를 실시하고, 미세조직 관찰, 유한요소해석(FEA)을 통해 변형 및 파단 거동을 비교하였다. As-punched 시편의 hole expansion ratio(HER)와 비교하여 레이저를 조사한 시편들은 우수한 HER을 나타냈다. L-circle 시편은 단일 레이저 intersection site를 중심으로 변형이 넓고 균일하게 분산되며 파단이 지연되었고, 이는 hole edge주변의 표면 조도가 낮고 열영향부가 작기 때문으로 분석되었다. FEA를 통해 응력 집중 해소 및 plastic strain 분산 양상을 정량적으로 분석한 결과, L-circle 시편의 높은 HER 경향성과 잘 부합하였다. 본 연구는 HEA의 HER 향상을 위해 표면 조건 제어가 효과적인 방법임을 실험적 및 수치적으로 규명하였으며, 차세대 고강도 재료의 실용화에 기여할 수 있는 기술적 근거를 제공한다.

### [고엔1-3 | 09:30]

**계층적 코어-셸 구조를 통한 우수한 고온 강도-경량화-가격 경쟁성 달성 전략:** 김래언, 이재홍, 허윤욱, 김형섭\*(POSTECH)

**Keywords:** 하모닉 구조, 중엔트로피 합금, 헤테로 구조, 기계적 물성

산업의 고도화에 따라 극한 환경에서도 고강도를 유지하는 소재의 중요성이 증대되고 있으며, 그 중 초합금 (superalloy)은 상온 및 고온 모두에서 우수한 인장 특성을 나타낸다. 그러나 FCC 기지 내에 L12 나노 석출상을 높은 비율로 생성하는 데 다량의 Ni와 Co가 필수적이며, 이는 높은 질량 밀도와 합금 비용을 초래하여 광범위한 산업적 적용을 제한한다. 본 연구에서는, 상온 및 고온에서 우수한 기계적 특성을 유지하면서 Ni와 Co에 대비 Fe 함량을 높이는 합금 설계 전략을 제시한다. 코어-셸 하모닉 구조 내

에 나노 석출물을 유도함으로써 코어-셸 간 기계적 대비를 강화하여, 우수한 이중 구조를 구현합니다. 본 합금은 마이크로미터 규모의 이중 결정립, 수십 나노미터 규모의 국부적 석출물, 나노미터 규모의 원소 변동을 결합하여 다중 스케일의 계층적 헤테로 구조를 나타냅니다. 이 계층 구조는 기존 초합금과 유사한 우수한 기계적 특성을 상온 및 고온에서 보여준다. 동시에, 이 합금 시스템에서 높은 철 함량은 합금 비용 및 질량 밀도 측면에서 탁월한 성능을 나타냅니다. 본 연구는 상온/고온에서의 합금 비용, 질량 밀도 및 기계적 특성 간의 상충관계를 극복할 수 있는 독창적인 계층적 이중 구조를 제시한다.

#### [고엔1-4 | 09:45]

**기계적 밀링이 방전 플라즈마 소결법으로 제조한 CrMnFeCoNi 고엔트로피 합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향:** 박성현(전북대학교), 신은주(한국원자력연구원), 정재길\*(전북대학교)

**Keywords:** High entropy alloy, Mechanical alloying, Spark plasma sintering, Transmission electron microscopy, Small-angle neutron scattering

고엔트로피 합금은 Yeh 및 Cantor에 의해 제안된 합금으로, 다섯 가지 이상의 원소를 동일하거나 비슷한 조성비로 혼합하여 만들어진 합금이다. 등원자비의 CrMnFeCoNi 합금은 대표적인 면심입방구조의 고엔트로피합금으로 우수한 연성과 극저온 특성으로 인해 주목받아 왔으나, 상온 항복강도가 상대적으로 낮아 극한 환경 적용을 위해서 강도 향상 전략이 요구되고 있다. 이를 해결하기 위해 석출 강화, 변태유기소성(TRIP) 및 쌍정유기소성(TWIP), 결정립 미세화 등 다양한 강화 메커니즘이 적용되고 있으며, 최근에는 분말 야금 공정을 통해 미세조직을 제어하려는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 특히 기계적 밀링은 분말에 강한 소성 변형을 부여하여 결합(전위, 저각입계 등) 도입 및 결정립 미세화를 유도할 수 있어 고강도화 측면에서 유용하다. 그러나 밀링 과정 중 냉간 용접, 공정제어제 및 공정 환경에 따른 불순물(C, O 등) 유입, 그리고 이에 따른 산화물/탄화물 등 이차상 형성이 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향은 정량적인 이해가 필요하다. 본 연구에서는 가스 분무법을 통해 제조한 CrMnFeCoNi 분말에 기계적 밀링을 적용한 뒤 방전 플라즈마 소결(Spark plasma sintering, SPS)을 통해 벌크 소결체( $\Phi 20 \times 6$  mm)를 제조하였으며, 기계적 밀링이 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. X선 회절 분석(X-ray diffraction, XRD)을 통해 상 변화를 확인하였으며, 주사 전자현미경 분석(Scanning electron microscopy, SEM) 및 후방산란전자회절법(Electron backscatter diffraction, EBSD)을 통해 소결체의 기지 조직 및 입계 특성(특히 저각입계 형성)을 분석하였다. 또한 투과전자현미경 분석(Transmission electron microscopy, TEM)으로 산화물/탄화물 등 이차상을 규명하고, 소각 중성자 산란 분석(Small-angle neutron scattering, SANS)을 통해 이차상의 크기 분포 및 체적 분율을 정량화하였다. 기계적 특성은 압축 시험을 통해 평가하였으며, EBSD, SANS 기반 정량 지표를 활용해 항복강도 모델링을 수행하였다.

#### [고엔1-5 | 10:00]

**나노쌍정 엔지니어링 기반 고엔트로피합금의 우수한 기계적 물성-수소 취성 저항성 획득:** 최주미, 김래언, 구분우, 이호형, 이시우, 하효정, 이도원, 손수정, 서동우, 김형섭\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 고엔트로피합금, 나노 쌍정, 이중 구조, 수소 취성

구조 재료는 산업에서 우수한 기계적 물성-서비스 환경에서의 높은 안정성을 필요로 한다. 하지만, 고강도 재료는 일반적으로 수소 환경에서 높은 취성을 가진다. 따라서, 본 연구에서는 나노쌍정 기반의 미세조직 제어 전략을 통해 고강도와 수소취성 저항성을 동시에 달성하고자 하였다. 연구 대상은 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금이며, 재결정화한 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금에 대해, 77 K의 극저온에서 30 %의 사전 변형을 부여하여 나노 쌍정을 형성하였다. 이어서 773 K에서의 소둔을 통해 고밀도 전위를 감소시키는 동시에, 형성된 나노쌍정 구조를 유지하였다. 형성된 나노쌍정은 항복강도와 인장강도를 향상시킨다. 한편, 수소취성 저항성 평가 결과, 구배적으로 분포된 나노 쌍정은 낮은 계면 에너지와 높은 정합성으로 인해 수소 확산 경로를 효과적으로 차단하며, 균열 개시와 전파를 억제하는 것으로 확인되었다. 실험 결과, 나노쌍정 제어 시편은 항복강도가 약 2.524배 향상되었고, 동시에 우수한 수소취성 저항성을 나타냈다. 특히 사전 변형과 소둔 처리를 통해 유지된 나노쌍정 구조는 수소 환경에서도 강도와 연성의 균형 유지를 가능하게 하였으며, 수소로 인한 열화를 억제하는 데 핵심적인 역할을 하였다. 결론적으로, 본 연구에서 제안한 미세조직 제어 전략은 고엔트로피 합금의 수소취성 문제를 효과적으로 개선할 수 있는 실질적이며 유망한 접근법으로, 수소 환경에서 우수한 기계적 성능이 요구되는 차세대 구조용 합금 설계에 중요한 기술적 방향성을 제공한다.

#### [고엔1-6 | 10:15]

**고엔트로피합금의 고속 변형 조건에서의 동적 거동:** 이소열(서울대학교), 김현수, 김윤호(서울대학교 항공우주공학부), 박은수\*(서울대학교)

**Keywords:** 고엔트로피합금, 고변형률 변형, 동적 거동, 변형 메커니즘

고엔트로피합금(High-entropy alloys, HEAs)은 다성분 조성에 기인한 우수한 기계적 성질과 높은 구조적 안정성으로 인해 극한 하중 조건에서의 구조재료로 주목받고 있다. 그러나 지금까지의 고엔트로피합금 관련 연구는 주로 준정적 또는 저변형률 조건에서의 인장 및 압축 거동에 초점을 맞추어 왔으며, 실제 고속 충격이나 탄도 환경을 반영한 고변형률 조건에서의 변형 거동에 대한 이해를 상대적으로 제한적이다. 본 연구에서는 고엔트로피합금의 변형률 의존적 기계적 거동과 변형 메커니즘을 규명하기 위해 연소 가스건 충돌 실험을 수행하였다. 이를 통해 다양한 변형 속도 조건에서의 응력-변형률 거동을 비교 분석하였으며, 고속 변형에 따른 변형률 민감도 변화를 체계적으로 평가하였다. 또한 충격 후 시편에 대한 미세구조 분석을 통해 마르텐사이트 상변태, 전위 집적과 같은 주요 변형 메커니즘의 발현 양상을 규명하였다. 본 연구는 준정적 변형 조건과 대비되는 고변형률 환경에서의 고엔트로피합금의 동적 변형 특성을 제시하며, 고속 충돌 및 방호구조 응용을 위한 합금 설계에 유의미한 기초 데이터를 제공할 것으로 기대된다.

**[고엔2-1 | 10:40] Canceled**

HT-PEMFC 적용을 위한 고온 인산 내부식 분리판 소재 연구: 유한준, 이진직(한국과학기술연구원), 오은기, 신한균, 김정환\*(동아대학교), 심재혁\*(한국과학기술연구원)

**Keywords:** 고엔트로피 합금, 분리판, 고온부식

고온 작동형 고분자전해질 연료전지(HT-PEMFC)는 기존의 저온형 연료전지(LT-PEMFC)에 비해 내열성, 내불순물성, 전극 반응속도 측면에서 우수한 특성을 지니며, 특히 일산화탄소(CO) 피독에 대한 내성이 높아 개질가스를 직접 사용할 수 있다는 장점이 있다. 또한 160–200 °C의 고온 작동 조건에서는 폐열 회수가 용이하여 시스템 효율을 향상시킬 수 있고, 물 관리 문제로부터 비교적 자유롭다는 점에서 차세대 수소에너지 변환 기술로 주목받고 있다. 이러한 이유로 PI-PBI(Polyimide-Polybenzimidazole) 기반 분리막을 적용한 HT-PEMFC의 개발은 고효율·고내구성 연료전지 구현을 위해 필수적이다. 그러나 HT-PEMFC는 고온 인산( $H_3PO_4$ ) 환경에서 작동하기 때문에 부식 문제가 심각하며, 특히 분리판(Bipolar plate)의 열화가 전체 연료전지 성능과 수명에 치명적인 영향을 미친다. 분리판은 전기 전도성, 가스 유통 형성, 구조적 지지체 역할을 동시에 수행하므로, 인산 환경에서의 내식성이 충분하지 않을 경우 전극 저항 증가, 금속 이온 용출, 막 오염, 셀 저항 상승 등이 발생하여 출력 저하 및 장기 내구성 저해를 초래한다. 따라서 고온 인산 환경에서도 안정적으로 작동하는 고내식성 분리판 소재 개발은 HT-PEMFC 상용화를 위한 핵심 과제로 평가된다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 부식 특성이 우수하다고 알려진 Ni-Cr-Co계 고엔트로피 합금(HEA)을 기반으로 세 가지 조성을 설계·제작하였다. 기본 합금인 Ni-Cr-Co를 기준으로, 미량의 합금원소를 첨가한 Ni-Cr-Co-Mo(0.05 at%) 및 Ni-Cr-Co-Cu(0.05 at%) 조성을 추가로 설계하였다. 각 합금에 대해 200 °C 고온 인산 환경에서 장시간 침지 실험을 수행하였으며, 시간에 따른 질량 변화를 기반으로 평균 및 순간 부식속도를 도출하였다. 그 결과, Mo 또는 Cu를 미량 첨가한 두 합금은 기본 Ni-Cr-Co 대비 부식속도가 약 한 자릿수(order of magnitude) 낮아지는 현저한 내식성 향상을 보였다. 이는 미량 합금원소가 표면 보호층 형성 및 국부 부식 억제에 기여했기 때문으로 해석된다. 본 연구 결과는 HT-PEMFC용 분리판 소재로서 Ni-Cr-Co 기반 고엔트로피 합금이 유망한 후보임을 시사하며, 향후 실제 셀 환경에서의 전기화학적 성능 및 장기 내구성 평가로 확장될 예정이다.

**[고엔2-2 | 10:55]**

Nb 및 Ta 함량에 따른 준안정 내열 고엔트로피 합금의 조성 의존적 변형 거동: 조윤준, 이강진(공주대학교), 이찬호(Auburn University, USA), 송기안\*(공주대학교)

**Keywords:** Refractory High-Entropy Alloys, Transformation-Induced Plasticity, Metastability, 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 상온에서의 낮은 연성으로 인해 실질적인 적용에 한계를 보이고 있다. 이를 극복하기 위해 결정립 미세화, 원자가전자농도 제어, 데이터 기반 합금 설계 등 다양한 접근이 시도되어 왔다. 최근에는 준안정 합금 설계를 통해 변형유기상변태 및 변형쌍정 과 같은 추가적인 변형기구를 활성화함으로써 연성을 효과적으로 향상시키는 전략이 주목받고 있다. 이러한 준안정 내열 고엔트로피 합금에서 변형 중 발생하는 변형유기상변태와 변형쌍정 거동에 대한 연구는 일부 보고된 바 있으나, 대부분 BCC 상의 안정도 수준에 따른 거동 분석에 집중되어 있다. 반면, BCC 안정화 원소의 종류에 따른 상안정도 및 변형기구의 차이를 체계적으로 비교한 연구는 상당히 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 TiZrHfNb<sub>x</sub> 및 TiZrHfTa<sub>x</sub> 합금계에 대하여 Nb 및 Ta 첨가에 따른 기계적 거동과 그에 따른 변형 메커니즘을 비교 분석하였다. Nb와 Ta 함량 변화에 따라 기계적 특성에 뚜렷한 차이가 나타났으며, 변형유기상변태 거동, 변형쌍정 거동 및 전위 특성의 차이에 기인하는 것으로 확인하였다.

**[고엔2-3 | 11:10]**

Mo-Nb-Ti-Cr 내열 고엔트로피 합금의 미세조직 제어에 따른 산화 거동 상관 관계 분석: 신승환, 이강진(공주대학교), 이찬호(Auburn University), 송기안\*(공주대학교)

**Keywords:** 내열 고엔트로피 합금, 산화거동, 내화성 산화물, 보호 산화물

내열 다원소 합금(Refractory Multi-Principal Element Alloys, RMPEAs)은 W, Mo, Nb, Ta와 같은 내화성 원소들로 구성되어 단상의 BCC 구조를 안정적으로 형성하고, 이로 인해 우수한 고온 기계적 특성 및 열적 안정성을 동시에 제공하는 차세대 고온 구조용 소재로서 주목받고 있다. 하지만 기존 RMPEAs는 고온환경에서  $WO_3$ ,  $MoO_3$ ,  $Nb_2O_5$ ,  $Ta_2O_5$  등의 내화성 산화물들의 형성으로 제한적인 산화 특성을 나타내어 장기간 사용 수명의 한계를 지닌다. 최근, RMPEAs의 산화 저항성을 개선하기 위해 Cr 함량 조절을 통해 산화과정에서 형성된  $Cr_2O_3$ 를 내화성 산화물과 반응시켜  $CrNbO_4$  및  $CrTaO_4$ 와 같은 복합산화물로 이루어진 보호 산화물층을 형성하여 산화저항성을 향상시킬 수 있다는 연구가 보고되었다. 게다가 보호 산화물의 유효성은 형성 원소 첨가량에만 의존하지 않으며, 보호 산화물 층이 연속적이고 치밀하게 형성될 수 있는 확산 조건이 함께 확보되어야 한다. 특히 결정립계는 산화과정에서 산소 및 금속 이온의 주요 확산 경로로 작용하므로, 결정립 크기 제어에 따른 합금의 산화 거동 변화에 대한 체계적인 연구가 요구된다. 따라서 본 연구에서는, Cr 함량 조절을 통해  $(MoNbTi)_{100-x}Cr_x$  ( $x=5, 10, 25$ ) 합금을 설계하였고, 추가적으로 열처리 공정을 통해 결정립 크기를 제어함으로써 합금의 산화 거동 메커니즘을 이해하고자 하였다. 합금의 산화 저항성 평가는 1000°C의 대기 중 분위기에서 진행하였으며, 산화 후 중량 변화를 측정하여 평가하였다. 산화 시험 시간에 따른 합금의 산화 거동을 분석하기 위해 SEM을 통해 합금 표면에 형성된 산화물의 형태학적 특징을 분석하고 XRD, TEM을 통해 구성상 분석을 진행하였다. 본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(RS-2024-00436523). 본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원의 기반구축 사업(P0018009) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.



**[고엔2-5 | 11:25]**

**TiHfNb계 BCC 중엔트로피 합금의 냉간 압연에 따른 미세조직 발달 및 기계적특성 변화:** 박태연, 최인철\*(국립금오공과대학교)

**Keywords:** 엔트로피 합금, BCC, TEM, 기계적물성, 압연

TiHfNb 기반의 체심입방(BCC) 중엔트로피 합금(MEA)은 우수한 고온 강도와 기계적 물성으로 주목받고 있다. 선행 연구에서 Zr과 V의 첨가가 격자 비틀림을 유발하여 고용 강화에 기여함을 확인하였다. 그러나 이러한 합금 원소가 소성 변형 과정에서 미세조직의 진화와 기계적 거동, 특히 가공 경화 및 상 안정성(Phase stability)에 미치는 영향에 대한 심도 있는 이해는 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서는 TiHfNb계 MEA의 냉간 가공 및 인장 변형 시 발생하는 미세조직 변화를 분석하고, 이를 기계적 특성과 연계하여 고찰하고자 한다. TiHfNb, TiHfNbZr, TiHfNbV, TiHfNbVZr의 4종 합금에 대하여 30%, 60%, 90%의 압하율로 냉간 압연(Cold rolling)을 진행한 뒤, 열처리를 진행하지 않고 각 합금에 대하여 XRD, EBSD, TEM 분석을 진행하여 미세조직을 분석하였고, 균질화재와 냉간 압연재에 대한 상온인장시험을 통해 응력-변형률 거동을 평가하였다.

**[고엔3-1 | 14:00]**

**고엔트로피 합금에 대한 다양한 인공지능 처리 기법:** 최윤석\*, 장리빈(부산대학교)

**Keywords:** 고엔트로피 합금, 인공지능, 확산모델, 전이학습, 역설계

수집된 고엔트로피합금 데이터에 대해 불균형학습(imbalance learning), 역설계(inverse design), 전이학습(transfer learning) 등 다양한 인공지능 처리 기법들을 적용하고 그 결과를 야금학적 측면에서 분석하였다. 첫 번째 사례 연구에서는 변분 오토인코더(VAE), 생성적 적대네트워크(GAN), 확산모델(DDPM)과 같은 생성형 인공지능 모델들을 이용하여 고엔트로피 합금의 소규모 상(phase) 데이터를 증강시켜 데이터 불균형 문제를 해결하고 조성에 따른 상 예측 성능을 비교 분석하였다. 두 번째 사례 연구에서는 확산모델을 고엔트로피 합금의 역설계 도구로 활용하여 그 가능성을 평가하였다. 이를 통해 확산모델을 이용한 생성형 인공지능 기반 고엔트로피 합금 역설계 프로토콜을 제안하였다. 마지막 사례 연구에서는 전이학습 기법을 활용하여 주조된 고엔트로피 합금 데이터 대비 적층제조된 고엔트로피 합금 데이터 부족 문제를 해결할 수 있는 방법을 모색하였고 그 결과를 정리하였다.

**[고엔3-2 | 14:15]**

**Accelerated Discovery of Refractory High-Entropy Alloys through Machine Learning and Uncertainty-Guided Design:** Ki-Seong Park, Chang-Seok Oh, Hyo-Sun Jang(KIMS), Sujung Son, Shi Woo Lee, Hyeong Seop Kim(POSTECH), Jiwon Park\*(KIMS)

**Keywords:** Refractory High-Entropy Alloys, Machine Learning, EMTO-CPA, Hybrid Sampling, Uncertainty

Refractory High Entropy Alloys (RHEAs) have attracted significant attention as next-generation structural materials due to their excellent high-temperature mechanical properties. However, their vast compositional space poses limitations for experimental-based exploration. In this study, EMTO-CPA calculations were performed on the compositional space of refractory high-entropy alloys composed of eight elements to obtain eight elastic properties (C11, C12, C44, bulk modulus, shear modulus, Young's modulus, Poisson's ratio, and Pugh's ratio). Various composition-derived physical parameters including average atomic radius, electronegativity, valence electron concentration, and others were calculated using weighted averages for each alloy composition, establishing an integrated property-composition-physical parameter database. After data preprocessing using multi-target outlier detection techniques, sampling conditions were constructed through a hybrid sampling strategy combining density-aware sampling and random sampling based on density weight(w) and sampling ratio(r) combinations. Optimal sampling conditions were selected for each elastic property, and prediction models were developed using XGBoost regression. Repeated K-fold cross-validation results demonstrated high prediction accuracy for all properties, and prediction confidence intervals were derived through Bootstrap-based uncertainty quantification. SHAP analysis was performed to quantitatively analyze the contribution relationships between alloy composition, composition-based physical parameters, and elastic properties, confirming that major composition-derived factors exhibit different importance levels for predicting specific elastic properties. PCA-based compositional space analysis visually confirmed the cluster structures and property distribution characteristics of alloys. Representative candidate alloys were selected by comprehensively considering prediction values and model uncertainties. The selected candidate alloys were fabricated for mechanical property evaluation and microstructural analysis, demonstrating excellent agreement between predicted and experimental values. This study presents the effectiveness of machine learning-based alloy design in large-scale compositional spaces.

**[고엔3-3 | 14:30]**

**Multi-Functional Properties of Superconducting and Hydrogen Storage in TaNb<sub>2</sub>HfZrTi High Entropy Alloy:** Rahmatul Hidayati, Jae Hyun Yun\*, Woo Jin Jo(Kyung Hee University), Sujin Kim, Woochul Kim(Yonsei University), Hyejeong Ha, Hyoung Seop Kim(Pohang University of Science and Technology (POSTECH)), Beongki Cho(Gwangju Institute of Science and Technology), Jin-Hee Kim\*, Jong-Soo Rhyee\*(Kyung Hee University)

**Keywords:** High-entropy alloy (HEA), Superconductors, Powder metallurgy, Hydrogen storage, Multifunctional materials

Metallic hydrogen storage and robust mechanical properties in superconductors may have critical importance in superconducting applications with liquid hydrogen cooling agent. Here, we investigate the superconducting and hydrogen storage functionalities in bulk TaNb<sub>2</sub>HfZrTi high-entropy alloys (HEAs) synthesized by mechanical alloying followed by hot-press sintering. The optimized superconducting sample (HP-900) exhibits a sharp superconducting transition at  $T_c = 7.8$  K, a high upper critical field  $\mu_0 H_{c2}(0) = 10.85$

T, and a critical current density exceeding  $2.9 \times 10^5 \text{ A cm}^{-2}$  at 4 K, surpassing values reported for arc-melted and spark-plasma-sintered counterparts. Meanwhile, the HEA sample achieves an outstanding room-temperature hydrogen storage capacity ( $\text{H/M} = 2.23, 3.8 \text{ wt}\%$  at 20 °C, 100 bar), which is high value corresponding to the state-of-the-art metallic high entropy alloy hydrides at room temperature. This unique integration of bulk processing, microstructural control, and dual functional performances establishes that the  $\text{TaNb}_2\text{HfZrTi}$  can be a benchmark platform for multifunctional BCC high-entropy alloys and it provides design principles for next-generation cryogenic and solid-state hydrogen technologies.

#### [고엔3-4 | 14:45]

**단·장범위 화학적 질서 제어를 통한 중엔트로피 합금의 강도-연성 균형 향상:** 소영섭(국립부경대학교), 박현영(국민대학교), 이준석(국립부경대학교), 이초현, 설재복\*(국민대학교), 배재웅\*(국립부경대학교)

**Keywords:** 중엔트로피 합금, short-range order,  $\text{L1}_2$  석출물, 기계적 특성, 변형 메커니즘

화학적 질서는 금속 재료의 기계적 거동에 중요한 영향을 미치는 요인으로 알려져 있으며, chemical short-range order (CSRO)와 long-range order (LRO)는 전위 이동 거동과 변형 메커니즘에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 기존 연구는 CSRO 또는 LRO의 개별적 영향에 초점을 맞추어 왔으며, 두 질서 상태의 공존 효과에 대한 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 Ni-rich face-centered cubic 구조의 중엔트로피 합금을 설계하고, 열처리 후 냉각 속도를 조절하여 화학적 질서 상태를 단계적으로 변화시켰다. 그 결과, 냉각 속도 감소에 따라 확산 제어 원자 재배열의 영향으로 점차 단범위에서 장범위에 이르는 화학적 질서 상태로 전이되는 경향을 확인하였다. 기계적 특성 평가 결과, CSRO-LRO 공존 상태에서 1,018 MPa의 최대 인장 강도, 29.4 GPa·%의 강도-연성 곱을 나타내며 가장 우수한 강도-연성 조합을 나타내었다. 또한 상온 인장 시험에서 비교적 높은 가공 경화 거동이 유지되었다. 이러한 결과는 CSRO와 LRO가 변형 과정에서 상호 보완적인 역할을 수행했기 때문으로 추정된다. 본 결과는 화학적 질서 제어를 통해 강도-연성 균형을 개선할 수 있는 가능성을 제시하며, 다중 원소 합금 설계에 대한 기초적인 방향성을 제공한다.

#### [고엔3-5 | 15:00]

**Cu 석출 기반 SFE 제어에 따른 Fe-Cr-Ni-Mn-Mo-Cu 합금의 상온 및 극저온 물성 향상:** 성민영, 장태진, 이하훈(고려대학교), 이 건직(한국과학기술연구원), 남승진, 박규민(고려대학교), Siyuan Zhang(Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH), 김세호, 손석수\*(고려대학교)

**Keywords:** Cu 석출, SFE, martensitic transformation, 극저온, 기계적 물성

금속 소재에서 상온 및 극저온의 강도-연성 균형을 확보하기 위해서는 항복강도와 변형 메커니즘의 동시 제어가 필요하다. 일반적으로 Fe 기반 합금에서는 탄화물을 통해 강도 향상과 변형 거동 조절이 가능하나, 탄화물의 비전단성 특성으로 인해 탄화물/기지 계면에서 국부 변형이 유발될 수 있다. 이러한 변형 불균일성은 온도 저하에 따라 더욱 심화되어 극저온 취성을 야기할 수 있으므로, 기존 탄화물과는 다른 석출상을 활용한 강화 전략이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 FeCrNiMnMoCu합금에서 전단 가능한 나노 스케일 Cu 석출물을 형성하여 강도 향상을 확보하고, 적층 결함 에너지(SFE) 제어를 통해 변형 거동을 조절함으로써 우수한 가공 경화능을 확보하였다. 약 3 nm의 반지름과 5% 분율의 구리 석출물은 전단을 통해 항복강도에 약 190 MPa 기여하였다. 또한 석출로 인한 기지 Cu 고용량 감소에 따라 SFE는  $23.3 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 에서  $15.6 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 로 감소하였으며, 이에 따라 상온에서는 변형 쌍정이 활성화되고 77 K에서는 FCC에서 BCC martensite 변태가 촉진되었다. 이를 통해 77 K에서 인장강도 1.43 GPa와 연신율 약 70%의 우수한 기계적 물성을 달성하였다. 본 연구는 변형 거동을 제어한 Cu 석출 강화 Fe 기반 합금 설계가 고강도·고인성 구조 재료 개발에 유효한 전략임을 제시하였다.

#### [고엔3-6 | 15:15]

**초고강도 및 저열팽창 특성 동시 구현을 위한 Super Invar 합금에서의 금속간화합물 석출 거동 제어:** 이상원, 정현, 오화윤(고려대학교), 홍석환, 서동우(포항공과대학교), 김정환, 이태호(한국재료연구원), 김세호, 손석수\*(고려대학교)

**Keywords:** 석출 강화, 금속간 화합물, 열팽창 계수, Super Invar

Fe-Ni-Co 기반 super Invar 합금은 특정 조성에서 0 ppm  $\text{K}^{-1}$ 에 가까운 열팽창 계수를 나타내어, 우주·항공·반도체 산업 등 열 변형이 최소화되어야 하는 정밀 구조체 소재로 활용되고 있다. 그러나 기존 super Invar 합금은 약 500 MPa 수준의 낮은 강도를 가져 구조용 소재로서의 적용에 한계가 있다. 강도 향상을 위한 일반적인 방법으로 석출강화가 활용되지만, 탄소 첨가에 따른 탄화물 석출은 강도 향상은 가능하나 연성의 급격한 저하를 동반한다. 이에 반해, Fe-Ni-Co FCC 단상 기지와 정합 또는 반정합 계면을 갖는 금속간 화합물을 이용한 석출강화는 강도와 연성의 동시 확보에 보다 효과적임으로 알려져 있다. Fe-Ni-Co 합금계에서 이러한 금속간 화합물을 석출시키기 위해 Al 및 Ti 첨가가 일반적으로 적용되며, Al/Ti 조성 비율에 따라  $\text{L1}_2$  또는  $\text{D0}_{24}$  석출상이 형성된다. 따라서 효과적인 석출강화를 위해서는 각 원소의 적정 함량과 이에 따른 석출상 제어가 필수적이다. 그러나 Al 및 Ti 첨가에 의해 형성되는  $\text{L1}_2$  및  $\text{D0}_{24}$  석출상이 super Invar 합금의 미세조직, 기계적 특성 및 열변형 특성에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구는 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서는 Al/Ti 조성 비율을 조절하여 서로 다른 석출상을 갖는 석출강화형 Fe-Ni-Co-Al-Ti super Invar 합금을 설계하고, 석출상의 종류가 미세조직 및 이에 따른 기계적·열변형 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 그 결과,  $\text{L1}_2$  석출상을 기반으로 강화된 super Invar 합금이 1158 MPa의 인장강도, 18%의 연성, 그리고  $2.66 \text{ ppm}\cdot\text{K}^{-1}$ 의 열팽창 계수를 동시에 달성하여, 기존 석출강화형 super Invar 합금 대비 우수한 기계적 및 열변형 특성을 나타냄을 확인하였다.

**[고엔4-1 | 15:40]**

Tailoring mechanical properties of an Fe-Ni-rich complex concentrated alloy by controlled lamellar precipitation: Dong Whan KIM\*, Jae Kwon KIM, Eun Soo Park(Seoul National University)

**Keywords:** Complex concentrate alloys (CCAs), Alloy design, Microstructure, Precipitation strengthening, Mechanical properties

The development of structural materials that simultaneously exhibit high strength and ductility is critical for advanced engineering applications, as such a combination enhances structural reliability, damage tolerance, and energy efficiency. However, achieving a desirable synergy between strength and ductility remains inherently challenging due to their generally antagonistic relationship. In this study, we report the design and development of a series of Fe-rich, non-equiatomic complex concentrated alloys (CCAs). Alloy compositions were determined using a semi-quantitative design strategy guided by CALPHAD-based thermodynamic predictions to promote the formation of a precipitation-strengthened microstructure. The targeted microstructure consisted of an FCC matrix reinforced by ordered  $L_{12}$  precipitates. The alloys were synthesized via arc melting, followed by homogenization and cold rolling. After solution treatment, systematic aging was performed at 600 °C and 800 °C for varying durations to investigate precipitation kinetics and microstructural evolution. Aging resulted in the formation of a lamellar  $L_{12}$  phase within the FCC matrix, with precipitates distributed across multiple length scales. This heterogeneous precipitation of the  $L_{12}$  phase played a pivotal role in optimizing the mechanical response by enabling effective strengthening while retaining substantial ductility. The optimized alloy exhibited a yield strength of approximately 1 GPa, an ultimate tensile strength of ~1.4 GPa, and an impressive ductility of ~25% at room temperature. The high Fe content not only reduces material cost and density but also contributes to mitigating the strength-ductility trade-off. These findings highlight the significant potential of Fe-rich CCAs for next-generation structural applications.

**[고엔4-2 | 15:55]**

Hot rolling-direct aging 기반  $L_{12}$  석출강화에 따른 FeCoNiV 등원자 중엔트로피 합금의 상온 및 극저온 기계적 특성: 하수빈, 이시우, 이재홍, 김진우, 김형섭\*(포항공과대학교)

**Keywords:** Medium-entropy alloy, Precipitation strengthening, Mechanical properties, 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  $L_{12}$  석출강화 전략이 큰 주목을 받고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 FeCoNiV 등원자 중엔트로피 합금에 열간압연과 direct aging 공정을 적용하여 높은 전위 밀도와  $L_{12}$  나노 석출상을 동시에 형성하고 이를 통해 기계적 특성을 향상시키고자 하였다. Direct aging된 시편은 전위강화와 석출강화의 시너지 효과로 인해 상온 및 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. 이러한 결과는 direct aging 공정을 통한 미세조직 제어 기반  $L_{12}$  석출강화 전략이 상온 및 극저온 환경에서 기계적 특성 향상에 효과적인 설계 방향임을 제시한다.

**[고엔4-3 | 16:10]**

Co-free  $L_{12}$  강화형 고엔트로피합금에서의 계층적 미세조직 기반 강도-연성 최적화: 정희재(포항공과대학교), 권현석(University of Cambridge), 허윤욱, 이재홍, 이시우, 김형섭\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 고엔트로피합금, 계층적 미세조직, 석출 강화, HDI 강화

본 연구에서는 Co-free  $L_{12}$  강화형 FeMnNiAlTi 신조성 고엔트로피합금을 설계하고, 열가공공정 제어에 기반한 계층적 미세조직을 활용하여 우수한 강도-연성 조합을 구현하고자 하였다. 본 고엔트로피합금은 기존  $L_{12}$  강화형 고엔트로피합금과 달리 고가의 Co를 사용하지 않아 가격 경쟁력이 높을 뿐만 아니라 밀도도 상대적으로 낮아 상용화에 유리하다. 기계적 특성의 향상을 위해 coarse grain과 fine grain이 공존하는 계층적 결정립 구조를 조성하여 계면에서의 변형간 전위 축적 및 hetero-deformation induced 강화 효과를 유도하였다. 또한,  $L_{12}$ , B2,  $\eta$  구조의 석출물을 공존시켜 석출강화를 통한 추가적인 가공경화 효과를 확보하였다. 본 결과는 Co-free HEA에서 계층적 결정립 구조와 석출물들을 통한 강도-연성 동시 향상 전략을 제시하였다는 의의를 갖는다.

**[고엔4-4 | 16:25]**

$L_{12}$  석출을 통한 우수한 극저온 기계적 물성을 갖는 지속가능 합금 설계: 김진섭, 김진경\*(한양대학교)

**Keywords:** 중엔트로피합금,  $L_{12}$ 석출, 트랩트 원소, 극저온 물성, DIMT

본 연구에서 지속가능한 합금 설계를 위해 트랩트 원소로 알려진 Cu를 활용하여 극저온 기계적 특성이 우수한  $L_{12}$  석출형 철계 중엔트로피 합금을 설계하였다. 재결정 열처리 후 시효 열처리를 거친 재료는 결정립 내부에 분포한  $L_{12}$  나노 석출상과 함께 결정립계를 따라 형성된 불연속 석출물(DP)을 보였다. STEM-EDS 분석 결과,  $L_{12}$  석출상이 Ni, Al, Ti뿐만 아니라 Cu도 주 원소로 구성되어 있음을 확인하였다. 재결정 열처리 후 시효 열처리된 재료는 상온 및 극저온 모두에서 우수한 강도-연성 균형을 나타내었으며, 특히 변형 온도가 감소함에 따라 연성의 저하 없이 변형 경화가 현저히 증가하였으며, 110 K에서 20% 이상의 연신율과 1.9 GPa를 이상의 인장강도를 달성하였다. 변형 거동 분석 결과, 시효 처리된 소재의 변형 과정에서 적층 결함의 활성화와 FCC-BCC 변형 유도 마르텐사이트 변태(DIMT)가 확인되었다. DIMT의 발생 정도는 변형 온도가 감소할수록 증가하였다. 이를 통해 본 재료가  $L_{12}$  석출 강화와 DIMT의 시너지 효과로 인해 우수한 기계적 특성을 나타내었으며, 특히 변형 온도가 감소할수록 DIMT의 기여도가 더욱 증가함을 확인하였다.

**[고엔4-5 | 16:40]**

**4.2 K에서 변형 불안정성이 완화된 L1<sub>2</sub> 강화형 중엔트로피 합금:** 이준선, 신필욱, 소영섭, 이민호(부경대학교), 김영균, 나영상(한국재료연구원), 김형섭(포항공과대학교), 설재복(국민대학교), 배재웅\*(부경대학교)

**Keywords:** 중엔트로피 합금, L1<sub>2</sub> 나노 석출물, 초극저온, 변형 불안정성, 전위

최근 다성분계 고중엔트로피 합금은 조성 설계의 자유도와 우수한 물리·기계적 특성으로 주목받고 있다. 특히 face-centered cubic (FCC) 기반 합금은 극저온에서 높은 파괴인성과 강도-연성 조합을 보이지만, 20 K 이하의 특정 임계 온도에서 발현되는 불연속 소성 변형(discontinuous plastic flow, DPF)에 의해 응력-변형률 곡선에서 serration 형태의 stress drop이 나타난다. 이러한 변형 불안정성은 연성 저하 및 구조 신뢰성 문제로 이어질 수 있어 초저온 환경에서의 제어가 요구된다. 본 연구에서는 FCC 기지와 정합성을 갖는 Ni<sub>3</sub>Al-type L1<sub>2</sub> 나노석출물을 도입한 비등원자조성의 AlCrFeNiMo 중엔트로피 합금을 설계하였다. 냉간 압연 후 1000 °C에서 용체화 처리 및 700 °C에서의 시효 처리를 통해 수십 나노미터 크기의 L1<sub>2</sub> 석출물을 형성하였다. 4.2 K 인장시험 결과, 항복강도 1.02 GPa, 인장강도 1.66 GPa, 총 연신율 29%의 우수한 강도-연성 조합을 나타냈다. 또한 인장강도 부근에서의 stress drop은 약 67 MPa 수준으로, 현재까지 보고된 합금 대비 비교적 낮은 변형 불안정성을 보였다. 추가적으로 L1<sub>2</sub> 나노석출물이 DPF 거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 용체화 처리 상태 시편과의 비교 평가를 수행하였다.

**[고엔4-6 | 16:55]**

**초극저온 불연속 소성 거동과 전위 하부구조 진화에 대한 적층결함에너지의 영향:** 신필욱(국립부경대학교), 김영균(한국재료연구원), 이준석(국립부경대학교), 나영상(한국재료연구원), 김형섭(포항공과대학교), 이수빈\*(Karlsruhe Institute of Technology), 배재웅\*(국립부경대학교)

**Keywords:** 변형 불안정성, 초극저온, 중엔트로피 합금, 적층결함에너지, 변형 메커니즘

초극저온(0.5–35 K) 환경에서 발생하는 불연속 소성 거동(discontinuous plastic flow, DPF)은 극저온 구조재의 기계적 신뢰성을 저해하는 주요 요인이지만, 이를 지배하는 근본 인자에 대해서는 여전히 명확한 합의가 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 적층결함 에너지(stacking fault energy, SFE)가 전위 거동과 DPF 거동을 제어하는 핵심 인자임을 체계적으로 규명하고자 하였다. 이를 위해 면심입방구조(face-centered cubic, FCC)의 Fe<sub>55</sub>Cr<sub>12.5</sub>Ni<sub>x</sub>Co<sub>(25-x)</sub>Mo<sub>7.5</sub> 중엔트로피 합금(medium entropy alloys, MEAs) 시스템을 설계하고, Ni/Co 조성 제어를 통해 SFE를 단계적으로 조절하였다. 4.2 K 인장시험 결과, SFE 증가에 따라 DPF가 점진적으로 억제되었으며, 응력 강하(Ds) 진폭이 감소하였다. 미세조직 분석 결과, 낮은 SFE 합금에서는 부분전위로의 해리가 촉진되어 planar slip이 우세하게 나타났고, 부분전위 간 상호작용으로 인한 국부적 격자 장벽(lattice barrier)의 연속적 형성 및 축적이 관찰되었다. 이러한 전위 하부구조는 큰 응력 강하를 동반하는 DPF의 빈번한 발생으로 이어졌다. 반면, 높은 SFE 합금에서는 부분전위로의 해리가 억제되어 wavy slip이 촉진되었으며, 변형 중 형성되는 격자 장벽의 밀도가 감소하여 상대적으로 안정적인 소성 거동을 보였다. 본 연구는 SFE가 전위 성격(character)과 전위 하부구조 진화를 매개로 DPF 거동에 중요한 역할을 함을 실험적으로 제시한다.

## 제13회 첨단 융복합 분석기술 심포지엄

Room 2층 202A, 4월 28일

## [융복합1-1 | 10:00] 초청강연(튜토리얼)

Revisiting the basal plane stacking faults in hexagonal structure 4H-SiC and its application to metallic system: Soon-Ku Hong\*(Chungnam National Univ.)

Keywords: Stacking fault

Stacking faults are two-dimensional planar defects common in all kinds of crystalline materials, including metals and semiconductors, and have been researched since the early 1950s. Silicon carbide (SiC) is a binary tetrahedral crystal with silicon and carbon atoms. 4H-SiC and 3C-SiC, the most common hexagonal and cubic polytypes, are important compound semiconductors. The formation of numerous basal plane stacking faults on the (0001) plane in hexagonal 4H-SiC has been widely reported since the early 2000s. Because of numerous basal stacking faults in SiC, experimental and theoretical researches have widely been carried out by HAADF-HTSTEM observations, weak-beam TEM analysis, photoluminescence mapping and spectra analysis, and DFT calculations of formation energy and band structures. The basal plane stacking faults can be classified into Shockley-type and Frank-type stacking faults. On the other classifications, the stacking faults can be classified into intrinsic and extrinsic stacking faults. In this presentation, we will cover the basic and fundamental concepts of these stacking faults. Further, we will also cover the formation mechanism. The results and insights of the comprehensive study using HAADF-HRSTEM observations and DFT calculations for 4H-SiC can be directly applied to other cubic and hexagonal material systems including metals and alloys.

## [융복합2-1 | 14:00] 초청강연

적층제조용 금속분말제조 및 응용기술개발: 홍준익\*(국립공주대학교, 첨단분말소재부품센터(CAMP2))

Keywords: 적층제조공정, DED, 분말 특성 평가

제품의 다품종 소량 생산, 복잡한 형상 구현 및 기계적 특성 향상 방안으로 금속 적층 제조 공정이 각광 받고 있다. 금속 적층 제조는 금속 분말을 사용하여 적층하는 PBF(powder bed fusion)와 DED(direct energy deposition) 공정이 주를 이루고 있으며, 분말 특성은 적층제조 공정의 안정성과 최종 부품 품질에 결정적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 다양한 합금 및 복합 분말을 GA(gas atomization), Milling 공정으로 제조하여 분말 특성 제어를 통한 산소함량, 유동성, 분말 표면 특성이 DED 공정에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 분말 특성 제어를 위해 Ni계 합금 분말을 GA 공정 중 오리피스 노즐 내경, 용탕 흡입 압력, 출탕 온도 조건을 매개변수로 하여 합금 분말 제조 수율, 특성 제어 연구를 진행하였다. 용탕 출탕 온도의 경우 분말 특성에 큰 영향을 미치지 않았으나, 흡입 압력과 오리피스 노즐 내경 제어를 통해 DED 공정에 적합한 입도와 형상을 지닌 합금 분말을 높은 수율 제조가 가능하였다. 또한, 분말 특성이 적층제조 공정에 미치는 영향을 조사하기 위해 고엔트로피 합금(CoCrFeMnNi) 분말의 산소함량, CoCrFeMnNi, B4C 복합 분말의 표면 특성을 제어하여 as-built 합금의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 분말의 산소함량은 GA 공정 중 챔버 내 분위기를 제어하여 조절하였으며, 분말 표면 산화물 형성, 레이저 반사를 변화가 DED 공정에 영향을 미쳤다. 서로 다른 밀링 공정을 통해 제조된 복합 분말의 표면 제어를 통해 분말 표면 반사율, 유동성이 DED공정에 미치는 영향을 확인하였으며, 이는 미세조직, 물성에 큰 영향을 미침을 확인하였다. GA 공정 매개변수 제어를 통해 입도, 형상, 산소함량 제어가 적층제조용 분말 생산에 필수적인 영역임을 확인하였고, 복합 분말 또한, 표면 특성이 기계적 특성에 큰 영향을 미쳤다. 따라서, 적층제조 공정으로 제조된 부품의 신뢰성과 재현성을 위해서는 분말 특성 제어와 균일한 분말이 필요함을 제시한다.

## [융복합2-2 | 14:30] 초청강연

SMR(Small Modular Reactor) 주기기 제작을 위한 혁신제작기술 개발 현황: 김정길\*, 김동수, 안세환(두산에너지빌리티)

Keywords: SMR, 혁신제조기술, PM-HIP, EBW, DLC

최근 탄소배출 저감을 위한 새로운 발전 기술의 하나로 SMR에 대한 관심이 증가하고 있다. 증기발생기와 같은 다양한 기기들이 단일 Vessel내부에 설치되어야 하기 때문에, 단일 기기기준으로 SMR은 기존 대형원자력 발전소에 설치되는 기기보다 더 크고 복잡하다. 그럼에도 불구하고, 발전사들은 SMR이 기존 대형원전보다 더 저렴하게 더 빨리 제작 설치되어야 한다고 요구하고 있는 실정이다. 따라서 수십년간 주기기 제작에 사용되어 오던 주조, 단조 및 아크용접 기술이 아닌 혁신적인 제작기술의 적용이 필수적으로 요구되고 있으며, 그 혁신제작기술은 대표적으로 PM-HIP(Powder Metallurgy Hot Isostatic Pressing), EBW(Electron Beam Welding) 및 DLC(Diode Laser Cladding)가 있다. PM-HIP기술은 최종형상의 Capsule내에 금속분말을 채워넣고 HIP처리를 하여 한번에 최종 제품을 제작하는 기술이며, EBW은 수백mmt 두께의 후판을 1Pass로 제작이 가능한 최신 용접기술이다. 그리고 DLC는 주기기 내면에 고내식 합금의 분말을 Diode Laser를 이용하여 단시간내에 Cladding하는 기술이다. 본 발표에서는 위와 같이 간략히 언급한 SMR 주기기 제작용 혁신제작기술에 대한 세부 설명과 개발진행 현황에 대하여 공유하고자 한다.

## [융복합2-3 | 15:00] 초청강연

이온조사 기반 핵융합 소재 중성자 손상 메커니즘 모사 및 예측: 강석훈\*, 박선영, 천영범, 진형하, 이승현, 이동원(한국원자력연구원)

Keywords: 핵융합 소재, 이온 조사, 중성자 손상 모사, 조사경화, 스웰링

본 연구는 핵융합 실증로의 극한 환경에서 구조 소재가 겪는 고에너지 중성자 조사 손상을 평가하기 위해, 이온 조사(Ion Irradiation) 시험법을 활용한 손상 기구 규명 및 수명 예측 기술 개발을 목표로 한다. 실제 중성자 조사 실험의 물리적·시간적 제약을 극복하고자, 고에너지 중성자 거동을 모사할 수 있는 이온 빔을 이용하여 단기간에 고선량(High-DPA) 손상을 인가하고, 이에 따른 미세조직 변화와 결합 생성 거동을 정량적으로 분석한다. 특히, 이온 조사 데이터와 실제 중성자 손상 간의 정량적 상관관계(Correlation)를 도출하여, 소재의 조사 취화 및 스웰링(Swelling) 현상을 예측할 수 있는 모델을 제시하는 목표를 가지고 있다. 본 연구 결과는 차세대 핵융합로(Reactor)용 구조 및 기능소재의 내구성 평가 및 최적 합금 설계를 위한 주요 자료로 활용될 것으로 기대한다.

### [용복합3-1 | 15:30] 초청강연

**내열성과 내식성을 동시에 만족하는 신개념 페라이트계 합금 설계:** 임가람\*, 심상훈, 권현준(한국재료연구원), 정재길(전북대학교), 송기안(공주대학교), 장혜정(한국과학기술연구원), 이호원(한국재료연구원)

**Keywords:** 내식성, 내열성, 페라이트계, 오스테로피 합금

최근 소형모듈원전, 고온수전해, 암모니아 크래킹 등 차세대 에너지 시스템의 상용화가 가속됨에 따라 고온 부식 환경에서 장기적으로 안정한 구조재료에 대한 요구가 급증하고 있다. 그러나 기존 내열합금은 성능과 비용, 내식성과 내열성 간의 상충 관계로 인해 적용에 어려움이 크다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 오스테로피 합금 설계 개념을 페라이트계 합금에 적용한 신개념 합금 설계를 제안하였다. 고함량 Al과 Cr을 포함하는 조성 설계를 통해 고온 수증기 환경에서 치밀한  $Al_2O_3$  보호피막 형성을 유도하였으며, Ni 및 Ti 첨가에 따른 L2<sub>1</sub> 석출상 제어를 통해 고온 미세조직 안정성과 내열 특성을 확보하였다. 700 °C 수증기 분위기에서의 산화 시험 결과, 개발 합금은 낮은 질량 증가율과 우수한 산화막 안정성을 나타내어 기존 페라이트계 합금 대비 향상된 내식성을 보였으며, 동시에 장기간 안정적인 내열 특성을 유지하였다. 본 연구는 내열성과 내식성을 동시에 만족하는 차세대 페라이트계 합금 설계 가능성을 제시한다.

### [용복합3-2 | 16:10] 초청강연

**주요 용접 공정의 장단점과 용접부 미세조직 및 기계적 특성:** 박철호\*(조선대학교)

산업 현장에서 널리 활용되는 주요 용접 공정들의 특성과 장단점을 비교하고, 각 공정의 열원 특성 및 입열 거동이 용접부 미세조직 형성과 기계적 특성에 미치는 영향을 금속학적 관점에서 종합적으로 고찰한다. 아크 기반 용접과 고에너지 밀도 용접 공정은 에너지 집중도, 열입력, 냉각속도 및 용융·응고 거동에서 뚜렷한 차이를 보이며, 이러한 공정 변수의 차이는 용고조직의 형태, 결정립 크기, 상 분율, 편석 및 열영향부 특성 변화로 이어져 최종 용접부 건전성과 신뢰성을 좌우한다. 특히 입열 제어와 냉각 조건은 상변태 거동과 잔류응력 형성에 직접적인 영향을 미치며, 이는 강도, 인성, 연성 및 피로 특성과 같은 기계적 성능 발현과 밀접하게 연관된다. 본 발표에서는 다양한 소재와 산업 적용 사례를 바탕으로 공정-조직-물성 간 상관관계를 체계적으로 정리하고, 요구 성능에 따른 최적 공정 선택과 용접부 조직 제어를 위한 실질적인 설계 전략 및 활용 방향을 제시하고자 한다.

### [용복합3-3 | 16:40] 초청강연

**액체수소저장 금속용접부의 수소취성 평가:** 이수열\*(충남대학교)

**Keywords:** 액체수소, 용접부, 수소취성, 15 K

일반적으로 금속의 수소취성은 상온에서 주로 발생하며, 온도가 내려갈수록 수소 확산도가 감소함에 따라 그 영향이 약화되는 것으로 알려져 있다. 하지만 초극저온(35 K 이하)에서는 전위 사태에 의해 활성화되는 특이한 불연속적 소성변형이 발생하면서 소재의 온도가 국부적으로 상승하게 된다. 이러한 국부적 온도 상승은 수소 확산을 활성화시키며 수소의 국부적 집적을 촉진함으로써 수소취성에 대한 민감도를 증가시킨다. 본 연구에서는 15 K 조건에서 스테인리스강의 모재부, 열영향부, 용접부의 위치별 수소취화 저항성을 평가하였다. 용접부 위치별 미세조직을 분석하고, 해당 미세조직이 수소 확산 및 집적 특성, 그리고 수소취성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다.



## 적층제조 및 분말

Room 2층 202B, 4월 28일

### [적층 1-1 | 09:00]

**다양한 용체화 열처리 조건 적용 후 로냉한 L-DED 적층제조 IN939 합금의 미세구조 및 석출물 거동:** 백하은, 최정원, 오규민, 정성원(영남대학교), 박기덕(주식회사 갯테크), 김도형\*(영남대학교)

**Keywords:** 적층제조, Directed Energy Deposition(DED), IN939, Solution heat treatment, Furnace cooling

Inconel 939는  $\gamma$  매트릭스 내  $L_{12}$  구조의  $\gamma'(Ni_3(Al, Ti))$  석출물 형성에 의해 주로 강화되는 석출경화형 니켈기 초내열합금으로 우수한 크리프 강도, 부식 및 산화 저항성과 약 850°C의 높은 사용온도로 인해 터빈 블레이드의 냉각 채널 같이 장기간 운용이 요구되는 항공우주 및 발전 산업에서 적용 가능성이 높은 유망한 소재이다. 적층 제조 공정은 기존 주조 및 절삭 가공 대비 높은 형상 자유도와 정밀한 구조를 구현할 수 있는 이점이 있으며, 최근 레이저 파우더베드 퓨전(laser powder bed fusion, L-PBF)이나 레이저 직접 에너지 적층(laser direct energy deposition, L-DED) 공정 등 다양한 적층제조공정으로 제조된 초내열합금에 대한 연구가 보고되고 있다. 반면, L-DED와 같은 적층제조공정은 국부적인 반복 용융 및 열이력으로 인한 용질편석, 탄화물 석출 등 불균일한 미세조직이 관찰되기 때문에 최종 시효처리를 거치기 전 균질화를 위한 용체화처리가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 L-DED 공정으로 제작된 IN939에 대해 다양한 용체화 열처리 온도(1100°C, 1150°C, 1200°C 및 1250°C)와 유지 시간(30 min, 1 h 및 2 h)을 달리하여 미세구조 및 석출물 거동의 변화에 대해 조사하였다. 또한, 니켈기 초내열합금의 경우 고온균열이나 지연균열 등 다양한 균열발생에 대한 민감도가 높기 때문에 고온 등방 가압 (Hot isostatic pressing, HIP) 처리가 권고되며 일반적으로 HIP처리 이후에는 로냉되는 것이 보편적이므로, 무가압 조건에서 용체화 처리 후 로냉을 진행하여 HIP처리 후 형성되는 미세조직을 모사하였다. 연구 결과, 용체화 열처리 온도가 증가할수록  $\gamma'$ 의 분율이 증가하였으며 석출물의 형상이 flowerlike 형태에서 cuboidal 이나 spherical 한 형태로 변화함을 관찰하였다. 또한 as-built 상태에서 소량 존재 하던 MC-type 탄화물은 열처리 후 조대화되는 것을 관찰할 수 있었으며, local misorientation, grain orientation spread 및 texture 분석 등 EBSD 분석을 통해 재결정화 정도를 평가하였다. 상기 결과들을 바탕으로, 후속연구인 시효처리조건에 따른 미세조직 변화에 대한 결과와 더불어 L-DED를 이용하여 적층된 IN939합금의 최적 열처리 조건을 도출하는데 있어 중요한 자료가 될 것으로 기대된다.

### [적층 1-2 | 09:15]

**Strengthening by B2 ordering and delayed TRIP in low-Mn Fe-Mn-Al-C lightweight steels: In the DED as-built state:** JeongWoong Park, Kwang Kyu Ko, Seong Hyeon Yang, Min Yu Kang(Kookmin University), Haeum Park, Jeong Min Park(KIMS), Hyun Joo Choi(Kookmin University), Hyoung Seop Kim(POSTECH), Jae Bok Seol\*(Kookmin University)

**Keywords:** Direct Energy Deposition(DED), Low-Mn lightweight steel, Nano-sized B2 precipitate, Delayed TRIP

Here, we demonstrate that controlling the specific laser energy input ( $E_{sp}$ ) in a pre-alloyed low-Mn Fe-Mn-Al-C ferrite-based lightweight steel enables tunable microstructural heterogeneity and staged strengthening in the as-deposited state. Lower  $E_{sp}$  promotes pronounced chemical partitioning, leading to an Al-enriched ferritic matrix and C/Mn-enriched martensite/austenite (M/A) constituents. As a result, the steel exhibits a tensile strength exceeding 1.0 GPa without post-deposition heat treatment. Early-stage deformation is dominated by the shearing of nanoscale B2-ordered precipitates (2-5 nm) within the Al-rich ferrite via planar glide of superdislocation pairs. At higher strains,  $E_{sp}$ -dependent partitioning and morphological constraint stabilize retained austenite within the M/A regions, activating a delayed transformation-induced plasticity (TRIP) effect.

### [적층 1-3 | 09:30]

**L-DED 통해 제작한 Co-Cr-Fe-Mn 고엔트로피 합금의 FCC/HCP 상분율에 따른 수소 취성 거동:** 박민수, 김민기, 이육진\*(부산대학교)

**Keywords:** Laser direct energy deposition, 고엔트로피 합금, 수소 취성, 마르텐사이트 변태

Co-Cr-Fe-Mn-Ni 고엔트로피 합금은 face centered cubic (FCC) 단상 구조를 보이는 합금으로 뛰어난 극저온 기계적 특성 및 낮은 수소확산 계수로 인해 수소 산업 분야에서의 적용 가능성으로 주목받고 있다. Co-Cr-Fe-Mn 고엔트로피 합금은 Co-Cr-Fe-Mn-Ni 고엔트로피 합금에서 Ni를 Co로 대체한 합금으로, FCC 상과 hexagonal close packed (HCP) 상간의 마르텐사이트 동소변태에 의한 형상기억특성이 발현된다고 보고되고 있다. 또한 Co-19Cr-20Fe-18Mn (wt. %) 합금을 L-DED를 통해 제작할 경우 급속응고에 의해 준평형 HCP상이 형성되어 FCC-HCP 이중상 구조를 나타낸다고 보고되었다. HCP상은 FCC상에 비해 낮은 수소 투과도를 가진다고 보고되고 있으나 제한적인 슬립계를 가져 낮은 연성을 보인다는 단점이 있다. 또한 이중상 합금에서는 상간 계면이 균열 개시의 취약부로 작용될 수 있음이 보고되어 왔다. 이러한 요인들을 고려해 볼 시 FCC/HCP 상분율 변화가 수소 취성에 미치는 영향은 불분명하다. 따라서 본 연구에서는 고엔트로피 합금의 상분율이 수소취성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하기 위해 FCC 안정화 원소로 널리 알려진 탄소를 첨가하여 Co-Cr-Fe-Mn 합금의 FCC/HCP 상분율을 조절하고 이에 따른 수소 취성 거동을 분석하였다. Co-19Cr-20Fe-18Mn-xC (x=0, 0.2, 0.4 wt.%) 합금을 L-DED를 통해 제작하였으며 합금의 미세조직 및 수소 장입 후 인장 거동 변화를 분석하였다.

**[적층1-4 | 09:45]**

**900°C 및 1100°C에서 LPBF Inconel 625 합금의 장기 산화 거동:** 고도열, 이서진(한국생산기술연구원, 성균관대학교), 최민호(한국생산기술연구원, 서울대학교), 이해진(한국생산기술연구원), 한혁수(성균관대학교, 한양대학교), 한성국, 김동수(CSCAM), 이병수\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 장시간 산화, LPBF, Inconel 625, 미세조직, 잔류응력

NiTi 초합금은 우수한 강도, 뛰어난 크리프 저항성, 훌륭한 내식성 가지고 있기 때문에 항공 우주, 에너지 생산, 화학 공정, 해양 분야에서 폭넓게 사용되고 있다. Inconel 625는 높은 강도와 탁월한 내식성을 바탕으로 고온·고압의 가혹한 환경에서도 안정적인 성능을 유지하기 때문에 산업적으로 적용범위가 매우 넓다. Laser powder bed fusion (LPBF)는 레이저를 금속분말층에 조사하여 분말간 용융을 통해 3차원 형상의 부품을 제작하는 방법으로 높은 설계 자유도, 재료 선택의 유연성, 우수한 소재 효율을 바탕으로 고가의 금형 없이도 복잡 형상을 제작하는데 효과적이다. 그러나 LPBF 제조된 소재의 표면 특성상 표면 품질이 상대적으로 열악하기 때문에 고온 환경에서 산화 저항성이 감소되며 온도가 증가할수록 산화 저항성은 더욱 감소한다. 본 연구에서는 LPBF로 제조된 Inconel 625 합금의 장시간 고온 산화 거동을 연구하였다. 고온 산화를 위한 노출 온도는 900°C 와 1100°C이며 대기 분위기에서 최대 1080시간까지 노출하였다. 또한, 온도에 따른 산화막 안정성, 박리(spallation) 발생, 그리고 Cr 고갈(Cr-depletion) 및 미세조직 변화를 비교하여 산화 열화 메커니즘을 규명하고자 하였다. 산화 초기에는 LPBF 공정에서 기인한 높은 잔류응력이 기지 내 Cr의 화학적 활성도를 증가시켜 산화 저항성이 상대적으로 낮게 나타났다. 그러나 노출 시간이 증가함에 따라 산화 저항성은 점진적으로 개선되었다. 900°C에서는 보호성  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  산화막이 형성되어 장시간 노출에도 박리 없이 안정적으로 유지되었고,  $\text{Ni}_3\text{Nb}$  금속간화합물의 형성이 관찰되었다. 반면 1100°C에서는 비보호성  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$  및  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  산화물이 형성되며 산화막 안정성이 저하되었고, 1080시간 노출 후 심각한 박리가 발생하였다. 또한 1100°C 조건에서는 산화 중 소성 변형이 동반되었으며, Kirkendall 확산 불균형에 의해 입계 공극 형성이 촉진되었다. 이로 인해 1100°C에서 900°C 대비 더 깊은 Cr 결핍층(Cr-depleted layer)가 형성되었으며, 이는 주로 심각한 박리에 기인한다. 결론적으로, LPBF Inconel 625는 900°C에서는  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  기반 보호막으로 우수한 내산화성을 보이는 반면, 1100°C에서는 비보호성 산화물 형성과 박리가 지배하여 산화 저항성이 크게 저하된다.

**[적층1-5 | 10:00]**

**텅스텐 산화물을 활용한 나노 텅스텐 분말 제조 및 고밀도 소결 특성 연구:** 신하진, 박민수, 박정우, 하국현\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 텅스텐, 입자 제어, 환원, 유동 반응, 소결

텅스텐은 고밀도, 고강도, 우수한 내마모성 및 뛰어난 고온 안정성을 지닌 금속으로, 초경합금, 정밀 가공 공구, 전기·전자 부품, 열 차폐 소재, 항공·우주 및 방위 산업 등 다양한 첨단 산업 분야에서 핵심 소재로 활용되고 있다. 그러나 텅스텐은 전 세계적으로 매장량이 제한된 희소 자원이며, 최근 중국의 전략 광물 및 희토류 수출 규제에 의해 공급 불안정성과 가격 상승 문제가 심화되고 있다. 이에 따라 안정적인 자원 확보를 위한 재활용 기술의 중요성이 크게 부각되고 있다. 현재 텅스텐 관련 연구는 미세 분말 제조, 환원 공정 제어, 고밀도 소결 기술 개발 등으로 확대되고 있으나, 기존 초경 스크랩 재활용 공정은 비용이 높고 희수 분말의 입자가 조대하여 고부가가치 소재 적용에 한계가 있다. 특히 텅스텐 분말은 주로 텅스텐 산화물의 환원 공정을 통해 제조되며, 고온 환원 시 입자 성장이 발생하여 합금의 기계적 특성 향상에 제약이 따른다. 본 연구에서는 폐 텅스텐 스크랩으로부터 회수한 텅스텐 산화물을 유동 반응 공정을 통해 100 nm 급 금속 텅스텐 분말로 제조하였다. 제조된 W분말은 HIP 및 SPS 소결 공정을 이용하여 고밀도 텅스텐 소결체를 제조하였다. 후기) This study was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP, Grant No. 20217510100070), the National Research Council of Science & Technology(NST) grant by the Korea government (MSIT) (No. GTL25031-210).

**[적층2-1 | 10:25]**

**직접응용증착으로 제조된 15-5 PH 스테인리스 강의 직접 시효에 따른 기계적 특성 및 미세구조 변화:** 주수빈, 김정기\*(경상국립대학교)

**Keywords:** Additive Manufacturing, precipitation hardening stainless steel, mechanical properties, heat treatment

산업의 고도화에 따른 우수한 내식성과 강도-연성 조합을 가지는 석출경화형 스테인리스 강에 대한 수요가 증가하고 있다. 그 중 15-5 PH 스테인리스 강은 높은 경도와 인장강도를 기반으로 가스터빈의 압축기, 핵 산업의 부품 등 고온·고응력 환경의 부품 소재로 활용되어 왔다. 15-5 PH 스테인리스 강은 열처리 중 역변태 오스테나이트를 형성함과 동시에 Cu-rich 석출물의 형태 및 결정구조가 변화하며 이들 미세조직 변화로 인해 기계적 특성에 큰 변화가 나타난다. 특히, 적층제조를 활용해 제조된 15-5 PH 스테인리스 강은 반복적인 용융-응고 및 빠른 냉각속도로 인해 석출 및 상변태 거동이 기존 공정과 달라지게 되므로 적층제조된 15-5 PH 스테인리스 강의 석출물 거동 변화에 대한 연구는 필수적이거나 아직 이에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 적층 제조된 15-5 PH 스테인리스 강의 직접 시효 온도 변화에 따른 Cu-rich 석출물 성장 거동 및 기계적 특성을 논의하고자 DSC 분석을 통해 7개의 열처리 온도를 설정하였다. 이후, 각각의 열처리 온도에 따른 미세조직 변화 관찰 및 DIC 인장시험을 통해 미세조직과 기계적 특성의 상관관계를 규명하고자 한다

**[적층2-2 | 10:40]**

**Directed energy deposition(DED)를 활용한 철계 중엔트로피 합금의 최적 조성 탐색 및 시험:** 구본우, 이재홍, 이지영(포항공과대학교), 김대겸(한국생산기술연구원), 이정완, 김은성, 하효정(포항공과대학교), 김택수(한국생산기술연구원), 김형섭\*(포항공과대학교)

**Keywords:** In-situ alloying, 중엔트로피 합금, 고속대량 합성, Directed Energy Deposition

기존의 시행착오 기반 합금 설계 방식은 고엔트로피 합금(HEA)과 같이 조성이 복잡한 합금계의 등장과 함께 한계에 직면하고 있

다. 최근 원소 분말을 활용한 directed energy deposition(DED) 기반 in-situ 합금화 공정이 이러한 한계를 극복할 유망한 접근법으로 제시되었다. 그러나 각 분말 간의 큰 용점 차이는 불완전한 용융을 초래하며, 이는 FeCoCrNiMo 철계 중엔트로피 합금(FeMEA)과 같은 복잡한 합금계 설계에 적용하는 데 기술적 제약이 된다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고 FeCoCrNiMo FeMEA 합금계의 가속화된 합금 개발 및 평가(accelerated alloy discovery and testing, ADAT)를 구현하기 위해 고도화된 in-situ 합금화 공정을 제안하였다. 이를 위해 Fe65Co20Mo15 (at%), Fe33.4Cr33.3Ni33.3 (at%), Fe64Co29Cr7 (at%) 세 종류의 분말을 설계·제조하여 합금화 과정에서의 용점 차이를 최소화하면서도 광범위한 조성 범위를 구현할 수 있도록 하였다. 제안된 방법을 통해 총 27종의 넓은 조성 범위를 갖는 FeCoCrNiMo FeMEA 시편을 성공적으로 제조하였으며, 모든 시편에서 균일한 조성과 목표 조성의 정합성이 확인되어 공정의 우수성이 입증되었다. 이 중 #4(Fe53.9Co16.8Cr11.7Ni11.5Mo6.0)와 #7(Fe52.9Co16.1Cr12.8Ni12.5Mo5.6) 합금은 FCC 단일상 구조를 유지하면서 가장 높은 경도를 나타내어 벌크 시편으로 제작되었다. 인장 시험 결과, #4 합금은 향상된 가공경화 거동과 우수한 인장 특성을 보여 최적 조성으로 도출되었다. 본 연구는 고속·대량 합성 기법을 활용한 신합금 개발 가속화에 유용한 설계 전략과 실험적 근거를 제공한다.

### [적층2-3 | 10:55]

LPBF로 제조된 Ti-6Al-4V 격자 구조에서 열처리에 따른 미세조직 변화와 압축 거동의 상관관계: 김영훈, 성효경\*, 박현영(국민대학교)

Keywords: 타이타늄, 적층제조, 미세조직분석

본 연구에서는 레이저 분말 적층 공정으로 제조된 Ti-6Al-4V 격자 구조를 대상으로, 형상 설계와 열처리에 따른 미세조직 변화가 압축 기계적 거동에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 옥텟 트러스 기반 구조에 프리미티브 요소를 결합한 하이브리드 격자 구조를 설계하고, 유한요소해석을 통해 압축 하중 하에서의 응력 분포 및 변형 거동을 예측한 후 실제 시편을 제작하였다. 적층 제조된 초기 상태에서는 급속 응고에 기인한 마르텐사이트형  $\alpha'$  조직과 국부 변형 집중이 관찰되었으며, 열처리 이후에는  $\alpha'$  조직이 분해되어  $\alpha+\beta$  라멜라 조직으로 전환되었다. 두 가지 열처리 조건 모두에서 서로 다른 두께 스케일의 라멜라가 공존하는 이중 라멜라 미세조직이 형성되었고, 열처리 조건에 따라 조대한 라멜라와 결정립 집합체의 분율이 달라지는 경향이 확인되었다. 이러한 미세조직 변화는 격자 구조의 국부 강성 및 변형 안정성에 영향을 미치며, 나아가 초기 강도와 평탄 변형 구간의 거동, 에너지 흡수 특성까지 조절할 수 있는 가능성을 시사한다. 본 연구는 얇은 스트럿과 높은 표면적 대비 체적비를 갖는 격자 구조에서 미세조직을 하나의 설계 변수로 활용할 수 있음을 제시하며, 적층 제조 격자 구조의 기계적 성능 정밀 제어를 위한 기초적인 설계 및 열처리 전략을 제공한다.

### [적층2-4 | 11:10]

L-PBF로 제조된 Inconel 718 합금에서 온도 별 hot isostatic pressing 공정을 통한 불안정한 결함 거동에서 안정적인 석출 제어형 거동으로의 전환: 강경록, 한승준(한국생산기술연구원, 성균관대학교), 김원래, 김건희(한국생산기술연구원), 송승욱(성균관대학교), 안성철(한화에어로스페이스), 한혁수(한양대학교), 강현수\*(한국생산기술연구원, 한양대학교), 이택우\*(한국생산기술연구원), 김형규\*(한화에어로스페이스)

Keywords: 적층제조, 레이저 분말 적층 융합, 인코넬 718, 후열처리, 열간 등방압 가압법

Inconel 718 합금은 석출 강화형 Ni기 초내열 합금으로 고온 강도, 크리프 저항성, 내피로특성이 우수하여 항공기 엔진, 가스터빈 등 극한 환경에서 사용되는 고온 구조 부품에 널리 활용된다. 기존 주조 등과 같은 제조 공정 기반 Inconel 718 부품은 성능 저하의 원인이 될 수 있는 Laves 상을 제거하고  $\gamma'$  및  $\gamma''$  석출을 극대화하기 위해 55시간 이상의 장시간 규격 열처리와 복잡한 후가공 공정을 필요로 한다. 이러한 공정적 한계로 인해 제조 기술은 Laser Powder Bed Fusion(L-PBF) 적층 공정 제조 방식으로 전환되고 있다. 그러나 L-PBF 공정에서는 급속 응고와 반복적인 열 이력으로 인해 Laves 네트워크 미세조직이 형성되며, 동시에 기공 및 높은 잔류응력이 동반된다. 기존 열처리 기술은 주조 및 wrought 소재를 기준으로 확립된 AMS 5662 등 규격 열처리를 적용하고 있어 이러한 적층품 고유의 특성을 반영하기에는 제약이 있다. 그 결과 공정 효율 및 생산성 측면에서 L-PBF 적층품에 대한 열처리 최적화의 필요성이 제기된다. 본 연구에서는 공정 효율 향상을 위해 기계적 압력을 통해 기공 결함 회복을 유도함과 동시에 열 에너지 기반의 온도를 통한 석출 강화 거동 미세조직 제어 및 잔류 응력 완화를 단일 공정 내에서 활성화할 수 있는 Direct-Hot Isostatic Pressing(HIP) 공정을 L-PBF 적층품에 적용하였다. 특히 급속 응고에 의해 계면에 Nb 편석이 유발되어 생성된 Laves 네트워크 미세조직은 기존 제거 대상으로서의 인식과 달리 열처리 온도 조건에 따라 Nb의 국부 저장소 및 석출 강화를 유도하는 기능적 미세조직으로 재해석 될 수 있다. 이에 따라 Direct-HIP 공정에서 온도를 핵심 설계 변수로 설정하고 650-950 °C의 다양한 온도 범위내에서 Direct-HIP 공정을 단계화 하여 온도 변화에 따른 미세조직 제어를 통한 석출 거동 및 기계적 특성의 상관관계를 체계적으로 분석하였다. 이러한 접근을 통해 Direct-HIP 공정에서 지배적인 강화 메커니즘의 변화를 규명하고, L-PBF 기반 Inconel 718 적층품에 적합한 고생산성 열처리 공정 설계 기준을 도출하고자 한다.

### [적층2-5 | 11:25]

L-PBF 공정에서의 Non-contact support 설계 및 성능 검증: 김오섭, 김민수, 김정호\*(인하대학교)

Keywords: Laser powder bed fusion, Ti-6Al-4V, Non-contact support, Finite element analysis

L-PBF 공정에서는 cantilever나 overhang 형상은 제품의 형태적 안정성과 열응력 완화를 위해 support 구조가 필수적이다. 그러나 block support를 비롯한 기존 접촉식 support는 부품과 직접 접촉하여 표면 품질을 저하시킬 뿐 아니라, 기계가공을 통한 제거 과정에서 피로수명 감소를 유발하고 상당한 시간과 비용을 요구하는 한계가 있다. 본 연구는 L-PBF 공정에서의 출력 품질을 높이기 위한 비접촉 서포트인 Non-contact support를 설계 및 제작하고, 그 성능을 정량적으로 검증하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 열

경로를 최적화하여 L-PBF 공정 중 발생하는 열을 효과적으로 배출하도록 유한요소 해석 기반으로 설계한 ‘Optimized Non-contact support 시편’, 열 경로 최적화 없이 비접촉 조건만 구현한 ‘Basic Non-contact support 시편’, 일반적인 block support를 적용한 ‘Basic support 시편’, 그리고 support를 사용하지 않은 ‘No support 시편’ 총 4가지를 출력하여 as-built 상태에서의 아랫면의 표면 조도와 변형을 측정하여 비교하였다. 그 결과, 윗면은 Basic Non-contact support 시편이 끝단과 길이 방향 전 구간에서 평균 변위 및 RMS 값이 가장 크게 나타났다. 아랫면의 경우 Basic support 시편이 끝단과 길이 방향에서의 변위, RMS, 표면조도 모두 가장 큰 값을 보였으며, 그다음으로 Basic Non-contact support 시편과 No support 시편이 높은 값을 나타내어 Optimized Non-contact support 시편의 우수성을 확인하였다. 이를 통해, L-PBF 공정에서 Non-contact support를 열전달 관점에서 최적 설계할 경우 overhang 형상의 표면 품질을 정량적으로 개선함과 동시에 support 제거 용이성까지 확보할 수 있는 실효적 대안임을 확인하였다. 이러한 결과는 support 제거 부담 완화를 통해 overhang 안정성과 support 제거성을 향상시키고, 금속 적층제조 부품의 설계 자유도 및 표면 품질 향상, 공정 효율 증대에 기여할 것으로 기대된다.

### [적층3-1 | 14:00]

**LPBF를 통해 제조한 Al-Fe 기지 복합재의 미세조직 및 기계적 성능 분석:** 최준호(한국재료연구원, 포항공과대학교), 김경태\*, 박정민, 유지훈(한국재료연구원), 김형섭(포항공과대학교)

**Keywords:** 적층 제조, 알루미늄 복합재, 기계적 특성

Al-Fe 합금은 미세하게 분포된 금속간 화합물상으로 인한 우수한 열적 안정성 덕분에 고온 경량 구조재로서 주목받고 있다. 본 연구에서는 가스 분무 Al-Fe 합금 분말과 ZrB<sub>2</sub> 분말을 활용하여 LPBF로 Al-Fe 합금 조형체 및 세라믹 입자 강화 복합소재 조형체를 제조하였다. 전자현미경을 통한 미세조직 분석 결과, LPBF의 급속 응고로 인하여 Al-Fe 합금 기지에는 미세한 eutectic 조직이 형성되는 것을 확인하였다. 또한, ZrB<sub>2</sub> 강화재를 첨가함으로써 grain boundary pinning을 통해 결정립이 더욱 미세화됨을 확인하였다. 상온에서 고온까지 수행된 기계적 시험에서 Al-Fe 합금 조형체는 우수한 기계적 성능을 나타냈으며, 복합소재 조형체는 전 온도 범위에서 보다 높은 강도와 연성을 나타내었다. 두 소재 모두 고온에서도 상당한 성능을 유지하여, LPBF 기반 미세조직이 고온 응용에도 적합함을 보여주었다. 이 결과는 LPBF가 Al-Fe 합금 및 그 복합재의 미세조직 맞춤 설계와 성능 향상을 가능하게 하는 제조 방법임을 보여주며, 열적으로 안정된 합금 기지와 세라믹 강화재가 결합된 복합 소재는 고온에서도 강도와 연성을 균형 있게 유지할 수 있다는 점을 시사한다. 이러한 특성은 LPBF 공정을 통해 제조된 Al-Fe 합금 및 그 복합재가 항공우주, 자동차, 에너지 분야에서 고온용 경량 구조재로서 활용될 잠재력이 있음을 나타낸다.

### [적층3-2 | 14:15]

**직접용융증착법을 활용한 NiCr/IN738LC경사기능재료의 미세조직 및 기계적 특성 변화:** 조민재, 유현용, 강호성, 김정기\*(경상국립대학교 / Gyeongsang National Univ.)

**Keywords:** Functionally Graded Material, Directed Energy Deposition, Ni-based Superalloy, Bond Coat

플라즈마 용사는 높은 증착 효율과 우수한 피복성으로 인해 열차폐 코팅 중 Bond Coat 증착 시 널리 활용되고 있으나, 기계적 결합 특성에 의존하기 때문에 계면에서의 접합 강도가 제한적이라는 한계를 지닌다. 본 문제를 해결하기 위해 조성 구배를 가해 계면부에서의 불연속성을 완화할 수 있는 경사기능재료(Functionally Graded Material, FGM) 설계를 시도해볼 수 있다. 특히 국부 용융과 Layer별 분말 조성 제어가 가능한 직접용융증착법(Directed Energy Deposition, DED)은 금속 기반 FGM에 여러가지 이점이 있는 것으로 평가받고 있다. 따라서, 본 연구에서는 NiCr 합금과 IN738LC 합금 기반 FGM을 DED 공정을 통해 제조하고, 계면부 반응 및 물성 변화에 대해 분석하였다. 두 합금의 조성을 각 Layer 별 25%로 점진적으로 변화하도록 설계하였으며, 조성 차이에 따른 석출상 분석을 위해 Direct aging, 2-step aging, 3-step aging의 3가지 열처리를 적용하였다. 상기 적층제조 및 후처리 결과, FGM 하단부에서 Al과 Ti 함량이 감소함에 따라 Monolithic 소재와 상이한 미세조직이 형성됨을 확인하였다. 상기 결과를 통해, 기존 코팅재와 다른 미세조직 및 물성 변화를 확인했으며 DED 공정을 활용한 금속 기반 FGM의 구현 가능성 및 설계 방향성을 제시하고자 한다.

### [적층3-3 | 14:30]

**DED로 제작한 CoCr-SUS316L Heterogenic structure의 미세조직과 기계적 물성에 미치는 체적 에너지 밀도의 영향:** 최민호(한국생산기술연구원 강원지역본부, 서울대학교 재료금속공학과), 안정환, 이해진, 이병수\*(한국생산기술연구원 강원지역본부), 한홍남(서울대학교 재료금속공학과)

**Keywords:** CoCr, SUS316L, DED 적층, 3D 프린팅

서로 다른 두 가지 소재를 교차 적층하는 연구는 많이 보고되고 있다. [Takeyuki Abe et al. Precision Engineering 45 (2016, 387-395)] 과 F.Khodabakhshi et al. [Journal of Manufacturing Process 43 (2019, 83-97)] 는 다른 금속재를 적층한 시편을 기준으로 연구를 진행하였다. 학계에 보고된 연구들의 경우 서로 다른 금속재를 각각 일정한 두께로 적층을 진행한 후 그 위에 이중 금속재를 적층하는 것으로 연구를 진행한다. 본 연구에서는 Directed energy deposition(DED)을 이용하여 CoCr과 SUS316L를 반복적으로 교차 적층한 CoCr-SUS316L Heterogenic structure의 미세조직과 기계적 물성에 미치는 체적 에너지 밀도의 영향을 연구하였다. 각각의 Layer의 두께는 0.8 mm이며 적층방향으로 총 50 mm 높이까지 적층 하였다. scanning speed를 10000 mm/min으로 유지한 상태에서 Laser power를 1200 W, 1500 W, 1800 W로 변화하여 제작하였으며 체적 에너지 밀도의 범위는 41.6 J/mm<sup>3</sup> ~ 71.4 J/mm<sup>3</sup>이다. 미세조직 관찰을 위해 시편을 방전와이어로 절단하였으며 부식하였다. 미세조직 관찰을 위해 공초점현미경, SEM, EDS 와 EBSD를 이용하였으며, 기계적 물성 평가를 위해 상온에서 인장시험을 수행하였으며 소재 계면 주위로 Vickers hardness를

측정하였다. 전체적인 시편은 에너지 밀도가 증가함에 따라 Melt pool line이 점차 증가하는 경향을 나타내었으며 SUS316L 층의 두께가 불규칙적으로 적층 되었다. SEM 분석으로 미세조직을 관측한 결과 Columnar 조직이 주로 확인되었으며 서로 다른 두 이종간 금속간계면에서 석출물들이 형성되었다. 성분계의 분포를 확인하기 위해 EDS 성분분석을 진행하였고, 그로 인해 에너지 밀도가 증가할수록 이전에 적층된 SUS316L에서 Fe가 확산되어 CoCr 소재의 Co의 분율이 감소하였고, SUS316에는 Co가 확산되었다. 체적 에너지 밀도가 증가함에 따라 CoCr 층에서는 경도가 감소하였고 SUS316 층에서는 경도가 증가하였다. 인장시험 결과 적층 방향과 평행하게 제작한 인장시험편의 경우 에너지 밀도가 증가함에 따라 인장강도와 연신율이 증가하였으며 적층 방향과 수직하게 제작된 인장시험편의 경우 에너지 밀도가 증가함에 따라 연신율이 증가하였다. 인장시험의 파단부를 관찰하였으며 모든 소재에서 연성과 파괴의 흔적인 dimple 조직이 발견되었다.

### [적층3-4 | 14:45]

**L-DED로 제작한 AISI 316L 스테인리스강의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 초음파 인가의 영향:** 장도현, 김태윤, 정종욱, 박민수, 이육진\*(부산대학교)

**Keywords:** L-DED, 316L 스테인리스강, 미세조직, 기계적 특성

AISI 316L 스테인리스강은 오스테나이트계 스테인리스강으로 일반적인 탄소강에 비해 높은 연성과 우수한 강도 및 부식 저항성을 가져 기계 부품, 해양 산업, 방위 산업 등 다양한 분야에 사용되고 있다. 특히 낮은 탄소 함량으로 인한 우수한 용접성으로 인해 적층제조에 적합하며, L-DED 공정으로 제조된 AISI 316L은 주조재 대비 약 2배 높은 인장강도를 나타내는 것으로 알려져 있다. 적층제조 공정 중 초음파 진동을 인가하면 melt pool 내부에 음향 교반(Acoustic streaming)에 의한 온도구배 완화 및 공동 현상(Cavitation)에 의한 핵생성을 증가가 발생하여 결정립 미세화 및 등축정화가 유도된다고 보고되고 있다. 그러므로 초음파 진동에 의해 미세화된 등축정이 형성되면 항복강도 및 인장강도가 증가할 것으로 예상되며, 실제로 wire arc additive manufacturing 공정 중 초음파 인가 시 기계적 특성이 개선된 사례가 다수 존재한다. 하지만 316L 합금을 L-DED 공정으로 제조할 때 초음파를 인가하는 효과에 대해서는 보고된 바가 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 AISI 316L 스테인리스강을 L-DED 공정으로 제조 시 초음파 진동을 인가하여 초음파가 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. S45C 기판에 주파수 25 kHz인 초음파 진동을 각각 0 W, 20 W, 40 W의 출력으로 인가한 상태에서 L-DED 공정으로 AISI 316L 스테인리스강을 제조한 뒤 미세조직 및 기계적 특성을 비교 분석하였다.

### [적층3-5 | 15:00]

**Laser powder bed fusion으로 제조된 Inconel 625 합금의 후열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화:** 이민호(국립부경대학교), 윤지상(국립부경대학교, 한국재료연구원), 조현빈(국립부경대학교), 배기창(한국세라믹기술원), 문종언(국립공주대학교), 이정훈, 배재웅\*(국립부경대학교)

**Keywords:** L-PBF (Laser powder bed fusion), Inconel 625, 후열처리, 기계적 특성, 마모

레이저 분말층 용융(Laser powder bed fusion, L-PBF)으로 제조된 Inconel 625 합금은 세포상 미세조직(cellular structure), 높은 전위밀도 및 합금원소의 미세편석(micro-segregation) 등 비평형 응고에 의한 미세조직을 나타내며, 이는 후열처리 과정에서의 재결정 거동 및 석출 반응에 유의한 영향을 미친다. 본 연구에서는 700 °C 용체화 처리 후 시효처리(SA700)와 700 °C 및 800 °C 직접 시효처리(DA700, DA800)가 L-PBF로 제조된 Inconel 625의 미세조직 진화, 기계적 특성 및 상온 마모 거동에 미치는 영향을 체계적으로 평가하였다. SA700 조건에서는 재결정 및 결정립 성장에 기인하여 강도 및 경도가 저하되고 연신율이 증가하였다. 반면 DA700 조건에서는 cellular structure의 잔존과 더불어 기지(matrix) 내 미세  $\gamma''$  (Ni<sub>3</sub>Nb) 석출이 유도되어, 연성 저하 없이 가장 높은 항복강도와 경도를 나타냈다. DA800 조건에서는 높은 직접 시효처리 온도에 의해  $\gamma'' \rightarrow \delta$  (needle-type Ni<sub>3</sub>Nb)상으로의 전이가 촉진되어 국부 취성 증가가 동반됨과 동시에 비교적 높은 강도를 유지하였다. 상온 마모 시험 결과, SA700은 재결정에 따른 연화로 인해 내마모성이 저하된 반면, DA700은 안정적인 전이층(transfer layer) 형성에 의해 연삭 마모(abrasive wear) 지배 거동을 보이며 가장 낮은 마모율을 나타냈다. 반대로 DA800은 불안정한 마찰 산화물(tribo-oxide) 생성과 관련된 연삭-산화 복합 마모가 우세하여 마모가 증가하였다. 종합적으로, L-PBF IN625의 마모 특성은 기계적 특성의 단독 지표로 설명되기보다, 마모 시험 간 미세조직 안정성과 전이층 형성 및 유지 능력의 상호작용에 의해 지배됨을 확인하였다. 이러한 관점에서 DA700은 세포상 미세조직을 유지하면서 미세  $\gamma''$  석출을 유도함으로써 강도-연성-내마모성의 균형을 확보할 수 있는 유효한 후열처리 조건으로 평가된다.

### [적층3-6 | 15:15]

**Laser Powder Bed Fusion of SAF 3207 hyper duplex stainless steel: Processing window, microstructure, and tensile behavior:** Jalal Kangazian Kangazi, Soung Yeoul Ahn, Bon Woo Koo, Jae Heung Lee, Hyoung Seop Kim\*(POSTECH)

**Keywords:** Laser Powder Bed Fusion, Duplex Stainless Steel, Columnar-to-equiaxed Transition, Strength-ductility synergy, Heat treatment

This study shows the successful processing of SAF 3207 hyper duplex stainless steel (HDSS) using laser powder bed fusion (LPBF) additive manufacturing. By optimizing LPBF process parameters, particularly layer thickness, a processing window was established to produce high-density, high-productivity samples. Consequently, near-full-density samples ( $\geq 99.9\%$ ) containing 8–25% austenite phase within the ferritic matrix were fabricated while maintaining a high build rate with a 50  $\mu\text{m}$  layer thickness. The samples exhibited a columnar-to-equiaxed (CET) transition driven by a high growth restriction factor and pronounced constitutional undercooling. Subsequently, an optimized post-heat-treatment was applied to tailor the as-built microstructure and room-temperature tensile properties,

yielding a microstructure with a balanced ferrite-to-austenite ratio. This also enhanced the strength-ductility balance through twinning-induced plasticity and hetero-deformation-induced back-stress hardening effects. Overall, this work highlights SAF 3207 HDSS as a promising material for additive manufacturing of structural parts, due to its unique CET behavior and superior strength and ductility compared to other LPBF-fabricated DSS grades.

### [적층3-7 | 15:30]

Process Optimization of L-PBF for Cost-Effective, High-Performance Manufacturing Using SiO<sub>2</sub> Nanoparticle-Coated Non-Spherical Ti Powder: Taehu Kang, Jongik Lee, Jimin Han, Bin Lee\*(Kyunghee Univ.)

**Keywords:** Laser Powder Bed Fusion,  $\alpha$ -Ti, Ti-O alloys, Flow property, Mechanical properties

In laser powder bed fusion (L-PBF), a metal powder additive manufacturing process, pure titanium is generally processed using expensive gas-atomized spherical powders, which leads to a significant increase in their material cost. While non-spherical titanium powders offer a more economical alternative, their utilization in L-PBF is limited by their poor flow properties and high oxygen content. To address these limitations, this study proposes a powder mixing approach that utilizes spherical titanium with hydrophobic SiO<sub>2</sub> nanoparticles to enhance the flow property and process stability of non-spherical Ti powders. Following the evaluation of flow properties across different mixing ratios, an optimal spherical-to-non-spherical Ti ratio of 4:6 was identified when SiO<sub>2</sub> nanoparticles were incorporated during the mixing process. The uniform distribution of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on the powder surfaces was verified through SEM and EDS analyses. Using these mixed powders, L-PBF-fabricated specimens achieved a maximum relative density of 99.7% over a range of processing conditions. At a volumetric energy density of 71.4 J/mm<sup>3</sup>, the specimens exhibited a tensile strength of 762.6  $\pm$  3.8 MPa and an elongation of 22.1  $\pm$  0.7%. These findings suggest that low-cost, non-spherical Ti powders can be effectively employed in L-PBF, enabling simultaneous enhancement of process stability and cost efficiency in titanium additive manufacturing.

### [적층4-1 | 15:55]

Wire Arc Additive Manufacturing으로 제조된 Al-5356 합금의 피로 및 충격 물성의 이방성: 서예진, 전민수, 황원구(인하대학교), 오민선, 감동혁(한국생산기술연구원), 이기안\*(인하대학교)

**Keywords:** Wire arc additive manufacturing, Al-Mg alloy, Fatigue properties, Impact properties, Anisotropy

높은 비강도와 우수한 내식성을 갖춘 Al 5356은 주로 용접용 와이어로 사용되며, 특히 뛰어난 용접성을 바탕으로 WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)과 같은 아크 기반 공정에 적합한 소재이다. WAAM은 금속 와이어를 아크 열원으로 용융·적층하는 방식의 적층 제조 공정으로, 별도의 진공 챔버 없이도 높은 적층 속도와 낮은 소재 낭비율을 달성할 수 있어 대형 금속 부품 제작에 응용, 시도되고 있다. 본 연구에서는 Al 5356 합금의 피로 및 충격 물성에서 나타나는 이방성을 조사하고 그 메커니즘을 분석하였다. WAAM 공정으로 제조된 Al 5356의 XCT (X-ray computed tomography) 분석 결과 0.02%의 낮은 기공도를 나타내었으며, 기공은 주로 층간 경계에 분포하는 것으로 관찰되었다. 또한 상기 Al 합금에서 높은 열전도도와 반복적인 열이력으로 인해 균일한 미세조직을 나타냄을 확인하였다. 인장 시험 결과, 수평 방향 및 수직 방향의 항복 강도(YS), 인장 강도(UTS), 연신율(EI)은 각각 155.1 MPa / 299.5 MPa / 40.7% 및 153.3 MPa / 292.3 MPa / 36.5%로 나타났다. 피로 시험 결과로 얻어진 WAAM Al 5356의 피로 한도( $10^7$  cycle)는 수평과 수직에서 각각 131.6 MPa과 104.8 MPa으로 확인되었으며, 수직 방향에서 피로 저항성이 약 20% 감소한 경향이 나타났다. 반면, 충격 물성은 수평 및 수직 시편의 흡수 에너지가 모두 4.5J로 동일하여 등방성을 보였다. 상기 결과들을 바탕으로 WAAM 공정으로 제조한 Al-5356의 피로 및 충격 변형 기구를 미세조직학적 관점에서 고찰하였다.

### [적층4-2 | 16:10]

Simulation-assisted fabrication process optimization of HEAs by laser cladding: heat flow, porosity, microstructure: Dadong Jie, Do Won Lee, Hyung Seop Kim\*(POSTECH)

**Keywords:** High-entropy alloy, Simulation, laser cladding, comsol

To combat the inadequate wear resistance of the steel compressor impeller under severe operating conditions, which drastically shortens its operational lifespan, this study successfully fabricated the high-entropy alloys (HEAs) coatings via laser cladding (LC). To optimize the LC process parameters, the influence of the synthesis routes on the thermal flow behavior, morphological characteristics, defects and solidified microstructure evolution was investigated. In detail, utilizing a multiphase numerical prediction model for LC, this research analyzed the correlation between dynamic temperature variations, velocity, and molten pool development occurring during the formation and evolution of the molten pool. In addition, the effect of synthesis routes on the Marangoni flow, macroscopic characteristics and defects of HEAs coating was further investigated. Combined with experimental analysis and simulation calculation, the potential interrelationship between solidification parameters and microstructure was quantitatively disclosed. This work will contribute to the further development of the compressor impeller surface strengthening field.

### [적층4-3 | 16:25]

레이저 기반 적층제조 전위 셀 및 저에너지 전위 구조 형성에 대한 편석과 열사이클 유도 소성 변형의 정량적 분리: 안성열(포항공과대학교), 정상국(한화에어로스페이스), 권지혜(포항공과대학교), Renhao Wu(Tohoku University), G.M. Karthik(Indian Institute of



Technology (BHU)), 김은성, 이정아, Jalal Kangazian, 구본우, 이재홍(포항공과대학교), 최중호(한국재료연구원), Takayoshi Nakano(Osaka University), 홍순익(충남대학교), 김형섭\*(포항공과대학교)

**Keywords:** Laser-based powder bed fusion of metals, Dislocation cell structure, Low-energy dislocation structure, Thermal-cycle-induced deformation, Kocks-Mecking model

전위 셀 (dislocation cell) 및 저에너지 전위 구조 (low-energy dislocation structure, LEDS)는 레이저 기반 금속 적층제조에서 보편적으로 관찰되는 미세조직적 특징이다. 그러나 그 형성 기구, 즉 응고 과정에 수반된 편석, 응고 조직에 기인하는지 혹은 열적으로 구동되는 반복적 소성 변형에 기인하는지에 대해서는 여전히 논쟁이 지속되고 있다. 본 연구에서는 Laser-based powder bed fusion of metals (PBF-LB/M) 공정으로 제조된 stainless steel 316L을 대상으로, 실험-시뮬레이션 통합 접근법을 통해 이러한 상반된 기여를 정량적으로 분리하였다. 용질이 농축된 수지상 경계는 전위 셀/LEDS 네트워크와 공간적으로 분리되어 있음을 확인하였으며, 이는 편석만으로는 관찰된 전위 셀 구조를 설명할 수 없음을 시사한다. 변형 기여도를 정량화하기 위해, 단일 경로 및 다중 경로/다중 스캔 조건에서 이동 열원을 적용한 순차적 열-기계 유한요소 해석을 수행하여 국부 열 이력과 열 유도 누적 소성 변형을 재구성하였다. 예측된 변형 이력은 Kocks-Mecking 전위 진화 모델과 순차적으로 연계되었으며, 그 결과  $(2.17-2.94) \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ 의 전위 밀도가 도출되었고, 이는 실험 결과와 높은 일치치를 보인다. 또한 저장 에너지 분석을 통해, 전위가 균일하게 분포하는 경우에 비해 LEDS로 국부화될 때 시스템 에너지가 감소함을 확인하였으며, 이는 반복적인 열 사이클 하에서 셀 형태의 전위 배열이 형성되는 열역학적 근거를 제시한다. 종합적으로 편석과 전위 셀 네트워크의 공간적 분리 및 열 이력-전위 진화의 정량적 검증 결과는 열적으로 구동되는 반복적 소성 변형이 전위 셀 형성의 주요 경로를 시사한다.

#### [적층4-4 | 16:40]

**직접용융증착법으로 제조된 IN939 합금의 비평형 미세조직을 고려한 열처리 최적화:** 김영우, 강호성, 성예찬, 김범준, 김정기\*(경상국립대학교)

**Keywords:** Directed Energy Deposition, IN939, Heat treatment, microstructure, Mechanical Properties

IN939합금은 석출강화형 니켈기 초내열 합금으로 우수한 고온 안정성 및 크리프 저항성을 가지며 가스터빈 부품의 핵심 소재로 활용되고 있다. 가스터빈 부품은 고온 및 고응력 환경에 장시간 노출됨에 따라 다양한 원인에 의한 부품 손상이 발생하게 되는데, 직접용융증착법(Directed Energy Deposition, DED)은 높은 형상자유도 및 빠른 공정속도를 가지고 있어 복잡한 형상의 가스터빈 수리에 적합한 공정으로 주목받고 있다. 하지만, 레이저 기반 적층제조 중 반복되는 용융/응고 및 빠른 냉각 속도는 기존 공정과는 상이한 초기 미세조직을 형성하며, 이들 미세조직은 후열처리 공정 후 형성되는 석출상에도 영향을 미치게 된다. 이에 본 연구에서는 DED 공정 기반 IN939 합금이 가지고 있는 비평형 미세조직에 적합한 최적 열처리 조건을 도출하고자 하였다. DED 공정으로 제조된 IN939 합금의 미세조직 균질화를 달성하기 위해 Solution Treatment (1200 °C / 4 h)를 적용하였으며, 1st Aging(840 °C, 850 °C, 860 °C / 8 h)과 2nd Aging(740 °C, 750 °C, 760 °C / 8 h)의 조합을 통해 총 9가지 조건을 설정하여 Aging을 진행하였다. 이후, 각각의 열처리 조건에 따른 미세조직 변화 관찰 및 기계적 특성 평가를 통해 최적 열처리 조건을 도출하였다. 상기 결과를 기반으로 미세조직과 기계적 특성 간의 상관관계를 규명함으로써 DED공정 기반 IN939 합금 열처리 적용 방향성을 제시하고자 한다.

#### [적층4-5 | 16:55]

**L-DED로 제작된 Fe-24Mn-4Cr-0.4C 고망간강의 Hf 및 Ce의 첨가에 의한 미세조직 및 기계적 특성의 변화:** 김민기, 박지영, 조해주, 이육진\*(부산대학교)

**Keywords:** 적층 제조, L-DED, 고망간강, 결정립 미세화

적층 제조(Additive Manufacturing)는 Computer-aided design으로 설계한 형상을 분말 또는 와이어 재료의 용융 및 적층을 통해 층별로 적층하는 공정으로, 주조 및 절삭 가공으로 제작이 어려운 3차원 부품을 재료 낭비를 최소화하며 제조할 수 있다. 다양한 적층 제조 기술 중 하나인 레이저 직접 에너지 적층(Laser Direct Energy Deposition, L-DED)은 금속 분말과 고에너지 레이저를 동시에 공급하여 금속을 용융시켜 한 층씩 쌓아 올림으로써 구조물을 제작하는 금속 적층 제조 공정이다. 고망간강(High-Manganese Steel)은 15-30 wt.%의 망간 함량을 갖는 오스테나이트계 합금으로, 우수한 인장강도, 연성, 높은 가공경화 능력을 바탕으로 건설, 자동차, 조선·해양, 석유화학 등의 산업에서 널리 사용되고 있다. 그러나 주조로 복잡한 형태를 제작할 경우에는 높은 망간 함량으로 인해 주조 시 편석이 발생하고 기계적 신뢰성 및 열간가공성이 저하되는 단점 역시 보고되고 있다. 이러한 문제는 L-DED 공정의 빠른 냉각 속도에 의해 완화될 수 있는 것으로 보고되어, 고망간강은 적층 제조에 적합한 재료로 주목받고 있다. 또한, 적층 제조로 제작된 고망간강은 압연재와 비교하여 상대적으로 조대한 결정립을 나타내어 항복강도와 연신율이 낮게 나타나는 경향이 보고되고 있다. 이를 개선하기 위해서는 L-DED 고망간강의 과도한 조대한 결정립을 제어하기 위해 새로운 핵생성 사이트를 형성시키거나 결정립 성장을 방해하는 미량 첨가원소의 활용이 유용할 것으로 생각된다. 한편 Hf와 Ce는 미세 산화물을 형성하여 핵생성 사이트로 작용할 수 있으므로, 주철 및 주강에서 결정립 미세화 효과를 나타내는 원소로 알려져 있다. 또한 적층제조와 유사한 금속 응고 거동을 보이는 용접 공정에서도 미량 원소 첨가에 따른 응고 조직 미세화가 보고된 바 있다. 그러나 L-DED로 제조된 고망간강에서 Hf 및 Ce 미량 첨가에 의한 미세조직 및 기계적 특성 변화는 아직 보고된 바 없다. 본 연구에서는 Fe-24Mn-4Cr-0.4C(wt.%) 합금 분말에 Fe-10Hf 및 Fe-10Ce(wt.%) 모합금 분말을 각각 99.5:0.5의 비율로 혼합하여, 최종 조성이 Fe-24Mn-4Cr-0.4C-0.05Hf 및 Fe-24Mn-4Cr-0.4C-0.05Ce(wt.%)가 되도록 하여 혼합분말로 L-DED 적층 제조를 수행하였다. 제조된 적층재의 미세조직 및 집합조직을 분석하고, 인장시험을 통해 기계적 특성을 비교하였다. 이를 통해 0.05 wt.%의 Hf 및 Ce 첨가가 L-DED 고망간강의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향을 미량원소가 첨가되지 않은 고망간강 합금과 비교 및 평가하였다.

**[적중4-6 | 17:10]**

LPBF-Based Optimization of In Situ Alloying for Low-Cost  $\beta$ -Ti Alloys Targeting Biomechanical Compatibility: Sehun Kim, Ukju Gim, Bin Lee\*(Kyunghee Univ.)

**Keywords:** Laser powder bed fusion, Cost-effective, In-situ alloying,  $\beta$ -Ti alloy, Mechanical properties

Research on  $\beta$ -titanium ( $\beta$ -Ti) alloys has gained momentum as a strategy to overcome the limitations of commercially pure titanium (CP-Ti) and to achieve improved mechanical performance for structural and biomedical applications. In particular, reducing the elastic modulus while maintaining sufficient strength is critical for load-bearing implants because a lower modulus can mitigate stress shielding and improve biomechanical compatibility. In this study, we focus on two  $\beta$ -stabilizing element Nb (isomorphous-type) and systematically analyze Nb-containing  $\beta$ -Ti alloys produced under identical processing conditions. Laser powder bed fusion (L-PBF) provides a promising route to fabricate  $\beta$ -Ti alloys owing to its near-net-shape capability, inert processing environment, and rapid cooling rates that enable microstructural tailoring in reactive Ti systems. While pre-alloyed spherical powders are commonly used to ensure chemical homogeneity, they increase material cost and restrict compositional flexibility. To address these limitations, we employed an in situ alloying approach in which elemental powders are blended prior to printing and alloying occurs during the L-PBF process. Ti-40Nb targeting a metastable  $\beta$  microstructure with reduced elastic modulus for enhanced biomechanical compatibility. Powder blends were prepared using a Turbula mixer to promote uniform dispersion of Nb within the Ti base powder, followed by L-PBF fabrication. The additively manufactured specimens were examined via microstructural and phase analyses to verify the effectiveness of in situ alloying and to assess compositional homogeneity. Mechanical properties were evaluated through hardness measurements and uniaxial tensile testing to quantify strength-ductility behavior and the influence of  $\beta$ -phase stability, with particular attention to composition-dependent differences relevant to biomechanical compatibility. Overall, the results demonstrate that L-PBF-based in situ alloying is a viable and cost-effective pathway for producing  $\beta$ -Ti alloys with tunable properties, offering greater compositional flexibility than conventional approaches relying on pre-alloyed spherical powders.

**[적중4-7 | 17:25]**

L-PBF 316L 스테인리스강의 초기 산화 거동에 미치는 잔류응력 완화 열처리의 영향: 정창현(국립순천대학교), 배기창(한국세라믹기술원), 김도형(영남대학교), 조의제\*(국립순천대학교)

**Keywords:** LPBF, 316L 스테인리스강, 잔류응력, 고온산화

L-PBF 공정으로 제작된 316L 스테인리스강은 우수한 용접성, 기계적 특성을 가지며, 높은 Cr 함량으로 고온 내식성이 뛰어나 자동차, 에너지, 우주항공 등 다양한 산업에 활용된다. L-PBF 공정의 높은 온도 구배와 빠른 냉각 속도에 의해 재료 내 잔류응력이 형성된다. 잔류응력은 변형, 취성, 응력 부식 균열 등 부품 내구성을 저하시킬 뿐만 아니라 산화 거동에도 영향을 미칠 수 있다. 산화 초기에 형성되는 산화물은 모재와의 접착력, 산화물의 두께 및 구조 등 산화 전체 거동에 영향을 미친다. L-PBF 공정 및 후열처리에 따라 316L 스테인리스강 내 잔류응력이 변화하며, 초기 산화 거동도 달라질 것으로 예상된다. 하지만 이와 관련된 상세한 연구는 부족하다. 본 연구에서는 열처리 조건에 따른 L-PBF 316L 스테인리스강의 잔류응력 차이가 초기 산화 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 열처리 조건은 400, 600 °C에서 4시간동안 진행하였다. 이후 30분동안 800 °C에서 고온 수증기 산화 시험을 실시하였다. 잔류응력 측정을 위해 XRD 기반  $\sin^2\psi$ 법을 수행하였다. TEM 분석을 통해 형성된 산화층 두께 및 이중층 구조를 확인하였고, EDS 맵핑으로 산화층 내 주요 원소인 Cr, Fe 및 O의 분포를 분석하였다. 또한 FFT 분석을 통해 얻은 회절 패턴으로 형성된 Cr-Fe 산화물 상의 결정구조를 분석하였다. 관찰 결과를 바탕으로 초기 산화 거동에 미치는 잔류응력의 영향을 고찰하였다.

## 저탄소 알루미늄 심포지엄

Room 2층 203, 4월 28일

### [저탄소1-1 | 09:20] 초청강연

재생원료 기반 탄소 저감 알루미늄 소재 개발 현황: 강희삼\*(현대자동차)

Keywords: 탄소중립, 알루미늄 재활용, 스크랩 전처리, 선별

탄소중립 정책 강화와 글로벌 공급망 재편에 대응하기 위해서는 경쟁력 있는 저탄소 알루미늄 재활용 밸류체인 구축이 필수적이다. 그러나 국내 알루미늄 산업은 원재료 수급을 전적으로 해외에 의존하는 구조적 제한을 가지고 있으며, 알루미늄 자원순환 체계 역시 아직은 스크랩 수거-선별-전처리-재활용 합금 제조-부품 적용으로 이어지는 통합 프로세스가 성숙하지 못한 실정이다. 특히, 스크랩 집하 및 전처리 단계에 속한 다수의 중소기업체들은 안정적인 스크랩 확보 능력, 불순물 제거·조성 제어 등 고도화된 전처리 기술력, 공정 표준화 역량이 제한적이어서, 자체적으로 고순도 재활용 알루미늄 합금 생산을 위한 지속가능한 공급 기반을 확보하기가 어렵고, 이러한 산업 구조하에서는 이미 대규모 자원순환 인프라와 선진 공정 기술을 보유한 북미·유럽의 주요 알루미늄 소재사와의 직접 경쟁은 사실상 불가능하다고 판단된다. 따라서 국내 산업계가 저탄소 알루미늄 경쟁력을 확보하기 위해서는, 현재 재사용이 어려운 저품질 스크랩을 대상으로 불순물 제거·합금 원소 농도 최적화·고순도화를 실현할 수 있는 차별화된 고도의 전처리 기술을 개발하고 이를 산업 규모로 양산화하는 것이 필요하며, 이를 바탕으로 자립적이고 지속가능한 재활용 밸류체인의 형성도 가능할 것이다.

### [저탄소1-2 | 09:45] 초청강연

친환경 xEV에 필요한 알루미늄 소재 기술: 성시영\*(케이에이랩스)

Keywords: xEV, 전기자동차, 알루미늄 합금

전 세계적인 탄소 중립 기조와 함께 자동차 산업은 내연기관(ICE)에서 전기자동차(EV)로의 급격한 패러다임 전환을 맞이하고 있다. 이러한 전환은 단순한 동력원의 변화를 넘어, 차량의 플랫폼 구조, 중량 배분, 열 관리 시스템 등 엔지니어링의 핵심 요소가 완전히 재정의됨을 의미한다. 이에 따라 자동차용 핵심 경량화 소재인 알루미늄 역시 기존의 접근 방식을 탈피하여 새로운 물성과 부품화 기술을 요구받고 있다. 본 강연에서는 다수 모델의 최신 xEV(BEV, HEV, PHEV)를 대상으로 직접 수행한 상세 분해(Teardown) 분석과 가혹 조건에서의 실주행 평가 데이터를 기반으로, 전동화 전환이 알루미늄 산업에 던지는 기술적 함의를 고찰하고자 한다. 내연기관 파워트레인의 변화와 배터리·구동 모터의 도입이 차체 구조 및 샤시 부품에 미치는 영향을 분석하고, 특히 배터리 팩 하우징 및 서스펜션 부품에서 요구되는 고강도·고방열 특성 변화를 다하고자 한다. 기존 주조 및 압출 공정의 한계를 극복하기 위한 초대형 다이캐스팅 기술의 적용 사례와, 이에 대응하는 비열처리형 고강도 합금 적용 동향을 실제 부품 분석 결과를 통해 제시하고자 한다. 카탈로그 상의 스펙이 아닌, 실제 주행과 분해 과정을 통해 검증된 xEV의 설계 철학을 역설계(Reverse Engineering) 관점에서 해석하고, 미래 모빌리티 시장에서 알루미늄 소재가 어떻게 대응하는지를 논하고자 한다.

### [저탄소1-3 | 10:10] 초청강연

저탄소 알루미늄 제조를 위한 스크랩 활용 확대 및 공정 대응 기술: 송람\*, 이영기, 조훈(한국생산기술연구원)

Keywords: 탄소저감, 스크랩, 조직제어

최근 글로벌 탄소중립 정책과 산업 및 제품 단위의 공급망 탄소 배출 관리 요구가 강화됨에 따라, 알루미늄 산업에서도 관련 부품 및 소재의 제조 단계에서 탄소 배출 저감이 중요한 경쟁력 요소로 자리잡고 있다. 알루미늄은 정련 과정에서 많은 양의 탄소 배출이 발생하지만, 스크랩 재활용 시 생산 과정에서의 탄소 배출을 약 90% 이상 저감할 수 있는 것으로 알려져 있어 스크랩 활용 확대는 제조 공정의 탄소 배출을 줄일 수 있는 가장 효과적인 접근으로 평가된다. 그러나 스크랩 사용 비율이 증가할수록 소재 내 Fe, Si, Cu 등의 용질 누적으로 인해 조대한 금속간화합물이 형성되고, 이는 조직 불균일 및 기계적 특성 저하로 이어져 고품질 소재 적용에 한계를 초래한다. 이러한 문제는 단순한 불순물 제거만으로 해결하기 어려우며, 조직 제어를 통한 특성 안정화 접근이 필요하다. 본 발표에서는 스크랩 활용 확대 과정에서 발생하는 조직 및 특성 문제를 완화하기 위한 공정기술로 용해 및 응고 과정에서 조직 미세화 및 균일화를 유도함으로써 금속간화합물의 영향을 완화하고 고스크랩 소재의 품질 안정성을 향상시킬 수 있는 가능성을 소개하고자 한다. 이러한 조직 제어 접근은 동일 조성 조건에서도 소재 특성 안정성 향상을 기대할 수 있으며, 이는 결과적으로 고스크랩 소재 적용 범위 확대에 기여할 수 있다. 향후 고스크랩 합금 설계 및 공정 조건 최적화를 포함한 연구 방향에 대해 논의하고, 이를 통해 저탄소 알루미늄 생산을 위한 산업 적용 가능성과 기술 발전 방향을 공유하고자 한다.

### [저탄소2-1 | 10:45] 초청강연

글로벌 탄소중립 규제에 따른 다이캐스팅 산업의 제조 전략 및 대응 사례 분석: 윤상일\*, 최지석, 송호섭, 나규제, 유한결(삼기)

Keywords: 탄소중립, LCA, 알루미늄, 다이캐스팅

글로벌 탄소중립 규제 강화는 알루미늄 다이캐스팅 산업 전반의 제조 패러다임 전환을 요구하고 있다. 본 발표는 원소재 단계부터 주조, 가공, 후처리까지 전 공정에서의 에너지 사용과 탄소배출 관리가 핵심 경쟁 요소로 부각되고 있음을 살펴본다. 알루미늄 다이캐스팅 공정에서는 고효율 용해 시스템, 저탄소 합금 적용, 공정 단순화 및 일체화 설계가 주요 대응 전략으로 제시되고 있다. 또한 공정 데이터 기반의 디지털 전환과 AI 활용을 통한 불량 저감 및 에너지 최적화 사례를 중심으로 제조 혁신 방향을 정리한다. 제

생 알루미늄(PCR) 활용 확대와 공정 내 스크랩 회수율 향상 전략 역시 탄소중립 대응의 중요한 요소로 분석된다. 본 발표는 이러한 분석을 바탕으로 국내 알루미늄 다이캐스팅 산업이 나아가야 할 중장기 제조 전략 방향을 제시하고자 한다.

### [저탄소2-2 | 11:10] 초청강연

**저탄소 알루미늄 리사이클과 신속용해로(furnace) 기술:** 장병록\*(인하대학교 제조혁신전문대학원)

**Keywords:** 신속용해로, 저탄소, 알루미늄, 스크랩, 재활용

알루미늄 리사이클은 모든 재활용산업과 같이 에너지 다소비를 특징으로 하고 이는 탄소 소비를 증가시키게 된다. 알루미늄 재활용에 사용되는 Scrap은 source 원천, 합금 유형, 청결도에 따라 분류되며, 주요 유형으로는 사용된 UBC, extrusion, cast, sheets, turnings 이 있다. 알루미늄의 재활용은 철 Scrap과 달리 청결도에 의한 분류와 함께 합금의 종류별 수집, 유통, 재활용(용해)이 핵심이라고 하겠다. 다시 말하자면 서로 다른 알루미늄 Scrap의 혼입은 재활용 자체로 무의미하다고 할 수 있다. 한편, 에너지 측면에서 Reverberatory furnaces, Rotary furnaces, Induction furnaces 등의 용해로를 고려하여야 한다. 따라서 본 강연에서는 탄소 저감이 가능한 알루미늄 리사이클용 신속용해로(furnace) 기술에 대해 설명드리고자 한다.

### [저탄소2-3 | 11:35] 초청강연

**저탄소 열교환기용 알루미늄 클래드재 국산화 개발:** 김민준\*((주)한국클래드텍)

**Keywords:** 재활용 알루미늄, 클래드, 열교환기

세계적인 탄소중립 정책기조가 강화되는 가운데 CBAM 등의 탄소배출관련 규제가 확대되면서 소재 산업에서의 저탄소 대응은 핵심 과제로 대두되었다. 특히 알루미늄의 생산공정은 높은 전력소비를 인하여 CO<sub>2</sub>배출량이 매우 높은 산업분야에 속한다. 이를 저감하기 위해서 재활용 알루미늄을 활용하거나, 사용되는 전력의 친환경화를 통해서 극복하려는 노력이 지속되고 있다. 재활용 알루미늄은 자원의 재활용과 탄소배출저감에 중요한 부분이지만, 재활용 비율의 증가에 의한 불순물의 축적과 성분 편차가 발생하여 고기능 소재로의 품질 안정화에 기술적 한계가 존재한다. 본 연구에서는 재활용 알루미늄을 이용한 저탄소화에 중점을 두어 친환경소재의 국산화를 추진하려고 한다. 이를 위해 재활용 소재의 체계적 분류를 통한 성분의 혼용을 최소화 하고, 불순물의 제어기술을 확립하고자 한다. 또한 재활용 잉곳을 활용한 알루미늄 연속주조를 기반으로 Al-Mn계 및 Al-Si계 합금의 안정적인 생산 기술을 확보하고, 이를 적용한 열교환기용 알루미늄 클래드를 제조한다. 나아가 이를 활용한 열교환기의 부품화 기술을 개발함으로써 재활용 소재를 활용한 저탄소, 고기능 알루미늄 클래드재 및 고효율 열교환기 부품화 기술의 국산화/사업화를 통해 안정적인 공급망 구축을 이루고자 한다.

### [저탄소3-1 | 14:00] 초청강연

**Car to Car 재활용 대응 크로스오버 알루미늄 합금 특성 연구:** 김세훈\*, 권교민, 김동규, 김대영(한국자동차연구원)

**Keywords:** Car to Car 재활용, Al-Mg-Zn 합금, 비열처리 합금, 지속가능성, 재활용 기반

지속가능한 모빌리티 전환과 EU CBAM 규제 대응을 위한 경량소재 개발이 전 세계적으로 요구되는 가운데, 알루미늄 합금의 재활용성이 미래 자동차 산업에서 핵심적인 가치로 부각되고 있다. 특히, Car to Car 재활용을 통한 순환경제 구현을 위해서는 고순도 알루미늄의 확보보다는 재활용 공정을 고려한 합금 설계가 필수적이다. 본 연구에서는 과거 개발된 Al-Mg-Zn계 비열처리(non-heat-treatable) 합금을 기반으로, 최근 제안되고 있는 재활용 친화형 합금 조성과의 연계성을 고찰하였다. 해당 합금은 Mg 함량이 6.5 wt.% 이하 이고, Zn 함량은 2 wt.% 이하의 범위를 가지며, 기존 5xxx계 합금 대비 향상된 강도를 확보하면서도 7xxx계 합금의 취약점인 수소취성 및 열처리 민감도를 회피할 수 있는 장점을 지닌다. 또한 비열처리형이므로 용체화 및 시효 열처리 공정이 불필요해, 재활용 과정에서 에너지 소비를 최소화할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 합금 조성에서 나타나는 주조성, 압출성, 가공성, 내부식성 등을 분석하였으며, 이 결과를 통해 모빌리티용 소재로써 잠재성을 확인하였다. 본 연구를 통해 도출된 소재는 재활용 기반의 합금 설계 패러다임을 확장함과 동시에, 미래 자동차용 알루미늄 소재의 지속가능성(sustainability) 확보에 기여할 것으로 기대된다.

### [저탄소3-2 | 14:25] 초청강연

**LiMCA 기반 알루미늄 스크랩 50%이상 고비율 합금 전처리기술 및 소재특성평가:** 김수완\*((주)알멕)

**Keywords:** 알루미늄, 저탄소

### [저탄소3-3 | 14:50] 초청강연

**재활용의 한계를 넘어 : 알루미늄 순환경제를 위한 새로운 길과 재언 / Rethinking Aluminum Recycling : New Pathways and Strategic Insights for a Circular Economy:** 김병철\*, 김경수((주)디에스리퀴드)

**Keywords:** Scrap Refining, Flux, Carbon Neutrality, Circular Economy, Alloy-to-Alloy recycling

전동화 및 EV 확산, 재생에너지 보급과 전력망 고도화, 데이터센터의 급증, 해저케이블 노후화 대응 등 구조적 산업 변화에 따라 알루미늄 수요는 특정 산업에 국한되지 않고 전 산업군에서 동시다발적으로 확대되고 있다. 경량성, 전기전도성, 내식성을 기반으로 한 적용 영역의 확장과 더불어, 원자재 공급 불확실성과 자원 순환 요구 증가는 스크랩 기반 2차 알루미늄의 전략적 중요성을 더욱 부각시키고 있다. 그러나 알루미늄 스크랩 재활용은 여전히 기술적·구조적 한계를 내포하고 있다. 국내의 경우 알루미늄 스크랩 수요의 상당 부분을 수입에 의존하고 있음에도 불구하고, 분리·선별·정련 기술의 한계로 인해 스크랩이 원래의 합금 체계로 환원되지 못하고 다운사이클링 또는 소멸적 재활용이 주류를 이루고 있다. 더 나아가 정책 및 제도적 공백으로 최근에는 스크랩의 해외 수출도

증가하는 추세로, 이는 2차 알루미늄의 품질 저하와 활용 범위 제한으로 이어지고 있다. 본 발표에서는 알루미늄 스크랩 재활용의 전반적인 현황을 바탕으로 재활용 단계별 가치 창출 구조와 그 한계를 살펴보고자 하였다. 아울러 글로벌 메이저 재활용 기업의 탄소중립 대응 전략을 검토하여 산업적 시사점과 방향성을 도출하고자 하였다. 특히 2차 알루미늄 고도화를 위한 핵심 요소로서 정련 공정과 플릭스의 기능적 역할에 주목하여, 불순물 종류별 정련 난이도와 정련이 가장 어려운 불순물에 대한 실험실적 정련 사례를 소개하고자 한다. 또한 플릭스 설계 시 고려사항과 자동 정련 공정의 현장 적용 사례를 공유하며, 이를 토대로 알루미늄 순환경제 구현을 위한 기술적·산업적 방향성을 논의하고자 한다.

#### [저탄소3-4 | 15:15] 초청강연

**알루미늄 스크랩 용탕 최적 제어방안 및 이에 따른 비금속개재물 정량평가 방법:** 김덕\*, 김명균, 하원(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 플릭스와 처리 조건을 적용한 후, 각 용탕에 대하여 비금속개재물의 정량 평가를 수행하였다. 이를 상호 비교함으로써 스크랩의 종류와 상태에 따른 최적의 용탕 정련 조건을 도출하고자 하였다.

#### [저탄소4-1 | 16:00] 초청강연

**저열팽창계수(Low Thermal Expansion Coefficient)를 갖는 알루미늄 합금 개발:** 허용강\*, 박호준, 박대범(현대제철 기술연구소), 최현주, 이진배(국민대학교)

**Keywords:** 알루미늄, 로봇, 저열팽창계수

알루미늄은 철 대비 낮은 밀도, 우수한 내식성, 높은 전기·열전도도, 그리고 낮은 용점으로 인한 주조 용이성 등 독보적인 특성을 지닌 금속이다. 그러나 생산 과정에서의 높은 탄소 배출량과 상대적으로 높은 가격은 적용 확대의 제약 요인으로 작용하고 있다. 그럼에도 불구하고, 알루미늄은 미래 모빌리티 산업의 전기·수소 기반 친환경차, 도심형 에어 모빌리티(UAM), 로봇 등에서 핵심 소재로서 잠재력이 크다. 특히, 최근 관심이 증가하고 있는 로봇용 소재로서 알루미늄의 활용 가능성을 고찰하고, 기존 철 기반 소재 대비 장점과 적용 전략을 논의한다. 로봇 분야는 경량화와 고강성, 내식성, 열관리 특성이 동시에 요구되는 영역으로, 알루미늄은 이러한 요구를 충족할 수 있는 유력한 후보 소재이다. 본 발표에서는 알루미늄의 물성적 장점과 기존 철 기반 소재 대비 차별성을 논의하고, 향후 기술 개발 방향과 산업 적용 가능성을 제시한다.

#### [저탄소4-2 | 16:25] 초청강연

**알루미늄 용탕 내 개재물의 양을 예측하는 방법:** 박종욱\*(PSS(주))

**Keywords:** 알루미늄, 개재물, 수소, DI

DI 측정의 기본 개념을 자세히 살펴보고 산업 현장에서 일반적으로 사용되는 용융 알루미늄의 수소 농도(S)(ml/100g Al로 표시됨)와 비교했습니다. 이 분석을 바탕으로 용융물에 존재하는 개재물 함량을 추정하는 방법이 개발되었으며, 이를 통해 수소 농도(S)와 DI(%)를 함수로 하여 용융물의 품질을 나타내는 청정도 상태 지도를 구축할 수 있었습니다. 이 지도는 수소 함량만으로 평가하는 것보다 더 포괄적으로 용융물의 청결도를 평가할 수 있는 실용적인 틀을 제공합니다. 마지막으로, 제안된 모델은 탈기 공정 전후에 채취한 시료의 단면 미세구조 관찰을 통해 검증되었다. 이러한 관찰 결과는 해당 수소 농도(S) 및 DI(%) 측정값과 잘 일치하여 모델의 신뢰성을 확인시켜 주었습니다.

#### [저탄소4-3 | 16:50] 초청강연

**자동차 소재/부품 탄소배출계수 산정 방법론:** 주정균, 김세열, 김창주(FITI시험연구원), 한경훈(트레스웍스)

**Keywords:** 기후변화, 탄소중립, 탄소배출계수, 자동차, 산정방법론

최근 지구온난화, 자원 고갈, 물 부족, 사막화 및 식량 위기, 생태계 파괴 등 환경 변화로 인한 부작용이 심각한 상황임, 특히, 온실가스 감축을 위한 전 세계적인 노력 가속화와 함께 다양한 국가 및 기업들의 경우 2050년 탄소중립을 목표로 하고 있으며, 자동차 산업은 온실가스 배출에 중요한 영향을 미치는 산업으로서 국내 수송 부문에서 발생하는 온실가스 배출량은 연간 약 1억 톤으로, 이는 우리나라 총 배출량의 약 14%를 차지하고 있음. 또한, 자동차 생산 과정에서 사용되는 부품 제조 및 완성차 조립 과정에서 발생하는 온실가스를 포함하면 자동차 산업의 탄소 배출 영향은 더욱 증가하고 있음. 이에, 글로벌 기후 위기 해결을 위한 자동

차 제조사와 부품 공급업체간 협력 및 온실가스 배출 저감의 공동 노력은 필수적인 사안으로 자동차 소재·부품별 온실가스 배출량의 명확한 산정이 우선적으로 요구되고 있음. 본 방법론은 자동차 소재·부품을 생산 및 공급하는 자동차 공급망 협력업체를 대상으로 제품 전과정 탄소배출계수를 산정할 수 있는 표준화된 공통 적용 지침을 제공하기 위해 마련되었음. 본 연구에서는 방법론의 개요 및 제조 공정에서 공통으로 사용 가능한 탄소배출량 산정방법론을 제시하고자 함. 본 방법론은 자동차 분야 제품 탄소발자국 산정을 위한 국제 방법론이 발표될 경우 수정될 수 있음.

#### [저탄소4-4 | 17:15] 초청강연

**주조용 알루미늄 합금에서 Fe 원소가 부식성에 미치는 영향:** 이병덕\*, 정재윤, 신병수(고등기술연구원)

**Keywords:** 알루미늄 합금, 내부식성, Fe 불순물, 동전위 분석

주조용 알루미늄 합금은 가볍고 주조성이 우수하여 자동차 부품, 항공우주 부품 등 다양한 산업 분야에서 사용되는 합금으로, 주로 알루미늄에 실리콘(Si), 구리(Cu), 마그네슘(Mg) 등을 첨가하여 내열성, 내마모성, 강도 등을 향상시킨 소재이며, 비열처리 합금과 열처리 합금으로 나뉩니다. 특히 실리콘을 첨가한 Al-Si 합금은 주조성이 뛰어나 엔진 부품 등에 많이 쓰이고, 구리와 마그네슘은 강도와 내식성을 높이며, 열처리를 통해 기계적 성질을 더 향상시킬 수 있습니다. 특히, 글로벌 환경적 트렌드에 따라 알루미늄 합금 분야의 탄소배출 저감 연구는 주로 재활용 기술 고도화, 친환경 제조 공정 개발, 그리고 경량화 소재 개발에 중점을 두고 있습니다. 알루미늄 재활용은 1차 생산(보크사이트 채굴 및 제련) 대비 탄소 배출량을 최대 95%까지 줄일 수 있는 가장 효과적인 저감 방안입니다. 그러나, 재활용 알루미늄 사용은 에너지 절약 효과가 크지만, 품질 유지와 공정 관리 측면에서 한계와 문제점이 존재합니다. 특히, 스크랩 수거 과정에서 철(Fe), 실리콘(Si), 납(Pb) 등 이종 금속이 혼입되기 쉽습니다. 특히 철 함량이 0.1%를 넘어서면 항공우주용 등 고인성 합금 제조가 불가능해지며, 불순물 유입은 제품의 부식 저항성(Corrosion Resistance)에 직접적인 영향을 미칩니다. 특히, Fe는 재활용 과정에서 가장 흔히 유입되는 불순물인 철(Fe)은 알루미늄과 전위차가 크며, 알루미늄 기재 내에 철이 섞이면 미세한 '음극' 역할을 하여 주변의 알루미늄을 빠르게 부식시키는 갈바닉 부식(전식) 현상 뿐만이 아니라 알루미늄과 결합해 조대한 화합물을 형성하며, 이 부위가 부식의 기점으로 작용하여 재질의 수명을 단축시킵니다. 본 연구에서는 Si 기반의 주조용 알루미늄 합금에서 Fe가 미치는 영향에 대하여 전기화학적 분석 및 미세조직 분석 등을 통해 부식 메커니즘을 연구하였습니다.



## 학성세션

Room 3층 삼다A, 4월 28일

## [학성 1-1 | 09:00]

**트랩스 원소 함유강의 고온 취성 균열 거동에 대한 정량적 평가: 평가법 개발 및 기구적 고찰:** 김우진<sup>1,3\*</sup>, 김성훈<sup>1</sup>, 이정민<sup>1</sup>, 유지성<sup>1</sup>, 이창훈<sup>1</sup>, 권순환<sup>2</sup>, 신명철<sup>2</sup>, 조종오<sup>2</sup>, 박형권<sup>1</sup>, 강남현<sup>3</sup>, <sup>1</sup>한국재료연구원 극한재료연구소, <sup>2</sup>현대제철 R&D 연구센터, <sup>3</sup>부산대학교 재료공학부

**Keywords:** 전기로강, 순환성 원소, 고온 취성, 열간 압연

전 세계적인 탄소 중립 기조에 따라 철강 공정은 고로 중심에서 전기로 중심으로 전환되고 있으며, 이에 따라 철 스크랩 수요가 급격히 증가하고 있다. 그러나 스크랩 사용량 증가는 필연적으로 저급 스크랩의 혼입을 초래하며, 이에 포함된 구리(Cu)와 주석(Sn)과 같은 순환성 원소(tramp elements)는 제강 및 열간 가공 중 심각한 고온 취성(hot shortness)을 유발하여 최종 제품의 품질 저하를 야기한다.[1-3] 이러한 배경에서 본 연구에서는 Cu-Sn 복합 첨가강의 표면 고온 취성 거동을 정량적으로 평가하고, 미세조직 분석을 통해 균열 발생 메커니즘을 규명함으로써 저급 스크랩 활용 확대를 위한 기술적 기초 자료를 제공하고자 한다.

본 연구는 전기로(EAF) 기반 저급 스크랩 재활용 환경을 모사하기 위해 1.5 GPa급 초고강도 강을 기반으로 구리(Cu)와 주석(Sn)을 복합 첨가한 모델 합금을 설계하였다. 해당 합금은 진공 유도 용해(VIM) 및 2단 열간 압연 공정을 통해 제조되었다. 실제 열간 가공 공정 중 발생하는 표면 결함을 재현하기 위해 시편에 제어된 산화 처리를 적용하여 표면 스케일을 형성시키고, 스케일/모재 계면에서의 원소 농축을 유도하였다. 이후 Gleeble 3800 시뮬레이터를 이용하여 1000~1200 °C 범위에서 고온 압축 시험을 수행함으로써 소재의 고온 변형 거동과 표면 균열 감수성을 평가하였다.[4] 변형 후 시편에 대해 표면 균열을 정량적으로 지수화하였으며, 광학 현미경(OM) 및 SEM/EDS 분석을 통해 입계 내 Cu 농축 액상 필름의 침투 거동과 이에 따른 균열 생성 메커니즘을 미세조직학적으로 분석하였다.

연구 결과, 산화 처리가 수행되지 않은 시편에서는 표면 균열이 거의 관찰되지 않은 반면, 1025 °C 및 1100 °C에서 2시간 동안 산화 처리된 시편에서는 대부분 300개 이상의 미세 균열이 발생하였다. 이는 산화 과정 중 Fe의 선택적 산화로 인해 스케일/모재 계면에 Cu 농축상이 형성되었고, 고온 압축 변형 시 해당 농축상이 액상 필름 형태로 입계를 따라 침투하면서 균열을 유발했기 때문이다. 특히 산화 온도에 따른 고온 취성 경향을 비교한 결과, 계면에 형성된 농축상은 단일 Cu상이 아닌 Cu-Sn 복합상으로 존재하였으며, 이로 인해 용점이 더욱 저하되는 효과가 확인되었다. [5]

정량적 분석 결과, 1100 °C에서 산화 처리된 시편보다 1025 °C에서 산화 처리된 시편이 더 높은 균열 민감도를 나타냈다. 이는 1025 °C 조건에서 Cu의 확산 속도가 상대적으로 느려 모재 내부로의 확산보다는 계면에서의 농축상 형성이 더욱 촉진되었기 때문으로 판단된다.

본 연구 결과는 Cu-Sn 복합 첨가강에서 발생하는 고온 취성 메커니즘을 이해하고, 저급 스크랩 활용 확대를 위한 고온 취성 제어 전략 수립에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

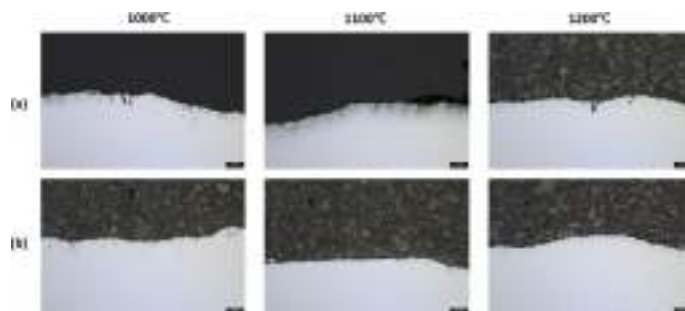


**Fig. 1.** (a) 1025 °C 및 (b) 1100 °C에서 선행 산화된 시편의 변형 온도(1000~1200 °C)별 고온 압축 후 표면 균열 비교(OM, ×100)

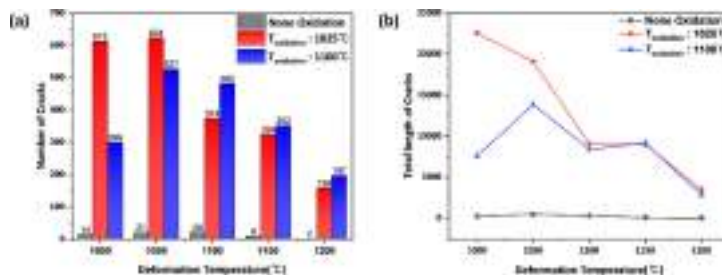


**Fig. 2.** 선행 산화 조건 및 변형 온도에 따른 표면 균열 민감도의 정량적 분석 결과: (a) 균열의 개수 및 (b) 총 균열 길이.

## 참고문헌(References)

1. S. Metallurgical, E. Association, U. o. Sheffield and M. Society, *Solidification and casting of metals: proceedings of an*

international conference on solidification, Metals Society(1979).

2. I. Le May and L. M. Schetky, *Copper in iron and steel*, Wiley, New York (1982).

3. Å. Bergman and R. West, *Scripta Metallurgica* 22, 659-663 (1988).

4. W. Xin, B. Song, Z. Yang, Y. Yang and L. Li, *ISIJ international* 56, 1232-1240 (2016).

5. N. Imai, N. Komatsubara and K. Kunishige, *ISIJ international* 37, 217-223 (1997).

### [학생 1-2 | 09:15]

**Al<sub>0.75</sub>VCrZrNb 내화 고엔트로피 합금의 미세조직 간 구동력 차이에 따른 복합 산화 거동 연구:** 윤교식<sup>1</sup>, 이용건<sup>1</sup>, 이유진<sup>1</sup>, 강민욱<sup>1</sup>, 안병민(책임저자)<sup>1,2\*</sup>, <sup>1</sup>아주대학교(에너지시스템 학과), <sup>2</sup>아주대학교(첨단신소재공학과)

**Keywords:** refractory high-entropy alloy, oxidation behavior, thermodynamic driving force, selective oxidation, complex oxide

Nb와 같은 고용점 원소 기반의 내화 고엔트로피 합금(Refractory high-entropy alloy, RHEA)은 고온에서도 높은 기계적 강도와 구조적 안정성을 확보할 수 있는 차세대 구조재료 소재이다. 최근에는 RHEA의 불안정한 산화거동을 야기하는 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>와 같은 비보호성 산화물 형성을 억제하기 위해 Al, Cr, Zr과 같은 높은 전자 친화도를 가지는 원소의 첨가를 통해 열역학적으로 안정한 보호성 산화막을 유도하고자 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만 다원계 합금에서는 원소의 산화 구동력 차이에 따라 비정형 산화가 발생하여 단일 보호성 산화물의 형성으로 단순화되기 어렵다. 특히 다상 구조의 합금에서는 미세조직적 차이로 인해 산화 구동력이 낮은 원소의 산화물이 우선적으로 형성될 수 있으나 미세조직 고려한 산화거동 연구는 미비한 상황이다. 이에 다중 원소 간의 경쟁적 산화와 상호작용을 고려한 열역학적 해석을 바탕으로 내화 고엔트로피 합금의 미세조직과 산화 거동 간의 상관성을 연구하였다.

본 연구에서는 기계적 합금화(Mechanical alloying, MA)를 통해 Al<sub>0.75</sub>VCrZrNb RHEA 분말을 제조한 후 방전 플라즈마 소결(Spark plasma sintering, SPS)을 통해 치밀화한 합금을 균질화 열처리를 실시하였다. 제조된 RHEA는 N<sub>2</sub> 99.9% 분위기, 900 °C에서 최대 24시간까지 산화거동을 분석하였다. RHEA의 산화 시간에 따른 상 및 미세조직은 변화는 X선 회절분석기(X-ray diffractometer, XRD), 주사전자현미경-에너지 분광 분석기(scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy, SEM-EDS)를 통해 분석하였으며, 고온 산화 거동은 동시 열분석기(simultaneous thermal analyzer, STA)를 통해 분석하였다.

제조된 RHEA의 상 및 미세조직 분석 결과, 상호 고용도 차이로 인해 BCC 기반의 기지상과 함께 Cr, V, Nb-rich phase가 형성되었으며, 모든 원소와 고용도가 낮은 Zr이 석출 및 산화되었다. 균질화 열처리 후에 rich phase가 감소하였으나 Nb-rich phase의 경우 증가하는 경향을 보였다. 열처리 한 합금의 산화가 진행됨에 따라 표면에는 ZrO<sub>2</sub>와 각 미세조직에서 열역학적 구동력이 높은 원소의 단순 산화물이 경쟁적으로 형성된 후 Zr<sub>6</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>17</sub> 등의 복합산화물이 형성되었다. 24시간 산화 후 합금은 총 115.9%의 질량 증가량을 가지며 산화물 간의 열팽창계수 차이와 산화물 형성에 의한 응력으로 인해 표면 및 내부에 균열이 형성되었다. 이에 표면 산화 및 내부 확산이 동시에 일어나 1.47의 power-law 지수와  $1.95 \times 10^{-3} \text{ mg}^2 \cdot \text{cm}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 산화 속도 상수를 가진다.

본 연구는 다상 구조의 고엔트로피 합금에서 내화 원소 기반의 비보호성 산화물의 형성과 장기 산화 시 형성되는 복합산화물을 분석함으로써 내화 고엔트로피 합금의 산화 거동 개선에 유용한 기초 데이터를 제공할 수 있다.

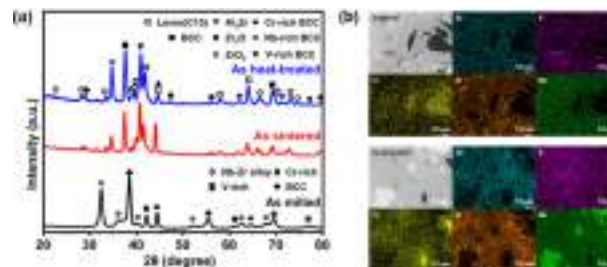


**Fig. 1.** Alloying behavior of Al<sub>0.75</sub>VCrZrNb RHEA (a) XRD patterns of as milled powder, sintered bulk, heat-treated bulk, (b) Cross section SEM-EDS image of as sintered and heat-treated RHEA



**Fig. 2.** Result of 24 hours high-temperature oxidation behavior at 900 °C (a) XRD result of RHEA, (b) SEM-SE image of RHEA (c) TG-DTA curve

### 참고문헌(References)

1. S. K. Dewangan, N. Cheenepalli, H. Lee and B. Ahn, *J. Mater. Res. Technol.* **31** 3781-3789 (2024).

2. H. Lee, H. G. Yu, R. Jain, M. Mohan, Y. Lee, S. K. Dewangan and B. Ahn, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* **135** 107507 (2026).  
 3. X. Pei, Y. Du, K. Wang, T. Li, M. Hu, H. Wang and W. Liu, *Corros. Sci.* **224** 111527 (2023).

### [학생 1-3 | 09:30]

**적층제조 기반 스테인리스 강-구리 복합재의 격자 구조 설계에 따른 열-기계적 거동 분석:** 김강산<sup>1</sup>, 최동인<sup>2</sup>, 정경재<sup>1\*</sup>, <sup>1</sup>성균관대학교 신소재공학부, <sup>2</sup>서울대학교 재료공학부

**Keywords:** 격자 구조, 적층 제조, 금속 복합재, 유한요소해석, 열 특성

스테인리스 강-구리 복합재는 스테인리스 강이 갖는 우수한 기계적 특성과 구리의 높은 열전도도를 동시에 확보할 수 있어, 고효율 열 전달이 요구되는 구조재료로 주목받고 있다. 특히 최근 적층 제조 기술의 발전은 복합재 내부에 다양한 격자 구조를 구현할 수 있는 높은 설계 자유도를 제공함으로써, 단순한 재료 조합을 넘어 내부 구조 설계를 통한 물성 제어 가능성을 제시하고 있다. 그러나 기존 연구는 주로 격자 구조의 기계적 특성 평가에 집중되어 있으며, 구리가 포함된 금속 복합 격자 구조에서 구조 기하학과 부피분율 변화가 열 전달 특성에 미치는 영향을 기계적 거동과 함께 종합적으로 분석한 연구는 상대적으로 부족하다. 본 연구의 목적은 316L 스테인리스 강-구리 복합재를 대상으로 내부 구조 설계 요소인 격자 구조 형상과 구리 부피분율 변화가 기계적 및 열적 거동에 미치는 영향을 수치해석적으로 규명하는 데 있다. 이를 통해 적층제조 기반 금속 복합재의 구조 설계 단계에서 기계적 강도와 열전도 성능을 동시에 고려할 수 있는 해석적 근거를 제시하고자 한다.

유한요소해석을 활용하여 316L 스테인리스 강과 구리로 구성된 복합 격자 구조 모델을 구축하였다. 내부 구조는 Simple cubic, Octet truss, TPMS 등 서로 다른 기하학적 특성을 갖는 여러 격자 구조로 모델링하였으며, 각 구조에 대해 구리의 부피분율을 단계적으로 변화시켜 해석을 수행하였다. 기계적 거동 분석을 위해 단축 압축 조건하에서의 응력 분포 및 변형 거동을 평가하였고, 열적 거동 분석을 위해 정상 상태 열전도 해석을 수행하여 온도 분포 및 유효 열전도 특성의 변화를 비교하였다. 모든 해석은 동일한 경계 조건과 물성 조건을 적용하여 구조형상과 부피분율 변화에 따른 상대적 경향을 분석하는데 초점을 두었다.

수치해석 결과, 격자 구조의 기하학적 특성과 구리 부피분율은 기계적 응력 분포와 열 전달 거동에 모두 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 구리 부피분율이 증가함에 따라 열전도 성능은 전반적으로 향상되는 경향을 보였으나, 격자 구조 형상에 따라 열 흐름의 경로와 온도 분포 양상에는 차이가 발생하였다. 또한 동일한 부피분율 조건에서도 구조 기하학에 따라 국부적인 응력 집중 현상과 압축 거동의 차이가 관찰되어, 열적 성능 향상과 기계적 안정성 간의 설계 상 트레이드오프 가능성이 확인되었다. 이러한 결과는 내부 구조 설계가 단순한 부피 분율 조절을 넘어 열-기계적 특성을 동시에 제어하는 핵심 설계 인자임을 시사한다. 본 연구에서 제시한 수치해석 기반 접근은 적층제조 금속 복합재의 구조 설계 초기 단계에서 물성 변화를 사전에 예측하고 설계 방향을 설정하는 데 유용한 도구로 활용 될 것으로 기대된다.



**Fig. 1.** 부피분율에 따른 Octet-truss 구조의 형상 변화: (a)Cu 23vol%; (b)Cu 26vol%; (c)Cu 30vol%; (d)Cu 38vol%; (e)Cu 45vol%

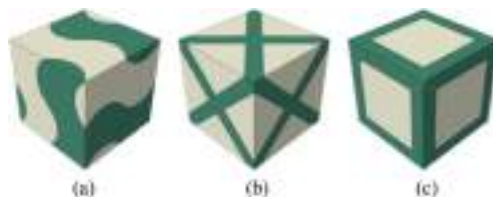


**Fig. 2.** 구조 기하학에 따른 형상: (a)TPMS-Gyroid; (b)Octet-truss; (c)Simple Cubic

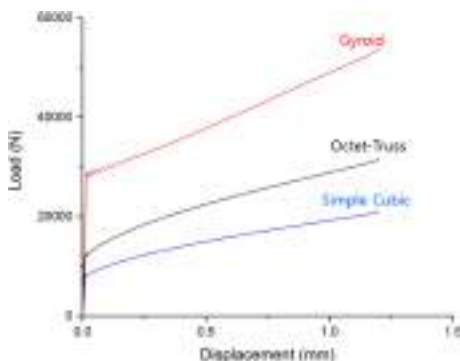


**Fig. 3.** 압축 거동 모사 시뮬레이션 결과



## 참고문헌(References)

1. Y. H. Cho, D. Choi, K. Jeong, Y. Kim, M. Park, S. Lee, H. Choi, I. S. Choi, S. G. Kang, and H. N. Han, J. Mater. Res. Technol. 37, 89 (2025).
2. N. Khan and A. Riccio, Prog. Aerosp. Sci. 149, 101021 (2024).
3. K. B. Shingare, A. Schiffer, and K. Liao, Sci. Rep. 15, 4253 (2025).

## [학생 1-4 | 09:45]

Al-Zn-Mg-Cu 합금에서의 결정립계 석출물이 피로 균열 전파거동에 미치는 영향: 신선호<sup>1</sup>, 정혜지<sup>1</sup>, 하재민<sup>1</sup>, 하상렬<sup>2</sup>, 성효경<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>국민대학교 신소재공학부, <sup>2</sup>명지대학교 반도체공학부

**Keywords:** Al-Zn-Mg-Cu 합금, 피로 균열 전파(Fatigue Crack Propagation, FCP), 결정 소성 유한 요소법(Crystal plasticity-Finite element method, CP-FEM), 결정립계 석출물(Grain boundary precipitate, GBP), 석출상 자유 영역(Precipitate free zone, PFZ)

고강도 Al Zn Mg Cu 합금은 우수한 비강도로 인해 항공우주 산업의 핵심 소재로 활용되나, 인장 강도와 응력 부식 균열 저항성을 동시에 확보하는 과정에서 결정립계 석출물과 석출물 자유 영역의 형성 및 성장에 따른 미세조직 변화가 수반된다. 이러한 변화는 피로 균열 전파 거동에서 near threshold 영역과 Paris law 영역의 균열 전파 경로와 에너지 소산 메커니즘을 결정하는 핵심 인자로 작용한다. 특히 석출물 자유 영역의 폭은 균열이 결정립계를 따라 국부화될지 여부를 좌우하며, 결정립계 석출물의 형상과 분포는 균열 침단의 응력 집중과 전파 속도에 직접적인 영향을 미친다. 본 연구는 결정립계 석출물과 석출물 자유 영역의 통계적 형상학적 특성화를 수행하고, 결정소성 유한요소법과 피로 균열 전파 데미지 모델을 결합한 수치 해석을 통해 피로 저항성을 극대화할 수 있는 최적의 미세조직 상태를 규명하는 것을 목적으로 한다.

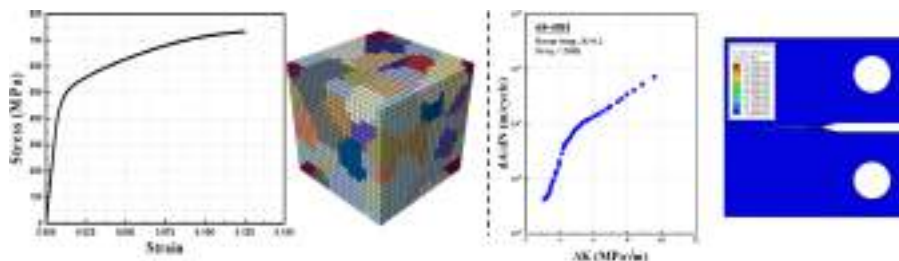


Fig. 1. 결정소성 유한요소법 및 피로균열전파 데미지 모델

이를 위해 Al Zn Mg Cu 합금에서 Zn 함량과 열처리 시간을 변화시켜, 결정립계 석출물의 크기와 연속성, 그리고 석출물 자유 영역의 폭이 상이한 시편을 제조하였다. TEM 분석을 통해 결정립계 석출물의 평균 크기, 형상비, 분포 간격, 피복률을 정량화하였고, EBSD 분석을 통해 결정립 크기, 입계 방위차 분포, 입계 성격을 도출하였다. 정량화된 미세조직 지표를 바탕으로 TEM 및 EBSD 이미지 기반의 미세조직 모델을 구축하여, 결정립계 석출물과 석출물 자유 영역을 명시적으로 포함하는 형태로 해석 영역을 구성하였다. 이후 결정소성 유한요소법으로 결정립계 인근의 소성 변형 분포와 변형 구배 기반 지표를 계산하고, 그 결과를 피로 균열 전파 데미지 모델과 연계하여 미세조직 의존 균열 전파 거동을 수치적으로 모사하였다. 실험적으로는 ASTM E647에 따라 피로 균열 전파 시험을 수행하여  $da/dN$ 과  $\Delta K$  관계를 확보하였으며, near threshold 특성과 Paris law 구간의 기울기 및 계수를 미세조직 인자와 비교하여 수치 해석 결과의 타당성을 검토하였다.

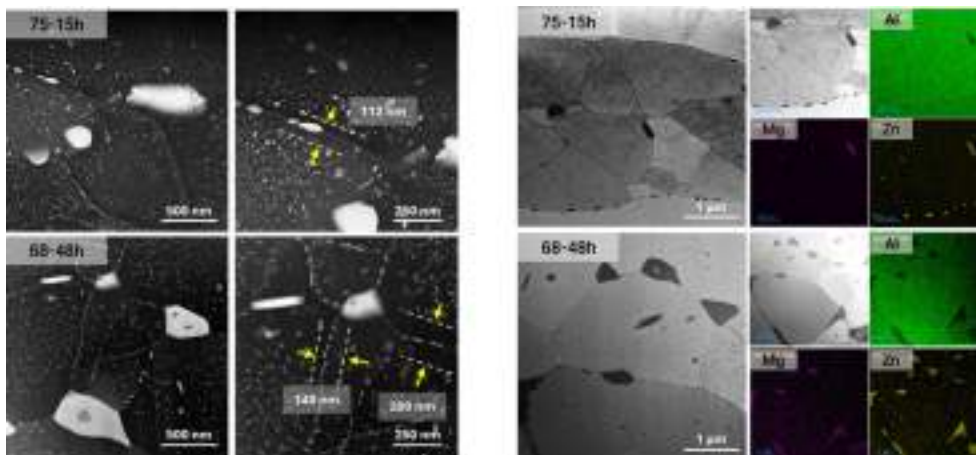


Fig. 2. Zn함량 및 열처리 조건에 따른 GBP 및 PFZ 형상 차이

연구 결과, near threshold 영역에서는 석출물 자유 영역의 폭이 상대적으로 좁고 결정립계 석출물이 불연속적으로 분포한 조건에서 결정립계 인근의 소성 변형 국부화가 완화되며, 균열 경로의 입계 지배성이 감소하여 균열 전파 저항이 향상되는 경향을 보였다. 반면 결정립계 석출물이 조대화되거나 연속성이 증가한 조건에서는 결정립계 주변의 응력 집중과 변형 구배가 증가하여, 균열 기점 형성과 초기 전파가 촉진되는 경향이 확인되었다. Paris law 영역에서는 전위와 석출물의 상호작용이 전파 저항을 지배하였으며, 전단 가능한 석출물의 비율이 높은 조건에서 가역적 슬립이 증가하고 손상 누적 속도가 감소하여, 균열 전파 저항성이 개선되는 경향을 확인하였다. 종합하면, Zn 함량과 열처리 시간 제어를 통해 결정립계 석출물의 조대화와 연속성을 억제하고 석출물 자유 영역의 폭을 적정 범위로 제한하는 미세조직 설계가 고강도 알루미늄 합금의 피로 수명 연장에 유효함을 확인하였다. 또한 본 연구의 이미징 기반 모델링과 결정소성 유한요소 해석 및 피로 균열 전파 데미지 모델의 결합은 피로 저항성 미세조직 설계를 위한 정량적 가이드라인을 제공한다.

#### 참고문헌(References)

1. S. Ha, S. H. Kayani, K. Lee, S. Park, H. Choi, J. B. Seol, J. G. Kim, and H. Sung, "Microscopic-plastic deformation behavior of grain boundary precipitates in an Al-Zn-Mg alloy," **Journal of Materials Research and Technology**, Vol. 30, pp. 3420–3429, 2024.
2. K. Wen, Y. Fan, G. Wang, L. Jin, X. Li, Z. Li, Y. Zhang, and B. Xiong, "Aging behavior and fatigue crack propagation of high Zn-containing Al-Zn-Mg-Cu alloys with zinc variation," **Progress in Natural Science: Materials International**, Vol. 27, pp. 217–227, 2017.
3. Z. Liang, A. Liu, X. S. Wang, and N. Q. Zhang, "Experimental and modeling study on small fatigue crack initiation and propagation behavior of Inconel 617," **International Journal of Fatigue**, Vol. 164, 107158, 2022.

#### [학생 1-5 | 10:00]

LPBF 제조 CoCrFeMnNi 고엔트로피 합금의 <100> 및 <110> 경쟁 성장 거동 규명 및 미세조직 제어: 김려현<sup>1</sup>, 박하음<sup>2</sup>, 박정민<sup>2</sup>, 성효경<sup>1\*</sup>;

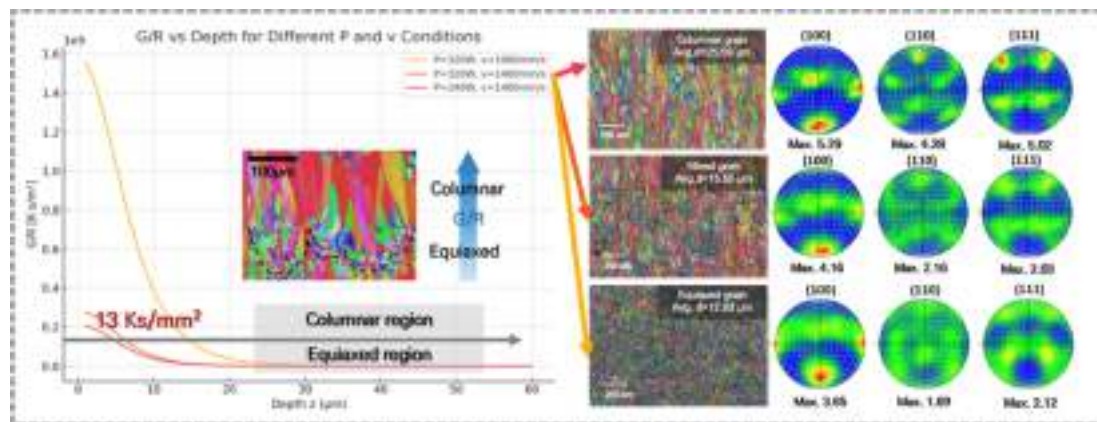
<sup>1</sup>국민대학교 신소재공학과, <sup>2</sup>한국재료연구원 나노재료연구본부

**Keywords:** LPBF 적층 제조, 고엔트로피 합금, 집합조직, 기계적 이방성, 미세조직 제어

##### 1. 연구의 목적과 의의

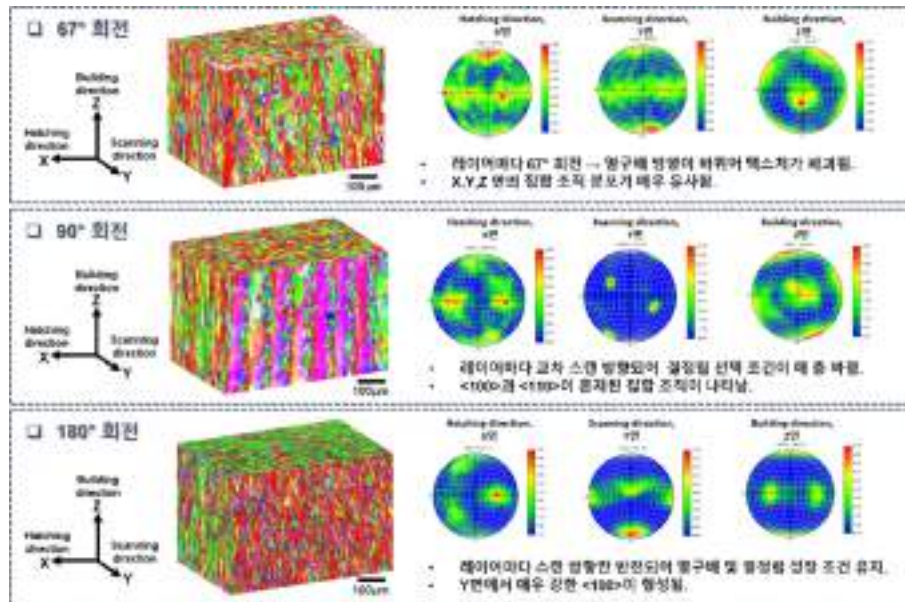
레이저 분말 베드 용융(LPBF) 공정 특유의 초고속 응고 과정 ( $10^6 \sim 10^8$  K/s)가 유도하는 계층적 불균질 미세조직을 정밀 제어하여, 금속 소재의 강도-연신을 상충 관계를 극복하는 데 목적이 있습니다. 특히 LPBF 특유의 강력한 에피택셜 성장 (Epitaxial growth)으로 인한 주상정 형성 및 기계적 이방성 문제를 해결하기 위해, 공정 변수 기반의 미세조직 프로그래밍 전략을 제시함으로써 적층 제조 부품의 구조적 신뢰성 제고와 기능적 확장성을 확보하고자 하였습니다.

##### 2. 연구 방법론 개요



• 단면별 응고 거동 분석: 빌드면 (Y면)에 대해서는 응고 계면의 안정성 및 형태를 결정하는 핵심 지표인 온도 구배(G)와 응고 속도(R)의 비율(G/R)을 중심으로 분석을 진행하였습니다. 소재 고유 열상수와 실제 적층 파라미터 (laser power, scan speed)를 대입하여 G/R값을 정량 산출하여 값의 구현성을 높였고, 이를 바탕으로 Ni 합금의 CET (Columnar-to-Equiaxed Transition) 임계값인  $13 \text{ K}\cdot\text{s}/\text{mm}^2$ 를 기준으로, 해당 값 내에서 주상정이 억제되고 등축정이 유도되는 열역학적 조건을 실험적으로 검증하였습니다. 반면, 스캔면(Z면) 분석에서는 레이저 출력과 스캔 속도의 조합인 에너지 밀도가 용융 풀의 기하학적 중첩과 집합 조직(Texture) 강도에 미치는 상관관계를 집중적으로 고찰하였습니다.

• 멀티스케일 물성 평가: 또한, 거시적인 기계적 이방성의 근본 원인을 파악하기 위해 미시적 영역에서의 물성 평가를 병행하였습니다. 적층 시의 스캔 전략( $67^\circ$  및  $180^\circ$  회전 적층)에 따른 결정학적 텍스처 변화를 EBSD로 분석하였으며, 각 면에서 나타나는 고유한 결정립 형상과 나노 단위의 셀 구조가 변형 기구에 미치는 영향을 평가하기 위해 나노 압입 시험을 수행하였습니다. 이를 통해 특정 결정 방위별 응력 및 슬립계 분석으로 미시 조직으로부터 거시적 인장 거동을 예측할 수 있는 멀티스케일 분석 체계를 구축하였습니다.



### 3. 주요 연구 결과

• 결정 방위별 성장 및 특성: 열 흐름 방향을 따라 성장하는 에피택셜 성장은  $\langle 100 \rangle$  방위를, 용융 풀 측면에서의 우선 성장은  $\langle 110 \rangle$  방위를 형성하며 경쟁하는 것으로 나타났다. 이러한 방위 차이는 인장 방향에 따라 전위 평균 자유 경로를 변화시켜 기계적 이방성을 유발한다.

• 67° 회전 전략 적용 시, 용융 풀 중앙부의  $\langle 100 \rangle$  성장과 측면부의  $\langle 110 \rangle$  성장 간 경쟁이 완화되어 지배적인 텍스처가 파괴됨을 확인하였습니다. 이는 스캔 전략을 통해 결정학적 이방성을 제어하고, 전위의 평균 자유 경로를 물리적으로 변화시킬 수 있음을 시사합니다.

• 나노 인텐테이션을 활용한 나노 스케일 분석을 통해 적층 조직의  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$  결정 방위의 각 임계 분해 응력과 슬립계 분석 및 정량화를 통해 LPBF 부품이 하중을 받을 때 나타나는 소성 거동을 분석하였다. 또한 적층 제조 조직에서 나타나는 전위 cell-structure가 각 결정 방위별로, 공정 파라미터 별로 나타나는 변형 거동 차이 분석으로 기여도를 평가해 기계적 물성 향상 메커니즘을 도출하였다.

결론적으로 본 연구는 G/R 제어를 통한 등축정 유도 및 스캔 전략 최적화를 통해 LPBF HEA의 미세조직을 프로그래밍할 수 있음을 입증하였다. 이는 최신 연구 동향인 불균질 미세조직의 이점을 살리면서도, 이방성 문제를 해결하여 고성능 적층 제조 부품의 신뢰성을 확보하는 데 기여할 것이다.

### 참고문헌(References)

1. J. M. Park, Addit. Manuf. 35, 101333 (2020).
2. S. Wei et al., J. Mater. Sci. Technol. 235, 133 (2025), p. 231, TMS, Warrendale, PA (1991).
3. S. Gao et al., Nat. Commun. 14, 6752 (2023).

### [학생 1-6 | 10:15]

**비금속 원자를 활용한 Al-Zn-Mg-Cu-O 합금의 MWCNT 첨가에 따른 석출 거동 및 미세조직 변화와 기계적 특성 분석:** 박현우<sup>1</sup>, 이진원<sup>2</sup>, 배동현<sup>2</sup>, 신세은<sup>1\*</sup>; <sup>1</sup>국립순천대학교, <sup>2</sup>연세대학교

**Keywords:** Al-Zn-Mg-Cu, Non-metallic element, MWCNT, Precipitate

#### 1. 연구의 목적과 의의

자동차 산업 분야에서 연비 향상을 위해 높은 비강도와 우수한 기계적 성질을 갖춘 소재 개발이 지속적으로 요구되고 있다. 본 연구에서 기지로 채택한 Al-Zn-Mg-Cu (7xxx) 계열 합금은 상용 Al 합금 중 가장 비강도가 높고 열처리를 통해 형성되는 미세 석출물에 의해 탁월한 강화 효과를 나타낸다. 이러한 기지 합금의 기계적 특성을 극대화하기 위해, 저밀도와 우수한 강성 및 강도를 지닌 다중벽 탄소나노튜브 (MWCNT)를 강화재로 선정하였다. 일반적으로 Al/CNT 복합체는 계면에서의 낮은 습윤성과 결합력으로 인해 하중 전달 효율이 저하되는 한계가 있다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위해 산소 원자를 첨가하여 계면 특성을 제어하고자 하였다. 산소는 Al-CNT 계면에서 가교 역할을 수행하여 결합력을 증진시키는 원소로 활용된다 [1].

#### 2. 연구 방법론 개요

이를 구현하기 위해 산소가 함유된 새로운 조성의 Al-Zn-Mg-Cu-ZnO 합금을 설계하였으며, 볼 밀링 공정을 통해 3 vol.%의 MWCNT를 균일하게 분산시켜 복합 분말을 제조하였다. 비교 분석을 위해 상용 Al 7075 합금, Al-Zn-Mg-Cu-ZnO 합금, 그리고 각 합금에 MWCNT를 첨가한 복합재를 포함하여 총 4 가지의 소재를 제작하였다. 모든 시편은 spark plasma sintering 공정으로 제작하였으며, T6를 수행하여 이에 따른 석출 거동과 기계적 성질 변화를 분석하였다.



### 3. 주요 연구 결과

미세조직 관찰 결과, 모든 시편에서 소결 중 ostwald ripening에 의해 석출물의 조대화가 발생하였으나, T6 후에는 미세하고 균일한 석출물 분포를 확인하였다. 복합재의 EDS mapping 관찰 결과, CNT는 국부적으로 응집된 형태를 보였으며, CNT 주변부에서 Mg와 O 원소가 집중적으로 검출되었다. XRD 상 분석 결과, CNT를 첨가하지 않은 두 합금에서는 기지상인 Al과 주요 석출상인  $MgZn_2$ 의 피크만 검출된 반면, CNT 첨가 복합재에서는  $MgAl_2O_4$  상이 추가로 검출되었다. 이는 Mg의 높은 산소 친화도로 인해 불 밀링과 소결 과정에서 분말 표면의 산화물 ( $Al_2O_3$ ) 및 내부 산소와 Mg가 우선적으로 반응한 결과로 판단된다 [2]. 이로 인해 상분을 계산 결과, 복합재 내  $MgAl_2O_4$  형성에 따른 Mg 원소 고갈로 주요 강화상인  $MgZn_2$ 의 분율이 감소하는 현상이 나타났다. TEM 관찰 결과, 산소 원자의 첨가는 기지 내 Mg와의 산화 반응에 의한  $MgAl_2O_4$  상 형성을 억제하는 대신, Al-CNT 계면에서의 oxygen bridging 형성을 유도하는 것을 확인하였다. 기계적 특성 분석 결과, Al-Zn-Mg-Cu-ZnO 합금은 산소 및 합금 원소의 첨가량 증가로 인해 상용 Al 7075 대비 우수한 경도를 나타냈으며, 특히 T6 후 열처리 전 대비 최대 2배의 경도 상승을 보였다. 기존 Al 7075/CNT 복합재의 경우, Mg가 Al-CNT 계면으로 확산하여  $MgAl_2O_4$  상을 형성함에 따라 강화상인  $MgZn_2$ 의 수가 감소하여 경도와 탄성계수가 저하되는 한계가 있었다. 반면, 본 연구에서 제안하는 산소 첨가 복합재는 산소 원자가 Al-CNT 계면에서 산소 가교 역할을 수행하여 강한 계면 결합력을 확보하였다. 이를 통해 석출물 감소에 따른 기계적 성질 저하 문제를 효과적으로 극복하였으며, 우수한 하중 전달 메커니즘을 구현하였다.

#### 참고문헌(References)

1. S. H. Bae, M. R. Joo, S. E. Shin, and D. H. Bae, Mater. Sci. Eng. A. 893, 146141 (2024).
2. G. N. Ma, D. Wang, Z. Y. Liu, B. L. Xiao, and Z. Y. Ma, Mater. Charact. 154, 381 (2019).

### [학병2-1 | 10:40]

**레이저 분말 적층 융합으로 제조된 인코넬718 격자 구조의 압축 거동 및 미세조직과의 상관관계 분석:** 정다운<sup>1</sup>, 강성민<sup>2</sup>, 이경준<sup>2</sup>, 강성규<sup>3</sup>, 성효경<sup>1\*</sup>; <sup>1</sup>국민대학교 신소재공학부, <sup>2</sup>가천대학교 기계공학과, <sup>3</sup>경상국립대학교 나노·신소재공학부

**Keywords:** 적층제조, IN718, 격자구조, 압축 이방성, 미세조직 제어

#### • 연구 목적과 의의

IN718은 우수한 고온 강도와 내식성을 바탕으로 항공우주 및 가스터빈 핵심 부품에 널리 사용되는 Ni 기반 초합금이다. 최근 레이저 분말 적층 융합(LPBF)을 통해 복잡한 격자구조를 제조함으로써 경량화와 기능성을 동시에 확보하려는 시도가 확대되고 있다. 그러나 LPBF는 급속응고와 반복 적층 열이력으로 인해 빌드 방향(BD)을 따라 주상정과 강한 ?001? 텍스처가 발달하는 경향이 커, 격자 부품 내부에 미세조직 이방성이 내재한다. 기존 격자 연구는 주로 기하학 요소를 중심으로 압축 거동을 설명해 왔지만, 실제 부품에서는 토폴로지에 따른 하중 경로와 BD 기반 미세조직 이방성이 동시에 작용하므로, 하중 방향이 BD와 평행(HD)인지 수직(VD)인지에 따라 강도와 붕괴 모드가 달라질 수 있다.

본 연구는 변형 메커니즘이 상이한 세 가지 IN718 격자 구조인 Auxetic, Dode-thin, Tesseract를 제작하고 VD/HD 압축을 비교하여 미세조직 이방성이 격자 압축 거동에 미치는 영향을 EBSD 기반으로 규명한다. 최종적으로 (1) 두 방향 간 강도 및 붕괴 모드의 정량적 차이와 (2) 그 차이를 설명하는 EBSD 기반 변형 집중 지표를 연결함으로써, 방향 의존성을 설계 변수로 반영할 수 있는 방향 의존 설계 지침을 제시하고자 한다.

#### • 연구 방법론 개요

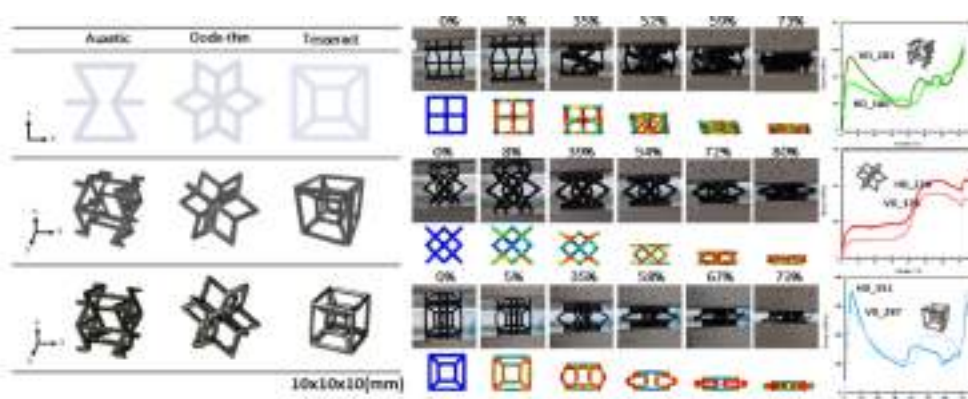


**Fig. 1.** IN718 격자 Auxetic, Dode-thin, Tesseract의 VD/HD 압축 응력-변형률 비교.

Fig. 1은 세 가지 격자 구조(Auxetic, Dode-thin, Tesseract)의 압축 거동을 하중 방향(VD/HD)별로 비교한 결과를 보여준다. 최대 압축응력은 방향에 따라 뚜렷한 변화가 나타났으며, Auxetic는 HD 대비 VD에서 56.1% 증가, Dode-thin은 VD 대비 HD에서 29.0% 증가, Tesseract는 VD 대비 HD에서 22.3% 증가하였다. 방향 민감도를 평균응력으로 정규화한 지표( $\Delta\sigma/\sigma$ )로 비교하면 Auxetic 43.8%, Dode-thin 25.3%, Tesseract 20.1%로 Auxetic의 방향 의존성이 가장 컸다. 즉, Dode-thin과 Tesseract는 HD에서 강도 우위를, Auxetic는 VD에서 강도 우위를 보이며, 토폴로지별 하중 경로 차이가 방향 효과를 좌우함을 시사한다.

## • 주요 연구 결과

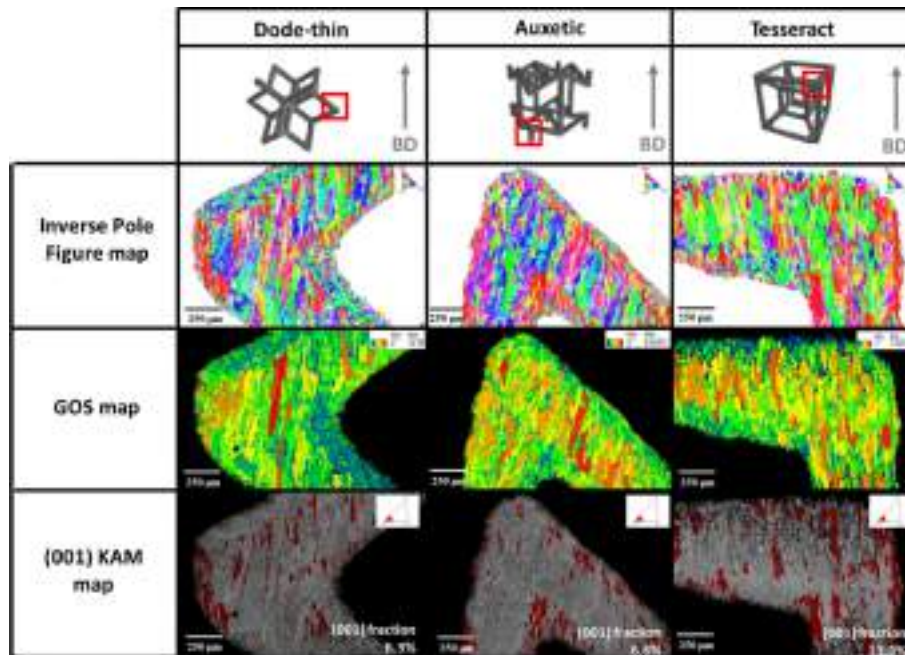


Fig. 2. HD 압축 후 EBSD 기반 노드-스트럿 변형 집중 분포(KAM·GOS).

Fig. 1의 방향 의존 거동을 미세조직 수준에서 해석하기 위해 HD 압축 후 EBSD에서 변형 집중 지표를 정량화하였다. 평균 KAM은 Auxetic 0.9°, Dode-thin 1.2°, Tesseract 1.4°였고, KAM 95분위는 각각 2.7°, 3.3°, 3.8°로 Tesseract에서 가장 높았다. 평균 GOS도 Auxetic 2.2°, Dode-thin 2.7°, Tesseract 3.1°로 증가하였다. 즉, HD에서 최대응력이 큰 구조일수록 KAM·GOS가 높아 노드-스트럿 접합부의 국부 변형 집중이 강화됨을 정량적으로 확인하였다. Fig. 2의 LPBF 공정 개략도에서 층별 적층과 반복 열이력이 누적되며 BD 기반 columnar grain 성장과 텍스처가 강화된다는 점과 연결되며, 공정 기원의 미세조직 이방성이 격자 하중 경로와 결합할 때 Fig. 1의 방향별 최대응력 및 붕괴 양상 차이가 확대됨을 시사한다.

## • 결론

본 연구는 IN718 격자구조에서 최대 압축응력이 하중 방향에 따라 22~56% 변화함을 정량적으로 제시하고, 토폴로지 하중 경로와 LPBF 기원 미세조직 이방성의 결합이 방향 의존 거동을 지배함을 EBSD 기반 KAM·GOS로 연결하였다. 이 결과는 격자 설계에서 토폴로지 선택에 더해 하중 방향과 BD 정렬을 설계 변수로 포함해야 함을 제시하며, 방향-민감 격자 설계 지침 수립의 근거를 제공한다.

## 참고문헌(References)

1. M. Toursangsaraki et al., Addit. Manuf.89, 104300 (2024).
2. T. Mayama et al., Addit. Manuf.93, 104412 (2024).
3. A. Ferrarotti et al., Mater. Sci. Eng. A919, 147491 (2025).

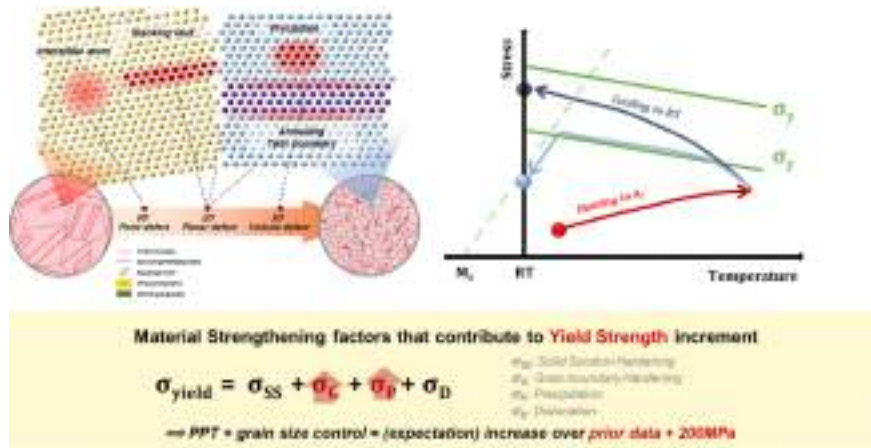
## [학생2-2 | 10:55]

**결정립 크기 제어와 석출강화 기반 Fe-Mn-Si 형상기억합금의 회복응력 향상 전략:** 윤제인<sup>1\*</sup>, 박은수(책임저자)<sup>1</sup>; <sup>1</sup>서울대학교 재료공학부

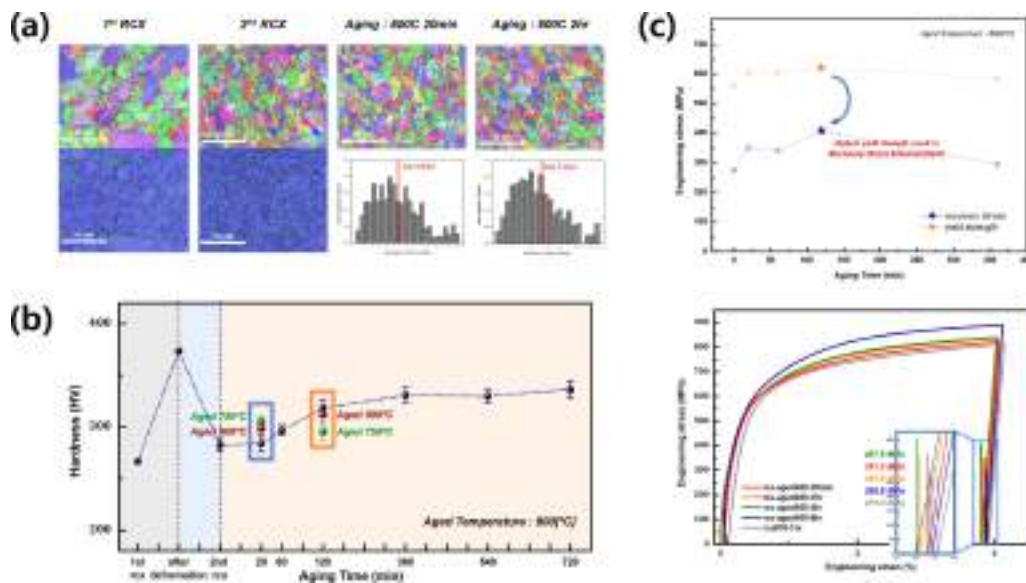
**Keywords:** Shape Memory Alloys, Thermomechanical Treatment (TMT), Recovery stress

Fe-Mn-Si 기반 형상기억합금(shape memory alloy, SMA)은 Ni-Ti계 합금에 비해 원가 경쟁력이 우수한 구조용 형상기억 소재로서 최근 큰 주목을 받고 있다. 특히 형상기억합금의 회복응력(recovery stress)을 활용한 프리스트레싱 기법은 구조 부재의 강도 향상과 재진장 가능성 측면에서 기존 프리스트레스 시스템의 대안으로 제안되고 있다. 이는 프리캐스트(PC) 구조물에 적용되는 프리스트레스 콘크리트(PSC)가 갖는 재진장 곤란, 시공 복잡성, 저온 취성 등의 한계를 효과적으로 극복할 수 있는 잠재력을 지닌다[1]. 본 연구는 이러한 응용 가능성을 바탕으로, Fe-Mn-Si계 형상기억합금의 회복응력 향상을 핵심 목표로 설정하였다. 회복응력은 응력 유도 마르텐사이트 변태가 소성 slip 변형보다 우선적으로 발생할 때 향상되며, 이는 합금의 항복강도와 밀접한 상관관계를 갖는다. 따라서 항복강도의 향상은 회복응력 증대를 위한 핵심 전략으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 미세조직 제어를 기반으로 항복강도를 향상시키기 위해, 약 10 μm 수준의 미세하고 균일한 결정립 형성에 따른 결정립계 강화(2D defect)와 VC 석출에 따른 석출강화(3D defect)를 결합한 다차원 결합 제어 전략을 제안한다. 특히 VC 석출상은 석출강화 효과뿐 아니라 적층결함(stacking fault)의 형성을 촉진하며, 이러한 적층결함은 응력 유도 마르텐사이트 변태를 구동하는 핵심 메커니즘으로 작용한다[2]. 결과적으로 본 연구는 다차원 결합 제어를 통해 항복강도를 증대시키고, 이를 바탕으로 회복응력과 형상기억특성(shape memory effect, SME)을 동시에 향상시키는 것을 목표로 한다.



본 연구에서는 오스테나이트 상을 강화하고 이를 통해 회복능을 극대화하기 위해, 기존 선행 연구들과 차별화된 접근으로 결정립계 밀도를 증가시키는 동시에 M23C6과 같은 강화상을 추가적으로 석출시키고자 하였다. 이를 위해 미세조직 제어에 앞서 CALPHAD 기반 합금 설계를 수행하였다. 구체적으로 Fe 기지 내 Mn과 Si 함량 변화에 따른 적층결함에너지(Stacking Fault Energy, SFE)를 제어하여 응력 유도 가역 상변태가 가능한 조성 영역을 확보하고, Cr 및 Ni의 소량 첨가를 통해 오스테나이트/마르텐사이트 계면 정합성을 향상시켜 형상기억효과가 극대화되는 조성 범위를 탐색하였다. 이후 석출강화를 위한 C 및 V 원소의 소량 첨가를 통해, 최종적으로 Fe-20Mn-6Si-9Cr-5Ni-1(V) wt%의 최적 조성을 설계하였다.



설계된 합금에 대해, 다결정 소재에서 필연적으로 존재하는 2D 및 3D 결함들을 정밀하게 제어함으로써 각 결함의 변형 거동 기여도를 정량화하고, 이를 기반으로 고강도 확보를 통한 회복능력 향상을 달성하고자 하였다. 특히 석출상이 존재하는 경우 단순 열처리만으로는 불균일 핵생성이 발생할 수 있으므로, 균일한 조밀 결정립 조직 형성을 위해 2-step 공정을 설계하였다. 구체적으로, 냉간압연-재결정화 공정을 2회에 걸쳐 미세 결정립을 형성한 후에, 나노 석출물 형성을 위한 석출시효 처리를 추가 수행하는 방식으로 미세구조 제어를 진행하였다. 시효 온도 및 시간 조건은 경도 측정 결과를 바탕으로 최적화하였으며, 시효 시간이 증가함에 따라 뚜렷한 시효경화 거동이 관찰되었다.

미세구조 제어가 완료된 인장 시편에 4% pre-strain을 인가한 뒤, Af(Austenite Finish) 온도 이상에서 약 5분간 가열하여 회복 응력을 측정하였다. 실험 결과, 결정립계 강화 및 석출강화가 구현되지 않은 기준 시편은 약 190 MPa의 회복응력을 나타냈다. 결정립 미세화를 통해 결정립계 강화가 구현된 시편에서는 회복응력이 약 80 MPa 향상되었으며, 시효 처리를 통해 석출강화가 추가로 구현된 최종 시편에서는 회복응력이 약 400 MPa에 도달하여, 다차원 결함 제어(결정립계 강화 + 석출강화)의 유효성을 정량적으로 확인하였다.

이와 함께 항복강도 또한 회복능력 향상과 동일한 경향으로 증가함을 확인하였으며, 이는 결정립계 강화와 석출강화가 오스테나이트 상의 강도를 효과적으로 증대시킨 결과로 해석된다. 이러한 항복강도 증가는 응력 유도 마르텐사이트 변태가 slip 변형에 선행하도록 유도함으로써, 궁극적으로 회복능력 및 회복특성 향상에 기여했음을 시사한다.



본 연구는 다차원 결함 제어를 기반으로 형상기억합금의 회복특성에 영향을 미치는 핵심 미세조직 인자를 규명하고, 회복능력 극대화를 위한 최적의 열-기계 처리(thermo-mechanical treatment) 조건을 도출하였다는 점에서 의의를 갖는다. 이러한 연구 결과는 고강도·고연성 특성을 동시에 구현할 수 있는 Fe-Mn-Si계 형상기억합금의 조성 설계 및 열-기계 공정 최적화를 위한 가이드라인 마련에 기여할 것으로 기대된다. 더 나아가 본 소재는 로봇, 의료, 군사 등 형상기억특성이 요구되는 다양한 응용 분야에서 고가의 Ni-Ti계 합금을 대체할 수 있는 경제적이고 실용적인 구조용 형상기억 소재로서의 적용 가능성을 제시한다.

#### 참고문헌(References)

1. WJLee, B.Weber, G.Feltrin, C.Czaderski, M.Motavalli, C. Leinenbach, Stress recovery behaviour of an Fe-Mn-Si-Cr-Ni-VC shape memory alloy used for prestressing, *Smart Mater. Struct.* 22 (2013) 125037
2. M.J. Lai, Y.J. Li, L. Lillpop, D. Ponge, S. Will, D. Raabe, On the origin of the improvement of shape memory effect by precipitating VC in Fe-Mn-Si-based shape memory alloys, *Acta Materialia*, 155 (2018) 222-235

#### [학생2-3 | 11:10]

Evaluating the Mechanical Behavior of Electro-deposited Invar Thin Films for High-Resolution FMM Applications: Kritichok Rattanakodsakun<sup>1</sup>, Zion Lee<sup>1</sup>, JungHun Park<sup>1</sup>, In-Gyeong Kim<sup>2</sup>, Gi-Dong Sim<sup>1\*</sup>; <sup>1</sup>Korea Advanced Institute of Science and Technology, <sup>2</sup>Sunchon National University

**Keywords:** Mechanical Behavior, Invar, Thin film, Meso-scale tensile test

##### 1. Introduction

Invar alloys are indispensable in industries requiring high dimensional stability due to their low coefficient of thermal expansion (CTE). Specifically, Invar thin films (sub-20  $\mu\text{m}$  thickness) are the primary material for Fine Metal Masks (FMMs) used in OLED evaporation processes in the display industry. As the production of displays with higher resolutions necessitates the use of thinner FMMs, this could lead to heightened risks of wrinkling and catastrophic crack initiation during manufacturing. However, while the mechanical properties of bulk Invar materials are well-established, research into the mechanical behavior of Invar thin films remains limited. This study investigates the mechanical behavior of as-deposited and annealed electroplated Invar 33, 36, and 42 thin films at both room and elevated temperatures to ensure reliable deployment for next-generation FMM applications.

##### 2. Methodology

100×120 mm<sup>2</sup> thin Invar 33, 36, and 42 sheets were fabricated by electro-depositing under the optimized technical parameters as described by Kim et al.<sup>[1]</sup>. The annealed sheets were subjected to an optimized heat treatment at 600 °C for 6 hours. Dogbone-shaped samples with a fixed gauge width and length of 1.6 mm and 3 mm, respectively, were prepared from both the as-deposited and annealed sheets by using a femtosecond laser (PHAROS, L2K Co., Korea).

Tensile tests were conducted on the as-deposited and annealed samples using a custom-built meso-scale tensile tester<sup>[2]</sup> at room temperature. Annealed samples were further tested in high temperature conditions between 100°C to 600°C at every 100°C increment (heating rate 0.5°C/s). All tests were performed at a constant strain rate of  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

##### 3. Experimental results

The as-deposited and annealed Invar thin films exhibited a significant difference in ductility. At room temperature, the as-deposited Invar 36 samples exhibited a brittle mechanical response with a yield strength (YS) of ~1000 MPa and an elongation of 1.5%. In contrast, a reduction in the YS was observed in the annealed samples Invar 36 (~390 MPa), but exhibited significant improvement of elongation (~10%) compared to the as-deposited samples. In addition, a remarkable degradation in mechanical integrity was observed at elevated temperatures. For all Invar films (33, 36, and 42), both tensile strength and ductility decreased as the temperature increased. In particular, a pronounced decrease in ductility occurs beyond 400°C.

##### 4. Conclusion

This study quantifies the mechanical properties of electro-deposited Invar thin films under both ambient and high-temperature conditions. While annealed samples are observed increasing ductility, it did not managed to prevent a noticeable decline in mechanical performance at temperatures above 400 °C. These findings provide a strategic framework for optimizing the thermal budget in OLED manufacturing and underscore the need for composition selection (Invar 33 vs. 36 vs. 42) based on the specific operating temperature of the FMMs.

#### 참고문헌(References)

1. J.B. Kim, J. Lee, I.G. Kim, Y.B. Park, and S.E. Shin, *Mater. Charact.* 210 (2024)
2. K.-H. Lim, J.-S. Bae, S. Chandra, K. Ryou, P.-P. Choi, X. Tan, G.-D. Sim, *Mater. Sci. Eng.: A* 927 (2025)
3. R.W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, fourth ed., Wiley & Sons, Newyork, 1996.

#### [학생2-4 | 11:25]

Effect of the Saccharin Concentration on Electrodeposition of the Fe-Ni Alloy: 김선민<sup>1</sup>, 김인경<sup>1</sup>, 박용범<sup>1</sup>, 신세은<sup>1\*</sup>; <sup>1</sup>국립순천대학교

**Keywords:** Invar 합금, 전주도금, 미세조직, 열팽창계수

##### 1. 연구의 목적 및 의의

OLED 디스플레이 제조 공정에서 사용되는 Fine Metal Mask(FMM)는 유기 발광층 서브픽셀 영역에 정밀하게 증착하기 위한 핵

심 부품으로, 공정 중 발생하는 열에 의해 치수 안정성이 크게 영향을 받는다 [1]. 이에 따라 열팽창계수(Coefficient of Thermal Expansion, CTE)가 매우 낮은 Fe-Ni Invar 합금이 FMM 소재로 활용되고 있다 [2,3]. 특히 차세대 초고해상도(UHD) 디스플레이 구현을 위해서는 shadow zone을 최소화하기 위한 10  $\mu\text{m}$  이하의 FMM이 요구되지만, 기존 압연 Invar 박판 제조 공정은 두께 균일성 및 가공 한계로 인해 적용에 제약이 있다 [4,5]. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 전주도금(electrodeposition) 공정이 주목받고 있으나, 전주도금 Invar 합금은 공정 조건에 따라 수소 발생, 내부 응력 증가, 미세조직 불균일 및 상 혼재( $\alpha$ -BCC/ $\gamma$ -FCC) 등의 문제가 발생하여 표면 품질과 열적 안정성 확보가 어렵다 [6, 8, 9]. 특히 도금 온도, 전해액, pH, 유기 첨가제의 종류와 농도는 전착 거동과 미세조직 형성에 결정적인 영향을 미치는 핵심 인자로 알려져 있다 [10]. 본 연구의 목적은 Fe-Ni Invar 합금 전주도금 공정에서 도금 온도 및 pH 조건을 선행적으로 최적화한 후, 사카린 첨가량 변화가 표면 특성, 미세조직 및 열팽창 거동에 미치는 영향을 체계적으로 평가하는 데 있다. 이를 통해 Invar 전주도금 공정의 공정 신뢰성을 향상시키고, FMM 응용을 위한 공정 설계 지침을 제시하고자 한다.

## 2. 연구 방법론 개요

Fe-36.5 wt.% Ni 조성의 Invar 합금 박판은 직류(DC) 전주도금 공정을 이용하여 제조하였다. 전해액은 황산염 기반 전해질로 구성되었으며, 사카린은 내부 응력 저감 및 결정립 제어를 위한 유기 첨가제로 사용되었다 [12]. 우선, 도금 온도(55-65  $^{\circ}\text{C}$ ) 및 전해액 pH(2.4-2.8)를 변화시켜 표면 형상, 조도 및 박리 거동을 비교함으로써 최적의 전주도금 조건을 도출하였다. 이후 최적 조건을 기반으로 사카린 첨가량을 0.7-5.2 g/L 범위로 변화시켜 전주도금 Invar 박판을 제조하였다. 제조된 시편에 대해 표면 형상은 광학현미경(OM) 및 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였으며, 표면 조도는 3D 레이저 현미경을 통해 정량적으로 평가하였다. 조성 분석은 SEM-EDS로 수행하였고, 상 분석 및 상 변태 거동은 X선 회절(XRD)을 통해 분석하였다. 또한 전주도금 후 열처리(400  $^{\circ}\text{C}$ , 450  $^{\circ}\text{C}$ , 600  $^{\circ}\text{C}$ )를 실시하여 상 안정화 거동을 관찰하였으며, 열팽창계수는 TMA를 통해 측정하였다.

## 3. 주요 연구 결과 및 고찰

도금 온도 및 pH 조건 변화에 따른 표면 형상 분석 결과, 55  $^{\circ}\text{C}$  및 pH 2.8 조건에서 가장 평탄하고 광택이 우수한 표면이 형성되었으며, 수소 발생에 기인한 백화 현상 및 박리 문제가 효과적으로 억제되었다. pH가 감소할수록 수소 발생 반응이 촉진되어 표면 백화와 조도 증가가 관찰되었으며, 이는 전극 표면에서의 국부적 pH 상승으로 인한 니켈 석출 억제 및 anomalous co-deposition 거동과 관련된 것으로 판단된다 [9,10]. 또한 도금 온도가 60  $^{\circ}\text{C}$  이상으로 증가할 경우, 용액 증발 및 과도한 전기화학 반응으로 인해 국부적 과전압 및 박리 시 전주도금 박판이 찢어지는 현상이 관찰되었다. 표면 조도 분석 결과 55  $^{\circ}\text{C}$ , pH 2.8 조건에서 약 0.1  $\mu\text{m}$  수준의 가장 낮은 Ra 값을 나타내어, 해당 조건이 전주도금에 가장 적합한 공정임을 확인하였다. 최적 조건에서 사카린 첨가량을 변화시킨 결과, 1.3-2.6 g/L 범위에서는 표면 개선 효과가 뚜렷하게 나타나며 내부 응력이 감소하고 균일한 표면 형상이 형성되었다 [10, 12, 13]. 반면, 0.7 g/L 조건에서는 내부 응력 제어가 충분하지 않아 정상적인 전착이 이루어지지 않았으며, 5.2 g/L 이상의 고농도 조건에서는 미셀(micelle) 형성으로 인한 이온 확산 저해로 국부적 거칠기 및 둥근 섬 형태의 표면 결함이 관찰되었다. XRD 분석 결과, 전주도금 상태에서는  $\alpha$ -BCC 및  $\gamma$ -FCC 상이 혼재된 구조를 나타내었으며, 열처리 온도 증가에 따라  $\alpha$ -BCC  $\rightarrow$   $\gamma$ -FCC 상 변태가 점진적으로 진행되었다 [7,11]. 400  $^{\circ}\text{C}$ 에서는 부분적인 상 변태가 관찰되었고, 450  $^{\circ}\text{C}$ 에서는  $\gamma$ -FCC 상이 우세하게 형성되었으며, 600  $^{\circ}\text{C}$ 에서는 완전한 상 안정화가 이루어졌다. EBSD 분석 결과, 사카린 첨가량 증가에 따라 결정립 미세화 경향이 뚜렷하게 나타났으며, 이는 사카린의 내부 응력 저감 효과에 기인한 것으로 판단된다 [15]. 반면, 열처리 온도 증가는 결정립 성장을 촉진하여 보다 안정한 미세조직 형성을 유도하였다. 열팽창계수 측정 결과, 전주도금 상태 대비 열처리 후 CTE가 현저히 감소하였으며, 450  $^{\circ}\text{C}$  열처리 조건에서 5.2 g/L 사카린 첨가 시편의 경우 약 3.6 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 의 값을 나타내었다. 또한 600  $^{\circ}\text{C}$ 에서 열처리한 시편은 상 안정화가 충분히 진행되어 상용 Invar에 근접하거나 이를 상회하는 열적 안정성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

## 4. 결론

본 연구를 통해 Fe-Ni Invar 합금의 전주도금 공정에서 도금 온도 및 pH의 선행 최적화가 표면 품질 확보에 필수적임을 확인하였으며, 사카린 첨가량 제어를 통해 미세조직 및 열적 거동을 효과적으로 조절할 수 있음을 규명하였다. 이러한 결과는 Invar FMM 제조를 위한 전주도금 공정 설계에 있어 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌(References)

- [1] Li, Anxin, et al. "Ultrasound-assisted electrodeposition of Fe-Ni film for OLED mask." *Materials Research Bulletin* 127 (2020): 110845.
- [2] Guillaume, Ch-Éd. "Recherches sur les aciers au nickel." *J. Phys. Theor. Appl.* 7.1 (1898): 262-274.
- [3] Wassermann, E. F. The invar problem. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 100(1-3), (1991): 346-362
- [4] Kim, et al. *Applied Science and Convergence Technology* 8.2 (1999): 116-120.
- [5] P. Jung-Joon, S. Jinmyeong, Y. Sanghwa, Y. Bongyoung, *ECS Meeting Abstracts* MA2022-02 (2022): 950.
- [6] Nagayama, Tomio, et al. *ECS Transactions* 50.52 (2013): 117.
- [7] Hansen, Max, Kurt Anderko, and H. W. Salzberg. "Constitution of binary alloys." *Journal of the Electrochemical Society* 105.12 (1958): 260C.
- [8] Liu, Yichun, et al. "Grain growth and grain size effects on the thermal expansion properties of an electrodeposited Fe-Ni invar alloy." *Scripta Materialia* 63.4 (2010): 359-362.
- [9] Torabinejad, V., et al. "Electrodeposition of Ni-Fe alloys, composites, and nano coatings-A review." *Journal of Alloys and Compounds* 691 (2017): 841-859.
- [10] Kim, S-H., et al. "Effect of saccharin addition on the microstructure of electrodeposited Fe-36 wt.% Ni alloy." *Surface and*

Coatings Technology 199.1 (2005): 43-48.

[11] Park, Yong Bum, and In Gyeong Kim. "The gain of low thermal expansivity via phase transition in electroformed invar." *Coatings* 8.5 (2018): 169.

[12] Ricq, L., et al. "Influence of sodium saccharin on the electrodeposition and characterization of CoFe magnetic film." *Surface and Coatings Technology* 138.2-3 (2001): 278-283.

[13] YU, J. K., WANG, M. Z., Qun, L. I., Jun, Y. A. N. G., & Lian, L. I. U., Effects of saccharin on microstructure and property of electro-deposited Ni-Fe alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19(4), (2009): 805-809.

[14] Smith, J. C. "Microstructure of the rat's intake of food, sucrose and saccharin in 24-hour tests." *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 24.2 (2000): 199-212.

[15] Nagayama, T., Yamamoto, T., & Nakamura, T, Thermal expansions and mechanical properties of electrodeposited Fe-Ni alloys in the Invar composition range. *Electrochimica Acta*, 205, (2016): 178-187.

### [학창3-1 | 14:00]

Conversion-Based Integration of Topological Metal MoP for Liner-Free Nanoscale Via Interconnects: 정서연<sup>1</sup>, 문광식<sup>2</sup>, 정연식<sup>1,2\*</sup>, 한혁진<sup>3\*</sup>; <sup>1</sup>Department of graduate school of semiconductor Technology, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Republic of Korea, <sup>2</sup>Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Republic of Korea, <sup>3</sup>Department of Materials Science and Engineering, Sungshin Women's University, Seoul, 01133 South Korea

**Keywords:** Topological Metal, Nanoscale interconnects, Via filling, Molybdenum phosphide (MoP), Electrical characterization

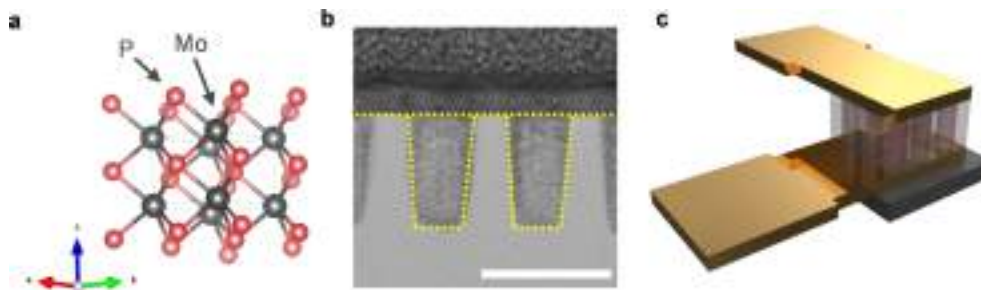


**Fig. 1.** a) A schematic of the hexagonal crystal structure of MoP. b) STEM image of MoP-filled vias. c) Device schematic for resistivity measurement of via.

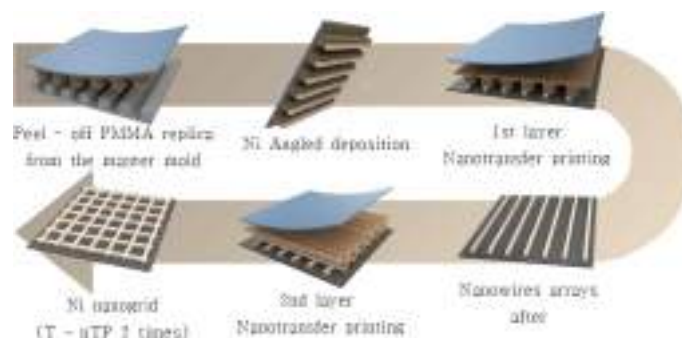


**Fig. 2.** Schematic illustration of Ni mask fabrication.

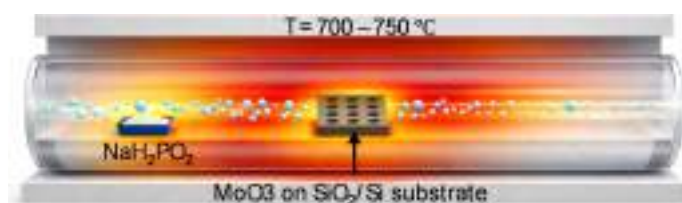


**Fig. 3.** Schematic illustration of the single-zone tube furnace used for synthesis of MoP in via.



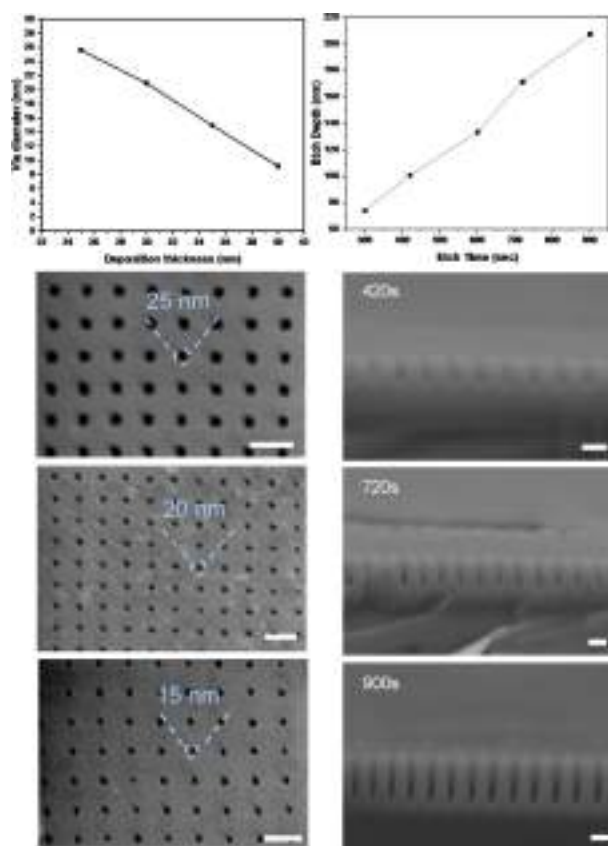


Fig. 4. Statistical analysis and SEM images of hole size and depth control.

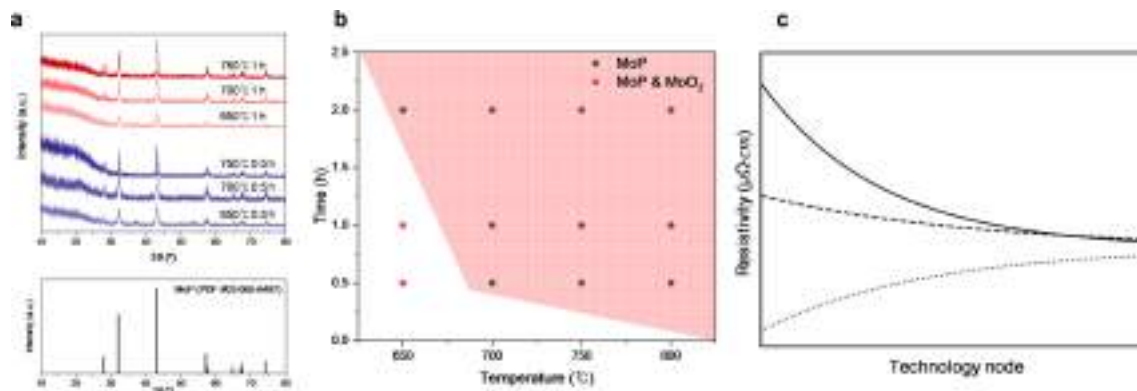


Fig. 5. Synthesis conditions for MoP nanostructures. a) XRD patterns before ( $\text{MoO}_3$ ) and after (MoP) conversion. b) Temperature-time phase diagram of the  $\text{MoO}_3$ -to-MoP conversion determined by XRD. c) Expected resistivity scaling of MoP in via with different conduction model.

#### 1. Research Motivation and Significance

Continued scaling of integrated circuits increases interconnect resistivity, making via resistance a critical bottleneck for signal delay and power efficiency. At nanoscale dimensions, Cu-based via fills suffer from pronounced size effects, including surface and grain boundary scattering, leading to increased resistivity and reduced reliability due to electromigration. These challenges motivate the exploration of alternative via materials beyond conventional metals.

Topological semimetals are expected to suppress the resistivity increase under nanoscale scaling by providing robust surface conduction channels that are less sensitive to surface roughness and grain boundary scattering, which dominate electron transport in conventional Cu interconnects.

For practical interconnect integration, however, candidate materials must be applicable not only to line patterns but also to high aspect

ratio via structures, where atomic layer deposition (ALD) is essentially the only viable filling technique. While ALD processes are well established for oxides and metals, their extension to phosphide-based materials remains highly challenging.

Molybdenum phosphide (MoP), a topological metal, exhibits low resistivity, high carrier mobility, and strong electromigration resistance; therefore represents an attractive yet experimentally underexplored candidate for via application. Here, we propose and demonstrate a process strategy to enable MoP integration into nanoscale via structures, addressing a critical gap in topological metal based interconnect technologies.

## 2. Methodology and Key Results

Nanoscale via templates with critical dimensions down to 15 nm were fabricated using thermally assisted nanotransfer printing (T-nTP) followed by reactive ion etching, yielding well-defined profiles with vertical sidewalls. Conformal filling by ALD was evaluated using line and via structures with lateral dimensions of approximately 40 nm, where a molybdenum oxide precursor was uniformly deposited along sidewalls and bottom regions. The oxide-filled structures were subsequently converted to MoP through a vapor-phase phosphorization process.

Uniform conversion to crystalline MoP was confirmed by X-ray diffraction (XRD) analysis, while transmission electron microscopy (TEM) analysis of converted via structures further verified conformal MoP formation within the vias. Structural and morphological analyses indicates that the phosphorization induced conversion proceeds in a diffusion-controlled manner, preserving the original via geometry without void formation or structural degradation, which is critical for reliable BEOL integration.

Electrical characterization shows that MoP-filled vias exhibit consistently lower effective resistivity than conventional Cu-based structures. These results collectively demonstrate the feasibility of MoP formation through a conversion reaction and support its potential as a candidate for next-generation nanoscale interconnect applications.

## 3. Implications and Outlook for Interconnect Scaling

The resulting MoP-filled vias adopt a liner/barrier-free architecture, maximizing conductive cross-sectional area and minimizing interface-related resistance. This study provides an experimentally proof-of-concept for integrating topological metals into nanoscale via structures through a conversion based filling strategy compatible with existing BEOL process flows. Together, these results position MoP as a promising candidate for liner-free, ultra-scaled via interconnects and establish a generalizable materials integration platform for exploring other topological and low dimensional conductor.

## 참고문헌(References)

1. H. J. Han, D. Hynek, Z. Wu, L. Wang, P. Liu, J. V. Pondick, S. Yazdani, J. M. Woods, M. Yarali, Y. Xie, H. Wang, and J. Cha, APL Mater. 8, 011103 (2020).
2. H. J. Han, S. Kumar, G. Jin, X. Ji, J. L. Hart, D. J. Hynek, Q. P. Sam, V. Hasse, C. Felser, D. G. Cahill, R. Sundararaman, and J. J. Cha, Adv. Mater. 35, 2208965 (2023).

## [학창3-2 | 14:15]

**미세 피치 인터커넥션을 위한 구형 h-BN 충전 비전도성 필름을 적용한 레이저 기반 압착 접합 공정:** 김성철<sup>1,2</sup>, 주지호<sup>1,†</sup>, 엄용성<sup>1</sup>, 최광문<sup>1</sup>, 신정호<sup>1</sup>, 이찬미<sup>1</sup>, 장기석<sup>1</sup>, 오진혁<sup>1</sup>, 이가은<sup>1,2</sup>, 이승윤<sup>2</sup>, 최광성<sup>1</sup>; <sup>1</sup>한국전자통신연구원, <sup>2</sup>국립한밭대학교 응용소재공학과  
**Keywords:** 레이저 기반 압착 접합(LABC), 신뢰성, 레이저 비전도성 필름(LNCF), 육방정 질화붕소(h-BN)

반도체 소자의 고성능화 및 고집적화가 가속됨에 따라, 패키징 공정에서 미세 피치 인터커넥션 기술의 중요성이 지속적으로 증가하고 있다. 특히 플립칩 기반 패키징은 고집적 구현을 위한 핵심 기술로 자리 잡았으나[1], I/O 피치의 축소로 인해 접합 공정의 정밀도 및 신뢰성 확보가 중요한 기술적 과제로 대두되고 있다. 미세 피치 구조에서는 범프 크기 감소와 범프 간 간격 축소로 인해 접합 계면이 열-기계적 응력에 더욱 민감해지며, 공정 조건의 미세한 변화만으로도 접합 결함이나 신뢰성 저하가 발생할 수 있다.[2]

현재 미세 피치 플립칩 패키징 공정에서 널리 사용되는 열 압착 접합(Thermal Compression Bonding, TCB)은 비교적 안정적인 접합 품질을 제공하지만[3], 긴 공정 시간과 높은 접합 온도로 인해 warpage 및 열적 스트레스 문제가 발생하고, 생산성 측면에서도 한계를 가진다[4,5]. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 레이저 기반 압착 접합 공정이 주목받고 있으며, 레이저 기반 압착 접합(Laser-Assisted Bonding with Compression, LABC)은 국부적인 레이저 가열과 압력을 동시에 적용함으로써, 미세 피치 조건에서도 열-기계적 스트레스를 완화하면서 균일한 접합 품질을 구현할 수 있는 유망한 기술로 평가되고 있다.[6]

그러나 공정 기술의 개선만으로는 미세 피치 패키징에서 발생하는 열 관리 및 신뢰성 문제를 근본적으로 해결하는 데 한계가 있다[7]. 집적도 증가에 따른 전력 밀도 상승과 국부적 열 축적은 접합 계면의 기계적 안정성 저하를 유발하고, 나아가 디바이스 동작 성능 저하로 이어질 수 있으므로[8], 이를 보완하기 위한 소재적 접근이 요구된다. 이에 본 연구에서는 높은 열전도도와 우수한 전기 절연 특성을 동시에 갖는 육방정 질화붕소(hexagonal boron nitride, h-BN)를 레이저 비전도성 필름(Laser Non-Conductive Film, LNCF)에 도입하고, 기존 나노입자 분산 방식의 한계를 극복하기 위해 구형 h-BN 필름을 적용하여 LABC 공정에서의 열 관리 성능 및 접합 신뢰성 향상을 도모하였다[9].

본 연구에서는 구형 h-BN 필름이 충전된 비전도성 필름을 미세 피치 플립칩 구조에 LABC 공정으로 적용하였다. 스프레이 드라이 및 열처리를 통해 합성된 구형 h-BN 필름을 20, 40 wt%로 LNCF에 도입하였으며, 비교를 위해 h-BN 필름이 포함되지 않은 LNCF를 기준 시편으로 함께 평가하고 범프 피치 40μm 구조에서 접합 공정을 수행하여 필러 함량에 따른 영향을 비교 분석하였다. 접합 공정 중 슬더 온도를 측정하여 공정 조건을 최적화하였으며, 접합 후에는 전기적 특성 평가, 계면 미세조직 분석 및 신뢰성 시험을 통해 접합 품질과 신뢰성을 평가하였다. Fig.1에서 보여지듯이, 구형 h-BN 필름이 충전된 비전도성 필름을 적용한 경우, 슬

더 젖음성 저하나 계면 박리와 같은 접합 결함은 전혀 관찰되지 않았다.

신뢰성 평가를 위해 JEDEC 조건의 thermal cycling 시험을 수행한 결과, h-BN 필러가 포함되지 않은 LNCf는 500Cycle 이전에 전기적 단선이 발생한 반면, 20wt% 및 40wt% h-BN 필러를 포함한 LNCf는 500Cycle 이후에도 전기적 연속성을 유지하였다. 특히 40wt% h-BN 필러를 적용한 경우 저항 증가가 가장 적게 나타나, 반복적인 스트레스 환경에서 우수한 신뢰성을 보였다. 현재 1000Cycle까지의 시험을 진행 중이며 Fig.2에서 확인할 수 있듯, 100, 300, 500 Cycle에서도 신뢰성 경향이 일관되게 관찰되고 있다. 이는 구형 h-BN 필러에 의한 필름의 기계적 안정성 향상에 기인한 결과로 해석된다.

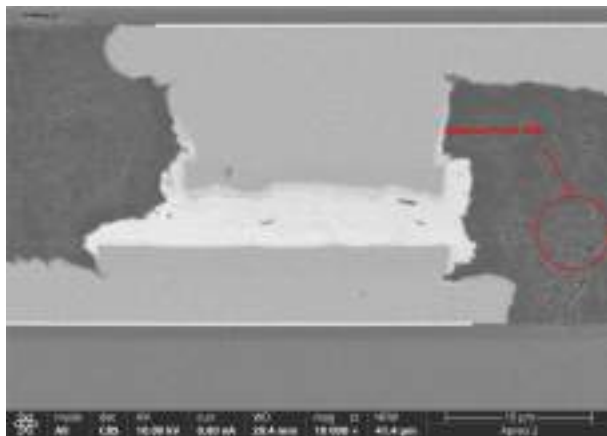


Fig. 1. 솔더 접합부의 단면 SEM 이미지(h-BN 40wt%)

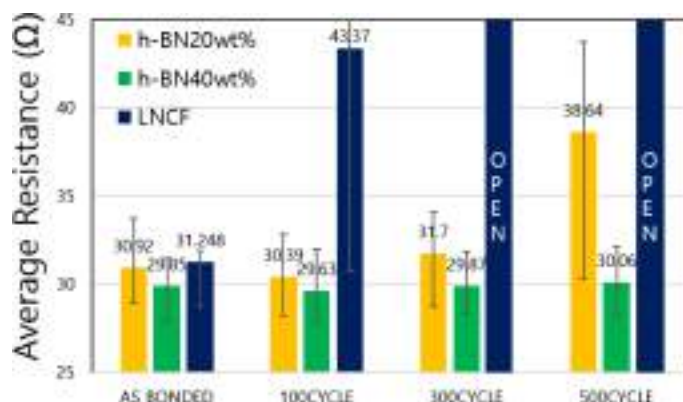


Fig. 2. 신뢰성 시험 후 저항 변화 분석 결과

#### 참고문헌(References)

1. A. Mackie, H. Jo, and S. Lim, *Proc. Int. Symp. Microelectronics* 2019, 1 (2019).
2. B. Banijamali, I. Mohammed, and P. Savalia, *Proc. Electron. Compon. Technol. Conf.* 59, 293 (2009).
3. J.-Y. Park, J.-Y. Lee, H.-P. Park, S.-C. Kim, T.-Y. Lee, S. Yoo, and Y.-H. Kim, *Microelectron. Eng.* 216, 110973 (2019).
4. A. Laor et al., *Microelectron. Reliab.* 76–77, 348 (2017).
5. H. Clauberg et al., *Proc. IEEE Electron. Packag. Technol. Conf.* 16, 492 (2014).
6. A. A. Vlasov et al., *Proc. IEEE Electron. Syst.-Integr. Technol. Conf.* 10, 1 (2024).
7. Z. Plachý, A. Pražanová, K. Dušek, and A. Géczy, *Polymers* 17, 2206 (2025).
8. D. Vasilevska, K. Raleva, and S. M. Goodnick, *Cutting Edge Nanotechnology*, InTech, 1 (2010).
9. G. Yun, M. Nam, S. Cho, Y.-W. Heo, and S. Lee, *ACS Appl. Eng. Mater.* 1, 3359 (2023).

Acknowledgements: 본 연구는 산업통상자원부-한국산업기술평가관리원(KEIT) 과제(02308294), 과학기술정보통신부-한국연구재단 과제(RS-2025-21452969, RS-2025-25457766), 한국전자통신연구원 과제(26YB1100, 25YB2500)의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

#### [학상3-3 | 14:30]

분자접합처리를 통한 반도체 패키징용 저온 Cu-Cu 접합 공정 연구: 안성민, 김미림, 한병준, 김정환\*; 국립한밭대학교 신소재공학과  
 Keywords: Low temperature bonding, surface activation, molecular bonding treatment, semiconductor packaging, Interfacial bonding characteristics

급격한 AI 연산 수요 증가는 고대역폭 및 고집적 인터커넥트를 구현할 수 있는 첨단 패키징기술의 개발을 요구하고 있다. 1, 2, 3) 하이브리드 구리-구리(Cu-Cu) 접합은 마이크로 범프를 대체할 수 있는 유망한 기술로서, 낮은 저항과 초미세 피치 I/O 스케일링을 가능하게 한다. 4, 5, 6, 7) 그러나 기존 Cu-Cu 접합 공정은 충분한 계면 확산을 확보하기 위해 상대적으로 높은 접합 온도를 필요로 하며, 이는 웨이퍼 변형, 잔류 응력 증가, 계면 결함 형성 및 장기 신뢰성 저하를 유발할 수 있다. 2, 8, 9, 10) 이러한 문제로 인해 저온 조건에서 안정적인 Cu-Cu 접합을 구현하는 것은 여전히 중요한 기술적 과제로 남아 있다.

본 연구에서는 구리의 결정학적 표면 특성과 분자접합처리를 결합한 접근법을 통해 저온 Cu-Cu 접합 공정의 가능성을 평가하고자 하였다. 우선 (111) 우선배향을 갖는 구리 전기도금층을 형성하여, 상대적으로 높은 표면 에너지와 확산 구동력을 활용함으로써 접합 온도 저감을 시도하였다. 그러나 (111) 면 도금만으로는 공정 중 및 접합 전 단계에서 발생하는 구리 표면 산화를 충분히 억제하기 어렵다는 한계가 존재한다. 이에 따라 본 연구에서는 구리 표면의 산화막 형성을 억제하고, 동시에 계면 접합을 보조할 수 있는 분자접합 처리를 도입하여 저온 Cu-Cu 접합을 시도하였다.

실험적으로는 전기도금 공정을 통해 (111) 우선배향 구리 표면을 확보한 후, 구리 표면 활성화를 위한 분자접합 처리 레시피를 설계하고 이를 침지 공정으로 적용하였다. 이후 처리된 시편에 대해 저온 조건에서 Cu-Cu 접합을 수행하였다. 우선배향 정도는 XRD 분석 및 EBSD를 통해 분율을 측정하였고, 주사전자현미경(SEM)을 이용해 단면 분석을 실시하였으며, 접합 강도는 기계적 시험을 통해 정량적으로 평가하였다.

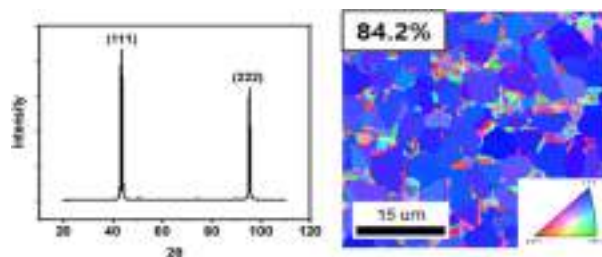


Fig. 1. (111) 도금층 XRD 분석 및 EBSD 분석 결과

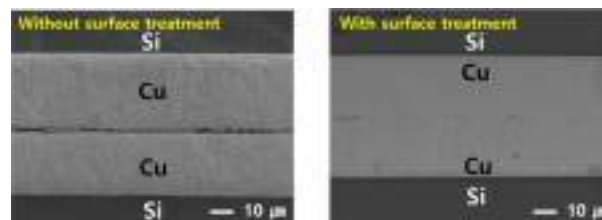


Fig. 2. 접합면 SEM 분석 결과

XRD 분석결과, (111) 피크 강하게 나타남을 확인할 수 있으며, EBSD 분석결과 (111) 면분율이 약 84% 상당으로 높은 비율로 두드러지는 것을 확인하였다. SEM 단면 분석 결과, 표면처리를 하지 않은 접합 칩에서는 상당부분 접합면의 박리가 일어났으며, 접합강도가 비교적 낮게 측정되었다. 반면 분자접합 표면처리의 경우 접합 계면 전반에 걸쳐 연속적이고 균일한 접합이 형성된 것을 확인할 수 있었으며, 뚜렷한 계면 박리나 미접합 영역은 관찰되지 않았다. 또한 접합 강도 평가 결과 높은 수준의 접합 강도를 확보함으로써, 분자접합처리를 적용한 (111) 배향 구리 표면이 저온 Cu-Cu 접합을 효과적으로 지원할 수 있음을 확인하였다. 본 연구 결과는 결정학적 표면 제어와 분자접합처리를 결합한 접근법이 저온 하이브리드 Cu-Cu 접합 공정의 실현 가능성을 확장할 수 있음을 시사한다.

참고문헌(References)

1. H. C. Liu, et al., Mater. Charact. 192, 112085 (2022).
2. W. Liu, H. Wang, K. S. Huang, C. M. Wang, and A. T. Wu, J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 125, 394 (2021).
3. X. Zhan, et al., Electrochim. Acta 365, 137391 (2021).
4. Z. Otgonbayar, et al., IEEE Access 13, 117831 (2025).
5. S. Kim, et al., Proc. Electron. Components Technol. Conf., 636 (2019).
6. Z. J. Hong, et al., Appl. Surf. Sci. 592, 153243 (2022).
7. H. W. Hu and K. N. Chen, Microelectron. Reliab. 129, 114412 (2021).
8. B. Rebhan, G. Hesser, J. Duchoslav, V. Dragoi, M. Wimplinger, and K. Hingerl, ECS Trans. 50(7), 139 (2013).
9. A. K. Panigrahy and K. N. Chen, J. Mech. Des. 140, 020801 (2018).
10. C. H. Tseng, K. N. Tu, and C. Chen, Sci. Rep. 8, 28812 (2018).



## [학상4-1 | 14:55]

Al-Si-Mg-Fe-Mn계 주조합금의 갈바닉 부식 예측을 위한 미세조직 단위 전기화학 전위 매핑: 김도현<sup>1</sup>, 장형욱<sup>1</sup>, 김동욱<sup>1</sup>, 이효종<sup>2</sup>, 김정환<sup>3</sup>, 차필령(책임저자)<sup>1\*</sup>; <sup>1</sup>국민대학교 신소재공학부, <sup>2</sup>㈜이켄코아, <sup>3</sup>동아대학교 신소재공학과

Keywords: Galvanic corrosion, Electrochemical potential, Phase-field Model, EDS, Al alloy

## 1. 연구 배경 및 목적

Al-Si-Mg-Fe-Mn계 주조 합금(A356, Silafont 등)은 우수한 주조성과 경량성으로 자동차 산업에서 핵심 소재로 활용되고 있으나, 응고 과정에서 형성되는 제2상으로 인한 미세 갈바닉 부식이 심각한 문제이다.  $\beta$ -Al<sub>3</sub>FeSi,  $\pi$ -AlFeSiMg 등의 금속간화합물(IMC)과 Si 입자는  $\alpha$ -Al 기지에 비해 높은(귀한) 전기화학 전위를 가지며, 국부 음극으로 작용하여 주변  $\alpha$ -Al의 우선 용해 및 조기 파단을 유발한다[1,2]. 따라서 미세조직 내 국부 전위 분포를 정확히 예측하고 상 간 전위차를 최소화하는 것이 고내식성 합금 설계에 필수적이다. 기존 연구들은 밀도범함수이론(DFT) 계산 또는 SKPFM 측정을 사용하였으나[1,3], DFT는 이상적인 화학양론 구조에 국한되어 실제 고용체를 다루기 어렵고, SKPFM은 느린 스캔 속도로 인해 대면적 평가에 부적절하다. 본 연구는 두 가지 상보적 접근법—(1) Phase-field model(PFM) 시뮬레이션 기반 전위 예측, (2) EDS 조성 맵 기반 국부 전위 계산—을 제시한다. 두 방법 모두 Calphad 기반 열역학 DB와 Modified Born-Haber Cycle[3]을 결합하여 임의 조성의  $\alpha$ -Al 고용체 및 IMC의 전기화학 전위를 신속하게(< 3분) 계산 및 매핑한다. 계산된 상 간 전위차 및 공간 분포는 KPFM, SECM 실험과 비교하여 검증하였으며, 이를 통해 미세조직 단위의 범용적인 부식성 평가 도구를 구현하고자 했다. 그림 1)은 전체 과정을 나타낸다.

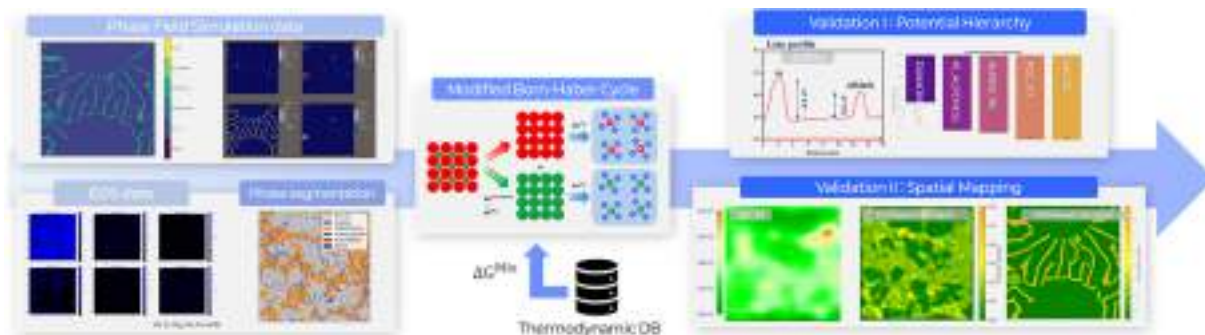


**Fig. 1.** 전기화학 전위 계산 및 검증 워크플로우. (좌) 입력 데이터: PFM 시뮬레이션(상 분포 및 조성 정보) 또는 EDS 맵 (조성 정보 및 조성 기반 상 분류). (중앙) CALPHAD 열역학 DB 기반 Modified Born-Haber Cycle 전위 계산. (우) 1. 계산된 상별 전위 vs KPFM 상대 전위 순서 확인. 2. SECM 전류 분포와 전위 분포 비교의 공간적 상관관계 분석

## 2. 연구 방법

## 2.1 데이터 획득 및 상 분류

Silafont-As cast 합금(Al-10.9Si-0.4Mg-0.3Mn-0.05Fe wt%)에 대해 에너지분산형 X선 분광기(EDS)를 이용한 원소 분포 데이터와 Phase Field 주조 시뮬레이션을 통해 원소 분포 및 상 데이터를 확보하였다. 열역학 DB 사용을 위해 EDS 데이터의 경우 평형 조성도와 EDS의 interaction volume을 고려해 조성 조건을 설정하여 상 분류를 진행하였다.

## 2.2 전기화학전위 계산

상 정보를 바탕으로 Pycalphad와 Al2022[4] 열역학 데이터베이스를 이용하여 각 픽셀의 혼합 자유에너지( $\Delta G^{mix}$ )를 계산하였다. 전기화학전위는 Modified Born-Haber Cycle[3] 식( $\Delta G^{Tot} = \Delta G^{Formation} + \Delta G^{mix} + \sum_i^N M_i \Delta G_i^{Tot}$ )을 적용하여 계산되었고, 계산된 총 자유에너지 변화는 식( $\Delta G^{Tot} = -nFE$ )을 통해 표준수소전극(SHE) 기준 표준전극전위(SEP)로 변환되었다.

## 3. 결과 및 검증

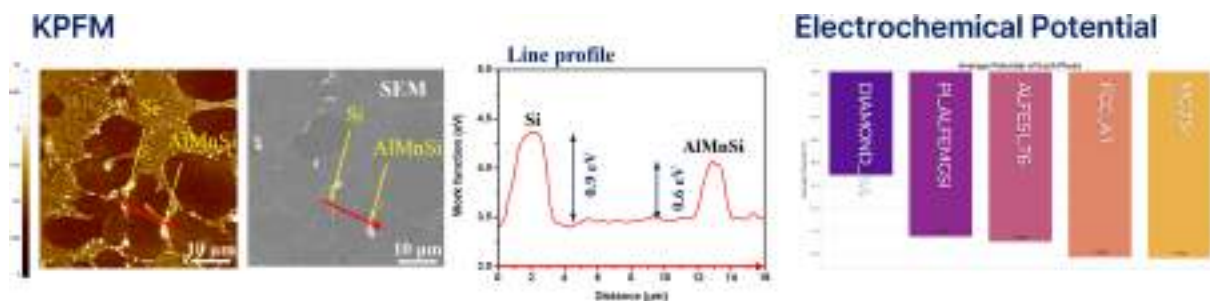


**Fig. 2.** (좌) Silafont-As cast 합금의 KPFM 이미지 및 SEM 미세조직. (중앙) Line profile에서 측정된 상별 일함수(Al: 3.4 eV, AlMnSi: 4.0 eV, Si: 4.3 eV). (우) 계산된 전기화학전위 분포.

그림 2)는 KPFM으로 측정된 일함수와 계산된 상별 전기화학전위의 비교를 나타낸다. Line profile 분석 결과, 일함수는  $\text{Al}(3.4 \text{ eV}) < \text{AlMnSi}(4.0 \text{ eV}) < \text{Si}(4.3 \text{ eV})$  순으로 측정되었으며, 이는 계산된 전위 순서  $\text{Al}(-1.63\text{V}) < \text{ALFESI}(-1.49\text{V}) < \text{Si}(-0.90\text{V})$  와 일치한다. 특히  $\alpha\text{-Al}$  기지(FCC Al1)가 가장 낮은 전위를 가져 우선 용해되는 양극임을 확인하였다. 본 결과는 전위 계산 방법론이 실제 미세조직 내 상 간 갈바닉 부식 구동력의 상대적 크기를 예측할 수 있음을 보여준다.

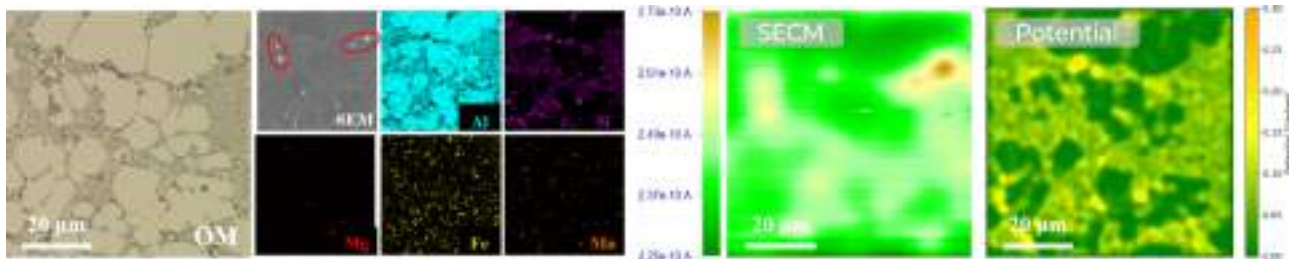


**Fig. 3.** 미세조직 단위 전위 분포의 공간 검증.(좌) Silafont-As cast 합금의 OM 이미지(빨간 원은 금속간화합물을 나타냄), SEM 미세조직 및 EDS 원소 맵 (Al, Si, Mg, Fe, Mn). (중앙) SECM으로 측정된 국부 전류 밀도 맵. (우) EDS 조성 기반 계산 전위 맵.

그림 3)은 계산된 전위 맵과 SECM 전류 맵의 공간적 상관관계를 보여준다. Al-Si 공정조직 영역에서 SECM 전류 분포와 전위 분포가 전반적으로 일치하나, IMC 주변의 국부 고전류 영역은 전위맵에서 약하게 나타났다. 이는 Si 원소의 낮은 전위로 인해 부식 기여도가 과대평가되고, EDS 장비의 interaction volume으로 인해 OM에서 관찰되는 미세 IMC가 조성 맵에서 뚜렷하게 분리되지 않아 IMC의 영향이 과소평가된 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 미세조직 내 부식 전류 분포 경향성은 계산과 일치하여, 본 전기화학전위 계산 방법론이 조성 및 상 정보를 기반으로 미세조직 단위에서 갈바닉 부식 위험 영역 예측에 활용될 수 있음을 확인했다.

#### 참고문헌(References)

1. R. Arrabal, B. Mingo, A. Pardo, M. Mohedano, E. Matykina, and I. Rodríguez, "Pitting corrosion of rheocast A356 aluminium alloy in 3.5 wt.% NaCl solution," *Corros. Sci.* 73, 342-355 (2013).
2. Z. Szklarska-Smialowska, "Pitting corrosion of aluminum," *Corros. Sci.* 41, 1743-1767 (1999).
3. 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, P.R. Cha, "Computational design of Mg alloys with minimal galvanic corrosion," *Journal of Magnesium and Alloys*, Vol. 10, pp. 1972-1980 (2022).
4. B. J. Lee, AL2022.tdb: unpublished work (2022).

#### [학생4-2 | 15:10]

**기계학습을 위한 7xxx계 알루미늄 합금 조합데이터셋 구축:** 이경환, 전서연, 천재은, 조기섭, 최현주\*; 국민대학교 신소재공학부

**Keywords:** 7xxx계 알루미늄 합금, 기계학습, 기계적 물성

Al-Zn-Mg-Cu계 7xxx계 알루미늄 합금은 석출강화에 의해 높은 강도와 우수한 기계적 특성을 나타내며, 항공우주 및 수송기기용 구조재료로 널리 활용되고 있다. 이러한 합금의 기계적 물성은 합금 조성뿐만 아니라 인공 시효 온도 및 시간에 따라 형성되는 석출상의 종류, 크기 및 분포에 의해 크게 좌우된다[1]. 그러나, 7xxx계 합금은 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 실험 데이터의 품질과 범위에 크게 의존한다[2]. 특히, 문헌 기반 데이터의 경우 실험 환경의 불일치로 인해 신뢰성 확보에 한계가 있다[3]. 이에 본 연구에서는 실제 실험을 기반으로 7xxx계 알루미늄 합금의 조성 및 열처리 조건을 체계적으로 변화시키고, 기계학습에 활용 가능한 조합데이터셋을 구축하고자 하였다.

초기 실험 단계에서는 Taguchi 실험계획법을 이용하여 Zn, Mg, Cu 조성을 주요 변수로 설정하였고, 인공 시효 온도(100, 120, 140, 160 °C)와 시효 시간(0~20 h, 2시간 간격)을 다변화시켜 총 280건의 초기 실험 데이터를 확보하였다. 모든 시편은 주조 공정을 통해 제작한 후 균질화 처리(460 °C, 48 h), 냉간 압연(80% reduction), 용체화 처리(470 °C, 2 h) 및 인공 시효 공정을 거쳐 제조하였다. 초기 실험 데이터 280건을 SSAE 전처리를 통해 고차원 입력을 물성범주 분리도가 높은 저차원 임베딩으로 변환한 후, GPR 기반 능동학습의 입력으로 활용하였다. 능동학습 후 1차 Query 실험 조건을 도출하여 212 HV의 높은 경도값을 보였으나, 냉간 압연 공정 중 시편 파단으로 인하여 2차 쿼리부터는 용질 원자 총합을 13 wt.%로 제한하여 도출하였다. 이후 Taguchi 실험계획법으로 결정립 미세화를 통한 물성 향상을 목적으로 Ti 및 Zr 미량 첨가 조건을 추가하여 11건의 조건에서 얻은 실험 데이터와 2차, 3차, 4차 Query 조성의 인공 시효 다변화 실험 데이터를 반영하여 학습하였다. 또한, peak aging 현상이 관찰되지 않은 시편에 한해 시간 범위를 24 h에서 최대 120 h까지 확장하여 peak aging 거동을 정밀하게 분석하였다. 이 과정에서 확보된 데이터도 능동학습에 반영하여 물성 예측 정확도를 개선하였다. 이러한 반복적인 학습-실험 과정을 통해 총 597건의 기본 조합 실험 데이터베이스를 구축하였고, 데이터베이스를 기반으로 기계학습을 진행하여 5차 Query에서 최고 경도 특성을 보일 것으로 예상되는 조건 10건을 도출하여 표 1에 나타냈다.



**Table 1.** 5차 Query 실험조건 및 예측 비커스 경도

|    | Sample (wt.%) |     |     |      |      | 온도 (°C) | 시간 (h) | 예측 경도(HV) |
|----|---------------|-----|-----|------|------|---------|--------|-----------|
|    | Zn            | Mg  | Cu  | Zr   | Ti   |         |        |           |
| 1  | 6.5           | 3.6 | 0.4 | 0.04 | 0.24 | 140     | 18     | 199.289   |
| 2  | 7.0           | 2.6 | 1.8 | 0.24 | 0.36 | 120     | 18     | 195.588   |
| 3  | 7.5           | 1.6 | 2.0 | 0.28 | 0.15 | 120     | 18     | 194.148   |
| 4  | 6.0           | 4.6 | 1.8 | 0.32 | 0.09 | 100     | 6      | 192.535   |
| 5  | 6.0           | 3.0 | 0.6 | 0.12 | 0.27 | 140     | 20     | 191.376   |
| 6  | 6.5           | 4.6 | 0.2 | 0.24 | 0.03 | 120     | 12     | 191.596   |
| 7  | 6.5           | 1.6 | 2.0 | 0.12 | 0.06 | 120     | 12     | 190.539   |
| 8  | 8.5           | 2.2 | 1.2 | 0.2  | 0.27 | 120     | 8      | 189.913   |
| 9  | 5.5           | 4.6 | 2.2 | 0.32 | 0.15 | 120     | 18     | 189.922   |
| 10 | 8.5           | 1.4 | 2.4 | 0.12 | 0.42 | 140     | 10     | 189.977   |

이후 추가적인 검증 실험을 포함하여 최종적으로 673건의 실험 데이터로 구성된 조합데이터셋을 확보하였다. 기계적 물성 평가는 신속한 데이터 축적을 위해 비커스 경도 시험을 통해 수행하였으며, Query 상위 경도 시편 5건에 대해서는 주사전자현미경(SEM), X선 회절 분석(XRD), 전자후방산란회절(EBSD)을 이용하여 미세조직 및 결정립 특성을 분석하였다. 또한, 투과전자현미경(TEM)을 이용하여 나노 스케일 석출상의 형태 및 분포를 분석하였다.

조합 실험 결과, 용질 원자 함량 증가에 따라 경도가 증가하는 경향이 관찰되었으며, Zn/Mg 비율 1.5 내외, Cu는 0.2~0.8 wt.% 범위에서 상대적으로 높은 경도 값을 나타낸 결과를 그림 1(a)에 나타냈다. 5차 Query 중 비커스 경도 예측값과 실험 결과가 유사한 조성 3건의 인공 시효 다변화 실험 결과를 그림 1(b)에 나타냈다. 실험 결과에서 200 HV 이상의 높은 비커스 경도를 확보하였다. 표 2에 Query 상위 경도 시편 5건의 조성과 열처리 조건, 실제 비커스 경도를 나타냈다.

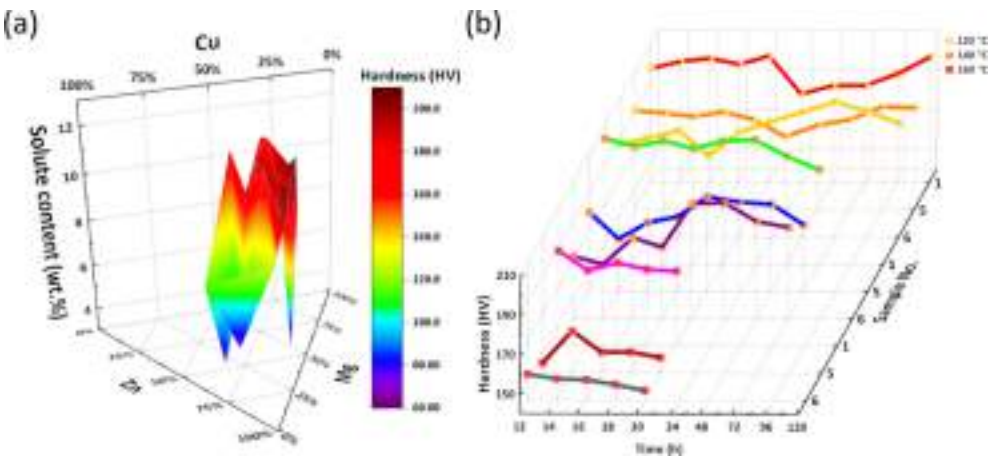


**Fig. 1.** (a) 조성 변화에 따른 실험 데이터 673건, (b) 5차 Query 열처리 조건 다변화 실험 비커스 경도

**Table 2.** Query 상위 경도 5건의 조성, 열처리 조건 및 비커스 경도

|    | Sample (wt.%) |     |     |      |      | 온도 (°C) | 시간 (h) | 경도 (HV) |
|----|---------------|-----|-----|------|------|---------|--------|---------|
|    | Zn            | Mg  | Cu  | Zr   | Ti   |         |        |         |
| A1 | 6.5           | 4.6 | 0.2 | 0.24 | 0.03 | 120     | 72     | 208.06  |
| A2 | 5             | 4.8 | 0.4 | 0    | 0    | 120     | 96     | 203.93  |
| A3 | 6.5           | 3.6 | 0.4 | 0.04 | 0.24 | 120     | 20     | 203.83  |
| A4 | 6.5           | 3.6 | 0.4 | 0.04 | 0.24 | 120     | 120    | 203.43  |
| A5 | 6.5           | 4.6 | 0.2 | 0.24 | 0.03 | 120     | 96     | 203.43  |

그림 2는 Query 상위 경도 시편 5건의 EBSD 분석 결과이다. EBSD 분석 결과, Zr이 첨가된 조성에서는 재결정이 억제되어 duplex 구조의 결정립이 형성되었으며, 미첨가 조성에서는 상대적으로 등방성 결정립이 관찰되었다. 그러나 표 2와 그림 2를 비교하였을 때, 결정립 크기와 경도 간의 직접적인 상관관계는 제한적인 것으로 나타났다.

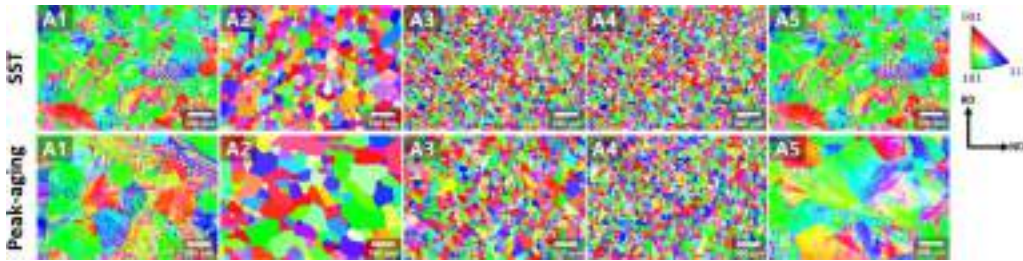


Fig. 2. Query 상위 경도 5건 IPF map 이미지

본 연구에서는 기계학습을 활용하여 7xxx계 알루미늄 합금의 조성 및 열처리 조건을 체계적으로 탐색하고, 총 673건의 실험 데이터를 기반으로 한 조합데이터셋을 구축하였다. 이를 통해 높은 기계적 물성을 나타내는 Query 조건을 도출하였으며, SEM, EBSD, 및 TEM 분석을 통해 미세조직과 기계적 물성 간의 상관관계를 고찰하였다. 본 연구에서 구축된 실험 기반 조합데이터셋은 향후 기계학습 기반 고성능 알루미늄 합금 설계를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌(References)

1. Y. H. Jo, H. J. Jung, S. Jeon, H. Choi, H.-W. Kim, H. Sung, "The effect of Zn content on tensile properties and fracture toughness of Al-Zn-Mg-Cu alloy", JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH AND TECHNOLOGY, Vol. 36, May-June 2025, pp. 5696-5706.
2. S. An, J. Han, S. Jeon, D. Kim, J. B. Seol, H. Choi, "Development of Aluminum Alloys for Additive Manufacturing Using Machine Learning", Journal of Powder Materials, Vol. 32, No. 3, 2025, pp. 202-211.
3. Z. Xu, M. A. McDowell, M. A. Ziatdinov, C. Kim, L. Ward, J. Ling, "Small data machine learning in materials science", NPJ COMPUTATIONAL MATERIALS, Vol. 9, 2023, Article No. 84.

#### [학생4-3]

**니켈 도금 배터리 케이스의 공식 저항성 평가 및 예측 모델 개발:** 이정민<sup>1</sup>, 권완건<sup>1</sup>, 송기안<sup>1</sup>, 이지운<sup>1</sup>, 홍순직<sup>1,2</sup>, 문종언<sup>1,2,\*</sup>; <sup>1</sup>국립공주대학교 신소재공학부, <sup>2</sup>첨단분말소재부품센터(CAMP2)

**Keywords:** 니켈도금강, 전기화학적 부식, 공식, 미세조직, 모델링

친환경 모빌리티 시장의 급격한 성장에 따라 핵심 부품인 전기차(EV)용 배터리 케이스의 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 최근 EV 배터리 폭발, 화재 등의 안전 사고로 인해 배터리 케이스 외부에 발생하는 공식(pitting) 및 표면 결함 예방에 대한 중요성이 높아지고 있다. 본 연구에서는 열처리 조건에 따른 담드로잉된 니켈 도금 배터리 케이스의 공식 저항성을 전기화학적으로 평가하고, 공식에 영향을 미치는 도금 두께, 염수 농도, 결정립 크기, 표면 잔류응력, 집합조직 등의 미세조직적 인자를 다각도로 분석하여 니켈 도금강의 공식 저항성 예측 모델을 개발하였다.

본 연구에서 사용한 배터리 케이스는 니켈 도금강의 담드로잉 가공 이후 연속어닐링공정 두 가지 조건(CAL-1 및 CAL-2) 및 배치어닐링공정 한 가지 조건(BAF)으로 열처리하여 비교 분석을 수행하였다. 해당 배터리 케이스의 전기화학적 부식 거동 분석을 위해 동전위 분극 실험을 수행하였으며, 3.5 wt%의 NaCl 용액 환경에서 Ag/AgCl 기준전극을 사용하여 실험을 진행하였다. 미세조직 분석을 위해 주사전자현미경(SEM)을 통해 도금 두께 및 도금층과 강재 계면의 화학적 조성을 분석하였으며, SEM-EBSD를 활용하여 도금층과 계면부의 결정립 크기, 상분율, 잔류응력 및 집합조직을 분석하였다.

Fig. 1은 배터리 케이스의 동전위 분극 실험 결과로 부식전위 및 부식전류 측면에서는 배터리 케이스별 큰 차이가 없었으나, CAL-2, BAF, CAL-1 시편 순으로 높은 공식전위를 가졌다.

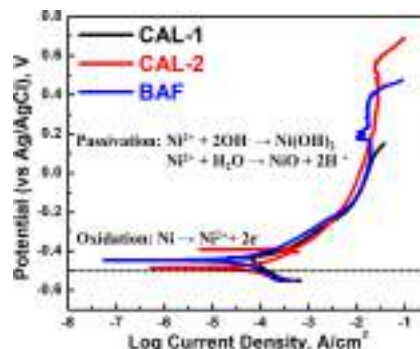


Fig. 1. Potentiodynamic polarization result of the battery cases under different heat treatments.

도금층 두께 측정 결과, 도금층 두께가 증가할수록 공식전위가 증가한다는 것을 확인하였다(그림 2(a)). EBSD를 이용한 미세조직 분석 결과, 상분을 및 미세 결정립 크기는 세 가지 조건의 시편에서 모두 비슷하여 공식저항성에 큰 영향을 끼치지 않았다. 배터리 케이스의 집합조직 분석결과, 높은 공식전위를 나타낸 CAL-2, BAF 조건에서 부식저항성에 유리한 집합조직인 Cube, Goss가 관찰되었다(그림 2(b)).

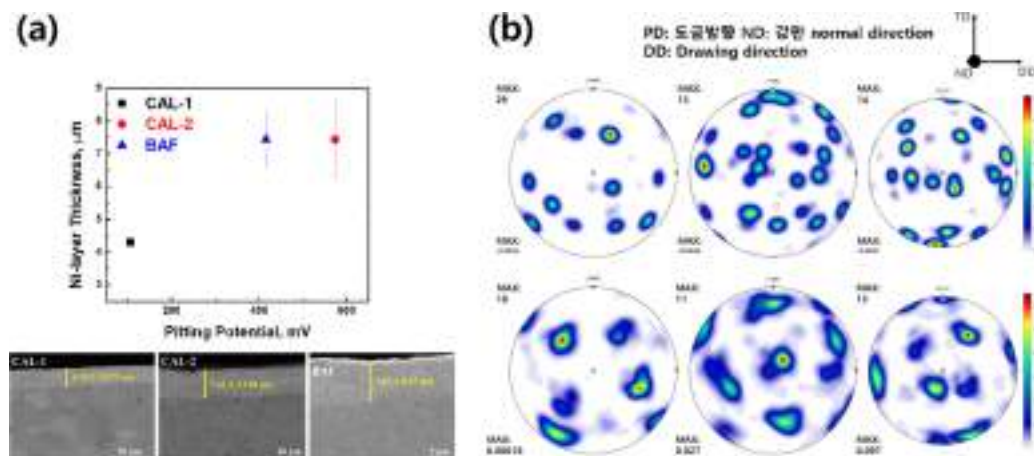


Fig. 2. (a) Pitting potential versus Ni-layer thickness and (b) crystallographic textures of the battery cases.

배터리 케이스 공식저항성에 대한 미세조직학적 영향 인자들을 변수로 공식전위를 예측하기 위해 다중 다항 회귀 분석(Multiple Polynomial Regression, MPR)을 진행하였으며, 예측 모델 함수를 도출하였다. 모델 예측 결과,  $R^2 = 0.9998$ 의 높은 신뢰도로 실험적으로 측정된 공식전위를 예측하는 것을 확인하였다. 모델에 영향을 미치는 변수 중요도(feature importance) 분석 결과, 니켈 도금 배터리 케이스 공식전위에 가장 큰 영향을 끼치는 인자는 도금층의 집합조직 > 염수 농도 > 도금층 두께 순으로 나타나 집합조직이 부식 거동을 결정짓는 가장 지배적인 인자임을 확인하였고, 니켈 도금 배터리 케이스의 내식성을 극대화하기 위해서는 단순한 도금 두께 확보뿐만 아니라 열처리 공정 최적화를 통해 부식에 유리한 집합조직을 형성하는 미세조직 제어가 필수적임을 규명하였다.

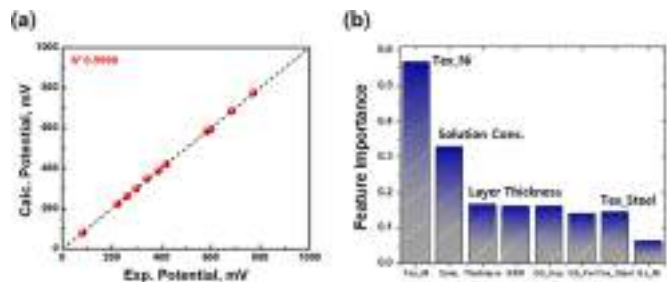


Fig. 3. (a) Pitting potential predicted using the model with respect to the measured pitting potential. (b) Feature importance analysis for the predicted model.

#### 참고문헌(References)

1. H. Jia, X. Feng, and Y. Yang, J. Mater. Sci. Technol. 34, 1229 (2018).
2. Z. Yu, L. Liu, R. Liu, M. Cao, L. Fan, Y. Li, S. Geng, and F. Wang, Materials 12, 1503 (2019).
3. S. Gunaselvi, P. Satheshkumar, and M. Jegannathan, J. New Mater. Electrochem. Syst., 23, 112-122 (2020)
4. M. D. Asaduzzaman, C. M. Mustafa, and M. Islam, Chem. Ind. Chem. Eng. Q., 17, 477-483 (2011)
5. A. Abbasi Aghuy, M. Zakeri, M. H. Moayed, and M. Mazinani, Corros. Sci., 94, 368-376 (2015).
6. A. Yazdanpanah, F. R. Biglari, and M. Dabalà, Mater. Sci. Technol., 56 (1) (2021).

#### [학생4-4 | 15:40]

통계적·기하학적 회도 분석 지표 기반의 고풍택 성형품 표면 결함 탐지용 조명 광학계 최적화 연구: 유경호, 김도현, 박현일, 석무영, 이 동준, 권용남, 최현성<sup>1\*</sup>; <sup>1</sup>한국재료연구원

Keywords: 머신비전, 고풍택 성형품 표면 결함, 최적 조명시스템, One stage detector, YOLO

제조 산업의 디지털 전환과 함께 AI 비전 검사는 품질 일관성 확보를 위한 핵심 기술로 자리 잡았으나, 고풍택 성형품은 복잡한 반사 특성으로 인해 기존 육안 검사를 완전히 대체하는 데 한계가 있다. 본 연구는 알고리즘 중심의 사후 보정 방식에서 벗어나, 조명 조건에 따른 결함 시인성을 정량화하고 최적의 물리적 전처리 환경을 구축하는 방법론을 제안한다. 이미지 차분 기반의 CNR



정량화와 3D 표면 프로파일 분석을 통해 데이터 취득 단계에서 조명 강건성을 확보함으로써, 모델의 불확실성을 선제적으로 제거하고 현장의 육안 검사 의존도를 최소화하는 데 의의를 둔다. 고풍택 성형품의 결함 탐지 성능을 검증하기 위해 헤어라인 마감에 적용된 SUS 소재 식기세척기 Door 부품을 대상으로 적합 결함을 분석하였다. 표면 반사 특성에 따른 시인성 변화를 평가하기 위해 세가지 프로세스를 수행하였다. 첫째, 세 가지 조명 패턴을 설계하고, 각 패턴에서 광원을 360° 회전시켜 8장의 이미지를 취득하였다(Fig. 1). 여기에 7종의 광원 색상과 13단계 노출값을 조합하여 총 2184장의 광학 시나리오 데이터를 구축함으로써, 다양한 환경 변화에 대한 조명 강건성을 확보하고자 하였다.

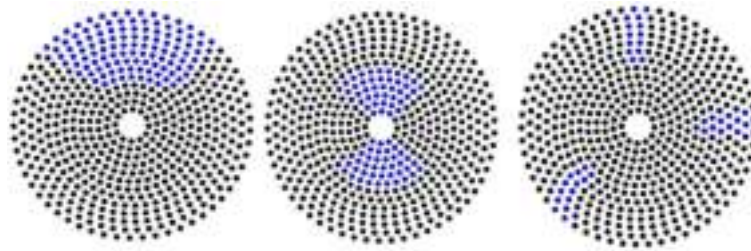


Fig. 1. 좌측부터 패턴 1. 패턴 2. 패턴 3으로 명칭

둘째, 최적의 조명 조합을 객관적으로 평가하기 위해 정량 지표로 CNR(Contrast to Noise Ratio)을 도입하였다. CNR은 배경 대비 결함의 변별력을 수치화하는 지표로, 결함 영역과 배경 영역의 통계적 차이를 통해 시인성을 평가한다. 이를 위해 동일 위치에서 취득한 정상 및 결함 이미지 간의 차분 기법을 적용하고, 임계값 이상의 픽셀 밝기 변화 영역을 결함으로 정의하여 마스킹하였다. Fig. 2는 차분 결과를 기반으로 비결함 영역(초록색)과 결함 영역(빨간색)을 분리한 예이다.

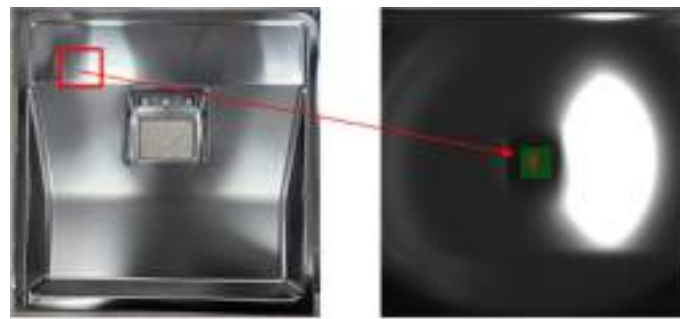


Fig. 2. 이미지 차분 기반 결함 Pixel 및 배경 Pixel 그룹화

각 영역에서 10,000개의 픽셀을 무작위 추출하여 정규분포 가정을 만족시킨 후, 평균과 표준편차( $\mu$ ,  $\sigma$ )를 이용해 식 (1)과 같이 CNR을 산출하였다. 산출된 CNR 값이 클수록 배경 대비 결함의 대비가 명확함을 의미하며, 이는 고시인성 학습 데이터의 판단 기준으로 활용된다.

$$CNR = \frac{|\mu_{\text{defect}} - \mu_{\text{background}}|}{\sqrt{\sigma_{\text{defect}}^2 + \sigma_{\text{background}}^2}} \quad (10)$$

Fig. 3은 노출 시간 및 조명 패턴 변화에 따른 결함·배경 픽셀 분포를 커널 밀도 추정으로 시각화한 결과로, 두 분포 간 중첩이 최소화될수록 시인성이 향상됨을 확인하였다. 또한 Welch's T-test( $\alpha=0.05$ )를 통해 두 그룹 간 평균 차이의 통계적 유의성을 검증하였으며, 광원 색상과 노출 조건별 CNR 분석 결과는 Table 1에 제시하였다.

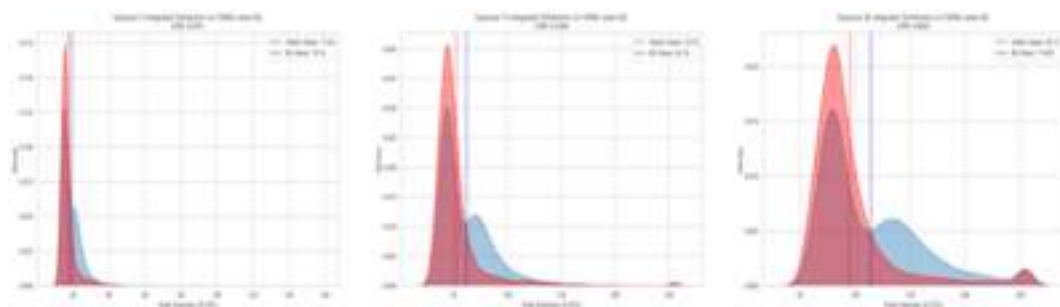


Fig. 3. 조명 조건에 따른 결함 및 배경 픽셀 밝기의 분포 결과

**Table 1.** 1번 조명 패턴에 대한 각 변수 적용 시 CNR 값 비교

| 색상 \ 노출 조건 | 3 ms   | 15 ms  | 30 ms  | 평균     |
|------------|--------|--------|--------|--------|
| Blue       | 0.2953 | 0.3014 | 0.3357 | 0.3108 |
| Red        | 0.2725 | 0.2836 | 0.2865 | 0.2809 |
| Green      | 0.2670 | 0.2867 | 0.2969 | 0.2835 |
| Magenta    | 0.2986 | 0.3158 | 0.3688 | 0.3277 |
| Yellow     | 0.2901 | 0.2960 | 0.3384 | 0.3082 |
| Cyan       | 0.3033 | 0.3205 | 0.3760 | 0.3333 |
| White      | 0.2951 | 0.3384 | 0.4065 | 0.3467 |
| 평균         | 0.2888 | 0.3061 | 0.3441 | -      |

마지막으로, CNR 기반 지표의 유효성을 기하학적으로 검증하기 위해 결함 영역에 대한 3차원 표면 분석을 수행하였다. CNR이 결함과 배경의 전반적인 분리도를 나타내는 통계적 지표라면, Peak-to-Valley(P-V) 지표는 결함 경계면에서의 휘도 변화량을 정량화하여 조명 조건별 엣지 보존 특성을 평가하는 척도로 활용된다. 이를 위해 결함 영역 주변에 설정한 윈도우 내 픽셀 강도를 3차원 공간으로 매핑하였다. Fig. 4는 각각 1번과 2번 조명 패턴에서 취득한 이미지의 P-V 수치와 Gradient 분포를 시각화한 결과로, 특정 조명 조건에서 결함 경계가 더욱 선명하게 보존됨을 확인하였다. 이는 사후 알고리즘에 의존하는 블랙박스형 접근과 달리, 하드웨어 수준에서 시스템 추론의 안정성을 확보했음을 의미한다. 결과적으로 자원 효율과 검출 성능을 동시에 만족하는 최적 환경을 구축하였으며, 결함 판단 근거를 물리적인 지표로 제시함으로써 설명 가능한 AI의 실질적 기반을 마련하였다.

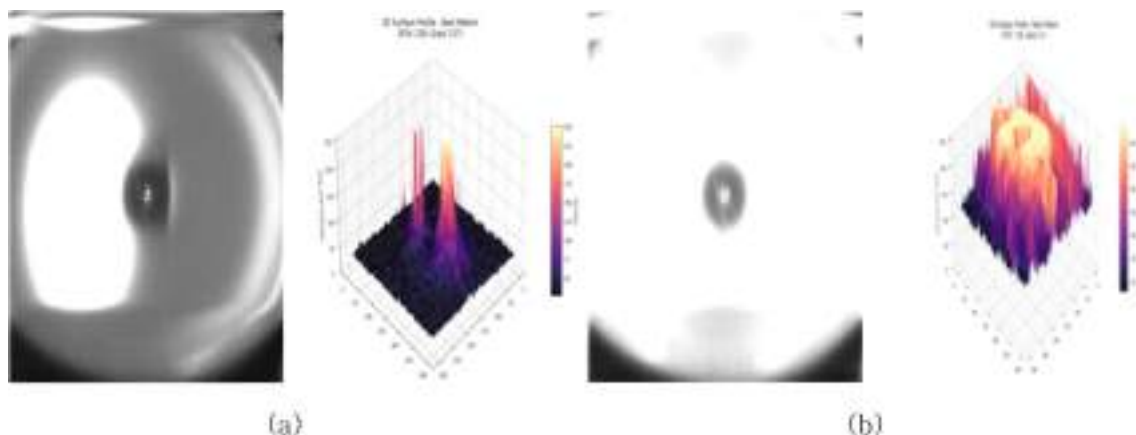


**Fig. 4.** (a) 1번 조명 패턴 적용 시의 픽셀 강도를 3차원 공간으로 시각화 (b) 2번 조명 패턴을 적용 시의 픽셀 강도를 3차원 공간으로 시각화

광학 조건 최적화를 통해 확보된 고품질 원천 데이터의 효용성을 검증하기 위해, 특화된 딥러닝 아키텍처와 성능 평가 체계를 구축하고 있다. 제조 공정의 사이클 타임 내 정밀 판정을 위해 후보 영역 추출과 분류를 병렬 수행하는 One-stage Detector를 채택하였으며, 고광택 표면의 미세 결함을 효과적으로 학습하면서 실시간 추론 성능을 확보하고자 최신 YOLO 계열을 베이스라인으로 선정하였다. 또한 공정 특성에 맞춰 백본의 컨볼루션 블록을 재설계하고, 다중 스케일 Feature map 융합을 위한 넥-헤드 구조를 경량화 및 고도화하여 파라미터 효율을 극대화할 계획이다. 성능 평가는 객체 탐지 표준 지표인 mAP과 함께, 산업 현장의 품질 신뢰도를 반영하는 F1-Score를 핵심 지표로 설정하고, 양산 환경에서의 운영 효율 분석을 위해 FPS를 병행 측정한다. 이를 통해 하드웨어 기반 데이터 최적화와 커스터마이징된 딥러닝 모델이 결합된 하이브리드 전략으로, 검출 성능과 운영 안정성이 동시에 향상된 통합 시스템을 제시하고자 한다.

#### 참고문헌(References)

1. Timischl, F. "The contrast-to-noise ratio for image quality evaluation in scanning electron microscopy." *Scanning* 37.1 (2015): 54-62.
2. Zhang, Laomo, et al. "Steel surface defect detection algorithm based on improved YOLOv10." *Scientific Reports* 15.1 (2025): 32827.

#### [학생4-5]

Life Cycle Assessment-based Optimization of EAF Processes: A Shapley-value Approach to interdependent Process: Jieun Ryu<sup>1</sup>, Yeongrae Cho<sup>1</sup>, Minho Kim<sup>1</sup>, Il Shon(책임저자)<sup>1\*</sup>; <sup>1</sup>Department of Material Science and Engineering, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Republic Korea

**Keywords:** Electric arc furnace, Life cycle assessment, Contribution analysis, Sensitivity analysis





electricity emission factor through increased renewable energy penetration becomes more effective (Figure 1b). At the same time, the large Shapley effect of H<sub>2</sub>-DRI suggests potential system instability, indicating that it should be treated as a critical control point. Although the hydrogen emission factor directly affects only the H<sub>2</sub>-DRI production stage, its system-level impact is comparable to that of the metallization degree, which influences all processes.

By integrating Shapley values into LCA, this study establishes a systematic framework for carbon emission management through the identification of critical emission control points in interdependent EAF systems. The proposed framework is readily extendable to economic analyses, including assessments of carbon tax escalation and variations in the scrap supply chain.

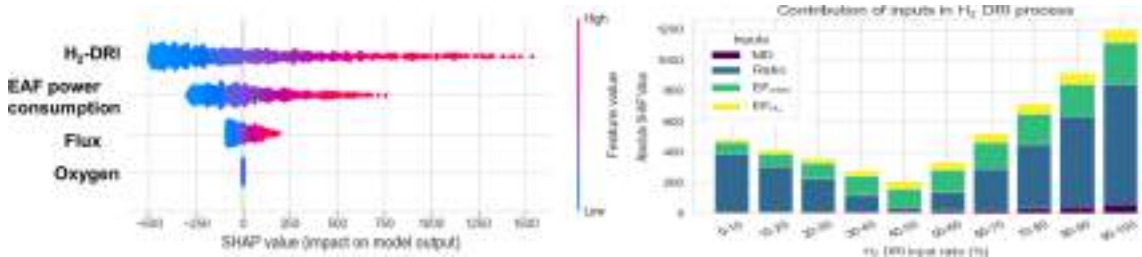


Fig. 2. (a) Process component-wise SHAP values and (b) contribution of inputs within H<sub>2</sub>-DRI by the H<sub>2</sub>-DRI input ratio

Table 1. Absolute SHAP values of inputs and Shapley effects of process components

|                                                     |                    | H <sub>2</sub> DRI | EAF power consumption | Flux  | Oxygen |
|-----------------------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-------|--------|
| Absolute SHAP value<br>(kgCO <sub>2eq</sub> /toncs) | MD                 | 23.28              | 17.97                 | 4.69  | 0.00   |
|                                                     | ratio              | 321.45             | 106.63                | 54.10 | 0.04   |
|                                                     | EF <sub>elec</sub> | 149.00             | 139.11                | 8.64  | 0.06   |
|                                                     | EF <sub>H2</sub>   | 48.92              | 0.00                  | 0.00  | 0.00   |
| Shapely effect                                      |                    | 0.63               | 0.29                  | 0.08  | 0      |

참고문헌(References)

1. B. Iooss and C. Prieur, Shapley effects for sensitivity analysis with correlated inputs: comparisons with Sobol' indices, numerical estimation and applications, *International Journal for Uncertainty Quantification* 9(5), 493–514 (2019).

2. Y. N. Toulouevski and I. Y. Zinurov, *Innovation in Electric Arc Furnaces*, Springer, Berlin (2010).

3. S. Jackson, M. Iacuzzi, and A. Pujadas, “EAF Energy Optimization at Nucor-Yamato Steel,” in *Proceedings of the 35° Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais e 5° Seminário de Fundição*, pp. 33–44, Salvador, Brazil (2004).

4. W. Wei, P. Larrey-Lassalle, T. Faure, N. Dumoulin, P. Roux, and J.-D. Mathias, How to Conduct a Proper Sensitivity Analysis in Life Cycle Assessment: Taking into Account Correlations within LCI Data and Interactions within the LCA Calculation Model, (2014).

5. B. Xue, G. Wei, Y. Hou, H. Hu, H. Zhang, R. Zhu, K. Dong, C. Feng, L. Yang, and H. Wang, Comparative Analysis of Process Selection and Carbon Emissions Assessment of Innovative Steelmaking Routes.

6. S. Seetharaman (ed.), *Treatise on Process Metallurgy*, 2nd ed., Elsevier (2014).

7. Building Trustworthy Life Cycle Assessment (LCA) as a Benchmark for Manufacturing Competitiveness, SK AX Insight, <https://www.skax.co.kr/insight/trend/3232> (2025).

Abbreviations

Table 1. Parameters of mass and energy balance

| Energy input  |                                                   | Energy output |                                                                                                 | Material input |                      | Material output |                     |
|---------------|---------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------|-----------------|---------------------|
| $E_{EL}$      | Amount of electrical energy                       | $E_{MET}$     | Enthalpy of liquid steel at tapping temperature                                                 | $\sum M_{MET}$ | Mass of metal charge | $M_{CS}$        | Mass of crude steel |
| $E_{SCR}$     | Enthalpy of metal charge                          | $E_{SL}$      | Enthalpy of final slag                                                                          | $M_{OXT}$      | Mass of oxygen       | $M_{SL}$        | Mass of slag        |
| $\sum E_{LW}$ | Total chemical energy of all exothermic reactions | $\sum E_{LW}$ | Total energy loss from electrical circuit, cooling water, roof panels and bottom of the furnace | $M_{FLUX}$     | Mass of additions    | $M_{DUST}$      | Mass of dust        |
|               |                                                   |               |                                                                                                 |                |                      | $M_{OTH}$       | Mass of exhaust gas |

## [학창4-6 | 16:10]

수소 및 암모니아 환원제에 따른 직접환원철(DRI)의 환원 특성 및 배기가스 거동 분석: 민성구<sup>1,2\*</sup>, 박성진<sup>1</sup>, 임호태<sup>1</sup>, 문태영(책임저자)<sup>1,†</sup>, 서명원<sup>2,‡</sup>;<sup>1</sup>한국에너지기술연구원 청정연료연구실, <sup>2</sup>울시립대학교 환경공학과

Keywords: Bubble Fluidized bed, Direct reduced iron, ammonia reduction, low-carbon steelmaking, Hydrogen carrier

## ① 연구의 목적과 의의

전 세계적인 탄소중립 대응을 위해 철강산업에서는 석탄 기반 고로 공정을 대체할 수소 기반 직접환원철(Direct Reduced Iron, DRI) 기술 도입을 가속화하고 있다 [1]. 특히, 철광석 분광을 전처리 없이 직접 환원할 수 있는 기포 유동층(Bubbling Fluidized Bed) 공정은 철광석을 펠릿화 해야하는 shaft furnace 공정에 비해 경제적이다. 최근 수소의 운송 및 저장 효율 문제를 해결하기 위한 대안으로 암모니아(NH<sub>3</sub>)가 주목받고 있으며, 이를 별도의 분해(Cracking) 과정 없이 환원 공정에 직접 투입하는 기술에 대한 관심이 높아지고 있다 [2]. 그러나 암모니아를 환원제로 직접 사용할 경우, 반응기 내부에서의 열분해 특성과 그에 따른 배기가스 조성 변화, 그리고 최종 DRI 제품의 물리·화학적 특성에 미치는 영향에 대한 연구 데이터는 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서는 기포 유동층 반응기를 활용하여 다양한 운전 조건에서 암모니아 직접 환원 시의 환원 반응 특성 및 배기가스 거동을 분석하고, 이를 기존 수소 환원 공정과 비교 정량화하였다. 또한, DRI의 물리·화학적 특성(환원율, 결정구조, 미세조직 등)을 분석함으로써 제품의 품질을 평가하였다. 이는 향후 암모니아를 직접 환원제로 활용하는 유동층 환원 공정의 설계 및 조업 최적화를 위한 기초 데이터를 제공하는 데 그 의의가 있다.

## ② 연구 방법론 개요

본 연구에서는 내경 5.45 cm, 높이 100 cm 규모의 단일 기포 유동층 반응기 [그림 1]를 활용하여, 호주산 저급 철광석(Total Fe 58.1 wt.%)의 환원 실험을 수행하였다. 실험은 크게 두 가지 관점에서 진행되었는데, 우선 750°C 조건에서 저농도 암모니아(2% NH<sub>3</sub>, Ar balance) 분위기 하의 반응 시간(2, 4, 6 hr)에 따른 기초 환원 거동을 조사하였다. 이어 암모니아의 직접 환원제로서의 효용성을 평가하기 위해 100% NH<sub>3</sub>를 사용하는 암모니아 직접 환원(ADR)과 100% H<sub>2</sub>를 사용하는 수소 직접 환원(HyDR) 실험을 동일한 환경에서 실시하여 환원제에 따른 반응 특성을 비교 분석하였다. 환원 반응 중 발생하는 배기가스(NO, N<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>)는 비분산 적외선 분석기(ND-IR) 및 휴대용 가스 분석기를 통해 실시간으로 모니터링하였으며, 시료의 환원율은 반응 전후의 중량 변화를 바탕으로 산출하였다. 아울러 최종 생성물인 DRI의 물리·화학적 변화를 고찰하기 위해 XRD를 통한 결정상 분석과 SEM-EDX를 이용한 표면 미세구조 및 원소 분포 관찰을 진행하였다.

## ③ 주요 연구 결과

2% NH<sub>3</sub> 분위기에서 배기가스 거동 및 철광석의 환원율은 [그림 2]에 나타내었다. 반응 시간에 비례하여 철광석 환원율이 증가하였으며, 6시간 경과 후 최종 환원율은 82.26%를 달성하였다. 배기가스 분석 결과, 반응 초기 NO 농도가 약 1,000 ppm까지 급격히 상승하였으나, 반응 시작 30분 이후부터는 검출 한계치 이하로 감소하였다. 이는 초기 암모니아의 직접 환원으로 생성된 금속 철(Metallic Fe) 상이 암모니아 분해를 촉진하는 촉매 역할을 수행하여 [3], NH<sub>3</sub>가 NO<sub>x</sub> 대신 H<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>로 완전히 분해되었기 때문으로 판단된다. XRD 분석 결과, 6시간 환원된 시료에서만 금속 철 피크가 관찰되어 위 내용을 뒷받침하였다 [그림 3]. 환원제(NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>) 100% 공급 실험 결과, ADR은 90.52%의 환원율을 달성하여 HyDR(81.32%)을 상회하는 성능을 보였다. 이러한 환원 효율의 증가는 유동층 내 암모니아 분해 반응(2NH<sub>3</sub> → N<sub>2</sub> + 3H<sub>2</sub>)을 통해 발생한 수소 농도 및 기체 유량의 변화가 기체-고체 접촉 효율을 가속화했기 때문으로 판단된다. 두 조건 모두 XRD 분석에서 금속 철 상이 지배적으로 관찰되었으며 [그림 4], 특히 ADR 과정에서 우려되었던 NO<sub>x</sub> 및 N<sub>2</sub>O 배출량은 약 1 ppm 미만으로 매우 낮게 유지되었다. 또한, SEM 분석을 통해 DRI의 미세구조 분석 결과 [그림 5], 암모니아 환원철은 수소 환원철과 뚜렷한 차이 없이 표면 전반에 걸쳐 유사한 다공성 구조(Porous structure)가 발달하였음을 확인하였다. 이는 암모니아 분해 및 환원 반응이 진행됨에 따라 입자 내부의 산소가 이탈하며 형성된 기공 경로가 수소 환원 시와 대등한 수준을 형성되었음을 의미한다. 결과적으로 암모니아는 수소와 유사한 물리·화학적 환원 기작을 유지하면서도 우수한 환원 효율을 제공할수 있음을 입증하였으며, 대기 오염 물질 배출이 없는 친환경 차세대 제철 공정으로서의 높은 가능성을 시사한다.

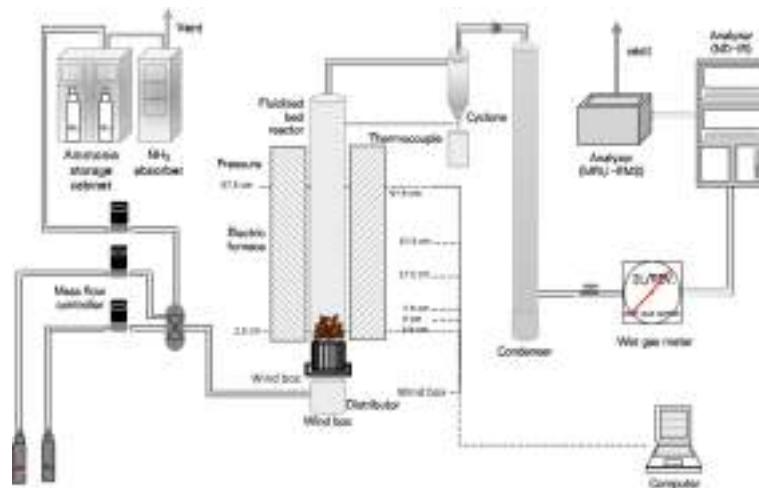


Fig. 1. Lap-scale 기포 유동층 실험 설비 공정도

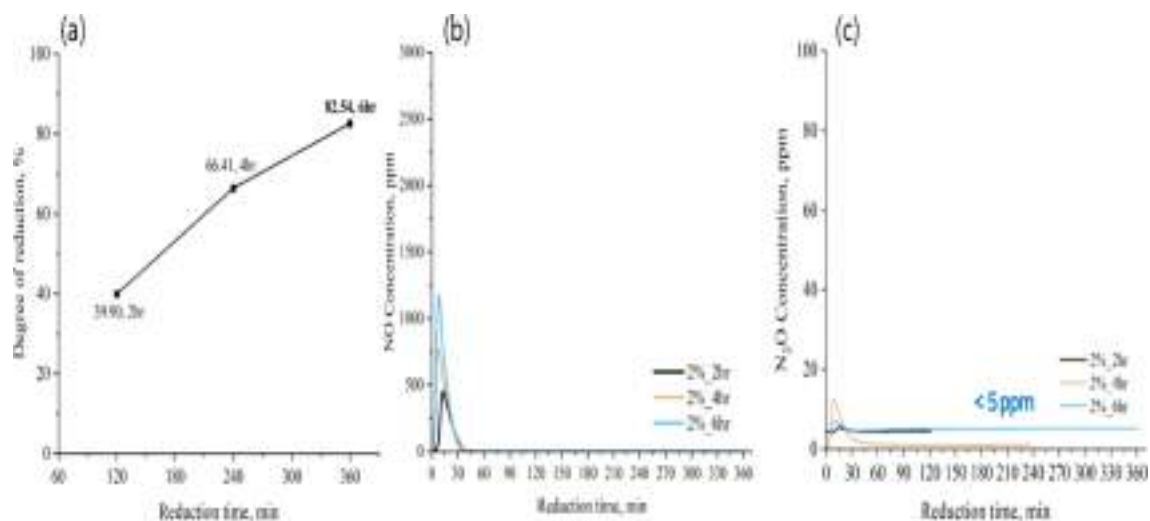


Fig. 2. 암모니아 2% 환원 (a)철광석 환원을 및 배기가스 거동 (b)NO 농도, (c)N<sub>2</sub>O 농도

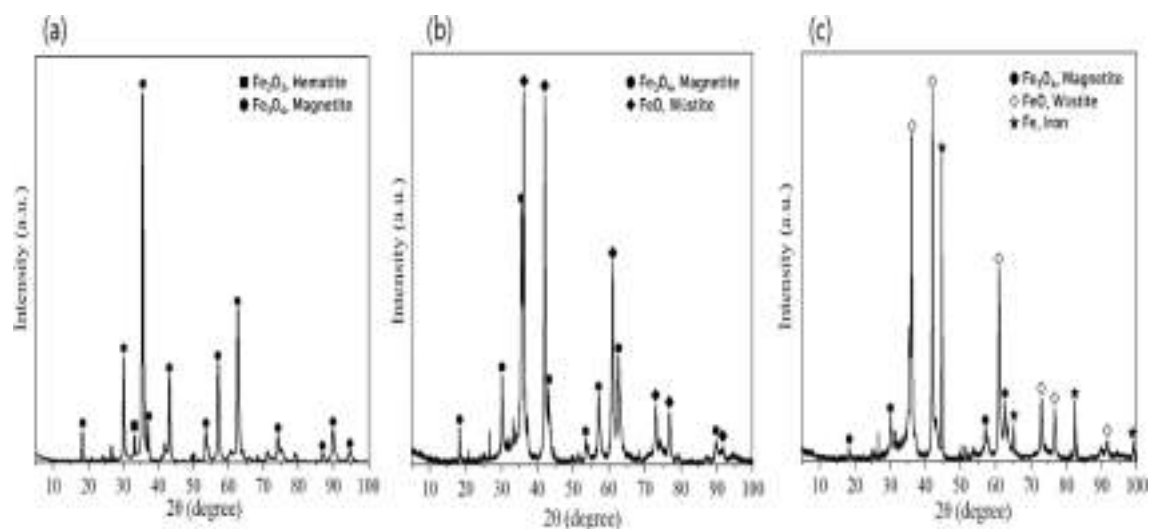


Fig. 3. 암모니아 2% 환원 반응 시간에 따른 XRD 분석 결과 (a)2 시간, (b)4 시간, (c)6시간

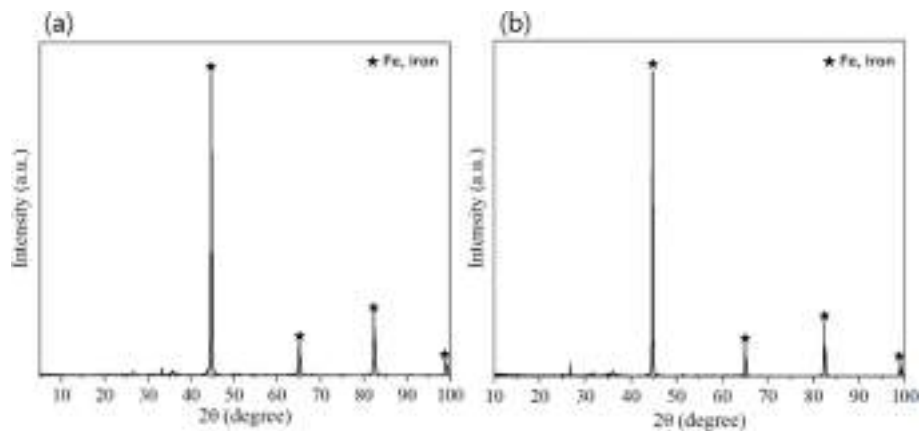


Fig. 4. XRD 분석 결과 (a)암모니아 환원철(ADR-DRI), (b)수소환원철(HyDR-DRI)

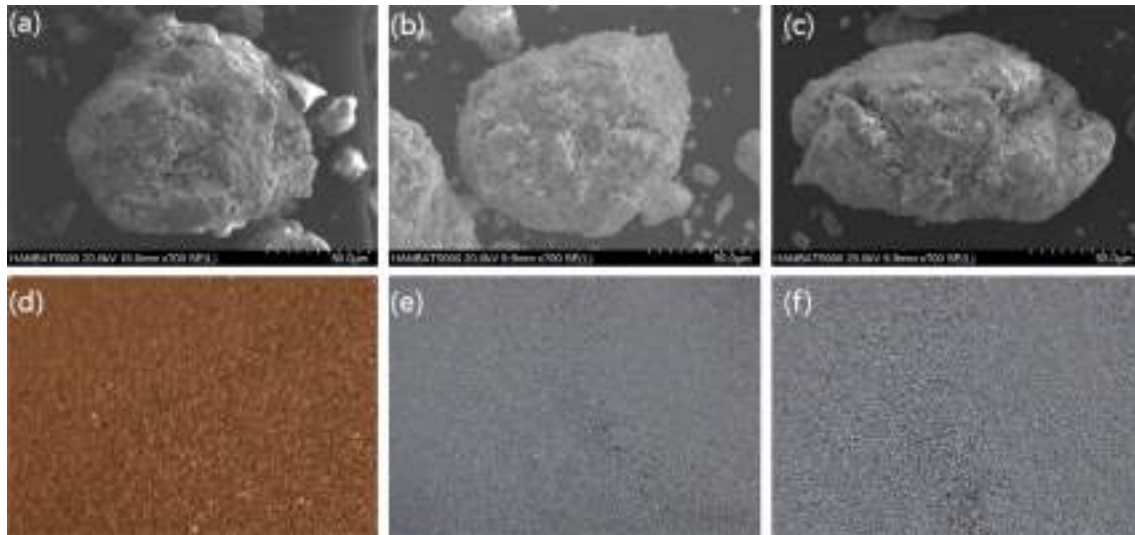


**Fig. 5.** SEM 이미지 (a)철광석 원료(Iron ore), (b)암모니아 환원철(ADR-DRI), (c)수소 환원철(HyDR-DRI) 및 시료 사진 (d)철광석 원료(Iron ore), (e)암모니아 환원철(ADR-DRI), (f)수소 환원철(HyDR-DRI)

#### 참고문헌(References)

1. 온실가스종합정보센터, 2024년도 국가 온실가스 잠정배출량, 환경부 (2025).
2. P. Singha, K. P. Kalyan, D. K. Murali, and M. Paliwal, Metall Mater. Trans. B 57, 576 – 595 (2026)
3. Y. Ma, Y. H. Han, V. V. Shvartsman, and D. Raabe, Adv. Sci. 10, 2206110 (2023).

#### [학생4-7 | 16:25]

**CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaF<sub>2</sub>-MgO 슬래그 조건에서의 스테인리스강 탈황 거동:** 박동민<sup>1</sup>, 이희재<sup>2</sup>, 박주현<sup>1\*</sup>; <sup>1</sup>한양대학교, <sup>2</sup>세아창원특수강

**Keywords:** 스테인리스강, 탈황 반응, 염기도, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 환원

스테인리스강 제품은 우수한 내식성과 높은 기계적 특성으로 인해 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있으며, 이를 안정적으로 확보하기 위해서는 고 청정강의 생산이 필수적이다. 황, 인, 산소와 같은 불순 원소는 용강 또는 합금 원소와 반응하여 유해한 석출물을 형성할 수 있다. 황 함량의 증가는 황화물 편석을 촉진하여 기계적 및 물리적 특성을 저하시킬 수 있으므로, 이를 제어하기 위한 탈황 정련이 필수적으로 요구된다<sup>1,2</sup>. 용강 내 황 함량이 과도하게 높을 경우 탈황 공정의 부담이 크게 증가하므로, 이를 완화하기 위해 2차 정련 이전 단계에서 예비 탈황 공정을 수행할 필요가 있다. 한편, 전기로(EAF) 조업에서 스테인리스강 정련 과정에서는 크롬의 산화가 발생하며<sup>3</sup>, 생성된 크롬 산화물은 슬래그의 물성에 큰 영향을 미친다. 따라서 크롬 수율 향상을 위해 크롬 산화물을 환원하는 과정은 제강 공정에서 고려해야 할 중요한 요소이다.

이러한 이유로 본 연구에서는 전기로(EAF) 조업 이후, 크롬 산화물 회수 과정에서 슬래그 염기도가 탈황 반응과 크롬 산화물 환원 거동에 미치는 영향을 조사하였다.

본 연구에서 고주파 유도 용해로를 사용하여 온도 1873K에서 MgO 도가니 내에서 예비 탈황 정련을 모사하였다. STS302S1(Fe-18Cr-8Ni-1.4Mn-0.5Si-0.09C) 조성에 FeS를 투입하여 용강 내 황 함량을 약 1000ppm 수준으로 조정하였으며, 슬래그 조성은 CaO-SiO<sub>2</sub>-10Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-10Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-10CaF<sub>2</sub>-5MgO 슬래그에 염기도(CaO/SiO<sub>2</sub>=1.5, 2.0, 2.5, 3.5)를 바꿔가며 실험을 진행하였다. 실험 후, C/S analyzer, ICP-AES 분석을 통해 용강 및 슬래그 내 성분을 정량 분석 하였다.

본 실험에서는 슬래그 염기도 변화에 따른 시간별 용강 내 탈황 비율 및 슬래그 내 황 농도 변화를 [그림 1]에 나타내었다.

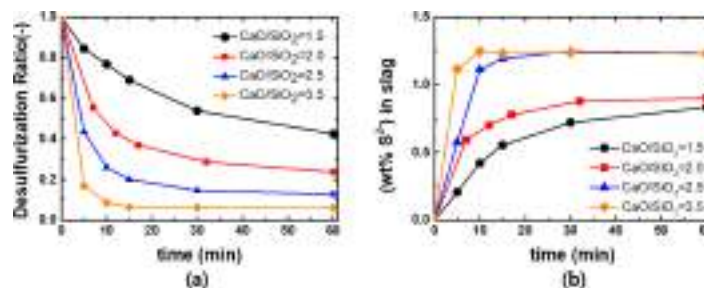


**Fig. 1.** 염기도 변화에 따른 시간별 (a) 용강 내 탈황 비율 및 (b) 슬래그 내 황 농도 변화



본 실험 결과 반응 시간 및 슬래그 내 염기도가 증가할수록 용강 내 황 함량이 감소하는 경향을 확인하였다. 이는 염기도 증가에 따라 CaO로부터 자유 산소 이온( $O^{2-}$ )의 농도가 증가하고, 그 결과 탈황 반응이 촉진되기 때문이다.

용강과 슬래그 사이의 평형 황 분배비( $L_S = (wt\%S)/(wt\%S)$ )는 제강 공정에서 열역학적 관점의 탈황 효율을 평가하는 데 사용된다. 이러한 분배비에 대해 sulfide capacity와 탈황 조건이 미치는 영향을 조사하고자 식 [2]을 통해 sulfide capacity를 계산하였다.

$$[S] + (O^{2-}) = [O] + (S^{2-}) \quad [1]$$

$$\log C_{S^{2-}} = \log L_S + \log a_O - \log f_S \quad [2]$$

또한 Duffy와 Ingram<sup>4,6)</sup>가 제시한 슬래그의 광학 염기도는 식[3]을 통해 계산할 수 있으며, Sosinsky와 Sommerville<sup>7)</sup>가 제시한 sulfide capacity와 광학 염기도 간에 관계식(식 [4])을 통해 sulfide capacity를 계산하였다.

$$\Lambda = \frac{\sum x_i n_i \Lambda_i}{\sum x_i n_i} \quad [3]$$

$$\log C_{S^{2-}} = \frac{22,690 - 54,650\Lambda}{T} + 43.6\Lambda - 25.2 \quad [4]$$

이렇게 FactSage™ 8.3 소프트웨어를 이용하여 계산한 값과, 실험 결과로부터 얻은 값, 그리고 Sosinsky와 Sommerville<sup>9)</sup>이 제시한 식 [4]로 계산한 sulfide capacity를 [그림 2]에서 비교하였다.

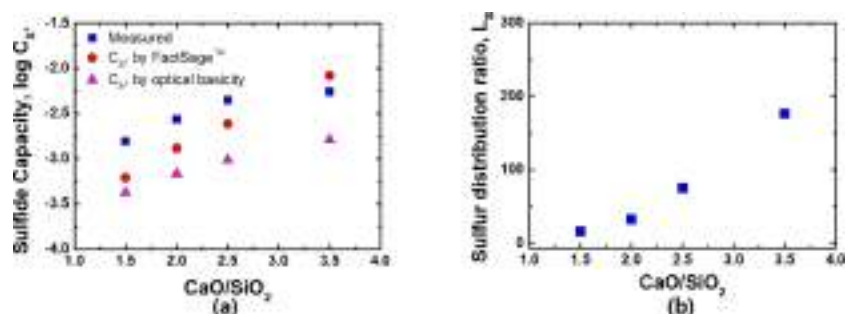


Fig. 2. 염기도 변화에 따른 (a) sulfide capacity, (b) 황 분배비 변화

세 sulfide capacity 값 모두 염기도가 증가함에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며, 황 분배비 역시 염기도 증가에 따라 함께 증가하는 것을 확인할 수 있다.

한편, 슬래그 염기도 변화에 따른 용강 및 슬래그 내 크롬 농도를 ICP-AES로 분석한 결과와, 식 [5]에 기반한 질량 수지 결과를 [그림 3]에 나타내었다.

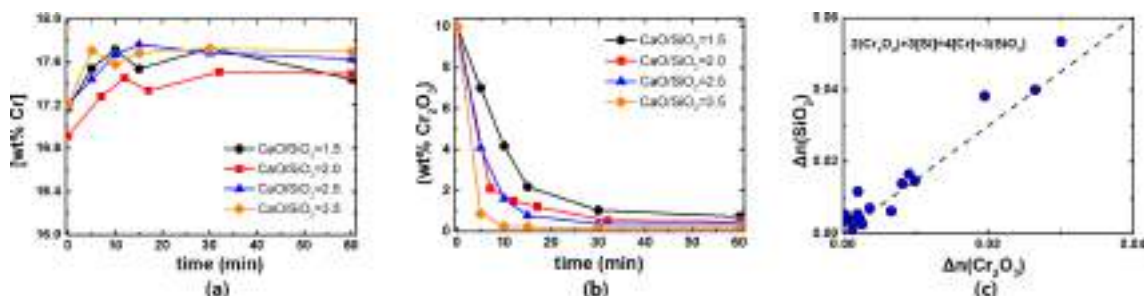
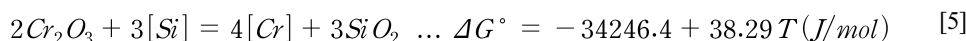


Fig. 3. 염기도 변화에 따른 (a) 용강 및 (b) 슬래그 내 크롬 농도 변화 (c)  $Cr_2O_3$  환원에 따른 Cr 질량수지

본 실험 결과, 반응 시간 및 슬래그 내 염기도가 증가함에 따라 슬래그 내  $Cr_2O_3$  함량이 감소하는 경향이 관찰되었다. 한편, 슬래그 내  $Cr_2O_3$ 가 용강 내  $[Si]$ 에 의해 주로 환원된 것은 식 [5]와 [그림 3 (c)]을 통한 것으로 판단된다. 이는 슬래그 염기도 증가로  $SiO_2$ 의 활동도가 감소하며, 그 결과 식 [5]에 제시된  $Cr_2O_3$  환원 반응의 열역학적 구동력이 증가하기 때문이다.

참고문헌(References)

1. Park, J. H., & Kang, Y. (2017). Steel Res Int., 88(12), 1700130.(2017).
2. Eklund, G. S. Journal of the Electrochemical Society, 121(4), 467. (1974)
3. Arh, B., & Tehovnik, F. Metalurgija-Zagreb, 50(3), 179. (2011).
4. J.A. Duffy and M.D. Ingram, J. Am. Chem. Soc., 1971, vol. 93, pp. 6448-54.
5. J.A. Duffy: J. Chem. Educ., 1996, vol. 73, pp. 1138-42.
6. Pretorius, E.Fundamentals of EAF and ladle slags and ladle refining principles. Bakers Refractories. (2015).
7. Sosinsky, N. J., & Sommerville, I. D. (1986). Metall. Trans. B, 17(2), 331-337. (1986).



## 에너지재료

Room 3층 삼다B, 4월 28일

## [에너지1-1 | 09:00]

**알루미늄 음극 합금 설계를 통한 알루미늄-공기 전지의 고에너지 밀도화:** 박은하, 이원도, 박준엽, 김정구\*(성균관대학교)**Keywords:** 알루미늄, 알루미늄-공기 전지, 음극, 합금 설계, 고에너지 밀도

알루미늄-공기 전지는 높은 이론 에너지 밀도를 가지는 유망한 에너지 저장 시스템이지만, 알루미늄 음극 표면에 형성되는 산화막으로 인해 알루미늄 용출 반응의 과전압이 증가하고, 이에 따라 방전 전압이 감소하는 한계를 가진다. 이러한 산화막 형성을 억제하기 위해 강염기성 전해질의 사용이 불가피하나, 해당 환경에서는 알루미늄 음극의 기생적인 자가부식 반응이 촉진되어 음극 활용률이 저하되는 문제가 발생한다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 알루미늄 음극의 합금 설계를 수행하였다. 수소 발생 반응의 과전압을 증가시켜 자가부식을 억제하는 In과, 알루미늄 표면에 보호 피막을 형성하여 내식성을 향상시키는 Mg를 첨가하였으며, 동시에 보호 피막으로 인한 알루미늄 활성 저하를 완화하기 위해 Ga를 도입하였다. 특히, Ga 첨가량이 전지 성능에 미치는 영향을 중점적으로 분석하였다. 전기화학적 분석 결과, Ga 농도가 증가할수록 알루미늄 음극의 활성화 분극이 감소하여 전지 출력이 향상되었으나, 일정 농도 이상에서는 기생적인 수소 발생 반응이 증가하여 에너지 밀도가 감소하는 경향을 보였다. 이러한 거동의 근본적인 메커니즘을 규명하기 위해 수행한 DFT 시뮬레이션 결과, Ga의 첨가는 국부적인 Al-Al 결합을 약화시켜 공공 형성 에너지를 감소시키고, 이로 인해 방전 활성이 촉진됨과 동시에 자가부식 반응 또한 촉진됨을 확인하였다. 결과적으로, 본 연구에서 개발한 Al-Mg-Ga-In 합금을 알루미늄-공기 전지 음극으로 적용함으로써 4, 333 Wh/kg의 에너지 밀도를 달성하였으며, 이는 현재까지 보고된 알루미늄-공기 전지용 알루미늄 음극 합금 중 세계 최고 수준의 성능이다.

## [에너지1-2 | 09:15]

**Aluminum foil anodes for lithium-ion batteries overcoming the energy–durability trade-off via microstructure engineering:**

정희태, 김우진\*(홍익대학교)

**Keywords:** Aluminum, Microstructure, Lithium-ion batteries, Anode, Grain boundary

Aluminum foil anodes offer a lightweight and scalable architecture by integrating the active material with the current collector. By contrast, practical deployment has been hindered by rapid mechanical degradation associated with ~100% volumetric expansion during charging/discharging. Prior stabilization approaches including grain refinement, alloying, and prelithiation, typically enhance either mechanical integrity or electrochemical reversibility. In the present study, we report a distinct microstructural strategy for Al-1 wt% Si foils in which the large atomic-size mismatch between Al and Si, together with dispersed Si particles, inducing pronounced lattice distortions and spatially heterogeneous stored energy. These features promote the formation of a laminated grain boundary architecture: grain boundaries are vertically aligned low-angle and medium-angle grain boundaries provide guided pathways for Li transport, whereas periodically spaced horizontal high-angle grain boundaries promote LiAl nucleation and directional growth. This laminated microstructure acts as a stack-dam that regulates Li-ion flux, directing phase evolution with circumventing volume expansion distinct from previously reported Al foil anodes. As a result, combining with controlled prelithiation, the laminate architecture achieves enhanced energy density and extended cycle life.

## [에너지1-3 | 09:30]

**주유형 알루미늄-공기전지 성능 및 효율에 대한 음극 pellet의 크기 및 적층 구조 영향 평가:** 김용원, 손경호, 박은하, 김정구\*(성균관대학교)**Keywords:** 알루미늄-공기전지, 음극 구조, 고에너지밀도

기후 변화와 화석 연료 고갈에 따라 대체 에너지 저장 기술에 대한 관심이 증가하고 있으며, 알루미늄-공기전지 (Aluminum-Air battery, AAB)는 이에 대응할 수 있는 유망한 대안으로 주목받고 있다. 알루미늄-공기 전지는 현재 가장 널리 사용되는 리튬 이온 전지 대비 높은 에너지 밀도, 저렴한 가격 등을 장점으로 갖는다. 그러나, 기존의 알루미늄-공기전지는 전기적 재충전이 불가능한 1차 전지에 해당하여 완전 방전 시 판형 음극을 교체하는 방식을 택하고 있다. 이는 음극 체결 불량으로 인한 전지 성능 저하 및 안전 문제를 유발할 수 있다는 한계를 갖는다. 따라서, 이러한 한계를 극복하기 위한 방안으로, 판형 음극을 교체하는 대신 pellet형 알루미늄 음극을 주유하는 방식의 알루미늄-공기 전지가 주목을 받고 있다. Pellet형 알루미늄 음극을 활용할 경우, pellet의 크기 및 적층 구조에 따라 음극의 유효 표면적과 내부 공극 형태 및 공극률이 변화하며, 이는 전해질 이온의 이동과 전지 성능과 효율에 직접적인 영향을 미친다. 따라서, pellet형 음극 성능 향상을 위해서는 pellet의 크기 및 적층 구조에 따른 전지 성능 변화에 대한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 pellet의 크기 및 적층 구조에 따른 전지 성능 및 효율 변화를 파악하기 위해 전기화학적 실험을 통해 pellet 크기 및 적층 여부에 따른 전지 성능 및 효율을 비교하였다. 또한, 방전 시험 후 pellet에 대한 분석을 통해 방전으로 인한 pellet 소모율과 표면 침전물 형성 여부를 비교하였다. 그 결과, 2 mm ~ 4 mm 직경 범위에서 pellet의 크기가 커질수록 pellet의 소모율이 감소하였으며, 전지의 에너지밀도가 증가하는 것을 확인하였다. 또한, 단층 구조 대비 복층 구조에서 전지의 에너지밀도가 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 통해 pellet 크기 및 적층 구조 최적화를 통한 표면적 및 공극 연결 제어가 pellet형 알루미늄 음극 기반 알루미늄-공기 전지 성능 향상에 핵심적인 설계 인자임을 확인하였다.

**[에너지2-1 | 09:50]**

**전고체전지용 저비용 고성능 대면적 고체전해질 제조 기술 연구:** 김화정, 최민서(한국표준과학연구원), 박혁준(고려대학교), 이석희(한국세라믹기술원), 김정현(한밭대학교), 신호선, 백승욱\*(한국표준과학연구원)

**Keywords:** 이차전지, 전고체전지, 고체전해질, 소결

가연성의 액체전해질로 인한 리튬이온전지의 화재 및 폭발 위험성을 원천적으로 배제할 수 있는 불연성 고체전해질을 사용한 전고체전지는 차세대 에너지 저장 시스템으로 큰 주목을 받고 있다. 특히 산화물계 고체전해질은 우수한 화학적 안정성이 장점이나, 고온 소결 공정에서 발생하는 리튬 휘발과 상불균로 인한 안정적인 물성 확보의 어려움으로 인해 고체전해질의 대면적화와 저비용 공정 개발은 기술적으로 난이도가 매우 높은 분야로 알려져 있다. 본 연구에서는 고체전해질 분말 표면에 리튬 화합물 기반의 고기능성 물질을 코팅하는 표면 개질 공정을 적용하여, 기존 산화물계 고체전해질 제조에 필수적이라 여겨졌던 대량의 소모성 모분말(mother powder) 사용이 필요 없는 공정을 개발했다. 리튬계 화합물 코팅층은 소결 과정에서 소결시간의 단축, 리튬 휘발 억제 및 계면 안정화에 동시에 기여함으로써, 모분말 없이도 안정적인 상 유지와 치밀한 미세구조 형성을 가능하게 한다. 개발한 제조 공정을 적용 시 98.2% 이상의 고밀도 고체전해질을 제조할 수 있었으며, 이온전도도는 기존 대비 2배 이상 향상되고, 전기전도도는 20배 이상 감소하여 전고체전지의 효율과 안정성을 동시에 높일 수 있었다. 또한 기존 대비 10배 이상 넓은  $16 \text{ cm}^2$  대면적 고체전해질을 제조하면서도 공정의 단순화로 인해 기존 대비 1/10 수준으로 고체전해질 제조비용은 절감할 수 있었다. 본 연구는 새로운 제조공정 개발을 통해 산화물계 전고체전지 상용화의 핵심 난제인 대면적화와 생산 비용 절감 문제를 동시에 해결할 수 있는 가능성을 보였다는 점에서 의미가 크다고 할 수 있다.

**[에너지2-2 | 10:05]**

**Enhanced Electrochemical Properties of NCM811 Cathodes with MWCNTs in Solid Polymer Electrolyte-Based Batteries:** Wu-young Goh, Chan-jin Park\*(Chonnam National University)

**Keywords:** Lithium-ion Batteries, Multi-walled CNT, Solid polymer electrolyte

Lithium-ion batteries (LIBs) are widely used in various industries due to their high energy density, but safety issues associated with liquid electrolytes remain a critical challenge. Solid polymer electrolytes (SPEs) are attracting attention as promising next-generation alternatives because they offer improved safety and more stable interfacial contact. In this study, a Ni-rich NCM811 cathode was employed to achieve high energy density, and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) were introduced to mitigate the “dead zone” problem induced by conventional 0D carbon black in high-density electrodes. Compared with single-walled carbon nanotubes (SWCNTs), MWCNTs are significantly more cost-effective and can form robust, continuous conductive networks owing to their multi-layered structure. An in-situ polymerization strategy was additionally adopted to construct seamless interfaces between the SPE and cathode, thereby minimizing interfacial resistance and enhancing both ionic and electronic transport. Composite cathodes containing different MWCNT contents (0–2.0 wt%) were fabricated and evaluated. The electrode with 1.0 wt% MWCNT (NCM811@MWCNT1.0) exhibited the most effective three-dimensional conductive network, as confirmed by SEM, delivering  $109 \text{ mAh g}^{-1}$  at 2.0C and retaining 80.3% of its initial capacity after 300 cycles at 0.2C. Pouch cells and high-loading coin cells ( $>15 \text{ mg cm}^{-2}$ ) further demonstrated stable performance under practically relevant areal capacities. Electrochemical analyses using cyclic voltammetry (CV) and galvanostatic intermittent titration technique (GITT) revealed that an optimal MWCNT content enhances the lithium-ion diffusion coefficient and ionic conductivity, thereby accelerating electrode kinetics. TEM and XPS measurements confirmed the formation of a stable LiF-based cathode-electrolyte interphase (CEI) layer during cycling, which suppresses side reactions and improves reversibility. In contrast, excessive MWCNT loading ( $>1.5 \text{ wt\%}$ ) caused aggregation, increased internal resistance, and degraded cell performance. These findings provide design guidelines for optimizing MWCNTs as cost-effective conductive additives in Ni-rich cathodes and support the development of safe, high-performance solid-state lithium batteries.

**[에너지2-3 | 10:20]**

**전구체 상태 제어를 통한 고성능 가넷형  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  고체전해질의 저온 합성:** 최민서(한국표준과학연구원, 충남대학교 분석과학기술대학원), 김화정, 신호선, 백승욱\*(한국표준과학연구원)

**Keywords:** 전고체전지, 가넷계 고체전해질, LLZT, 저온합성

차세대 전고체전지용 고체전해질로서 배터리 화재 시 폭발과 유독가스 배출 위험이 낮은 산화물계 고체전해질이 주목받고 있다. Ta-doped  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  (LLZT)는 대표적인 가넷계 고체전해질로서 높은 이온전도도와 화학적으로 안정한 특성으로 많은 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 고체전해질로서 우수한 특성을 보이는 입방정상 구조는  $900^\circ\text{C}$  이상의 높은 소성 온도를 필요로 하지만 고온 소성은 불균일한 미세구조 형성으로 인해 고체전해질의 이온전도도를 저하시키는 문제를 야기한다. 본 연구에서는 저온에서 안정적인 입방정상 LLZT 소성을 위해 전구체 분말의 입자 크기를 줄이고, 전구체 표면의 준비정질화를 통한 입자간 반응성을 향상시키는 전략을 위해 고에너지 불밀링 공정을 사용했다. 결과적으로, 고에너지 불밀링 공정을 통해 제조한 수백 나노미터 크기의 준비정질 전구체를 이용해  $700^\circ\text{C}$ 에서도 안정적인 입방정상이 형성될 수 있음을 확인했다. 또한 저온에서 소성된 분말을 후속 소결 공정에 적용한 결과 높은 상대 밀도 (95.6%)와 이온 전도도 ( $8.28 \times 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ ) 및 임계전류밀도 ( $1.5 \text{ mA cm}^{-2}$ )를 나타냄을 확인했다. 이러한 결과는 낮은 소성 온도에서 미세하고 균일하게 성장한 입자들이 소결 중에 비정상적인 입자 성장을 억제하고, 리튬 이온 수송에 유리한 연속적인 입자경계 네트워크를 생성할 수 있었기 때문이다. 본 연구에서 제시하는 고에너지 불밀링을 통한 전구체 미세화 및 비정질화 방법은 저온에서 입방정상 형성을 가능하게 하며, 고체전해질의 물성 향상에 효과적인 공정임을 확인하였다.

**[에너지3-1 | 10:40]**

TRU핵연료 공정수율 향상을 위한 신소재 세라믹 도가니의 제조공정조건에 따른 열충격저항성 평가: 박상규, 안정수\*, 심영호, 국승우, 김준환, 안정수(한국원자력연구원)

**Keywords:** 금속연료, 공정 수율, 핵연료 도가니, NdYO<sub>3</sub>, SFR

사용후핵연료는 강한 방사선과 높은 열을 방출하는 장반감기 방사성동위원소를 포함하고 있다. 따라서 방사성 독성이 수십만 년 이상 지속되는 사용후핵연료를 안전하게 관리하기 위한 기술의 확보는 국가 차원에서 매우 중요한 현안 중 하나이다. 이를 위해 현재 사용후핵연료 처리의 일환인 건식처리기술(파이로프로세싱) 및 소듐냉각고속로(SFR) 기술개발이 진행되고 있다. TRU핵연료는 이러한 파이로프로세싱을 통해 생산되는 핵연료이며, 핵물질 손실을 증가에 따른 핵연료 재촬영율감소 문제는 사용후핵연료 재사용을 위한 당위성 확보를 위한 필수 해결 요소이다. TRU핵연료 주조공정에서 주조부품과 금속연료간의 반응은 금속연료 수율감소와 핵물질 손실을 증가를 유도한다. 이를 해결하기 위해 금속연료 주조 용융물과 주조부품간의 반응을 방지할 수 있는 신소재를 개발하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 상용 소재인 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 소재에 비해 반응저감성이 우수한 신소재로 NdYO<sub>3</sub>를 활용하여 이에 대한 반응저감성을 검증한 뒤, 실공정 적용을 위한 도가니 형태로 제조하여 열충격저항성을 평가하였다. 도가니 형태를 만들기 위해 슬립캐스팅 공정을 사용하였으며, Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 50:50비율로 혼합하여 Ar 분위기에서 1550°C, 10시간 조건으로 가열하여 소결 제조하였다. 제조된 도가니는 XRD, SEM분석을 통하여 물성평가를 하였고, U-Zr과 유사한 Cu-Ni합금을 활용하여 실제 연료심 제조공정과 동일한 환경에서 열충격 모사시험을 수행하였다.

**[에너지3-2 | 10:55]**

블로커 보조 증착법을 이용한 유연 헬리컬 적층 안테나 제작: 스마트 콘택트 렌즈용 OLED에서의 고효율 무선 전력 전송: 장규백, 전진후, 오성민, 박진우\*(연세대학교)

**Keywords:** 유연 헬리컬 적층 안테나(HSA), 무선 전력 전송(WPT), 스마트 콘택트렌즈, 블로커 보조 증착법(blocker-assisted deposition), 녹내장 측정 및 치료(glaucoma theragnostic)

최근 피부 및 신체기관과 밀접한 접촉을 통해 생체 기전을 실시간으로 모니터링 하고, 직접적인 치료를 수행할 수 있는 웨어러블 디바이스가 이목을 집중 받고 있다. 그중, 안구에 밀접하게 접촉하여 안압 측정, 당 수치 측정, 그리고 약물 전달을 수행할 수 있는 스마트 콘택트 렌즈는 차세대 진단 및 치료(theragnostic) 플랫폼으로 각광받고 있다. 이러한 시스템의 안정적인 구동을 위해서는 높은 전력이 요구되기에, 렌즈 내에 무선 전력 전송(WPT)을 위한 안테나를 삽입하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 안테나로 고효율 전력 전송을 위해서는 높은 인덕턴스와 낮은 저항을 갖는 안테나 설계가 필수적이다. 그러나, 렌즈 내 한정된 공간에서 이를 구현하기 위해서는 i) 공정 난이도가 높고, 용액의 인체 유해성 우려가 있는 포토리소그래피 공정이 수반되어야 하며, ii) 턴(turn, L) 수가 많아질수록 선폭 감소로 인한 저항 증가 또는 저항 감소를 위한 턴 수 감소(즉, 인덕턴스 감소)라는 트레이드 오프(trade-off) 문제가 발생한다. 본 연구에서는 포토리소그래피를 사용하지 않는 간단한 공정으로, 선폭을 유지하면서도 저항 증가를 억제할 수 있도록 헬리컬(helical) 방향으로 적층된 안테나를 설계 및 제작하고 그 효율을 분석하고 theragnostic에 사용할 수 있는 지 확인하였다. 각 층을 선택적으로 절연하고 전기적으로 연결하기 위해 ‘블로커 보조 증착법(blocker-assisted deposition)’을 도입하였다. 이는 Ag를 통해 안테나 라인을 형성하고, Parylene-C CVD 공정 중 전기적 연결이 필요한 부분 위에 블로커를 배치하여 선택적 절연층 형성을 유도함으로써 적층 구조 간의 안정적인 전기적 연결을 확보하는 방법이다. SEM 이미지를 통해 Ag와 Parylene-C의 교차 적층 구조를 확인하였으며, 표면거칠기 측정(surface profilometry)을 통해서, 의도된 전기적 연결 부위에 절연층이 형성되지 않았음을 검증하였다. 제작된 안테나의 두께는 적층 수에 따라 7 μm(1L), 9 μm(2L), 11 μm(3L), 13 μm(4L), 그리고 15 μm(5L)로 정밀하게 제어되었으며, 저항 측정 결과 턴 수가 증가에 따른 도선 길이 증가 및 점접 증가로 인해 <1 Ω(1L), ~3.5 Ω(2L), ~4.2 Ω(3L), ~4.9 Ω(4L), 그리고 ~5.3 Ω(5L)으로 상승함을 확인하였다. 전력 전달 효율 분석 결과, 1-3턴 구간에서는 인덕턴스 지배 효과로 효율이 증가하였으나, 3턴 이후에서는 저항 증가와 적층 구조의 기생 커패시턴스 영향으로 효율이 감소하여, 3L 구조에서 최대 ~20.9%의 효율을 달성하였다. 또한, 송신부(transmitter)와의 거리와 각도 불일치에 따른 효율 변화를 정량화하였을 때, 거리와 각도의 불일치가 증가함에 따라 효율이 감소하는 경향을 확인하였다. 다양한 기계적 변형(휨, 말림, 접힘, 두 번 접힘, 뒤틀림, 물딩) 전후의 저항과 효율 차이가 미미함을 확인하여, 안테나의 우수한 유연성을 입증하였다. 마지막으로, 녹내장 치료용 실효성을 검증하기 위해 10 mW 수신 조건에서 LED 사용시에 온도변화를 측정한 결과, 약 ~1.2°C의 미미한 상승을 보여 안구의 안정성을 예측했다. 또한, 스마트 렌즈에 통합된 OLED 소자의 안정적인 구동을 구현함으로써, 본 연구에서 제안한 안테나가 차세대 스마트 콘택트 렌즈의 전력원으로서 높은 활용 가능성이 있음을 확인했다.

**[에너지3-3 | 11:10]**

Enhancement of Thermoelectric Performance by Anion-Cation Co-Doping In Bismuth Tellurides And Cost-Effective & Mechanically Robust Thermoelectric Module Fabrication Process: Saurabh Thoravat, Jae Hyun Yun\*(Kyung Hee University), Anil Kumar\*(Texas Tech University), Junyoung Park, Hyungyu Jin(POSTECH), Changsun Pak, Young-Kwang Kim(R-Materials Co. Ltd.), Jin Hee Kim, Jong-Soo Rhyee\*(Kyung Hee University)

**Keywords:** Thermoelectric, Bismuth Tellurides, Figure of Merit, TE Module and Device, Thermal conductivity

Thermoelectric (TE) materials and devices offer a solid-state solution for waste-heat recovery and precise thermal management; however, their widespread adoption remains limited by moderate conversion efficiency and high module fabrication costs. In this work, we report a dual-advancement strategy combining anion-cation co-doping-induced performance enhancement in p-type bismuth antimony telluride with a cost-effective and mechanically robust thermoelectric module fabrication process. Polycrystalline (BST)<sub>1</sub>

$x(\text{NaCl})_x$  ( $0 \leq x \leq 5.0$  mol%) samples were synthesized via melting and hot-press sintering, and their anisotropic structural, electrical, and thermal transport properties were systematically investigated. At low NaCl concentrations,  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  act as effective substitutional dopants, optimizing carrier concentration, enhancing carrier mobility, and suppressing bipolar thermal conduction through local lattice strain fields. At higher NaCl contents, nanoscale precipitates form, introducing additional phonon scattering while maintaining favorable electronic transport. As a result, a maximum figure of merit  $ZT \approx 1.49$  at 350 K and an average  $ZT_{\text{avg}} \approx 1.4$  (300–425 K) were achieved, representing a significant improvement over pristine BST. Beyond materials optimization, we introduce a novel thermoelectric module architecture employing an electrically insulating and low-thermal-conductivity PEEK support, which eliminates wafering and dicing processes and enables direct sintering and transfer of thermoelectric legs. A 31-pair module fabricated using the optimized p-type  $(\text{BST})_{1-x}(\text{NaCl})_x$  and n-type  $(\text{CuI})_{0.3} \text{Bi}_2 \text{Te}_{2.7} \text{Se}_{0.3}$  materials exhibits a power-generation efficiency of 3.4%, comparable to that of commercial  $\text{Bi}_2 \text{Te}_3$ -based modules, despite a reduced number of thermoelectric pairs. These results demonstrate a viable pathway toward high-performance, scalable, and economically competitive next-generation thermoelectric modules.

#### [에너지4-1 | 11:30]

Heterostructure Engineering in Transition Metal Compounds for Multi-Electron Electrocatalysis: 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

Transition metal compounds have been predominantly investigated as electrocatalysts for acidic hydrogen evolution reaction (HER), largely due to their intrinsic n-type semiconducting character that facilitates electron donation. However, this electronic configuration inherently limits their ability to drive multi-electron anodic reactions such as alkaline oxygen evolution reaction (OER) and hydrazine oxidation (HzOR), where efficient electron extraction, redistribution, and stabilization of reaction intermediates are essential. Here, we demonstrate that heterostructure engineering transforms layered transition metal chalcogenides into three-dimensionally integrated charge-transport architectures capable of enabling complex proton-coupled electron transfer (PECT) reactions beyond conventional acidic HER. In  $\text{MoTe}_x/\text{Ni}(\text{OH})_2$  heterostructures, electrochemically induced chalcogen vacancies promote partial 2H-to-1T' phase transitions, generating metallic domains within semiconducting  $\text{MoTe}_2$  and facilitating  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  nucleation at defect sites [1]. The resulting heterophase boundaries and chalcogenide/hydroxide interfaces reduce the free-energy barriers of OER intermediates, enabling highly efficient and stable alkaline OER surpassing  $\text{IrO}_x$  benchmarks. In strain-engineered  $\text{NiTe}_{2-\delta}/\text{NiO}_x$  systems, controlled Te dissolution and lattice deformation produce oxygen-substituted chalcogenide domains coupled with oxide regions, modulating d-band energetics and establishing spillover-assisted HER/OER pathways for bifunctional water electrolysis under industrial current densities [2]. Finally, plasma-induced Pt cluster/ $\text{PtSe}_x\text{O}_y/\text{PtSe}_2$  architectures introduce amorphous oxychalcogenide matrices that electronically couple with Pt clusters, rendering them electron-deficient and stabilizing PCET during HzOR while suppressing nitrogen-intermediate accumulation under sustained anodic operation [3]. Across these systems, heterointerfaces function as electronically cooperative domains that establish bidirectional charge-flow networks. Electron-donating chalcogenide regions promote hydrogen adsorption and reduction, whereas electron-accepting oxide, hydroxide, or amorphous domains enable oxidative intermediate formation and charge extraction. This three-dimensional electronic integration redefines transition metal compounds as versatile catalytic platforms for alkaline HER, OER, and alternative anodic reactions. Our findings establish heterointerface-mediated charge redistribution as a generalizable design principle for activating transition metal compounds beyond traditional acidic HER catalysis. [1] Han, J.; Nam, M. K.; Shin, S.; Cho, I.; Jeon, H.; Heo, J.; Lee, J.; Cho, M. K.; Preston, D. J.; Hersam, M. C.; Kim, I. S.; Shong, B.; Lee, W.-K. Efficient and Stable Electrocatalytic Oxygen Evolution from  $\text{MoTe}_x/\text{Ni}(\text{OH})_2$  Heterostructures. *J. Am. Chem. Soc.* 2025, 147, 41096–41108. [2] Shin, S.; Cho, I.; Han, S. K.; Heo, J.; Han, J.; Jeon, H.; Lee, J.; Cho, M. K.; Preston, D. J.; Kim, I. S.; Shong, B.; Lee, W.-K. Strain-Engineered Oxygen-Modified Nickel Telluride/Nickel Oxide Heterostructures for Bifunctional Alkaline Water Electrocatalysis. *ACS Nano* 2025, 19, 51, 42769 [3] Han, S. K.; Kweon, Y.; Jeon, H.; Cho, J. H.; Yim, J.-H.; Lee, J.; Heo, J.; Shin, S.; Baek, S. J.; Cho, M. K.; Kim, S. Y.; Kim, I. S.; Kim, M.; Lee, W.-K. Amorphized and Oxidized Layered  $\text{PtSe}_2$  as an All-in-One Electrocatalytic Platform for Proton-Coupled Electron Transfer in Hydrazine Oxidation. 2026, in preparation

#### [에너지4-2 | 11:45]

Cu-doped  $\text{Sn-TiO}_2$  nanofibers with improved charge separation for efficient  $\text{CO}_2$  photoreduction under UV-Vis light: Hazina Charles, Plassidius J. Chengula, Jiyeon Seo, Caroline Sunyong Lee\*(Hanyang University ERICA)

**Keywords:** Cu-doped STO NFs,  $\text{CO}_2$  photoreduction, UV-vis photocatalysis, Charge separation, and Electron trapping sites.

The efficient conversion of  $\text{CO}_2$  into valued fuels using sunlight remains a critical challenge in photocatalysis. In this work, we report the fabrication of Cu-doped  $\text{Sn-TiO}_2$  nanofibers ( $\text{Cu}_x\text{-STO NFs}$ ) via an electrospinning-calcination route and demonstrate their superior performance for  $\text{CO}_2$  photoreduction under UV-vis irradiation. The incorporation of Cu species into the STO lattice induces mid-gap electronic states, enhances visible-light absorption, and promotes charge-carrier separation by acting as electron-trapping centers. Structural analyses confirm the successful formation of homogeneous, one-dimensional nanofibers with well-dispersed Cu dopants. At the same time, optical and electrochemical measurements reveal a reduced bandgap, suppressed recombination, and improved

charge-transfer efficiency compared to pristine STO. Under UV-vis illumination, the Cu-doped STO NFs exhibit significantly enhanced CO<sub>2</sub> reduction activity, yielding higher production rates of carbon-based products such as CO, CH<sub>4</sub>, or CH<sub>3</sub>OH. The boosted photocatalytic performance is attributed to the synergistic effects of Cu doping, including extended light harvesting, optimized electron migration pathways, and improved surface redox kinetics. These findings highlight the potential of Cu-modified STO NFs architectures as efficient, earth-abundant photocatalysts for sustainable solar-driven CO<sub>2</sub> conversion.

**[에너지]4-3 | 12:00**

Intimate contact-driven CO<sub>2</sub> photoreduction in Cu<sub>3</sub>SnS<sub>4</sub>/ZnTiO<sub>3</sub> heterojunction for solar driven methanol production:

Plassidius Chengula, Hazina Charles, JiYeon Seo, Caroline Sunyong Lee\*(Hanyang University)

**Keywords:** ZnTiO<sub>3</sub>, Cu<sub>3</sub>SnS<sub>4</sub>, Heterostructure, CO<sub>2</sub> photoreduction, methanol

The rational construction of oxide/sulphide heterostructures offers an effective strategy to enhance photocatalytic CO<sub>2</sub> reduction by simultaneously improving light harvesting and charge separation. In this work, Cu<sub>3</sub>SnS<sub>4</sub> (CTS) nanosheets were uniformly integrated onto ilmenite-type ZnTiO<sub>3</sub> (ZTO) nanofibers via a solvothermal approach to form CTS/ZTO heterostructures with tunable interfacial architectures. SEM and TEM analyses reveal that CTS loading critically governs nanosheet coverage and interfacial contact, with intermediate CTS contents yielding dense, well-dispersed nanosheets anchored onto the ZTO surface. High-resolution TEM confirms intimate interfacial coupling between the two crystalline phases without disrupting their individual lattice structures. XRD and elemental mapping further verify the coexistence and homogeneous distribution of CTS and ZTO within the heterostructure. Optical measurements show enhanced visible-light absorption upon CTS incorporation, indicating favorable electronic interaction across the oxide-sulfide interface. Integrating CTS into ZTO nanofibers leads to the generation of intrinsic electric fields, which greatly improves charge transfer and decreases charge carrier recombination. As a result, the CTS/ZTO heterostructure exhibits markedly improved photocatalytic CO<sub>2</sub> reduction performance compared with pristine ZTO and CTS, with a pronounced enhancement in methanol production, reaching 1185.9 μmol g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> under UV-vis irradiation. The synergistic interplay between optimized nanosheet morphology, intimate interfacial contact, and improved charge-transfer pathways is identified as the key factor governing superior photocatalytic activity. This study provides structural and mechanistic insights into the design of efficient oxide-sulfide heterostructures for solar-driven CO<sub>2</sub> conversion.



## 여성세션

Room 3층 삼다B, 4월 28일

## [여성 1-1 | 14:00] 조정강연

과학기술의 미래, 여성 인재의 힘으로: WISET 전주기 성장 지원 체계: 송은경\*(한국여성과학기술인육성재단(WISET))

Keywords: 발표자 아직 미정으로 대신 입력함

한국여성과학기술인육성재단(WISET)은 과학기술정보통신부 산하 공공기관으로, 여성과학기술인의 육성 및 지원을 통해 국가 과학기술 발전과 사회적 가치 실현에 기여하고 있다. WISET은 여성과학기술인의 이공계 유입 촉진 → 경력 성장 → 경력단절 예방 및 복귀 → 리더 성장에 이르는 전 과정을 체계적으로 지원한다. 이러한 전 주기 지원을 위해 WISET은 ‘글로벌 여성 리더 양성’ 및 ‘지속성장 생태계 조성’을 전략 방향으로 다양한 맞춤형 프로그램을 수행하고 있다. 글로벌 여성 리더 양성을 위해 미래 신산업·신기술 전문인력 양성, 경력단계별 멘토링 및 네트워크 구축, 경력단절 예방을 위한 연구·일자리 지원을 추진하고 있다. 대표적으로 여대학원생 공학연구팀제 지원사업, 취업탐색·글로벌 멘토링, R&D 경력복귀 및 대체인력을 지원하는 사업을 운영한다. 또한 여성과학기술인 맞춤형 정책·제도 혁신, 다양성과 포용성 기반의 과학기술 문화 조성, 전 생애주기 통합 지원을 위한 W브릿지 플랫폼 및 지역협력사업을 통해 여성과학기술인이 안정적으로 정착할 수 있는 지속가능한 과학기술 생태계를 조성하고 있다. 이번 대한금속·재료학회 춘계학회 여성분과 세션을 통해 WISET의 비전과 가치, 주요 프로그램을 공유하고 여성과학기술인들의 지속적인 연구활동과 커리어 개발을 지원하기 위한 협력의 장을 마련하고자 한다.

## [여성 1-2 | 14:25]

우연의 파편들이 만든 하나의 흐름: 류채우\*(홍익대학교)

Keywords: 비정질 구조, 금속 재료

돌아보면 저의 진로 선택은 처음부터 뚜렷한 목표나 확신에 따라 이루어진 것이 아니었습니다. 성적에 맞춘 진학, 지도교수님의 권유, 그리고 그 과정에서 만난 사람들과 경험들이 쌓이며 현재의 연구 경로로 이어졌습니다. 당시에는 규칙성이 없어 보였던 선택들이 시간이 지나 하나의 흐름과 방향성을 이루고 있었음을 뒤늦게 깨닫게 되었습니다. 마치 겉보기에는 무질서해 보이는 구조 속에서도 일정한 상관성과 패턴이 존재하듯, 제 진로 또한 우연처럼 보였던 선택들의 축적 속에서 서서히 의미 있는 방향을 형성해 왔다고 느낍니다. 연구자의 길이 반드시 거대한 동기나 분명한 사명감에서 비롯되어야 하는 것은 아니라는 점을 말씀드리고 싶습니다. 스스로 특별하지 않다고 느끼거나 이 길이 정말 자신에게 맞는지 확신하지 못하는 사람 역시 충분히 자신만의 질서를 발견하며 연구자의 길 위에 설 수 있음을 전하고 싶습니다.

## [여성 1-3 | 14:40]

선택의 과정에서 만들어진 정답: 김수민, 최현주\*(국민대학교)

Keywords: 학부 연구생, 시행착오, 대학원 진학

대학교 입학 이전부터 진로의 방향을 명확히 확정한 학생은 많지 않다. 전공 선택 이후에도 연구 분야, 진로 목표, 진출 분야에 대한 고민은 지속되며, 학부 과정에서 이러한 불확실성은 반복적인 선택과 수정의 과정을 거치게 된다. 재료공학 분야를 전공하며 연구 주제 선정, 산업계와 학계 사이의 진로 선택, 진학 시점 등에 대한 고민 역시 지속적으로 이어졌다. 이 과정에서 중요한 것은 처음부터 정해진 정답을 찾는 것이 아니라, 여러 선택과 시행착오를 통해 방향이 점차 구체화된다는 점이다. 석사 과정 진학 결정 또한 이러한 탐색 과정의 연장선에서 이루어졌으며, 이후 연구 활동과 학술 발표를 통해 관심 분야와 강점이 점차 명확해지고 있다. 본 발표에서는 진로가 단선적으로 결정되지 않고, 탐색과 수정의 과정을 거쳐 형성되는 사례를 소개한다. 이를 통해 진로 탐색 과정에서의 고민과 변화가 실패가 아닌 자연스러운 축적 과정임을 보여주고, 진로 선택에 대한 과도한 조급함이 반드시 필요하지 않음을 논의하고자 한다.

## [여성 1-4 | 14:55]

지속 가능한 미래를 위한 재료공학: 내가 이 길을 선택한 이유와 연구자로서의 지속 가능성: 이정아\*(포항공과대학교)

Keywords: 재료공학, 여성 과학자

본 발표에서는 재료공학을 전공하게 된 배경과 연구자로서의 경로를 이어오게 만든 핵심 동기를 발표하고자 한다. 연구자로서 출발점은 금속과 재료가 구조·성분·공정의 상호작용을 통해 어떤 성능을 갖게 되는지를 이해하고자 하는 기본적인 과학적 관심이었다. 상변태, 미세조직, 기계적 거동의 연계를 분석하는 과정에서, 이러한 연구가 실제 산업적 문제 해결과 미래 기술 개발에 직결된다는 점을 확인할 수 있었다. 연구 과정에서 마주한 실험 실패나 예측과 다른 결과들은 이 분야가 요구하는 정확성, 끈기, 원인 분석 능력을 체계적으로 익히는 계기가 되었다. 이는 단순한 어려움이 아니라 연구자로서의 역량을 확장시키는 과정이었고, 지금까지 이 분야를 계속 선택하게 만든 중요한 이유이기도 하다. 현재 재료공학은 에너지, 환경, 신산업 등 다양한 분야에서 핵심 기반 기술을 제공하고 있다. 이 흐름 속에서 새로운 합금 설계와 물성 예측 기법 개발을 통해 미래 소재의 성능과 활용 가능성을 넓히는 연구를 수행하고 있다. 본 발표에서는 재료과학 분야를 선택한 이유와 그 과정에서 발견한 의미, 그리고 앞으로의 연구 방향을 간결하게 소개하고자 한다.

**[여성 1-5 | 15:10]**

세상에 쓸모없는 경험은 없었습니다: 알바생에서 연구자가 되기까지: 이효정, 최현주\*(국민대학교)

**Keywords:** 대학원생, 대학원생활

대학 시절 나는 학비와 생계를 위해 수많은 아르바이트를 전전했습니다. 카페 바리스타, 학원 조교, 행사 보조, 심지어 공장에서의 단기직까지, “내가 안 해본 알바가 있을까?” 싶을 만큼 다양한 일을 겪었습니다. 당시에는 그저 살아남기 위해 했던 일이었지만, 돌이켜보면 그 시간들이 지금의 저를 만들었습니다. 이제 대학원생이 되어 연구를 하고 있는 지금, 저는 종종 생각합니다. “연구가 세상에서 제일 어려운 일은 아니구나.” 물론 연구도 힘듭니다. 하지만 손님 응대, 클레임 대응, 생계의 무게 같은 현실적인 스트레스에 비하면, 연구는 차라리 ‘질문이 명확한 고민’이라는 점에서 다르게 느껴졌습니다. 그리고 그렇게 연구를 바라보는 저만의 관점이 생기자, 연구는 더 이상 두려운 대상이 아니라, 집중할 수 있는 기회로 다가왔습니다. 사회생활을 간접적으로나마 경험하며 얻은 가장 큰 교훈은, “주어진 일에 최선을 다하는 태도와, 문제를 내 일처럼 받아들이는 자세”였습니다. 이 두 가지는 연구실에서도 똑같이 적용됩니다. 실험에 실패해도 그 안에서 배움을 찾고, 막막한 데이터를 마주해도 ‘이건 내 프로젝트다’라는 책임감을 가지게 된 건, 여러 알바 경험을 통해 익힌 ‘살아남는 기술’ 덕분이었습니다. 대학원 생활은 여전히 어렵고, 미래에 대한 불안은 여전합니다. 하지만 알바를 하며 세상을 겪었던 시간은, 제가 지금 이 시간을 덜 불안하게, 더 주체적으로 견디게 만들어주었습니다. 어쩌면 저는 ‘연구자로서의 자질’보다 먼저, ‘사람으로서의 단단함’을 먼저 키워왔는지도 모릅니다. 이번 발표에서는 제가 겪은 아르바이트 경험들이 연구와 진로에 어떤 영향을 미쳤는지, 그리고 그 경험을 통해 연구에 대해 어떻게 다른 시각을 갖게 되었는지를 진솔하게 나누고자 합니다. 정해진 정답이 없는 진로 앞에서 방황하는 많은 대학원생들에게, 조금은 현실적이고도 따뜻한 시선이 전달되길 바랍니다. 쓸모없는 경험은 없었습니다. 모든 경험은 언젠가 나를 더 유연하고 단단하게 만들어주는 재료가 되더라고요.

**[여성2-1 | 15:35]**

Do we really need to be superhuman to pursue a career in materials science?: Aleksander Albrecht\*, Se-Ho Kim(Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 0284) Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea, Republic of Korea)

**Keywords:** Sustainability in research, Curie trap, Matilda effect, gender diversity in STEM

The most prominent figures in science have always been presented as role models. Marie Curie-Skłodowska is one such figure, one of only five individuals to have been awarded the Nobel Prize twice. The pace of progress in science forces us to think that this is the only way. We all would love to reach this level of excellence, and it is too easy to be caught in the so-called “Curie Trap”. It is a sustainability issue. This attitude might be especially harmful to younger people, who are just choosing their future path. Setting an almost impossibly high bar might lead to the belief that one has to be a Nobel-prize-level scientist to even consider a future in academia. What might lead to even more disastrous consequences is the Matilda effect – the tendency to overlook the achievements of great female scientists, like Lise Meitner, one of the inventors of nuclear fission and discoverer of the cause of the Auger-Meitner effect. It seems that not only do women need to be geniuses, but they also need to be lucky to get acknowledged. That is well represented in the ratio of male to female Nobel Prize laureates. For individuals, it equals 14:1. There are positives in that story. The knowledge about great scientists, especially female, who are relatable to each person individually, is getting increasingly abundant. Despite historical and economic challenges Poland faced in the 20<sup>th</sup> century, some great scientists, like Stephanie Kwolek, inventor of Kevlar, are of Polish origin. Others engaged in manual labor to support their families during their growing up, like Mildred Dresselhaus, the “Queen of Carbon Science”. Thanks to digital media, these relatable figures are even closer now. For example, ‘Physics Girl’, with over 3.5 M subscribers on YouTube, or slightly less known ‘dykanite’, PhD student in geology, who is currently fighting the stereotype that “science was built by men”. Another factor that helps to foresee a better future for materials science is campaigns carried by industrial giants, like Polish Orlen’s “Women in science”, that aim to not only give due credit to female innovators but also motivate the young generation to engage with materials science. To test these theses, I am carrying out a survey for a group of students and PhD students from Poland and other European countries about their perception of the Matilda effect, the Curie trap, scientists they look up to, and the most encouraging vs discouraging aspects of their work. I would like to point out that both academic and industrial communities should foster equality of motivation, possibilities, attitude, and recognition. It cannot be carried as a charity, but as an opportunity to finally show due respect and evolve the whole materials science by encouraging women to join the field. Yet, the historical gender imbalances must be made up for.

**[여성2-2 | 15:50]**

희소금속 신제련법 연구의 시행착오 및 해결사례: 송영주, 강정신\*(서울대학교)

**Keywords:** 희소 금속, 금속 제련, 대학원생

타이타늄 (Ti)은 높은 비강도와 우수한 내식성 및 생체적합성을 갖는 희소금속으로 수요가 지속해서 증가하고 있으나, 국내 상용공정이 부재하고 이산화타이타늄 (TiO<sub>2</sub>)으로부터 고순도·저산소 Ti 금속 직접 제조 공정은 대표적 고난도 연구로써 현재 실험실 수준에서만 연구가 이루어지고 있다. 또한 차세대 이차전지인 전고체전지의 핵심 원료 물질인 황화리튬 (Li<sub>2</sub>S) 역시 높은 흡습성으로 인해 제조가 까다로워, 전세계적으로 대량생산에 성공한 사례는 제한적으로 보고되고 있다. 본 발표에서는 마그네슘 (Mg) 열환원법을 이용한 친환경 저산소 Ti 직접 제조법 및 탄소 (C) 열환원법을 이용한 황산리튬 (Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)로부터 고순도 Li<sub>2</sub>S 제조법을 대상으로 희소금속의 신제련법 개발 시 겪었던 시행착오와 연구 성과 및 연구를 지속하기 위해 설정했던 기준과 문제 해결방법을 공유하고자 한다. 이를 통해 동일한 연구 분야 또는 유사한 진로를 고민하고 있는 대학원생들에게 참고 사례를 제공하고자 한다.

**[여성2-3 | 16:05]****질문으로 만들어진 초보 연구자의 첫걸음:** 이지원, 최현주\*(국민대학교)**Keywords:** 일상, 성장, 학부연구생, 석사

저는 학부 시절 2년간 학부연구생으로 연구실 생활을 경험하며 연구의 기본적인 흐름과 실험 문화에 익숙해질 수 있었습니다. 다만 대학원 진학은, 경험이 있음에도 불구하고 이제는 더 주도적으로 책임을 지고 스스로 방향을 만들어가야 한다는 점에서 또 다른 단계의 도전으로 다가왔습니다. 그 과정에서 제가 가장 중요하게 붙잡은 것은 모르는 것을 숨기지 않고 배우려는 태도였습니다. 연구실에서 저는 궁금한 점이 생기면 즉시 질문하고, 답을 들은 뒤에는 직접 실행하며 확인하는 방식으로 학습해왔습니다. 질문-실행-점검-재질문의 과정을 반복하면서 시행착오를 줄이고 이해의 폭을 넓혔고, 이러한 성향 때문에 연구실 내에서는 ‘질문 살인마’라는 별명도 생겼습니다. 때로는 “질문은 하루에 한 개씩만 하자”는 농담 섞인 조언을 듣기도 했지만, 그 말은 제게 질문을 억제하라는 의미라기보다 배움을 지지해주는 분위기 속에서 성장하고 있다는 신호로 받아들여졌습니다. 질문이 잦다 보니 때로는 선배들께 번거롭게 느껴질 수도 있겠다고 생각한 적도 있습니다. 그럼에도 연구실 선배들은 질문을 학습 의지와 책임감의 표현으로 받아들이 주었고, 저는 그 분위기 속에서 부족함을 감추기보다 드러내고 채워가는 방식으로 성장할 수 있었습니다. 특히 초입 연구자에게 중요한 것은 완성된 성과를 빠르게 내세우는 것이 아니라, 스스로의 ‘모름’을 정확히 인식하고 이를 학습과 실행으로 연결해 나가는 과정임을 경험적으로 배웠습니다. 본 발표에서는 학부연구생 2년의 경험을 바탕으로 대학원 과정에 진입하며 마주한 변화와, 질문과 실행을 중심으로 한 학습 방식이 연구 태도 및 성장에 미친 영향을 공유하고자 합니다. 또한 선배 연구자들과의 상호작용 및 연구실 문화가 초입 연구자의 불안을 완화하고 지속적인 성장을 가능하게 만든 요인으로 어떻게 작용했는지 함께 논의하고자 합니다.

**[여성2-4 | 16:20]****알루미늄 연구실의 일상:** 전서연, 최현주\*(국민대학교)**Keywords:** 알루미늄, 대학원생, 연구실, 일상

본 발표는 빅데이터 기반 고속 스크리닝(High-Throughput Screening) 기술을 활용하여 Al-Cu 합금 내 신규 석출물을 탐색하고 있는 평범한 박사과정 1년차로서, 저의 연구실 생활을 돌아보고 현재의 고민과 앞으로의 마음가짐에 대해 이야기를 나누고자 합니다. 박사과정이라는 새로운 도전을 시작하며 마주한 연구의 현실과 성장의 과정을 담백하게 공유하고자 합니다. 특히 연구 주제를 설정하고 실험을 수행하는 과정에서, 대학원생이라면 누구나 한 번쯤 겪게 되는 보편적인 고민들과 이를 대하는 태도에 대해 다루려 합니다. 또한, 연구 성과에 대한 조급함보다는 꾸준히 데이터를 축적하고 해석해 나가는 과정 자체에서 의미를 찾고자 하는 연구자로서의 소회와, 앞으로 그려나갈 미래에 대한 생각도 함께 나누고자 합니다. 이러한 평범한 이야기들을 통해, 치열한 연구 환경 속에서 비슷한 길을 걷고 있는 동료 연구자들과 소박한 공감대를 형성하고, 잠시나마 서로의 고민을 환기할 수 있는 시간이 되기를 기대합니다.

## 비철금속

Room 3층 300, 4월 28일

### [비철1-1 | 09:00]

**국내 저품질 타이타늄 정광으로부터 고순도 이산화타이타늄 제조 공정 개발:** 이태혁, Shakib Benyamin, 강희남, 이진영(한국지질자원연구원), 강정신\*(서울대학교)

**Keywords:** 타이타늄, 소다배소, 이산화 타이타늄, 국내산 정광

타이타늄 (Ti)은 Ti 금속 또는 이산화타이타늄 (TiO<sub>2</sub>)으로 제조되어 항공우주, 자동차, 화장품, 건축자재 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 우리나라에는 Ti 금속 제련산업은 없으나 TiO<sub>2</sub>의 경우 해외 Ti 정광을 수입 후 황산법을 이용한 아나타제형 TiO<sub>2</sub>을 제조하고 있다. Ti는 지구 지각 중 매우 풍부한 원소로써 국내에도 Ti 광산이 존재하며, 최근 강원도 태백시 면산 지역에 Ti 광맥이 발견되어 Ti 자원에 대한 탐사, 선광 및 제련에 관한 전주기 연구가 이루어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 면산층 Ti광의 선광을 통해 제조된 정광 중 저품질 정광으로부터 고부가가치 루타일형 TiO<sub>2</sub> 제조를 위한 소다배소 - 침출 및 용매추출 - 가수분해 공정 개발 결과를 논의하고자 한다.

### [비철1-2 | 09:15]

**MoO<sub>3</sub> 생산을 위한 MoS<sub>2</sub> 산화 거동 및 로터리 킬른 공정 최적화 연구:** 최정호\*, 한성수(한국지질자원연구원(KIGAM), 과학기술연합대학원대학교(UST))

**Keywords:** 몰리브데나이트, 로터리 킬른, 산화 로스팅, 전환율, 응집물

몰리브덴 (Mo)은 합금강, 특수강 등 국내의 철강 산업에서 핵심 원료로 사용된다. Molybdenite (MoS<sub>2</sub>) 정광을 기초 원료로 사용하며, 산화 로스팅을 (oxidation roasting) 거쳐 황(S) 함량이 낮은 Technical grade 삼산화 몰리브덴 (TG-MoO<sub>3</sub>)을 생산하고, 이를 후속 공정을 통해 페로 몰리브덴 (FeMo)으로 전환한다. MoS<sub>2</sub> 산화 로스팅은 MoO<sub>3</sub> 생산의 핵심 단계이며 MoO<sub>3</sub> 생산량과 품위에 직결된다. MoS<sub>2</sub> 산화 로스팅은 다단 배소로 (Multiple Hearth Furnace, MHF)에서 진행되는 것으로 알려져 있으나, 안정적인 MHF 운영 조건을 유지하는 것은 비교적 어렵다. 이에 로터리 킬른 (Rotary kiln) 공정이 대안으로 떠오르나, 로터리 킬른에서 로스팅 동안의 MoS<sub>2</sub>의 산화 거동에 대한 기초 연구가 부족하다. 따라서, 본 연구에서는 로터리 킬른의 핵심 공정 변수인 드럼의 회전 속도, 온도, 산소 포텐셜이 MoS<sub>2</sub> 산화 거동에 미치는 영향에 대하여 평가하였다. 본 실험은 85% 순도 및 평균 입자 50 μm의 MoS<sub>2</sub> 정광 분말 20 g을 사용하였으며, 실험실 규모의 로터리 킬른에서 산화 로스팅을 진행하였다. 승온 과정 중 MoS<sub>2</sub> 정광의 산화 방식을 위해 질소 (N<sub>2</sub>) 가스를 지속적으로 주입했으며, 목적하는 온도에 도달한 후 1시간 동안 1L/min의 유량으로 공기 (Air)를 유입하였다. 주요 변수는 드럼 회전 속도 (0, 5, 10 rpm)와 온도 (550, 600, 650 °C), 산소 포텐셜 (Air, 50%Ar-50%O<sub>2</sub>, pure O<sub>2</sub>) 일정 시간 간격에 맞추어 (5, 10, 30, 60분) 샘플을 확보하였다. 얻어진 샘플은 성분 및 상 분석을 하였으며, 응집 현상의 정량화를 위해 시간별 샘플의 응집물의 질량을 함께 평가하였다. 드럼 회전 속도를 5 rpm 이상으로 높일 경우, S 감소율이 크게 증가하여 60분 내 S 함량이 5% 이하로 감소했다. 초기 S 감소율은 온도가 증가함에 따라 비례하였으나, 최종 S 함량은 온도에 반비례함을 확인하였다. 또한, S 감소율은 산소 포텐셜에 비례하였다. 일반적으로 드럼 회전 속도와 반응 시간에 비례하여 MoS<sub>2</sub>에서 Mo<sub>x</sub>O<sub>y</sub> = (MoO<sub>2</sub> + MoO<sub>3</sub>)로의 전환율이 증가하였고, 5 - 10 rpm 및 550 - 600 °C, 50%Ar-50%O<sub>2</sub> 및 pure O<sub>2</sub> 조건에서 90% 이상의 MoO<sub>3</sub>의 전환율을 확보하였다. S 감소율과 MoO<sub>3</sub>의 전환율은 응집현상에 영향을 받음을 확인하였고, MoS<sub>2</sub> 산화 trajectory를 함께 평가하였다. 본 연구를 바탕으로, MoS<sub>2</sub> 산화에 있어 로터리 킬른의 적절한 공정 윈도우를 설정할 수 있었으며, 결론적으로 적절한 온도, 드럼 회전속도 및 산소 포텐셜을 제어하는 것이 중요함을 확인하였다.

### [비철1-3 | 09:30]

**싸이클론 전해 공정을 이용한 폐 LFP 배터리 내 희소금속의 친환경 선택적 분리 및 회수 거동 연구:** 이현준(과학기술연합대학원대학교, 한국지질자원연구원), 최영중, 이현주, 배무기, 최종원(한국지질자원연구원), 김수경\*(과학기술연합대학원대학교, 한국지질자원연구원)

**Keywords:** 싸이클론 전해 공정, 리튬이차전지, 분리정제, 희소금속, 친환경

전기차 시장의 급성장에 따라 리튬인산철(LFP) 배터리의 폐기량 또한 급증하고 있으며, 이에 포함된 리튬(Li)과 같은 희소금속의 지속 가능한 회수 기술 확보가 핵심 과제로 부상하고 있다. 본 연구에서는 기존의 정적인 전해 공정의 한계를 극복하고자, 고속 전해액 흐름을 유도하는 싸이클론 전해조(Cyclone Electrowinner)를 활용하여 LFP 폐기물로부터 유가금속을 고효율·친환경적인 방법으로 분리·정제하는 공정을 제안한다. 본 연구에서는 LFP 파우더의 산 침출액을 전해액으로 사용하였으며, 싸이클론 전해 시스템 내에서 전류 밀도 및 유량 등 주요 공정 변수에 따른 금속 회수 특성을 분석하였다. 특히 전해 공정 진행에 따른 전해액 내 이온 농도 변화와 pH 거동을 모니터링하여 최적의 분리 조건을 도출하였다. 실험 결과, 싸이클론 전해조 내의 높은 난류 강도는 이온의 물질 전달 속도를 비약적으로 향상시켰으며, 농도 분극 현상을 억제하여 저농도 침출액에서도 높은 전류 효율을 유지함을 확인하였다. 공정 초기 pH 1.8에서 시작된 전해액은 반응이 진행됨에 따라 2.3까지 상승하는 거동을 보였으며, 이러한 pH 변화는 특정 전위 영역에서 철(Fe)과 리튬(Li)의 선택적 분리를 제어하는 핵심 인자로 작용하였다. 전착된 금속의 순도 분석 결과, 싸이클론 공정을 통해 고순도의 희소금속 회수가 가능함을 입증하였다. 본 연구는 싸이클론 전해 기술이 LFP 배터리 재활용 공정에서 희소금속 회수를 극대화할 수 있는 유망한 대안임을 보여준다. 이는 향후 친환경적인 자원 순환형 배터리 생태계 구축 및 전략 금속 자립화에 크게 기여할 것으로 기대된다.

**[비철 1-4 | 09:45]**

**A Study of Acidic-Neutral Solvent Extraction Systems for Enhanced Nickel Selectivity from Electroplating Sludge:** Burhan Febrinawarta(Korea Institute of Industrial Technology, University of Science and Technology), Myungsuk Kim(Korea Institute of Industrial Technology, Korea University), Kyoung-Tae Park, Jae Hong Shin\*(Korea Institute of Industrial Technology, University of Science and Technology)

**Keywords:** Nickel Recovery, Electroplating Sludge, Solvent Extraction, Sustainable Recycling

Electroplating sludge is a hazardous industrial residue that contains significant amounts of nickel along with copper, chromium, zinc, iron, and other impurities. Despite its environmental risks, it represents a valuable secondary resource for producing high-purity nickel. However, conventional recycling methods often lack selectivity, resulting in co-recovery of impurities and reduced product quality. Although acidic extractants such as Cyanex 272 have shown effectiveness in nickel extraction, their selectivity in complex multi-metal systems remains limited. This study investigates acidic-neutral extractant systems to enhance nickel selectivity from electroplating sludge leachate via solvent extraction. Acidic extractants were combined with tributyl phosphate (TBP) on an equimolar basis to enable consistent comparison with single acidic and mixed acidic systems. The extraction performance of the acidic-TBP systems was evaluated by systematically varying the equilibrium pH, extractant composition, organic-to-aqueous (O/A) phase ratio, and degree of saponification. Extraction efficiency, distribution ratios, and separation factors were determined to assess improvements in nickel selectivity and suppression of impurity extraction. The incorporation of TBP broadened the effective operating pH range and, in selected systems, reduced the co-extraction of competing metals. Comparative analysis showed that certain acidic-neutral combinations achieved higher nickel selectivity than purely acidic mixtures under identical conditions. These results demonstrate the potential of acidic-neutral extractant systems as an improved solvent extraction strategy for selective nickel recovery from complex electroplating sludge leachates.

**[비철 1-5 | 10:00]**

**알루미늄 합금 재자원화를 위한 염 플럭스 기반 Fe 제거 및 용융염 물성 평가:** 이자성(인하대학교), 김영재, 강민우, 이지용(현대자동차), 김영재\*(인하대학교)

**Keywords:** 알루미늄 재활용, 정련, 염플럭싱, 분자동역학 시뮬레이션

자동차 산업에서 차체 경량화를 통한 에너지 효율 향상과 배출 가스 저감이 주목받고 있으며, 이에 따라 비강도가 우수한 알루미늄 합금 적용이 활발히 검토되고 있다. 하지만 알루미늄은 생산 과정에서 막대한 에너지를 필요로 하며, CBAM 등 국제 규제에 따른 2차 알루미늄의 확보가 공급망 측면에서 커다란 리스크로 작용하고 있다. 따라서 국내에서도 알루미늄을 재활용하여 2차 알루미늄을 확보하는 저탄소 그린 알루미늄 공급의 중요성이 커지고 있다. 2차 알루미늄은 원료로부터 알루미늄을 생산하는 일반적인 제련 공정 대비 에너지 소비를 크게 절감할 수 있으나, 자동차용 스크랩은 합금 원소와 불순물이 혼재되어 고순도의 알루미늄 금속을 회수하기 어렵다. 특히 알루미늄 내 다양한 불순물 중 Fe는 기계적 특성 저하 및 주조 결함을 유발하는 난분리성 불순물로 알려져 있다. 국내의 알루미늄 리사이클링 연구는 알루미늄 캔에 대한 기초적인 리사이클링 기술로 염플럭싱법을 주요 공정으로 하고 있으나 Fe 제거에는 제한적인 단점이 있다. 기존 전해 정련 제거법은 경제성 또는 공정 복잡도 측면에서 산업 적용에 한계가 있다. 본 연구는 산업적 접근성과 경제성이 비교적 우수한 염 플럭싱 공정을 기반으로 알루미늄 합금 재자원화를 위한 Fe 정련 기술을 연구하였다. Fe 분리가 가능한 용융염을 설계하고 Fe 정련 한계를 도출하였다. 실제 공정에서의 적용 가능성을 검토하기 위하여 고온에서의 용융염 물성인 점성과 밀도를 평가하였다. 또한 분자동역학 시뮬레이션을 통하여 실험 결과를 검증하고, 알루미늄 재활용을 위한 용융염계의 모사 가능성을 확인하였다.

**[비철 2-1 | 10:25]**

**구리-스테인리스강 이종 접합을 위한 저온·무플럭스 브레이징 용가재의 조성 설계 및 접합 거동:** 이찬양, 마은호, 오민철, 김진홍\*(고등기술연구원)

**Keywords:** Filler metal, Brazing, Hybrid interface, Mutual wettability, Interfacial microstructure, Thermal Fatigue

AI 기술 확산에 따라 고밀도 연산 장비에서 발생하는 열부하가 급증하면서, 서버 냉각 시스템의 신뢰성과 효율 확보가 중요한 과제로 부각되고 있다. AI 서버의 쿨드플레이트에는 높은 열전도도를 갖는 구리가 적용되지만, 냉각수 순환 계통에는 기계적 강도와 구조적 안정성이 우수한 스테인리스강이 요구되어 구리-스테인리스강 이종재 접합 기술이 필수적이다. 접합기술 중 브레이징은 물성 차이가 큰 이종 금속을 저온에서 접합할 수 있는 유효한 공정이나, 기존 Ag-Cu계 용가재는 높은 은 함량과 플럭스 사용이 필요하다는 한계가 있다. 본 연구에서는 무플럭스 브레이징이 가능한 Cu-Ag-P-Sn계 용가재를 설계하고, Ag 및 P 함량 변화에 따른 용융 거동, 젖음성, 계면 미세조직 및 접합 특성을 평가하였다. Ag 함량 증가는 용융 안정성과 젖음성을 향상시킨 반면, 과도한 P 함량은 취성 Cu-P 계 상 형성을 유도하여 접합 특성을 저하시켰다. 그중 55Cu-20Ag-5P-20Sn(wt.%) 조성은 안정적인 젖음 거동과 균일한 계면 조직을 나타냈으며, 은 함량이 낮음에도 불구하고 상용 Ag계 용가재와 유사한 접합 강도를 확보하였다. 본 연구 결과는 저온·무플럭스 Cu-Ag-P-Sn 용가재가 고신뢰성 구리-스테인리스강 접합을 위한 대안 소재로 활용 가능함을 보여준다.

**[비철 2-2 | 10:40]**

**전기차 고전압 릴레이용 동합금의 기계적 특성이 미세조직에 미치는 영향에 대한 연구:** 남효문\*, 박철민, 최영철, 문선영((주)풍산)

**Keywords:** 고전압 릴레이, 전기전도도, 내연화온도, 석출처리, 정출물

전기차 고전압 릴레이 접점 소재는 아크에 의한 용손/용착 저항, 낮은 안정적인 접촉저항, 고온 연화 저항과 함께 높은 전기전도도와 경도를 동시에 요구한다. 본 연구에서는 Cu-Cr-X 계열과 Cu-Te-X 계열의 동합금 접점 소재를 합금설계 및 최적화 공정을 제조하고, 기계적 특성 평가와 TEM/SEM 기반 미세조직 분석하였다. Cu-Cr-X 계열은 Cr 기반 석출경화에 미량원소를 첨가하여 전기전도도, 경도, 내연화온도의 균형을 최대한 확보를 목표로 하였다. TEM/EDS 분석을 통해 Cu 기지 내 Cr와 미량원소에 따른 미세 석출물의 크기, 밀도를 분석하였다. Cu-Te-X 계열은 Te 첨가과 미량원소에 따른 정출물의 형상과 분포를 SEM/EDS로 규명하고, 기계적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 두 합금은 석출경화 기반(Cu-Cr-X 계열)과 정출물 기반 제어(Cu-Te-X 계열)라는 상이한 미세조직 설계를 통해 접점용 동합금의 최적 요구 특성에 도달하고자 하였다. 본 연구 결과는 전기차 고전압 릴레이 접점 소재의 합금설계 및 공정을 최적화 하며, 향후 전기차 고전압 릴레이용 고신뢰 접점 동합금 개발에 활용될 것으로 기대된다.

### [비철2-3 | 10:55]

**Contact-Killing Performance of Copper Alloys Against Multidrug-Resistant Bacteria on High-Touch Surfaces:** MUN SUNYOUNG\*, PARK CHEOL MIN, NAM HYO MOON, Choi Young-cheol, Kim Jun-hyeong, Park Seung-hoon(Poongsan R&D)  
**Keywords:** Copper, Copper alloy, antibacterial activity, antiviral activity, antibiotic-resistant bacteria

Copper has long been recognized as a material with broad-spectrum antimicrobial activity, and the use of copper-based materials has been reported in environments where hygiene control is critical. While the bactericidal effect of high-purity copper is relatively well established, copper alloys with reduced copper content—advantageous in industrial applications due to their strength, durability, manufacturability, and cost competitiveness—also exhibit antimicrobial activity. In particular, these copper alloys not only inactivate common bacteria but also demonstrate bactericidal efficacy against multidrug-resistant “superbugs.” In this study, we evaluated and compared the contact-killing performance of two copper alloys with different copper contents using representative multidrug-resistant pathogens associated with healthcare-related infections. Stainless steel, widely used in medical and public facilities, was included as a reference material. Standardized bacterial suspensions were inoculated onto each material surface, and surviving bacteria were quantified over time by culture-based enumeration (colony-forming unit, CFU counts) to compare inactivation behaviors among materials. The results showed that, although the killing rate varied depending on copper content, the copper alloys exhibited clear and time-dependent bactericidal activity. In the copper-alloy group, viable multidrug-resistant bacteria decreased to the limit of detection within approximately 4 hours. In contrast, bacterial survival persisted for a substantially longer period on stainless steel and the reference alloy surface, suggesting a higher potential risk of indirect cross-contamination. Therefore, applying copper and copper-alloy materials to high-touch components in hospitals and public facilities (e.g., door handles, handrails, and switch panels) may provide a practical strategy to reduce surface contamination and cross-transmission of multidrug-resistant bacteria while maintaining mechanical reliability for industrial use.

### [비철2-4 | 11:10]

**불균일 핵생성상 제어를 통한 Cu-Ni-Si계 합금의 강도 향상:** 정현우, 신지용(한국재료연구원, 부산대학교), 정일석, 최은애(한국재료연구원), 권세훈(부산대학교), 한승진\*(한국재료연구원)

**Keywords:** Cu-Ni-Si alloy, Inclusion, Ni<sub>2</sub>Si, Grain boundary phase, Ni<sub>16</sub>Mn<sub>6</sub>Si<sub>7</sub>

Cu-Ni-Si 합금의 기계적 특성은 주 강화상인 Ni<sub>2</sub>Si 석출물의 형성 및 분율에 의해 결정되며, Ni 및 Si 함량 증가에 따라 강도가 향상된다. 그러나 첨가 원소의 함량 증가는 결정립계에서 불균일 핵생성을 유도하여, 부정형의 조대한 Ni<sub>2</sub>Si 개재물 형성을 초래한다. 이러한 개재물은 결정립 내부 강화상 형성을 저해할 뿐만 아니라, 소성변형 과정에서 개재물 기점의 응력 집중을 유발하여 기계적 특성을 저하시킬 수 있다. 본 연구에서는 이러한 결정립계 개재물 문제를 완화하기 위하여 Mn을 첨가하고, 이에 따른 결정립계 상의 형상 및 구조 변화를 분석하였다. Cu-6Ni-1.25Si 및 Cu-6Ni-1.25Si-2.14Mn 합금을 980°C에서 8시간 균질화 처리한 후 다양한 압하율로 냉간 압연을 수행하였다. Mn이 첨가된 합금은 균질화 처리 직후부터 더 높은 강도를 나타냈으며, 압하율 증가에 따른 강도 증가 폭 또한 크게 나타났다. 미세조직 분석 결과, Cu-6Ni-1.25Si 합금의 결정립계에 형성되던 부정형의 조대한 Ni<sub>2</sub>Si 개재물은 Mn 첨가 시 필름 형상의 Mn<sub>6</sub>Ni<sub>16</sub>Si<sub>7</sub> 화합물로 변화하였다. 이러한 결정립계 상의 변화는 개재물 분율을 감소시켜 결정립 내부 강화상의 분율을 상대적으로 증가시키는 효과를 보였으며, 연속적인 필름 형상은 소성변형 시 응력 집중을 완화하는 데 기여하였다.

### [비철2-5 | 11:25]

**시효 처리에 따른 Cu-Ni-Si 합금의 연속 및 불연속 석출 거동 분석:** 장점아(경상국립대학교), 김규낙(경상국립대학교, 한국재료연구원), 안지혁(한국재료연구원), 강성규\*(경상국립대학교)

**Keywords:** Cu-Ni-Si 합금, 시효 열처리, 석출 거동, 불연속 석출, 활성화 에너지

Cu-Ni-Si 합금은 시효 처리 시 연속 석출물과 불연속 석출물이 형성되며, 특히 불연속 석출물 형성 시 강도 대비 높은 전기전도도를 얻을 수 있다. 연속 석출물에 대한 연구는 활발히 이루어진 반면, 불연속 석출물의 분포와 성장 거동에 대한 연구는 상대적으로 부족하다. 본 연구에서는 Cu-4.5Ni-0.95Si, Cu-6Ni-1.26Si 합금의 불연속 석출 거동을 시효 온도 및 시간을 달리하여 분석하였다. 대기 주조 후 50 % 열간 압연 및 용체화 처리(980 °C, 1 h)를 거친 합금을 각각 500 °C, 525 °C, 550 °C에서 20분부터 최대 300분 동안 시효 처리 후 관찰한 미세조직을 바탕으로 전기전도도와 비커스 경도 변화를 분석하였다. 그 결과 500 °C, 525 °C,



550 °C에서 시효한 조건 모두에서 과시효에 따른 라멜라 구조의  $\delta$ -Ni<sub>2</sub>Si 불연속 석출물이 형성됨을 확인하였고, 불연속 석출물의 성장에 따라 전기전도도는 증가하고, 비커스 경도는 점차 감소하는 경향을 확인하였다. 또한 불연속 석출물의 성장 동역학 분석을 통해 시효 온도에 따라 불연속 석출물의 형성 및 성장 속도가 변화하는 것을 관찰하고 그에 영향을 미치는 미세조직적 요인들을 확인하였으며, 이를 바탕으로 불연속 석출의 입계 확산 활성화 에너지를 조성별로 각각 정량화하였다. 본 연구는 향후 Cu-Ni-Si 합금의 연속 및 불연속 석출 메커니즘 규명 및 열처리 조건 선정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### [비철3-1 | 14:00]

**Cu-Ni-Co-Si-Cr-Sn 합금의 가공 경화 및 시효 거동에 미치는 용체화 처리 온도의 영향:** 황지인(한국재료연구원), 정현우(한국재료연구원, 부산대학교), 최문수, 최은애\*, 한승전\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 동합금, 용체화 처리 온도, 가공 경화, 불균일 핵생성, 입자 강화

본 연구에서는 고강도와 고전도성이 동시에 요구되는 리드 프레임 및 커넥터용 소재를 개발하기 위해 Cu-Ni-Co-Si-Cr-Sn 합금의 가공 경화 및 시효 거동에 미치는 용체화 처리 온도의 영향을 조사하였다. 해당 합금을 각각 830, 930 °C에서 용체화 처리한 후, 균일 및 불균일 변형 조건에서 압연하였고, 이후 시효 처리하여 물성과 미세조직을 분석하였다. 830 °C에서 용체화 처리된 시편은 압연 및 시효 과정에서 경도 상승 폭이 모두 낮게 나타났다. 이는 저온 용체화 처리의 낮은 고용도로 인해 다량의 개재물을 기지 내에 잔류시키며, 기지 내 용질 원자 농도가 감소함에 따라 가공 경화를 또한 저하된 것으로 판단된다. 또한, 시효 시 잔류 개재물이 주변 용질 원자를 우선적으로 흡수하며 조대화됨에 따라 석출에 의한 경화 효과가 감소하였다. 반면, 930 °C 용체화 처리 시편은 압연 시 높은 경도 상승을 보였으며, 후속 시효 처리에서도 석출 경화 효과가 크게 나타났다. 이는 고온 용체화 처리가 고용도를 높여 잔류 개재물을 재용해시켜 기지 내 용질 원자 농도를 높임으로써 가공 경화능을 향상시킨 것으로 판단된다. 또한, 증가된 전위 밀도가 시효 시 석출물의 불균일 핵생성을 촉진하였다. 결론적으로 Cu-Ni-Co-Si-Cr-Sn 합금의 고온 용체화 처리를 통해 압연과 시효 처리를 거쳐 높은 전기전도도와 강도를 동시에 달성할 수 있음을 확인하였다.

### [비철3-2 | 14:15]

**Enhanced strength and electrical conductivity in Cu-Ni-Co-Si alloys by manipulating chemical composition and thermomechanical treatment:** Alireza Derakhshandeh, Hamed Shahmir\*(Tarbiat Modares University), Farsad Forghani(Alloyed Ltd), Shi Woo Lee(POSTECH), Hyoung Seop Kim(POSTECH)

**Keywords:** Cu-Ni-Co-Si alloys, Microstructure engineering, Thermomechanical treatment, Heterostructure, Mechanical properties, Electrical conductivity

An exploration of Cu-Ni-Co-Si alloys was performed through combined approaches of alloy and thermomechanical treatment designs in order to improve the strength and electrical conductivity of Cu-based alloys, simultaneously. It had been shown by CALPHAD approach that manipulating the chemical composition by changing the Co content (Cu-2.5Ni-0.5Si, Cu-1.5Ni-1.0Co-0.5Si and Cu-1.0Ni-1.5Co-0.5Si all in wt.%) leads to decrease in stacking fault energy, with no significant change of volume fraction of secondary phase, which is an important factor for microstructure tuning through thermomechanical treatment. Three alloys processed by a simple thermomechanical treatment including severe cold rolling (80% thickness reduction) followed by post-deformation annealing/aging and then moderate cold rolling (40% thickness reduction). Annealing/aging temperature and time were considered as variables of the conducted treatments which were in a range of 350-550 °C and 0.5-6 hours, respectively. The results indicate formation of a heterostructure consisting of recrystallized and deformed regions in Co-containing alloys, while a simple deformed microstructure formed in Co-free alloy after post-deformation annealing/aging at 500 °C for 1 hour. Strength and electrical conductivity of different processed alloys through this thermomechanical treatment were also studied and the strength of 785 MPa and the electrical conductivity of 50 IACS% was attained in the Cu-1.5Co-1.0Ni-0.5Si alloy. This suggests superior mechanical and electrical properties for advanced electrical applications.

### [비철3-3 | 14:30]

**통전 처리에 따른 Cu-4.5Ni-0.95Si 합금의 석출 거동 및 기계적 특성 변화:** 정의화(경상국립대학교), 김규낙(경상국립대학교, 한국재료연구원), 안지혁(한국재료연구원), 최동인, 한홍남(서울대학교), 강성규\*(경상국립대학교)

**Keywords:** 구리합금, 시효, 통전, 석출강화, 불연속 석출물, kinetics

Cu-Ni-Si계 합금은  $\delta$ -Ni<sub>2</sub>Si 석출에 의해 강도가 향상되는 대표적인 석출 강화형 합금이다. 시효 과정에서 발생하는 연속 석출(CP)과 불연속 석출(DP)은 기계적 특성과 전기전도도에 직접적인 영향을 미치지만, 기존 열처리 공정은 DP 형성까지 최소 30분에서 최대 24시간 이상의 긴 시간이 소요되어 공정 시간 단축(효율 향상)에 한계가 있다. 본 연구에서는 기존 열처리 대비 미세조직 변화를 가속하는 것으로 알려진 통전처리(electrical current treatment, ECT)를 Cu-4.5Ni-0.95Si 합금에 적용하여 석출 거동 및 기계적 특성에 미치는 영향을 규명하였다. 75~80 A/mm<sup>2</sup>의 전류 밀도 조건에서 시효를 진행한 결과, 동일 시효 조건에서 ECT 시편의 DP 면적 분율이 열처리 대비 10배 이상 증가하여 DP 거동의 현저한 가속화를 확인하였다. 또한, 나노인덴테이션 및 투과전자현미경(TEM) 분석을 통해 시효 초기 CP 거동을 관찰하였으며, 전기전도도 기반의 석출 진행도  $X(t)$ 를 정의하여 CP 구간의 석출 kinetics를 정량적으로 비교 분석하였다. 본 연구는 통전을 활용한 Cu-Ni-Si 합금의 미세조직 제어 가능성을 제시하며, 향후 전위 회복과 석출 강화의 복합 메커니즘을 규명함으로써 합금 특성 최적화에 기여할 것으로 기대된다.

**[비철3-4 | 14:45]**

**저온 용사 가스 압축 온도 및 후열처리 조건이 구리 적층재 물성 및 알루미늄과의 접합강도에 미치는 영향:** 안지영(한국재료연구원, 경북대학교), 김형준, 김규낙(한국재료연구원), 조현욱(SHKOREA), 최돈현(현대모비스), 민경문(한국재료연구원), 박성혁\*(경북대학교), 안지혁\*(한국재료연구원)

**Keywords:** Copper, Aluminium, Cold Spray, Annealing, Intermetallic compound

구리-알루미늄 이중접합 소재는 우수한 비강도와 전도도를 가져 차세대 버스바 및 방열판에 사용된다. 금속 분말을 상온에서 초음속으로 분사하는 저온 용사 공정은 산화를 최소화하고 원하는 표면에 분말을 고르게 적층할 수 있는 장점을 가져 이중접합 소재 제조 기술로 주목받고 있다. 그러나, 저온 용사 공정으로 적층한 구리는 결합이 많아 전도도가 낮고, 알루미늄과의 계면이 기계적 결합으로만 유지되어 클래딩 이중접합 소재보다 접합강도가 낮다는 한계점이 있다. 이에 본 연구에서는 적층 후 열처리를 통해 적층 구리의 결합을 낮추고, 알루미늄과의 접합면을 화학적으로 결합시켜 안정화하고자 하였다. 가스 압축 온도 700 ~ 1,000°C 및 가스 압력 50 Bar에서 순 알루미늄 기판에 구리 분말을 저온 용사 공정으로 적층한 후, 300°C에서 0 ~ 9 h 까지 열처리 하였다. 전도도 측정 결과, 구리 적층재의 전도도는 가스 분사 온도 및 후열처리 시간이 증가할수록 향상되었다. EBSD 및 XRD 분석 결과, 가스 압축 온도 증가는 동적재결정을 유도하고, 후열처리는 전위를 회복시키는 것으로 나타났다. 결국 이는 구리의 전위밀도를 감소시켜 전도도를 향상시켰다. 구리와 알루미늄 접합면 미세조직 분석 결과, 가스 압축 온도와 후열처리 시간이 증가할수록 금속간 화합물의 두께가 증가하였고, 이는 접합강도를 향상시켰다. 그러나 2  $\mu\text{m}$  이상의 금속간화합물은 오히려 접합강도를 낮췄다. 파단면 분석 결과, 이는 과도한 금속간화합물이 접합 시험 시 취성파괴를 유도했기 때문인 것으로 분석되었다.

**[비철4-1 | 15:05]**

**Cu-Cr alloy - based Shield-Cans with High Thermal Conductivity for Enhanced Thermal Performance of Smartphones:** EUNJIN PARK, JUNWOO GA, JINHWAN JUNG, JIHYEON SON, MIN PARK\*(Samsung electronics)

**Keywords:** Cu, Shield can

With the proliferation of 5G communication technology and the increasing densification and performance of mobile devices, effective thermal management of the Application Processor (AP) has become a critical factor determining smartphone performance and reliability. Conventionally, materials such as nickel silver (Cu-Ni-Zn) alloys or stainless steel have been used for shield cans; however, their low thermal conductivity hinders efficient heat spreading. Furthermore, as devices become smaller and thinner, intensifying physical constraints on internal space, there is an urgent need for research to maximize heat dissipation performance within limited mechanical spaces. In this study, we developed a high-strength and high conductivity Cu-Cr alloy to replace conventional nickel silver shield cans. The developed alloy exhibits a thermal conductivity of approximately 300W/m·K, which is 10 times higher than that of conventional nickel silver (~30 W/ m·K). When applied as a shield can and implemented in an actual smartphone, the Cu-Cr alloy effectively reduced the AP temperature, thereby enhancing device performance. Additionally, we optimized the heat balance between the front and rear of the smartphone to prevent localized heat concentration. This study proposes a novel thermal design strategy capable of controlling the direction of heat transfer according to the required performance and structure by utilizing the thermal characteristics of the material.

**[비철4-2 | 15:20]**

**The copper alloy achieves excellent mechanical properties through the construction of a multiscale microstructure:** Yijie Ban(Graduate Institute of Ferrous & Eco Materials Technology, POSTECH), Shi Woo Lee(Department of Materials Science and Engineering, POSTECH), Hyoung Seop Kim\*(Graduate Institute of Ferrous & Eco Materials Technology, POSTECH, Department of Materials Science and Engineering, POSTECH)

**Keywords:** Copper alloy, Heterogenous microstructure, Precipitate, Mechanical property

Precipitation-strengthened Cu-Ni-Si alloys usually suffer from a severe strength-ductility trade-off, where elongation typically falls below 8% once the ultimate tensile strength exceeds 800 MPa. In this study, a Cu-Ni-Si-Al alloy with a deliberately designed multiscale microstructure achieves a yield strength of 800 MPa, an ultimate tensile strength of 830 MPa, and an elongation of 15%, effectively overcoming this limitation. Microstructural characterization reveals the coexistence of  $\delta$  ( $\text{Ni}_{22}\text{Si}$ ) and coherent  $\text{L}_{12}$  precipitates. The  $\delta$  phase provides strong precipitation strengthening, while the coherent  $\text{L}_{12}$  phase allows dislocation shearing, reducing interfacial stress concentration and suppressing crack initiation. In addition, the heterogeneous grain structure and multiscale precipitate distribution promote strain partitioning and enhance strain hardening capacity, thereby improving ductility without sacrificing strength. These findings demonstrate that multiscale microstructural engineering is an effective and transferable strategy for developing high-performance copper alloys.

**[비철4-3 | 15:35]**

**Si계 무연 황동의 열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화:** 김규낙(한국재료연구원, 경상국립대학교), 민경문, 안지영, 김형준(한국재료연구원), 이진수(주) 대창), 오영석, 이운수(한국재료연구원), 강성규\*(경상국립대학교), 안지혁\*(한국재료연구원)

**Keywords:** Silicon brass,  $\kappa$  phase, Heat treatment, EBSD

Si계 무연 황동은 우수한 절삭성과 강도 및 내부식성을 가져 수도 배관용 소재로 널리 활용되고 있다. 그러나 다른 황동 대비 높

은 강도로 인해 냉간 가공 시 직진도가 낮다는 한계가 있다. 이를 개선하기 위해 압출 시 생성된 잔류응력 및 전위밀도를 열처리로 감소시키지만, 이는 Si계 무연 황동의 강도와 절삭성을 향상시키는  $\kappa$ 상을 급격히 감소시킨다. 따라서 본 연구에서는 Si계 무연 황동의 강도와 절삭성을 유지하면서 냉간 가공 직진도를 향상시키기 위한 최적의 열처리 조건을 도출하고자 하였다. Cu-20 wt.%Zn-3 wt.%Si 합금 압출재를 300, 400, 500, 600 °C에서 1, 3 h 열처리하고 이에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화를 분석하였다. EBSD 및 XRD 분석 결과, 열처리 온도가 증가함에 따라 전위밀도 및  $\kappa$ 상의 분율 감소, 결정립 성장으로 인해 합금의 강도가 감소하는 경향을 보였다. 특히 600 °C, 1, 3 h 열처리 시 압출재 대비  $\kappa$ 상의 분율이 약 68% 이상 감소하여 강도와 절삭 힘이 12 Hv 이상 저하되었다. 그런데, 400 °C 1 h 열처리 시편은  $\kappa$ 상의 분율이 거의 유지되어 강도와 절삭성이 크게 저하되지 않으면서 전위밀도와 잔류응력이 각각 32, 31 % 만큼 감소하였다. 400 °C, 1 h 열처리에 의한 전위밀도와 잔류응력 감소는 10% 봉상 압연을 통한 직진도 평가에서 11.1 mm/m을 보여, 압출재 대비 7배 이상의 직진도가 개선된 것으로 분석되었다. 결론적으로, 본 연구를 통해 Si계 황동의  $\kappa$ 상 분율을 유지하여 강도와 절삭성을 확보함과 동시에 가공 직진성을 확보할 수 있는 최적의 열처리 조건을 도출하였다.

#### [비철4-4 | 15:50]

**Al-Zn-Cu-Mg 합금의 기계적 및 마모 특성에 미치는 용체화 및 시효처리의 영향:** 신지윤, 정현우(한국재료연구원, 부산대학교), 정일석, 최은애(한국재료연구원), 권세훈(부산대학교), 한승전\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 알루미늄합금, 석출 경화, 마모 거동, 열처리

Al-Zn-Cu-Mg 합금에서 Cu와 Mg의 미량 첨가는 Zn 석출물의 안정화와 Al/Zn 계면에너지 감소를 통해 주조 응고 과정 중 Zn 석출을 촉진한다. 이로 인해 합금은 주조 상태에서도 우수한 기계적 특성과 내마모성을 나타낸다. 그러나 주조 공정 이후에도 Zn의 국부적 편석이 일부 잔존할 수 있다. 이에 본 연구에서는 Al-17Zn 및 Al-17Zn-0.5Cu-0.1Mg 합금을 대상으로 400 °C에서 1시간 용체화 처리 후 160 °C에서 단시간 시효를 실시하고, 기계적 특성과 마모 거동의 변화를 분석하였다. 그 결과, 용체화 및 시효 처리 후 기계적 특성이 향상되었으며, 마모 시험결과 마찰 계수가 증가한 반면 마모율은 감소하였다. 이러한 결과는 용체화 처리 과정에서 Zn가 재고용되고 시효 과정에서 Zn가 재분배되면서 표면 경도가 증가한 결과로 해석된다. 본 결과는 용체화 및 시효 처리 이후 주조재 대비 기계적 특성과 마모 특성이 효과적으로 개선되었음을 보여준다.

## 반도체

Room 3층 300, 4월 28일

### [반도체1-1 | 16:20]

**2차원 p형 MoTe<sub>2</sub> 채널과 강유전 고분자를 활용한 저전압 비휘발성 메모리:** 박지훈\*(국립부경대학교)

**Keywords:** 비휘발성 메모리, 2차원 반도체, 강유전 고분자, 계면

본 연구에서는 p형 2차원 반도체인 MoTe<sub>2</sub> 채널을 기반으로 한 비휘발성 저전압 메모리 트랜지스터를 세계 최초로 구현하였다. 기존의 2차원 반도체 메모리 소자는 PVDF-TrFE 계열의 강유전 고분자를 탑게이트 구조로 적용해 왔으며, 그 특성상 전극과 고분자 계면 사이 절연층으로 인해 구동 전압이 20V 이상 요구되는 한계가 있었다. 본 연구는 바텀게이트 구조를 도입함으로써 구동 전압을 이론값 수준까지 낮추는 데 성공하였다. 게이트 전극과 PVDF-TrFE 계면을 제어함으로써 100 nm두께의 PVDF-TrFE 필름도 안정적으로 동작함을 보였다. 또한, 전극-채널 접촉 특성을 개선하기 위해 기존 공정과 차별화된 과산화수소 기반 처리를 적용하였고, 이를 통해 컨택 저항을 대폭 감소시켜 드레인 전압 10 mV에서도 안정적인 동작이 가능하였다. 이로 인해 전체 소비전력을 pW 수준까지 저감할 수 있었으며, 상용화된 ITO 투명 전극과의 호환성을 확보하여 투명 메모리 소자 구현도 가능하였다. 마지막으로 본 메모리 트랜지스터를 녹색 OLED 소자와 직렬로 연결한 결과, 단일 점멸 펄스 입력만으로 1000초 이상 발광 상태를 유지하는 비휘발성 구동 특성을 입증하였다.

### [반도체1-2 | 16:35]

**Rare-Earth Oxides Doped ZrO<sub>2</sub> Charge Trap Layer to Mitigate Lateral Charge Loss for NAND Flash Memory:** Gyunjin Hwang, Dohyun Lee, Jisu Park, Hoon Pyo(Hanyang University), Hansol Oh, Yongjoo Park(SK trichem, Sejong, Korea), Changhwan Choi\*(Hanyang University)

**Keywords:** High-k Charge Trap Layer, NAND Flash Device, Retention, Elemental Incorporation, Rare-Earth Oxide

High-k dielectrics are promising charge-trap layer (CTL) materials for advanced NAND flash memory, where ZrO<sub>2</sub> has been investigated under great attention. Although ZrO<sub>2</sub> offers a high dielectric constant and a large conduction band offset (~2.2 eV) compared with SiO<sub>2</sub>, its low crystallization temperature (~400 °C) induces grain boundary defects leading to significant charge loss. Therefore, ZrO<sub>2</sub>-based CTL needs further material engineering. In this study, to overcome this limitation, Hf, Gd, and La were incorporated into ZrO<sub>2</sub> to suppress crystallization and engineer deeper trap states. Poole-Frenkel analysis revealed systematic trap deepening from 0.72 eV (ZrO<sub>2</sub>) to 0.86 eV (Hf), 1.21 eV (Gd), and 1.58 eV (La). This electrical modulation directly improved retention characteristics: charge loss decreased from 96% in undoped films to 93% (Hf doped), 40% (Gd doped), and 30% (La doped). ISPP characteristics showed a similar trend. While undoped and Hf-doped films exhibited slopes around ~0.5, Gd- and La-doped films achieved slopes approaching ~0.85, closer to the ideal value of 1, indicating enhanced electron confinement and reduced leakage. Optical analyses supported these findings. Photoluminescence measurements showed oxygen-vacancy-related emission peaks shifting toward the valence band with dopant incorporation, consistent with the extracted trap deepening. UV-vis spectroscopy confirmed a wide band gap of ~5 eV, with PL peaks attributed to defect-related transitions within the band gap. Overall, controlled elemental incorporation enables systematic defect-state engineering in ZrO<sub>2</sub>, significantly enhancing retention and programming performance, highlighting its strong potential as a CTL material for next-generation NAND flash memory. Acknowledgments This work was supported by Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korea Government (MOTIE) (RS-2024-00410066, RS-2024-00407767, HRD Program for Industrial Innovation) References [1] IEEE Symposium on VLSI Technology and Circuits (2023). [2] You, H. W et al, Applied Physics Letters (2010).

### [반도체1-3 | 16:50]

**Interfacial Metal Nitride Layers for Improved Dielectric and Reliability Properties of Hf<sub>1-x</sub>Zr<sub>x</sub>O<sub>2</sub> Morphotropic Phase Boundary :** Jaewon Chung, Sangkuk Han, Wonjae Choi, Haesoo Jang, Kyungwook Park, Sangmyun Lim, Soyoung Park, Sangwoon Jeong, Changhwan Choi\*(Hanyang University)

**Keywords:** DRAM, HZO, MPB, Metal Nitride

Continuous DRAM scaling reduces the effective cell footprint, consequently lowering storage capacitance. The accompanying decline in  $\Delta V_B$  (the sum of bit-line and cell charge) narrows the sensing margin, making reliable read operations increasingly challenging [1]. Further scaling of the capacitor dielectric thickness is constrained by the rapid increase in leakage current. Accordingly, research efforts have focused on enhancing cell capacitance through the adoption of high-k materials rather than continued physical thinning. Among emerging candidates, Hf<sub>1-x</sub>Zr<sub>x</sub>O<sub>2</sub> (HZO) has attracted significant attention, particularly near the morphotropic phase boundary (MPB), where reversible phase transitions between the tetragonal and orthorhombic phases enable a very high dielectric constant at low operating voltages. Nevertheless, MPB-engineered HZO often suffers from reliability degradation under electric-field cycling, including ferroelectric wake-up and fatigue phenomena, which reduce the dielectric constant and increase remanent polarization, thereby limiting its applicability to volatile DRAM applications [2, 3]. In this study, we propose a strategy incorporating a 3

nm ultrathin nitride metal interfacial layer (TiN, CoN, MoN, VN) into HZO MPB capacitors to enhance both dielectric performance and reliability. The inserted ultrathin nitride metal interfacial layer acted as an interfacial passivation layer, mitigating direct interaction between the W electrode and the HZO film and thereby suppressing excessive oxygen scavenging. As a result, the capacitors achieved endurance exceeding  $10^5$  cycles while maintaining stable dielectric characteristics. In particular, the TiN interfacial layer significantly improved capacitance, achieving an equivalent oxide thickness (EOT) of 4 Å and a low leakage current of  $8.4 \times 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup> at 0.7 V. Moreover, the insertion of a CoN interfacial layer reduced the remanent polarization by 86% without introducing any additional EOT penalty, thereby maximizing energy efficiency by effectively suppressing ferroelectric switching losses while maintaining strong electrostatic control. These findings demonstrate that interfacial nitride metal engineering is a promising approach for improving the reliability and scalability of high-k DRAM cell capacitors. In addition, the effectiveness of this interfacial engineering strategy was further investigated in HKMG (High-k Metal Gate) stacks, confirming its potential applicability to advanced CMOS device platforms. Acknowledgments This work was supported by Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korea Government (MOTIE) (RS-2024-00410066, RS-2024-00407767, HRD Program for Industrial Innovation) References [1] Spessot, A et al., IEEE Transactions on Electron Devices, (2020). [2] Park, M et al., ACS Applied Materials & Interfaces, (2018). [3] Kim, S et al., IEEE Electron Device Letters, (2021).

#### [반도체1-4 | 17:05]

**양면 방열 파워모듈 적용을 위한 다층 Cu 소결 스페이서 개발:** 백준하(한국생산기술연구원, 서울대학교), 김병찬(한국생산기술연구원, 고려대학교), 유하영(한국생산기술연구원, 서울대학교), 김동진\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 양면 방열 파워모듈, Cu 소결 접합, 스페이서, 금속 미세구조, 고온 신뢰성 평가

이 연구는 양면 방열 파워 모듈(Double side cooling power module)의 방열 부품인 Cu-Mo-Cu (CMC) 적층 구조의 스페이서(spacer)의 방전 가공성 저하에 대응하기 위해 균일한 재료 특성을 갖는 Cu-Cu 소결층-Cu 구조의 스페이서를 개발하여 방전 가공성을 향상시키고, 다공성 Cu 소결 구조를 통해 낮은 열팽창 계수를 구현하고자 수행되었다. 다층 Cu 소결 접합 스페이서의 제작 공정은 250 °C의 온도, 20 MPa의 압력에서 시간에 따른 기공률 (Porosity)제어를 목적으로 수행되었다. 제작된 Cu 소결 스페이서의 최대 500 시간까지의 신뢰성 테스트에 따른 미세구조 변화는 단면 관찰을 통한 주사전자현미경 (SEM) 분석으로 정량적으로 분석되었으며, 방전 가공 이후 CMC 구조 스페이서와의 절단 면의 차이를 포함하여 고온 신뢰성 시험 이후의 열 물성 (열팽창계수, 열전도도)의 차이에 대한 심층적인 분석이 이루어졌다. 결과적으로 개발된 다층 Cu 소결 스페이서는, 동종 재료 특성에서 비롯된 균일한 방전 가공 절단면이 형성됐으며, 10 ppm/K의 자동차 산업에서 만족할만한 열팽창계수를 구현하는 결과를 얻을 수 있었다. 이 연구는 다층 Cu 소결 스페이서 개발을 통해 방전 가공성 향상과 산업 적용 가능성이 미세구조와 열 물성 분석 관점에서 체계적으로 다루어졌으며, 스페이서를 동종 재료로 일체화 함으로써, 방전 가공성과 일관성 있는 열물성 관리에 기여할 수 있는 메커니즘에 대해 심층적으로 논의된다.

#### [반도체2-1 | 17:20]

**Threshold Voltage Shift Enabled by ALD CoN Metal Gate for Advanced Logic Devices:** Jang HaeSoo, Choi Changhwan\*, Han Sangkuk, Choi Wonjae, Chung Jaewon, Lim Sangmyun, Park Kyungwook, Jeong Sangwoo, Park Soyoung(Hanyang University)

**Keywords:** Advanced Logic, Work-Function Metal(WFM), Reliability, Multi-Vt, metal gate

Next-generation logic transistors including Gate-All-Around (GAA) FETs and sequential complementary FETs(s-CFETs) demand HKMG integration under aggressively scaled geometries, where the tight suspended thickness ( $T_{sus}$ ) severely shrinks the process window for multi-Vt implementation. Although interfacial dipole engineering offers a volume-less route to multi-Vt tuning without modifying the metal gate stack, achieving a wide set of Vt flavors in advanced logic still requires work function metal(WFM) patterning in conjunction with the dipole scheme. Moreover, further scaling calls for promising pWFM solutions that can increase effective work function(eWF) with minimal eWF&EOT trade-off, motivating the development of thermally robust, pWFM materials for next-generation CMOS. In this work, we evaluate ALD-deposited cobalt nitride(CoN) as a pWFM and combine dipole engineering to maximize the multi-Vt flavors in MOSCAP and MOSFET platforms. Increasing the CoN thickness up to ~30 Å yields a ~400 mV positive  $V_{FB}$  shift. At a fixed EOT, higher-eWF conditions suppress gate current, and achieves ~40% lower leakage at the optimized CoN condition. In fabricated MOSFETs, the Vt trend shows a corresponding shift consistent with the  $V_{FB}$  behavior observed in MOSCAPs, enabling clear multi-Vt separation( $\Delta V_t \approx 150$  mV) while preserving S.S. Moreover, we NBTI stress at shows ~35% Vt for 3 nm CoN compared to the TiN only, indicating improved high-temperature bias-stress robustness. Acknowledgement: This work was supported by Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korea Government (MOTIE) (RS-2024-00410066, RS-2024-00407767, HRD Program for Industrial Innovation)

#### [반도체2-2 | 17:35]

**Balancing Interfacial Defect Suppression and Capacitance Coupling via MoOx Interfacial Layer in HZO-based Devices:** TAESUK KIM, KYUNGSOO PARK, CHANGHWAN CHOI\*(Hanyang Univ.)

**Keywords:** 강유전체, HZO

Hf<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.5</sub>O<sub>2</sub> (HZO) thin films are widely used as scalable ferroelectric gate dielectrics, yet practical stability is often limited by the

top-gate interface where oxygen-vacancy ( $V_O$ ) related defects promote trap-assisted charge injection and field redistribution under electrical stress. In addition to chemical instability, the interfacial electrostatics captured by the effective interfacial capacitance ( $C_i$ ) directly governs field partitioning across the gate stack and thus modulates the apparent polarization-to-electrode coupling. Therefore, simultaneous control of interfacial defects and  $C_i$  is essential for reliable HZO integration. Here, we introduce a  $\text{MoO}_x$  interfacial layer (IL) at the top interface of HZO and systematically investigate thickness-dependent electrostatic-chemical trade-offs in HZO gate stacks.  $\text{MoO}_x$  is expected to regulate oxygen activity near the top interface, suppressing excessive  $V_O$  formation and associated trapping, while its thickness alters the series capacitance and redistributes the electric field within the stack. We fabricate HZO gate-stack test structures incorporating  $\text{MoO}_x$  ILs with varying thicknesses and compare them with non-IL references. Transfer-like characteristics are used to extract hysteresis and stability metrics associated with ferroelectric switching and trapping. Complementarily, capacitance-voltage ( $C-V$ ) measurements quantify  $C_i$  and the overall stack capacitance ( $C_{\text{stack}}$ ), enabling direct correlation between electrostatic coupling and hysteresis/shift behavior. Endurance-like electrical stressing is performed to evaluate drift of characteristic voltages, hysteresis evolution, and leakage stability, while gate leakage measurements assess suppression of trap-assisted conduction. In this study, HZO gate-stack test structures incorporating  $\text{MoO}_x$  interfacial layers with varying thicknesses are fabricated and compared with reference structures without  $\text{MoO}_x$ . Current-voltage characteristics under gate-bias sweeps are analyzed to extract hysteresis width, subthreshold slope, and hysteresis stability.  $C-V$  measurements quantify interfacial capacitance and correlate it with hysteresis and characteristic-voltage shift through the effective stack capacitance. Endurance-like electrical stressing evaluates characteristic-voltage drift and hysteresis evolution under repeated cycling, while gate leakage measurements assess suppression of trap-assisted conduction. Acknowledgement: This work was supported by Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korea Government (MOTIE) (RS-2024-00410066, RS-2024-00407767, HRD Program for Industrial Innovation) References [1] HU, Tao, et al. IEEE Electron Device Letters, 2024, 45.5: 825-828.

### [반도체2-3 | 17:50]

**Ag-Al-Mn 합금 기반 나노다공성 마이크로 Ag의 탈합금 공정에 따른 미세조직 변화와 소결 접합 특성:** 나인성, 정재욱\*, 현승균\*(인하대학교)

**Keywords:** 나노다공성 마이크로 실버, 탈합금 공정, Ag-Al-Mn 합금, 리가먼트 사이즈, 비표면적, 소결 접합

고온 동작 전력반도체용 소결 접합 재료에 대한 요구 특성이 고도화됨에 따라, 접합 재료의 내열성과 신뢰성 확보가 중요한 과제로 대두되고 있다. 나노 실버는 높은 비표면적에 의해 소결 특성이 우수하여 접합 재료로 주목받고 있으나, 나노 크기의 분말로 인해 취급이 어렵다는 한계를 지닌다. 이에 본 연구에서는 나노 실버와 유사한 비표면적을 유지하면서도, 분말 크기는 마이크로 수준인 접합 재료를 구현하고자 하였다. 이를 위해 나노다공성 구조를 갖는 마이크로 실버(nanoporous micro Ag)를 개발하였다. 모합금 조성은 Ag-Al-Mn으로 설계하였으며, 모합금으로부터 Al과 Mn 원소를 선택적으로 용출하는 탈합금 공정을 통해 나노다공성 구조를 형성하였다. 탈합금 과정에서 Ag는 리가먼트(ligament) 구조를 이루어 높은 비표면적을 나타낸다. 탈합금 공정 조건이 미세조직에 미치는 영향을 분석하기 위해, 용액의 농도, 온도 및 탈합금 시간을 주요 변수로 설정하고, 이에 따른 리가먼트 사이즈 변화를 정량 분석하였다. FE-SEM 분석 결과, 공정 조건과 리가먼트 사이즈 간의 경향성이 확인되었다. 또한, 비표면적 분석, XRD 분석을 추가로 진행하여, 다양한 분석 결과를 바탕으로 소결 접합용 페이스트에 최적화된 탈합금 공정 조건을 도출하였다.

### [반도체2-4 | 18:05]

**Top Chuck의 기하학적 형상 변화가 Die 접촉 계면 특성에 미치는 영향에 관한 시뮬레이션 분석:** 유한준, 장병록\*(인하대학교)

**Keywords:** 유한 요소 해석, Die 공정 변수

차세대 반도체 패키징 및 고집적 공정에서 웨이퍼와 장비 인터페이스 간의 정밀한 접촉 제어는 공정 신뢰성을 결정짓는 핵심 과제이다. 특히 하이브리드 본딩 및 첨단 노광 공정에서는 Chuck의 형상 변화와 Die 레벨에서 발생하는 다양한 변수들이 상호작용하여 최종 품질에 복합적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 유한요소해석(FEA)을 기반으로 Top chuck의 다양한 기하학적 형상 변화가 Die 접촉 메커니즘에 미치는 상관관계를 고찰하였다. 시뮬레이션 모델은 톱 척의 거시적인 곡률 변화뿐만 아니라, 150 $\mu\text{m}$ 인 Die의 배치, 크기, 및 재료적 특성 등 Die 레벨의 공정 변수를 반영하여 수행하였다. 분석 결과, 척 표면의 형상 제어는 Die 전체의 응력 분포와 접촉 균일도에 영향을 미치며, 이는 개별 다이 단위에서 발생하는 왜곡과 밀접한 연관이 있음을 확인하였다. 다양한 공정 조건하에서 Chuck의 형상 변형이 계면 사이의 불균일성을 보상하거나 최적화할 수 있는 가능성을 수치적으로 제시하였다.



## NEW-HORIZON: 소프트 반도체 응용 센서리 디스플레이 소재 기술 심포지엄

Room 3층 301, 4월 28일

### [소반1-1 | 10:00] 초청강연

Soft Iontronics for sensors and energy generators: Hyunhyub Ko\*(Ulsan National Institute of Science and Technology)

*Keywords:* Iontronics, sensor, energy generator

Traditional electron-based devices face fundamental limitations in energy efficiency and seamless integration with biological systems due to their rigid architectures and high power consumption. To overcome these challenges, iontronics has emerged as an alternative platform that exploits ionic transport to enable soft, biocompatible, and ultra-low-power systems. Here, we present soft iontronic devices that provides self-sustained energy generation and neuromorphic computing. Addressing the need for autonomous power, we introduce two different energy-generation strategies. A bioinspired ionic heterojunction generator (BIAS) produces stimulus-free direct current via spontaneous interfacial ion migration, mimicking the electrocyte architecture of electric rays. In parallel, a MXene nanochannel-based hydrovoltaic generator (MHG) leverages ion-electron coupling within asymmetric nanochannels to generate robust power from trace amounts of water, independent of evaporation, humidity, or environmental fluctuations. Finally, to process sensory information with biological efficiency, we report a fully biodegradable multilayer artificial synapse (M-AS). Enabled by ion-dipole coupling and interfacial ion trapping, the synapse exhibits rich synaptic plasticity with sub-biological energy consumption (0.85 fJ per event) and record-long memory retention, allowing reflexive and adaptive responses in eco-friendly neuromorphic systems. Together, these results establish soft iontronics as an efficient platform for self-powered sensing and intelligent information processing, offering a sustainable alternative to conventional electronics for next-generation wearable, biointegrated, and neuromorphic technologies.

### [소반1-2 | 10:25] 초청강연

Liquid-Metal and Conductive-Polymer Platforms for Stretchable Sensory Platform: Steve Park\*(KAIST)

*Keywords:* Liquid metal, conductive polymer, stretchable, 3D printing

Stretchable electronics enable emerging technologies such as electronic skin, soft robotics, and biointegrated sensing by providing electrical functionality under large mechanical deformation. Central to these systems are conductive materials that combine high electrical performance with mechanical compliance and durability. In this Invited Talk, I will present recent advances in stretchable electronic materials, with a focus on liquid-metal conductors and conductive polymer systems. The talk will highlight liquid-metal and liquid-metal-particle architectures that achieve high conductivity and extreme stretchability through microstructural design. Recent progress in additive and conformal patterning of PEDOT:PSS and liquid-metal particle inks will also be introduced, enabling integration of conductive pathways into soft and three-dimensional structures. These material and processing strategies address key limitations of planar electronics and support new form factors for stretchable sensors and soft electronic interfaces. Finally, I will briefly discuss future opportunities and challenges in scaling and integrating stretchable electronic materials for next-generation interactive and sensory platforms.

### [소반1-3 | 10:50] 초청강연

Light-driven Computing enabling Low-power Classification, Motion Recognition, and Multi-tasking: Gunuk Wang\*(Korea University)

*Keywords:* Light-driven artificial synapse, Neuromorphic computing, Electrochemical transistor, Dual-output electroluminescent synapse, Multi-tasking, Real-time motion recognition

This presentation highlights a multi-faceted approach to light-driven artificial synapses, demonstrating how light functions as a catalyst, perceiver, and communicator. Initially, we introduce dopamine-facilitated learning in organolead halide perovskite synapses, where light exposure lowers potentiation thresholds, enabling classification with 2.6-thousand-fold lower power consumption. Building on this, we present skin-conformable electronics integrating organic proximity sensors with titanium-oxide-based synaptic arrays. This system tracks 3D finger motions in free space, achieving 95% accuracy in handwriting recognition even under mechanical strain. Furthermore, we introduce an electrochemiluminescent tactile visual synapse comprising an electrochemical transistor with a functional elastomeric top gate. This architecture serves as an intuitive interface for in situ healthcare monitoring, converting tactile inputs from finger rehabilitation or ECG signals into real-time visual feedback. Finally, we demonstrate dual-output electroluminescent synapses based on mixed-dimensional perovskite quantum dots. By processing post-synaptic current and luminescence signals concurrently, this hardware supports parallel multi-tasking—such as simultaneous classification and image reconstruction—reducing energy consumption by 32.4-fold compared to GPUs. Together, these advancements in multi-modal light-driven systems provide a robust foundation for next-generation intelligent edge computing and interactive human-machine interfaces.

**[소반1-4 | 11:15] 초청강연**

Freestanding Single-crystalline Membranes in Chemical Sensor Application: Jun Min Suh\*(Seoul National University)

*Keywords:* Semiconductor, Sensor, Device, Membrane, Freestanding

In modern electronics, various semiconductor materials are essential for many different functional applications, such as transistors, resonators, and sensors. Recently, performance requirements for each function have been dramatically increasing, and these semiconductor materials exhibit their best performance when they have a single-crystalline nature. However, single-crystalline materials are difficult to grow and face numerous challenges in device process compatibility, which limits their further applications. Freestanding single-crystalline membranes present exciting opportunities from both material and device perspectives. The functional single-crystalline layers are exfoliated from the bottom substrate and the material properties of the released layers can be significantly improved as they are no longer attached to a substrate. Additionally, the challenging growth conditions typically required for single-crystalline materials can be avoided by exfoliating the membrane after the growth, enabling new device opportunities. This talk will cover the fabrication processes of freestanding single-crystalline membranes and explore their potential, particularly in gas sensor applications.

**[소반2-1 | 14:00] 초청강연**

Neuromorphic e-SKIN and Microdisplay for Physical AI: Do Hwan Kim\*(Hanyang University)

*Keywords:* Neuromorphic e-SKIN, Sustainable Lithography, Microdisplay, Physical AI

An iontronic-based artificial tactile nerve is a promising technology for emulating tactile recognition and learning of human skin with low power consumption. However, its weak tactile memory and complex integration structure remain challenging. In this talk, we explore the significance of ion dynamics in sustainable solid-state gel electronics for neuromorphic e-SKIN applications such as tactile perception, biochemical and electrophysiological sensing, neural interfaces, and therapeutic treatments. We conclude with future perspectives and challenges in gel-based electronic devices, highlighting the need for ongoing innovation in iontronic materials to further enhance the integration of these technologies in the versatile fields. Additionally, we aim to extend our discussion to the emulation of biological perception via artificial synapses, concluding with future perspectives and challenges in neuromorphic system development. Also, we present a silicone engineered anisotropic lithography of the organic light-emitting semiconductor that in-situ forms a non-volatile etch-blocking layer during reactive ion etching. This unique feature not only slows the etch rate but also enhances the anisotropy of etch direction, leading to gain delicate control in forming ultrahigh-density patterns (up to 10,000 pixels per inch) through anisotropic photolithography.

**[소반2-2 | 14:25] 초청강연**

Toward Practical Hardware Neural Networks with Organic Synaptic Devices: Hea-Lim Park\*(Seoul National University of Science and Technology)

*Keywords:* Organic synaptic devices, organic synaptic transistors, organic memristors, artificial neural networks

Organic synaptic devices are drawing growing interest as a realistic building block for neuromorphic hardware that merges sensing, memory, and computation within thin, lightweight, and mechanically flexible platforms. However, scaling beyond impressive single-device results and toward working hardware neural networks is not simply a matter of pushing individual performance metrics. What is fundamentally needed is a system-level design approach that tightly links analog and multi-state conductance programming with high repeatability, array-level scalability including parallel operation and reliable programming across dense matrices, and application-level verification where the fabricated hardware itself executes recognition or learning, rather than serving only as a basis for software-level simulation. Here, we present organic synaptic device platforms and integration routes that address these requirements at both the device and array scales. We emphasize device-level strategies, such as enhanced vertical-field modulation and suppression of parasitic leakage pathways, which improves weight programmability and operational robustness. We then describe complementary weight-update schemes driven by optical stimuli, offering practical options for parallel weight modulation as well as iterative conductance refinement. Finally, we discuss how these advances enable representative hardware neural-network demonstrations for pattern-recognition tasks, demonstrating a direct pathway from materials and fabrication innovations to measurable neuromorphic functionality. This work underscores a “device–array–task” co-design paradigm as a central accelerator for transitioning organic synaptic devices from laboratory-scale prototypes to scalable, task-performing neuromorphic hardware.

**[소반2-3 | 14:50] 초청강연**

A Paradigm Shift in OLED Design: Leveraging Generative and Predictive AI Models: Jae-Min Kim\*(중앙대학교)

*Keywords:* 디스플레이, OLED, AI

While Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs) have established themselves as the dominant display technology, the optimization of materials and device architectures continues to depend on empirical trial-and-error. This presentation explores the paradigm shift toward AI-driven design protocols in the OLED industry. Specifically, I will introduce case studies where generative and predictive models were employed to design high-performance materials. Additionally, I will highlight novel predictive tools designed to extract key physical factors directly from measured OLED characteristics. Finally, I will offer strategic insights into how AI-assisted approaches can streamline and innovate the overall R&D process.

**[소반2-4 | 15:15] 초청강연**

Measurement Techniques for Inkjet Based Flexible Electronics: Kyung-Tae Kang\*(Korea Institute of Industrial Technology)  
*Keywords:* inkjet printing, laser diffraction, droplet size, droplet speed, droplet classification, jetting characteristics, object detection, deep learning.

Inkjet printers have been used as a powerful manufacturing tool for printed and flexible electronics included QD-OLED TV/monitor and printed RGB OLED monitors. Even though the first inkjet printers were commercialized as a small digital paper printer by Epson in 1968, many companies have worked on various inkjet head technologies since 1950s. Because the inkjet printers deliver pico-liter liquid droplets to make tens of micron-sized width patterns or submicron-thick functional thin layer on the various substrates for printed and flexible electronics application, various inkjet droplet measurement technologies have been developed. The massive inkjet printing machines in the factory usually are consisted with many inkjet heads which deliver tens of thousands of liquid droplets with several m/s moving speed, new measurement techniques using optics and/or artificial intelligence are needed. In this presentation, laser diffraction techniques and various deep learning-based methods are introduced to measure the single droplet information including droplet shape, droplet diameter, droplet flying velocity, the droplet classification, and the jetting characteristics. References Eunsik Choi, Kunsik An, and Kyung-Tae Kang, 2022, Deep-Learning-Based Microfluidic Droplet Classification for Multijet Monitoring, ACS Applied Materials & Interfaces, 14 (13): p. 15576-15586. Dong Yeol Shin, Yoon Jae Moon, Jun Young Kim and Kyung-Tae Kang, 2023, Measurement of inkjet droplet size based on Fraunhofer diffraction, Review of Scientific Instruments, 94 (10). Seong Jae Kim, Eunsik Choi, Dong Yeon Won, Gyuhyeon Han, Kyung-Tae Kang, Sanha Kim, 2023, Accelerated Deep-Learning-Based Process Monitoring of Microfluidic Inkjet Printing, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 46, p. 65-73. Dong Yeol Shin, Yoon Jae Moon, Byeong-Kwon Ju, Kyung-Tae Kang, 2024, Measurement of inkjet droplet speed using interference fringe by diffracted light, Scientific reports, 14(1), 22364 Eunsik Choi, Suwon Choi, Kunsik An, and Kyung-Tae Kang, 2024, Deep Learning-Based Inkjet Droplet Detection for Jetting Characterizations and Multijet Synchronization, ACS Applied Materials & Interfaces, 16 (14), 18040-18051. Yuehua Hu, Dong Yeol Shin, Yoon Jae Moon, Jaekyun Kim, Kyung-Tae Kang, 2025, Comparison of different experimental methods for measuring droplet size in inkjet printing, Journal of Measurements in Engineering, 13(4), pp.999-900.

**[소반3-1 | 16:05] 초청강연**

GaN 나노막대 기반 다파장 집적 마이크로 LED 제작 및 RGB 디스플레이 응용 GaN 나노막대 기반 다파장 집적 마이크로 LED 제작 및 RGB 디스플레이 응용: 류상완\*(전남대학교)

*Keywords:* GaN, 마이크로 LED, 다파장 집적, 디스플레이

RGB가 집적된 micro-LED ( $\mu$ LED) 디스플레이 구현을 위해 GaN thin film과 GaN nanorods(NRs)가 발광층으로 결합된 orientation-controlled template 위에서 효율적인 다파장 발광을 가능함을 실험적으로 검증하였다. 본 연구에서는 nano-imprint lithography 기술을 사용하여 NR template을 제작했으며, 특히 GaN의 서로 다른 crystallographic orientations에 따라 indium incorporation efficiency가 달라지는 특성을 이용해 파장을 조절할 수 있도록 GaN thin film 영역과 GaN NRs 영역이 포함된 패턴으로 설계하였다. 결정 방위가 제어된 template 위에 MOCVD 방식으로 성장시킨 InGaN/GaN 양자우물 활성층을 통해 가시광선 영역에서의 tunable emission을 실현하고, 가변 파장범위와 발광효율의 변화를 체계적인 광학 및 구조 분석으로 확인하였다. 나아가 해당 template 상에 녹색 및 청색  $\mu$ LED pixel을 제작할 수 있는 타당성을 입증하였으며, 최종적으로 이 pixel들을 성공적으로 통합하여 full color display module의 프로토타입을 구현하였다. 결과적으로 정밀 리소그래피 기술을 이용한 template 준비와 MOCVD 기반의 InGaN/GaN 양자우물 성장을 결합하여  $\mu$ LED 디스플레이 기술 발전을 위한 full-color pixel array 제작의 새로운 방법론을 제시하였다.

**[소반3-2 | 16:30] 초청강연**

Directional emission from full color hybrid GaN LEDs for AR glasses: Jaesang Lee\*(Seoul National University)

One of the key challenges in achieving high-efficiency augmented reality (AR) glasses is enhancing the light coupling between the optical combiner and the light engine. In general, the optical combiner only accepts light within a narrow range of a few degrees from its optical axis, with other emissions either wasted or contributing to stray light. However, most light-emitting diodes (LEDs) using organic, quantum-dot (QD), perovskite, or inorganic semiconductors exhibit a Lambertian-like broad angular emission profile, resulting in significant optical loss when coupled with the combiner. Additionally, the first three types of LEDs lack sufficient operational stability at the luminance levels required for AR glasses. In this talk, we introduce a hybrid device architecture to achieve highly directional and full-color emission using a gallium nitride (GaN) LED combined with an oxide-based distributed Bragg reflector (DBR) and a QD color conversion layer (CCL). To place DBRs on top and bottom of the GaN LED epitaxy on a silicon wafer, we utilize reactive ion etching and stamp printing techniques for wafer removal and epitaxy transfer to a new substrate. The red and green structures incorporate three DBR mirrors, where the QD CCL is sandwiched between the top and middle mirrors, while the LED epitaxy is positioned between the middle and bottom mirrors. The blue LED electroluminescence is confined within the structure by infinite reflections between the top and bottom mirrors, eventually being absorbed by the QD CCL. The resultant red or green photoluminescence from the QD CCL resonates between the top and middle mirrors and is outcoupled through the top mirror with a highly directional emission profile and high color purity. This hybrid LED architecture with directional emission achieves at least a 4-fold enhancement in light coupling with a diffractive optical combiner compared to conventional LEDs with Lambertian emission. Our device design aiming for the directional light engine will enable high-efficiency, highly pure full-color AR glasses.

**[소반3-3 | 16:55] 초청강연**

AI-Assisted Screening and Binder-Free Formation of Color Conversion Layers via Solvent-Tuned Plasticity in Lead-Free Manganese Halides: Won Bin Im\*(Hanyang University)

**Keywords:** AI-assisted screening, binder-free, color conversion, lead-free metal halides

The development of efficient color conversion layers for  $\mu$ -LED technology faces significant challenges owing to the limitations of materials that require binders. Binders are typically used to ensure uniform film formation in color-conversion layers, but they often cause optical losses, increase layer thickness, and introduce long-term stability issues. To address these limitations, we leveraged machine learning with our in-house database to screen A-site organic molecules and predict high-efficiency lead-free metal halide compositions. Guided by this data-driven screening, we synthesized cyclopropyltriphenylphosphonium manganese tetrabromide (CPTP<sub>2</sub>MnBr<sub>4</sub>), a novel lead-free manganese halide exhibiting a photoluminescence quantum yield (PLQY) of 83.3% and a full width at half maximum (FWHM) of 46 nm. CPTP<sub>2</sub>MnBr<sub>4</sub> exhibits unique solvent-based plasticity, which enables the formation of uniform films thinner than those formed with binders without the need for either heat treatment or binders. This approach eliminates the performance degradation typically associated with conventional binder systems such as optical losses and stability issues. Structural and optical analyses confirmed its high luminescence efficiency and stability, supporting its potential applications in luminescent clays, direct ink writing, pattern printing, and ink drawing. Moreover, its successful application in white light-emitting diodes (WLEDs) and scintillators demonstrates that CPTP<sub>2</sub>MnBr<sub>4</sub> can replace traditional binder systems, offering a solution to overcome the technical challenges in next-generation displays, lighting, and scintillator technologies.

**[소반3-4 | 17:20] 초청강연**

Nanomaterials simulations in the era of foundation AI models: Sungwoo Kang\*(KIST)

**Keywords:** 인공지능, 머신러닝 포텐셜, 생성모델

Foundation AI models are redefining nanomaterials simulations by enabling accurate and computationally efficient modeling of complex systems. We show that recently developed universal machine-learning interatomic potentials (MLIPs) reliably reproduce near-DFT accuracy for realistic nanoscale environments, including catalytic reactions, battery materials, and ligand-surface interactions. Building on this capability, we introduce strategies to significantly reduce simulation costs through model acceleration and distillation, while maintaining accuracy. We further demonstrate how targeted fine-tuning improves predictive performance for specific material classes and chemical processes. In particular, we develop a practical simulation method for quantum dots, enabling efficient calculations of exciton-phonon coupling and the resulting optical properties. This approach allows realistic treatment of structural fluctuations and finite-temperature effects that are typically difficult to access with conventional first-principles methods. Finally, we briefly highlight diffusion-based generative models as an emerging tool for exploring nanoscale structures and compositions, while noting remaining challenges in chemical generalization and physical consistency.

**[소반3-5 | 17:45]**

머신러닝 가이드 2차원 페로브스카이트 합성 및 특성 예측 모델 (Machine Learning Guided Predictive Model for 2D Perovskites: Synthesis and Properties): Junsang Cho\*(Sungshin Women's University)

**Keywords:** 머신러닝, 2차원 페로브스카이트, 예측 모델

Machine learning-directed synthesis have emerged as a powerful tool, alternative to transitional approaches wherein a single synthetic parameter is changed at a single time along with a resulting outcome. Such approaches can be limited in their ability to explore multidimensional design space, effectively predict the synthetic outcome, and provide sufficient understanding of variable correlation even with the sparse initial dataset (not complete). However, ML approaches are more powerful, effective in not only provide a mapping of structure-function correlations but also uncovering the complex chemical reactions to reveal underlying mechanisms beyond the synthesis, which can accelerate the materials discovery at the end. A variety of classification and regression models with machine learning algorithms so far allows for synthetically predicting the outcomes including layer thickness of the lead halide perovskites and even further understanding growth mechanism with more desired optoelectronic properties. In this talk, I will focus on machine-learning directed navigation over two-dimensional perovskites. An efficient machine learning navigation of reaction space that allows for predictive control of layer thickness down to sub-monolayer dimensions. I will present a systematic investigation into how organic spacer cations govern both thermodynamic driving forces and Pb monomer kinetic diffusions during quasi-2D perovskite crystallization. By decoupling chemical-potential effects from spacer cation thermodynamics (ligand aggregation), we reveal how these competing factors collectively determine monomer diffusion behavior and, ultimately, the growth kinetics and average layer thickness of quasi-2D perovskites. Our findings highlight the strength of machine learning-guided prediction models in navigating complex, multivariate chemical design spaces, providing significant insight into the rational design principles of quasi-2D perovskite materials. We believe that our work offers a substantial advancement in understanding and engineering quasi-2D perovskites with tailored optoelectronic properties.

## 수소재료 Room 3층 303, 4월 28일

### [수소1-1 | 09:00]

이온 조사에 따른 RAFM 강 표면의 수소 트랩 특성 변화 및 국부 변형 거동 분석: 최단웅(한국재료연구원, 부산대학교), 유지성, 이승용(한국재료연구원), 신찬선(명지대학교), 박형권, 이창훈\*(한국재료연구원), 최윤석\*(부산대학교)

**Keywords:** RAFM 강, Fe-ion 조사, 수소 트랩, 열탈착분석(TDS), 국부 항복 특성

핵융합 blankets 구조재인 RAFM(Reduced Activation Ferritic-Martensitic) 강은 조사 손상과 수소 침투가 동시에 발생하는 극한 환경에 노출된다. 조사에 의해 형성되는 점결합, 전위 루프 및 결함 클러스터는 수소 트랩으로 작용될 수 있으며, 이는 수소 분포와 국부 기계적 특성에 직접적인 영향을 미칠 가능성이 있다. 그러나 조사 손상에 따른 수소 분포 변화와 결함 구조에 기인한 수소 트랩 특성, 그리고 이를 국부 기계적 물성과 연계하여 정량적으로 분석한 연구는 여전히 제한적이다. 본 연구에서는 Fe-ion 조사를 통해 RAFM 강 표면에 조사 결함 구조를 형성하고, 수소 충전 후 열탈착분석(TDS)을 수행하여 수소 방출 거동을 비교 분석하였다. 이를 통해 조사량에 따른 수소 트랩 밀도와 트랩 결함 에너지 분포의 변화를 규명하였다. 또한 조사층이 수  $\mu\text{m}$  수준으로 제한되는 점을 고려하여 Plastometrex 기반 압입 소성 시험을 적용함으로써, 조사 및 수소 주입에 따른 표면 국부 항복 거동 변화를 함께 평가하였다. 그 결과, Fe-ion 조사 후 표면에는 vacancy cluster 및 전위 기반 결함이 형성되었으며, 이에 따라 고에너지 수소 트랩 밀도가 증가하는 경향을 보였다. TDS 분석 결과, 조사 시편에서 고온 영역 탈착 피크가 뚜렷하게 증가하였으며, 이는 조사로 형성된 결함이 보다 강한 수소 트랩과 연관되어 있음을 의미한다. 또한 조사층에서는 방사선 경화로 인해 국부 항복 강도가 증가하였고, 수소 주입 이후에는 변형 거동에 유의미한 차이를 확인하였다. 이러한 결과는 조사로 형성된 결함 구조와 수소 트랩 특성이 국부 기계적 특성과 밀접하게 관련되어 있음을 시사한다.

### [수소1-2 | 09:15]

Unveiling the Role of Local Lattice Distortion in Regulating Hydrogen-Induced Phase Transformation of PdAg Nanoalloys: Jinseok Koh(KAIST), Hyunjeong Kim(AIST), Daiju Matsumura(JAEA), Kouji Sakaki(AIST), Eun Seon Cho\*(KAIST)

**Keywords:** Hydrogen storage, Solid-solution nanoparticles, Hydrogen sorption thermodynamics, Phase transformation

The precise control of hydrogen sorption thermodynamics in metal hydrides is pivotal to the advancement of solid-state hydrogen storage and purification technologies. Compositional engineering of solid-solution nanoparticles has emerged as a promising strategy to regulate the hydrogen-metal interaction that dictates sorption behaviors; however, bridging the gap between atomic-scale structural observations and macroscopic thermodynamic properties remains a significant challenge. While recent single-nanoparticle studies have provided valuable insights into diverse, often non-classical phase transformation behaviors, these observations are frequently obscured by shape- and facet-dependent kinetics. Such particle-specific behaviors make it difficult to identify a universal structure-thermodynamics relationship for nanoparticle ensembles. Therefore, it is essential to identify a fundamental structural descriptor that can be decoupled from distinct morphological features and bridge atomic-scale lattice dynamics with macroscopic thermodynamic trends. Here, we correlate ensemble thermodynamics with in-situ local structure evolution under controlled hydrogen atmospheres using monodisperse palladium-silver (PdAg) solid-solution nanoparticles as a compositionally systematic model platform. By combining hydrogen pressure-composition isotherms with operando tracking of composition-dependent lattice changes, we identify Ag-induced local lattice distortion as a governing factor that dictates hydrogen-driven structural dynamics and reshapes sorption behavior from a first-order phase transition toward a continuous, solid-solution-type uptake. We demonstrate that the intrinsic strain heterogeneity inherent in high-Ag compositions acts as a structural buffer. Notably, this pre-existing distortion is effectively attenuated upon hydrogen insertion as the lattice mismatch is energetically alleviated. This unique lattice relaxation is directly linked to the macroscopic disappearance of the two-phase plateau in pressure-composition isotherms, providing a structural origin for the observed thermodynamic shift. These findings demonstrate that the local strain distribution governs the phase transformation during hydrogen sorption—an explicit structure-thermodynamics linkage that has not been established clearly in previous Pd-based alloy systems. In a broader sense, our results suggest that static lattice distortion can serve as a robust experimental descriptor for connecting atomic-scale structural dynamics to ensemble thermodynamics, providing a design framework for optimizing hydrogen sorption properties via controlled composition.

### [수소1-4 | 09:30]

Microstructural evolution of 304 Stainless Steel in High Temperature Ammonia Environments: Doowon Jeong(Pohang University of Science and Technology), Hyungjun Ahn(POSCO N.EX.T Hub), Hwasung Yeom\*(Pohang University of Science and Technology)

**Keywords:** Ammonia, Nitriding, Stainless Steel, Degradation

Ammonia is a promising hydrogen carrier, as it can be more easily stored and transported than liquid or gaseous hydrogen. Moreover, ammonia can be directly used as fuel in combustion or fuel cell systems without reforming. However, although these systems operate at high temperature, the specific degradation mechanisms of stainless steels in high-temperature ammonia environments remain poorly

understood. The fuel injection nozzles of gas turbine systems, typically made of 304 stainless steel, are exposed to 400-500°C ammonia atmospheres for approximately 8,000 hours per year, making them susceptible to severe material degradation. In this study, the microstructural evolution of 304 stainless steel exposed to 400-500°C  $\text{NH}_3$  atmospheres up to 200 hours was investigated. Material characterization was performed using SEM (Scanning Electron Microscopy), EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), and XRD (X-Ray Diffraction). Nitrogen atoms were found to diffuse into the base alloy, forming a uniform nitrided layer on the surface. This nitriding process induces lattice expansion, leading to stress-induced degradation. Based on these experimental findings, a nitriding-induced degradation mechanism is proposed.

#### [수소 1-5 | 09:45]

**기체 투과도 측정 기술:** 정재갑\*, 이지훈(한국표준과학연구원)

**Keywords:** 수소, 기체 투과도, 부피 분석, 압력 분석, 기체 확산

본 연구는 고압 기체 노출 후 고분자 재료의 기체 장입량(uptake), 확산도(diffusivity), 투과도(permeability)를 정량화하기 위한 저비용·확장형(ex situ) 기체 투과 센싱 시스템 2종(압력분석/부피분석)을 제안한다. 압력분석 시스템은 밀폐 스테인리스 용기와 상용 데이터 로거를 사용하고, 부피분석 시스템은 밀폐 메스실린더·디지털 카메라·영상 기반 분석을 결합해 기체 방출을 시각적으로 모니터링한다. 두 시스템 모두 이상기체법칙과 Fick의 제2법칙 기반 확산 해석 소프트웨어를 적용했으며, LDPE/HDPE 시편에 대해  $\text{H}_2$ , He,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , Ar의 기체 수송 특성을 평가했다. 두 ex situ 방법은 불확도 범위 내에서 일치했으며, 안정적 측정 성능(편차 0.39 % 이하)과 온도·압력 변동에 대한 자동 보정 특성을 확인했다. 또한 기존 in situ 투과 기법과의 비교를 통해 제안 방법의 신뢰성과 유효성을 검증했으며, 포장재, 패키징재, 수소 인프라, 가스 배관 시스템 등 다양한 응용에 활용 가능성을 제시한다.

#### [수소 1-6 | 10:00]

**냉간 압연에 따른 Pure V의 미세조직 변화와 수소 흡·방출 동역학 거동:** 최병철(한국생산기술연구원, 강원대학교), 강규병, 백민아, 석경찬, 홍성찬(한국생산기술연구원, 고려대학교), 엄수진(한국생산기술연구원), 신중호\*(강원대학교), 나태욱\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 바나듐, 압연, 수소저장합금, 키네틱, 수소압축기

수소 모빌리티 확산에 따라 수소충전소 및 고압 수소압축기 기술 개발의 필요성이 증가하고 있다. 기존 기계식 압축기는 높은 비용, 소음, 진동 및 윤활유 사용으로 인한 수소 순도 저하 등의 문제점을 가진다. 이에 설치 및 유지 비용이 낮고 수소의 순도를 유지할 수 있는 비 기계식 수소압축기 개발이 요구되고 있다. V기반 BCC계 수소저장합금은 다른 수소저장합금에 비해 더 높은 수소 저장용량을 가지고 있으며, 상대적으로 낮은 온도 차에서도 높은 압축비를 확보할 수 있는 장점이 있다. 하지만 상대적으로 느린 수소 흡·방출 속도가 제한 요소로 작용한다. 본 연구에서는 수소저장합금 개발을 위한 기초 연구로서 Pure V에 냉간 압연 공정을 적용하였다. 압연을 변화에 따른 미세조직, 활성화 분말 및 수소 흡·방출 속도 변화를 분석하고, 압연에 의해 형성된 결합 구조가 흡·방출 속도에 미치는 영향과 그 거동을 고찰하였다.

#### [수소 2-1 | 10:25]

**수소 저속 주입 준평형 조건에서 금속수소화물 베드의 수소 저장 거동 및 열 출입 특성 해석:** 하태준\*(한국생산기술연구원), 배상환(한국생산기술연구원), 선현덕(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 수소저장합금, 에너지, 압력용기, 모델링, 열관리

수소는 연소 시 이산화탄소를 배출하지 않으며, 질량당 에너지 밀도(저위발열량 기준 약 120 MJ/kg- $\text{H}_2$ )가 휘발유 및 천연가스 대비 2배 이상 높아 유망한 에너지 운반체로 평가된다. 그러나 상온·상압에서 부피 에너지 밀도가 낮아 고효율 저장 기술이 요구되며, 금속수소화물 기반 저장은 높은 부피 저장밀도와 낮은 누설 위험으로 인해 안전한 대안으로 주목받고 있다. 한편 금속수소화물의 수소화 및 탈수소화 반응은 각각 발열 및 흡열을 수반하므로, 압력용기 내부 합금 베드에서의 열 제거·공급 효율이 반응 속도와 유효 저장량을 지배한다. 본 연구에서는 금속수소화물이 충전된 압력용기에 수소를 준평형 조건에 가깝게 저속 주입하고, 실험에서 측정된 시간 의존 압력 및 유량 데이터를 경계조건으로 적용한 Python 기반 3차원 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 또한 수소화 과정에서 입자 팽창에 따른 충전층 구조 변화와 반응열을 고려하여, 유동·구조적 제약(입자 반지름 및 공극률 변화)과 열전달(입자 간 전도 및 벽면 열교환)을 결합적으로 모사하였다. 제안한 모델을 통해 소형 베드 조건에서의 압력 응답과 저장 거동을 재현하고, 소재의 저장 특성과 입자 크기가 시간에 따른 압력용기 저장 성능 및 열관리 요구조건에 미치는 영향을 정량적으로 평가함으로써 금속수소화물 소재 및 압력용기 설계를 위한 지침을 제시하였다.

#### [수소 2-2 | 10:40]

**머신러닝 기반  $\text{AB}_2$  수소저장합금의 저압·저비용 조성 설계 전략:** 진시원(한국과학기술연구원, 서울대학교), 하태준(한국생산기술연구원), 이영국(연세대학교), 박은수(서울대학교), 심재혁\*(한국과학기술연구원)

**Keywords:**  $\text{AB}_2$  수소저장합금, PCT(Pressure-Composition-Temperature) 곡선, 머신러닝

$\text{AB}_2$ 형 라베스상 수소저장 합금은 조성 설계 자유도가 높아 목표 플래토 압력과 저장 성능을 조절할 수 있는 잠재력이 크다. 특히 저압 영역에서 구동 가능한 소재는 수소 압축 부담을 줄여 시스템 운전 측면에서 유리하지만, 조성 변화에 따른 PCT(Pressure-Composition-Temperature) 곡선의 플래토 압력 및 형상 변화가 단순하지 않아 실험 중심의 탐색에는 시간과 비용 부담이 크다. 또한 고가 원소인 Zr과 V의 함량이 높아질수록 소재 단가가 상승하므로, 저압 성능을 유지하면서 Zr·V 총함량을 낮추는 저비용 조성 설계가 필요하다. 본 연구는 자체 실험으로 구축한  $\text{AB}_2$  PCT 데이터셋을 기반으로, 합금 조성 and 시험 조건(온도, 압력, 흡·방출 구분)을 입력으로 수소 저장



량을 예측하는 머신러닝 기반 surrogate model을 구축하였다. 학습된 모델을 활용하여 조성 공간을 고해상도로 스크리닝하고, 목표 온도 범위에서 저압 플래토 특성이 기대되는 조성 영역을 우선적으로 도출한 뒤, 해당 영역 내에서 Zr-V 총합량을 단계적으로 저감하는 후보 조성을 선별하였다. 또한 머신러닝 예측을 이용해 주요 원소 함량 변화에 따른 PCT 곡선 변화를 조성-특성 맵으로 시각화하였다. 이를 통해 특정 원소의 함량 변화가 플래토 압력 및 PCT 형상 변화로 단순 비례적으로 이어지지 않는 경향을 확인하였고, 다원소 상호 작용이 존재하는 조성 공간에서 경험적·선형적 조정만으로는 설계 효율이 제한적임을 시사하였다. 결과적으로 본 발표는 “저압 성능 목표 설정-머신러닝 기반 조성-PCT 맵핑 및 후보 스크리닝-고가원소(Zr·V) 저감 조성 제안”으로 이어지는 저압·저비용 조성 설계 워크플로를 제시한다. 제안된 접근은 실험 반복을 줄이면서도 상용화 지향 조성 탐색을 가속하는 데 기여할 것으로 기대된다.

### [수소2-3 | 10:55]

**저가 원소재를 활용한 AB<sub>2</sub> 수소저장합금의 효율적인 비용 설계:** 배상환(한국생산기술연구원, 서울과학기술대학교), 진시원(서울대학교, 한국과학기술연구원), 선현덕(한국생산기술연구원, 고려대학교), 변종민(서울과학기술대학교), 심재혁\*(한국과학기술연구원, 성균관대학교), 하태준\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** HESS, 수소저장합금, Hydrogenation kinetics, Low-grade raw materials, Pressure-Composition-Isotherm (PCI) curve

원자재 가격이 높은 것은 수소 저장 합금의 대규모 공급에 있어 여전히 중요한 장벽입니다. 목표 조성과 저온도 원소재의 가격 및 화학적 특성을 고려하여 특정 합금 화학 조성을 만족하는 원료 혼합 비율을 Excel Solver와 Python 코드를 사용하여 개발했습니다. Solver에서 얻은 원료 조성에서 Si 함량을 0.001 wt% 미만으로 줄이기 위해, 가격-조성 균형을 최적화하는 범용 Python 프로그램 사용하여 수정된 조성 비율을 결정했습니다. Solver에서 도출된 레시피에 따라 진공 아크 재용융법으로 100 g, 진공 유도 용융법으로 120 kg의 합금을 제조했습니다. 또한, 목표 조성에 따라 시약 등급 진공 아크 용융물 25 g을 대조군으로 준비했습니다. Si 및 Hf와 같은 산업 불순물이 수소 저장 합금의 H<sub>2</sub> 흡착 성능에 미치는 영향도 분석했습니다. 이번 연구 결과는 레시피 수준의 비용-성능 상충 관계에 대한 실험적 실증을 제공하며, 성능 저하를 최소화하면서 수소 저장 합금에 경제적으로 실현 가능한 원료 혼합 전략을 제시합니다.

### [수소2-4 | 11:10]

**Interfacial Surface Bulging in AB-Type Hydrogen Storage Alloys during Hydrogenation:** SuMin Lee(Sungkyunkwan University), Jin Hyeon Choi(Korea Institute of Science and Technology), Kyubin Hwang(Sungkyunkwan University, Korea Institute of Science and Technology), Jinyoung You, Changhyo Sun(Sungkyunkwan University), Taejun Ha(Korea Institute of Science and Technology, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)), Jae-Hyeok Shim\*(Sungkyunkwan University, Korea Institute of Science and Technology), Hye Jung Chang\*(Korea Institute of Science and Technology), Yunseok Kim\*(Sungkyunkwan University, Korea Institute of Science and Technology)

**Keywords:** hydrogen, bulge, hydrogen storage alloys, phase transition, electron microscopy, atomic force microscopy

Excess hydrogen typically causes bulging and subsequent cracking in metals and alloys, leading to what is commonly recognized as hydrogen damage in conventional metals and alloys. However, similar hydrogen-induced degradation can play a beneficial role in hydrogen storage alloys. Despite the well-established understanding of bulging and cracking in conventional metals, their mechanistic origin in multiphase hydrogen storage alloys remains poorly understood. In this study, we reveal that hydrogen-induced bulging, followed by crack and crater formation, is associated with volume expansion at phase boundaries of a Ce-containing TiFe alloy. Initially, the secondary phase Ce particles exist as CeO<sub>2</sub>. As hydrogenation progresses, some transform into CeH<sub>2</sub>, causing bulging due to local volume expansion. Further hydrogenation leads to crack formation at the phase boundary, and once CeH<sub>2</sub> dominates, the affected area rises and detaches, forming a crater. These observations address a critical gap in understanding the early-stage hydrogenation behavior of multiphase hydrogen storage alloys by directly revealing how hydrogen-driven phase transformations occur within rare-earth-containing secondary phases. Understanding the underlying mechanism of these sequential processes could not only facilitate the design of improved hydrogen storage materials but also provide valuable insights into hydrogen damage in conventional metals and alloys.

### 수소2-5 | 11:25]

**Mg-20Ni 합금의 수소저장 특성에 대한 공정조직의 영향 :** 최태열(한국재료연구원, 부산대학교), 김도현, 서병찬(한국재료연구원), 이제인(부산대학교), 김영민\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 수소저장, 마그네슘, 니켈, 미세조직, 초기활성

본 연구에서는 수소 저장용 Mg-20Ni(at.%) 합금의 냉각 속도 및 몰드 형태에 따른 수소 저장량과 초기 활성도를 비교하였다. Mg-20Ni 합금은 원형 몰드, 스탬 몰드 두 가지 형태의 몰드로 주조되었으며, 예열 여부를 달리하여 예열한 몰드와 예열하지 않은 몰드로 각각 나누어 제조되었다. 예열한 스탬 몰드 샘플 중 가장 냉각속도가 빠른 HS4 샘플은 350°C에서 3시간 만에 초기 활성이 되었으며, 5.46 wt.%의 높은 수소 저장량을 나타내었다. 수소 저장의 초기 활성도와 미세조직 간의 상관관계를 규명하기 위한 주사 전자현미경(SEM) 분석 결과, 냉각 속도에 따라 Primary Mg<sub>2</sub>Ni 상의 크기가 변하고, Lamella 구조의 크기와 형태가 변하는 것을 확인하였다. 또한, 냉각속도가 특정 구간 이상 빨라지면, Primary Mg<sub>2</sub>Ni상 보다 Lamella 구조 및 조직의 변화가 큰 것을 관측하였다. 수소 저장 능력, 초기 활성 능력과 정량·정성적 특성 간의 상관관계를 파악하기 위해 XRD, XRF 등의 분석을 진행하였다. HS4 샘플은 고르게 분포한 Primary Mg<sub>2</sub>Ni 상과 단방향으로 분포한 Lamella 구조에 의해 높은 초기 활성도 및 수소 저장능력을 나타내었다. 결과적으로 미세조직의 변화를 통해 수소 저장 합금의 초기 활성도를 증진시킬 수 있을 것으로 간주된다.

## [수소2-6 | 11:40]

**산소 안정화 금속간 화합물  $\text{Ti}_2\text{FeO}_x$ 의 Ni, Cr, Mn, V 치환 효과:** 윤영철(한국과학기술연구원, 서울대학교), 박은수\*(서울대학교), 김진우\*(한국과학기술연구원)

**Keywords:** Hydrogen storage materials, Ti-Fe-O alloy, B-site substitution, Hydrogen properties, Microstructure

TiFe계 및 BCC 고용체 기반 수소저장합금은 상온 부근에서 높은 체적 저장밀도와 빠른 반응성을 기대할 수 있으나, 공기 노출로 형성되는 표면 산화층(부동태막)이 수소 분자의 해리 및 확산을 저해하여 초기 수소화를 위해 고온 열처리, 고진공/고압 조건, 또는 기계적 활성화가 요구되는 문제가 지속적으로 보고되어 왔다. 이러한 활성화 문제를 극복하기 TiFe계 합금에 산소를 첨가하여 초기 수소 흡수가 가능한 산소 안정화 금속간 화합물( $\text{Ti}_2\text{FeO}_x$ 상)을 형성할 수 있으나, Fe-site 치환에 따른 초기 수소화 거동 및 미세조직 변화에 대한 체계적 비교는 여전히 부족한 실정이다. 본 연구에서는 활성화 공정이 필요 없고 빠른 초기 수소 흡수 거동을 보이는  $\text{Ti}_2\text{FeO}_{(0.4, 0.8)}$ 을 기준 조성으로 설정하고, B site(Fe)의 절반을 Ni, Cr, Mn, V로 치환한 Ti-Fe-M-O(M = Ni, Cr, Mn, V) 합금을 설계 및 제조하였다. 치환 원소에 따른 초기 수소화 거동과 저장 용량(H/M 및 wt.%)을 평가하였으며, 형성된 상과 미세구조는 XRD 및 SEM으로 분석하였다. 또한 Sieverts-type PCI 분석을 통해 압력에 따른 흡수 및 탈착 거동을 비교하고, TGA-MS를 이용하여 탈수소화 온도를 확인하였다. 그 결과, V 치환 합금은  $\text{Ti}_2\text{FeO}_{0.4}$  합금 대비 초기 수소 저장 용량이 약 154% 증가하여 2.8 wt.%(1.45 H/M)를 나타내었고, 치환 원소에 따라 초기 수소 흡수 거동이 달라짐을 확인하였다. 특히 Ti-Fe-V-O 계에서는  $\tau$  상( $\text{Ti}_2\text{FeO}_x$ ), BCC, 그리고  $\beta$ -Ti 상이 공존하는 영역이 나타나고, V 조성 증가 및 O 조성 감소에 따라 BCC 상의 분율이 증가하는 경향을 관찰하였다. 이는 산소 안정화 효과로 유지되던 금속간 화합물의 상안정성이 산소 조성 감소 및 치환 원소 효과에 의해 유효 전자 구조가 변화하여 수소가 점유 가능한 격자 간극(site) 환경과 확산 경로가 달라질 수 있음을 보여준다. 이로부터 초기 수소 흡수가 가능한  $\tau$  단상을 유지하면서 높은 수소 저장 용량과 낮은 탈수소화 온도를 동시에 만족시키는 Fe 치환 원소 조합을 도출하여 우수한 수소 저장 합금 소재 개발 전략을 제시하고자 한다.

## 수소경제 구현을 위한 수소 운송 및 저장소재 심포지엄

Room 3층 303, 4월 28일

### [저장1-1 | 14:00] 초청강연

**화학적 수소저장과 금속·재료:** 남석우\*(한국과학기술연구원)

**Keywords:** 화학적 수소 저장, 수소 저장/추출 반응, 촉매, 열전달, 금속

수소사회 구현을 위해서는 대용량 수소를 안전하고 효율적으로 저장·이송할 수 있는 기술 확보가 필수적이며, 이를 위해 암모니아 및 액상유기물을 활용한 화학적 수소 저장 방식이 유망한 대안으로 주목받고 있다. 본 연구에서는 화학적 수소저장 기술의 주요 특성을 정리하고, 대용량 재생에너지 저장을 위한 적용 사례를 검토한다. 또한 수소 저장 반응의 특성 향상 방안을 금속·재료 관점에서 분석한다.

### [저장1-2 | 14:30] 초청강연

**Ti계 AB2계열 저온 저압형 수소저장합금 제조공정 연구:** 이기열\*, 금보경, 권용혁((주)케이피씨엠)

**Keywords:** 저장합금, 진공용해, 스크랩, 유효수소저장, 평탄압

재생에너지 및 탄소중립의 확대에 인하여 수소에너지의 비중이 빠르게 증가하고 있다. 압축, 액화, 고체 저장 등 다양한 저장 운송기술 중 수소저장합금은 고체저장기술의 핵심요소기술로 자리잡고 있는 중이다. 유효수소저장량 1.0wt.%이상을 보이는 합금의 저가화를 위해서는 티타늄 스크랩 활용 및 대용량 용해기술 확보는 향후 극복해야 할 요소기술로 판단된다. 본 연구에서는 상대적으로 경제성이 우수한 티타늄계열 AB2계열의 합금조성을 진공용해, 진공아크용해 등 대량 제조기술과 더불어 응용분야 Feedback을 통한 수소저장합금 연구개발 현황을 소개하고자 한다.

### [저장1-3 | 15:00] 초청강연

**고압수소 이송을 위한 100기압급 배관용 소재/강관 제조기술 개발 및 실증:** 이동호\*, 정환교(포스코)

**Keywords:** 고압 수소 파이프라인, 수소취화, 고강도 용접강

국내외 수소 파이프라인 구축이 확대됨에 따라 기존 천연가스 인프라의 수소 전환과 고강도 강재 적용의 필요성이 커지고 있다. 그러나 수소취화로 인한 재료 건전성 저하와 이를 체계적으로 평가·설계할 수 있는 표준의 미비는 여전히 주요 과제로 남아 있다. 본 연구는 이러한 한계를 극복하고 수소경제 확산에 대비하기 위해, 100기압급 고압 수소 이송용 용접강관 소재 및 제조기술을 개발하고, 고압 수소 환경에서의 내수소취성 성능과 설계 적합성을 종합적으로 검증한 결과를 다룬다. API 5L X52~X70급 고강도 강재를 대상으로 미세조직 제어를 통해 내수소취화 저항성을 확보한 수소전용 강재를 개발하였으며, ERW 및 SAW 용접강관 제조공정의 최적화를 통해 용접부 인성의 균일성을 확보하였다. 개발된 소재 및 용접강관에 대해 100 bar 고압 수소 환경에서 SSRT 및 파괴인성( $K_{IH}$ ) 평가를 수행한 결과, 목표 물성인  $R_{NTS} \geq 0.7$  및  $K_{IH} \geq 60 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$ 을 만족하는 우수한 내수소취성 성능을 확인하였다. 또한 전기화학적 수소차징을 활용한 대체 시험법을 확립하고, Small Punch 시험과 중공 인장시험편을 이용한 in-situ 평가 기술을 제시하였다. 아울러 수소취성 데이터를 반영한 한계수명 평가와 ASME 및 KGS 기준에 기반한 수소배관 설계 적정성 검토를 통해 수소전용 배관 설계 및 표준 개발 방향을 제안하였다. 본 연구 결과는 향후 고압 수소 파이프라인용 고강도 강재 및 용접배관의 상용화는 물론, 수소배관 설계 및 평가 기준 정립에 중요한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

### [저장1-4 | 15:30] 초청강연

**4D-STEM 다차원 데이터 분석으로 규명하는 MgNi 기반 수소저장합금 수소화 메커니즘:** 강상준\*(Karlsruhe institute of technology (KIT))

**Keywords:** 투과전자현미경, 수소저장합금, 상변화, 실시간투과전자현미경

본 연구에서는 4D-STEM을 기반으로 NiMg(MgNi) 수소저장합금의 수소화 전후 미세구조, 변형 거동, 전자기적 특성을 통합적으로 규명하였다. 먼저 4D-STEM 회절 데이터로부터 상 분포 맵핑을 수행하여 NiMg 영역과 Mg 금속 영역의 공간적 분포와 경계 구조를 정밀하게 분해했으며, 동시에 정량 스트레인 맵핑을 통해 수소화 진행에 따른 격자 상수 변화와 국소 변형의 축적 양상을 추적하였다. 더 나아가 전기장 맵핑을 적용하여 수소화 전후의 전하 재분포 및 내부장 변화 가능성을 평가함으로써, 구조 변화와 전자기적 응답 간의 연계를 함께 분석하였다. 나아가 EELS low-loss 스펙트럼 이미징을 통해 플라즈몬 및 저에너지 손실 신호의 공간 분포를 기반으로 상 분포를 독립적으로 재구성하였고, 이 결과를 4D-STEM에서 얻은 상/스트레인/전기장 정보와 결합하여 고차원 통계분석을 수행하였다. 이를 통해 픽셀 단위의 다변량 특징(회절 패턴 특성, 변형 텐서 성분, 전기장 성분, low-loss 스펙트럼 특징)을 하나의 고차원 데이터 공간에서 정렬하고, 상-변형-전기장 신호의 상관관계를 정량적으로 도출하였다. 분석 결과, 수소화 이후 NiMg 영역과 Mg 금속 영역의 대부분이 수소화를 상으로 전환되었고, 잔존 금속상은 제한된 영역에 국소적으로 분포하였다. 특히 수소화는 in-plane 방향에서 점진적인 격자 팽창과 함께 진행되는 특징을 보였고, 반응이 진행되는 전면 및 상 경계 주변에서 강한 변형장이 집중되는 현상이 뚜렷하게 관찰되었다. 이러한 변형장 집중은 상 변환에 따른 부피 변화, 결정학적 비정합, 그리고 수소 확산에 의해 유도되는 국소 응력 축적과 연관될 가능성을 시사한다. 본 연구는 4D-STEM의 다중 물리량 맵핑(상, 스트레인, 전기장)과 EELS low-loss 기반 상 분해를 결합하고, 이를 고차원 통계분석으로 통합함으로써 수소화 과정의 공간적 비균일성과 지배적 변형 모드를 동시에 해석할 수 있는 분석 프레임워크를 제시한다. 제안한 접근은 NiMg 계뿐 아니라 다양한 수소저장합금 및 수소화물 형성 재료에서 상 변환과 기계적 구속 효과를 정량적으로 연결하는 데 활용될 수 있으며, 궁극적으로 미세구조 설계 및 내구성 향상을 위한 메커니즘 기반 지침을 제공한다.

**[저장2-1 | 16:10] 초청강연**

**액체수소 모빌리티용 핵심소재 개발 및 실증:** 나영삼\*, 김영균, 장태진, 권현준(한국재료연구원), 손석수(고려대학교), 정덕현(충남대학교), 박태훈, 이승건(한국재료연구원)

**Keywords:** 액체수소, 수소 모빌리티, 극저온, 기화율

탄소중립 사회로의 전환시점에서 수소는 1차 에너지이자 에너지 carrier로서 중요한 역할을 할것으로 예상되고 있다. 특히 이송, 저장, 활용 등의 관점에서 수소의 활용 효율을 높이기 위해서는 고밀도의 액체수소(LH2)의 역할도 크게 기대되고 있다. 액체수소는 상온, 상압 기체수소에 비해 800배의 밀도를 갖고 있기 때문에, 수소의 저장과 이송 효율을 극대화할수 있으며, 활용 관점에서도 고밀도의 연료저장시스템을 통해 활용 효율을 높일수 있다. 수소의 액화온도는 상압에서 -253°C의 극저온이고, 수소라는 특수한 환경에 노출되기 때문에 이송, 저장 시스템을 구성하는 물질의 수소 연관 물성과 극저온에서의 물성에 대한 이해가 필수적이다. 특히 -253°C에 이르는 극저온의 액체수소 저장시스템에서는 강도, 연성, 파괴인성 등과 같은 통상적인 금속 구조체의 기계적 물성뿐 아니라 외부 열침입을 최소화하기 위한 단열 방안 및 열적 물성에 대한 고려도 필수적이다. 따라서 기계적-열적 물성을 모두 고려한 재료의 개발과 적용이 액체수소 저장시스템의 성능 향상에 중요한 요소라고 할수 있다. 한국재료연구원에서는 액체수소와 같은 극저온 용 소재 개발을 위해 극저온 환경에서의 물성 평가 장비를 구축하고 있으며 액체수소 모빌리티용 핵심소재 개발 및 실증 사업을 이어오고 있다. 이에 본 발표에서는 액체수소 저장시스템에 사용될수 있는 금속 소재 개발과 외부 열침입 방지를 위한 단열 소재 개발에 대한 한국재료연구원의 연구 결과와 실증 방안에 대한 기술 개발 결과를 소개하고자 한다. 더불어 극저온용 금속 재료의 개발에 있어서 고려해야 할 기계적-열적 물성에 대한 연구 결과를 발표하고 향후 연구 개발 방향에 대해서도 논의하고자 한다.

**[저장2-2 | 16:40] 초청강연**

**How Ab-Initio Calculations Advance Our Understanding of Water Electrolysis:** Soonho Kwon\*(POSETCH)

**Keywords:** DFT, Water Electrolysis, Oxygen Evolution Reaction

Oxygen evolution reaction (OER) is the rate-limiting step in water electrolysis, a technology with over two centuries of development and renewed importance for sustainable hydrogen production. Density functional theory (DFT) calculations have become indispensable tools for understanding and designing high-performance OER catalysts. In this talk, I will demonstrate how different ab-initio techniques can target specific physicochemical properties: (i) cyclic voltammetry simulations for materials characterization and interpretation of redox signals, (ii) grand canonical DFT for modeling electrochemical reaction pathways and predicting reaction energetics and kinetics, and (iii) ab-initio molecular dynamics for probing the dynamic structure of solid-liquid interfaces. Through representative case studies, I will show how these theoretical approaches directly connect with and complement experimental measurements, providing molecular-level insights into catalytic performance.

**[저장2-3 | 17:10] 초청강연**

**Effects of Bake-Hardening(BH) Heat Treatment on Hydrogen Embrittlement(HE) in automotive UHSS: Atomic-Scale Microstructural Analysis :** Yeon Seung Jung\*(POSCO Technical Research Lab.), Pang-Yu Liu, Chun Chen, Ranming Niu, Julie Cairney\*(The university of Sydney), Ain Hwang, Younghoon Jin, Honggee Kim(POSCO Technical Research Lab.)

**Keywords:** Hydrogen embrittlement, Bake-hardening, Ultra-high strength steel, Atom probe tomography, Dislocation core

Ultra-high strength martensitic steels (UHSS) are susceptible to hydrogen embrittlement (HE), which degrades mechanical performance in hydrogen-rich environments. In this study, the effects of bake-hardening (BH) heat treatment at 170 °C for 20 min on HE resistance were investigated using cryogenic atom probe tomography (Cryo-APT), scanning/transmission electron microscopy (SEM/TEM), and thermal desorption spectroscopy (TDS). BH treatment significantly reduced diffusible hydrogen content (0.05 ppm vs. 0.2 ppm in untreated samples) and suppressed surface cracking under bending in corrosive conditions. Atomic-scale analysis revealed that BH increased carbon concentration at dislocation cores from ~0.5 at.% to >2 at.%, thereby blocking hydrogen trapping sites. This site-blocking effect alters the chemical nature of traps, mitigating HE mechanisms such as hydrogen-enhanced localized plasticity (HELP) and Cottrell atmosphere formation. The findings provide a mechanistic basis for designing UHSS with improved durability in hydrogen environments through low-temperature BH processing.

**NEW-HORIZON: Next Generation AI 바이오 융합 심포지엄**

Room 3층 한라A, 4월 28일

**[A바이오-1 | 14:10] 초청강연**

Accelerating Multiphysics Modeling via GNNs and PINNs: A Journey from Ferroelectrics to Biodegradable Materials:

Pil Ryung Cha\*(국민대학교)

*Keywords:* Phase-Field Modeling, Graph Neural Networks (GNNs), Physics-Informed Neural Networks (PINNs), Multiscale Modeling

Predicting macroscopic material properties from complex microstructural evolution remains a grand challenge in computational materials science. This presentation outlines a comprehensive data-driven framework that bridges this gap, transitioning from established success in ferroelectrics to emerging applications in biodegradable materials. First, we demonstrate the efficacy of geometric deep learning in polycrystalline ferroelectrics. We constructed a massive dataset comprising over 15,000 microstructures with varying textures and calculated their polarization-electric field (P-E) curves using Phase-Field Modeling (PFM). By representing these polycrystalline structures via Graph Neural Networks (GNNs), we developed a surrogate model that predicts P-E hysteresis with high fidelity compared to PFM ground truth. Furthermore, we validated the Fourier Neural Operator (FNO) on the same dataset, achieving comparable accuracy to the GNN-based surrogate, thereby confirming the robustness of these AI architectures for standard polycrystalline systems. Expanding beyond this, we address the challenge of modeling general materials where microstructures often exhibit complex morphologies that are difficult to represent with standard GNNs. To overcome this, we are currently developing an ensemble-based AI framework. By generating numerous micro-scale microstructures under identical composition and processing conditions via PFM, we extract key microstructural features and apply ensemble averaging. This approach aims to predict macro-scale microstructures (spanning hundreds to thousands of micrometers) from localized data. Finally, we discuss our roadmap to link these predicted macro-structures to intrinsic material properties and integrate physics-informed neural networks (PINNs), specifically targeting the degradation mechanics of biodegradable alloys. This journey highlights the transformative potential of AI in accelerating material design from the micro- to the macro-scale.

**[A바이오-2 | 14:35] 초청강연**

Engineered Tissue and Bone-on-a-Chip Platforms Toward AI-Driven Regenerative Medicine: Junmin Lee\*(포항공과대학교)

*Keywords:* Engineered Biomaterials, Tissue and Bone-on-a-Chip, Osteochondral Microphysiological Systems, High-Throughput Tissue Modeling, AI-Ready Regenerative Medicine Platforms

Despite notable progress in biomaterials and organ-on-a-chip technologies, achieving high-throughput platforms that accurately reproduce dynamic and mechanically heterogeneous tissue environments remains challenging, particularly for cartilage, bone, and osteochondral interfaces. These limitations hinder systematic exploration of complex design parameters and data-driven optimization. Here, we present engineered tissue and bone-on-a-chip platforms based on biopolymer composite systems that are intrinsically AI-ready, enabling structured and scalable data generation for future machine-learning-assisted analysis. The platforms support high-content screening of biological, mechanical, and biochemical cues across multiple tissue models. A high-throughput microphysiological system for the knee cartilage microenvironment is demonstrated using aligned biopolymer scaffolds that deliver controlled anisotropic mechanical signals. This approach enables identification of matrix compositions and mechanical conditions that enhance cartilage-specific functionality. The platform is further extended to bone and osteochondral interface-on-a-chip models, where graded architectures and stiffness transitions emulate native load-bearing tissues and generate reproducible datasets linking scaffold design to osteogenic outcomes. Additionally, a dynamic tissue simulation platform employing flexible biopolymer networks is introduced to mimic physiological mechanical stimulation in soft tissues. A personalized skin-on-a-chip model using patient-derived cells and decellularized extracellular matrices recapitulates individual wound-healing and inflammatory responses. Collectively, these engineered platforms provide a scalable and AI-applicable experimental foundation for next-generation tissue models and personalized regenerative medicine, bridging advanced biomaterial design with data-centric biomedical research.

**[A바이오-3 | 15:00] 초청강연**

Active learning approach in designing energy materials: 김용주\*(고려대학교)

*Keywords:* Active learning, entropy alloy, energy materials

Searching for an optimal component and composition of multi-metallic alloy catalysts, comprising two or more elements, is one of the key issues in catalysis research. Due to the exhaustive data requirement of conventional machine-learning (ML) models and the high cost of experimental trials, current approaches rely mainly on the combination of density functional theory and ML techniques. In this study, a significant step is taken toward overcoming limitations by the interplay of experiment and active learning to effectively search for an optimal component and composition of multi-metallic alloy catalysts. The active-learning model is iteratively updated using by examining electrocatalytic performance of fabricated solid-solution nanoparticles for the hydrogen evolution reaction (HER). An

optimal metal precursor composition of  $\text{Pt}_{0.65}\text{Ru}_{0.30}\text{Ni}_{0.05}$  exhibits an HER overpotential of 54.2 mV, which is superior to that of the pure Pt catalyst. This result indicates the successful construction of the model by only utilizing the precursor mixture composition as input data, thereby improving the overpotential by searching for an optimal catalyst. This method appears to be widely applicable since it is able to determine an optimal component and composition of electrocatalyst without obvious restriction to the types of catalysts to which it can be applied.

#### [A#이오 1-4 | 15:25] 초청강연

Artificial Molecular Recognition and Machine Learning for Multidimensional Biochemical information Decoding: Sooyeon Cho\*(Sungkyunkwan University)

**Keywords:** machine learning, artificial molecular recognition, sensor, SWCNT

Corona phases on single-walled carbon nanotubes generate rich near-infrared (nIR) fluorescence signals that encode molecular interactions. By tailoring these soft-matter interfaces, we produces multidimensional spectral and spatial responses beyond conventional receptor-based sensing. Recent advances in our group integrate artificial intelligence with the corona phase engineering, where machine learning decodes hidden multispectral features within nIR spectra to reveal subtle fingerprints that classical analysis cannot capture. In parallel, deep learning applied to nIR imaging performs pixel-level feature extraction and object detection, allowing high-throughput mapping of cellular heterogeneity and dynamic chemical process. In this talk, I will highlight how corona phase engineering, combined with AI-driven interpretation of nIR spectral and imaging data, opens a route to multidimensional precision chemical information transfer for diagnostics and process analytics.

#### [A#이오 1-5 | 15:50] 초청강연

MetaFlow: 3D NodeSpace 기반 연구자 중심 소재 개발 AI 플랫폼: 박세진, 최준혁, 원예지(국민대학교), 어광준(한국재료연구원), 조기섭\*(국민대학교)

**Keywords:** 인공지능, 플랫폼, 에이전트, 문헌자동수집

소재 연구개발 초기 단계의 문헌 분석은 필수적이거나, 방대한 데이터 탐색에는 막대한 시간과 노력이 소요된다. 본 연구에서는 이를 자동화하기 위해 3D NodeSpace 기반의 소재 개발 AI 플랫폼인 MetaFlow를 소개하고자 한다. MetaFlow는 연구자가 코딩 없이 시각적으로 워크플로우를 설계할 수 있는 3D 노드 기반 인터페이스를 제공하며, 문헌 수집, LLM 활용 CPSP 구조화, 관계성 매칭, 데이터 정제 등을 개별 노드로 구성하여 사용자 목적에 특화된 문헌 수집 에이전트를 자율적으로 구축할 수 있다. 이러한 에이전트는 특정 태스크(Task) 단위로 등록되어 외부 호출이 가능하며, 단순 키워드 입력만으로 고도화된 문헌 수집 업무를 수행한다. 본 플랫폼은 다양한 소재 연구 분야에서 데이터 확보 효율을 제고하고 연구자의 통찰력을 돕는 범용적 AI 도구로 활용될 것으로 기대된다.

#### [A#이오2-1 | 16:25] 초청강연

Integrating AI into Bioinspired Bionanomaterial Engineering: Ju Hun Lee\*(Hanyang University, ERICA)

**Keywords:** Artificial Intelligence, Molecular Nanodiagnostics, Protein Structure Prediction, Bio-Piezoelectric Materials, Interdisciplinary Research

Recent advances in artificial intelligence have rapidly expanded its applications across the bio- and life-science fields, with AI-based protein structure prediction gaining formal recognition of its scientific value through the 2024 Nobel Prize in Chemistry. Despite this progress, substantial barriers to effective collaboration remain due to differences in research languages and methodologies between bio researchers and AI researchers. The primary goal of this presentation is to bridge this interdisciplinary gap and foster mutual understanding. First, we introduce current molecular nanodiagnostic technologies and approaches that integrate machine learning-based multiplexing techniques, and discuss how these methods can be further expanded using AI. Second, we present the development of bio-piezoelectric devices inspired by protein structures in the human body, focusing on material design for utilizing microcurrent stimulation—one of the key mechanisms underlying musculoskeletal regeneration—and pose questions on how AI can be effectively integrated into this process. Beyond a simple introduction of technologies, this presentation aims to identify shared research questions and explore practical opportunities for collaboration. Through this effort, we seek to lay the groundwork for sustainable interdisciplinary research and the development of joint projects within the academic community.

#### [A#이오2-2 | 16:50] 초청강연

Application of Artificial Intelligence for Property Control of Biomedical Polymers: Hyun-Do Jung\*(Hanyang University)

Biomedical polymers are required to simultaneously satisfy diverse performance criteria, including biocompatibility, mechanical properties, degradation behavior, and surface characteristics. These properties are intricately governed by polymer composition, molecular structure, and processing conditions, rendering conventional trial-and-error optimization approaches inefficient and time-consuming. In this study, an artificial intelligence (AI)-based framework is proposed for effective property control of various biomedical polymers. Comprehensive datasets were constructed using polymer composition, molecular parameters, and processing variables as input features, while mechanical, thermal, degradation, and biological properties were employed as output targets. Machine learning and



deep learning models were applied to predict polymer properties and to identify critical structure–property relationships. The AI models successfully captured complex nonlinear correlations across different polymer systems and demonstrated high agreement with experimental results. Furthermore, inverse design strategies enabled the determination of optimal polymer compositions and processing conditions that satisfy target performance requirements. This AI-driven approach offers an efficient pathway for biomedical polymer design and is expected to accelerate the development of advanced biomaterials and customized biomedical polymer systems.

### [바이오2-3 | 17:15] 초청강연

**생분해성 바이오 의료소자에서의 AI 응용 전략:** 강승균\*(서울대학교)

**Keywords:** 생분해성 소재, 의료용 전자소자, 생분해성 금속, 딥러닝

딥러닝 기반 해석 기술은 바이오 산업 분야에서 기존 인적 노동으로는 달성하기 어려웠던 분석 시간의 획기적 단축과 새로운 판단 기준을 제시하고 있다. 본 발표에서는 인공지능 기술의 접목이 필수적인 차세대 바이오·의료소자 기술을 소개하고, 이를 통해 도출될 수 있는 새로운 연구 방향을 논의하고자 한다. 첫째, 생분해성 소자를 활용한 최소침습형 뇌-기계 인터페이스(BMI) 기술을 다룬다. 형상기억소재 기반의 주사형 전극을 이용하여 대뇌피질에 대면적 전극 인터페이스를 구현함으로써, 연속적인 뇌 신호 모니터링이 가능하다. 이를 통해 인지 및 행동과 연계된 뇌 활동의 정밀한 브레인 매핑과 이해를 가능하게 하며, 나아가 심부 뇌 영역에서 발생하는 스파이크 신호의 해석으로 확장될 수 있다. 이러한 고차원·대용량 신호의 분석 과정에서 AI 기반 신호처리는 핵심적인 역할을 수행한다. 둘째, 생분해성 소재 설계에 딥러닝 기술을 적용한 연구를 소개한다. 생분해 금속 소재는 전자소자의 배선이나 전류 집전체뿐만 아니라, 생분해성 배터리 등 에너지 소자로의 활용 가능성이 크다. 박막 특성을 결정하는 소재 인자 및 공정 인자를 체계적으로 데이터베이스화하고, 이를 기반으로 소재를 설계하는 딥러닝 기반 소재 설계 플랫폼 구축을 목표로 한 소재 허브 연구를 추진 중이며, 본 발표에서는 해당 접근법과 최근 연구 성과를 함께 논의한다. 본 발표는 바이오 의료소자 분야에서 AI 기반 해석 및 설계 기술의 역할을 조명하고, 생분해성 소자와 인공지능의 융합이 열어갈 새로운 연구 가능성을 제시하고자 한다.

## 전산재료과학 I

Room 3층 한라B, 4월 28일

## [전산1-1 | 09:00] 초청강연

Computational investigation of anionic redox chemistry for sustainable high-energy Li-ion batteries: Eun Ryeol LEE\*(충북대학교)

**Keywords:** First principles calculations, Li-ion batteries, high-energy cathodes, oxygen redox

Conventional Li-ion layered oxide cathodes,  $\text{LiTMO}_2$  (TM=transition metal), are approaching their theoretical energy density limit, which constrains further innovation in energy density and the broader application of Li-ion battery technologies. This limitation fundamentally arises from their exclusive reliance on TM-based cationic redox reactions. In contrast, Li-excess and TM-deficient  $\text{Li}_{1+x}\text{TMO}_2$  layered system activates lattice oxygen to participate as an additional redox center, potentially increasing the theoretical energy density beyond that of conventional  $\text{LiMO}_2$  cathodes. However, oxygen redox chemistry is often accompanied by severe structural and electronic instability during electrochemical cycling, leading to voltage hysteresis, oxygen loss, and poor reversibility. This presentation introduces our recent computational investigations, closely integrated with experimental validation, to elucidate the fundamental origin of oxygen redox instability and propose strategies for stabilizing anionic redox activity. Two complementary approaches will be discussed: (i) structural engineering to regulate oxygen environments and (ii) compositional design to enhance TM-O covalency and electronic stabilization. These findings provide guiding principles for designing sustainable, high-energy Li-ion cathodes based on reversible anionic redox chemistry.

## [전산1-2 | 09:25]

이중 도핑 기반 과리튬 망간 층상 구조 양극재의 전자 구조와 전기화학적 성능 연구 : 주용하(포항공과대학교), 신용진(단국대학교), 김경덕\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 제일원리계산, 양극재, 전자 구조

과리튬망간층상계 산화물(Lithium- and Manganese-rich layered oxides, LMR)은 높은 이론 용량과 낮은 원가로 인해 차세대 리튬이온전지 양극 소재로 주목받고 있으나, 산소 방출에 따른 구조적 불안정성, 전압 감소 및 제한적인 사이클 수명이라는 한계를 지닌다. 이러한 문제를 완화하기 위한 도핑 전략이 제안되어 왔으나, 다중 도펀트 간 상호작용에 대한 체계적인 이해 부족으로 인해 효과적인 조성 설계에는 제약이 존재한다. 본 연구에서는 과리튬망간층상계 산화물에서 5종의 단일 도펀트와 4종의 이중 도펀트 조합을 대상으로, 제일원리 밀도범함수이론(DFT) 계산과 리간드 장 이론을 활용하여 도핑에 따른 전자 구조 및 전기화학적 특성 변화를 분석하였다. 이를 통해 도펀트 조합에 따른 상 안정성, 가역 용량, 평균 작동 전압, 격자 부피 변화 및 산소 공공 형성 에너지를 종합적으로 평가하였다. 그 결과, 도펀트의 원자 크기와 전하 이동과 같은 물리적 화학적 변수가 형성 에너지 및 전기화학적 성능과 밀접한 상관관계를 가짐을 확인하였다. 더 나아가,  $d^0$  전이금속 원소와 산화·환원 활성 도펀트를 이중으로 도핑할 경우, 산화·환원 활성 도펀트의 레독스 반응성이 향상되며 음이온 레독스 과정이 안정화됨을 확인하였다. 한편, 산소 공공 형성 에너지 분석을 통해 도펀트 시스템의 산소 안정화 메커니즘이 전이금속이 완전히 치환된 층상계 산화물( $\text{LiMO}_2$  계열 및  $\text{Li}_2\text{MO}_3$ )에서 보고된 거동과는 다른 새로운 메커니즘을 가짐을 확인하였다. 이를 바탕으로 격자 부피 변화와 산소 공공 형성 에너지 사이의 트레이드오프 관계를 규명하고, 도펀트 조합을 세 가지 그룹으로 분류하여 사이클 수명 특성을 비교·분석하였다. 본 연구는 과리튬망간층상계 산화물의 도핑 효과에 대한 체계적인 이해를 제공하며, 합리적인 도핑 설계를 위한 예측적 가이드라인을 제시한다.

## [전산1-3 | 09:40]

Effects of Hydrophobic Layer on Layered Transition Metal Oxide Cathodes for Ultrafast-Charging Aqueous Li-Ion Batteries: A First-Principles Study: Suim Lim(Korea Institute of Energy Research, Sogang University), Eunjin Choi, Hyunjeong Oh, Hye Ryung Byon\*(Korea Advanced Institute of Science and Technology), Kanghoon Yim\*(Korea Institute of Energy Research)

**Keywords:** Density Functional Theory, Fast-charging, Aqueous Li-ion battery

Fast-charging capability is essential for maintaining the stability of energy storage systems under high-power operation. In aqueous Li-ion batteries, however, this performance is limited by poor ion-transport pathways at the electrode-electrolyte interface, which raise interfacial energy barriers and accelerate parasitic side reactions. To mitigate proton insertion, which induces degradation in layered transition metal oxide cathodes, ion-pair formation between  $\text{SO}_4^{2-}$  in  $\text{Li}_2\text{SO}_4$  electrolytes and  $\text{Li}^+$  in  $\text{LiCoO}_2$  (LCO) has been employed; however, its stabilizing effect is limited to mild operating conditions. Recently, we demonstrate that lithium dodecyl sulfate (DS) acts as a molecular ion-channel for polycrystalline LCO, enabling ultrafast and durable performance in aqueous media. In this talk, we present the theoretical study using density functional theory (DFT) calculations to elucidate the molecular-scale role of DS additive at the cathode-electrolyte interface. We identify that a downward configuration of DS reduces  $\text{Li}^+$  extraction barriers during charging, while mixed orientations facilitate  $\text{Li}^+$  insertion during discharging. In addition, the structural analysis results indicate the distortion of Co-O octahedra in LCO during the delithiation process can be suppressed by the DS passivation layer. We anticipate that this stabilizing effect, enabled by self-assembled organic molecular channels, will be broadly applicable to a wide range of electrochemical energy storage systems, thereby offering a versatile pathway toward next-generation fast-charging technologies.

**[전산1-4 | 09:55]**

Self-Healing Strategy for Seawater Electrolysis: The Role of  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$  in Stabilizing NiFe-LDH Anodes: Bogeun Park(Hanyang University ERICA), Won-Chul Cho\*(Seoul National University of Science and Technology), Byung-Hyun Kim\*(Hanyang University ERICA)

**Keywords:** NiFe-LDH, Seawater Electrolysis, Self-Healing

The production of green hydrogen via the electrolysis of seawater is a critical technology for sustainable energy, particularly in peninsular regions such as South Korea. While NiFe-LDH is a highly active OER catalyst in fresh water, its practical application in seawater is severely limited by chloride ion ( $\text{Cl}^-$ ) induced corrosion, which rapidly degrades long-term stability. In order to surmount this challenge, an investigation was conducted into the sustained performance of NiFe-LDH anodes in Fe-rich electrolytes. The experimental analysis confirmed that, under operating conditions, dissolved iron exists predominantly as  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ . In light of the findings, Density Functional Theory (DFT) calculations were performed to elucidate the atomic-level mechanism underlying the observed enhancement in stability. The results of the simulations indicate that  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$  demonstrates a higher degree of adsorption onto the surface of the catalyst in comparison to  $\text{Cl}^-$ , thus forming a protective layer that, from a thermodynamic perspective, impedes the penetration of chloride ions. This protective layer has been shown to significantly increase the energy barrier for metal dissolution, thereby effectively suppressing corrosion. Moreover, a self-healing mechanism was identified, whereby abundant  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$  ions in the electrolyte immediately re-adsorb to repair surface defects, even in instances of  $\text{Cl}^-$  induced detachment. In conclusion, this study demonstrates that an Fe-rich electrolyte strategy extends catalyst lifespan through the formation of a protective layer and a self-healing process. These findings provide critical mechanistic insights for developing durable seawater electrolysis systems.

**[전산1-5 | 10:10]**

First-Principles Insights into the Enhanced Catalytic Activity of Mg-Doped Prussian Blue for Hydrogen Peroxide Decomposition: PRITAM DAS(Kookmin University), Yu-Chan Kim(Korea Institute of Science & Technology), Pil-Ryung Cha\*(Kookmin University)

**Keywords:** Prussian Blue Nanozymes, First-Principles Calculations, Hydrogen Peroxide Decomposition, Mg-Doping, Catalytic Activity

Reactive oxygen species (ROS) serve as essential signaling mediators in biological systems; however, their overproduction induces oxidative stress and contributes to the progression of chronic diseases. Artificial enzyme mimetics, or nanozymes, have therefore emerged as promising therapeutic platforms for precise regulation of ROS. Among them, Prussian Blue-based iron nanozymes exhibit intrinsic superoxide dismutase (SOD)-mimetic activity, yet their clinical translation remains limited by structural instability and insufficient catalytic efficiency at therapeutic doses. Rational structural optimization is thus critical to enhance their biomedical applicability. In this work, we employ first-principles density functional theory simulations to systematically investigate the dissociation mechanisms of hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) on Prussian Blue and its structurally modified derivatives. All plausible interfacial configurations are evaluated to comprehensively map reaction pathways and identify energetically favorable dissociation routes. We elucidate the electronic origins of catalytic activation by analyzing work function variations, d-band center shifts, H-H bond elongation, and interfacial charge redistribution via Bader charge analysis. To ensure physiological relevance, solvent effects are incorporated through the Computational Hydrogen Electrode framework. Furthermore, we examine the structural and electronic consequences of magnesium (Mg) incorporation, which induces the transformation from Prussian Blue to Prussian White. Our results demonstrate that Mg concentration modulates Fe charge states and preferential doping sites, thereby strongly influencing catalytic behavior. Notably, Mg incorporation lowers the  $\text{H}_2\text{O}_2$  dissociation energy barrier by 38%, indicating a substantial enhancement in catalytic efficiency. In close integration with experimental efforts, this study provides atomistic-level insight into ROS-related catalytic mechanisms and establishes a rational design strategy for next-generation Prussian Blue-based nanozymes with improved performance and translational potential for biomedical applications.

**[전산2-1 | 10:35] 초청강연**

Developing universal algorithms for decomposing ionic transport into interpretable mechanisms: KyuJung Jun\*(Korea University)

**Keywords:** 이온전도체, 배터리, 머신러닝기반모델링, 계산재료과학

Understanding ion transport mechanisms in bulk materials is essential for the rational design of next-generation ion conductors for energy storage. However, most all-atom molecular dynamics (MD) studies report only overall transport coefficients, offering limited insight into the underlying spatiotemporal mechanisms by which charge is carried. Here, we present a computational framework that transforms MD trajectories into a quantitative, mechanism-resolved description of transport. The method decomposes macroscopic Onsager transport coefficients into additive contributions arising from physically interpretable events. These events are defined either through heuristically identified microscopic transitions—such as single-ion hops, concerted multi-ion motion, and vehicular transport, or through transitions between chemically meaningful coordination macrostates. By construction, all attributed contributions sum exactly to the Green-Kubo/Einstein transport coefficients, ensuring thermodynamic consistency. Furthermore, systematic variation of the sampling window reveals the characteristic timescales at which distinct transport mechanisms emerge and dominate. We apply the

framework to three prototypical electrolyte classes: inorganic crystals, liquids, and polymers, quantitatively resolving longstanding mechanistic debates (e.g., the role of concerted motion and exchange processes), identifying dominant pathways and rate-limiting steps, and extracting activation energies for distinct transport modes. The resulting mechanism maps provide quantitative design rules for fast ion conduction. This general and reproducible analysis tool converts MD simulations into interpretable, quantitative transport maps, enabling rigorous comparison of mechanistic hypotheses and accelerating the discovery of high-performance ion conductors.

### [전산2-2 | 11:00]

Revealing the Origin of Enhanced Li-ion Conductivity in  $\text{BH}_4^-$ -Substituted Li-Argyrodites: Jung Woo Kang, Sang Uck Lee\*(Sungkyunkwan University)

**Keywords:**  $\text{BH}_4^-$ -substituted argyrodite, ab initio molecular dynamics, rotational motion, hop-anion coupling, Li-cage size

**Introduction.** All-solid-state batteries (ASSBs) with solid electrolytes (SEs) offer improved safety over conventional lithium-ion batteries. Halide argyrodites  $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$  ( $\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ) are promising SEs, and  $\text{BH}_4^-$  substitution at halide sites has been reported to enhance room-temperature Li-ion conductivity with stable full-cell operation. However, whether  $\text{BH}_4^-$  rotational motion facilitates  $\text{Li}^+$  transport remains debated. Here, ab initio molecular dynamics (AIMD) is used to clarify the role of  $\text{BH}_4^-$  rotational motion via  $\text{BH}_4^-$ -mobile/frozen comparisons and event-resolved coupling analysis. Li-cage uniformity is additionally evaluated as a structural descriptor of  $\text{Li}^+$  percolation in  $\text{BH}_4^-$ -substituted argyrodites. Model systems and Li-ion conductivity. Three  $\text{BH}_4^-$ -substituted argyrodite compositions were constructed by substituting anions at the Wyckoff 4a/4c sites of  $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{X}$ : LPS-BB ( $\text{Li}_5\text{PS}_4(\text{BH}_4)_2$ ), LPS-BCl ( $\text{Li}_5\text{PS}_4(\text{BH}_4)\text{Cl}$ ), and LPS-SB ( $\text{Li}_6\text{PS}_4\text{S}(\text{BH}_4)$ ). Across sampled configurations of each composition, 300 K AIMD (100 ps) gave bulk conductivities of 13.68 mS  $\text{cm}^{-1}$  for LPS-BB ( $\sim 3\times$  higher than  $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ , 3.82 mS  $\text{cm}^{-1}$ ) and 6.64/7.67 mS  $\text{cm}^{-1}$  for LPS-BCl/LPS-SB ( $\sim 2\times$  higher), demonstrating a marked conductivity enhancement upon  $\text{BH}_4^-$  substitution.  $\text{BH}_4^-$  rotational motion and  $\text{Li}^+$  transport. Analysis of B-H angular displacements reveals that  $\text{BH}_4^-$  rotational motion is dominated by persistent libration punctuated by intermittent reorientation events. Additional 500 K AIMD (20 ps) with  $\text{BH}_4^-$  mobile versus frozen shows that freezing  $\text{BH}_4^-$  reduces Li-ion diffusivity by 59%/46%/36% for LPS-BB/BCl/SB, indicating a substantial dynamical contribution. Under  $\text{BH}_4^-$ -mobile conditions, both intra-cage and inter-cage transport are enhanced, : the intra-cage  $\text{Li}^+$  displacement distribution shifts rightward across its main body (consistent with libration-driven broad mobility), and inter-cage hopping increases, reflected in more  $\text{Li}^+$  ions undergoing hops and an enhanced long-displacement component in the self part of the van Hove correlation.  $\text{Li}^+$  hop- $\text{BH}_4^-$  reorientation coupling. Inter-cage  $\text{Li}^+$  hops and nearby  $\text{BH}_4^-$  motion were tracked using 1 ps-averaged  $\text{Li}^+$ - $\text{BH}_4^-$  distances and B-H angular displacements. Each hop—an abrupt  $\text{Li}^+$ - $\text{BH}_4^-$  distance change—coincided with sharp ( $>60^\circ$ ) multi-bond angular-displacement changes, indicating hop-reorientation coupling. Sub-ps ordering was then resolved by frame-by-frame OVITO inspection:  $\text{BH}_4^-$  reorientation predominantly followed, rather than coincided with, the hop, disfavoring a synchronous paddle-wheel mechanism. Instead,  $\text{BH}_4^-$  reorientation appears adaptive, responding to the locally perturbed environment created by  $\text{Li}^+$  relocation. To rationalize the adaptive  $\text{BH}_4^-$  response, single-point DFT was used to map a  $\text{Li}^+$ - $\text{BH}_4^-$  orientational PES, which is strongly anisotropic ( $\Delta E \approx 0.18$  eV) and comparable to typical inter-cage barriers in halide argyrodites ( $\sim 0.2$ – $0.3$  eV). This indicates that hop-driven  $\text{Li}^+$  relocation can render the local  $\text{Li}^+$ - $\text{BH}_4^-$  alignment energetically unfavorable, triggering post-hop  $\text{BH}_4^-$  reorientation. In the crystal, these local reorientations collectively reshape the transport landscape, relax transient bottlenecks, and promote sustained inter-cage hopping. Li-cage uniformity. While  $\text{BH}_4^-$  rotational motion provides dynamical facilitation, prior studies on argyrodites show that greater Li-cage size uniformity (anion-centered  $\text{Li}^+$  cages) reduces mismatch at cage junctions and facilitates inter-cage diffusion. In  $\text{BH}_4^-$ -substituted argyrodites, the same trend is observed: the cage-size standard deviation (STD) inversely correlates with Li-ion conductivity. Notably, the  $\text{BH}_4^-$ -substituted compositions exhibit improved uniformity (STD  $\leq 0.03/0.06/0.08$  Å for LPS-BB/BCl/SB) compared with prior halide argyrodites, supporting a percolating  $\text{Li}^+$  migration network. Conclusion. Overall,  $\text{BH}_4^-$  rotational motion enhances  $\text{Li}^+$  transport: libration boosts intra-cage mobility, and reorientation—strongly coupled to hopping but predominantly post-hop—supports an adaptive energy-landscape response rather than a synchronous paddle-wheel. Together with improved Li-cage uniformity that maintains percolation, these effects explain the high conductivities of  $\text{BH}_4^-$ -substituted argyrodites.

### [전산2-3 | 11:15]

Origin of Optimal Composition and Density for Li-Ion Diffusion in Amorphous Li-P-S Electrolytes: Chihun Kim(Korea Institute of Science and Technology, Korea Univ.), Hyun-Jae Lee(Korea Institute of Science and Technology), Byungju Lee\*(Korea Institute of Science and Technology, University of Science & Technology)

**Keywords:** amorphous, diffusion mechanism, simulation, solid electrolytes, sulfide

Amorphous solid electrolytes (SEs) are promising candidates for next-generation solid-state batteries owing to their mechanical softness and isotropic ion transport. However, the absence of long-range order has hindered a mechanistic understanding of their ionic conductivity. Here, we employ AI-based simulations to investigate  $\text{Li}_2\text{S}$ - $\text{P}_2\text{S}_5$  glasses across a broad composition-density space. We show that conventional descriptors—density, lithium content, and polyanion distribution—explain only part of the diffusivity trends. By decomposing transport into short- and long-range components, we find that conduction is dominated by short-range dynamics. Further analysis identifies two complementary structural determinants: Li-S4 coordination environments, which stabilize hopping events, and

pore evolution, which distinguishes accessible diffusion channels from inactive voids. This dual framework explains the emergence of optimal conductivity near  $\text{Li}_3\text{PS}_4$  stoichiometry and clarifies why excessive free volume can suppress transport. Overall, our results provide a mechanistic basis for ion conduction in amorphous solids and guiding principles for the design of high-performance glassy electrolytes.

#### [전산2-4 | 11:30]

Effect of lattice distortion and hydrogen affinity on hydrogen diffusion in hydrogen storage alloys: An atomistic simulation study : Ji-Su Lee, Byeong-Joo Lee\*(POSTECH)

**Keywords:** hydrogen storage alloy, diffusion, machine learning potential, molecular dynamics

Metal hydrides are considered promising for hydrogen storage, and  $\text{TiMn}_2$ -based hydrogen storage alloys are particularly recognized for their favorable hydrogenation kinetics. We focused on diffusion, an essential component of kinetics, with the aim of elucidating the effects of structural distortions and chemical bonding characteristics on hydrogen diffusivity. In this study, we developed a machine learning potential for molecular dynamics simulation and performed diffusion simulations utilizing the developed potential. Diffusion simulations of alloys with varied compositions showed that  $\text{TiMn}_2$  exhibited the highest hydrogen diffusivity among the systems investigated. Trajectory analysis demonstrated that lattice distortions obstruct established hydrogen diffusion pathways, leading to decreased diffusivity, and coordination analysis indicated that hydrogen trapping occurs near Ti atoms due to their strong affinity for hydrogen. These findings provide fundamental insights into diffusion mechanisms of hydrogen, thereby suggesting guidelines for the design of advanced hydrogen storage materials.

#### [전산2-5 | 11:45]

상장 모델을 활용한 소성 중 미드니켈 층상 양극활물질의 단결정화 메커니즘 분석: 박현호(포항공과대학교), 김상범, 김영진(강원대학교), 김경덕\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 이차전지 양극재, 단결정 NCM, 미드니켈

단결정(Single-Crystal) 층상 산화물은 우수한 기계적 내구성을 바탕으로 고전압 구동이 가능하다는 장점으로 인해 양극활물질로서 활발히 연구되어 왔으며, 미드니켈( $\text{Li}[\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}]\text{O}_2$  ( $x=0.5$  and  $0.6$ )) 조성에서는 상용화 단계에 이르렀다. 그러나 고온 소성 및 소결 과정에서 발생하는 상변화와 미세조직 진화 메커니즘에 대한 근본적인 이해가 부족하여, 대면적 합성 및 공정 스케일업에는 여전히 한계가 존재한다. 본 연구에서는 고온 소성 과정 중 치밀화와 결정립 성장을 포괄적으로 이해하기 위해 상장 모델을 활용하여 미드니켈 층상 양극활물질의 단결정화 메커니즘을 분석하였다. 본 상장 모델은 표면, 입계 및 격자 내부를 통한 확산, 기상 수송, 입자의 병진 및 회전에 따른 강체 운동, 그리고 입계 이동에 의한 결정립 성장 등 소성 과정에서 동시에 발생하는 복합적인 물리 현상을 통합적으로 모사할 수 있다. 시뮬레이션 결과, 기존 연구에서 상대적으로 주목받지 않았던 산소 분압이 입자 성장 속도와 단결정화 거동을 지배하는 핵심 인자로 작용함을 확인하였다. 높은 산소 분압 조건에서는 입계가 안정화되어 국소적인 입자 병합이 억제되며, 소결 속도는 감소하나 균질한 미세조직이 형성된다. 반면, 낮은 산소 분압 조건에서는 확산이 촉진되어 결정립 성장이 빠르게 진행되며, 이에 따라 단결정화에 소요되는 시간이 단축된다. 이러한 결과는 실험적으로 관찰되는 시간 효율적인 단결정화 거동의 기저 메커니즘을 설명하며, 구조적 안정성과 공정 시간 간의 상충 관계를 이해할 수 있는 물리적 근거를 제시한다.

#### [전산3-1 | 14:00] 초청강연

Deep learning of short-range order formation kinetics in multicomponent alloys: Hoje Chun\*(국민대학교)

**Keywords:** AI, reinforcement learning, atomistic simulation, short-range order, high entropy alloys, thermal annealing

Processes slow compared to atomic vibrations pose significant challenges in atomistic simulations, particularly for phenomena such as diffusive relaxations and phase transitions, where repeated crossings and the shear number of thermally activated transitions make direct numerical simulations impossible. We present a computational framework that captures atomic-scale diffusive relaxation over extended timescales by learning the mean first passage time (MFPT) with a deep neural network. The model is trained via a self-consistent recursive formulation based on the Markovian assumption, relying solely on local residence times and transition probabilities between neighboring states. Furthermore, we leverage deep reinforcement learning (DRL)-accelerated atomistic simulations to expedite the identification of thermodynamic equilibrium and the generation of accurate physical transition probabilities. Applied to vacancy-mediated chemical short-range order (SRO) evolution in equiatomic  $\text{CrCoNi}$ , our method uncovers disorder-to-order transition timescales in quantitative agreement with experimental measurements. By bridging the gap between simulation and experiment, our approach extends atomistic modeling to previously inaccessible timescales and offers a predictive tool for navigating process-structure-property relationships.

#### [전산3-2 | 14:25]

Revealing Li staging Reactions in Graphite via a Genetic Algorithm Coupled with a Machine-Learning Interatomic Potential: YONG HUI KIM, Sang Uck Lee\*(SungKyunKwan University)

**Keywords:** staging reaction, Li orderings, stacking transition, machine-learning interatomic potential

1. Introduction The formation of ordered 'stage' structures is a hallmark of lithium intercalation in graphite anodes, governing the

battery's voltage profile and capacity. However, the precise mechanism guiding the evolution of these stages has been a subject of debate for decades, centered on two classical models. The Rüdorff–Hofmann (RH) model describes uniform, periodic staging in which Li layers alternate regularly with graphene sheets. In contrast, the Daumas–Hérolld (DH) model emphasizes the localized growth of intercalant domains within layers. Which mechanism prevails in real electrodes remains unresolved. This lack of consensus stems from significant experimental limitations; direct, atomic-scale observation is exceptionally challenging, forcing a reliance on indirect data and thus necessitating rigorous computational modeling. While empirical methods like kinetic Monte Carlo (KMC) are limited by pre-defined parameters, a first-principles approach like density functional theory (DFT) is essential for accurately describing the ground-state energetics of the Li–graphite system. In this study, we aim to elucidate the graphite stage reaction using a DFT based approach by addressing three key physical questions: (i) DFT functional dependence: The stability of phases is highly dependent on the chosen vdW functional, as Li intercalation introduces Li–Li and Li–C interactions that compete with the native vdW binding. (ii) Graphene stacking mode: It remains unclear when the AB→AA transition occurs and what factors, such as local versus global Li concentration, govern this process. (iii) Li arrangement: How the preferred ordering of Li atoms evolves with states of charge (SOC) and how it interplays with the stacking mode has not been systematically resolved. To this end, we first benchmarked vdW-corrected DFT functionals to establish a reliable energetic baseline and identify stacking transition criteria as a function of Li concentration. To overcome the limited configurational sampling accessible to conventional DFT, we developed a machine-learning interatomic potential (MLIP) trained on the benchmarked dataset and coupled it with a genetic algorithm (GA). This GA-MLIP framework enables large-scale exploration of Li configurations and stacking modes across the full SOC range in supercells containing up to 448 atoms, allowing us to resolve their coupled evolution and establish a thermodynamically grounded framework for graphite stage reactions.

## 2. Results and Discussion

### 2.1 Functional benchmark for Li-graphite compounds

The description of van der Waals (vdW) interactions is critical for accurate DFT calculations of graphite. We therefore benchmarked several vdW functionals against experimental data using four key descriptors: the intercalation energy of LiC<sub>6</sub>, the cohesive energy of graphite, and the interlayer distances of both pristine graphite and LiC<sub>6</sub>. Among the tested functionals, optB88-vdW consistently exhibited the lowest overall deviations across all descriptors and was therefore selected for all subsequent calculations.

### 2.2 Criterion for graphene stacking mode

Li intercalation induces a transition from graphite's native AB stacking to AA stacking, and identifying the onset of this transition is important for understanding the staging mechanism. To pinpoint this threshold, we compared a Local–Lithiation (LL) model, in which stacking stability is evaluated as a function of local SOC adjacent to a target graphene layer, with a Global–Lithiation (GL) model, in which the same stability is evaluated as a function of global SOC under uniform lithiation. In both cases, the stacking preference was quantified using the energy difference  $\Delta E$  ( $E_{AA} - E_{AB}$ ) based on the lowest-energy Li ordering. Although the SOC definitions differ, both models exhibit a stacking transition near ~13% SOC. Since the global SOC description inherently reflects the local lithiation environment of the transitioning layer, the transition criterion can be conveniently discussed in terms of local SOC.

### 2.3 Li arrangement as a function of SOC and stacking

Guided by the identified local SOC threshold of ~13% for the stacking transition, our GA-MLIP framework reveals a systematic evolution of Li ordering with increasing lithiation. At low SOC (< 20%), lithium ordering remains strongly stacking-dependent, reflecting the dominance of interlayer C–C interactions: AB stacking favors Off-facing (DH-like) orderings that minimize disruption of the interlayer framework, whereas locally expanded AA stacking stabilizes Alternating (RH-like) orderings through enhanced Li–C interactions. As SOC approaches ~20%, stacking dependence diminishes as Li–C interactions become increasingly significant, and the Alternating (RH-like) ordering is favored regardless of stacking type. With further lithiation (~30–35% SOC), the emergence of interlayer Li–Li interactions leads to a competitive regime in which Off-facing (DH-like) and Alternating (RH-like) orderings coexist with comparable stability. At higher SOC (≥40%), AB stacking is no longer sampled in the GA-MLIP search, and the accessible configurations converge toward an AA-stacked environment in which Alternating (RH-like) ordering persists. Taken together, the SOC-dependent progression from Off-facing to Alternating ordering, with a coexistence regime at intermediate SOC, provides a unified framework for the graphite staging reaction and offers a consistent interpretation of experimental observations reporting both RH-like and DH-like staging behaviors.

## 3. Conclusions

This study introduces a GA-MLIP framework to investigate Li intercalation in graphite. We identify a local-SOC-based stacking criterion, with an AB→AA transition at ~13% SOC and AB stacking sampled only up to ~35% global SOC. The associated evolution of Li ordering—from Off-facing ordering at low SOC, through a coexistence regime near ~35% SOC, to Alternating ordering at higher SOC—can be understood in terms of the evolving balance among interlayer C–C, Li–C, and Li–Li interactions. Together, this work offers a concise framework for interpreting SOC-dependent staging behavior in graphite.

### [전산3-3 | 14:40]

Efficient Exploration of PtZn-Based Ammonia Catalysts Using Universal Machine Learning Potentials: [Hayoung Jeong](#), Jeong Woo Han\*(Seoul National University)

**Keywords:** screening, PtZn, HEA

Ammonia has gained significant attention as a carbon-free hydrogen carrier, necessitating the development of efficient catalysts for its decomposition and synthesis. While L1<sub>0</sub> ordered PtZn alloys exhibit superior stability and activity, doping with transition metals (Fe, Ni, Co) offers a pathway to further tune their catalytic properties. However, the combinatorial explosion of possible surface atomic configurations and doping sites in such multi-component systems renders comprehensive exploration via conventional Density



Functional Theory (DFT) computationally prohibitive. To address this challenge, we propose a hierarchical screening methodology utilizing state-of-the-art Universal Machine Learning Interatomic Potentials (MLIPs). To avoid model-dependent bias, we established a rigorous validation protocol. A ground truth dataset was constructed via single point DFT calculations on randomly generated structures, which was used to benchmark various MLIPs based on their Root Mean Square Error (RMSE) and, crucially, their Spearman rank correlation to ensure accurate energy ranking preservation. Using the verified champion model, we performed large scale structural optimization on thousands of randomized configurations, successfully identifying thermodynamically stable candidates while drastically reducing the computational cost. High precision DFT calculations were subsequently performed on the top ranked structures to evaluate  $\text{NH}_3$  adsorption energetics. Furthermore, we elucidated the electronic and geometric origins of the enhanced adsorption by analyzing the d-band center shifts and charge transfer mechanisms. This study demonstrates that a verified MLIP assisted workflow is a powerful tool for navigating the vast chemical space of complex systems, such as High Entropy Alloys (HEAs), providing a systematic guideline for the pre experimental screening of promising catalytic materials.

#### [전산3-4 | 14:55]

**제일원리계산 및 기계학습 기반  $\gamma$ -Fe 결정립계 편석 예측과 분자동역학 규모 확장:** 이호, 김상태\*(한양대학교)

**Keywords:** 결정립계, 편석, 기계학습

결정립계 편석은 결정립계에서 용질 농도가 증가하는 현상으로, 나노결정질 합금의 안정화 및 내식성 향상 등 합금 설계에 중요한 역할을 한다. 그러나 결정립계 편석 예측에서 밀도범함수이론은 높은 정확도를 제공하는 반면, 다양한 결정립계, 치환 원소, 치환 위치, 온도 조건으로 확장하기에는 막대한 계산 비용이 요구된다. 또한 원자간 퍼텐셜을 이용한 분자동역학은 대규모 및 유한 온도 조건 설정에 유리하지만, 신뢰성 있는 퍼텐셜 구축과 편석 에너지의 정량 정확도, 전자 구조 기반 상호작용 재현에는 한계가 있다. 이에 본 연구는  $\gamma$ -Fe 기반 결정립계에서의 편석 현상을 대상으로, 제일원리 계산 수준의 정확도를 유지하면서도 분자동역학 규모로 확장 가능한 멀티스케일 예측 모델 구축을 위해, Vienna Ab Initio Package(VASP) 계산을 사용하여  $\gamma$ -Fe의 5종 결정립계를 모델링하고, 12종 전이금속 원소 치환에 대해 총 708개의 편석 에너지를 계산하였다. 합금 원소가 치환되지 않은 결정립계에서 각 치환 위치의 원자 구조 및 전자 구조를 정량화하여 학습 인자를 구성한 뒤, gradient boosting 기반 기계학습 모델을 개발하였다. 또한 멀티스케일 확장성을 확보하기 위해, 전자 구조 관련 학습 인자를 원자 구조 기반 학습 인자로 대체할 수 있는지를 평가하였다. 그 결과, 전자 구조 관련 학습 인자는 높은 Pearson 상관계수를 갖는 원자 구조 기반 학습 인자로 대체 가능함을 확인하였다. 학습된 모델은 제일원리 계산으로 얻은 22종 결정립계에서 4, 620개의 편석 에너지에 대해 예측을 수행하였다. 더 나아가 973 K에서 분자동역학으로 얻은 11종 결정립계의 476, 340개 편석 에너지까지 예측하여 유한 온도 조건으로의 확장 가능성을 보였다. 또한 유효 편석 에너지로 정리한 편석 경향은 기존 실험을 통해 1323 K에서 보고된 오스테나이트계 스테인리스강의 4종 합금 원소 결정립계 편석 경향과 일치함을 확인하였다. 본 연구는 기계학습 방법론을 통한 멀티스케일 모델링을 통해 결정립계 편석 에너지를 분자동역학 규모에서 제일원리 계산 수준의 신뢰도로 예측할 수 있는 방법론을 제시하며, 실험적으로 확인이 어려운 결정립계 편석 합금 원소의 고속 스크리닝 및 합금 설계 전략 제안에 기여할 것으로 기대된다.

#### [전산3-5 | 15:10]

**Construction and Validation of a Machine-Learning Interatomic Potential for Liquid Metal Simulations: A Case Study of Pb-Bi-Ni Alloys with Oxygen Impurities:** Jimin Lee(Seoul National Univ.), Atsushi Komatsu, Takahiro Igarashi(Japan Atomic Energy Agency (JAEA)), Takuji Oda\*(Seoul National Univ.)

**Keywords:** Liquid Metal, Pb-Bi based Liquid Alloy, Machine Learning Potential, Oxygen Solubility, Nickel Solubility

Liquid metals (LMs) are considered promising coolant materials for advanced nuclear reactors because of their small neutron cross sections and high thermal conductivity. However, certain LMs exhibit severe chemical reactivity, such as combustion upon exposure to oxygen, as well as strong corrosiveness toward structural materials. To address these material challenges, fundamental knowledge of LM chemistry, such as thermodynamic and transport properties of impurity elements, is essential. However, due to the experimental difficulties associated with high-temperature liquid metals, reliable property data for diverse LM systems remain scarce. In this context, density functional theory (DFT) calculations and molecular dynamics (MD) simulations employing machine-learning interatomic potentials (MLIPs) trained on DFT data can offer a promising approach to supplement missing experimental data and to provide mechanistic insight into impurity behavior. However, the accuracy and limitations of DFT-based approaches for LM systems have not yet been sufficiently assessed. In this study, we evaluate the performance of DFT calculations for Pb-Bi and Pb-Bi-Ni liquid alloys, using oxygen solubility as a representative test property, through direct comparison with experimental measurements. We developed a machine-learning interatomic potential in the form of the Moment Tensor Potential (MTP) [1], designed to cover the full composition range of Pb-Bi-Ni alloys, including oxygen impurities, over a relevant temperature range. The MTP was constructed using the MLIP package [2] and trained on DFT data generated with Vienna Ab initio Simulation Package (VASP) employing the r2SCAN exchange-correlation functional. Using the constructed MTP, solution enthalpies of Ni and O were evaluated via MD simulations with Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator (LAMMPS). For validation, electrochemical measurements and inductively coupled plasma (ICP) analyses were conducted at the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) to obtain experimental data. First, Ni solubility was calculated and compared with available literature [3] and the ICP analysis data obtained at JAEA in five compositions of pure Pb, pure Bi and Pb-Bi alloys (25-75 wt%, 67-33 wt%, 83-17 wt%). The calculation results showed reasonable agreement with the previous and

present experimental data. Solubility of O was calculated as well, and compared with electrochemical measurements in compositions of Pb-Bi (60-40 wt%), Pb-Bi-Ni (44.23-55.62-0.15 wt%, 43.64-54.86-1.5 wt%) and Pb-Ni (99.85-0.15 wt%). While the composition dependence was reproduced qualitatively, noticeable quantitative discrepancies were observed. Overall, the MTP successfully captures the qualitative behavior of Ni and O impurities in Pb-Bi-Ni liquid alloys, although it does not yet achieve quantitative experimental accuracy in its current form. In the presentation, we will analyze systematic error trends and discuss possible correction strategies to improve predictive accuracy. References: [1] A.V. Shapeev, Multiscale Model. Simul. 14 (2016) 1153; [2] I.S. Novikov et al., Mach. Learn. Sci. Technol. 2 (2021) 025002; [3] M. S. Dodd, A. Ferrante, J. Comput. Phys. 273 (2014) 416.

#### [전산4-1 | 15:35] 초청강연

Engineering Metastable Phases: What Can Theory Predict and Where Does It Fail?: 홍기하\*(국립한밭대학교)

*Keywords:* 준안정상, 열역학, 페로브스카이트, 다형질

Metastable phases often exhibit superior functional properties, yet their stability is not determined by equilibrium thermodynamics alone. In systems such as halide perovskites and ferroelectric HfO<sub>2</sub>, desirable phases are commonly achieved through alloying, compositional mixing, strain, and interfacial control. Over the past years, we have examined how these engineering approaches modify relative phase energetics, defect formation energies, and local structural distortions. First-principles calculations and molecular dynamics provide reliable information on relative phase energies and point-defect thermodynamics. These approaches are effective in identifying energetic trends and evaluating the influence of compositional or mechanical perturbations. However, experimentally observed phase stability often depends on transformation pathways, nucleation behavior, microstructural constraints, and mechanical boundary conditions that extend beyond atomic-scale energetics. Consequently, a phase predicted to be energetically favorable does not necessarily remain stable under realistic synthesis or operating conditions. Addressing this discrepancy requires connecting atomic-scale energetics with mesoscale descriptions of nucleation, growth, and mechanical confinement. Clarifying the scope and limits of these computational approaches is essential for developing more reliable strategies for metastable phase engineering.

#### [전산4-2 | 16:00]

CALPHAD-Coupled Phase-Field Modeling of Multi-Component Aluminum Alloys: Overcoming Data Scarcity in AI-Driven Design: Dong-Uk Kim, Seong Gyoon Kim, Hyung-Uk Jang, Hwijae Cho, Pil-Ryung Cha\*(Kookmin University)

*Keywords:* Phase-Field Method, CALPHAD, Aluminum Alloys, Artificial Intelligence (AI), Solidification

The application of Artificial Intelligence (AI) to accelerate materials design is frequently hindered by a “data bottleneck” arising from the chronic scarcity of high-quality experimental microstructural data, which is essential for determining process-property relationships. To overcome this limitation, computational materials science serves as a vital tool for generating deterministic, physics-based data to augment sparse experimental records. In this study, we present an advanced Phase-Field Method (PFM) framework that seamlessly integrates with the CALPHAD thermodynamic formulation to generate high-fidelity microstructural data. A distinguishing feature of our approach is its capability to rigorously model phases with limited solubility—a regime that has remained challenging for conventional PFM. We demonstrate this capability by predicting the solidification microstructure of recycled aluminum alloys, thereby addressing critical needs in both AI-driven design and sustainable materials engineering.

#### [전산4-3 | 16:15]

Microstructural Evolution and Oxidation Kinetics of Zirconium Cladding under LOCA Conditions: A Phase-Field Study: Jiho Kim, Kunok Chang\*(Kyung Hee University)

*Keywords:* Zirconium, Oxidation, Phase-field modeling

The phase-field method is utilized to model the high-temperature oxidation of zirconium-based nuclear fuel cladding under loss-of-coolant accident (LOCA) conditions, with a focus on the microstructural evolution driven by oxygen diffusion. This study employs the Kim-Kim-Suzuki (KKS) model within the MOOSE framework to investigate oxidation kinetics and phase distribution (HCP-Zr, BCC-Zr, and monoclinic zirconium oxide) across various temperatures and oxygen potentials on both the interior and exterior of the cladding, which is geometrically representative of the APR1400 nuclear reactor. The thermodynamic properties for each phase are derived from the Zr-O binary system. While this work assumes the cladding is composed solely of pure zirconium, one- and two-dimensional simulations of the APR1400 reactor cladding indicate that oxide growth aligns with Wagner's metal oxidation theory. Notably, the study reveals that the HCP-Zr phase forms between the BCC-Zr and oxide phases, which is consistent with experimental findings.

#### [전산4-4 | 16:30]

Phase-Field Modeling of Ternary Systems with Stoichiometric Phases and a Solution phase: Jeonghwan Lee, Kunok Chang\*(Kyung Hee University)

*Keywords:* Phase-field method, Stoichiometric compound

Phase-field modeling of stoichiometric compounds has recently been formulated based on reaction extents to treat the formation of a compound phase together with solute diffusion in a solution. However, the existing framework has primarily been applied to binary

systems containing a single stoichiometric phase, while many alloy systems involve multiple competing compound phases in multicomponent environments. In this study, the stoichiometric phase-field framework is extended to a ternary system consisting of multiple stoichiometric phases and a solution phase. Reaction extents are introduced to represent the formation of each compound phase, enabling the coupled treatment of solute diffusion and local stoichiometric reactions. From thermodynamic analysis, the governing equations are expressed in terms of independent diffusion driving forces associated with composition and reaction driving forces associated with each stoichiometric phase.

#### [전산5-1 | 16:55] 초청강연

Toward Accelerated Quantum Mechanical Property Prediction via Deep Learning: Yang Jeong Park\*(울산과학기술원)

**Keywords:** Deep Learning, Machine Learning Potentials, Surrogate Modeling, Electronic Structure

Quantum mechanical simulations have become indispensable tools for understanding and designing materials, yet their computational cost limits exploration across vast compositional and configurational spaces. Deep learning is emerging as a transformative approach to overcome this bottleneck. This talk explores recent developments in deep learning-enabled acceleration of quantum mechanical property prediction. By combining data-driven models with physically grounded electronic structure theory, we move toward a new paradigm of rapid and scalable quantum simulations. I will discuss methodological advances, practical implementation strategies, and integration into automated materials discovery pipelines. Perspectives on reliability, extrapolation, and future autonomous computational materials design will also be presented.

#### [전산5-2 | 17:20]

Shifting the Volcano Relationship in Ammonia Decomposition through Interfacial Cooperation: Jungwoo Choi(Korea Institute of Science and Technology (KIST)), Byung Chul Yeo\*(Pukyong National University), Donghun Kim\*(Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))

**Keywords:** Ammonia decomposition, Machine learning potential, Volcano relationship, Interfacial cooperation, Metal-support interaction

Ammonia decomposition is governed by an intrinsic trade-off between  $\text{NH}_3$  dehydrogenation and N-N recombination, resulting in the well-established volcano relationship that places Ru near the activity maximum. However, whether this relationship can be modified through catalyst design remains unclear. In this work, we show that metal-oxide interfacial cooperation can alter the reaction pathway of ammonia decomposition. Reaction-aware machine learning simulations reveal that, on MgO(111)-supported metal nanoparticles, the kinetically demanding  $\text{NH}_3$  dehydrogenation steps occur preferentially at the metal-MgO(111) interface with significantly reduced activation barriers, while N-N coupling remains controlled by metal surface sites. This spatial separation of rate-limiting steps relaxes the conventional single-site trade-off and shifts the activity volcano toward metals with weaker nitrogen binding. As a result, Ni/MgO(111) and Cu/MgO(111) are identified near the new activity maximum and are predicted to match or surpass Ru/MgO(111), as supported by density functional theory calculations and microkinetic modeling. These findings suggest that interfacial cooperation provides an effective strategy for tuning volcano relationships in heterogeneous catalysis and for enabling high activity in earth-abundant metals beyond single-site limitations.

#### [전산5-3 | 17:35]

Vacancy-Induced Dynamic Evolution of Cu Dual-Atom Sites Enables C-C Coupling for Electrochemical  $\text{CO}_2/\text{CO}$  Reduction: Hyun Dong Jung(Sogang Univ.), Seoin Back\*(Korea Univ.)

**Keywords:** CO<sub>2</sub>RR, DFT, AIMD, reaction mechanism

Dual-atom catalysts (DACs) have emerged as promising candidates for the electrochemical  $\text{CO}_2/\text{CO}$  reduction reaction ( $\text{CO}_2/\text{CORR}$ ) toward multi-carbon ( $\text{C}_{2+}$ ) products. However, most reported systems predominantly yield CO, and achieving  $\text{C}_{2+}$  products on dual-metal sites remains exceptionally rare. Although experimental reports studies have reported stable, nanopore-anchored  $\text{Cu}_2$  dimers capable of producing  $\text{C}_{2+}$  products without aggregation, the atomistic origin of this exceptional reactivity remains elusive. In this work, using constant-potential ab initio molecular dynamics (AIMD) simulations, we show that vacancy-engineered  $\text{Cu}_2\text{-N-C}$  sites facilitate C-C coupling, unlike the kinetically inert pristine surface. This enhanced activity is driven by the site's inherent structural adaptability, which facilitates spontaneous hydrogen passivation and Cu dimer rearrangement. Crucially, this structural evolution creates a synergistic interfacial environment that anchors cations, thereby stabilizing the transition state by mitigating electrostatic repulsion. Our findings highlight the essential role of dynamic structural evolution, offering a key design principle for future electrocatalysts.

#### [전산5-4 | 17:50]

Exploring binary-alloyed  $\text{RuO}_2$  for enhanced activity and stability under acidic OER: Soonsung So, Sang Soo Han\*(Korea Institute of Science and Technology)

**Keywords:** DFT, oxygen evolution reaction, catalyst,  $\text{RuO}_2$

Water electrolysis is a key route toward green hydrogen and low-carbon energy systems, yet the oxygen evolution reaction (OER) in acidic media remains kinetically sluggish and strongly limits overall efficiency.  $\text{RuO}_2$  is among the most active acidic OER catalysts, but

its scarcity and operational degradation hinder large-scale deployment due to the surface reconstruction and Ru dissolution. Binary oxide alloys provide a promising pathway to simultaneously tune activity, stability, and cost. However, the vast compositional space makes purely experimental trial-and-error screening inefficient. Here, we present a density functional theory (DFT)-driven screening framework to accelerate the discovery of Ru-based binary oxides, focusing on  $\text{Ru}_{0.75}\text{X}_{0.25}\text{O}_2$  ( $\text{X}$  = transition metals) as practical candidates. The workflow combines the vacancy formation energies for oxygen and  $\text{RuO}_4$ , considering lattice-oxygen mediated mechanism and metal dissolution for stability and OER Gibbs energy for activity. Across the screened set,  $\text{Ru}_{0.75}\text{Sc}_{0.25}\text{O}_2$  emerges as the most promising candidate, exhibiting a favorable adsorption energy balance for oxygenated intermediates while stabilizing surfaces in a manner that suppresses oxygen vacancy and Ru dissolution tendencies. Beyond ranking candidates, the calculations provide mechanistic insight into how substituents reshape surface bonding and reaction energetics, thereby rationalizing activity-stability trade-offs in Ru-based catalysts. This work highlights a simple but systematic theoretical route for narrowing down experimentally viable binary oxide compositions and offers design principles for developing durable, low-Ru-content acidic OER electrocatalysts.

## 집합조직

Room 4층 400, 4월 28일

### [집합1-1 | 09:00]

Low-cycle fatigue behavior of bi-textured magnesium alloys: Du Hyeon Woo, Hyung Jun Kim, Je Hyeong An, Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National Univ.)

**Keywords:** Magnesium alloy, Bi-texture, Low-cycle fatigue, Microstructure, Life prediction model

Wrought Mg alloys typically exhibit pronounced tension-compression asymmetry during cyclic deformation due to strong basal textures, which activate different dominant deformation mechanisms under reversed loading and result in asymmetric hysteresis loops in fully reversed low-cycle fatigue (LCF) testing. Previous studies have shown that LCF behavior and fatigue life strongly depend on the initial texture, with alloys having basal poles aligned parallel to the loading direction exhibiting superior fatigue resistance compared to those with basal poles oriented perpendicular to the loading direction. However, LCF behavior in Mg alloys containing mixed texture components, namely bi-textured microstructures, remains poorly understood. In this study, bi-textured Mg alloys were intentionally fabricated by applying rolling-direction precompression of 3% and 6% to a rolled AZ31 plate, followed by annealing to remove precompression-induced twins while retaining distinct texture components. Strain-controlled LCF tests were performed to investigate cyclic deformation behavior, hysteresis loop evolution, fatigue crack initiation, and fatigue life. Microstructural and texture characteristics were quantified using electron backscatter diffraction, and fatigue tests were interrupted to identify crack initiation sites and their crystallographic orientations. In addition, an energy-based fatigue life prediction approach was applied to evaluate its applicability to bi-textured Mg alloys. The results demonstrate that deformation partitioning between grains with different crystallographic orientations governs the cyclic response and damage localization, providing insight into texture-controlled fatigue behavior in Mg alloys.

### [집합1-2 | 09:15]

적층제조 다상조직강의 비대칭 압연에 따른 불안정 오스테나이트 거동의 미세조직적, 기계적 분석: 강민섭, 신중호\*(강원대학교), 최인석, 김재우(서울대학교), 정효태, 조유연(솔루션소재), 김보규, 한준희, 김대현, 한성희, 서태현, 신승우, 윤수빈, 장지훈, 이류경(강원대학교)

**Keywords:** 비대칭 압연, 적층제조, 17-4PH, DIMT, TRIP, EBSD, Nanoindentation

본 연구에서는 Laser Powder Bed Fusion(L-PBF) 공정으로 제조된 17-4PH 스테인리스강의 낮은 상온 오스테나이트( $\gamma$ ) 안정성을 기반으로, 강소성 가공 환경에서 발생하는 변형 유기 마르텐사이트 변태(Deformation-Induced Martensitic Transformation, DIMT) 거동을 분석하였다. 이를 통해 의도된 분율의 다상 조직을 제조하고, 전단 변형으로 유도된 마르텐사이트를 활용한 후공정을 통해 TRIP(Transformation Induced Plasticity) 효과의 유효 범위를 규명하고자 하였다. 후공정으로는 등주속이형(Equal Diameter Dissimilar Speed) 방식의 비대칭 압연을 채택하여 기계적 물성 향상 및 전체 공정의 에너지 저감 효과를 검토하였다. 적층 제조된 다상강을 최종 압하율 10% 및 30%로 비대칭 압연한 후, 압연 단면(TD면)의 표면부와 중심부에 대하여 XRD, EBSD, ECCI를 활용해 미세조직을 분석하였다. 특히, 동일 영역에서 상(Phase)별 나노압입 시험(Nano-indentation)을 수행하여 불안정 오스테나이트 상의 기계적 거동을 미시적으로 분석하였다. 이후 인장 시험을 통해 압하율 변화에 따른 벌크 소재의 변형 거동 및 가공경화율을 비교하고 TRIP 현상의 발생 정도를 정량화하였다. 이러한 미시적-거시적 분석 기법을 공간적으로 매칭(Spatially matching)하여 ‘공정-미세조직-기계적 특성’ 간의 상관관계를 규명하였으며, 이를 통해 기존 후열처리 의존도를 낮춘 저에너지/저탄소 후가공 설계의 근거를 제시하고자 한다.

### [집합1-3 | 09:30] 초청강연

Modeling of Plane-Strain Texture Evolution in Polycrystalline Aluminum Alloys Incorporating Statistically Stored and Geometrically Necessary: Preetham Alluri, Wi-Geol Seo, Shi-Hoon Choi\*(Sunchon National University)

**Keywords:** Crystal Plasticity, Statistically Stored Dislocations (SSD), Geometrically Necessary Dislocations (GND, Plane-Strain Texture, Polycrystalline Aluminum

Building upon our previous dislocation density-based modeling of anisotropic tensile behavior in aluminum single crystals, the present study extends the framework to polycrystalline Al alloys subjected to plane-strain deformation. A physically grounded constitutive model is developed by incorporating both statistically stored dislocations (SSD) and geometrically necessary dislocations (GND), enabling the simultaneous description of strain hardening, lattice curvature, and microstructural heterogeneity under constrained deformation conditions. The model is implemented within a finite-strain crystal plasticity framework and applied to simulate plane-strain compression representative of rolling-type processes. Particular attention is devoted to predicting the evolution of crystallographic texture and its coupling with the orientation-dependent accumulation of dislocation densities. The formulation explicitly captures the anisotropic development of SSD and GND densities across grains, providing theoretical insight into orientation-dependent hardening behavior and intra-granular heterogeneity. Numerical simulations demonstrate that the combined SSD-GND framework successfully predicts the evolution of plane-strain texture components and associated dislocation substructures in polycrystalline aluminum. The

results highlight the critical role of lattice constraint and slip-system interactions in governing microtexture development and strain localization. The proposed approach offers a mechanistically consistent platform for analyzing dislocation-mediated microstructural evolution in advanced thermomechanical processing routes.

#### [집합1-4 | 09:55]

**고속 탄도 충돌 하 AZ31 판재의 방향 의존적 파손 메커니즘 규명:** 이정훈, 유진영(부산대학교), 김운호(서울대학교), 이정훈(경북대학교), 이태경\*(부산대학교)

**Keywords:** az31, 소성 이방성

마그네슘 합금은 낮은 밀도와 높은 비강도를 기반으로 군사 및 항공 구조물에서 목표 강도를 유지하면서 경량화를 실현할 수 있는 소재로 주목받고 있다. 특히 마그네슘 합금은 우수한 충격 감쇠 성능으로 인해 고속 충돌 환경에서 매력적인 후보 재료로 평가된다. 그러나 육방정계(HCP) 결정 구조로 인해 활성화 가능한 변형 기구가 제한적이며, 강한 집합조직이 형성되기 쉬워 기계적 거동의 비대칭성과 방향 의존성이 크게 나타난다. 이러한 이방성은 고속 충돌·관통 과정에서 변형 국부화, 손상 진화 및 파손 모드에 직접적인 영향을 미칠 수 있음에도, 방위·항공 분야에서 문제되는 고변형률 속도 조건에서 이방성의 역할은 아직 충분히 규명되지 않았다. 본 연구에서는 열간 압연된 AZ31B 마그네슘 합금 판재를 대상으로 충돌 방향 효과를 비교하기 위해 ND 및 RD 방향에 대해 고속 충돌·관통 실험을 수행하였다. 관통 과정에서의 에너지 흡수 거동을 정량화하고, 관통 시편의 크레이터 주변부에 대해 EBSD 분석을 통해 결정립 특성, 변형 지표 및 집합조직 변화를 비교하였다. 또한 이방성 항복 기준을 포함한 수치해석을 통해 충격 하 전단 변형 분포를 예측하고, 실험에서 관찰된 후면 손상 및 미세조직 변화와의 대응 관계를 분석하였다. 그 결과, 충돌 방향에 따른 변형 분포와 변형 국부화 양상이 달라지며, 이는 후면 손상 양상 및 파손 모드의 차이로 이어짐을 확인하였다. 본 연구는 고속 충돌 환경에서 마그네슘 합금의 이방성이 관통 성능과 파손 거동을 좌우하는 미세조직적·역학적 메커니즘을 제시하며, 향후 경량 구조재의 충격 저항성 향상을 위한 이방성 제어 및 설계 전략 수립에 기초 자료를 제공한다.

#### [집합1-5 | 10:10]

**Investigating deformation mechanism of AZ31 alloy in the temperature range of 25°C ~ 200°C :** Dain Choi, Ha seong Baek, Tea-Sung Jun\*(Department of Mechanical Engineering, Incheon National University, Incheon 22012, Republic of Korea)

**Keywords:** AZ31, Non-basal slip, Microstructure, Temperature, Deformation mechanism

The aim of this study was to investigate the effect of temperature on the deformation behaviour of AZ31 sheets in the mid-high temperature range of 25°C to 200°C. Tensile tests were performed using a micro-tensile stage at 25°C to 200°C and strain was measured using Digital Image Correlation (DIC). Interrupted tests were performed at strains of 5%, 10% and 15% to further understand the detailed deformation as a function of applied temperature. Dislocation density and slip/twin activity at each temperature were investigated using X-ray diffraction techniques. Electron Backscatter Diffraction (EBSD) was used to follow the deformed texture and slip activity. We found that as temperature increases, the deformation mode changes from basal slip and twinning to DRX and non-basal slip activity, resulting in an increase in fracture strain. As the temperature increases from room temperature to 100°C, slip becomes more active and the influence of twinning decreases. At temperatures above this, twinning is rarely seen, but at 150°C, unlike other temperatures, it is identified as TDRX, where a decrease in twinning occurs as strain increases. However, the influence of slip is greater than that of twinning due to the low occurrence of twinning. Above 150°C, non-basal slip is dominant and more modes of non-basal slip become active as the temperature increases. A switch in the deformation mechanism was observed around 150°C.

#### [집합1-6 | 10:25]

**ZX합금의 박판압연에 따른 집합조직의 거동:** 김성재, 이상봉\*(국립금오공과대학교)

**Keywords:** 마그네슘, 집합조직, ZX합금, 압연, 박판

ZX 합금은 HCP 결정구조 특성으로 인해 제한된 슬립계와 강한 기저집합조직 형성 경향을 보이며, 박판 압연 시 성형성 저하와 기계적 이방성이 주요 문제로 작용한다. 본 연구에서는 ZX 합금을 단계적 압연과 중간 열처리를 통해 박판화하고, 압하율 및 열처리 조건 변화에 따른 집합조직의 진화 거동을 체계적으로 분석하였다. OM 및 SEM 관찰을 통해 결정립 미세화, 변형쌍정 형성 및 재결정 거동을 비교하였으며, EBSD 분석을 통해 IPF 맵과 극점도를 기반으로 기저면(0001) 집합조직 강도, 방위 분포 및 KAM 변화를 정량화하였다. 또한 RD 방향 인장시험을 수행하여 항복강도와 연신을 변화를 평가하고, 공정 변수에 따른 집합조직 변화가 압연 한계 및 성형성에 미치는 영향을 고찰하였다. 이를 통해 ZX 합금 박판 압연 공정에서의 조직 제어 전략과 최적 공정 조건을 제시하고자 한다.

#### [집합2-1 | 10:50]

**다마신 공정을 위한 구리 전해 도금에서의 저농도 PEG의 흡착 거동 및 도금층의 미세조직에 관한 연구:** 최재훈(동아대학교), 이한근(포항공과대학교), 신한균(동아대학교), 이효종(주식회사 이켄코아), 송재용(포항공과대학교), 김정환\*(동아대학교)

**Keywords:** Copper electrodeposition, Organic additives, Polyethylene Glycol, Microstructure, EBSD

유기첨가제를 이용한 구리 전해도금은 반도체 칩 제조 공정에서 요구되는 미세 배선 형성을 구현하기 위한 핵심 공정으로, 첨가제의 흡착으로 조절되는 가속·억제 거동을 통해 도금 중 전류 및 과전압 분포를 변화시켜 도금층의 충전 거동과 미세조직을 정밀 제어한다. 본 연구에서는 유기 첨가제 중 억제 거동을 나타내는 PEG (polyethylene glycol)의 흡착 동역학 거동을 전기화학적, 미세



조직적으로 분석하고자 하였다. PEG는 할라이드(halide) 이온과의 공흡착을 통해 억제막을 형성하고, 수화된 구리 이온의 계면 수송을 저해하는 대표적 억제제로 널리 활용되고 있다. 기존 연구는 주로 PEG가 형성한 억제층 하에서 티올(thiol), 이황화물(Disulfide) 작용기를 갖는 가속제의 흡착-활성 거동을 규명하는 데 초점을 두어 왔으며, PEG는 상대적으로 빠른 피복(coverage) 형성으로 인해 다 성분계에서 배경 억제층으로 가정되는 경우가 많았다. 또한 아민(amine) 기반 억제제(혹은 평활제) 및 PEG-PPG (Polypropylene Glycol) 공중합체(copolymer)는 단독 조건에서 폭넓게 분석된 반면, PEG는 상대적으로 억제력이 낮아 단독 흡착 거동에 대한 체계적 논의가 제한적이었다. 그러나 PEG의 흡착 거동을 선행적으로 정량화해야만, PEG를 포함하는 다성분 첨가제 시스템에서 관찰되는 시간 의존적 전류/과전압 응답과 경쟁 흡착 현상을 보다 일관되게 해석하고 예측할 수 있다. 이에 따라 PEG의 빠른 표면 피복 형성으로 인한 초기 흡착 동역학의 시간 분해능을 높이기 위해, 저농도 조건으로 희석함으로써 농도에 비례하는 흡착 속도를 낮추고자 하였다. 전기화학 분석을 통해 PEG의 표면 피복 형성에 따른 전착 전류 변화를 기반으로 시간 및 전위 조건에 따른 전류 응답을 추적함으로써, 저농도 PEG의 흡착 동역학을 정량 평가하였다. 또한 전자 후방산란 회절 (Electron Backscatter Diffraction, EBSD) 기반 미세조직 분석을 수행하여 도금층의 결정학적 특성 변화를 통해 PEG의 소모 및 작용 거동을 간접적으로 분석하였다.

#### [집합2-2 | 11:05]

**반도체 패키지 기판 마이크로 비아의 PEG-SPS 유기첨가제 조합 기반 구리 전해도금 시 충전 거동과 미세조직/집합조직 분석:** 오은기, 최재훈, 신한균, 박 현, 김정한\*(동아대학교)

**Keywords:** Semiconductor Package Substrate, Microvia Filling, Cu Electroplating, Organic Additives, Microstructure/Texture

고집적·고대역폭 컴퓨팅 수요의 확대에 따라 반도체 패키지 기판 구리(Cu) 배선 미세화가 핵심 과제로 부상하고 있으며, 성능과 비용의 균형을 고려한 대안으로 2.1D 패키징이 주목받고 있다. 본 연구에서는 2.1D 패키징용 패키지 기판에 적용되는 30  $\mu\text{m}$  비아 패턴의 구리 전해도금 충전 공정에서, 유기첨가제 조성 변화가 비아 내 충전 거동과 도금층의 미세조직 및 집합조직에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위해 먼저 억제제인 polyethylene glycol (PEG), 가속제인 bis-(3-sulfopropyl) disulfide (SPS), 평활제인 Janus Green B (JGB) 각각의 전기화학적 거동을 rotating disk electrode (RDE) 기반 정전류 실험(galvanostatic measurement)으로 평가하였다. 그 결과를 바탕으로 PEG가 패턴 표면을 완전히 뒤덮는 고농도 조건과 부분적으로 뒤덮는 저농도 조건으로 구분하고, 각 조건에 대해 SPS의 농도 범위를 설정하여 도금 용액 조성을 설계하였다. 각 유기첨가제 조합에 대한 도금 후 비아의 충전 거동은 광학현미경으로 관찰하였으며, 비아 내부 결함 및 충전률은 주사전자현미경 및 집속 이온 빔 (focused ion beam, FIB)을 이용하여 평가하였다. 또한 전자 후방 산란 회절(electron backscatter diffraction, EBSD) 분석법을 이용하여 결정립의 크기·형상 및 결정방위의 분포를 분석하여, 첨가제 조성에 따른 미세조직 및 집합조직 특성을 정량적으로 비교하였다. 나아가 각 유기첨가제의 농도에 따른 흡착 및 확산과 유체 유동을 고려한 유한요소법 기반 도금 시뮬레이션을 수행하여, 실험에서 관찰된 유기첨가제 조합에 따른 비아 충전 거동 및 미세조직/집합조직 변화의 원인을 설명하였다.

#### [집합2-3 | 11:20]

**결정학적 정합성에 따른 타이타늄 내 입계 수소화물 석출 거동 분석:** 진초록(한국과학기술연구원, 서울대학교), 정원석(로렌스리버모어국립연구소), 김태엽, 윤영철, 강재동(한국과학기술연구원), 박은수\*(서울대학교), 허태욱\*(로렌스리버모어국립연구소), 김진우\*(서울대학교)

**Keywords:** 타이타늄, 수소화물, 결정립계, 결정방위 관계, 방위차 각도, EBSD

타이타늄과 그 합금은 높은 비강도와 우수한 내식성으로 다양한 산업 분야에 활용된다. 그러나 상온에서 수소 용해도가 낮아, 가공 또는 사용 환경에서 흡수된 수소가 수소화물로 석출되며 연성과 강도 저하를 유발한다. 수소화물 석출은 격자 변형 및 계면 에너지를 최소화하기 위해 모재와 특정 결정방위 관계(orientation relationship)를 따르는 경향이 있으며, 이로 인해 미세구조 내에서 침상/판상 형태로 관찰된다. 특히 일부 결정립계(grain boundary)를 따라 형성되는 수소화물은 인접한 두 결정립 중 한쪽 결정립과의 결정방위 관계만을 만족하는 경향을 보여, 결정립계 구조와 석출 선택성 간의 정량적 상관관계 규명이 요구된다. 본 연구에서는 순수 Ti를 모델 소재로 선정하고 고온 수소가스 충전을 통해 수소를 주입하여, 입계 수소화물의 석출 분포와 결정립계 특성의 상관관계를 분석하였다. 전자후방산란회절(EBSD) 기반으로 방위차 각도(misorientation angle)뿐만 아니라, 인접 결정립 간의 슬립면 각도차(slip plane misorientation angle) 등 결정학적 정합성을 나타내는 지표를 도출하고, 각 지표와 석출 선택성 간의 통계적 유의성을 평가하였다. 나아가 2차원 EBSD 분석만으로는 규명하기 어려운 결정립계면(grain boundary plane)의 공간 배향을 확인하기 위해 집속이온빔(FIB)을 활용한 3차원 결정립계면 분석을 수행하였다. 이를 바탕으로 결정립계면의 기하학적 특성과 결정학적 요인을 통합적으로 비교하여, 입계 수소화물 석출에 영향을 미치는 주요 인자를 분석하였다.

#### [집합2-4 | 11:35]

**Accelerated Screening of Corrosion-Resistant Coating Materials for Molten Chlorides via Computational Phase-Stability Diagrams:** 환성원, 김상태\*(한양대학교)

**Keywords:** Molten salt, Corrosion, Thermodynamic analysis, Computational screening

The favorable physicochemical properties and high chemical stability of molten chlorides enable their application in numerous industrial fields; however, severe corrosion induced by trace impurities, notably moisture, restricts their widespread implementation. Existing phase stability diagrams, while used to predict corrosion behavior in molten chlorides, solely consider oxo-acidity, thereby disregarding the significant impact of impurity-driven corrosion. Here, we present a holistic computational framework for phase stability diagrams incorporating impurity effects in molten salts. Employing chloride melts as model systems, we construct three-dimensional phase stability maps with potential,  $\text{pO}^{2-}$  and pH as axes, revealing how moisture and oxide ions influence the phase stability of

structural materials. For 56 binary systems involving Cr-, Fe-, and Ni-based coatings, this framework quantitatively predicts corrosion tendency and demonstrates that the formation of borides and silicides substantially enhances corrosion resistance in molten chlorides. The predictions from the framework are verified via electrochemical characterizations and static corrosion tests, confirming that the predicted order of corrosion resistance of coating materials aligns well with experimental results. Consequently, this framework and results provide a strategic guideline for the rapid screening of corrosion-resistant materials for molten chlorides. Furthermore, we anticipate that this work will serve as a cornerstone for designing strategies to protect structural materials in aggressive molten salt environments.

### [집합2-5 | 11:50]

Divergent Density Trends Driven by Oxygen Speciation in Uranium-Bearing Molten Chlorides: hyeonwoo Kim, Heejin Park, Sangtae Kim\*(한양대학교)

**Keywords:** 용융염, 액체 구조, 기계학습 포텐셜, 부식 메커니즘

The structural integrity and thermophysical behavior of molten salts in nuclear applications are fundamentally governed by their local coordination environments and intermediate-range order. However, the structural evolution of uranium-bearing chloride melts under oxygen contamination remains poorly understood due to the complexity of actinide coordination chemistry. In this study, we investigate the distinct molecular structural responses of KCl- $\text{UCl}_3$ , NaCl- $\text{UCl}_3$ , and NaCl-KCl- $\text{UCl}_3$  melts to two different oxygen contamination scenarios, molecular oxygen ( $\text{O}_2$ ) ingress and oxide ion ( $\text{O}^{2-}$ ) accumulation, using molecular dynamics simulations driven by a machine learning interatomic potential (MLIP). Our analysis reveals that the speciation of oxygen dictates the topological transformation of the anionic framework. In the  $\text{O}_2$  gas ingress scenario, the melt undergoes a transition from a flexible, isotropic chloride network to a rigid, anisotropic framework dominated by uranyl-like ( $[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{2-}$ ) motifs. These units preferentially interconnect via linear, corner-sharing U-O-U bridges, creating open-framework chains that reduce the overall packing efficiency. Also, this coordination shift forces a redistribution of the chloride sublattice, where sterically shielded 'bridging' chlorides are displaced to 'terminal' sites with high degrees of freedom. This structural ejection not only lowers the macroscopic density but also generates active chlorinating agents, thereby accelerating corrosion. Conversely, the  $\text{O}^{2-}$  accumulation scenario triggers a fundamental condensation of the cation network. The oxide ions effectively substitute chloride ligands within the first coordination shell, facilitating the formation of compact, high-connectivity uranium clusters stabilized by edge- and face-sharing polyhedra. This leads to a global contraction of the liquid structure and a consistent increase in density. By mapping these divergent structural pathways, we demonstrate that the macroscopic anomalies in density and corrosivity are intrinsic consequences of specific alterations in the liquid's molecular topology, providing a comprehensive structural model for predicting the physicochemical degradation of fuel salts.

### [집합3-1 | 14:00]

Data-driven Investigation into Twinning Behavior of Magnesium Alloys: Jaehyung Cho\*, Murugesan Mohanraj, Jang Hyo-sun, Lee Geon-young(한국재료연구원)

**Keywords:** Magnesium alloys, ZK60, texture and microstructure, strain compatibility, twin variants, twin transmission

The effects of the Schmid factor (SF) and the strain compatibility factor  $m'$  on the variant selection and intergranular transmission of 10-12 tensile twins in ZK60 magnesium alloys were investigated at 225 °C and a strain rate of 1.666  $\text{s}^{-1}$ . The analysis focused on twin activation across various grain orientations in two distinct sample configurations: the compression axis (CA) parallel to the rolling direction (RD) and the CA parallel to the normal direction (ND). Twinning behavior was more prominent in the CA||RD sample, which exhibited a characteristic concave-up stress-strain response, signifying substantial microstructural evolution driven by twin initiation and growth. Twin activation patterns varied according to grain orientation. Grains with a single twin variant predominantly activated the highest-ranked SF variant in both CA||RD and CA||ND conditions. In grains with double twin variants, rank 1-2 pairs were frequently co-activated, particularly in the CA||RD sample. Grains exhibiting multiple twin variants were also observed, though less frequently. Most activated variants possessed Schmid factors exceeding 0.4. Twin transmission across grain boundaries occurred when the strain compatibility factor exceeded approximately 0.8 and the misorientation angle remained below 35°. In contrast, transmission was inhibited when the strain compatibility factor was at a moderate level of approximately 0.6, even in cases with low misorientation angles.

### [집합3-2 | 14:15]

인공신경망을 활용한 복합조직강의 물성과 미세조직 분석: 강전연\*(한국재료연구원), 강민우, 권순우, 김동휘(현대자동차그룹)

**Keywords:** 복합조직강, 미세조직, 인장물성, EBSD, 인공신경망

컨볼루션(convolution)신경망을 활용하여 고강도 복합조직 강판의 미세조직과 물성을 연계 분석하였다. EBSD 측정으로부터 강판 미세조직의 형상, 결정상 분포, 방위구배 분포 등을 담은 다채널 영상을 얻고, 이에 적합한 신경망을 구성하여, 작업 목적에 따라 훈련시켰다. 결정립 단위의 구성상 분류 작업에서는 95 % 이상의 정합도를 보였다. 미세조직 영상으로부터 항복 및 인장강도, 균일 및 총연신율의 인장 물성을 예측하는 작업에서는 최소 90 % 이상의 정합도를 보였다. 활용한 강판들이 포함하는 잔류 오스테나이트의 분율은 거시적인 측면에서는 인장 특성과 유의미한 상관관계를 가지지 않았다. 그럼에도 신경망을 활용한 분석에서 변태유기소성 효과와 부합하는 잔류 오스테나이트 영역의 높은 인장강도와 연신율이 예측되었다.

**[집합3-3 | 14:30]**

**Fe-3%Si 전기강판에서 탄소가 집합조직에 미치는 영향:** 한규석\*, 문현우, 주형돈((주) 포스코)

**Keywords:** Fe-3%Si, Goss 집합조직, Cube 집합조직, 냉간압연, 재결정, 탄소

Fe-3%Si 무방향성 전기강판은 고효율 가전 및 전기차 구동모터용 철심재료로 사용되며, 모터의 효율을 향상시키는데 중요한 소재이다. 특히, 고속회전이 필요한 전기차의 구동모터에서는 고주파 영역에서의 와전류손실을 저감하기 위해서 Si함량 증가가 필요하다. 그러나, Si 함량이 증가할수록 자속밀도가 떨어지는 문제점이 있다. 자속밀도는 구동모터의 출력에 영향을 주기 때문에, 전기강판의 자속밀도를 개선하는 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 전기강판 미세조직에 {110}<001> Goss 집합조직 혹은 {100}<001> Cube 집합조직이 많을수록 자속밀도가 증가하는데, 이는 압연방향으로 자화특성이 우수한 <001> 결정방향이 정렬되기 때문이다. 이러한 자속밀도가 우수한 집합조직을 형성하기 위한 한 방법으로 탄소를 첨가하여 냉간압연 및 재결정 소둔을 실시한 후 집합조직의 변화를 조사하였다. Fe-3%Si 주성분으로 하고 탄소함량을 3조건을 변경하여 진공용해 및 열간압연을 진행하였다. 이어서 열연판소둔을 실시하고, 냉간압연 및 재결정소둔을 진행한 다음 미세조직과 집합조직 분석을 진행하여 탄소함량에 따른 변화를 분석하였다.

**[집합3-4 | 14:45]**

**1차 재결정 조직에서 Goss 방위 결정립의 크기 이상 및 인접립 집합조직 특성:** 이세일\*(POSCO 기술연구원)

**Keywords:** 전기강판, 집합조직, 결정 성장

전기강판은 2차 재결정을 통해 Goss ({110}<001>) 방위의 집적도가 극도로 높은 집합조직을 형성하며, 이를 위해서는 2차 재결정 이전 소재의 미세조직 상태를 정밀하게 제어하는 것이 필수적이다. 특히, 1차 재결정 후 결정립 크기 분포는 2차 재결정 거동을 좌우하는 핵심 인자 중 하나로, 일반적으로 좁은 범위의 균일한 분포가 바람직한 것으로 알려져 있으나, 이에 대한 실증적 근거는 아직 충분하지 않다. 본 연구에서는 1차 재결정 완료 후의 시편을 수집하고, 동일 소재에서 2차 재결정이 성공적으로 발현된 것을 확인한 시편을 기반으로 EBSD 분석을 수행하여, 1차 재결정 조직의 결정립 크기 분포와 결정 방위 간의 상관관계를 체계적으로 조사하였다. 분석 결과, Goss 방위를 갖는 결정립 중 일부는 주변 결정립 대비 현저히 조대한 크기를 가지고 있음을 확인하였다. 또한, Goss 방위 결정립을 둘러싼 인접 결정립들의 평균 집합조직은 강판 전체의 벌크 집합조직과 유의미한 차이를 나타내었다. 한편, Goss 방위가 아닌 조대 결정립에 대해서도 동일한 분석을 수행하여 인접 결정립 집합조직의 특성을 비교함으로써, Goss 방위 조대립이 갖는 미세조직학적 고유성을 정량적으로 규명하였다. 본 연구의 결과는 2차 재결정 과정에서 Goss 방위가 선택적으로 성장하는 메커니즘에 대한 새로운 실험적 근거를 제시하였다.

**[집합4-1 | 15:10]**

**Impact of Recrystallization on Hydrogen-Sensitive Creep in Zirconium Alloy Cladding:** Sangtae Kim\*, Sungjun Choi, Ho-A Kim(Hanyang University)

**Keywords:** thermal creep, zirconium hydrides, spent nuclear fuel cladding, atom probe tomography, recrystallization

Ensuring the long-term integrity of spent nuclear fuel requires understanding how hydrogen concentration interacts with cladding microstructure to govern creep in zirconium alloys, particularly across recrystallization. We systematically investigate the creep of Zircaloy-4 and Zr-Nb claddings with controlled annealing and hydrogen contents at 450 °C and 120 MPa. The effect of hydrogen on creep behavior depends on the microstructure: in fiber-textured Zircaloy-4, grain-boundary hydrides mitigate creep, whereas in recrystallized Zircaloy-4, hydrogen accelerates creep via dislocation-assisted mechanisms; equiaxed Zr-Nb aligns with the heavily recrystallized response despite its finer grains, isolating crystallographic texture—not grain size—as the principal control. Atom-probe tomography links these trends to hydrogen partitioning: below the terminal solid solubility of dissolution (TSSD), hydrogen concentrates at dislocation cores and promotes creep; above TSSD, precipitation along grain boundaries is expected to impede dislocation glide and climb as well as grain-boundary sliding. These results identify texture as a key assessment variable for low-burnup cladding and motivate careful control of drying temperature and duration during dry storage.

**[집합4-2 | 15:25]**

**In-situ SEM-EBSD-DIC investigation of intragranular deformation and lattice rotation in 316L austenitic stainless steel:**

Min-Su Lee(한국생산기술연구원), Jun Won Yoon(한국생산기술연구원, 고려대학교), Taeyang Kwak, Taejin Lee(루안), Seok Su Sohn(고려대학교), Jungho Shin\*(강원대학교), Chang-Soo Park\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** Austenitic stainless steel, Intragranular deformation, Lattice rotation, Electron backscatter diffraction, Digital image correlation

Austenitic stainless steels (ASSs), which are face centered cubic (FCC) alloys, have been widely used in industries such as food processing, chemical and petrochemical applications, and nuclear reactor due to their excellent mechanical properties (e.g., toughness) and high resistance to corrosion [1]. Although the mechanism can shift to martensitic transformation (TRIP) and twinning (TWIP), dislocation slip is the primary mechanism in  $\gamma$ -Fe, including the TRIP- and TWIP-steels. Consequently, failure of materials arises from the localised slip deformation at microstructural scale. In previous studies [2,3], experimental and simulation approaches have been used to investigate the intragranular deformation heterogeneity and lattice rotation at grain-scale. However, a specific material factor related to intragranular deformation heterogeneity still remains elusive. By combining in-situ scanning electron microscopy (SEM) and digital image correlation (DIC), we investigated the intragranular deformation and lattice rotation of 316L ASS plate during tensile deformation. A 40-nm silica monolayer was fabricated on the polished sample surface for the  $\mu$ -DIC pattern. Electron backscatter

diffraction (EBSD) was used to analyse the deformation-induced intragranular orientation changes. A fully  $\gamma$ -austenite microstructure and annealing twins (i.e.,  $\Sigma 3$  boundaries) were observed in the initial state. Pure dislocation slip governed the plastic deformation of  $\gamma$ -austenite grains. The misorientation of neighbouring grain boundaries (NGBs) surrounding each grain was characterised by EBSD. The relative difference in the misorientation of NGBs has an impact on the intragranular deformation heterogeneity. The intragranular deformation aspects were summarized as follows: (i) heterogeneous for NGBs with low- and high-misorientation, (ii) homogeneous for NGBs with equivalent misorientation and (iii) twisted boundary formation inside a grain. Reference [1] T. Michler et al. (2016) Ref. Module. Mater. Sci. Mater. Eng. [2] F.Di. Gioacchino et al. (2015) Int. J. Plast. [3] J.M. Hestroffer et al. (2022) Acta. Mater.

#### [집합4-3 | 15:40]

**적층제조 다상조직강의 단계별 인장에 따른 상별 나노역학적 특성 분석:** 한성희(국립강원대학교), 김재우(국립서울대학교), 김대현, 김보규, 한준희, 강민성(국립강원대학교), 최인석(국립서울대학교), 신중호\*(국립강원대학교)

**Keywords:** Stainless steel(스테인리스 강), Digital Image Correlation(디지털 영상 상관 기법), Tensile test(인장시험), Nanomechanics(나노역학), Electron Backscatter Diffraction(후방산란전자 회절패턴 분석기)

Laser Melting(SLM)으로 제조된 17-4PH 다상조직 스테인리스강은 오스테나이트 분율이 25% 이상이며, 본 연구에서는 스캔 속도 300–1400 mm/s 범위에서 미세조직을 조절하여 오스테나이트 입자 크기와 상 분율을 변화시켰다. 그 결과 항복강도 416–635 MPa, 인장강도 881–958 MPa, 연신을 8.1–22.5%의 변화를 확인하였으며, 이러한 거시적 변화를 해석하기 위해 상별 나노역학적 변화를 추적하였다. 대표 시편을 대상으로 인장단계별 디지털 영상 상관법(DIC)을 통해 변형장 분포를 측정하고, 각 단계 직후 동일 영역에서 EBSD 분석과 나노인덴테이션 맵핑을 병행하였다. 이를 통해 오스테나이트와 BCC/BCT 영역을 구분하고, 국부 경도 및 탄성계수 변화를 비교하였다. 변형이 진행됨에 따라 상별 경도 분포와 분산이 변화하는 경향을 보였으며, 이는 오스테나이트 안정성 차이와 BCC/BCT 영역의 전위 활동에 기인할 수 있다. 본 연구는 적층 제조된 17-4PH 스테인리스강에서 DIC를 활용하여 인장시험을 통해 변형률 2%, 4%, 8%, 10% 조건에서 시편을 확보하고 각각에 대해 나노압입을 수행함으로써, 변형 수준에 따른 국부 기계적 거동 변화를 비교하였다. 또한, 미세조직-기계적 특성 상관성을 다각적으로 규명하고, 강도-연성의 균형을 고려한 공정 설계 방향을 제시하고자 한다.

#### [집합4-4 | 15:55]

**Dwell-Fatigue Behaviour of Ti6242 alloy Manufactured via Electron Beam Powder Bed Fusion:** A. Rajesh Kannan, Ha-Seong Baek(인천대학교), S. Maheshwaran, N. Siva Shanmugam(National Institute of Technology, Tiruchirappalli), Jae H. Kim(한국재료연구원), Tea-Sung Jun\*(인천대학교)

**Keywords:** Ti6242, titanium alloys, electron beam powder fusion, high-cycle fatigue, dwell fatigue

Titanium alloys serve as critical load-bearing materials in aeroengine structures and operate under demanding cyclic loading conditions. During service, they experience high stress peaks at take-off, sustained loading throughout flight, and unloading during landing. Research has shown that the sustained load-hold segment can markedly degrade fatigue performance in many dual-phase titanium alloys. In particular, maintaining the maximum load for a period of time can decrease the fatigue life by an order of magnitude or more compared with a conventional triangular (“saw-tooth”) loading cycle. This phenomenon is commonly termed the ‘dwell debit’. It has been demonstrated that, in Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti6242), failure is predominantly governed by the local microstructure. Ti6242 is a near- $\alpha$  titanium alloy extensively used in aerospace applications due to its superior combination of high-temperature strength, creep resistance, fatigue performance, and oxidation resistance. This study examines the ambient-temperature dwell-fatigue behaviour of Ti6242 alloy manufactured via Electron Beam Powder Bed Fusion (EB-PBF) in the as-built condition. The motivation of this study is to investigate the dwell process, with a particular focus on characterizing the fundamental mechanisms in dwell-sensitive EB-PBF-processed Ti6242. A systematic experimental study focusing on conventional low-cycle fatigue (LCF), low-cycle dwell fatigue (LCDF) incorporating 120 s peak stress holds was conducted to quantify time-dependent damage evolution and dwell sensitivity intrinsic to the additively manufactured microstructure. The as-built microstructure was characterized with fine  $\alpha$  lamellae and acicular  $\alpha$  within the prior  $\beta$  grains. This hierarchical microstructure comprising fine  $\alpha$  variants, nano-scale  $\beta$  ligaments, and strong crystallographic texture resulted in comparable tensile properties. Compared with conventional load-controlled LCF, dwell fatigue exhibited a significant life reduction, with a dwell debit factor of approximately 8-15 depending on peak stress level. The dwell debit remained nearly invariant with decreasing peak stress, indicating that time-dependent plastic strain accumulation rather than stress amplitude alone controlled life reduction. The post-fracture microstructure and fracture surfaces will be analysed to evaluate the crack initiation and propagation behaviour, where localized creep strain accumulated during stress holds. The present work will demonstrate the creep-fatigue interaction and dwell sensitivity in as-built EB-PBF Ti6242 at ambient temperature due to microstructural anisotropy, residual stresses, and enhanced load-controlled damage evolution, underscoring the necessity for microstructure-informed life prediction strategies for additively manufactured titanium alloys.

## 가공-소성가공

Room 4층 400, 4월 28일

### [소성 1-1 | 16:30]

**아연도금 초고강도강재의 전단면 수소취성에 미치는 미세조직적 영향:** 박형권\*, 유지성(한국재료연구원), 조용희(전남대학교), 이진중, 김정원, 이창훈(한국재료연구원), 김지영, 정승필, 박영철(현대제철)

**Keywords:** 초고강도강, 수소취성, 전단 가공, 파괴인성, 침지 시험

탄소배출규제 강화 및 연비 향상을 위한 차량 경량화 요구에 따라 초고강도강재의 적용이 확대되고 있으며, 이에 따라 초고강도강재의 수소취성에 대한 우려가 지속적으로 제기되고 있다. 특히 전단 가공된 부위는 가공 과정 중 발생하는 국부적인 소성 변형, 결함 및 잔류응력으로 인해 수소취성에 취약한 영역으로 알려져 있다. 본 연구에서는 아연도금 초고강도강재 전단면의 수소취성 거동을 미세조직적 관점에서 분석하고, 전단면의 수소취성 저항성과 파괴인성 간의 상관관계를 고찰하였다. 이를 위해 동일 화학 조성을 갖는 1.5 GPa급 복합조직강(complex phase steel)과 단상 마르텐사이트강(martensitic steel)을 대상으로 전단 가공을 수행하였으며, 강재 모재와 전단면의 수소취성 거동을 비교 분석하였다. 강재 내 수소는 전기화학적 방법을 통해 주입하였고, 모재의 수소취성 평가는 저변형률 인장시험(slow strain rate tensile test, SSRT)을 통해 수행하였다. 전단면의 수소취성 저항성은 4점 굽힘 조건에서의 침지 시험을 통해 평가하였으며, 파괴 거동은 파단 시간 및 균열 전파 특성을 기준으로 분석하였다. 복합조직강은 모재 기준으로 상대적으로 우수한 가공경화 능력과 낮은 수소취성 민감도를 보였으나, 전단면에서는 단상 마르텐사이트강에 비해 현저히 낮은 수소취성 저항성을 나타내었다. 이는 복합조직강 전단면에서 형성된 상간 미세조직 불균일성과 국부적인 응력 집중이 균열 전파를 촉진시키기 때문으로 판단된다. 반면 단상 마르텐사이트강은 전단면에서 상대적으로 높은 파괴인성을 보이며, 균열 전파 저항성이 우수한 것으로 확인되었다. 결과적으로 아연도금 초고강도강재 전단면의 수소취성 거동은 미세조직적 특성과 파괴인성과 밀접하게 연관됨을 확인하였으며, 이는 향후 전단 가공부의 수소취성 저감을 위한 미세조직 설계의 중요성을 시사한다.

### [소성 1-2 | 16:45]

**저온 열처리에 따른 초고강도강 전단면 수소취성 저항성 거동 및 향상:** 유지성\*, 이진중, 박형권, 이태호, 이창훈(한국재료연구원)

**Keywords:** 초고강도강, 전단면, 수소취성, 저온열처리

수소취성(hydrogen embrittlement)은 자동차용 강재의 초고강도화에 따라, 사용 신뢰성과 직결되는 주요 이슈로 대두되고 있다. 본 연구에서는 복합조직강(complex phase, CP steel)의 전단(shearing) 공정에 의해 형성된 전단면에서의 수소취성 거동을 규명하고, 저온 열처리를 통한 수소취성 저항성 향상 메커니즘을 분석하였다. 저온 열처리 전·후 미세조직 변화와 기계적 특성을 비교 분석하였으며, 인장 시험과 침지 시험을 통해 수소취성 저항성을 평가하였다. 열처리 전 CP 강의 미세조직은 Tempered martensite, Lath bainite, 그리고 Island-type bainite로 구성되어 있었다. 저온 열처리 이후에도 전체적인 미세조직은 크게 변화하지 않았으나, 탄소 재분배에 의해 항복강도와 파괴 인성이 향상되었으며, 나노경도 분석 결과 조직 간 기계적 물성의 균일성이 증가한 것을 확인하였다. 수소취성 저항성의 향상은 탄소 클러스터링 또는 탄화물 석출에 의해 수소 확산이 억제된 결과로 해석된다. 침지 시험 결과, 수소취성은 버(burr)가 상향으로 형성된 전단면에서만 발생하여, 전단면 상태가 수소취성 민감도에 중요한 영향을 미침을 확인하였다. 열처리 전에는 베이나이트와 기지 조직 간의 나노경도 차이로 인해 계면을 따라 균열이 전파되었으나, 열처리 후에는 균열이 Bainite 내부로 전이되어 응력 집중이 완화되고 나노경도 분포가 보다 균일해졌음을 시사한다. 종합적으로, 저온 열처리는 균열 전파 거동을 변화시키고 파괴 인성을 향상시키며 수소 확산도를 감소시킴으로써 전단면 수소취성 저항성을 효과적으로 개선하였다.

### [소성 1-3 | 17:00]

**탄소배출 및 원가 저감을 위한 핫스탬핑 냉간트림 기술 연구:** 손성국\*, 이창욱(현대자동차), 박재명, 윤승(현대제철)

**Keywords:** 냉간 트리밍, 프레스 트리밍, 핫스탬핑 강판, 전단 메커니즘

최근 차량의 연비 향상을 위한 경량화 및 강화된 충돌 법규에 대응하기 위하여 핫스탬핑 강판의 적용이 확대되고 있다. 그러나 핫스탬핑 부품은 열처리 성형 후 강도 상승으로 인해 기계적 트리밍 적용에 제한이 많으므로 비접촉식 가공 방법인 레이저 트리밍 공법을 적용 중이나, 높은 에너지 손실 및 공정 시간 증가로 공정 비용이 높다. 또한, 핫스탬핑 공정은 높은 가열온도와 유지 시간 및 레이저 트림 가공으로 인하여, 프레스 트림 대비 높은 탄소배출량이 발생하고 있다. 이에 탄소배출 저감, 원가 절감 및 생산성 향상을 위해 기존 레이저 트림을 대체할 수 있는 프레스 트림 기술 확보가 필요한 상황이며, 다양한 연구 사례를 기반으로 대체 기술을 검토하였다. 본 연구에서는 냉간 프레스 트림 변수 중 트림 속도, 클리어런스, 금형강 재질, 시어각 등 인자가 전단면 품질과 수소지연파단에 미치는 영향을 확인하였으며, 기존 레이저 트림과 비교하여 대체 가능성을 확인하였다.

### [소성 1-4 | 17:15]

**다단 신선 및 열처리 공정에 따른 펄라이트 강선의 미세조직 변화와 기계적 물성 간 상관관계 분석:** 이승희, 박주현(동아대학교), 김보미, 제환승(고려제강), 강신곤\*(동아대학교)

**Keywords:** 펄라이트 강선, 다단 신선, 패터닝 열처리, 도금

고강도 강선은 일반적으로 과공석(hypereutectoid) 강을 원소재료 하며, 열간 압연 후 냉각 제어를 통해 완전한 펄라이트 조직을 형성시킨다. 이후 다단 신선(multi-pass drawing), 패터닝(patenting) 열처리 및 도금 공정을 거쳐 최종 제품이 제조된다. 다단 신선

과정에서는 시멘타이트 라멜라의 분절(fragmentation) 및 비정질화(amorphization)와 함께 페라이트 기지 내 탄소 농축 등 특징적인 미세조직 변화가 발생한다. 이때 신선 단계 사이에 실시하는 패터닝 열처리는 누적된 내부 결함과 조직 불균일을 완화하며, 미세하고 균일한 펄라이트 조직을 재형성함으로써 후속 공정에서의 높은 단면 감소율과 최종 강도 확보를 가능케 한다. 한편, 신선 가공 이후 수행되는 용융 아연도금(hot-dip galvanizing) 및 블루잉(bluing) 공정 중에는 연화(softening) 현상이 발생하며, 이는 심하게 변형된 시멘타이트가 부분적으로 분절되고 구상화(spheroidization)되면서 기인하는 것으로 보고되고 있다. 특히 신선 공정에서 층상 간격 미세화 등의 여러 복합적인 강화기구를 통해 초기 강도는 증가하는 반면, 아연도금 과정에서의 강도 감소가 발생하는 경향이 선행 연구에서 보고되었다. 이처럼 제조 공정 단계에 따라 다양한 미세조직 변화가 발생하며, 이는 최종 기계적 물성에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 각 제조 공정 단계별 미세조직 변화를 체계적으로 분석하고, 공정-미세조직-물성 간 상관관계를 규명하고자 하였다. Fe-0.89C-0.2Si-0.3Mn-0.2Cr(wt.%) 조성의 펄라이트 강을 대상으로 1~3차 신선, 패터닝 열처리 및 도금 공정 단계에서 채취한 총 6개의 시편을 분석하였다. 광학현미경(OM) 및 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 펄라이트 콜로니의 전반적인 미세조직 변화를 관찰하였으며, 투과전자현미경(TEM)과 X선 회절(XRD) 분석을 통해 시멘타이트의 결정성 및 페라이트 내 탄소 농도 변화를 평가하였다. 기계적 물성은 인장 및 비틀림 시험을 통해 측정하였다.



**철강A-제선, 제강, 환경, 에너지**

Room 4층 401, 4월 28일

**[철강A1-1 | 09:00]**

Effect of Temperature on Multi-stage Hydrogen Reduction of Iron Ore: Seong-Jin Kim(포항공과대학교), Seongkyu Cho(포스코기술연구원), Sung-Mo Jung\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 철광석, 수소 환원, 유동로, 동역학 분석

The aim of this study is to simulate multi-stage hydrogen reduction of fine iron ore in a lab-scale fluidized bed, optimizing HyREX operation. Stepwise reduction of Australian iron ore in four stages (R4-R3-R2-R1) with  $N_2$ ,  $H_2$ , and  $H_2O$  showed major conversion at R2 & R1 stages, indicating that the reduction degree is largely governed by temperature and gas oxidation degree. This corresponds to a shift in the rate-controlling step from a 3-D diffusion to a 3rd-order reaction during wustite-to-Fe transformation. Reaction kinetics at R2 stage varies over microstructural evolution, from isolated nuclei to layered grains.

**[철강A1-2 | 09:15]**

Design of a New Iron Ore Sinter with Quasi-particles - Part 1. Fluidity Test: Haeun Kim, In-kook Suh, Joonho Lee\*(Korea University)

**Keywords:** Iron ore sinter, Quasi-particle, Fluidity

The modern ironmaking process is operated with either iron ore sinter or pellets. In Korea, iron ore sinter is preferred due to its low cost, reasonable mechanical properties, and high reactivity. During sintering, liquid-phase sintering is employed to achieve the required mechanical strength. Generally, limestone is mixed with iron ore particles (sinter feed), forming a liquid phase called calcium ferrite that binds the particles. On the other hand, various industrial waste or by-products containing CaO and FeOx are generated in iron- and steel-making plants. These materials can be used as calcium ferrite liquid formers in the sintering process, thereby reducing sintering temperature and CO<sub>2</sub> emissions. The key issue is to find the optimal addition strategy for the CaO-containing by-products in the sintering bed. The most feasible approach is to provide core-shell quasi-particles composed of an iron ore core and a CaO-containing powder shell. In order to obtain excellent mechanical properties, the quasi-particle should play the role of a liquid binder. In this study, we propose a new Fluidity of Melt Index (FMI) to test the fluidity of a quasi-particle. The results indicate that FMI is strongly influenced by both the mineralogical characteristics of a nucleus particle and the composition of the powder shell. The findings from this study provide practical insights for designing quasi-particles to reduce sintering temperature and CO<sub>2</sub> emissions.

**[철강A1-3 | 09:30]**

딥러닝 기반 차수 축소 모델을 이용한 기포 유동층의 동역학적 거동 예측 가속화 연구: 진봉민, 서승원, 심승현, 양현진\*(인하대학교)

**Keywords:** 유동환원로 (Fluidized Bed Reactor), LSTM (Long Short-Term Memory), RBF (Radial Basis Function)

유동환원로는 복잡한 다상 유동으로 이를 모사하기 위해 Two-Fluid Model(TFM) 기반 Euler-Euler 기법 등이 활용되고 있으나, 유동층 수치 해석은 막대한 계산 비용을 요구하여 실시간 공정 최적화 및 장시간 운전 분석에 제약이 따른다. 본 연구에서는 머신러닝 기반 차수 축소 모델(Reduced-Order Model, ROM) 프레임워크를 구축하여 2차원 기포 유동층의 비선형 거동을 효율적으로 예측하고자 한다. 연구의 신뢰성 확보를 위해 실험 데이터를 제시한 두 편의 문헌(Taghipour et al., 2005; Hernández-Jiménez et al., 2011)을 선정하여 수치적 검증을 수행하였다. TFM 기반 비정상 CFD 계산을 통해 압력 강하, 층 팽창비(Bed expansion ratio) 등을 비교하여 시뮬레이션의 타당성을 확보하였다. 학습 및 검증 데이터셋은 실험과 동일한 공탑 속도(Superficial velocity)를 포함한 다양한 유속 조건에서 생성되었다. 입력 변수로는 압력강, 속도장 및 고체 분율장을 사용하였으며, 이를 저차 모드 공간으로 투영한 후 RBF(Radial Basis Function) 기반 정적 보간 모델과 LSTM(Long Short-Term Memory) 기반 시계열 예측 모델을 각각 적용하여 시간에 따른 거동을 모사하였다. 특히 학습 데이터 구성에 따라 내삽 및 외삽 시나리오를 설정하여 모델의 일반화 성능을 체계적으로 분석하였다. 구축된 ROM의 예측 결과는 TFM 직접 해석 결과 및 문헌의 실험 데이터와 동일한 지표로 정량적 평가를 수행하였다. 본 연구는 기존 실험-수치 비교 연구를 딥러닝 기반 ROM 프레임워크로 확장함으로써 계산 비용을 절감하고, 고충실도 해석 수준의 유동 특성 재현이 가능한 가속 해석 기법을 제안한다. 이는 향후 철강 공정 유동환원로의 설계 최적화 및 실시간 예측 모델 개발을 위한 기반 기술로 활용될 수 있다.

**[철강A1-4 | 09:45]**

고로 레이스웨이 형상에 따른 연소 및 입자 거동 특성에 대한 전산해석 연구: 이정호, 남준영, 류창국\*(성균관대학교), 이승문, 신민수(포스코)

**Keywords:** 탄소중립, 고로, 레이스웨이, 미분탄, 전산해석

2050년 탄소중립 달성을 위해 철강산업에서는 기존 석탄 기반 고로 공정의 탄소 배출을 저감하기 위한 다양한 기술적 대안이 검토되고 있으며, 그중 고로에 합수소가스를 투입하는 방식은 석탄 사용량을 줄이면서 CO<sub>2</sub> 배출을 저감할 수 있는 유망한 전환 기술로 주목받고 있다. 그러나 고로 내부는 고온·고압의 극한 조건으로 인해 직접적인 관찰과 계측이 거의 불가능하며, 특히 연소가 집중적으로 발생하는 레이스웨이 영역에서의 미분탄 연소 특성과 입자 거동 변화에 대한 이해는 여전히 제한적이다. 이에 따라 레이스

웨이 영역에서의 연소 및 입자 거동을 파악하고, 취입 조건 변화에 따른 영향을 예측할 수 있는 해석 기반의 연구가 필요한 상황이다. 고로 레이스웨이는 풍구를 통해 열풍과 산소, 미분탄이 취입되어 풍구 앞부분에 형성되는 공간이며, 활발한 연소를 통해 열과 환원가스를 고로 내에 공급하는 핵심 영역이다. 레이스웨이 형상에 따라 고속의 순환영역이 국부적으로 변화하여 가스 유동, 온도 분포, 반응 및 입자 체류 특성이 달라질 수 있다. 이에 본 연구에서는 2,500 m<sup>3</sup> 이상 급 고로 레이스웨이 형상 변화가 연소 및 입자 특성에 미치는 영향을 전산해석을 통해 고찰하였다. 그 결과, 레이스웨이 길이가 증가할수록 입자 체류시간이 늘어나 미분탄 반응률은 증가하였으나, 순환 유동 약화로 배가스가 더 확산되면서 레이스웨이 내 고온 영역이 축소되고 최고 온도는 기준 조건 대비 약 83 °C 감소하였다. 반면, 레이스웨이 길이가 감소할수록 입자 체류시간 감소로 미분탄 반응률은 낮아졌으나, 유동의 감속이 충분히 일어나지 않아 순환 유동이 강화되면서 배가스 확산이 제한되었다. 이로 인해 고온 영역이 확대되었으며, 최고 온도는 기준 조건 대비 약 95 °C 증가하였다. 이는 레이스웨이 형상이 미분탄 연소 특성과 내부 온도 분포에 영향을 주는 주요 인자임을 시사한다. 향후 본 연구 결과를 기반으로 합수소가스 취입 조건에 따라 적절한 레이스웨이 형상을 반영하고, 이에 따른 레이스웨이 내 연소와 반응 특성 및 환원가스 온도 분포 특성 변화를 평가하는 데 활용할 예정이다.

#### [철강A1-5 | 10:00]

**EAF형 수 모델 내 저취 유동의 레이놀즈 수에 따른 영역별 특성 고찰:** 박지현, 김선중\*(조선대학교)

**Keywords:** Electric arc furnace, Bottom-blowing, Water model, Reynolds number

철강 산업에서는 탄소중립 실현과 산업의 지속 가능한 발전을 위해 수소 환원 제철에 대한 연구가 활발하다. 수소 환원 제철법은 코크스 대신 수소를 환원제로 사용하여 CO<sub>2</sub> 발생을 억제하며, 그린수소를 활용할 경우 공정 전반의 탄소 배출을 최소화할 수 있다. 특히 기존 고로의 생산량을 대체하기 위해 전기로의 대형화가 요구됨에 따라, 이에 상응하는 고도화된 조업 기술 또한 필요하다. 전기로의 낮은 교반력을 극복하기 위해 Bottom blowing 기술이 제안되고 있으나, 이를 적용했을 때의 실제 유동 특성을 고찰한 보고는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 전기로 형 수 모델에 Bottom blowing을 적용하여 각 영역의 유동 현상을 관찰하고, 평균 속도를 기반으로 레이놀즈 수를 도출하여 유동 특성을 파악하였다. 나아가 기존 연구에서 다루지 않았던 영역의 유동까지 관찰함으로써, 전기로 전체의 유동 메커니즘을 규명하는 새로운 시사점을 제공하였다.

#### [철강A1-6 | 10:15]

**철강 슬라브 연속주조 몰드내 토출류 거동과 탕면 변화 현상 모델링:** 박정섭, 신재원, 김나영, 조성묵\*(국립부경대학교)

**Keywords:** 철강, 연속주조, 몰드, 토출류, 탕면

철강 연속주조 몰드내 유동 현상은 슬라브내 다양한 표면결함 발생과 깊은 관련성을 가지고 있다. 공정 조건에 따라 몰드내 토출류 거동이 변화하고, 이는 유동 패턴, 탕면슬래그/용강 계면 거동에 영향을 미친다. 특히 토출류의 몰드벽 충돌 위치와 상부 재순환 영역내 유동장 변화는 탕면 유동 및 레벨 변화를 야기하여, 표면 결함 발생과 관련한 슬래그 혼입 및 포집 현상을 일으킬 수 있다. 본 연구에서는 몰드내 유동 현상에 대한 램스케일 수모델 실험과 전산시뮬레이션을 통해서 노즐로부터 몰드로 유입되는 용강 토출류의 거동과 관련한 몰드내 충돌, 편류 발생, 비대칭 유동 패턴 현상을 분석하고, 해당 현상들이 탕면 유속 및 레벨 변화, 슬래그 혼입 및 포집 현상에 미치는 영향에 대해서 정량적으로 고찰하였다.

#### [철강A2-1 | 10:40]

**메탄 열분해 반응 중 용융 금속 촉매의 피독 현상을 활용한 용철 내 황 흡착 계수 측정:** 위태균(포항공과대학교), 이은도(한국생산기술연구원), 강윤배\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 청록 수소, 메탄 열분해, 용융 금속 촉매, 촉매 피독, 황 흡착 계수

용융 금속 촉매를 이용한 메탄 열분해 방식은 탄소 배출 없이 청록수소를 생산할 수 있는 기술로 주목받고 있다. 연구실 환경에서 순도 높은 메탄을 활용할 경우 용융 금속 촉매는 우수한 활성을 나타내지만, 실제 공정에서는 천연가스 내 유황성분에 의한 촉매 표면의 피독 현상에 의해 성능이 저하될 수 있다. 본 연구에서는 용철 촉매 내 황 농도 변화가 메탄 열분해 반응 속도에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하였다. 용철 촉매 내 황 농도가 증가함에 따라 메탄 열분해 반응 속도가 감소하였으며, 이를 기반으로 용철 내 황 흡착계수를 측정하고, 유효 활성점을 반영한 속도론적 모델을 구축하였다.

#### [철강A2-2 | 10:55]

**합철 부산물 및 Al 부산물 활용 환원 반응에 따른 환원철 제조 및 Al, Si 환원 거동:** 김윤하, 김선중\*(조선대학교)

**Keywords:** Mill scale, Al dross, Al dust, Al solubility

최근 철강산업은 저탄소화 및 부산물 발생 최소화를 위한 고부가가치 재활용 기술이 대두되고 있다. 전세계적으로 연간 1,350만 톤에 달하는 Mill scale은 높은 합철량 덕분에 공정 내 재자원화가 진행되고 있다. 반면 알루미늄 부산물은 전세계에서 연간 500만 톤 규모로 발생하고 있으며, 대부분 단순 매립으로 처리되고 있다. 알루미늄 부산물은 산화물 외에도 금속성 알루미늄을 포함하고 있어 이를 활용하여 고부가가치 기술 개발이 가능하다. 본 연구에서는 알루미늄 부산물로 알루미늄 드로스 및 분진을 사용했으며, Mill scale과의 혼합비에 따라 환원 반응을 통해 얻어진 환원철내 Al 및 Si의 환원 거동을 1873K에서 조사하였다. 알루미늄 부산물과 Mill scale의 혼합비를 Al/Fe의 몰 혼합비로 정의하였고, 환원 반응후 얻어진 샘플의 성분 분석을 통해 Al/Fe의 몰 혼합비가 증가할수록 Metal 내 Al 및 Si 최대 농도가 각각 약 12 wt% 및 16 wt%로 증가하는 결과를 얻었다.

**[철강A2-3 | 11:10]**

**맥석 조성과 탄소 함량 차이에 따른 HBI의 잔탕 내 용해거동 모사:** 이민주(한양대학교), 조재섭(한양대학교, 메탈켄텍), 박주현\*(한양대학교)

**Keywords:** EAF, melting behavior, gangue oxide, HBI

최근 전기로 내 고급강 생산을 위한 연구가 주목받고 있다. 기존 스크랩 위주 조업은 Cu, Sn과 같은 tramp element 농축 문제가 발생하며, 이를 예방하기 위해서는 고품위 스크랩 사용이 필수적이다. 하지만 전 세계적인 고품위 스크랩 수요 증가로 인해 수급 불안정이 우려됨에 따라, 이를 대체할 철원으로 직접환원철 (direct reduced iron, DRI)이 주목받고 있다. 특히, DRI의 운송 중 발화 문제를 해결하기 위하여 HBI (hot briquetted iron) 형태로 가공하여 사용하지만, DRI와는 다른 물리적 특성으로 인해 HBI 기반 전기로 조업 기술에 대한 이해는 아직 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 전기로에서의 HBI 용해 거동을 규명하기 위하여, Fe 용탕에서의 HBI 침적 실험을 진행하였다. HBI를 5초간격으로 용탕에 침적하기를 반복하며, 시간에 따른 샘플 크기 변화를 관찰하였다. 완전 용해까지 걸린 시간은 ST(standard) 샘플은 35초, HS(high-silica) 샘플은 20초 HC(high-carbon) 샘플은 15초로 나타났다. 초기 metal shell 생성 두께는, ST에서 약 30%, HS와 HC에서 약 10% 증가하였다. Metal shell 용해 이후 HBI의 전체 용해 속도는 HC>HS>ST 순으로 빠르게 나타났다. CFD model 결과와 비교하였을 때 ST는 비슷하지만 HS와 HC는 CFD 결과보다 실험에서 훨씬 빠르게 용해되는 것을 보아, HS와 HC에서 맥석으로 인하여 용해속도가 상대적으로 증가했다는 것을 확인하였다. HBI 용해 과정에서, ST는 내부에 생성된 CO 가스가 간헐 커다란 기공을 형성하였으며, 표면부터 순차적으로 용해되는 것을 확인하였다. 반면 HS와 HC에서는 HBI가 작은 파편으로 분리 후 용해되는 거동을 관찰하였다. 이는 각 샘플의 맥석 조성 및 함량 차이에 기인한 것으로 확인된다. ST(산화물~14%) 샘플은 슬래그 네트워크가 외부로 연결되지 못해 내부 기공을 형성한 반면, HS(산화물~16%) 샘플은 충분한 산화물 함량으로 인해, 그리고 HC(산화물~12%) 샘플은 Fe<sub>3</sub>C의 용해로 인하여 외부와 연결된 open channel 형태의 통로가 형성된 것으로 추정된다. 이 통로를 통해 외부로 빠져나간 슬래그와 가스는 용탕 교반을 촉진하여 metal shell의 생성을 억제한 것으로 보인다. 따라서 약 15% 이상의 산화물을 함유하고, 저융점 슬래그를 형성하는 HBI는 내부의 탄소가 FeO 환원보다 Fe 상의 용점 감소에 효율적으로 사용되어 HBI 용해를 촉진시킬 수 있음을 알 수 있다.

**[철강A2-4 | 11:25]**

**자선분광 분사연마 공정내 분광베드 형성 및 연마 현상 전산모델링:** 신재원(국립부경대학교), 조성구(포항산업과학연구원), 조성묵\*(국립부경대학교)

**Keywords:** 철강, 슬래그, 분사연마, 분광베드, 전산시뮬레이션

Kanbara Reactor (KR)는 용선 예비처리 단계에서 임펠러를 용선에 침지 및 회전시켜 탈황제와 용선을 혼합해 탈황 반응을 가속하는 공정으로, 반응생성물 CaS와 미반응 CaO가 부력에 의해 용선 표면으로 부상해 슬래그상 (KR slag)을 형성한다. 슬래그에는 Fe상이 포함될 수 있어, 재활용을 위한 자력선별은 슬래그로부터 자성 성분을 분리 및 회수하기 위한 대표적인 분리 방법으로 사용된다. 하지만 자력선별로 얻는 자선분광은 슬래그 성분을 함유하기에 잔류 슬래그 성분을 제거하는 후속 공정이 필요하고, 연마재를 분사하여 자선분광 표면의 불순물을 제거하게 된다. 본 연구에서는 자선분광 분사연마 공정의 분광 베드 형성, 연마재 분사, 분광-연마재 충돌 현상을 전산모사하였다. 전산모델링 결과는 랩스케일모델 실험을 통해서 측정되는 자선분광의 베드 형상과 비교하여 정합성을 평가하였으며, 분광-연마재 충돌수를 정량적으로 해석하였다.

**[철강A2-5 | 11:40]**

**전기강판용 Fe-Si 합금의 고온 열물성 평가:** 박지우(고려대학교), Hideo Higashi, Hiroyuki Fukuyama(Tohoku University, Institute of Multidisciplinary Materials Science), Jürgen Brillo(German Aerospace Center (DLR), Institute of Material Physics in Space), 이준호\*(고려대학교)

**Keywords:** 전기강판, Fe-Si 합금, 전자기부양장치, 표면장력, 밀도, 점도

전기강판용 Fe-Si 합금은 일반적으로 1~6.5 wt%의 Si를 포함한 소재로, 우수한 자기적 특성을 가져 모터나 변압기의 철심 소재로 사용된다. 현재 Fe-Si 합금은 주로 연속주조 공정을 통해 생산되고 있으나, 최근에는 형상 자유도 확대와 고 Si 함량 적용을 통해 최종 제품의 성능을 향상시키고자 가스분무법, 적층제조, melt spinning 등 다양한 공정에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 공정은 모두 액상 상태의 합금을 포함하며, 응고, 핵생성, 유동 등 복합적인 현상이 동반된다. 이러한 현상은 액상 합금의 밀도, 표면장력, 점도 등과 같은 고온 열물성에 의해 지배되므로, 액상 합금의 고온 열물성에 대한 정밀한 평가는 해당 공정의 명확한 이해 및 최적화에 있어 필수적이다. 본 연구에서는 지상과 마이크로중력 환경하에서 전자기 부양 장치(Electromagnetic Levitation, EML)를 활용하여 액상 Fe-Si 합금의 고온 열물성(밀도, 표면장력, 점도)을 측정하였다. 밀도는 Si 함량이 각각 3, 4.5, 6.5 wt%인 합금을 대상으로 시료의 고유 진동을 억제하기 위한 전자기장과 결합된 지상용 EML 시스템을 활용하여 측정하였으며, Si 함량 및 온도가 미치는 영향을 평가하였다. 한편, 표면장력과 점성은 Fe-3wt%Si 합금에 대해 포물선 비행 중 형성되는 미세중력 환경에서 EML을 활용하여 측정하였으며, 온도의 영향을 평가하였다. 본 연구 결과는 향후 액상 Fe-Si 합금을 포함하는 공정의 이해 및 최적화에 유효하게 활용될 것으로 기대된다.

**[철강A2-6 | 11:55]**

**Determination of the Adsorption Coefficient of Phosphorus on Liquid Iron from Surface Tension Data within an Ideal Adsorption Framework:** Chan-Jun Lee, Tae-Gyu Wi, Youn-Bae Kang\*(POSTECH)

**Keywords:** Adsorption coefficient, Surface tension

The adsorption of impurity elements on liquid iron (Fe) provides fundamental basis for gas-liquid interfacial phenomena and

reactions. Phosphorus (P), one of the representative surface-active elements, preferentially adsorbs on the molten metal surface and significantly modifies the surface tension ( $\gamma$ ) of the liquid metal. As this variation in  $\gamma$  is governed by the bulk-surface adsorption equilibrium of P, establishing a reliable adsorption coefficient ( $K_P$ ) on liquid Fe is essential for understanding such interfacial properties. In the present study,  $K_P$  was determined using an ideal adsorption model based on Szyszkowski equation. By using the reported saturated surface excess ( $\Gamma^\infty$ ),  $K_P$  was obtained by fitting calculated  $\gamma$  values to experimentally measured literature data. The obtained  $K_P$  values exhibit Arrhenius-type temperature dependence:  $\ln K_P = 4937/T - 1.23$  (T in K). Although P adsorption might exhibit non-ideal behavior, the results based on ideal-adsorption framework provide an effective  $K_P$  in the high-P composition regime of interest (>5 wt% P), offering a thermodynamic basis for interpreting the interfacial adsorption phenomena.

### [철강A3-1 | 14:00]

**고로 연화·용착대 실시간 가시화 기술 개발 현황과 탈탄소 공정 활용 방안:** 이성희\*, 이상대, 권민락, 류진호(포스코)

**Keywords:** 철강, 고로, 용착대, 함수소가스, 대체철원, 펠렛

연화용착대는 고로 내에서 가스의 분포를 결정하는 중요한 영역이다. 연화용착대의 위치와 형상을 정확하게 평가하는 것은 효과적인 고로 조업 설계에 필수적이다. 특히 연화용착대의 높이와 두께를 적절히 유지하는 것은 안정적인 조업과 생산 효율 향상에 직접적으로 기여한다. 그러나 고로 내부의 연화용착대를 직접 관찰하거나 시각화하는 데에는 한계가 있어, 보다 정확한 접근법 개발이 필요하다. 본 연구에서는 고로 본체의 온도·압력 센서와 노두부(throat) 온도 센서를 활용하여 연화용착대를 실시간으로 시각화하는 방법을 개발하였다. 이를 기반으로 1분 간격으로 연화용착대의 위치와 형상을 시각화하는 모델을 구축하였으며, 고로 온도 분포 측정 시스템을 통해 모델의 타당성을 검증하였다. 연구 결과는 실제 고로에 적용되어 실시간 시각화 시스템이 구현되었으며, 탈탄소 원료를 사용하는 고로 조업에서 장입물(burden) 분포 설계에 활용되었다. 이를 통해 조업 안정화와 효율 향상에 기여하였다.

### [철강A3-2 | 14:15]

**HBI 장입 고로의 조업 안정성 확보를 위한 MgO 함량별 펠렛의 환원 및 연화용융 특성 평가:** 김리주, 박준범, 권재홍, 오한상, 이종협\*(현대제철)

**Keywords:** 제선, 고로, HBI, 대체철원, 연화용착대

고로 공정의 CO<sub>2</sub> 발생량 저감을 위해 국내외 철강사 주도로 대체철원 사용기술 개발 및 실기 적용을 활발히 진행하고 있다. 대체철원 중 HBI(Hot Briquetted Iron)를 고로에 사용하면, 연화 과정 없이 용융하는 특성으로 안정적인 연화용착대 유지가 어렵고 불안정한 가스 흐름이 나타날 수 있다. 이는 고로 통기성 저하 및 열 변동 심화 등 조업 안정성 저하의 원인이며, HBI와 혼합 사용하는 기존 철원의 연화용융 특성 관리 강화가 필요하다. 이에, 주원료인 소결광과 연화용융온도가 유사한 고 MgO 펠렛 특성을 활용하여 안정적인 연화용착대 유지 관리를 목표로 하고 있다. 본 연구에서는 고 MgO 펠렛 사용 및 특성평가를 진행하였다. MgO 함량에 따른 영향을 평가하기 위해 상용 펠렛 2종을 선정하여 환원 및 연화용융 특성을 비교 평가하였다. 열중량분석시험과 고온하중 연화시험으로 펠렛 환원 및 연화용융 특성평가를 하였다. 환원 특성의 경우 고 MgO 펠렛과 상용 펠렛 모두 700 ~ 800°C 구간에서는 유사한 환원 특성을 보였으나, 900 ~ 1000°C 구간에서는 차이를 보였다. 고 MgO 펠렛의 연화점과 용융점은 각각 1177°C와 1436°C로, 상용 펠렛(1122°C, 1414°C) 대비 연화점-용융점 온도차가 약 259°C로 더 좁게 나타났으며, 이는 고로 연화용착대 거동을 모사한 조건에서 고 MgO 펠렛의 연화용융 특성이 소결광과 유사함을 확인하였다. 이러한 실험 결과를 기반으로 고 MgO 펠렛 적용이 HBI 투입 고로의 조업 안정성 향상에 효과적인 방안이 될 수 있다고 판단된다.

### [철강A3-3 | 14:30]

**Fe의 탄소 석출에 미치는 표면 조도 및 CH<sub>4</sub>-CO-H<sub>2</sub> 혼합 가스 조성의 영향성 평가:** 조다한, 김영재\*(인하대학교), 이유빈(현대제철)

**Keywords:** 탄소 석출, 표면 조도, DRI 공정, 열중량분석

탄소 석출은 직접환원철(Direct Reduced iron; DRI) 생산 공정 및 천연가스 개질 공정에서 중요한 문제 중 하나이다. 직접환원철 생산 공정에서의 적절한 침탄은 직접환원철의 용융 효율을 향상시켜 후속 공정에서 전력 소모를 감소시키고 공정 안정성을 향상시키는 장점이 있다. 그러나 과도한 탄소 침적이 발생할 경우, 펠렛의 물리적 붕괴를 유발하고 가스 투과성을 저하시켜 공정 운전이 심각한 악영향을 미칠 수 있다. 또한 천연가스 개질 공정에서는 탄소 침적이 촉매 표면을 피복하여 촉매 비활성화를 초래함으로써 촉매의 활성 및 수명을 크게 저하시킨다. 이러한 이유로 다양한 공정 온도 및 압력에서 가스 조성에 따른 탄소 석출 경계를 정확하게 판단하는 것이 중요하다. 기존 연구에서는 온도, 압력 및 가스 조성 등을 고려한 열역학 계산을 기반으로 탄소 석출 경계를 예측해 왔다. 그러나 이러한 열역학적 석출 경계는 실제 공정 조건을 충분히 반영하지 못하며, 탄소 석출 발생에 대한 충분한 조건만을 제시하는 한계를 가진다. 실제 공정에서는 H<sub>2</sub>O 및 CO<sub>2</sub>에 의한 탄소 제거 반응과 같은 속도론적 요인, 석출된 탄소의 구조적 안정성, 그리고 촉매 표면의 입자 크기 등과 같은 요인들이 추가적인 에너지 장벽으로 작용하여 탄소 석출 거동에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 1273 K에서 표면 형상 및 가스 조성이 탄소 석출에 미치는 영향을 확인하였다. 이를 위해 서로 다른 표면 조도의 Fe 박판과 수소 환원된 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 펠렛을 이용하여 CH<sub>4</sub>-CO-H<sub>2</sub> 혼합 가스 조성 하에서 탄소 석출 거동을 열중량분석으로 확인하였다. 그 결과, 매끄러운 Fe 표면에서는 열역학적으로 탄소 석출이 예측되는 조건에서도 탄소 석출이 억제되는 반면, 표면 조도가 증가할수록 동일한 가스 조성에서도 탄소 석출이 용이하게 발생함을 확인하였다. 또한 다공성 펠렛의 경우 탄소 핵생성이 용이하여 실험적으로 관찰된 탄소 석출 거동이 열역학적 석출 경계와 보다 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 탄소 석출은 열역학적 조건뿐만 아니라 표면 조도 및 가스 조성에 의하여 영향을 받으며, 실제 공정에서는 이를 반영한 탄소 석출 경계의 재정립이 필요하다.

**[철강A3-4 | 14:45]**

Effect of Gas Composition and Temperature on Direct Reduction of Iron Ore Pellets: A Novel Resistance Analysis for Kinetic Modelling: Ahmad Raza Javed\*(POSTECH (GIFT))

**Keywords:** Green Iron making Green steel making Sustainability

Decarbonizing ironmaking requires fast, low-emission direct reduction routes compatible with existing shaft furnace (MIDREX-style) practice. Direct reduction of iron ore pellets using CO-H<sub>2</sub> gas mixtures is critical for developing carbon-neutral steelmaking processes, yet the interplay of gas composition and temperature on multi-stage reduction kinetics and rate-limiting mechanisms remains underexplored. This study quantifies these effects across industrially relevant conditions to guide process optimization. Reduction experiments were conducted via thermogravimetric analysis (TGA) on hematite pellets using CO:H<sub>2</sub> ratios (1:0, 3:1, 1:1, 1:3, 0:1) at 800–1000 °C. Phase evolution was assessed by X-ray diffraction (XRD), morphology by scanning electron microscopy (SEM), and carbon content via LECO analyzer. Kinetic modeling employed the multiple kinetic models with resistance analysis to identify rate-limiting steps across three reduction stages (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>→Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>→FeO→Fe). Increasing H<sub>2</sub> content accelerated overall reduction kinetics due to its higher diffusivity compared to CO, yielding more porous microstructures and carbon deposition reduced from 2.21 wt% at 100% CO to 0.046 wt% at 100% H<sub>2</sub>. Higher temperatures promoted swelling, especially with CO-rich gases. At 800&850 °C, the 1<sup>st</sup> reduction stage followed 3<sup>rd</sup>-order reaction control (except diffusion control at 100% CO), while the 2<sup>nd</sup> reduction stage was 2<sup>nd</sup>-order reaction-controlled; activation energies were 19.0–29.1 kJ/mol (3<sup>rd</sup>-order) and 26.1–38.8 kJ/mol (2<sup>nd</sup>-order). At 900&950 °C, reduction stages shifted to 3<sup>rd</sup>-order reaction (1<sup>st</sup> stage) and 1-D diffusion control (2<sup>nd</sup> stage). At 1000 °C, 1<sup>st</sup> stage shifted from 3<sup>rd</sup> to 1<sup>st</sup>-order reaction control with increasing H<sub>2</sub> content in reducing gas, while 2<sup>nd</sup> stage remained 2-D diffusion-controlled. The 3<sup>rd</sup> reduction stage across all reduction conditions was further investigated using novel resistance analysis to identify the rate-limiting mechanism. The results showed that reduction was solely diffusion-controlled under 100 pct CO at 800 °C and 850 °C, whereas H<sub>2</sub> addition caused the reaction to be initially chemically reaction-controlled and subsequently diffusion-controlled. Furthermore, H<sub>2</sub> addition shifted the reaction-controlled regime to higher reduction degrees due to its superior diffusion coefficient. At 900 °C, 950 °C, and 1000 °C, thermal sintering effects were observed, with the initial reduction stage being chemically reaction-controlled and the later stage diffusion-controlled for all gas compositions, except for 100 pct CO, which remained purely diffusion-controlled at 950 °C and 1000 °C. The activation energies for the interfacial chemical reaction-controlled and diffusion-controlled regimes were 27.7–41.7 kJ/mol and 38.7–41.7 kJ/mol, respectively.

**[철강A3-5 | 15:00]**

DRP 원료 환원 특성 평가: 박태준\*(한국지질자원연구원, 과학기술연합대학원대학교), 이동수, 김혁(현대제철)

**Keywords:** 직접환원철, MIDREX, 수소환원, 환원성

본 연구는 직접환원철 제조 공정의 안정적 조업을 위해 직접환원용 펠렛(DRP)의 환원성 평가 기준을 재검토하고 실제 조업에 적용 가능한 조건을 도출하는 것을 목적으로 수행되었다. 기존 ISO 기반 환원성 평가는 복합 환원 가스 환경과 이동층 반응기 내 펠렛 거동을 충분히 모사하지 못하는 한계가 있어, 본 연구에서는 상용 플랜트 운전 조건과 반응 영역 내 가스 유동 및 펠렛 하강 거동을 분석하여 실험 조건을 재설계하였다. 상용 DRP를 대상으로 화학 조성, 미세조직 및 환원 실험을 수행한 결과, 모든 시료는 다공성 hematite 조직을 보였으며 CO 환원 조건에서 펠렛 종류에 따른 환원성 차이가 뚜렷하게 나타났다. 반복 실험을 통해 장비의 재현성과 신뢰성을 검증하였다. 본 연구에서 제안한 환원성 평가 방법은 DRP 고유의 환원 특성을 정량적으로 구분할 수 있으며, 실제 조업 조건 변화에 대응 가능한 표준화된 품질 평가 지표로 활용될 수 있다. 이는 원료 선정 및 공정 최적화를 위한 기초 데이터베이스 구축에 기여하고, 향후 저탄소 직접환원 공정 개발을 위한 핵심 평가 기술로 활용될 것으로 기대 된다.

**[철강A3-6 | 15:15]**

Comparative Carbothermal Reduction of DRI with Steelmaking By-Products via Vertical Furnace & Microwave Heating:

Dahye Han, Seojin Lee, Il Sohn\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Steelmaking by-products, Direct reduced iron, Microwave, Recycling

In modern ironmaking and steelmaking, tens of millions of tonnes of Fe-bearing by-products such as dusts and sludges are generated annually. Recycling these secondary resources into direct reduced iron (DRI) maximizes metal recovery, reduces production costs, and advances circular economy objectives under a zero-waste framework. Microwave heating presents distinct advantages for the carbothermal reduction of carbon-bearing DRI, owing to the high microwave absorptivity of carbon and iron oxides. This internal heating is also expected to reduce the temperature gradient between the pellet core and surface, which may reduce early stage pellet disintegration caused by strain during phase transformation and thermal stress. Carbon composite pellets made from the same Fe-bearing steelmaking by-product were reduced using a vertical tube furnace and microwave heating and their results were compared. Metallization degree, pellet strength, and Zn removal, and morphology analysis were quantified using titration, universal testing machine (UTM), and inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES), and Scanning Electron Microscope(SEM). In microwave assisted reduction, the reduction temperature was measured using a K-type thermocouple that passed through the crucible. During microwave-assisted reduction, we confirmed that the pellet core temperature was higher than the surface temperature. The

microwave-assisted reduction achieved a similar metallization degree, but Zn removal and pellet strength were lower than those of the vertical tube furnace reduction. In this study, compared vertical tube from internal temperature measurements, microwave-assisted reduction showed the pellet core temperature was higher than the surface temperature. Although microwave-assisted internal heating was expected to reduce thermal shock related disintegration, the microwave reduction pellet strength was lower than that of the vertical tube furnace pellet. Morphology observations indicated that reduced Fe particles in the microwave pellet showed limited sintering and remained dispersed, which contributed to the lower pellet strength. Therefore, further study is needed to evaluate a hybrid process that combines the advantages of both methods. This hybrid process is expected to synergistically enhance metallization, mechanical strength, and Zn removal, thereby overcoming the limitations of each individual method.

#### [철강A4-1 | 15:35]

**Auto-SEM 활용한 Clean Steel DB 시스템 개발:** 채수관, 서성모, 송민호\*, 조승현(POSCO 기술연구원)

**Keywords:** Clean Steel, Auto-SEM, Inclusion Analysis, EDS, Data Base

철강 제조공정에서 용강의 청정도(Steel Cleanliness)는 제품의 기계적 성질, 내구성, 가공성에 직결되는 핵심 품질 지표로, 특히 고청정강은 자동차-조선-에너지-전자 등 고부가가치 산업에서 필수적으로 요구된다. 미세 개재물(Inclusion)의 정밀 제어는 고객 품질 요구를 만족시키기 위한 필수 조건이나, 기존의 성분 제어 및 불순물 제거 기술만으로는 청정도 향상에 한계가 나타나고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 당사에서는 Auto-SEM(자동 주사전자현미경) 장비를 도입하여, 제강-연주 공정에서 발생하는 개재물의 크기, 형태, 성분, 유형, 공간 분포를 정밀하게 분석하고 있다. 해당 장비는 개재물 분석 전용 소프트웨어와 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy) 모듈을 갖추고 있으며, 하루 최대 18개 시편 분석이 가능하다. 현재 Ladle Charge당 2개 시편(RH-소강 또는 LF-소강)을 분석하는 체계를 운영 중이며, 분석기 가동률은 140% 수준으로 고청정강 생산 현장에서 높은 활용도를 보이고 있다. 확보되는 용강 시편은 연속주조의 Cast 단위로 채취되며, 다양한 강종을 대상으로 청정도 Data Base를 구축하고 있다. 특히, Auto-SEM 분석 결과와 제강공정의 조업 정보를 통합한 DB를 구성함으로써, 개재물 특성과 발생 경향을 공정 조건과 연계하여 정량적으로 파악할 수 있다. 이를 기반으로 슬래그 조성 최적화, 조업 조건 개선, 원료·부원료 관리 강화 등 다양한 품질 개선활동을 추진할 수 있으며, 청정도 향상뿐만 아니라 생산 효율 개선과 불량률 저감에도 직접적으로 기여할 수 있다. 향후에는 본 DB를 확장·고도화하여 AI 기반 예측모델 개발 등 선제적 품질 관리 체계로 발전시킬 계획이나, 이번 발표에서는 DB 구축 과정과 이를 활용한 개선 가능성에 중점을 두어 소개한다. 본 시스템은 제강공정의 품질 안정성과 고청정강 생산 경쟁력 확보에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

#### [철강A4-2 | 15:50]

**Mechanism of Sulfur-Induced Changes in Nitrogen Absorption:** Heeju Kim, Il Sohn\*(Yonsei University)

**Keywords:** Direct Reduced Iron (DRI), Surface-active Effect of Sulfur, Nitrogen Absorption, Low-grade Iron Ore

As steelmaking routes shift toward hydrogen-based direct reduction followed by electric furnace melting, the use of low-grade iron ores containing elevated sulfur has become an important issue. Sulfur, a surface-active element, can significantly influence interfacial reactions such as nitrogen absorption, potentially affecting product quality. While the effect of sulfur on nitrogen absorption in molten iron has been widely studied, its influence at solid iron surfaces during direct reduction and subsequent handling remains poorly understood. In this study, the effect of sulfur originating from iron ore on nitrogen absorption was investigated under conditions relevant to hydrogen-based reduction and ammonia-containing atmospheres. Samples simulating chemically bound sulfur in iron ore were reduced under hydrogen, followed by exposure to nitrogen generated from ammonia dissociation. The distributions and chemical states of sulfur and nitrogen were analyzed using ONH, CS, XRD, and SEM. The results show that chemically bound sulfur in iron ore decomposes during reduction, migrates through the gas phase, and adsorbs onto the surface of reduced metallic iron. The resulting surface sulfur coverage modifies the interfacial conditions and influences nitrogen absorption behavior. These findings provide insight into the role of ore-derived sulfur during reduced iron production and its potential impact on downstream steelmaking operations.

#### [철강A4-3 | 16:05]

**2차연소 조건에서 MgO-C 내화재의 열화거동:** 김기원(한국공학대학교), 정지훈(한국공학대학교), 박찬근, 김민철, 정용석\*(한국공학대학교)

**Keywords:** 전로, 이차연소, MgO-C 내화물, 금속 산방제

2050년 탄소중립(Net-Zero) 달성을 위한 철강 산업의 대응 전략으로 스크랩 사용량 확대가 가속화되고 있다. 스크랩 비율이 증가된 상저취전로 조업에서는 용선의 현열 감소로 인해 추가적인 열원이 요구되며, 이를 보완하기 위한 방법으로 CO 가스의 2차연소( $\text{CO} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ )를 유도하여 발생하는 연소열을 활용하는 조업이 검토되고 있다. 1차연소( $[\text{C}] + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$ )는 2, 200 kcal/kg C의 열량을 발생시키는 반면, 2차연소는 더 많은 열량인 5, 630 kcal/kg C의 열량을 방출하여 열적 보완 효과가 크다. 기존 조업보다 2차연소율이 증가할 것으로 예상된다. 그러나 2차연소를 증가에 따른  $\text{CO}_2$  농도의 증가로 인해  $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$ 가 촉진되면서 MgO-C 내화재의 열화가 가속하는 잠재적 위험을 내포하고 있다. 특히 강화된 2차연소 조건에서의 내화물 열화 거동에 대한 체계적인 이해는 아직 충분하지 않은 실정이다. 본 연구에서는 2차연소 조건에서의 MgO-C 내화재 열화 거동과 산방제 효과를 관찰하여 이차연소 조건에서 내화물 열화 메커니즘을 체계적으로 이해하여 이차연소 조업에서 우수한 MgO-C 내화물을 제시하고자 한다.



**[철강A4-4 | 16:20]****제강-연주공정 연속 버블링 설비의 상태 모니터링 기술: 김성준\*(포스코)****Keywords:** 래들, 버블링, 설비, 계측, 진단

포스코에서는 제강공정부터 연속주조공정에 이르기까지 가스 공급을 중단 없이 연속적으로 버블링함으로써 개재물 품질 수준을 향상시킬 수 있는 ATOM(Argon Tank for plug Opening and Maintenance) 설비 및 기술을 개발하여 왔다. 그러나 기계적 메커니즘으로 동작하는 ATOM설비의 특성상 Ch별 정상 작동 여부를 실시간으로 확인하기 어려웠으며, 고장 진단이나 예방을 위한 체계적인 방법이 부재하였다. 이에 본 연구에서는 ATOM 설비의 상태를 계측할 수 있는 방법과 장치를 개발하여 설비 고장 진단 및 예방이 가능하도록 하였다. ATOM설비의 적용으로 용강 개재물 품질 향상과 설비 신뢰성 제고에 기여할 수 있음을 확인하였으며, 이를 통해, ATOM설비의 설계, 계측, 진단 기술 기술을 통합한 Full Package기술이 완성되었다.

**[철강A4-5 | 16:35]****Computational and Experimental Investigation of Two-phase Gas-liquid Flows in Ladle Shroud on Tundish Hydrodynamic Performance During Continuous Casting: Subham Ranjan\*, Joonho Lee\*(Korea University)****Keywords:** clean steel, gas aspiration, residence time distribution, gas-liquid flows, water modelling

In the present study, gas aspiration through the ladle shroud during teeming of steel from ladle to tundish has been systematically investigated using both mathematical and physical modeling approaches. A Volume of Fluid (VOF)-based two-phase turbulent flow model, coupled with the standard k- $\epsilon$  turbulence model, was implemented in ANSYS Fluent to simulate the gas-liquid flow behavior. The computational study was conducted on a full-scale two-strand bloom casting tundish geometry to ensure industrial relevance. To validate the numerical predictions, full-scale water modeling experiments were carried out. Both flow field characteristics and residence time distribution (RTD) measurements were obtained using well-established experimental techniques. The computational results showed good agreement with the measured data, confirming the predictive capability of the numerical model. The combined numerical and experimental analyses reveal that gas aspiration significantly modifies the hydrodynamics in the vicinity of the shroud entry region. Buoyancy of the entrained gas causes premature upward redirection of the incoming liquid jet toward the free surface, thereby reducing jet penetration depth. This early jet reversal intensifies surface velocities and turbulence levels, leading to an increase in well-mixed flow volume at the expense of plug flow volume. Most importantly, however, due to the premature redirection, the liquid jet from the shroud does not interact with the pouring box. Under such conditions, a pouring box's shape and specific design are expected to exert very little influence on tundish hydrodynamics in the presence of aspiration in shroud. The present study appears to indicate that with aspiration rate ratio,  $Q_g/Q_L = 0.2$ , a pouring box starts to lose its relevance, and with aspiration rate ratio,  $Q_g/Q_L = 0.5$  or greater, a pouring box and its design can be completely redundant in a ladle shroud-tundish system. Finally, the study demonstrates that the application of weirs can significantly reduce the intensity of surface flow and turbulence caused by gas aspiration, thereby promoting the plug flow conditions required for the floatation of non-metallic inclusions in the tundish.

**[철강A5-1 | 16:55]****철스크랩 고급화 기술 국내외 현황 및 향후 기술 과제: 황성두, 강동훈\*, 이창호\*(현대제철 기술연구소), 김대성\*, 차지훈\*(현대제철)****Keywords:** 재활용, 저탄소 원료, 스크랩, 선별 기술, 자력 선별, 중성자 분석

철강 산업은 2050 탄소중립 실현을 위해 고로 중심의 전통적 생산 구조에서 수소환원제철과 전기로 기반의 저탄소 공정으로 빠르게 전환하고 있다. 이러한 변화 속에서 철스크랩은 탄소배출을 즉각적으로 감축할 수 있는 핵심 원료로 부상하였으나, 고급(A급) 스크랩의 글로벌 수급 부족과 품질 편차가 산업적 제약으로 대두되고 있다. 특히 스크랩 내 Cu, Sn, Ni 등 트랩스 원소는 고급 강판 생산 품질을 저해하는 주요 요인으로, 이를 정밀하게 제어하기 위한 기술 개발 필요성이 증대되고 있다. 본 연구에서는 유럽 HMS1-2, E1, E40 등 스크랩 등급의 화학조성 분석과 선별·정제 실증을 통해 스크랩 고급화 가능성을 평가하였다. 자력선별, 수선별, XRT(X-ray Transmission), LIBS(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy), AI 기반 비전 인식 등 다양한 센서 기술을 적용한 결과, 육안 식별 가능한 Cu류(전선·미트볼·모터)의 집중 제거 시 Cu 함량을 0.1%대까지 낮출 수 있음을 확인하였다. 이는 기존 규격을 초과하는 스크랩도 고급 강재 생산용 원료로 전환할 수 있음을 시사한다. 또한 현대제철은 스크랩 성분 자동 분석, 배합 시뮬레이터, 전기로 장입 제어 등 공정 디지털화 기술을 개발하여 폐차·폐가전 기반 저품질 스크랩까지 활용 가능한 체계를 구축 중이다. 본 연구는 스크랩 고급화 기술이 탄소중립 시대 경쟁력 확보의 핵심 요소임을 제시하며, 향후 산·학·연·정의 기술 협력이 필수적임을 강조한다.

**[철강A5-2 | 17:10]****중성자 분석을 활용한 국내 철스크랩 선별 공정 최적화 및 품질 평가 기술 개발: 이창호, 강동훈\*, 황성두\*(현대제철 기술연구소), 이동은\*, 차지훈\*, 김대성\*(현대제철)****Keywords:** 철 스크랩, 선별, 트랩스 원소, 중성자

탄소저감 정책으로 인해 전기로 기반 공정의 비중이 증가함에 따라, 고급 판재 생산을 위해서는 공정 효율 향상뿐 아니라 원료인 철스크랩 자체의 품질 고도화가 필수적이다. 특히 전기로 공정의 경우 스크랩 내 비철 금속 및 이물질의 잔존이 제품 품질에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 안정적인 조업을 위해서는 고품질 스크랩의 확보 및 선별 기술의 정교화가 요구된다. 그러나 국내에서는 스크랩 특성에 최적화된 자체 품질 고도화 선별 기술 개발이 미비하여 주로 해외 장비 및 기술을 도입해 활용하고 있는 실정이다.

다. 문제는 국내 스크랩의 발생 구조, 조성, 오염, 형태가 해외와 상이하다는 점이며, 이로 인해 해외 기술을 그대로 적용할 경우 기대한 수준의 적정 품질 및 선별 효율을 확보하기 어렵다는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 국내 스크랩 특성에 맞는 선별 조건을 확립하기 위해 중성자 분석기를 활용해 스크랩 성분 및 불순물 분포를 정밀 진단하고, 이를 기반으로 드럼선별기 및 비철선별기의 조건을 체계적으로 최적화하였다. 중성자 분석 결과를 통해 스크랩 내 트랩트 원소의 실제 분포와 제거 수준을 파악했으며, 드럼 선별 조건 조정 및 비철 선별기의 분리 효율 개선을 통해 고품질 스크랩 확보가 가능함을 검증하였다. 본 연구는 국내 스크랩 특성에 부합하는 선별 공정 최적화의 사례를 제시하며, 향후 전기로 기반 고급 강재 생산을 위한 원료 기술 확보의 방향성을 제안한다.

#### [철강A5-3 | 17:25]

**이중 입경-다상유동모델 기반 상온유동층 모사 및 입도 효과 분석:** 심순현, 진봉민, 양현진\*(인하대학교)

**Keywords:** 유동층, 분광, 대표 입경, 분리(segregation), 비산(dust loss)

수소 기반 유동환원로는 철강 산업의 탈탄소화를 위한 하나의 대안으로 주목받고 있다. 실제 조업에서는 스티킹, 비산, 체류시간 불균일과 같은 현상이 발생할 수 있으며, 이는 운전 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 현상들은 유동층 공정의 특징인 넓은 입도 분포와 밀접하게 연관되어 있으므로, 입도 효과를 적절히 반영할 수 있는 수학적 모델의 개발이 중요하다. 본 연구에서는 단일 대표 입경을 사용한 기존 연구들과는 달리, 두 개의 대표 입경을 고려한 오일러리안 모델 기반 이중 입경-다상유동모델을 개발하고, 상온 유동화 거동을 정량적으로 분석하였다. 개발된 모델은 차압 및 축방향 고체분율에 대한 실험 결과와의 비교를 통해 검증되었다. 계산 결과, 이중 입경-다상유동모델은 기존 단일 입경 모델에 비해 축방향 고체분율의 평균제곱근오차를 56% 감소시키고, 차압 예측 정확도를 약 7% 향상시켜 전반적으로 개선된 예측 성능을 보였다. 또한 평균 피크 차이 분석 결과, 실험에서 관찰된 진폭 특성을 단일 입경 모델 대비 67% 더 정밀하게 재현하는 것으로 나타났다. 이러한 정량적 정확도 향상과 함께, 이중 입경-다상유동모델은 입도 차이에 따른 유동화 특성 또한 효과적으로 포착하였다. 특히 단일 입경 모델에서는 확인하기 어려웠던 입자 분리 및 비산 현상이 명확히 관찰되었으며, 이를 바탕으로 미립자와 조립자의 상이한 거동이 국부적인 유동 영역 분리와 차압 신호 변동에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구는 복잡한 유동층 시스템에서 입도 효과를 정량적으로 평가할 수 있는 수학적 모델링의 기반을 제시하며, 향후 화학 반응을 포함하는 경우 체류시간 영향 및 환원도 거동 차이를 분석하는 데 활용 가능한 기초적인 틀을 제공할 것으로 예상된다.

#### [철강A5-4 | 17:40]

**스테인리스 AOD 정련 자동화 기술 개발:** 정은주\*, 한승민, 정태인(포스코)

**Keywords:** 스테인리스, 제강, 정련로, 자동화, One-Touch 취련

STS 제강 설비 중 AOD(Argon Oxygen Decarburization) 정련 공정은 탈탄, 환원, 탈황을 One-Station에서 처리하는 고난도 공정으로, 작업자의 숙련도와 경험에 따라 품질 편차가 발생하는 특성을 가지고 있다. 이러한 편차는 생산 효율 저하와 경쟁력 약화로 이어졌으며, 특히 숙련 인력의 감소와 세대 교체가 진행되는 상황에서 인적 요인에 의한 변동을 최소화하고 안정적인 품질을 확보하는 것이 시급한 과제로 부상하였다. 이에 따라 AOD 취련 자동화 기술 개발이 필수적으로 요구되었다. 이번 개발에서는 다수의 수동 취련 시스템을 통합하고, Dynamic 제어 기반의 One-Touch 취련 시스템을 구현하여 조업 자동화를 완성하였다. 기존에는 작업자의 경험과 감각에 의존하던 탈탄 효율, 승온계수, 원료 실수율 등의 암묵지를 분석하여 로직화하고, 이를 자동취련 시스템에 반영함으로써 개별 노하우를 공유할 수 있는 기반을 마련하였다. 그 결과, 작업자의 시스템 적용률이 크게 향상되었으며, 현장 전반에 걸쳐 표준화된 조업이 가능해졌다. 포스코 STS2제강공장에서는 2018년부터 2021년까지 자동화 관련 인프라를 구축하고, 실시간 탈탄 속도 및 탄소 농도 예측 모델을 개발하여 단계별 중점 판정 기준을 마련하였다. 이후 2022년부터 2024년까지 통합 자동취련 시스템을 개발하여 다수의 수동 제어 화면을 하나로 통합하는 자체 시스템을 구현하였고, 배가스 정보를 활용한 Dynamic control을 통해 C농도 제어하였다. 이를 기반으로 취련 전체를 제어하는 시스템을 완성하였으며, 현재 전강종 대상 자동취련 적용률을 95% 수준으로 안정적으로 유지하고 있다. 포스코 STS3제강공장에서는 STS2제강에서 개발한 자동취련 기술을 확대 적용하고, AI 기반 유사 조업 검색 기능 모델을 개발하여 작업 편차를 저감하였다. 이러한 기술 개발의 성과로 조업 편차가 크게 줄어들었고, 부원료 원단위 절감 효과를 기대할 수 있다. 이후 AOD 공정을 대상으로 한 조업 Assistant를 개발·적용함으로써, AI 기반의 조업 지원 체계를 완성하고 스마트 제조 환경을 한층 고도화할 예정이다.

#### [철강A5-5 | 17:55]

**전기용융로 내 슬래그/용선 계면에서의 SiO<sub>2</sub> 환원 및 Si pick up 반응의 속도론 및 반응 메커니즘에 관한 연구:** 박성환, 박주현\*(한양대학교)

**Keywords:** 수소환원제철, 전기용융로, SiO<sub>2</sub> 환원, Si pick up

수소환원제철 공정은 이산화탄소 배출 저감을 위한 차세대 친환경 제철 기술로 주목받고 있다. 본 공정에서는 수소로 환원된 직접 환원철(H<sub>2</sub>-DRI)을 전기용융로(Electric Smelting Furnace, ESF)에서 전기에너지를 이용해 용융함으로써 용선을 생산한다. 기존 고로 공정에서는 용선 내 Si 함량이 용선 품질과 조업 상태를 평가하는 핵심 지표로 활용되어 왔으며, ESF 공정에서도 동일한 지표로 활용 가능성이 있다. 그러나 ESF는 고로와 구조적 특성이 상이하므로 Si transfer 또한 다른 메커니즘을 따를 것으로 예상된다. 본 연구에서는 ESF 조건에서 슬래그로부터 용선으로의 Si transfer가 슬래그/용선 계면에서의 SiO<sub>2</sub> 환원에 따른 SiO 가스 생성 반응과, 생성된 SiO 가스가 용선 내 탄소와 반응하는 Si pick up 반응의 연속 과정으로 진행됨을 확인하였다. 온도, 초기 슬래그 염기도, 용선 내 황 함량이 각 반응 속도에 미치는 영향을 평가하였다. SiO<sub>2</sub> 환원 반응은 특정 온도 범위에서 최대 속도를 나타냈으며, 초기 슬래그 염기도가 낮을수록 환원 속도가 증가하였다. 또한 해당 반응 속도는 슬래그/용선 계면 기체층의 안정성에 의해 결정되며, 기체층이 불안정할수록 환원 속도가 증가하였다. Si pick up 반응 속도는 온도가 증가하거나 초기 염기도 감소함에 따라 증가하였고,

이 반응의 활성화 에너지는 238.3 kJ/mol로 계산되었다. 용선 내 황 함량 증가 시 SiO<sub>2</sub> 환원 속도는 감소 후 증가하는 거동을 보였으며, Si pick up 속도 역시 일정 구간 이후 증가하는 경향을 나타냈다. 본 연구를 통해 ESF 공정 중 슬래그/용선 계면에서 발생하는 SiO<sub>2</sub> 환원과 Si pick up 반응 속도에 영향을 미치는 요소를 확인하였으며 이는 ESF 공정 운영에 대한 체계적인 이해를 제공할 것으로 기대된다.

#### [철강A5-6 | 18:10]

**용강 내 산소 저취 마그카본 퍼징 플러그의 열화 거동:** 명재우, 김기원, 박찬근, 정용석\*(한국공학대 학교)

**Keywords:** 순산소 저취, 마그카본 열화, (Mg, Fe)O 반응층, 용강 탈탄

본 연구에서는 고주파 유도로를 활용하여 1550°C, 20분 동안 용강(초기 탄소 함량(0.5, 1, 2, 4%))에 침지된 마그카본 내화물을 통한 산소 주입 시 내화물의 열화 거동을 연구하였다. X-ray CT 분석 결과, 가스/내화물 계면과 용강/내화물 계면에서 서로 다른 열화 경향이 관찰되었다. 마그카본은 가스/내화물 계면에서 용강/내화물 계면보다 더 심하게 열화되었다. 가스/내화물 계면의 경우 모든 시편에서 반응층이 형성되었지만, 용강/내화물 계면의 경우 초기 탄소 함량이 0.5%인 용강에서만 반응층이 형성되었다. FE-SEM/EDS 분석 결과를 통해 두 계면에서 형성된 반응층은 (Mg, Fe)O 고용체로 확인되었다. 해당 반응층은 가스/내화물 계면에서  $\text{Fe(s, l)} + 1/2\text{O}_2(\text{g}) + \text{MgO(s)} = (\text{Mg, Fe})\text{O(ss)}$  반응과 용강/내화물 계면에서  $\text{Fe(l)} + \text{O} + \text{MgO(s)} = (\text{Mg, Fe})\text{O(ss)}$  반응을 통해 형성될 수 있다. 한편, 용강 내 탄소 함량은 약 0.09%C까지 선형적으로 감소 후, 약 0.03%C까지 비선형적으로 서서히 감소하였다. (Mg, Fe)O(ss) 반응층은 실험 시작 후 약 15분경(0.04%C, 0.17%O)에 형성된 것으로 추정된다.

## 마그네슘

Room 4층 402A, 4월 28일

### [마그네슘 1-1 | 14:00] 조정강연

**싱크로트론 X-선 회절을 이용한 마그네슘 합금의 변형기구 해석:** 이상봉\*(국립금오공과대학교), 김영민(한국재료연구원), Gaoming Zhu(Helmholtz-Zentrum Hereon), Ulrich Lienert(Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)), Dietmar Letzig(Helmholtz-Zentrum Hereon)

**Keywords:** 마그네슘 합금, 실시간 회절, 3DXRD, 전위, 변형거동

마그네슘 합금 판재의 성능최적화를 위해선 조성-미세조직-공정간 상관관계에 대한 연구와 이를 바탕으로 한 변형기구 구동에 대한 이해가 필수적이다. 상온 성형성의 극대화를 이루는 방법으로 특정 합금원소를 첨가하여 집합조직 약화와 함께 결정립의 기지면이 판재면에 대해 심하게 기울어지게 하는 방법이 널리 이용되고 있다. 이러한 집합조직의 정량-정성적변화는 Ca 또는 희토류 금속을 Zn와 함께 합금원소로 첨가함으로써 얻어지지만, 이 때 Zn대신 Al을 첨가하면 집합조직 약화로 인한 성형성 향상효과는 사라진다. 이는 Ca 및 희토류원소가 Al원소와 높은 친화성을 가짐으로써 고용원소로 존재하는 양이 감소하는 것과 더불어, Zn를 Al로 대체함으로써 변형 시 구동되는 주변형기구의 변화에 따른 것이다. 본 발표에서는 합금원소별 마그네슘 합금의 변형기구에 대한 기존의 실시간 회절분석연구 및 3D-XRD 등 최근연구 결과에 대하여 알아본다. 특히 Al과 Zn용질원소에 따른 변형기구 변화에 대한 실시간 회절실험 연구내용에 대하여 중점적으로 소개한다. 평균결정립도 100 $\mu\text{m}$ 로 미세조직을 조절한 Mg-1Al (wt.%), Mg-1Zn, Mg-1Al-1Zn 합금판재에 변형을 가하며 고에너지 X-선을 이용해 실시간 3D-XRD 실험을 수행하고, basal <a>와 prismatic <a> 전위슬립 구동에 대한 정량적 분석을 통하여 전위슬립에 미치는 용질원소의 영향을 평가하였다. 실시간 3D-XRD 분석을 통하여 Zn첨가는 prismatic <a> 전위구동을 크게 증가시키며 이는 임계분해전단응력의 감소로 인한 것임을 알 수 있고, Al첨가는 고용강화를 유발함을 확인하였다. Zn와 Al을 동시에 첨가한 ZA11합금의 경우 가장 높은 prismatic <a> 슬립의 구동을 보이며, prismatic <a>과 basal <a> 슬립에 대한 분해전단응력의 비( $RSS_{\text{prismatic}}/RSS_{\text{basal}}$ )도 본 연구에서 이용한 3가지 합금 중 가장 작은 값을 나타낸다. 본 연구는 신소재 연구소(NRF-2018R1A6A1A03025761)의 지원을 받아 수행되었음.

### [마그네슘 1-2 | 14:25]

**냉간 압연된 마그네슘 이상 합금의 변형과 집합조직 변화 나노압입시험 및 유한요소 연계 분석:** 서원걸, 고경민, 이승철, Khushahal Thool, 최시훈\*(국립순천대학교)

**Keywords:** LZ91, 냉간 압연, 미세조직, 나노압입시험, 시뮬레이션

마그네슘 합금은 초경량 구조재료로서 구조용 금속 중 가장 낮은 밀도를 가지며 높은 비강도를 나타내어 전자기기 및 자동차 부품 등에 적용되고 있다. LZ91 합금은 마그네슘에 저밀도 리튬을 첨가함으로써 우수한 냉간 가공성을 나타내며, 특히 80% 이상의 높은 압하율에서도 균열 없이 변형이 가능하다는 특징을 가진다. 이러한 거동은 Mg-rich  $\alpha$ (hcp) 상과 Li-rich  $\beta$ (bcc) 상으로 구성된 이중상 조직과 Li 첨가에 따른 결정학적·전위론적 변화와 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서는 냉간 압연 시 변형을 단계별 미세조직 및 집합조직 변화를 체계적으로 분석하기 위해, 초기 미세조직을 SEM 및 EBSD로 관찰하고 RD 및 TD 방향 압축시험을 수행하였다. 이후 20, 40, 60 및 80% 압하율 조건에서 미세조직 변화를 SEM으로 분석하였으며, XRD 및 EBSD를 이용하여  $\alpha/\beta$  상의 집합조직 변화를 정량적으로 평가하였다. 각 상의 기계적 물성을 확보하기 위해 나노압입시험을 수행하고 역해석 알고리즘을 적용하여 상별 응력-변형을 곡선을 도출하였다. 이를 기반으로 유한요소해석을 수행하여 압하율 증가에 따른 상 간 변형 분배 거동을 비교·분석하였다. 향후 연구에서는 Rietveld refinement 기반 고분해능 XRD 및 neutron diffraction을 병행하여  $\alpha$ 상의 격자상수 및 c/a ratio 변화를 정밀하게 규명하고,  $\alpha/\beta$  상의 기여를 신뢰성 있게 분리·정량화할 예정이다. 또한, density functional theory(DFT) 계산을 통해 Li 첨가에 따른 c/a ratio 변화가 기저(basal) 및 비저면(non-basal) 슬립계의 에너지 장벽과 전위 이동 특성에 미치는 영향을 정량적으로 평가함으로써, 실험적으로 관찰된 우수한 냉간 가공성과의 상관관계를 원자 수준에서 해석하고자 한다.

### [마그네슘 1-3 | 14:40]

**Mg-9 wt%Ag 합금의 고온 평면변형 압축 중 초기 집합조직에 따른 재결정 및 미세조직 발달에 미친 영향:** 윤지민(국립부경대학교), 김기범(The University of Tokyo), 김권후\*(국립부경대학교)

**Keywords:** 마그네슘, Mg-Ag 단상, 생체용 금속재료, 집합조직, 미세조직

마그네슘 및 그 합금은 우수한 비강도, 생체적합성, 진동 감쇠능 등의 특성으로 인해 경량 구조재 및 생체용 금속 소재로 지속적 인 관심을 받아왔다. 그러나 육방정(HCP) 결정구조의 특성상 상온에서 활성화 가능한 슬립계의 수가 제한되어 있어, 가공 시 파단 및 균열이 쉽게 발생하는 한계를 가진다. 이러한 문제를 극복하기 위해 고온 압연 및 압출과 같은 공정이 적용되어 왔으나, 고온 변형 과정에서 강한 (0001) 저면 집합조직이 형성되며 소성 이방성이 심화되는 또 다른 문제가 발생하였다. 이를 해결하기 위해 고온 가공 조건 제어 및 희토류 원소를 포함한 다양한 합금 원소 첨가를 통해 변형 메커니즘을 규명하고 집합조직 발달을 억제하려는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그러나 생체용 Mg 합금의 경우, 첨가 원소의 생체 안전성 또한 중요한 고려 요소이다. 일부 Al, Zn, Mn, Y 과 같은 원소는 체내 축적 시 신경계 또는 간 기능에 부정적 영향을 미칠 가능성이 보고된 바 있다. 이에 반해 Ag는 우수한 생체적합성을 가지며 항균 특성까지 기대할 수 있는 합금 원소로 주목받고 있다. 다만, Mg-Ag 이원계 합금의 단상 영역에

서 Ag 첨가가 집합조직 및 미세조직 진화에 미치는 영향에 대해서는 아직 명확히 규명되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 Mg-Ag 합금의 기초 거동을 이해하기 위하여 단상 영역의 Mg-9wt%Ag 합금을 대상으로 초기 집합조직에 따른 고온 변형 거동을 분석하였다. 합금은 주조 후 673 K에서 25% 압하율로 열간 압연을 수행하였으며, 압연 방향과 시편 축의 관계에 따라 ND, TD, RD를 기준으로 A, B, C 세 가지 타입으로 시편을 절단하였다. 이후 773 K에서 1시간 균질화 열처리를 실시하고, 723 K, 변형률 속도  $0.05 \text{ s}^{-1}$  조건에서 진변형률 -1.0까지 평면변형 압축 시험을 수행하였다. 응력-변형률 곡선 분석 결과, 각 타입은 변형 초기 급격한 가공경화 후 최대 응력에 도달한 뒤 연화 거동을 나타냈다. 그러나 B 타입에서는 뚜렷한 최대 응력 및 이후의 가공연화 거동이 관찰되지 않아 상이한 변형 메커니즘이 작용함을 시사하였다. 미세조직 분석 결과, 변형률 증가에 따라 전반적으로 재결정에 의해 평균 결정립 크기가 감소하는 경향을 보였다. 반면 B 타입은 진변형률 -0.7 구간에서 일부 변형 결정립의 잔존에 따라 비교적 조대한 결정립이 관찰되어 다른 타입과 차별화된 거동을 나타냈다. 이러한 결과는 Ag 첨가 조건 하에서 초기 집합조직에 따라 우선 활성 슬립계와 동적 재결정 거동이 달라지며, 이에 따라 집합조직 및 미세조직 발달 거동이 상이하게 진행되었기 때문으로 판단된다. 본 연구는 Mg-Ag 합금에서 초기 집합조직 설계가 고온 변형 중 재결정 및 슬립 거동을 제어에 영향을 줄 수 있는 인자임을 제시하며, 향후 마그네슘 합금의 가공성 향상을 위한 집합조직 제어 전략 수립에 기초 자료를 제공한다.

#### [마그네슘1-4 | 14:55]

Interfacial Characteristics and Mechanical Properties of Mg-Core and Al-Sleeve Clad Rods Fabricated by Compound Casting and Extrusion: Seoung-youn Yu, Gun Woong An, Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National University)

**Keywords:** Mg/Al clad rods, Compound casting, Interface reactions, Intermetallic compounds, Mechanical properties

Mg/Al hybrid clad materials are promising for lightweight structural applications because they combine the high specific strength of Mg with the excellent corrosion resistance of Al. Achieving a sound and reliable Mg/Al interface is critical for practical applications. Although co-extrusion of a Mg core within an Al sleeve is widely used, severe interfacial contact during extrusion can induce excessive frictional heating and non-uniform temperature fields, increasing the susceptibility to interfacial cracking and bonding degradation. To overcome these limitations, this study employs compound casting as a pre-bonding strategy to stabilize the Mg/Al interface prior to extrusion. An alloy-design approach using a Mg-5Bi-3Al (BA53) core is proposed to suppress excessive interfacial reactions against a fixed AA6063 Al sleeve, while a conventional Mg-8Al-0.5Zn (AZ80) alloy is used as a reference core for comparison. The compound-cast billets are subsequently extruded into Mg/Al clad rods. The interfacial characteristics and mechanical properties of the extruded clad rods are systematically evaluated with emphasis on intermetallic compound layer morphology and thickness, elemental diffusion behavior, defect formation, and interfacial integrity, using microstructural and compositional analyses, microhardness mapping, and mechanical tests sensitive to bonding strength.

#### [마그네슘2-1 | 15:20]

급속 냉각 공정이 생분해성 마그네슘 미세튜브의 기계적 특성 및 생분해 거동에 미치는 영향: 김재성(한국재료연구원), 황건호(한국재료연구원, 고려대학교), 김하식, 이상은, 김재연, 임창동, 서병찬, 서종식\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 생분해성 마그네슘 합금, 미세튜브, 급속 냉각, 기계적 물성, 생분해 거동

혈관질환 치료용 스텐트는 현재 Co-Cr 합금이나 니티놀(Nitinol)과 같은 영구 잔존형 소재로 제작되어 혈전증, 재협착, 염증 등의 부작용과 2차 제거 수술의 한계가 있다. 이에 대한 대안으로 생분해성 스텐트가 제안되고 있으며, 마그네슘은 우수한 생체적합성과 생분해 특성으로 유망한 후보 소재로 평가된다. 그러나 마그네슘 합금은 낮은 기계적 강도와 빠른 분해 속도로 인해 임상 적용에 제약이 있다. 본 연구에서는 2단 직접 압출 공정을 통해 생체분해성 스텐트용 2 mm급 마그네슘 미세튜브를 제조하고, 압출 시 Ar 가스를 이용한 급속 냉각 공정을 적용하여 급속 냉각 유무에 따른 미세조직, 집합조직, 기계적 특성 및 생분해 거동의 변화를 비교·분석했다. 그 결과, 급속 냉각은 결정립 미세화를 통해 기계적 강도를 향상시키는 동시에 생분해 거동도 일부 가속화시키는 것으로 확인되었다.

#### [마그네슘2-2 | 15:35]

Mg 합금 부식속도 예측을 위한 기계학습 회귀 알고리즘 비교 연구: 원윤철, 임창동\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 마그네슘 합금, 부식속도 예측, 기계학습, 알고리즘 벤치마킹

본 연구에서는 Mg 합금의 조성-공정-부식속도 데이터베이스를 기반으로, 부식속도 예측을 위한 기계학습 회귀 알고리즘의 성능을 체계적으로 비교·평가하였다. 데이터베이스는 합금원소 9개와 공정 변수 6개로 구성되며, 피쳐 엔지니어링과 전처리를 통해 학습용 데이터셋으로 재구조화하였다. 도메인 지식 기반 상호작용 피쳐와 데이터 기반 상호작용 피쳐의 기여도를 비교하여 최종 피쳐 구성을 확정하였고, 타깃 변수의 비대칭 분포를 고려해 log 변환을 적용하였다. 또한 증화 무작위 추출로 훈련/테스트 데이터를 분할하고, 연속형 변수는 표준화(standardization)하였으며 이진 변수는 원형을 유지하였다. 비교 알고리즘은 트리 앙상블(ExtraTrees), 그래디언트 부스팅(CatBoost), 커널 기반(SVR-RBF), 선형 회귀(HuberRegressor)로 구성하였고, 각 모델은 베이지안 최적화와 교차검증을 통해 하이퍼파라미터를 최적화한 뒤 동일 테스트셋에서 성능을 평가하였다. 모델 성능 지표로는 실험으로 측정된 부식속도와 모델 예측 부식속도 간 절대오차의 평균인 평균절대오차(Mean Absolute Error, MAE; mm/y)를 사용하였다. 그 결과, MAE는 ExtraTrees가 0.238 mm/y로 가장 우수하였고, CatBoost는 0.287 mm/y로 준수한 성능을 보였다. 반면 SVR과 HuberRegressor는 각각 0.435 mm/y, 0.462 mm/y로 상대적으로 오차가 커 일반화 성능이 제한적이었다. 본 비교 결과는 Mg 합금 부식속도 데이터에서 트리 기반 앙상블이 조성-공정 변수의 비선형 상호작용을 효과적으로 포착하며, 노이즈가 큰 데이터에 대해서도 상대적으로 안정적인

예측을 제공함을 시사한다. 본 연구에서 제시한 비교·평가 프로토콜과 성능 비교 결과는 향후 고내식 Mg 합금의 설계 및 실험 검증으로의 확장 연구에 기초 자료로 활용될 수 있다.

### [마그네슘2-3 | 15:50]

Core-shell 입자 설계를 통한 마그네슘 합금 내식성 향상: 김정기, 민두원, 권재호, 박성수\*(울산과학기술원)

**Keywords:** 마그네슘, 고내식, 미량 합금화, 코어-셸 구조

마그네슘(Mg) 합금은 구조재로 사용 가능한 금속 중 가장 낮은 밀도( $1.74 \text{ g cm}^{-3}$ , 알루미늄 대비 약 2/3 수준)를 가지며, 이에 따라 친환경 모빌리티 및 항공·우주 분야의 경량 구조재로서 매우 유망한 소재로 평가되고 있다. 그러나, 마그네슘은 수분과 염분을 포함한 환경에서 빠르게 부식되고 이러한 열악한 내식성은 실제 부품 적용을 제한하는 가장 큰 요인으로 작용한다. 특히, 마그네슘 기지와 입자 간 전위 차이에 의해 발생하는 미소 갈바닉 부식(microgalvanic corrosion)이 내식성 저하의 주요 원인으로 알려져 있는데, 예를 들어 알루미늄을 포함한 마그네슘 합금에서는 Al-Fe계 입자가 마그네슘 기지와 큰 전위 차를 형성하여 국부 부식을 가속화한다. 본 연구에서는 부식 촉진 입자를 core-shell 구조로 재설계함으로써 알루미늄을 포함한 마그네슘 합금의 내식성을 효과적으로 향상시킨 사례를 보고하고자 한다. 구체적으로, 0.05 wt.% 수준의 Sc 미량 첨가를 통해 기지와 입자 간의 전위 차이가 큰 입자를 중심부에 국한시키고, 상대적으로 전위 차이가 낮은 입자를 외곽에 형성함으로써 미소 갈바닉 부식의 구동력을 현저히 완화하였다. 그 결과, 0.6 M NaCl 용액에서 72시간 침지 후 무게 감소량으로 평가한 부식 속도는 기존 Mg-3 wt.% Al 합금의 경우  $22.2 \text{ mm y}^{-1}$ 로 나타난 반면 Sc가 미량 첨가된 Mg-3 wt.% Al 합금의 경우  $0.38 \text{ mm y}^{-1}$ 로 감소하여, 기존 합금 대비 약 60배 수준의 내식성 향상이 확인되었다. 합금 성분 변화에 따른 미세조직 차이와 부식 거동 간의 상관관계를 분석함으로써, core-shell 구조 입자가 미소 갈바닉 부식을 완화하는 메커니즘에 대해 고찰하고자 한다.

### [마그네슘2-4 | 16:05]

기지 합금이 Mg-SiC 복합재의 부식 특성에 미치는 영향: 강동현(한국재료연구원, 경북대학교), 김영민, 문영훈(한국재료연구원), 박성혁(경북대학교), 김재연\*, 배준호\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 마그네슘, 복합재료, 부식

마그네슘은 낮은 밀도와 높은 비강도로 대표적인 경량 구조재이며 수송기기 및 전자제품 등에 적용되고 있다. 그러나 마그네슘 소재의 낮은 강성과 알루미늄 대비 상대적으로 낮은 열전도 특성은 마그네슘 소재의 폭넓은 사용을 제한하고 있다. 이러한 소재의 한계를 극복하기 위해 낮은 밀도와 높은 강성을 가진 강화재를 첨가한 마그네슘 기지 복합소재가 연구되어 왔다. 하지만 이러한 마그네슘 기지 복합소재는 강화재와 기지와의 전위차로 인한 미세 갈바닉 부식이 매우 심각하게 발생할 가능성이 높아 내식성을 확보하기 위한 연구가 필수적이다. 이에 관하여 상용 Mg 기지 SiC 복합재의 부식 거동 연구는 다수 보고되었으나, 부식 특성에 미치는 기지 합금 조성에 관한 체계적인 연구는 미흡한 실정이다. 이를 위해 본 연구는 기지 합금 조성이 Mg-SiC 복합소재의 내식성에 미치는 영향을 규명하고자, 높은 전기화학적 포텐셜과 큰 고용 한계를 갖는 Al, Zn, Sn을 합금 원소로 선정하여 Mg-Al, Mg-Zn, Mg-Sn 이원계 합금을 기지로 적용하였다. 상기 이원계 합금에 SiC를 첨가한 복합재를 교반 주조법으로 제조하고, 각 합금에 대한 부식 특성을 수소 발생 시험, 개방회로 전위(OCP), 동전위 분극, 전기화학 임피던스 분광법(EIS)으로 평가하였다.

### [마그네슘2-5 | 16:20]

Effect of  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> morphology and composition on corrosion behavior of AZ-based cast alloys: Hongxiu Liu(한국재료연구원, 창원대학교), Bae Jun-ho, Moon Young-Hoon, Lee Sang-eun, Kim Jae-yeon\*, You Bong-sun\*(한국재료연구원)

**Keywords:** Magnesium, AZXW alloy, Corrosion,  $\beta$  phase

In AZ-based cast alloys, the morphology and chemical composition of  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> play a crucial role in determining corrosion behavior. In particular, isolated  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> accelerates corrosion rate by acting as a galvanic cathode, whereas interconnected  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> reduces corrosion rate by acting as a physical barrier that impedes corrosion propagation. Although numerous studies have addressed this issue, quantitative criteria defining the mechanistic role of  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> in corrosion have not yet been established. This study investigated quantitatively the effect of  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> morphology and composition on corrosion behavior of AZ-based cast alloys. Various specimens were fabricated by systematically controlling Al content (6, 9, 11, 13 wt.%) and cooling rates (0.8, 1.5, 6.6, 12.7, and 100-1000 °C/s) to modify the morphology and chemical composition of  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>. Increasing Al content and cooling rate increased the  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> area fraction and refined grain size, thereby enhancing its connectivity. This enhanced connectivity reduced the corrosion rate. Notably, when the grain size is smaller than approximately 100  $\mu\text{m}$ ,  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> formed an interconnected network and primarily functioned as a physical corrosion barrier. In this case, higher Al content enhances the barrier effect. In contrast, when the grain size exceeded approximately 200  $\mu\text{m}$ ,  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> existed predominantly in an isolated form and primarily acts as a galvanic cathode. Meanwhile, increasing Al content and cooling rate reduced the Zn content in  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>, resulting in a decreased volta potential difference (VPD) between the  $\alpha$ -matrix and  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>. The reduced VPD contributed to lower corrosion rates.

### [마그네슘3-1 | 16:45]

마그네슘 합금에서 관찰된 intra-precipitation 현상: 권재호, 김정기, 박성수\*(울산과학기술원)

**Keywords:** 마그네슘, 석출, 상변태

마그네슘 합금은 구조용 금속 중 가장 낮은 밀도를 가지고 있어 경량 구조재로서 높은 잠재력을 지니지만, RE-free 합금계에서



효과적인 시효 강화 경로의 부재가 주요한 한계로 지적되어 왔다. 특히 우수한 열적 안정성으로 주목받아 온 Mg-Sn계의 시효 과정에서 비정합 계면을 갖는 평형 석출상이 과포화 기지로부터 곧바로 형성되기 때문에, 핵생성 장벽이 높고 강화 효과가 크지 않다는 문제가 있다. 이는 천이상 형성과 단계적 고상 변태를 통해 빠른 시효 반응을 보이는 알루미늄 합금과 대비되며, 결과적으로 시효 강화를 제한하는 요인으로 작용하고 있다. 본 연구에서는 Mg-Sn계 신 합금의 독특한 석출 경로를 제시하고, 천이상을 활용한 고상 변태 과정이 시효 반응을 효과적으로 개선할 수 있음을 보고한다. 나아가, 이 합금에서 관찰되는 독특한 내부석출(intra-precipitation) 과정을 통해 기존의 높은 핵생성 장벽을 우회하고, 미세한 평형상을 고밀도로 형성할 수 있음을 규명하였다. 이러한 전략은 높은 계면 에너지로 인해 석출이 제한되는 합금계에 적용 가능한 새로운 설계 개념을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

### [마그네슘3-2 | 17:00]

**Effect of Sn Addition on Microstructural Evolution and Hydrogen Storage Properties of Mg-Mg<sub>2</sub>Ni Alloy:** Do-Hyeon Kim(Korea Institute of Materials Science, Kyungpook National Univ.), Tae-Yeol Choi(Korea Institute of Materials Science, Pusan National Univ.), Da-Young Choi, 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, Microstructure, Hydrogen absorption, Hydrogen desorption

The increase in renewable energy has led to frequent surplus power generation, thereby creating a growing demand for long-term energy storage technologies. The hydrogen storage has emerged as a promising solution for mitigating supply-demand imbalances. In particular, metal hydride-based hydrogen storage systems have been extensively investigated as safer and more compact alternatives to conventional compressed and liquid hydrogen storage methods. Mg-Ni alloys, composed primarily of Mg and Mg<sub>2</sub>Ni phases, have been recognized as promising hydrogen storage materials due to their relatively fast reaction kinetics and high hydrogen storage capacity compared with pure Mg or single Mg<sub>2</sub>Ni phase. Numerous studies have focused on improving the hydrogen absorption and desorption kinetics as well as the hydrogen storage properties of Mg-Ni-based alloys through alloying strategies. The present study aims to systematically investigate the influence of Sn addition on the microstructural evolution and hydrogen storage properties of Mg-Ni alloys fabricated via casting followed by subsequent turning processes.

### [마그네슘3-3 | 17:15]

**마그네슘 합금 판재의 미세조직 제어에 따른 전자기파 차폐 거동 및 중성자 차폐 효과 방안:** 김경택, 김성제, 강민혁, 이상봉\*(금오공과대학교)

**Keywords:** Mg Alloy, Shielding effectiveness, Electromagnetic wave, Radiation shielding, Microstructure

정보기술의 급속한 발전과 함께 고밀도 집적회로 기반 첨단 전자기기의 활용이 무인항공기 및 자율주행 등 다양한 분야에서 중요해지고 있다. 전자기파 간 상호 간섭은 적합성과 신호 품질을 저하시킬 수 있으므로 우수한 차폐 특성과 내구성을 동시에 갖는 경량 소재가 요구된다. 마그네슘 합금은 구조용 금속 중 가장 낮은 밀도를 가지며, 높은 비강도, 우수한 진동 감쇠 특성과 더불어 뛰어난 전기전도도 및 전자기파 차폐능을 갖춘 것으로 알려져 있다. 그러나 현재까지 마그네슘 합금의 전자기파 차폐 특성에 대한 연구는 주로 주조재 및 압출재에 초점이 맞춰져 있으며, 수송기기 및 통신장비의 경량화 케이스 재료로의 응용을 위해서는 압연 판재의 차폐능에 대한 심도 있는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 판재 압연에 따른 변형량과 시효처리에 따른 2차상 형성이 마그네슘 합금의 전자기파 차폐 효과에 미치는 영향에 대해 분석하였다. AZ61 마그네슘 합금 판재를 200 °C에서 시효 열처리하여 2차상 형성에 따른 미세조직 변화, 전기전도도, 차폐 효과 간 상관관계를 분석하였다. 또한 전자기파와 방사능 동시 차폐용 초경량 Mg-B 복합소재 개발을 위하여 Hot Press 기반 제조 경로를 확립하고자 하였다. B함유 소재 종류 및 함량에 따른 공정적 한계와 차폐성능에 미치는 영향을 규명함으로써, 향후 미세조직 제어와 계면 결합력 향상을 통한 고성능 경량 차폐 소재 설계 가능성을 제시한다.

### [마그네슘3-4 | 17:30]

**Zn 함량 및 압출 온도가 Mg-Al-Zn-Mn-Ca-Y 합금 압출재의 물성에 미치는 영향:** 황건호(한국재료연구원, 고려대학교), 김재성, 김재연, 서병찬, 이상은, 문병기(한국재료연구원), 김세호(고려대학교), 서종식\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 마그네슘 합금, 압출, 기계적 물성, 내식성

모빌리티 구조 소재의 경량화를 위해 마그네슘 합금은 유망한 후보이나, 낮은 강도와 내식성으로 인해 적용에 한계가 있다. 본 연구에서는 Mg-Al-Zn-Mn-Ca-Y 합금 압출재를 제조하고, Zn 함량 및 압출 온도가 미세조직, 기계적 특성 및 내식성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 합금 조성 및 압출 조건에 따른 결정립 구조, 2차상 분포 및 집합조직 특성을 평가하고, 이와 물성 간의 상관관계를 분석하였다. 이를 통해 모빌리티용 고강도·고내식 마그네슘 압출재 설계를 위한 합금 및 공정 설계 지침을 제시하고자 한다.

## 철강B -압연, 강종 개발, 후처리

Room 4층 402B, 4월 28일

### [철강B1-1 | 09:00]

Al 계 코팅된 핫프레스포밍강의 상온 수소 탈착거동에 대한 코팅층 미세공극의 영향 분석: 고성민, 강대인(연세대학교), 김성우, 오진근(포스코 기술연구소), 이영국\*(연세대학교, 포항공과대학교)

**Keywords:** 핫프레스 포밍강, Al-Si 코팅, 수소 탈착, 미세공극

본 연구에서는 AISi 및 AlFe 코팅된 핫프레스 포밍강에서 상온 시효 중 수소 탈착에 미치는 코팅층 내 미세공극의 영향을 조사하였다. 상온 방치 전, 두 시편 모두 수소 함량이 거의 동일하도록 준비하였고, 측면에는 니켈 도금을 실시하였다. 그 결과, AISi\_Ni 코팅 시편은 시효 초기 약 7일 동안 AlFe\_Ni 코팅 시편보다 느린 수소 탈착 속도를 보였으나, 이후에는 유사한 양상을 나타냈다. 이러한 경향은 시효 시간에 따른 겉보기 수소 확산 계수(Dapp)의 변화와 일치하였다. AISi\_Ni 코팅 시편의 느린 수소 탈착 속도와 낮은 Dapp는 주로 FeAl(Si)와  $\alpha$ -Fe 층 사이의 계면을 따라 형성된 분리된 커렌달 공극 띠에 의한 수소 포획 때문으로 분석되었다. 반면, AlFe\_Ni 코팅 시편은 표면에 수많은 공극이 존재했지만, 이러한 공극들이 서로 연결되어 수소 확산 경로를 제공했기 때문에 수소 탈착 속도가 더 빨랐다.

### [철강B1-2 | 09:15]

22MnB5 강의 내마모성능 분석: 김현, 김혜진, 이승준\*(한국공학대학교)

**Keywords:** 22MnB5, 마모

본 연구는 자동차 핫스탬핑 소재인 22MnB5 강판의 마모 거리에 따른 마모 거동의 특징을 분석하는 것을 목적으로 한다. 건식 마모 실험은 지르코니아 ( $ZrO_2$ ) 볼을 이용하여 10N 하중, 주파수 5Hz, 스트로크 15 mm 조건에서 진행하였으며, 마모 거리를 50 m, 200 m, 500 m로 나누어 그 변화를 관찰하였다. 본 연구에서는 거리에 따른 마모 형상과 마모 메커니즘을 도출하기 위해, 3D laser scanning confocal microscope와 SEM-EDS를 활용하였다. 추가적으로, 본 발표에서는 표면에 형성된 산화물 층이 실제 마모 형상 변화에 미치는 영향에 대해 구체적으로 논의하고자 한다.

### [철강B1-3 | 09:30]

Effect of Al on Hydrogen Absorption and Embrittlement in 34MnB5 Hot-Stamping Steels: Dae-In Kang, Jin-Young Lee, Woo-Joong Lee, Young-Kook Lee\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** 34MnB5 steel, Hot-stamping steel, Martensitic steel, Hydrogen absorption, Hydrogen embrittlement

The addition of Al to 2.0 GPa-grade 34MnB5 hot-stamping steel not only increased its strength but also substantially enhanced its resistance to hydrogen embrittlement, despite the absence of notable microstructural differences between 34MnB5 and Al-added 34MnB5. The improved hydrogen embrittlement resistance was attributed to reduced H absorption during austenitizing, as a thin Al oxide layer suppressed additional water reduction reactions involving Fe, Mn, Si, and Cr, thereby limiting H generation. Consequently, Al addition produced a markedly thinner Fe-based oxide layer, which forms as a byproduct of the water reduction reaction leading to higher H absorption into the specimen.

### [철강B1-4 | 09:45]

API X60강의 마모 거동 및 메커니즘 분석: 한지혜, 이승준\*(한국공학대학교)

**Keywords:** API X60 steel, Wear behavior, Wear mechanism, Abrasive wear, Oxidative wear

본 연구에서는, API X60강의 마모 거리 증가에 따른 마모 거동과 마모 메커니즘의 변화를 체계적으로 분석했다. 마모 특성 평가는 reciprocating 방식의 ball-on-disc로 수행했으며, 15 N의 하중에서 마모 거리 50 m 부터 500 m까지의 조건으로 진행하였다. 마모 시험 결과, 마모 거리 50 m에서  $1.7 \times 10^7 \mu m^3$ 의 volume loss를 나타냈으며, 마모 거리 500 m에서는  $22.5 \times 10^7 \mu m^3$ 의 값을 보였다. 이후, 주사 전자현미경과 전자 후방산란 회절을 활용하여 마모 형상 및 트랙을 정밀 분석하여 API X60강의 마모 거리별 내마모 특성에 미치는 영향을 비교하여, 마모 메커니즘을 규명하고자 한다.

### [철강B1-5 | 10:00]

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 합금에 Segregation 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 있어 Mn 원소를 segregation engineering의 최적 원소로 선정하였다. 이 합금 설계 전략을 통해 intergranular에 FCC 오스테나이트 상이 석출된 합금을 설계할 수 있었다. 그러나 연성 FCC Y 상이 석출에 의해 발생하는 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  $\alpha$ -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.

#### [철강B1-6 | 10:15]

**위성 구조체용 인바/마르텐사이트강 클래드 합금 개발:** 송건호, 김채영, 정윤문, 나종범, 한정호\*(한양대학교)

**Keywords:** 인바, 마르텐사이트강, 클래딩

우주 환경에서 운용되는 위성은 일식, 일광에 따른 극심한 온도 변화(-150°C ~ 100°C), 유성체 및 우주 잔해물과의 충돌 위험 등 가혹한 환경에 노출된다. 이러한 이유로 위성의 구조 부품은 극한 환경을 견디기 위해 경량성, 저열팽창성, 고강도, 고인성 등 상반되는 특성을 동시에 요구한다. 현재 위성의 구조체는 용도별 요구 특성에 따라 다양한 합금이 복합 적용된다. 예를 들어, 높은 비강도가 요구되는 부품에는 Ti-6Al-4V 합금, 저열팽창 특성과 높은 인성이 필요한 부품에는 인바 합금, 경량성이 필요한 부품에는 알루미늄 7000계 합금이 사용된다. 그러나 이러한 방식은 제조 공정의 복잡성을 증가시키며, 생산 비용 증가를 초래한다. 본 연구에서는 단일 소재를 제조하기 위한 대안으로 클래딩 공정을 제안하며, 상반 물성을 확보하기 위해 고인성, 저열팽창 특성을 갖는 인바 합금과 고강도를 갖는 마르텐사이트강을 클래딩하였다.

#### [철강B2-1 | 10:40] 초청강연

**화학적 불균일 기반 차세대 철강재료 미세조직 설계:** 김지훈\*(부산대학교), 서동우(포항공과대학교)

**Keywords:** 화학적 불균일, 고강도 철강, 저합금화

철강재료는 합금원소 조성 및 프로세싱에 따라 페라이트, 베이나이트, 마르텐사이트와 같은 다양한 미세조직을 구현할 수 있으며, 이로 인해 철강은 다른 금속 소재에 비해 매우 넓은 물성 스펙트럼을 구현할 수 있는 대표적인 구조재료임. 이러한 미세조직 제어를 기반으로 다양한 강종이 개발되어 왔으며, 현재 철강은 현대 사회를 지탱하는 없어서는 안 될 핵심 소재로 자리 잡고 있음. 최근에는 소재 경량화, 극한환경 노출, 탄소중립 등 새로운 시대적 요구가 빠르게 증가하고 있음. 이에 따라 철강소재에는 더 높은 강도와 인성, 수소취성 저항성, 그리고 재활용성을 고려한 저합금 설계까지 동시에 요구되는 상황임. 이러한 복합 요구조건을 만족하는 차세대 철강재료 개발을 위해서는 새로운 미세조직 제어 전략이 필요한 시점임. 본 발표자는 이러한 한계를 극복하기 위한 새로운 접근법으로 화학적 불균일을 활용한 미세조직 제어 전략을 제안하고자 함. 기존 철강 미세조직 제어는 균일 조성을 기반으로 발전해 왔으며, 화학적 불균일은 억제해야 할 요소로 인식되어 왔음. 그러나 최근 연구 결과에 따르면 화학적 불균일을 의도적으로 설계하고 활용할 경우 기존 철강재료 대비 더욱 다양한 미세조직 설계가 가능한. 국부 조성 차이를 활용하여 상변태 속도 제어가 가능하며, 미세조직의 상분율뿐만 아니라 형상과 분포까지 제어할 수 있는 장점이 있음. 이를 통해 기존 균일 조성 기반 철강에서 얻기 어려웠던 다채로운 미세조직 구현이 가능함. 또한 합금원소 사용량을 줄이면서도 우수한 기계적 특성을 확보할 수 있어 최근의 다양한 요구조건을 충족하기 위한 유망한 미세조직 제어 접근법임. 본 발표에서는 화학적 불균일성을 활용한 미세조직 제어 기법을 소개하고, 이를 기반으로 한 고강도 철강재료의 미세조직 제어 및 기계적 특성 향상 사례를 제시할 예정임. 더 나아가 향후 연구 방향과 확장 가능성, 추가적인 응용 방안에 대해서도 함께 논의하고자 함.

#### [철강B2-2 | 11:05]

**고경도 보론강의 Al, Ti, Nb 복합 첨가에 따른 석출 거동과 충격인성:** 정민섭(서울과학기술대학교), 유승호, 고성웅(포스코 기술연구원), 황병철\*(서울과학기술대학교)

**Keywords:** Boron-added steel, Hardenability, High-hardness, 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. 그러나 제강 과정에서 불가피하게 발생하는 부산물인 질소는 응고 및 열처리 과정에서 보론과 강하게 반응하여 붕화물을 형성함으로써 용질 보론 함량을 감소시킨다. 질소를 제거하기 위해 Al, Ti, Nb와 같은 질소 친화력이 높은 합금 원소를 첨가하지만 이러한 원소들은 조대한 TiN 또는 AlN 형성을 촉진하여 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 석출물의 종류, 형태 및 분포를 분석하여 보론, 질소 및 합금 원소 간의 상호작용 메커니즘을 체계적으로 분석하였다. 또한, 경도 및 충격 인성을 평가하고 석출물 등 미세조직과의 상관관계를 규명하였다.

**[철강B2-3 | 11:20]**

**Arrhenius식 동적 재료 모델을 사용한 S355NL 저합금강의 고온 변형 거동 해석:** 이성호, 유진영, 천세호, 이정훈(부산대학교), 이채훈, 이진모(태웅), 이태경\*(부산대학교)

**Keywords:** S355NL, Hot deformation, Dynamic material model, Processing map

본 연구에서는 구조용 저합금강 S355NL의 고온 변형 거동을 정량적으로 해석하고 최적 열간 가공 조건을 도출하기 위해 변형공정지도를 구축하였으며, 구성방정식 기반 보정을 통해 기존 동적 재료 모델(dynamic materials model)의 한계를 개선한 새로운 해석 방법을 제안하였다. 800–1200°C의 온도 범위와 0.001–10/s의 변형속도 조건에서 수행한 고온 압축시험 데이터를 바탕으로 에너지 분산 효율 및 소성 불안정 영역을 도출하였다. 기존 변형공정지도는 power-law 기반의 응력-변형속도 관계식을 사용하므로 변형률에 따른 실시간 유동 거동을 충분히 반영하지 못하며, 실제 미세조직 관찰 결과와 불일치하는 한계가 있었다. 특히 800°C의 0.001/s 조건에서는 동적 재결정이 활발히 발생하고, 1200°C의 0.001/s 조건에서는 베이나이트 상변태 및 결정립 성장이 지배적임에도 불구하고 기존 모델은 이를 낮은 에너지 분산 효율로 예측하였다. 이를 개선하기 위해 전 변형률 구간에서 높은 적합도를 보이는 쌍곡선 기반 Arrhenius 구성방정식을 적용하여 변형률 의존성이 반영된 새로운 변형공정지도를 구축하였다. 제안된 지도는 낮은 변형속도 영역에서 재결정 및 상변태에 따른 조직 연화 거동을 효과적으로 반영하여 높은 에너지 분산 효율을 정확히 예측하였으며, 이는 미세조직 분석 결과와도 높은 일치성을 보였다. 또한 기존 모델이 예측한 소성 불안정 영역은 실제 시험에서 전단 밴드나 국부 변형 집중 등의 결함이 관찰되지 않아 물리적 타당성이 낮은 것으로 확인되었으나, 새롭게 제안된 모델에서는 이러한 오류가 제거되었다. 본 연구 결과는 Arrhenius 보정 기반 변형공정지도가 실제 변형 메커니즘 및 미세조직 변화를 보다 정밀하게 반영함을 입증하며, 향후 다양한 금속 소재의 열간가공 공정 설계 및 최적화에 있어 기존 방법 대비 향상된 신뢰성을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

**[철강B2-4 | 11:35]**

**가스터빈 압축기용 3.5NiCrMoV 강의 템퍼 취성 거동:** 김중훈(한국생산기술연구원, 울산과학기술원), 강수성(한국생산기술연구원, 부경대학교), 김형찬, 김병준(한국생산기술연구원), 박성수\*(울산과학기술원), 김병구\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 3.5NiCrMoV steel, step cooling heat treatment, DBTT, FATT, Microstructure

가스터빈은 2050 탄소중립 달성을 위한 친환경 에너지 전환의 핵심 설비로, 이에 따른 기술 고도화와 부품 국산화가 필수적이다. 특히 가스터빈 압축기는 400°C 이상의 고온과 고속 회전 환경에서 운전되어 소재의 우수한 내진동성 및 템퍼 취성 저항성이 요구되나, 고온 터빈 부품에 비해 신뢰성 확보를 위한 연구가 미비한 실정이다. 이에 본 연구는 가스터빈 압축기의 핵심 소재인 3.5NiCrMoV 강의 장기 신뢰성을 확보하기 위해, 해당 소재의 템퍼 취성 경향을 체계적으로 분석하였다. 연구 방법으로는 장시간의 열 노출을 단축하여 효율적으로 평가할 수 있는 step cooling heat treatment (SCHT)를 적용하였으며, 이를 통해 ductile to brittle transition temperature (DBTT) 및 fracture appearance transition temperature (FATT)를 평가하였다. 열처리 마스터 커브를 통해 도출된 최적 조건 (830°C 퀴칭, 605°C 템퍼링)으로 시편을 제작하고 5단계의 SCHT를 수행하였다. 이후 총 9개의 온도 조건에서 충격 시험을 진행하여 천이 온도를 도출함으로써, 3.5NiCrMoV 강의 템퍼 취성 거동을 정량적으로 규명하였다.

**[철강B2-5 | 11:50]**

**열처리 조건에 따른 SA350 강의 수소 취성 회복 특성 비교:** 이진균, 이선(부산대학교), 이정훈(경북대학교), 허상현, 이채훈, 김남용, 이진모(태웅), 이태경\*(부산대학교)

**Keywords:** 저탄소강

건식 원자력 폐기물 저장 용기의 안전성 확보를 위해서는 구조용 강재의 수소 취성 저감과 기계적 성능 회복이 필수적이다. BCC 결정구조를 갖는 SA350 LF3 강은 우수한 저온 인성과 강도를 보유하지만, 수소 확산 속도가 빠르고 전위 이동이 제한되어 수소 취성에 취약한 소재로 알려져 있다. 이번 연구에서는 전기화학적 방법으로 수소를 장입한 SA350강에 대해 전기로 열처리(FHT)와 전류 펄스 열처리(EPT)를 적용하여, 수소 장입 이후 후열처리 조건에 따른 수소 취성 회복 거동을 체계적으로 비교 분석하였다. 열처리는 100–300°C 범위에서 20분간 수행하였으며, SSRT를 통해 연신을 회복률을 정량 평가하고, SEM 파면 관찰, EDS 개재물 분석, EBSD 기반 결정립계 및 변형 분포 분석, TDS를 통한 수소 트랩 특성 평가를 병행하였다. 그 결과, 모든 온도 조건에서 EPT 처리 시편은 FHT 대비 더 높은 연신을 회복률을 보였으며, 이는 EPT가 LAGB 분율과 KAM 값을 증가시켜 전위 기반의 가역적 수소 트랩을 확대하고, 수소에 의한 취성 균열 발생을 효과적으로 억제한 결과로 해석된다. 본 연구는 수소 취성에 취약한 BCC 구조 강재에서 수소 장입 이후 적용 가능한 EPT 기반 후열처리 전략의 유효성을 제시하며, 건식 저장 용기용 저온 구조강의 수소 취성 대응 및 공정 최적화를 위한 기초 자료를 제공한다.

**[철강B3-1 | 14:00]**

**극저탄소강 극표면부의 석출 및 재결정 거동 규명:** 하유미\*, 송태진, 한성호, 김성일(포스코 기술연구원)

**Keywords:** 극저탄소강, 재결정, 석출물, 집합조직

극저탄소강은 페라이트 단상 구조를 가지며, 우수한 성형성이 요구되는 자동차 외판 소재로 널리 사용되고 있다. 이러한 높은 성형성을 확보하기 위해서는 강 내의 C, N, S 등의 불순물을 제거하는 것이 필수적이며, 이를 위해 티타늄(Ti) 또는 니오븀(Nb)과 같은 탄질화물 안정화 원소를 첨가하는 방법이 일반적으로 적용된다. Ti 및 Nb의 첨가는 강 내부에서 탄질화물의 석출을 유도하여 재결정 거동에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 특히 Ti-Nb 복합계에서의 석출 특성과 재결정 거동 간의 상관관계에 대해서는 다양한 연구가 진행되어 왔다. 기존 연구들은 주로 소둔 처리 후 시편의 단면부 조직을 관찰하여 재결정 상태를 분석해 왔다. 그러

나 본 연구에서는 소둔 완료 후 단면부에서 정상적인 재결정이 이루어진 경우에도, 소재의 극표면부에서는 재결정이 완전히 진행되지 않는 현상이 존재함을 확인하였다. 이러한 극표면부의 불완전 재결정은 소재의 성형성에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로, 그 원인 규명이 필요하다. 이에 본 연구에서는 극저탄소강의 극표면부를 대상으로 석출 거동과 재결정 거동을 투과전자현미경(TEM, Transmission Electron Microscopy)과 전자 후방산란 회절(EBSD, Electron Backscatter Diffraction) 기법을 병행하여, 미세 석출물의 형상·분포와 재결정 진행 정도를 종합적으로 평가하였다.

#### [철강B3-2 | 14:15]

Development of High-Toughness 2.0 GPa-Class Martensitic Hot Stamping Steel: Byung-Gil Yoo\*, Jewoosoo Kim, Jae Wook Kang(Hyundai Steel R&D Center)

**Keywords:** Martensitic ultra-high-strength steel, high bendability, homogeneous microstructure

Recently, the development of martensitic hot stamping steel with a tensile strength level of 2.0 GPa has been actively pursued to achieve a new concept of high-toughness ultra-high-strength automotive steels. While conventional 1.5 GPa grade martensitic hot stamping steels have been optimized for enhanced bendability and crashworthiness to protect the passenger cabin, further improvements in toughness are required for next-generation vehicle safety standards. In particular, the 1.5 GPa class high-toughness PHS is now under preparation for mass production in premium large SUV models, demonstrating the industrial feasibility of this concept. In this study, the key microstructural design concepts and technological approaches for achieving superior toughness in 2.0 GPa grade martensitic steels are investigated. Special emphasis is placed on the optimization of martensitic unit microstructures within prior austenite grains, grain refinement strategies, and the enhancement of localized plasticity during bending deformation. The findings highlight the critical pathways for realizing high-toughness 2.0 GPa class hot stamping steels suitable for future automotive applications.

#### [철강B3-3 | 14:30]

Zn-Al-Mg 도금강판 냉간압연 시 압하율 변화에 따른 기계적 특성 및 응용 연구: 이계만\*, 박종원, 유윤하, 조재동(POSCO)

**Keywords:** Zn-Al-Mg 도금강판

Zn-Al-Mg 3원계 도금강판은 일반적인 Zn 도금강판 대비 우수한 내식성을 보유하여 건축 자재, 태양광 구조물 등 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다. 고강도 제품을 적용하면 소재 두께를 감소시켜 투입량 절감이 가능하며, 고강도 특성이 요구되는 특수 용도에도 적합하다. 그러나 연속생산 도금 라인의 설비 한계로 인해 일정 강도 이상의 제품 생산에는 제약이 존재한다. 본 연구에서는 Zn-Al-Mg 도금강판을 냉간압연하여 가공경화를 부여함으로써 고강도 도금강판을 제조하였다. 냉간압연 과정에서 압하율 변화에 따른 기계적 특성을 평가하였으며, 도금층 손상에 따른 도금밀착성과 내식성 변화를 분석하였다. 이를 통해 높은 강도와 우수한 도금밀착성 및 내식성을 동시에 확보할 수 있는 최적 압연 조건을 도출하였다. 또한, 제조된 고강도 Zn-Al-Mg 도금강판을 적용한 부품의 응용 사례를 제시하여 산업적 활용 가능성을 검토하였다.

#### [철강B3-4 | 14:45]

Zn-Mg-Al 도금층에서 열처리에 의한 Mg-Zn계 결정상의 변화 및 내식성 평가: 유윤재\*, 소성민, 이윤정, 강훈철(현대제철)

**Keywords:** 용융아연도금, 상변태, 열처리, 부식

Zn-Mg-Al 도금층에서 열처리 매개변수에 따른 Mg-Zn 계 금속간화합물의 상변태 거동을 규명하고자, 다양한 가열온도 및 유지시간을 적용하고 동일 냉각조건을 부여하여 도금층 조직 변화를 분석하였다. 초기 도금층에서 주로 관찰되는  $MgZn_{11}$  상은, 추가적인 열처리 및 열처리 온도가 상승하고 유지시간이 증가함에 따라  $Mg_{17}Zn_{11}$  상으로의 선택적 성장 및 상변태가 확인되었다. 특히  $MgZn_{11} \rightarrow Mg_{17}Zn_{11}$  변태는 확산 기반의 상분해 및 재배열 과정과 관련되며, 도금층의 열적 안정성과 후처리 조건에 민감하게 의존하는 것으로 나타났다. 본 연구는 Zn-Mg-Al 도금층에서의 금속간화합물 제어 전략 수립 및 도금층 성능 최적화를 위한 기초적 이해를 제공한다.

#### [철강B3-5 | 15:00]

초고강도 냉연 마르텐사이트(MS) 강의 첨가 원소에 따른 기계적 성질 및 내수소취성 평가: 최강현\*, 류주현, 공종판, 방찬우, 정연승, 진영훈, 황아인(POSCO)

**Keywords:** 마르텐사이트강(MS), 인장물성, 굽힘, 수소취성

최근 글로벌 전기차(EV) 및 하이브리드차(HEV) 시장이 급성장함에 따라, 승객 및 충돌 안전성뿐만 아니라 배터리 보호를 위해 인장강도 1.5GPa급 이상의 Hot Press Forming(HPF) 및 냉연 마르텐사이트(MS)강의 적용이 급격히 증가하고 있다. 특히, 전 세계적으로 탄소중립 등의 이슈로 인해 자동차 보강재에 적용 중인 HPF에서 저탄소·저비용인 냉연 MS강으로의 전환이 활발히 진행되고 있으며, 초고강도 HPF 대체를 위한 1.7, 1.9 GPa 이상의 냉연 MS강 개발도 진행 중이다. 수소취성은 금속이 수소 환경에 노출될 때 기계적 성질이 심각하게 저하되는 현상으로, 초고강도 냉연 MS강은 내수소취성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 초고강도 냉연 MS강의 첨가 원소에 따른 기계적 성질 및 수소취성에 미치는 영향을 연구하였다. 결정립 미세화, 편석 억제, 입계 강화 등 각종 메커니즘에 의해 내수소취성을 확보할 수 있음을 확인하였다. 일반적으로 초고강도 MS강은 급냉 공정을 통해 제조되며, 급격한 상변태로 인해 형상이 열화되어 이를 교정하기 위해 텐션 레벨링(Tension Leveling) 등이 적용된다. 특히, 수냉(Water quenching) 공정을 통해 제조된 MS강은 냉각 속도가 빨라 원소재에서 Twist 및 Wave 등의 변형이 과도하게 발생하여 이를 교정하기 위해 과도한 텐션 레벨링이 적용될 수밖에 없다. 따라서, 이러한 문제를 극복하기 위해 POSCO에서는 성분 및 냉각 조건을

최적화하여 형상 및 내수소취성이 우수한 냉연 MS강을 개발하였으며, 텐션 레벨링 적용을 최소화하여 표층 가공 경화를 저감함으로써 우수한 굽힘 특성 및 내수소취성을 확보하였다. 현재 형상이 우수한 POSCO 냉연 MS강은 자동차(EV 등) 보강재의 다양한 부품(Bump, Sill side 등)에 양산 적용되고 있다.

#### [철강B3-6 | 15:15]

**수소취성 저항성이 강화된 마르텐사이트 강판 개발:** 박봉준\*, 장민호, 이수민, 정승필, 신희권(현대제철연구소), 김성대(부경대학교)  
**Keywords:** Martensitic steel, Martensite, Hydrogen Embrittlement, Industrial-scale Production

전 세계적인 탄소중립 목표 달성을 위한 핵심 수단으로 전기차의 보급이 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 전기차의 무거운 배터리 중량은 내연기관과 비교하여 공차 무게를 증가시켜 차량의 충돌 안정성을 저해하고 1회 충전 주행 거리를 감소시키는 요인으로 작용한다. 이와 같은 이슈를 해소하기 위하여 전기차 차체의 초고장력화 및 경량화가 요구되고 있고 마르텐사이트 강판의 적용 또한 확대되고 있다. 마르텐사이트 강판은 높은 강도를 가지기 때문에 수소취성에 매우 민감한 것으로 알려져 있다. 그러므로 전기차 차체에 적용하기 위하여 수소취성 저항성을 향상시켜야 한다. 이를 위하여 내식성 향상 원소 첨가, 수소 트랩 사이트 증가 및 균질한 결정립 등 성분과 미세조직 설계를 수행하였다. 또한 스텝 로드 테스트 (Step Load Test)를 활용하여 각 인자별 수소취성 저항성에 미치는 영향을 상대적으로 비교 분석하여 설계를 최적화하였다. 상기와 같은 설계를 바탕으로 인장강도 1.3, 1.5, 1.7 GPa급 마르텐사이트 강판을 실제 라인에서 제조하였으며, 재질 및 수소취성 저항성 등에 대한 목표를 만족하였다.

#### [철강B3-7 | 15:30]

**Effect of defects on hydrogen induced cracking in normalizing steel plates:** Dae Woo Kim\*(posco)

**Keywords:** Non-metallic inclusions, HIC, hydrogen, A516-70

Normalizing steel plates with a tensile strength of 485 MPa are widely utilized in natural gas purification facilities. Driven by the increasing demand for purification efficiency and large-capacity processing, the scale of these facilities has expanded, leading to a corresponding increase in material thickness. This study investigates the hydrogen-induced cracking (HIC) behavior of ASTM A516-70 plates, characterized by a ferrite-pearlite microstructure, in relation to slab defects and plate thickness. Furthermore, secondary refining processes and forging/rolling methodologies were evaluated to optimize HIC resistance. The results indicate that the timing of calcium treatment significantly influences the composition and volume fraction of oxide inclusions. By reducing the total oxygen content, T[O] from 20 ppm to below 8 ppm through optimized refining, the Crack Area Ratio (CAR) was drastically reduced from 3.0% to less than 0.1%. In the case of extremely thick plates with a total rolling reduction ratio of 70% or less, HIC defects predominantly occurred in the center of the plate. Microstructural analysis revealed that cracks initiated at residual pores in the center and propagated along the ferrite-pearlite interfaces. To effectively eliminate residual slab pores during the rolling process, it was found that surface cooling followed by reduction was more effective than conventional heavy reduction. By implementing this thermomechanical controlled process, the CAR was successfully lowered from 7.3% to below 0.2%. The results demonstrate that precise control of total oxygen content and the implementation of surface-cooled reduction are essential for ensuring HIC integrity in heavy-gauge normalizing steel plates.

#### [철강B4-1 | 15:55]

**설명 가능한 인공지능을 활용한 데이터 효율적인 핫스탬핑강 응력-변형률 곡선 예측:** 선혜진, 이정아, 최주미(포항공과대학교), 서민홍, 오경석(포스코), 김형섭\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 핫스탬핑강, 머신러닝, SHAP, LSTM

핫스탬핑강의 응력-변형률 곡선 예측은 성형 공정 최적화에 필수적이지만, 고온 인장 시험의 제약으로 인한 데이터 부족의 문제를 겪고 있다. 본 연구에서는 온도, 변형률 속도, 냉각 속도로 구성된 소규모 데이터를 활용한 최적의 응력-변형률 곡선 예측 방법을 찾기 위해 피쳐 엔지니어링과 Long Short Term Memory(LSTM) 구조 최적화 전략을 비교하며, 그 과정에서 Shapley Additive Explanations(SHAP) 분석을 통해 성능 향상의 원인을 분석한다. 첫 번째 전략에서는 피쳐 엔지니어링 적용이 예측 성능을 향상시키는 것을 확인하였으며, 다른 모델과 비교 평가한 결과 Extra Trees Regressor(ETR) 모델이 가장 우수한 성능을 보였다. SHAP 분석 결과, ETR 모델은 다른 모델과 달리 온도 관련 특성을 가장 중요하게 학습하였으며, 피쳐 엔지니어링 과정에서 온도 특성의 중요도가 증가하여 성능 향상에 기여하였음을 확인하였다. 두 번째 전략에서는 초기 데이터 지점에서의 예측 부정확성을 갖는 단방향 LSTM의 한계를 극복하기 위해 양방향 LSTM(BiLSTM)과 가중 손실 함수를 적용한 LSTM(WL-LSTM) 구조를 활용하였다. 구조 최적화 결과, 가중 손실 함수를 적용한 양방향 LSTM(WL-BiLSTM)이 물리적으로 일관된 우수한 예측 성능을 보였다. 시간적 SHAP 분석을 통해, 구조 최적화로 초기 변형 단계에서의 특성들 간의 중요도 편차가 완화되었음을 확인하였다. 이와 동시에, 평균적으로는 온도 특성의 지배적 영향이 유지되어 예측 정확도가 향상되었다. 연구 결과, LSTM 구조 최적화가 피쳐 엔지니어링보다 우수한 결과를 보였으며, SHAP 분석 기반의 해석 가능한 응력-변형률 예측 최적화 방법론을 제시하였다.

#### [철강B4-2 | 16:10]

**배터리케이스용 강재의 단면 특성에 따른 부식 영향성 상관관계 연구:** 홍수직\*(포스코)

**Keywords:** 금속, 탄소강, 도금층, edge, 부식

본 연구에서는 배터리케이스에 활용되는 강재의 도금층 및 단면 구조에 대한 처리 방법에 따른 방청 및 내식성과의 상관관계를 실험적으로 규명하고자 한다. 배터리케이스에 요구되는 비염수조건의 고온-고습 조건 하에서, 처리 방법에 따라 앓지부 부식 양상이



상이함을 관찰하였다. 기존 활용되는 도금층을 개선한 도금방법에 따른 소재, 가공 후 내식성 및 도금조건 변화에 따른 부식 영향성 차이 여부에 대해서도 X선 본 연구에서는 배터리케이스에 활용되는 강재의 도금층 및 단면 구조에 대한 처리 방법에 따른 방청 및 내식성과의 상관관계를 실험적으로 규명하고자 한다. 배터리케이스에 요구되는 비염수조건의 고온-고습 조건 하에서, 처리 방법에 따라 옛지부 부식 양상이 상이함을 관찰하였다.

#### [철강B4-3 | 16:25]

**지중 고압송전 전자파 차폐용 고내식 연자성 소재 개발:** 권윤익\*, 한민수, 주형돈, 권문재, 유윤하(포스코 기술연구원), 나상준, 김재희(포스코), 최무성, 소준영(한국전력공사 전력연구원)

**Keywords:** 전자파, 차폐, 전기강판, 자기장, 저주파

인공지능(AI)과 빅데이터 분석 등 대규모 데이터를 기반으로 하는 산업이 빠르게 성장하면서, 이를 저장·관리하는 데이터센터의 수가 늘어나고 있다. 데이터센터는 저장하는 데이터량이 많아질수록 전력 소비가 크게 증가하며, 이를 위해 고전압 전류를 공급할 수 있는 고압 전력선이 시설까지 연결된다. 특히 데이터센터는 도심 인근에 위치하는 경우가 많아, 고압 전력선에서 발생하는 전자파로 인한 영향을 최소화할 필요가 있다. 지중에 매설된 고압 전력선의 전자파를 줄이기 위해, 전력선 설치 시 땅을 파고 전력선을 매설한 뒤, 그 위를 강판이나 기타 소재로 덮어 매립하여 차폐하는 방법이 사용된다. 이러한 환경에서는 차폐재가 높은 전자파 차폐율 뿐만 아니라 토양 속에서도 견딜 수 있는 충분한 내식성을 가져야 한다. 기존 소재들은 차폐 성능은 우수하지만 토양 환경에서의 내식성이 부족한 경우가 많다. 또한 차폐율이 낮은 소재는 두께를 늘려 성능을 보완할 수 있으나, 그로 인해 무게가 증가해 시공성이 떨어지는 문제가 있다. 따라서 전자파 차폐재는 차폐 성능, 내식성, 시공성을 모두 만족하는 소재가 요구된다. 본 연구에서는 일반적인 송전 환경인 60Hz 저주파에서 발생하는 전자파를 차폐하기 위해, 소재 성분과 도금성 및 열처리 조건에 따른 미세조직 변화와 전자파 차폐율 변화를 비교 분석하였다. 이를 통해, Fe-Ni계 복합강판 대비 내식성과 차폐성이 우수하며 후물 알루미늄 소재 대비 시공성까지 갖춘 연자성 소재를 개발하였다.

#### [철강B4-4 | 16:40]

**Fe-Ni-Ti계 마레이징 강에서 Mo 첨가에 따른 입계석출물의 상변태 거동 변화 연구:** 김동현(포항공과대학교), 윤건영(한국재료연구원), 주용하, 김경덕, 허윤옥\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 마레이징강, 상변태, 입계석출물, TEM, APT, 제일원리

마레이징강은 과포화된 마르텐사이트 기지를 시효시켜서 시효 과정 중에 형성되는 치밀한 금속간화합물에 의해 1.5GPa 이상의 인장강도를 얻는 대표적인 초고강도강이다. 마레이징강의 강화상 중 대표적인 금속간화합물은  $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Mo})$ 이며, 주로 Fe-Ni을 Base로 한 합금에 Ti와 Mo를 첨가하여 석출을 유도한다. Fe-Ni-Ti계 마레이징강은 시효 중 결정입내와 결정립계에  $\text{DO}_{24}$   $\eta\text{-Ni}_3\text{Ti}$ 가 석출하며, 장시간 시효 시 결정립계에 석출된  $\eta\text{-Ni}_3\text{Ti}$ 는 오스테나이트( $\gamma$ )로 상변태하는 것이 관찰된 바가 있다. 입계석출물의 상변태 과정은 전위의 움직임에 의한 결정구조 변화와 성분원소의 확산에 의해 일어나며,  $\eta\text{-Ni}_3\text{Ti} \rightarrow \gamma\text{-Ni}_3\text{Ti} \rightarrow \gamma$ 의 변태 순서를 거친다고 알려져 있다. 이러한 입계석출상의 상변태 거동은 마레이징강의 입계취성파괴와 입계취성회복과 밀접한 관련이 있으므로, 성분원소 변화에 따른 석출상의 상변태 메커니즘 변화에 대한 고찰이 필요하다. 본 연구에서는 Fe-Ni-Ti계 마레이징강의 입계석출물 상변태 거동에 미치는 Mo 첨가 효과를 TEM, APT 분석 및 제일원리 계산을 통해 체계적으로 고찰하였다. TEM 분석 결과, Mo 첨가 시 입계  $\eta\text{-Ni}_3\text{Ti}$ /마르텐사이트의 상계면에  $\gamma$ 의 핵생성이 빠르게 발생하며, 중간상인  $\gamma'\text{-Ni}_3\text{Ti}$  형성 없이  $\eta\text{-Ni}_3\text{Ti}$ 에서  $\gamma$ 로의 직접적인 상변태가 일어남을 확인하였다. 이러한 상변태 거동의 변화를 이해하기 위해서 TEM과 APT의 고분해능 분석을 진행하였고, 이를 토대로 제일원리 계산을 진행하였다. 본 발표에서는 Mo 첨가에 의해 변경된 입계석출상의 상변태 거동을  $\eta\text{-Ni}_3\text{Ti}/\gamma$  interface energy와 lattice mismatch 관점에서 설명하고자 한다.

#### [철강B4-5 | 16:55]

**극저온 인성이 우수한 액화수소용 고강도 오스테나이트계 스테인리스강 개발 연구:** 송석원\*, 김광민, 이봉근, 채동철(포스코)

**Keywords:** 스테인리스강, 고강도, 고내식, 액화수소

수소경제의 확산과 함께 수소의 대량 운송 및 저장 기술에 대한 수요가 급격히 증가하고 있다. 특히 액화수소는 기체수소 대비 약 1/800의 부피를 가지므로 대용량 저장에 적합하며, 향후 수소 산업 인프라의 핵심 형태로 주목받고 있다. 그러나 액화수소의 끓는점은  $-253^\circ\text{C}$ 로, 이 온도에서 안정성을 확보할 수 있는 극저온용 소재 개발이 필수적이다. 현재 산업 현장에서는 극저온 인성이 우수한 오스테나이트계 스테인리스강(304L, 316L)이 주로 사용되고 있으나, 낮은 강도로 인해 대형 구조물 적용 시 두께 증가, 제작 비용 상승, 용접성 저하 등의 한계가 존재한다. 본 연구에서는 액화수소 저장·운송용 고강도 오스테나이트계 스테인리스강 316LH(Liquefied Hydrogen)를 개발하였다. 316LH는 ASTM S31655, KS STS316HS 규격에 부합하며 ASME BPVC 코드에 등재되었고, 국내 KGS AC111 코드 등재를 진행 중이다. 설계허용강도 기준으로 304L 및 316L 대비 약 30%의 두께 저감이 가능하여 경량화에 유리하다. 소재 설계 과정에서 고질소 첨가를 통해 오스테나이트 안정성을 강화하고 고강도 특성을 확보하였으며, 고질소 첨가에 따른 극저온 인성 저하를 최소화하기 위해  $\delta$ -페라이트 분율과 변형기구를 고려한 성분 설계 및 제조공정 최적화를 진행하였다. 이를 통해 냉연재부터 후판재까지 전 제조공정 범위에서 우수한 극저온 인성을 구현하였다. 성능 평가 결과,  $-253^\circ\text{C}$ 에서의 충격인성은  $100\text{ J}$  이상( $LE \geq 1.0\text{ mm}$ )을 확보하였고,  $-53^\circ\text{C}$  수소장입 SSRT 시험에서  $RRA \geq 0.9$ 로 우수한 내수소취성을 나타냈다. 또한 316LH 전용 용접재료를 병행 개발하여, 모재뿐만 아니라 용접부에서도 동일한 수준의 극저온 인성을 확보하였다.

**[철강B4-6 | 17:10]**

Ferritic Stainless Steel의 주조조직 미세화에 따른 기계적 성질 및 가공성 향상 연구: 최가열\*, 박성배(포스코)

**Keywords:** 스테인리스, 주조조직

400계 스테인리스강은 페라이트 또는 마르텐사이트 조직을 기반으로 하며, 오스테나이트계에 비해 저온 충격 인성이 낮다. 이는 BCC 구조 특성상 저온에서 전위 이동이 어려워 취성 전이가 빠르게 일어나기 때문이다. 또한 압연 과정에서 특정 결정방위가 국부적으로 발달하여 리징(ridging) 결함이 발생하기 쉽다. 본 연구에서는 400계 스테인리스 슬라브 주조조직을 제어하여, 주조조직 크기에 따른 충격에너지와 최종재 물성을 평가하였다. 최종 냉간압연재 평가 결과, 결정립 크기가 작을수록 연신율과 r값이 높고 리징 높이가 감소하는 경향을 확인하였다. 이러한 결과는 결정립 미세화가 충격 인성, 냉연재 가공성 및 표면 품질 개선에 모두 긍정적인 영향을 미치는 것을 보여주며, 슬라브 품질 향상과 공정 전환 검토에 중요한 기초 자료를 제공한다.

**[철강B4-7 | 17:25]**

초고강도 고인성 주철 개발을 위한 사형주조 냉각공법 개발: 이형국\*(현대자동차), 조용재(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 구상흑연주철, 고강도, 고인성, 냉각속도, 사형주조

1. 서론 주철은 다양한 형상의 부품을 저렴한 비용으로 쉽고 빠르게 생산가능한 장점이 있다. 하지만 친환경 차량 제조기술의 발전에 따라 주철은 강도를 높여서 경량화가 필요하다. 하지만 주철은 강도를 700 MPa 이상 높일 경우 취성이 높아 실제 부품에 적용하는데 한계가 존재한다. 본 연구는 주철의 강도를 높여도 신율을 높일 수 있는 미세조직 인자를 규명하고 사형주조의 냉각속도를 향상시켜 강도 향상과 신율을 최대한으로 향상시키는 연구를 실시하고자 한다. 2. 실험방법 첫째, 기존의 사형제작 시 사용되는 주물사 재료인 천연사를 대체할 수 있는 인공사를 적용하여 기계적물성을 평가한다. 둘째, 냉각속도를 향상시키기 위해 사형에 냉각채널을 형성하여 주조품의 기계적물성을 평가한다. 3. 결과 사형의 재료를 변경하여 인공사를 적용할 경우 기계적물성은 인장강도 900 MPa 이상, 신율 7% 이상 달성하였다. 냉각채널을 형성하여 냉각속도를 향상시킬 경우 기계적물성은 인장강도 900 MPa 이상, 신율 9% 이상과 인장강도 1000 MPa, 신율 3% 이상을 달성하였다. 4. 결론 주물사 변경과 사형주조의 냉각시스템을 적용하여 기존 사형주조품의 물성을 900 MPa 이상, 신율 7% 이상 향상시킬 수 있다. 이는 기존의 구상흑연주철의 물성을 혁신적으로 개선하여 다양한 부품에 적용할 수 있는 기초연구이며 주철부품을 경량화 효과가 높을 것으로 예상된다.

## 대형 일체형 차체부품 알루미늄 주조기술 심포지엄

Room 2층 201A, 4월 29일

### [자세 1-1 | 09:00] 초청강연

대형·박육 차체부품 일체화를 위한 주조압력 저감 공정 기술개발: 유한결, 최지석, 나규제, 송호섭, 윤상일\*(삼기)

**Keywords:** 컴팩트 가압주조, 알루미늄 다이캐스팅, 대형·박육 일체형 차체부품, 주조압력 저감, 고기능성 알루미늄 복합소재

글로벌 완성차 시장은 내연기관 중심에서 전기차로 전환되는 흐름 속에 있으나, 전기차 캐즘 현상으로 인해 원가 경쟁력과 생산성 확보가 중요한 과제로 부상하고 있다. 이에 따라 차체부품의 대형·일체화가 확산되는 추세이나, 대형 부품 생산을 위해 요구되는 초 대형 설비는 투자·운영 측면에서 한계가 존재한다. 본 연구에서는 기존 설비 기반에서도 대형·박육 일체형 부품을 안정적으로 생산하고 품질을 확보하기 위해 주조압력 저감형 컴팩트 가압주조 공법을 개발하고, 부품 요구 성능에 따라 고기능성 알루미늄 복합소재 및 레오캐스팅 공법 등을 복합적으로 적용하였다. 공정·금형·설비 운용 조건의 최적화와 충전/응고 거동 관리, 품질 편차 저감을 위한 모니터링 기반 접근을 통해 양산 적용성을 검토하였으며, 그 결과 대형·일체형 도어 인너 프레임 시제품을 제작하여 제조 가능성과 품질 확보 방향을 확인하였다. 본 기술은 주조압력 저감을 통해 설비 부담과 에너지 소모를 완화하면서도 대형 부품의 성형 안정성과 품질을 확보할 수 있는 대안으로서, 설비 다용사이징/기존 설비 활용, 공정 경쟁력 향상, 전기차 부품의 경량화 및 기능 통합 관점에서 유효한 확장 가능성을 제시한다.

### [자세 1-2 | 09:20] 초청강연

대형 차체부품 알루미늄 주조 공정에서 진공밸브 공기 배출 단면적 변화에 대한 실험 및 시뮬레이션 검토: 최경환\*(한국신소재산업(주))

**Keywords:** 알루미늄 주조, 진공다이캐스팅, 진공밸브, 칠벤트

대형·박육 알루미늄 차체부품 주조 공정에서 진공 시스템의 성능 평가는 주로 금형 캐비티가 아닌 진공 호스 구간에서 측정되는 진공 장비 표시 진공도를 기준으로 이루어지는 경우가 많다. 그러나 이러한 표시 진공도는 측정 위치 및 유동 경로의 영향을 받아, 실제 금형 캐비티 내부의 진공 형성 상태를 충분히 반영하지 못할 가능성이 있다. 캐비티 내부 공기는 진공밸브 또는 칠벤트를 통해 배출되며, 두 밸브는 구조적 특성이 상이하다. 진공밸브는 비교적 단순한 유동 경로와 상대적으로 큰 공기 배출 단면적을 가지는 반면, 칠벤트는 지그재그 형상의 구조를 가지며 유효 갭이 약 1.2 mm 수준으로 제한되어 있다. 이러한 구조적 차이로 인해 칠벤트 내부에서는 국부적인 압력 손실과 유동 왜곡이 발생할 수 있으며, 이로 인해 밸브 인근에서 측정되는 진공도가 실제 캐비티 진공 상태와 차이를 보일 가능성이 있다. 반면, 진공밸브에서는 이러한 왜곡이 상대적으로 적을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 진공밸브와 칠벤트 적용 조건에서 캐비티 내부와 외부에서 형성되는 진공도 차이에 주목하여, 진공도 측정 위치와 밸브 형상에 따른 진공 형성 거동을 실험 및 시뮬레이션을 통해 검토하고자 한다. 이를 통해 주조 공정에서 진공 시스템 성능 평가 시 표시 진공도의 해석 한계와 캐비티 진공 형성에 대한 이해를 돕는 기초적인 시사점을 제시하고자 한다.

### [자세 1-3 | 09:40] 초청강연

대형 다이캐스팅 공정에서 Load-cell 센서 기반 사출 및 금형 압력 데이터의 신뢰성 확보 기술에 관한 연구: 이광희\*, 최형규((주)세미코)

**Keywords:** 다이캐스팅, 로드셀센서, 압력데이터, 신뢰성, 공정모니터링

1. 연구 배경 및 필요성 최근 자동차 산업을 중심으로 경량화 및 고효율화를 위한 대형 알루미늄 다이캐스팅 부품의 수요가 급격히 증가하고 있으며, 이에 따라 멀티 캐비티(Multi-cavity) 금형 및 대면적·박육 구조 부품의 적용이 확대되고 있다. 그러나 이러한 고난도 주조 부품의 생산 과정에서는 충전 불균형, 국부 변형, 코어핀 파손 등 다양한 공정 불안정 요소가 발생하며, 이는 최종 제품 품질 저하 및 불량률 증가로 이어지고 있다. 기존 다이캐스팅 공정에서는 주조 중 금형 내부 상태를 실시간으로 파악할 수 있는 수단이 제한적이었으며, 대부분의 품질 검증이 사후 검사에 의존하고 있다. 이러한 방식은 불량 발생 이후에만 문제를 인지할 수 있어 생산 비용 증가와 품질 리스크 확대의 원인이 된다. 따라서 금형 내부의 공정 상태를 실시간으로 감지하고 이를 기반으로 품질 이상을 사전에 예측할 수 있는 기술의 필요성이 지속적으로 제기되어 왔다. 본 연구는 이러한 산업적 요구에 대응하기 위하여, 금형 내부 압력 변화를 실시간으로 계측할 수 있는 초소형 로드셀 기반 몰드아이(MoldEye) 센서 시스템과, 수집된 데이터를 활용한 AI 기반 품질 예측 알고리즘을 융합한 스마트 주조 품질 예측 기술 개발을 목표로 한다. 이를 통해 다이캐스팅 공정에서 발생하는 이상 징후를 조기에 감지하고, 불량 발생을 사전에 예방하는 지능형 품질 관리 시스템을 구현하고자 한다. 2. 연구 목표 및 개발 내용 본 연구의 최종 목표는 다음과 같이 정의된다. 1)금형 내장형 압력센서를 활용한 실시간 스마트 센싱 모듈 개발 2)공정 이상 감지와 불량 간의 상관관계 분석을 통한 AI 품질 예측 알고리즘 개발 3)AI 기반 현장 연동형 품질 예측 소프트웨어 및 알람 시스템 개발 이를 위해 다음과 같은 세부 개발 내용을 설정하였다. - 금형 내부 삽입형 초소형 로드셀 센서 구조 설계 및 제작 - 반복 하중 환경(50,000회 이상)에서의 내구성 확보 - 20채널 이상, 300Hz 이상의 고속 데이터 수집 시스템 구축 - 주조해석 기반 센서 최적 설치 위치 선정 - 수집 데이터 전처리 및 학습용 데이터셋 구축 - 이상 패턴 분석을 위한 LSTM 및 CNN 기반 AI 모델 개발 - 품질 예측 소프트웨어 및 사용자 인터페이스 구현 이러한 목표와 개발 범위는 과제 신청 단계에서 구체적으로 정의되었으며, 본 연구는 해당 계획을 기반으로 수행되었다. 3. 1차년도 연구 수행 내용 본 연구의 1차년도에는 주로 센서 하드웨어 개발과 실증 테스트를 중심으로 다음과 같은 연구가 수행되었다. 3.1 몰드아이 센서 프로토타입 개발 초기 단계에서는 다이캐스팅 공정 환경에 적합한 센서 요구특성 분석을 수행하였다. 금형 내부의 고온·고압·고진동 환경을 고려하여 내구성과 내식성이 우수한 SUS630 소재를 적용하였으며, 최대 하중 100kgf 용량의 초소형 로드셀 구조를 설계하였다. 초기 설계안(φ30×40)에서 시편금형 적용을 고려하여

구조를 재설계하였으며, 최종적으로  $\phi 22 \times 12$  크기의 초소형 센서 프로토타입을 제작하였다. 센서 설치 방식은 자성체 영향에 의한 측정 오차를 방지하기 위해 볼트 체결 방식으로 결정하였다. 또한, 선행연구를 통해 확보된 6채널 데이터 수집 모듈을 활용하여 실증 테스트를 위한 계측 환경을 구성하였다. 해당 모듈은 무선 통신을 통해 PC로 데이터를 전송할 수 있도록 설계되었으며, 자동 영점 보정 기능을 포함한다. 3.2 실증 테스트 및 데이터 수집 850톤급 다이캐스팅 설비를 대상으로 시편금형 실증 테스트를 수행하였다. 실제 주조 공정 조건에서 센서의 동작 안정성, 반복 정밀도, 데이터 수집 신뢰성을 검증하였다. 채널별 압력 데이터 분석 결과, 전체 센서에서 유사한 압력 변화 패턴이 확인되었으며, 금형 내부 압력 측정이 실제로 가능함을 확인하였다. 일부 채널에서 데이터 수신 불안정 현상이 관찰되었으나, 이는 커넥터 접속 구조의 한계로 분석되었으며 2차년도 개선 과제로 도출되었다. 특히 실측 압력이 설계 예상치(80kgf)보다 높은 약 180kgf 수준으로 나타남에 따라, 향후 센서 내구도 보강 및 구조 개선의 필요성이 확인되었다. 3.3 AI 학습 데이터 구축 AI학습을 위해 수집된 압력 데이터를 기반으로 결함 유형 정의, 데이터 변수 설계, AI 학습용 데이터셋 구축을 수행하였다. LSTM 및 1D-CNN 알고리즘을 활용한 시계열 분석 모델 구조를 설계하였으며, 품질 데이터와 센서 데이터 간의 상관관계 분석 체계를 구축하였다. 또한 주조해석을 통해 금형 내 압력 집중 위치를 분석하고, 센서 최적 설치 위치를 도출하였다. 이를 통해 실험 데이터의 신뢰성과 해석적 근거를 동시에 확보하였다. 4. 연구 결과 및 의의 1차년도 연구를 통해 다음과 같은 성과를 확보하였다. - 금형 내 삽입 가능한 초소형 몰드아이 센서 프로토타입 개발 - 실제 다이캐스팅 환경에서의 압력 측정 가능성 검증 - 실시간 공정 데이터 수집 체계 구축 - AI 기반 품질 예측을 위한 기초 데이터셋 확보 - 주조해석 기반 센서 위치 선정 방법론 확립 본 연구는 기존에 사후 검사 중심이었던 다이캐스팅 품질 관리 방식을 실시간-예측 중심으로 전환할 수 있는 기반 기술을 제시하였다는 점에서 큰 의의를 가진다. 5. 향후 연구 계획 2차년도 이후에는 다음과 같은 연구를 수행할 예정이다. - 20채널 이상 다채널 고속 인디케이터 보드 개발 - 센서 내구도 보강 및 구조 고도화 - 양산금형 적용 실증 테스트 확대 - AI 모델 고도화 및 품질 예측 정확도 향상 - 실시간 품질 예측 소프트웨어 플랫폼 구축 최종적으로는 다양한 다이캐스팅 제품군에 적용 가능한 범용 스마트 센싱 솔루션을 상용화하고, 주조 산업 전반의 품질 경쟁력 향상에 기여하고자 한다. 6. 결론 본 연구는 금형 내부 압력 센싱 기술과 인공지능 분석 기술을 융합하여, 다이캐스팅 공정의 실시간 품질 예측을 가능하게 하는 혁신적인 접근을 제시하였다. 1차년도 연구를 통해 핵심 요소기술의 가능성을 확인하였으며, 향후 고도화를 통해 스마트 주조 공정 구현 및 제조 디지털 전환에 기여할 것으로 기대된다.

#### [차제1-4 | 10:00] 초청강연

**대형?박육 차체부품용 금형의 열피로면처리 조건에 따른 열피로 및 용손 특성 평가:** 윤국태\*, 김주업, 이략규, 홍창완, 김용유(대구기계부품연구원), 양상규(대국정공(주)), 윤상일((주)삼기), 김형신(세아창원특수강)

**Keywords:** Compact Pressure Die-casting, Hard Coating, Nitriding, Thermal fatigue, Heat checking, Melt-out, Hot work tool steel

알루미늄 다이캐스팅 공정에서 열간 금형용 공구강은 고온 용탕과의 접촉에 의한 Thermal Cycle과 알루미늄 용탕 성분의 화학적 반응에 의해 표면 결함이 발생된다. 이러한 손상 메커니즘으로는 반복 가열-냉각에 의한 열피로 균열(Thermal Fatigue Cracking, Heat Checking)과 고온 용탕에 의해 금형 표면에 금속간화합물이 형성되고 탈락되는 용손(Soldering, Erosion) 현상이 지배적이다. 본 연구에서는 주조기 톤수의 컴팩트화(Downsizing) 및 미세조직 컴팩트화로 고품질 다이캐스팅 제품 생산을 목표로 하는 컴팩트 가압주조(Casting Of Minimized Pressure Applied for Composite Technology, COMPACT) 공법 개발에 있어 다이캐스팅 공정은 도의 하강에 의한 열피로 균열지표에 미치는 영향을 고찰하고, 질화처리와 표면 coating 적용에 따른 열피로 및 용손 현상을 고찰하였다. 개발 컴팩트 주조 공정의 용탕온도를 고려한 열피로시험 결과,  $\Delta T$ 의 축소에 의한  $\Delta \sigma$  감소로 VD급 금형재의 열피로 균열지표인 최대 균열길이와 총 균열길이가 크게 감소되어 금형수명 향상 효과가 확인되었다. 또한 질화처리시 형성되는 질화층의 두께에 따른 상온~700°C 열피로 시험결과 확산층 내에서 균열성장이 유지되는 현상이 나타나고, 무처리재 대비 질화처리 시험재는 최대 균열길이가 증가하는 반면 열피로 균열 발생 수는 감소시킬 수 있어 확산층 두께제어로 금형수명 확보가 가능함을 알 수 있었다. AlTiCr(Si)N, AlCrTiN coating 처리를 적용시 micro 균열 발생 적고 소수의 균열이 조대하게 진전되며, 열피로 시험 후 잔존된 표면 coating층이 관찰되어 초기 열피로 균열 생성 지연효과와 선택적 균열 전파 현상이 확인되었다. Carbon coating 시험재는 STD61 matrix재 대비 최대 균열길이가 크고 타 coatingc 처리재 대비 균열발생 수도 많아 그 유효성이 낮은 것으로 예상되나 coating층 두께가 상대적으로 얇게 구성(약 2  $\mu\text{m}$ )되어 두께 조정이 요구되었다. 모사시험 결과에서 coating층에 의해 열피로 초기 균열의 생성 저지가 가능함이 확인되며, 최초 형성된 소수의 균열은 선택적으로 응력집중에 의해 균열이 크게 진전, 전파되고 이후 코팅층의 탈락과 동시에 matrix가 노출되어 새로운 crack의 발생과 추가 진전이 진행되었다. 이에 P(C)VD hard coating 표면처리에 의해 초기 균열발생 시점 지연효과와 함께 가스 또는 가스연질화처리 등에 의한 확산층(두께 제어)을 동시 적용함으로써 내열피로 특성 확보가 가능할 것으로 판단된다(Hard coating + Nitriding 구조). 그리고 개발 고연신 후보 Al합금 용탕과 표면처리재에 대한 용손특성 평가 결과, 비코팅 STD61 matrix재의 용탕반응에 의한 용손 깊이가 가장 크게 나타나고, AlTiCr(Si)N, AlCrTiN 처리 시험편의 내용손성이 가장 우수하였으며 610°C 용탕온도 조정시 용손현상도 현저하게 감소하였다. \* Acknowledgements 본 연구는 2024년 산업통상부 소재부품기술개발사업(이종기술융합형/투자연계형, RS-2024-00421087)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### [차제2-1 | 10:40] 초청강연

**대형주조품 대쉬카울판넬 주조 해석을 통한 주조 방안 선정:** 고건호, 임영택\*(서울대학교)

**Keywords:** 다이캐스팅, 주조, 대형주조품

**[자세2-2 | 11:00] 초청강연**

**온도 시계열 데이터를 이용한 다이캐스팅 공정 불량 예측 모델 개발:** 민향기, 정준희, 박준희, 한도석, 김낙수\*(서강대학교)

**Keywords:** 고압 다이캐스팅, 온도, 결함 예측, 인공지능

본 연구는 고압 다이캐스팅(HPDC) 공정에서 발생하는 미충전, 균열, 유동 자국 등 주요 외관 결함을 실시간으로 예측하기 위한 데이터 기반 공정 관리 기법을 제안한다. 기존의 육안 판별 및 사후 비파괴 검사는 엔지니어의 숙련도에 의존하며 비용과 시간이 많이 소모된다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 ALDC12 소재의 Plate 형상 제품을 대상으로 AnyCasting v6.3을 활용한 고압 다이캐스팅 해석을 수행하였으며, 온도 변화가 극심한 주요 지점 5곳을 선정하여 150개 사이클 시계열 온도 데이터를 확보하였다. 다이캐스팅 공정 사이클은 용탕 주입, 금형 개방, 제품 탈거, 윤활 및 냉각, 금형 폐쇄 단계로 구분되며, 금형 개방 단계에서 결함을 판별한다. 수집된 온도 데이터와 제품 결함의 복잡한 비선형 관계를 학습하기 위해 AutoML(AutoGluon)을 적용하였으며, 다층 앙상블 학습을 통해 결함 예측 모델을 탐색하였다. 연구 결과, LightGBM 기반 베이스 모델들을 결합한 Weighted Ensemble이 최적 모델로 선정되었으며, 실제 공정 시계열 데이터 적용 시 89%의 결함 예측 정확도를 달성하였다. 본 연구는 다이캐스팅 공정의 실시간 결함 판별 자동화를 통해 생산 효율을 높이고 불량 유무를 사전에 판단할 수 있는 지능형 제조 시스템의 가능성을 제시한다. 이 연구는 2024년도 산업통상자원부 소재부품기술개발사업 지원에 의한 연구임(RS-2024-00421087)

**[자세2-3 | 11:20] 초청강연**

**대형 다이캐스팅 금형 코팅을 위한 대면적용 원형 아크소스 및 고출력 이온스퍼터링 소스를 활용한 하이브리드 코팅 시스템:** 이수용\*((주)이노센테크)

**Keywords:** 하이브리드 코팅, 대면적 원형 아크소스, 이온스퍼터링, 나노복합구조

최근 자동차 산업은 차체 경량화와 제조 원가 절감을 위해 초대형 부품을 한 번에 주조하는 기가캐스팅 공법을 도입하고 있다. 이에 따라 다이캐스팅 금형은 대형화 되고 있으며, 용융 금속의 고압 분사 환경에서 견딜 수 있는 초경도 및 고내열 표면처리 기술에 대한 수요가 급증하고 있다. 기존의 단일 아크 이온 플레이팅 공정은 높은 이온화율을 바탕으로 우수한 밀착력을 제공하지만, 증착 과정에서 발생하는 마이크로 파티클로 인해 표면 조도가 거칠어지는 고유의 한계가 있다. 이는 대형 금형 표면에서 용융 금속의 용착을 유발하고, 이형성을 저하시켜 생산 효율을 떨어뜨리는 주요 원인이 된다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 대면적 원형 아크 소스와 고출력 이온 스퍼터링 소스를 융합한 하이브리드 코팅 시스템을 이용하여 기존 아크 이온공정의 단점을 극복하고자 한다.

**[자세3-1 | 14:00] 초청강연**

**컴팩트 가압주조용 고유동·고강도 알루미늄 제조기술 개발:** 서판기\*, 유기량(삼보오토주식회사)

**Keywords:** 알루미늄 합금, 잉곳, 고유동

본 연구에서는 알루미늄 복합소재 매트릭스 합금 생산을 위한 고효율 잉곳 연속 주조 공정 설계를 진행하였으며, 고박욕 다이캐스팅 제품 시주조를 통한 개발 합금의 유동성을 평가하였다. 스크랩을 활용한 알루미늄 잉곳 제조를 위해 스크랩 품위별 분류 체계를 구축하였다.

**[자세3-2 | 14:20] 초청강연**

**대형·박육 차체부품용 금속복합소재 적용 AI 합금 설계 기술 개발:** 최승규(한국자동차연구원, 전북대학교), 방현식, 김진평\*(한국자동차연구원)

**Keywords:** Aluminum alloy, Casting Of Minimized Pressure Applied for Composite Technology, Fluidity, Mechanical properties

글로벌 대형 차체 부품 주조 기술 개발 및 연구 고도화에 맞추어 적은 주조기 톤수에서 대면적 차체 부품 주조를 가능하게 하기 위한 컴팩트 가압주조 기술 연구가 진행되고 있다. 이에 저압 환경에서 대형 주조품의 성형성 및 기계적 특성을 확보하기 위해 높은 유동성과 고강도 특성을 지닌 알루미늄 합금 개발이 요구된다. 이에 본 연구에서는 합금의 요구 특성을 만족하기 위해 열역학 시뮬레이션 해석을 기반으로, 첨가 원소 합금의 조성 범위 변수에 따른 고-액 공존 영역 대비 인장강도 DB를 구축하였다. 구축한 DB를 기반으로 새롭게 설계한 알루미늄 합금에 FeMn 금속복합소재를 적용하여 기계적 특성 향상을 유도하였으며, 유동성 평가 및 기계적 특성 평가를 통해 설계 합금의 요구 특성 만족도를 평가하였다.

**[자세3-3 | 14:40] 초청강연**

**자이언트 캐스팅 기반 대형 일체형 셀 프레임 언더바디 부품 개발 및 주조 특성 평가:** 최지석, 나규제, 송호섭, 유한결, 윤상일\*(주식회사 삼기)

**Keywords:** 자이언트 캐스팅, 일체화차체모듈, 센터 플로어 언더바디, 저탄소 알루미늄 합금

전동화 확산과 탄소중립 요구가 강화되면서 차체 언더바디의 대형 일체화와 박육화가 핵심 제조 트렌드로 부상하고 있다. 본 발표에서는 자이언트 캐스팅 기반 대형 일체형 셀 프레임 언더바디 부품 개발 과제의 전반적인 추진 내용과 셀 프레임 언더바디 시시출을 통한 주조 특성 평가 결과를 소개한다. 대상 부품은 대면적 박육 구간과 형상 복잡부를 동시에 포함하여 충전 안정성 확보와 결함 저감, 변형 거동 관리가 주요 과제로 작용한다. 과제 수행은 구조 설계와 주조 방안 수립, 게이팅과 벤트 설계, 고속 충전 공정 조건 정립, 금형 온도 밸런스 및 스프레이 조건 최적화, 시시출 기반 결함 모드 확인과 조건 보정의 흐름으로 추진하였다. 시시출은 복수 치수로 단계적으로 수행하며 금형 수정과 공정 조건 보정을 반복하였고, 대형 박육 일체품에서 발생 가능한 취출 안정성, 충전 및 유동 불안정, 국부 수축 및 표면 결함, 소착, 진공 안정성 저하 등 주요 리스크를 확인하였다. 또한 합금 적용과 냉각 구형 조건에 따른 성형성과 품질 민감도를 점검하여 공정 안정화 우선순위를 도출하였다. 본 발표는 셀 프레임 언더바디의 일체형 주조 전환 과정에서 확인된 핵심 이슈와 개선 방향을 정리하고, 후속 치수 변형 분석과 조립 및 신뢰성 검증 단계로의 연계 전략을 제시한다.

**[자세3-4 | 15:00] 초청강연**

Assessment for the Sustainable Giant-HPDC Processes with Die-Casting Mold Components Manufactured by using Hot-Rolled Diffusion Bonding Materials: Sang Soo Shin\*, Tae Han Kim, Seong Ho Hwang(R&D Center, Oh-Sung Co. Ltd)  
 Keywords: Synthesis&Processing/Assembly/Bonding, Properties/Mechanical/Strength, Performance/Sustainability/Material availability, Giant Casting

In this study, a hot-rolled solid-state diffusion process was used to securely bond mold steel, copper, and beryllium copper. Using this material, a chill vent component for a high-pressure die-casting mold was developed. As the heating temperature and reduction ratio increased, the shear strength of the dissimilar materials increased. Pure copper was inserted between the mold steel and beryllium copper to enhance simultaneously the bonding strength and thermal conductivity of the both materials. The role of a die-casting chill vent is to exhaust air within the mold cavity and prevent the outflow of molten aluminum to ensure a sound casting. The developed chill vent component was installed in a die-casting mold and field-tested, including measuring the venting length. Based on this, the development of functional mold components for a sustainable die-casting process was explored.

**[자세4-1 | 15:40] 초청강연**

주조해석을 통한 자이언트 캐스팅 초대형 금형의 주조방안 및 공정조건 영향 분석: 윤준목\*, 조민호(애니캐스팅소프트웨어)  
 Keywords: 자이언트 캐스팅, 주조해석, 셀프레이밍, 기포, 변형

1. 서론 최근 자동차 산업에서는 부품 통합을 통한 경량화 및 원가 절감을 위해 6,000톤급 이상의 초대형 다이캐스팅 공법인 ‘자이언트 캐스팅(Giant Casting)’ 기술 도입이 가속화되고 있다. 특히 전기차의 일체형 언더바디(Cell Frame) 부품은 크기가 매우 크고 형상이 복잡하여 주조 결함 제어 및 금형 수명 확보가 필수적이다. 본 연구에서는 주조해석 소프트웨어를 활용하여 초대형 셀프레이밍 언더바디의 주조 방안을 설계하고, 해석 기반의 최적화를 통해 성형 품질을 확보하는 과정을 검토하고자 한다. 2. 연구방법 및 내용 본 연구에서는 전용 주조해석 소프트웨어(AnyCasting)를 활용하여 6,000~8,000톤급 장비 사양을 반영한 공정 검토를 수행하였다. - 공정변수 분석 : PQ2 분석을 통한 인게이트 단면적, 사출속도 및 압력을 검토하여, 제품의 형체력 및 장비 사양 검토 - 주조방안 검토 : 용탕 유동패턴 분석을 통하여 오버플로우 및 벤트의 위치 설정 - 변형 제어 : 냉각채널 및 금형온도에 따른 제품 및 금형 변형 예측 3. 결론 주조 해석 결과, 중앙 인게이트 두께 및 라운드 형상 변경을 통해 용탕의 충전 거동이 개선되었으며, 가스 배출 효율이 향상됨을 확인하였다. 또한 초대형 금형의 열변형 예측을 통해 주조 시 발생할 수 있는 치수 문제를 사전에 검토하고 방지책을 마련하였다. 본 연구를 통해 초대형 일체형 부품의 주조 공정 설계 시 주조 해석이 결함 예측 및 금형 설계 최적화에 유효한 도구임을 확인하였으며, 이는 향후 8, 000톤급 이상 자이언트 캐스팅 양산 기술 확보에 기여할 것으로 기대된다

**[자세4-2 | 16:00] 초청강연**

자이언트 캐스팅 환경에서의 서보 실린더 기반 실시간 교정 알고리즘 개발: 이광원\*(디라이트파트너)

Keywords: 자이언트 캐스팅, 서보 실린더 기반 실시간 교정, 대형 주조품 변형 제어, 전기차 차체 경량화, 후처리 공정 치수 정밀도

전기자동차 산업의 급성장과 함께 차체 경량화 요구가 증가하면서, 기존 수십 개의 부품을 용접하여 제작하던 차체 구조물을 단일 알루미늄 주조품으로 대체하는 기가캐스팅(Giga Casting) 기술이 주목받고 있다. 기가캐스팅은 생산 공정 단축, 부품 수 감소, 차체 강성 향상 등의 장점을 제공하지만, 대형 주조품 특유의 변형 문제가 품질 관리의 핵심 과제로 대두되고 있다. 기가캐스트 셀프레이밍(Cell Frame) 소재는 주조이형 시 금형 분리 과정에서의 변형, 냉각 과정에서의 열수축 변형, 게이트 커팅 및 디버링 등 후처리 작업 중 변형, 그리고 이송 및 적재 과정에서의 변형 등 다양한 원인에 의해 치수 변형이 발생한다. 이러한 변형은 후속 조립 공정에서 품질 불량을 야기하므로, 정밀한 교정 공정이 필수적이다.

**[자세4-3 | 16:20] 초청강연**

2D 및 3D 멀티모달 데이터를 활용한 다이캐스팅 외관 결함 검사 알고리즘 개발: 변영훈(한국생산기술연구원, UST), 윤준석, 조수혜, 서예찬, 김석진, 원홍인, 김동웅, 김문조(한국생산기술연구원), 윤종필\*(한국생산기술연구원, UST)

Keywords: 다이캐스팅 품질 관리, 멀티모달 융합, 표면 결함 탐지, 딥러닝

다이캐스팅 공정에서 발생하는 결함 검사는 외관(표면) 검사와 X-ray/CT 기반 내부 검사로 구분된다. 외관 검사에서는 크랙, 스크래치, 미성형 등 다양한 결함을 안정적으로 탐지해야 하며, 표면 텍스처 정보뿐 아니라 형상 정보를 통해 구분되는 결함도 존재한다. 이에 따라 2D 영상과 레이저 프로파일 기반 3D 형상 데이터를 함께 활용하는 멀티모달 검사 방식이 요구된다. 본 연구에서는 정합된 2D-3D 데이터를 입력으로 받아 결함 존재 여부 및 결함 유형을 예측하는 멀티모달 결함 검사 알고리즘을 제안한다. 제안하는 방법은 2D 영상과 3D 형상 데이터로부터 각각 특징을 추출한 뒤, Attention 기반 융합 모듈을 통해 상호 보완적인 정보를 통합하여 분류 성능을 향상시키도록 설계하였다. 정합된 2D-3D 벤치마크 데이터셋을 이용해 제안하는 방법의 성능을 검증하고 향후 현장 데이터 적용 가능성을 검토하였다.

**[자세4-4 | 16:40] 초청강연**

현장 변동에 강인한 홀 치수 변형 인식 및 결함 판정 파이프라인 개발: 문정민\*, 김주희(한국광기술원)

Keywords: 홀 치수 측정, 홀 변형 인식, SAM 기반 분할, 타원 피팅, k-시그마 통계 판정, CycleGAN 전처리

제조 현장에서 홀(Hole) 치수의 미세한 변형(직경 변화, 타원화, 편심 등)은 조립 불량과 기능 저하로 직결되므로 신속하고 신뢰도 높은 자동 검사가 필요하다. 그러나 수동 측정 및 샘플링 검사는 인력·시간 부담이 크고 공정 변동을 즉시 반영하기 어렵다. 또



한 현장 영상은 조도 변화, 표면 반사, 노이즈로 인해 홀 경계가 불명확해져 기존 규칙 기반 영상처리만으로는 치수 측정과 결함 판정의 안정성이 제한된다. 본 연구는 이러한 한계를 해결하기 위해 홀 치수 기반 변형 인식 및 결함 판단 자동화를 목표로, CycleGAN 전처리, SAM 기반 정밀 분할, 타원(ellipse) 피팅 기반 치수 정량화,  $k\sigma$  통계 판정을 결합한 방법을 제안한다. 먼저 CycleGAN 전처리를 통해 카메라·조명·표면 상태 차이로 인한 도메인 편차를 완화하여 입력 영상의 일관성을 확보한다. 다음으로 파인튜닝된 SAM을 적용해 반사·그림자 등 환경 변화에도 강인한 홀 ROI를 정밀 분할한다. 분할된 마스크 윤곽선에는 타원 피팅을 수행하여 중심과 장·단축 등 치수 파라미터를 추정함으로써 홀 변형을 해석 가능한 형태로 정량화한다. 마지막으로 정상(OK) 레퍼런스의 평균과 표준편차로 허용 범위를 정의하고,  $k\sigma$  기준에서 벗어나는 경우를 결함으로 판정하여 라벨 데이터가 제한된 상황에서도 설명 가능한 기준 기반 판단을 제공한다. 정상 50개와 고장 50개로 구성된 테스트 데이터(총 100개) 평가에서 제안 방법은 정확도 81%를 달성하였다. 본 연구는 현장 영상 품질 변동이 존재하는 조건에서도 홀 치수 변형을 안정적으로 정량화하고 결함을 판정할 수 있음을 보여주며, 향후 공정 조건별 레퍼런스 분리, 다변량 통계 기준 도입, 임계값 적응화를 통해 성능 및 현장 적용성을 추가로 향상할 수 있다.

## 가공-용접 및 접합 I

Room 2층 201B, 4월 29일

### [용접 1-1 | 09:00]

**사용후핵연료 심층처분용기 무산소동 마찰교반용접부 특성 연구:** 김정민\*, 김남규, 고신범, 송상우(한국재료연구원)

**Keywords:** 무산소동, 마찰교반용접, 사용후핵연료, 심층처분용기

국내 가동원전의 지속적인 운영으로 사용후핵연료 발생량이 증가함에 따라, 국내 원전 사용후핵연료 저장시설의 포화시점이 점차 도래하고 있다. 이에 따라 사용후핵연료 처분기술에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다. 국내에서는 사용후핵연료 처분 방식으로 심층처분을 계획하고 있으며, 이를 위한 연구용 지하연구시설(URL) 구축이 예정되어 있다. 사용후핵연료 심층처분용기 용기 및 덮개에 사용되는 재료는 무산소동으로 고려되고 있으며, 용기와 덮개의 밀봉용접은 마찰교반용접과 전자빔용접이 후보로 검토되고 있다. 두 용접공정을 비교한 결과, 마찰교반용접의 기계적 성질이 우수하여 스웨덴 및 핀란드에서 채택되었으며, 국내에서도 사용후핵연료 심층처분용기 무산소동에 대한 마찰교반용접 연구가 요구된다. 본 연구에서는 무산소동(ASTM C10100) 12 mm 판재를 대상으로 회전속도 1600 RPM 및 용접속도 400 mm/min 조건에서 마찰교반용접을 수행하여 제작된 건전한 용접시험체에 대한 미세조직 및 기계적 성질을 평가하였다.

### [용접 1-2 | 09:15]

**오스테나이트계 스테인리스강 배관 용접 시 발생하는 열 변색부 내식성 검증에 관한 연구:** 이창민\*, 유진석, 김진호, 김종배, 이재희(HD 한국조선해양)

**Keywords:** 오스테나이트계 스테인리스강, Ar 퍼징, 열 변색부, 내식성

오스테나이트계 스테인리스강 배관 용접 시 열 변색을 최소화하기 위해 Ar 퍼징 공정이 적용되고 있으나, 질식 위험 등 안전 상의 문제로 퍼징 공정을 생략한 용접 기술 개발이 요구되고 있다. 다만 퍼징 공정 생략 시 발생하는 열 변색부 심화에 대한 건전성 검증은 반드시 필요하다. 본 연구에서는 기존 퍼징 공정의 산소 농도 대비 퍼징 생략 시 발생하는 열 변색부의 내식성을 다 각도에서 비교 분석하여 건전성을 검증하였다. 우선 GTAW 용접 기법을 통해 퍼징 유/무에 따른 용접 열 변색부를 모사하였다. 또한 내식성은 동전위 분극시험 및 장기 침지 시험을 통해 기본적인 내식 성능을 비교 분석하였으며, 열 변색부를 직접 해양 대기에 장기간 노출하는 옥외폭로 시험을 통해 표면의 부식 발생 경향을 검증하였다. 결과적으로 3가지 시험 모두 퍼징 공정 유무에 따른 내식성 차이는 발생하지 않았으며, 이를 통해 퍼징 공정 생략에 대한 용접부 건전성을 확보하였다.

### [용접 1-3 | 09:30]

**SUS304 seam Tube의 TIG 용접부의 인장과 조직 변화:** 박은혜(한국폴리텍2대학, 인하대학교), 이종혁, 장병록\*(인하대학교)

**Keywords:** 스테인리스강 304, seam tube, TIG, HAZ, 인장시험

Stainless Steel 304 Seam Tube (용접관/심관)는 뛰어난 내식성, 가공성, 용접성을 바탕으로 다양한 산업 분야에서 광범위하게 사용된다. 스테인리스강 튜브 용접부의 건전성은 SUS304 튜브 간 TIG 용접부를 대상으로 미세조직 및 기계적 특성을 비교 분석하였다. 용접부의 특성 평가는 광학현미경(OM)을 이용한 미세조직 관찰, 경도 분포 측정, 인장시험, 그리고 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM)을 이용한 파단면 분석을 통해 수행하였다. 미세조직 관찰 결과, Ni/Cr 당량비 계산 결과에서 예측된 바와 마찬가지로 두 용접부 모두 FA(Ferrite-Austenite) 모드로 응고한 것으로 판단되었다. 즉, 응고 과정에서  $\delta$ -페라이트가 선행 형성된 후 오스테나이트로 변태하는 응고 경로가 관찰되었다. 또한 이러한 조직적 특징은 경도 분포에서도 반영되어, 특정 구간에서의 경도 변화가 미세조직의 국부적 차이와 함께 나타났다. 인장시험 결과 FE-SEM 기반 파단면 분석을 통해 파단 위치가 열영향부(HAZ)임을 확인하였다. 결론적으로, 스테인리스 튜브 맞대기 용접부의 기계적 건전성은 Ni/Cr 당량비에 의해 결정되는 응고모드와 이에 따른 미세조직 및 경도 분포 특성, 그리고 인장시험 및 FE-SEM 파단면 분석을 통해 평가할 수 있음을 확인하였다.

### [용접 1-4 | 09:45]

**다공성 316L 스테인리스강 소결체 펄스 TIG 용접부 미세조직 및 기계적 성질에 대한 연구:** 이진희, 문준오\*(국립창원대학교), 김세현(유니락)

**Keywords:** 통합가스시스템, 필터, 펄스 TIG welding, 다공성 금속 소결체, 316L 스테인리스강, 미세조직, 기계적 특성

반도체 제조 공정 중 순수한 가스를 공급하기 위해 불순물을 걸러 주는 통합가스시스템 필터가 적용되고 있다. 일반적으로 필터는 소결 공정을 통하여 open pore(개기공)를 형성함으로써 다공성 구조를 가지게 한다. 이러한 구조는 열전도율을 낮출 뿐만 아니라 구조적 물성을 열위하게 하여 용접 시 균열 발생 민감도를 높게 된다. 본 연구에서는 다공성 소결체 316L 스테인리스강 용접부 미세조직 변화 및 기계적 특성을 조사하였으며 다공성 316L 스테인리스강 소결체와 316L 스테인리스강 압연 판재를 다양한 조건에서 펄스TIG 용접 하였다. 용접부의 미세조직은 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM), 전자후방산란회절(EBSD) 분석을 통해 관찰하였다. 다음으로 용접부의 기계적 특성은 경도, 나노 압입 및 인장 시험을 통해 평가하였으며, 용접부 조직과 기계적 특성 간의 상관관계를 분석하고 이를 통해 최적의 용접 조건을 도출하였다.

### [용접 1-5 | 10:00]

**Relieving Residual Stress in Heterogeneous Joints of C/C-SiC Composites and 410B Stainless Steel via Composite Interlayer Engineering:** Haitao Zhu(Department of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology (HIT)),

Sujung Son\*(Department of Materials Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH)), Yanyu Song, Duo Liu, Xiaoguo Song(Department of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology (HIT)), Hyoung Seop Kim\*(Department of Materials Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH))

**Keywords:** C/C-SiC composite material, Brazing, Thermal expansion mismatch, Interlayer

Carbon fiber-reinforced Carbon/Silicon Carbide (C/C-SiC) composites are prime candidates for next-generation braking components in high-speed rail, such as the CR450 project, due to their exceptional thermal stability. However, integrating these composites with structural metals like 410B stainless steel presents a significant challenge: the drastic mismatch in coefficients of thermal expansion (CTE) leads to excessive residual stress and joint failure. This study addresses these issues by introducing a novel composite interlayer design during the brazing process. Unlike traditional direct joining, the proposed interlayer acts as a functional buffer to bridge the CTE gap between the ceramic matrix composite and the steel substrate. We systematically investigated the microstructural evolution at the interface and the mechanism of stress relaxation. The results demonstrate that the engineered interlayer effectively regulates interfacial reactions and optimizes the stress distribution within the joint. Consequently, the mechanical integrity and reliability of the C/C-SiC/410B brazed joints are significantly enhanced, providing a robust solution for heterogeneous material integration in extreme braking environments.

#### [용접 1-6 | 10:15]

**고상접합된 SS 304에서 결정립계 석출상이 수소취성에 미치는 영향:** 최동현(부산대학교), 손영훈, 김현준(동화엔텍), 강남현\*(부산대학교)

**Keywords:** 스테인리스강, 수소취성, 확산접합, 석출물

최근 기후 변화 대응을 위한 친환경 수소 에너지의 수요가 급증함에 따라, 수소 저장 및 운송을 위한 인프라 구축의 중요성이 대두되고 있다. 특히 수소 취화(Hydrogen Embrittlement)는 수소 노출 환경에서 강재의 급격한 파단을 유발하는 주요 원인으로 지목된다. 오스테나이트계 합금은 페라이트계 대비 우수한 내수소취성을 지녀 수소 환경용 소재로 적합하며, 이를 활용한 인쇄회로 기판형 열교환기(PCHE)는 고효율 수소 기화를 위한 핵심 부품으로 주목받고 있다. PCHE 제작 시 적용되는 고상 접합 공정인 확산 접합은 고온-고압 조건에서 수행되므로, 공정 중 sigma 상 및 탄화물과 같은 2상 석출물이 형성될 수 있다. 결정립계에 형성된 이러한 석출상은 기계적 물성을 저하시키는 것으로 알려져 있으나, 수소 취성과의 구체적인 상관관계에 대한 연구는 여전히 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 SS 304 2t판재를 활용하여 확산 접합 시험편을 제작하고, 전기화학적 충전 방식으로 수소를 주입하였다. 이후 저속변형인장시험(SSRT)을 통해 수소취화 민감성을 정량적으로 평가하였다. SEM 및 EBSD 분석을 통해 미세조직의 변화와 변형 거동, 파단면을 분석하였으며, 이를 바탕으로 수소 유기 균열(HIC)의 발생 메커니즘과 미세조직적 인자 간의 상관관계를 규명하고자 한다.

#### [용접 1-7 | 10:30]

**철 분말의 DED 방식 3D 프린팅 적층품질에 미치는 공정변수의 영향에 관한 연구:** 이목영\*, 배규열, 홍석현(포스코)

**Keywords:** 3D printing, DED, Process parameters, Optimization, Fe 분말, Quality

21세기에 들어선지도 25년이 지나면서, 인류사는 전환기를 맞이하게 되었다. 19세기의 산업혁명으로 구축된 전통제조산업은 AI에 의하여 종말을 고하고 새로운 질서로 재편되는 과정으로 진입하게 되었다. 일 예로 최근 새로운 산업으로 각광을 받고 있는 데이터 센터는 전력, 냉각, 안보 등의 이유로 우주에 건립하는 프로젝트를 진행하고 있다. 이에 따라 소재산업에도 일대 혁신의 바람이 불고 있는데, 구글에서는 딥마인드의 AI 모델(GNoME)를 사용하여 결정구조의 안정성을 예측하여 약 38만 개의 새로운 소재성분을 설계하였다. 3D 프린팅(혹은 AM, 적층제조)은 소재를 연속적으로 쌓아 가면서 구조물을 제조하는 것으로 특정한 형상의 몰드내에 재료를 쏟아 붓는 전통적인 방식에 비하여 제조 과정이 단순하고 다양한 조성을 구현할 수 있는 혁신적인 제조기술이다. 이 기술은 현장에서 필요한 부품을 직접 생산할 수 있으며, 급열/급냉으로 강도가 높고, 비평형성분계의 소재제조가 가능하고, 경사기능합금 등 다양한 소재/부품의 제작이 가능하다. 그러나, 0.1 mm 가량의 작은 분말을 연속적으로 적층하여 가공/재료를 등 내부결합, 제조 시간/비용의 과다, 최종 제품의 치수 편차와 외관품질 등의 단점을 지니고 있다. 본 연구에서는 철 분말을 사용하여 3D 프린팅 적층제조 품질에 미치는 공정변수의 영향을 알아보았다. 3D 프린팅에 사용된 장비는 최대출력 500 W의 화이버 레이저와 분말송급시스템으로 구성된 DED 방식이었으며, 주요 공정변수는 레이저 출력, 분말 송급량 및 레이저 빔의 초점거리 등 이었다. 적층제조 품질은 외관, 적층 높이 및 단면미세조직 등을 조사하였다. 상기의 공정변수를 최적화하여 균일한 층간 적층량 확보 및 산화방지를 통하여 적층정밀도 향상 및 적층품질의 확보가 가능하였다.

#### [용접 2-1 | 10:45]

**Active Metal Brazing 이종접합 방열기판의 미세조직 비교 분석:** 권홍기(포항소재산업진흥원), 김준태, 이경훈(주식회사 코웰), 박상원\*(포항소재산업진흥원)

**Keywords:** Active Metal Brazing(AMB), 질화규소(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), 구리(Cu), 이종접합

전기자동차 및 전력 반도체 소자의 고출력화-고집적화가 가속화되면서, 안정적인 열 관리와 장기 신뢰성을 확보할 수 있는 고성능 방열 기판의 필요성이 급격히 증가하고 있다. 보고에 따르면 전자 소자의 주요 고장 원인 중 약 55% 이상이 과열에 기인하며, 이에 따라 효율적인 열 방출 기술은 소자의 성능 유지와 수명 연장에 핵심적인 역할을 담당한다. 세라믹 기반 방열 기판은 높은 전기 절연성과 우수한 열전도 특성을 동시에 갖추고 있어 전력 반도체 모듈 및 고신뢰 전자 소자의 기판 소재로 적합하다. 특히 질화규소(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)는 우수한 기계적 강도와 높은 열전도도를 동시에 확보할 수 있어, 기존 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN 기판 대비 기계적 신뢰성과 열 확산

능력 측면에서 장점을 가진다. 본 연구에서는  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 를 기판 소재로 적용하고, Active Metal Brazing(AMB) 공정을 이용하여 구리(Cu)와의 이종 접합 방열 기판을 제작하였다. 접합 온도 조건을 달리하여 시편을 제조한 후, 계면 반응층의 형성 거동과 미세조직 변화를 분석하였다. 또한 전단강도 시험을 통해 접합 강도를 정량적으로 평가하고, 미세조직 특성과 기계적 특성 간의 상관관계를 비교·고찰하였다. 이를 바탕으로 계면 반응층의 두께 및 상(phase) 형성이 접합 특성에 미치는 영향을 규명하고, 최적의 접합 온도 조건을 도출하였다. 본 연구 결과는 고신뢰  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}$  방열 기판 설계 및 공정 최적화에 대한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### [용접2-2 | 11:00]

**저융점 다성분 비정질 삽입재를 이용한 Ti 브레이징 접합부 계면의 미세조직 및 기계적 특성:** 노주원, 김동우, 이운서, 이진규\*(국립공주대학교)

**Keywords:** Ti 접합, 브레이징, 비정질, 삽입재, 급냉응고

Ti 및 Ti 합금은 높은 비강도, 우수한 내식성, 그리고 생체적합성 등의 장점을 바탕으로 항공우주, 해양, 화학 플랜트 및 의료기기 분야에서 폭넓게 활용되고 있다. 그러나 약 880°C 이상의 온도 영역에서는  $\alpha$ - $\beta$  동소변태 특성으로 인해 치수 변형과 조직 변화가 발생할 수 있으므로, 모재의 열적 손상을 최소화할 수 있는 접합 기술 확보가 중요하다. 접합 공정 중 브레이징 접합은 모재를 용융시키지 않고 저융점 삽입 금속의 용융과 확산을 통해 접합을 형성하는 효과적인 방법으로 주목받고 있다. 특히 급냉응고 공정으로 제조된 비정질 삽입재는 낮은 용점, 균일한 화학 조성, 우수한 젖음성 및 박편 제조 용이성 등의 장점을 지니고 있다. 본 연구에서는 Zr-Ti 합금을 기본 조성으로 하여 용점 저하를 위해 Co 및 Cu를 첨가하고, 급냉 응고 공정을 통해 리본 형태의 비정질 삽입재를 제조하였다. 삽입재의 열적 특성은 시차주사열량측정기(DSC)와 시차열분석기(DTA)를 이용하여 유리전이온도( $T_g$ ), 결정화온도( $T_x$ ), 고상선온도( $T_s$ ), 액상선온도( $T_L$ ) 등의 열적 거동을 분석하였다. 제조된 비정질 리본 삽입재를 적용하여 Ti 브레이징 접합을 수행하였으며, 브레이징 온도 변화에 따른 접합부 미세조직 형성 거동을 고찰하였다. 접합부의 미세조직 및 상 분석을 위해 주사전자현미경(SEM), 전자탐침미량분석(EPMA), 투과전자현미경(TEM)을 활용하였다. 또한 인장시험을 통해 브레이징 접합부의 기계적 특성을 평가하였다.

#### [용접2-3 | 11:15]

**Semi-solid brazing via CoCrFeNiCu<sub>x</sub> high-entropy alloy fillers: interfacial microstructure, mechanical properties, and joining mechanism of C/C-SiC composites and TZM alloy:** Wenlong Zhou(Harbin Institute of Technology), Sujung Son\*(POSTECH), Shengpeng Hu, Xiaoguo Song(Harbin Institute of Technology), HyoungSeop Kim\*(POSTECH)

**Keywords:** CoCrFeNiCu<sub>x</sub> HEA filler, Semi-solid brazing, C/C-SiC composites, TZM alloy, Interfacial microstructure, Mechanical properties, Formation mechanism

This study addresses the challenges of joining ceramic matrix composites (C/C-SiC) to refractory alloys (TZM) by proposing an innovative semi-solid brazing strategy. Using a CoCrFeNiCu<sub>x</sub> high-entropy alloy (HEA) filler, we leverage a unique dual-endothemic melting behavior that creates an adjustable semi-solid window. This approach ensures optimal fluidity while effectively suppressing deleterious interfacial reactions. Results indicate that the Cu-rich liquid phase initiates wetting, followed by the FCC phase replacing the liquid to form a continuous  $\mu\text{-Co}_7\text{Mo}_6$  layer on the TZM side. Simultaneously, an  $\text{M}_7\text{C}_3$  reaction layer and a SiC decomposition zone develop at the composite interface. Under optimized conditions (1180 °C for 15 min), the joint achieved a peak shear strength of 40.2 MPa. Notably, the joints maintained structural integrity at 800 °C, exhibiting an “anomalous strengthening” effect driven by high-temperature stress relaxation. Finite element simulations confirmed that fracture occurs at the Cu(s, s)/  $\text{M}_7\text{C}_3$  boundary, dominated by normal stress ( $S_{22}$ ). This work provides a robust framework for high-temperature interface design using HEA fillers.

#### [용접2-4 | 11:30]

**압력 조건 및 고온 열처리에 따른 일방향 다공성 구리 삽입 Cu-Sn계 천이액상확산접합부의 미세조직 및 기계적 특성:** 이수현(인하대학교), 김근수(호서대학교), 현승균\*(인하대학교)

**Keywords:** UPM, 천이액상확산접합, 일방향 다공성 구리, 금속간 화합물, Cu-Sn

최근 파워 모듈의 고전력화 및 소형화에 따라 구동 온도가 상승하고 있으며, 이에 따라 접합부의 고온 신뢰성 확보를 위한 접합 기술 개발이 요구되고 있다. 천이액상확산(Transient Liquid Phase, TLP) 접합은 용점이 높은 금속간화합물 층을 형성함으로써 고온 환경에서도 열적으로 안정한 구조를 유지할 수 있는 접합 기술로 주목받고 있다. 그러나 일방향 다공성 금속(Uni-directional Porous Metal, UPM)을 활용한 TLP 접합 연구는 아직 제한적이다. UPM은 기공이 일방향으로 배열된 구조를 가지며, 기공과 평행한 방향으로 우수한 열전도 특성을 나타내고 수직 방향으로 낮은 탄성율을 갖는다. 이러한 구조적 특성은 접합부 내 응력 분산 및 균열 전파 억제에 기여할 수 있으며, TLP 접합에서 확산 거동과 파단 특성에도 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 일방향 다공성 구리를 interlayer로 적용한 Cu-Sn계 TLP 접합부에 대해 압력 조건 및 고온 열처리가 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 접합은 thermo-compression 방식으로 서로 다른 압력 조건에서 수행되었으며, 접합 후 고온 열처리를 통해 잔류 Sn의 소진 및 IMC 층의 성장을 유도하였다. 접합부의 미세조직과 IMC 성장 거동을 분석하고, IMC 두께 변화의 시간 의존성을 확산 지배 성장 거동에 기반하여 평가하였다. 또한 전단 시험을 통해 UPM 적용 여부에 따른 기계적 특성을 비교하고, 고온 열처리에 따른 파단 지배 상의 변화를 분석하였다.

**[용접2-5 | 11:45]**

**복합진동 초음파 용접에서 혼팁 널 형상에 따른 접합 특성 비교:** 신지영\*, 박성범, 이재민, 김도형(비엠에스엔지니어링), Jun Mitsuyuki(Link-us CO., Ltd.)

**Keywords:** 복합진동 초음파 용접, 혼팁 널 형상, EBSD 미세조직, 배터리 탭 용접, 유효접합면적

복합진동 초음파 용접에서 혼팁 널 형상(Pyramid, Cone)이 Al 1100/Al 1050 이중 두께 접합의 기계적 특성 및 미세조직에 미치는 영향을 조사하였다. 동일 공정 조건에서 제작한 시편에 대해 인장 강도, 유효접합면적, 분진 발생량, EBSD 미세조직을 분석하였다. 인장 시험 결과 Cone 형상이 Pyramid 형상 대비 평균 5.05-5.9 kgf로 우수한 접합 강도를 나타내었으며, 모든 시편에서 PF(Pull-out Failure) 파단을 확인하였다. Cone 형상은 유효접합면적  $2.67 \text{ mm}^2$ (Pyramid  $2.21 \text{ mm}^2$  대비 +21%)로 접합 품질이 향상되었고, 고속 카메라(1000 fps) 분석에서 분진 발생량을 효과적으로 억제하였다. EBSD 분석에서는 Pyramid 형상 평균 결정립 크기  $2.9 \mu\text{m}$ (Cone  $3.3 \mu\text{m}$ ), KAM  $0.852^\circ$ (Cone  $0.914^\circ$ )로 미세화를 나타내었으나, Cone의 분진 억제와 유효접합면적 증가가 종합 강도 우위를 결정지었다. Cone 형상은 내부 배터리 용접 공정에 적용 시 접합 강도와 공정 안정성에서 우수한 것으로 판단된다.

**[용접2-6 | 12:00]**

**마찰교반용접과 전자빔용접 무산소동 용접부의 미세조직 및 황화물·염화물 환경에서의 부식 거동 비교:** 고신범(한국재료연구원, 국립부경대학교), 김승현\*(한국재료연구원), 채관일(서울대학교), 김정민, 송상우(한국재료연구원), 노상훈(국립부경대학교)

**Keywords:** Deep geological disposal, Canister, Corrosion, Electrochemistry, Friction stir welding, Electron beam welding, Chloride/Sulfide Environment

무산소동(Cu-OF)은 장기 지하 처분 환경에서 수만 년 이상의 건전성이 요구되는 사용후핵연료 처분용기 외피 소재로 적용되고 있다. 지하수에는 염화물 및 황화물 이온이 존재할 수 있으며, 저산소 조건에서의 부식 반응은 접합부의 국부적 취약성으로 이어질 가능성이 있다. 처분용기 밀봉 공정에는 전자빔용접(Electron Beam Welding, EBW)과 마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)이 주요 후보로 고려되고 있으며, 두 공정은 서로 다른 조직 형성 메커니즘을 나타낸다. EBW는 용융-응고 과정을 통해 상대적으로 조대한 조직을 형성하는 반면, FSW는 고상 접합 공정으로 미세 재결정 조직을 형성한다. 이러한 조직적 차이는 부식 반응의 개시 및 진행 거동에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 12T 무산소동에 대해 EBW와 FSW를 각각 적용하고, 두 공정에서 형성된 용접부 및 열영향부의 부식 거동을 비교하였다. 3.5 wt.% NaCl 용액과 실제 지하수 환경에서 기본 전기화학 특성을 확보한 후, 염화물·황화물 복합 환경과 저산소 조건에서 동전위분극시험(Potentiodynamic Polarization, PDP)과 전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)을 수행하여 Ecorr, Icorr 및 전하이동저항을 정량적으로 분석하였다. 더불어 동일 환경에서의 침지 실험을 통해 시간 경과에 따른 부식 진행 경향과 반응 특성을 평가하고, 전기화학적 지표와 상호 비교함으로써 초기 반응성과 장기 노출 조건에서의 거동 차이를 분석하였다. 이를 통해 EBW와 FSW 공정에서 형성되는 조직 차이가 염화물·황화물 환경에서의 부식 반응성에 미치는 영향을 종합적으로 규명하고, 처분용기 접합 공정 선택 및 장기 안전성 확보를 위한 공학적 판단 근거를 제시하고자 한다. 본 연구는 향후 구리 용접부의 환경 적합성 평가 체계 구축에 기여할 것으로 기대된다.

**[용접2-7 | 12:15]**

**리필마찰교반점용접공정을 활용한 구리 버스바 접합부의 부식 거동:** 유하영(한국생산기술연구원, 서울대학교), 김동진\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** Refill friction stir spot welding (RFSSW), Cu busbar, Corrosion behavior, Microstructure

이 연구는 리필마찰교반점용접(RFSSW) 공정을 활용하여 스페터, 과도한 결정립 조대화, 키햄 등 종래의 용접결합이 억제된 구리(Cu) 버스바의 고상 접합을 성공적으로 구현하고, 용접부 위치별 미세조직과 부식 거동간의 상관관계를 규명하고자 수행되었다. RFSSW 공정은  $30 \times 100 \times 1 \text{ mm}$  크기를 갖는 터프피치동(C11000) 시트 2장을 겹친 후, 스피들 속도 1600 rpm, 오프셋 약 1.1 mm 조건에서 1.2 초 간 회전과 압력을 인가시켜 최종적으로 겹치기 용접되었다. 용접부는 각각 교반부(Stir zone, SZ), 열-기계적 영향부(Thermo-mechanically affected zone, TMAZ), 열영향부(Heat-affected zone, HAZ), 그리고 모재(Base metal, BM)로 구분되며, 위치별 미세구조 거동은 주사전자현미경(SEM) 분석과 전자후방산란회절(EBSD) 분석을 통해 체계적으로 분석되었다. 용접부의 부식거동은 3전극 시스템에서 개방회로전위(OCP) 안정화 후, 전기화학 임피던스 분광법(EIS)와 선형 분극 저항법(LPR) 측정을 이용하여 평가되었다. 그 결과, 상대적으로 결정립이 미세하고 소성변형이 축적된 SZ와 TMAZ에서는 부식전위가 각각 약 -0.77 V로 나타났으며, 이는 BM(0.04V)에 비해 보다 음의 방향으로 이동되었음을 의미한다. TMAZ에서는 Nyquist 곡선상 반원의 직경이 가장 작게 나타났으며, 이는 용접 후 TMAZ 영역에서 전하이동저항이 가장 낮고, 부식저항에 가장 취약함을 의미한다. 이 연구를 통해 RFSSW 접합부 내 미세구조의 구배에 기인하는 국부 부식 거동이 실재한다는 것을 이해할 수 있으며, 대전력용 구리 버스바 접합부의 내구성 향상 설계를 위해 전기화학적 관점에서의 공정 및 소재의 이력에 대한 연구의 중요성을 시사한다.

**[용접3-1 | 14:00]**

**규제샌드박스 제도를 활용한 고망간강 액체수소 탱크의 육상 실증 및 선박 적용성 연구:** 유재석(한화오션, 부산대학교), 윤광희, 박종민(한화오션), 남지민, 최동현, 강남현\*(부산대학교)

**Keywords:** 용접, 고망간강, 액체수소 운송선, 충격 인성, 수소 취성

극저온용 고망간강은 현재 LNG 저장 소재로 상용화되어, 국제해사기구(IMO)의 독립형 탱크 타입 LNG 연료탱크에 적용되고 있다. 상용화 시점에 대한 기관별 전망은 다소 차이가 있지만, 향후 액체수소의 대량 수송을 위한 액체수소 운송선의 필요성에 대해서는 대체로 의견이 일치하고 있다. 하지만, 선박의 경우 액체수소 화물창용 재료 및 용접부에 대한 명확한 요구 기준은 마련되지 않

있으며, 관련 코드 기준상 육·해상 모두에서 액체수소를 저장할 수 없는 소재이다. 이에 본 연구에서는 극저온용 고망간강의 액체수소 저장 소재로서의 적용 가능성 평가를 위해, 강재보다 물성 확보가 어려운 용접부를 대상으로 저온 취성 및 수소 취성 저항성 등을 평가하였고, 규제샌드박스 제도를 활용하여 육상 실증탱크 제작을 승인받은 사례를 소개하고자 한다. 관련 연구 결과를 바탕으로 고망간강은 액체수소 운송선 화물창에 적용 가능한 것으로 판단되며, 대표적인 액체수소 저장 소재인 오스테나이트계 스테인리스강 대비 더 높은 강도를 가져 재료비 절감 및 생산성 향상이 가능한 경제성이 우수한 액체수소 저장 소재로 기대된다.

### [용접3-2 | 14:15]

**오스테나이트계 스테인리스 강 전자빔 용접부의 수소취화 거동:** 남지민(부산대학교 재료공학부), 이승건(한국재료연구원), 강남현\*(부산대학교 재료공학부)

**Keywords:** 스테인리스 강, 전자빔 용접, 용접이음부, 수소취성, 극저온 물성

오스테나이트 계 스테인리스강은 기후변화 해결을 위한 수소경제의 도입이 가시화되고 있는 현시점에서 액체수소를 저장하기 위한 가장 유력한 후보 소재이다. FCC 결정구조를 가지는 오스테나이트 계 스테인리스강은 변형 쌍정과 변형 유기 마르텐사이트의 형성에 따라 극저온에서 우수한 물성이 나타나나 이러한 변형 조직의 증가는 수소취화 민감도를 증가시키는 것으로 보고되고 있다. 극저온 물성과 내수소취성을 모두 확보할 수 있는 공정 및 합금 개발을 위해 연구들이 지속적으로 수행되고 있다. 용접 시 형성되는 응고 조직은 모재 대비 기계적 물성 저하를 유발하며 델타 페라이트는 오스테나이트 계 스테인리스강 용접부의 수소취화에 영향을 미치는 주요 미세조직으로 평가된다. 특히 오스테나이트계 스테인리스강의 기계적 물성 및 내수소취성 향상을 위한 미세조직 제어법은 아직 선택지가 제한적이며, 다양한 연구개발이 요구되에도 모재에 비해 용접부를 대상으로 한 성과는 미비하다. 기계적 물성과 내수소취성은 서로 상충하는 경우가 많아 이를 모두 적절히 확보할 수 있는 용접 야금학적 전략이 필요하다. 본 연구에서는 고에너지 밀도 용접 공정인 전자 빔 용접(Electron Beam Welding, EBW)을 적용하여 급속 냉각을 유도함으로써 용접부의 미세조직을 제어하고, 이에 따른 기계적 특성 및 내수소취성 향상 효과를 규명하였다. EBW 용접부의 특성을 기존 STS 316L 가스 텅스텐 아크 용접부와 레이저빔 용접부와 함께 비교하였다. 상온, -100°C, -196°C에서 저속 인장시험을 수행하여 극저온 물성을 평가하였으며, 전기화학적 수소를 사전 주입한 시험편과 주입하지 않은 시험편의 비교를 통해 수소취화 민감도를 평가하였다. 각 용접부의 수소 및 온도 민감성을 비교하여 설계 공정 및 재료에 대한 우수성을 확인하였으며, 이를 미세조직학적으로 고찰하였다.

### [용접3-3 | 14:30]

**극저온 특성 향상을 위한 준안정 철계 중엔트로피 합금 용접부의 공정-구조-특성 상관관계 연구:** 이유나(부산대학교), 박정민(한국재료연구원), 강남현\*(부산대학교)

**Keywords:** 철계 중엔트로피 합금, 용접, 극저온 특성

전 세계적으로 탄소 중립의 중요성이 대두됨에 따라 에너지 전환은 액화천연가스 및 액화수소와 같은 에너지 저장 및 운송 시스템에 적용되는 구조재료에 대한 수요 증가를 야기하였다. 이러한 수요를 충족하기 위해 극저온 환경에서 요구되는 기계적 성능을 만족하는 급속 재료 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 한편 에너지 저장 및 운송을 위한 대형 구조물의 제조에는 용접 공정이 필수적이다. 그러나 극저온 환경에서 용접 금속의 기계적 열화는 용접 이음부의 조기 파단을 초래하며, 이는 구조물의 구조적 무결성을 저하시킬 뿐만 아니라 수명을 단축시키는 주요 원인으로 작용한다. 이러한 문제는 극저온 환경에서 용접부 성능의 중요성을 강조하지만, 극저온 응용 분야에서 용접부 성능을 향상시키기 위한 연구는 아직 충분히 이루어지지 않아 관련 연구의 필요성이 지속적으로 제기되고 있다. 본 연구에서는 가스 텅스텐 아크 용접(gas tungsten arc weldign, GTAW) 공정과 레이저 빔 용접(Laser beam welding, LBW) 공정을 적용하여 철계 중엔트로피합금 용접재의 극저온 인장 거동을 조사하고, 용접 공정에 따른 미세조직 변화와 이에 기반한 강화 메커니즘을 규명하였다. 본 연구 결과는 철계 중엔트로피합금 용접부가 극저온 구조 재료로서의 가능성을 제시하며, 극저온 조건에서 용접부의 기계적 열화 문제를 극복하기 위한 Process-Structure-Property 상관관계 기반의 설계 전략을 제공한다.

### [용접3-4 | 14:45]

**Laser beam welding된 이중 고엔트로피합금 접합부에서 후열처리를 통한 강도-연성 조화:** 정차희, 정희찬, 이상원, 이건직(고려대학교), Hadiseh Esmailpoor, 김정 한(국립한밭대학교), 손석수\*(고려대학교)

**Keywords:** Laser beam welding, 이중 접합, 고엔트로피 합금, 석출 강화

서로 상이한 변형 메커니즘을 갖는 고엔트로피합금(High-Entropy Alloys, HEAs)을 접합하는 것은 상호적인 가공경화 거동을 통합할 수 있는 잠재력을 제공하는 동시에, 용접부 전반에 걸친 기계적 불일치를 수반한다. 특히 조성과 미세조직이 크게 다른 HEA 간의 이중 접합에서는 용융 및 응고 과정에서 발생하는 이질성이 접합부 성능을 저해할 수 있다. 본 연구에서는 높은 정밀도와 낮은 입열 특성을 지닌 레이저 빔 용접(Laser Beam Welding, LBW)을 적용하여, TRIP과 dislocation slip을 각각 지배 변형 메커니즘으로 갖는 두 석출경화형 HEA의 이중 접합부 미세조직 및 기계적 거동을 규명하였다. 용융 용접으로 인한 조성 불균일성과 잔류 응력을 완화하고 접합부 기계적 적합성을 향상시키기 위해 후열처리(Post-Weld Heat Treatment, PWHT)를 도입하였다. PWHT는 750 °C에서의 진행하였고 모재와 용접부 전반에 걸쳐 입내 L1<sub>2</sub> 및 입계 B2 석출상이 형성되었으며, 이로 인해 석출물 밀도와 조성이 연속적으로 변화하는 gradient 미세조직이 형성되었다. 이러한 미세조직 진화는 경도 불일치를 효과적으로 완화하고 용접부 강도를 향상시키는 동시에, TRIP 모재에서 용접부를 거쳐 slip 지배 모재로 이어지는 단계적 변형 전달을 가능하게 하였다. 그 결과, PWHT가 적용된 접합부는 항복강도 781 MPa와 연신율 15.9%를 달성하였으며, 이는 용접 직후 상태 대비 항복강도 약 50% 증가와 연성의 약 3배 향상에 해당한다. 본 연구는 석출 거동 제어를 통해 기계적으로 구배화된 접합부를 구현할 수 있음을 보여주며, 이중 HEA 용접부에서 강도-연성 상충 관계를 극복하기 위한 효과적인 전략을 제시한다.



**[용접3-5 | 15:00]**

**다이오드 레이저 클래딩 공정 변수에 따른 압력용기용 SA508 Gr.3 저합금강 클래딩부 미세조직 및 기계적 특성 변화에 대한 연구**  
: 김재성, 김정훈, 문준오\*(국립창원대학교), 조성우, 구남기, 윤강준(두산에너지빌리티)

**Keywords:** Diode laser cladding (DLC), SA508 Gr.3 저합금강, Heat-Affected Zone (HAZ), 미세조직, 기계적 특성

원자로의 주요 구조물 중 하나인 압력용기는 고온, 고압 및 중성자 조사 등의 극한의 가동환경에서도 높은 강도와 인성을 요구한다. 이러한 요건을 충족시키는 소재로는 SA508 Gr.3 저합금강이 있으며, 현재 압력용기 제작에 널리 사용되고 있다. 하지만 SA508 강은 내식성이 열위해, 실제 적용 시 오스테나이트계 스테인리스강 또는 Ni 기반 초내식합금을 이용한 표면 클래딩을 통해 보호된다. 다이오드 레이저 클래딩 (Diode laser cladding, DLC)은 다양한 산업 분야에서 적용되고 있는 공정으로, 기존의 아크 클래딩 공정에 비해 입열량이 낮다. 이로 인해 DLC 공정은 모재 희석률이 낮고, 변형 및 잔류응력이 적으며, 열영향부 (Heat-Affected Zone, HAZ)가 좁은 고품질의 클래딩층을 형성할 수 있다. 본 연구에서는 309L 및 308L 오스테나이트계 스테인리스강 분말을 사용하여 다이오드 레이저 클래딩된 SA508 Gr.3 강의 미세조직 및 기계적 특성을 조사하였다. 이를 목적으로 서로 다른 예열 조건과 DLC 공정 조건에서 클래딩 시편을 제작하였다. 모재, 클래딩 층 및 계면 영역의 미세조직은 광학현미경 (OM), 주사전자현미경 (SEM), 전자후방산란회절 (EBSD), 투과전자현미경 (TEM)을 이용하여 분석하였다. 또한 각 영역의 기계적 특성은 비커스 경도시험, 나노인덴테이션 시험 및 마이크로 인장 시험을 통해 평가하였다. 마지막으로, 미세조직과 기계적 특성 간의 상관관계를 고찰하였다.

**[용접3-6 | 15:15]**

**고강도 오스테나이트계 스테인리스강(XM-19) 용접부의 고온균열 민감도 및 기계적 특성에 미치는 미세조직의 영향**: 정혜은(한국재료연구원, 국립부경대학교), 강용준\*, 박기태, 송상우(한국재료연구원), 천은준(국립부경대학교)

**Keywords:** XM-19 Stainless Steel, Arc Welding, Hot Cracking Susceptibility, Mechanical Properties, Microstructure

XM-19은 질소(0.2-0.4 wt%)를 첨가하여 약 690 MPa급 강도를 확보한 오스테나이트계 스테인리스강으로, 우수한 내식성 및 중성자 조사 저항성을 바탕으로 소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR)의 압력 및 격납용기에 적용이 검토되고 있다. 그러나 질소 합금화에 따른 응고모드 변화와  $M_2X$ ,  $MX$  등의 탄질화물 형성이 스테인리스강의 고온균열 민감도 및 용접부 기계적 특성에 미치는 영향에 대한 선행 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 XM-19 모재에 상용 용접재료 ER209를 적용하여 V-그루브 아크 용접부를 제작하고, Vareststraint 시험을 통해 용접 고온균열 거동 및 민감도를 정량적으로 평가하였다. 또한 인장, 경도, 충격 시험을 수행하여 기계적 특성을 체계적으로 분석하였다. 연구결과, XM-19 모재의 총 균열 길이(Total Crack Length, TCL)는 8.53 mm로, 이는 ER209 성분의 용접금속에서 측정된 TCL(1.5 mm 이하)과 비교하여 상당히 높은 응고균열 민감도를 의미한다. 다양한 미세조직 분석 및 열역학적 계산을 바탕으로, 응고균열은 용접 응고 과정에서 형성되는 Nb-rich 공정(eutectic) 조직과 응고모드에 기인하는 것으로 판단된다. XM-19 모재 및 아크 용접부의 인장강도와 충격흡수에너지는 서로 상반된 경향을 나타내며, 이는 NbCrN 조성의 Z-phase 거동 및 상 분율과 밀접한 상관관계를 가지는 것을 확인하였다. 연구결과는 XM-19 용접 고온균열 제어 방향을 제시하여 SMR 적용 신뢰성 확보를 위한 용접부 설계 및 공정 최적화를 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대한다.

**[용접3-7 | 15:30]**

**냉간 기가스틸용 고성능 및 저원가 용접솔루션 개발**: 한도경\*, 홍석현, 배규열(포스코 기술연구원)

**Keywords:** GMA welding, PosZET, Welding solution, Artificial intelligence, Data augmentation

최근 전기차 시장의 성장과 함께, BEV(Battery Electric Vehicle)의 핵심 부품인 배터리 셀로 인한 하중 증가에 대응하기 위해 더 높은 내구성과 강성을 갖춘 BIW 부품의 수요가 확대되고 있다. 다만 철강 소재의 고강도화가 진행됨에 따라 수소 유입으로 인한 물성 저하, 수소취화의 발현으로 일정 수준 이상의 성능 확보를 어렵게 만드는 문제가 존재한다. 과거에는 이러한 이유로 주로 DP(Dual Phase) 강이 사용되었으나, 최근 승객 안전과 직결되는 부품에 초고강도 강종을 적용하는 추세가 뚜렷하다. 이에 자동차 산업에서는 고온의 연질상에서 부품 형상을 성형하는 HPF(Hot-Press Forming) 강종을 포함하여, 냉간 성형된 Mart 강을 도입하고자 하는 움직임이 있다. 본 연구에서는 120~130S급 PosZET 기술을 적용한 냉연 1.5 GPa급 Mart 강의 GMA(Gas Metal Arc) 용접부 최적 물성 확보 솔루션을 개발하였다. 와이어 송급량 증가 시 용접부 인장강도가 향상되는 효과가 일부 나타났으나, 동시에 과도한 입열로 인한 열영향부(HAZ) 연화와 용접부 파단 위치의 천이가 확인되었다. 초고강도 Mart 강의 경우 HAZ 연화로 인한 물성 저하가 주요 문제로 예견되어, 와이어 송급 제어를 통해 입열량을 상대적으로 낮게 유지할 수 있는 CMT(Cold Metal Transfer) 모드를 적용하였다. 이를 통해 기존 70S급 와이어 적용 대비 용접부 인장강도가 39.4% 향상된 물성 확보 조건을 확보하였다. 한편, PMC(Pulse Multi Control) 모드는 CMT 모드에 비해 용접 입열 수준이 높은 것으로 알려져 있다. 그러나 실제 산업 현장에서 용접 속도 향상은 생산성 증대와 직결되는 중요한 요소이므로, 고속 용접 조건을 적용하여 PMC 모드에서 예상되는 과도한 HAZ 연화 수준을 완화하였다. 또한, 용접부의 냉각속도 향상 효과를 통해, 상대적으로 저속 용접한 CMT 용접부의 최적 인장강도 값 대비 7.8% 이상의 높은 물성을 확보하는 결과를 얻을 수 있었다. 한편, PosZET 기술을 적용한 GMA 용접 데이터를 기반으로 용접부 물성 예측 모델을 구축하였다. 데이터 수집량이 상대적으로 제한적인 한계를 보완하기 위해, 극단 구간의 오버 샘플링을 활용한 데이터 증강(Data Augmentation) 기법을 적용하여 성능 예측의 정확성을 향상시켰다. 이러한 인공지능 분석 과정을 통해 용접부 물성에 직접적으로 영향을 미치는 주요 인자를 정량적으로 도출하고자 하였다. 본 연구를 통해 기가급 초고강도 Mart 강의 GMA 용접부 성능을 확보하기 위한 최적 용접 솔루션을 개발 및 검증하였다. 이를 통해 자동차 산업, 특히 전기차 시장의 확대라는 시대적 흐름 속에서 에너지 효율과 안전성을 동시에 향상시키는 경량화 기술 발전에 기여할 것으로 기대된다.

**[용접4-1 | 15:55]**

**자동차 샤시 부품의 내구 성능 향상을 위한 아크용접 보강비드 효과:** 김대원, 박시영((주)현대자동차), 박영도\*, 전현도(동의대학교)

**Keywords:** 피로내구, 아크용접, 보강용접, 피로수명, 잔류응력

최근 자동차 산업에서는 연비 향상 및 환경 문제 대응을 위해 친환경차량의 수요가 증가하고 있으며, 기존 내연기관 차량의 샤시 부품을 공용 부품으로 사용하여 적용하는 경우 중량 증가로 인한 균열 발생 문제가 제기되고 있다. 특히, 개발단계에서 설계 및 금형 변경이 어려운 경우 균열 등의 문제는 개선 방안이 매우 제한적이다. 이에 따라, 본 연구에서는 아크 용접을 이용하여 보강비드를 형성하고 이러한 적용이 피로 성능에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 비드 형상과 Edge Distance의 변화가 피로 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 샤시 부품에 많이 쓰이는 60K급 판재로 시편형상을 새로 설계하고, 피로 시험을 통해 S-N 곡선을 확보하였다. 실험 결과 보강비드가 적용된 시편에서 피로 성능이 증가하는 경향을 확인하였으며, 보강 비드 형상 최적화하는 경우 피로 성능 향상이 향상되는 것을 확인하였다. 보강 비드 형상에 따른 피로 성능 비교와 Edge Distance 차이에 의한 피로 성능 비교를 통해 피로 수명 증가가 나타나며, 이러한 피로 성능 증가의 원인으로 보강 비드 형상에 의한 압축 잔류 응력이 균열 개시 속도를 늦추는 것이 원인으로 파악되며, 이러한 영향을 검증하며 피로 성능 증가 메커니즘을 평가하였다.

**[용접4-2 | 16:10]**

**클래드 메탈(Steel/Al/Steel)의 공정별 용접성 비교 및 기초 특성 평가 Comparative Weldability and Fundamental Property Evaluation of Steel/Al/Steel Clad Metal by Welding Process:** 신승철, 김용\*(고등기술연구원)

**Keywords:** Clad Metal, Arc Welding, Spot Welding, Laser Welding

현대 산업에서는 경량화, 내식성 향상, 고강도 확보 및 비용 절감을 위해 다양한 금속 소재의 적용이 확대되고 있으며, 여러 금속의 장점을 동시에 활용하기 위한 이종 소재 접합 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 중 클래드 메탈은 이종 금속의 특성을 조합한 소재로서 조선·해양, 자동차, 항공우주, 화학 플랜트 등 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다. 특히 자동차 산업에서는 경량화 효과를 극대화하기 위해 클래드 메탈 적용이 증가하고 있으나, 이종 소재 간 열팽창계수 차이 및 접합 과정에서 금속간화합물 형성 등에 의해 접합부 취성 증가 및 용접 물성 저하가 발생할 수 있어 적용에 어려움이 있다. 본 연구에서는 클래드 메탈의 공정별 용접 특성을 파악하기 위해 Steel/Al/Steel 3층 클래드 메탈을 대상으로 아크 용접, 레이저 용접, 저항점 용접을 적용하고, 공정별 접합부 특성을 비교·평가하였다. 각 공정에 대해 용접부 단면(계면/결함) 분석과 기계적 특성 평가를 수행하여 접합부 품질을 검토하였다. 본 연구 결과는 클래드 소재의 최적 용접 공정 및 조건 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 클래드 소재의 산업적 응용 가능성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

**[용접4-3 | 16:25]**

**철계 중엔트로피 합금 GTAW 용접부의 수소취화 거동 분석:** 최정현, 남지민(부산대학교), 이승건(한국재료연구원), 강남현\*(부산대학교)

**Keywords:** 수소취성, 고엔트로피합금, 변형유기소성(TRIP), 용접

철계 중엔트로피 합금(Ferrous Medium-Entropy Alloy)인 Fe-Co-Ni-Cr계 합금은 기존 오스테나이트계 스테인리스강을 대체할 수 있는 극저온 구조용 소재로 각광받고 있다. 기존 스테인리스강은 용고 과정에서 FA 모드(Ferrite-Austenite mode)를 따르며, 이로 인해 용접부에 조대하고 연속적인 델타 페라이트( $\delta$ -ferrite)가 잔존하여 극저온 인성 저하 및 수소 취화(Hydrogen Embrittlement, HE)의 기점이 되는 한계가 있다. 반면, Fe60Co15Ni15Cr10 합금은 용고 후에도 수소의 확산 속도가 느린 오스테나이트 단상을 유지하여 용접부에서도 우수한 수소 취화 저항성을 가질 것으로 예상된다. 또한 기존의 동일 원자비를 가진 고엔트로피 합금 대비 Fe 함량이 높아 비교적 가격 경쟁력 측면에서도 우수하여 용접재료로 활용 가능성이 높다. 따라서 기존의 극저온 액화수소 저장탱크에 사용되는 오스테나이트계 스테인리스강의 용접재료로 적용하여 용접부의 수소취화 열화 현상을 극복할 수 있을 것으로 기대된다. 이에 본 연구에서는 준안정(Metastable) 오스테나이트계 철계 중엔트로피 합금인 Fe60Co15Ni15Cr10의 GTAW 용접부를 제작하여 저온 및 극저온에서 기계적 물성과 내수소취성을 평가하고, 용접재료로서의 적용 가능성을 논의하고자 한다. 이를 위해 저온(-100°C) 및 극저온(-196°C) 환경에서의 인장 특성 및 수소취화 저항성 평가 후 델타페라이트의 유무 및 철계 중엔트로피 합금의 침입형 원소 부재로 인한 낮은 강도, 용접부와 모재간의 변형거동 불일치 현상을 종합적으로 고려하여 분석을 수행하였다.

**[용접4-4 | 16:40]**

**레이저 와블 용접된 알루미늄/구리 박판 겹치기 용접부의 피로특성 분석:** 윤성민, 유채은(부산대학교), 김용(고등기술연구원), 이제인\*(부산대학교)

**Keywords:** laser wobble welding, lap joint, dissimilar welding, intermetallic compound, fatigue

알루미늄과 구리와 같은 이종 금속소재 간 레이저 용접 시, 용융부에 형성되는 금속간화합물은 용접부 기계적 특성 저하의 주요한 요인이다. 전기차에 탑재되는 배터리 팩은 주행 중에 다양한 형태의 반복 하중을 받게 되므로, 레이저 용접부의 피로특성을 이해하는 것이 배터리 팩의 신뢰성을 향상시키는 데 중요하다. 본 연구에서는 알루미늄/구리 박판의 겹치기 용접에 레이저 와블 용접을 적용하였고, 이 때 빔 와블링 진폭(0 - 0.5 mm)이 용접부의 미세조직 및 피로특성에 미치는 영향을 분석하였다. 인장강도 대비 30 - 90 % 하중에서 주파수 10 Hz, 응력비 0.1 조건으로 피로시험을 수행한 결과, 와블링 진폭을 0.5 mm까지 늘린 용접부에서 피로수명이 수십 배 향상되었으며 피로강도 역시 높아짐을 확인하였다. 고진폭 용접부의 경우, 구리가 부분적으로만 용융됨에 따라 금속간화합물 층이 얇게 형성되므로, 연성인 구리 모재에 의해 균열 전파가 더디게 진행되는 것으로 확인되었다. 반면, 저진폭 용접부의 경우, 하판 구리가 두께 방향으로 모두 용융되어 구리 용융선에 금속간화합물 층이 깊게 형성되었다. 그 결과 금속간화합물을 따라 단시간 내에 피로 균열이 전파되어 피로 수명이 짧아졌다.

**[용접4-5 | 16:55]**

**Al-Zn 개발 도금강의 저항 점용접 연속타점 시 도금 부착량에 따른 전극 합금화 거동 연구:** 장여진(한국재료연구원), Nelikode Savvasachi, 황순기(동의대학교), 강남현(부산대학교), 엄상호(포스코 글로벌 R&D 센터), 이석규(포스코 기술연구원), 백두진(포스코 홀딩스), 박영도\*(동의대학교)

**Keywords:** Al-Zn 도금, 도금층, 도금 부착량, 전극 수명, 저항 점용접

최근 자동차 산업에서는 차량 보증기간의 장기화에 따라 차체 강판에 대한 내식성 요구가 지속적으로 강화되고 있으며, 이에 따라 아연 도금 강판의 적용이 확대되고 있다. 그러나 자동차용으로 널리 사용되는 GI 및 GA 도금강은 액상금속취성(LME) 균열 민감성 등 용접 공정 상의 한계가 반복적으로 보고되어 왔다. 이러한 문제를 개선하기 위해 개발된 Al-Zn 도금강은 동일 두께의 아연 도금강 대비 우수한 내부식성을 나타내며, 동시에 LME 균열 민감도가 상대적으로 낮은 소재로 알려져 있다. 본 연구에서는 Al-Zn 도금강의 저항 점용접 특성을 체계적으로 분석하고, 연속 타점 조건에서의 전극 수명 저하 메커니즘을 규명하기 위해 Cu-Cr 전극의 합금화 거동과 전극 열화 특성을 조사하였다. 도금 부착량이 전극 열화 및 연속 타점 수명에 미치는 영향을 평가하기 위해, Al-Zn 도금 부착량이 상이한 두 조건을 대상으로 전극-도금 계면 반응과 Cavitation 발생 거동을 비교 분석하였다. 도금 부착량이 낮은 경우 연속타점 초기(Stage I)에는 전극 표면에  $\text{CuAl}_2$  기반 합금화층이 형성되면서 전극 선단 직경 증가율은 낮게 유지되었으나, Stage II 이후 전극 중심부에서 Central Cavitation이 발생함에 따라 전극 마모가 급격히 가속되었다. 반면 도금 부착량이 높은 경우에는 용접 초기(Stage I)에서 전극 팁 직경 증가율이 상대적으로 크게 나타났으나, 이후 전극 표면에 Radial Cavitation이 형성되면서 전극 마모율이 감소하거나 유사한 수준으로 유지되었다. 이러한 결과는 Al-Zn 도금강의 연속 타점 용접 시 전극 열화가 전극 표면에 형성되는  $\text{CuAl}_2$  및  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  금속간화합물과 밀접하게 연관되어 있으며, Cavitation의 발생 위치와 성장 양상이 전극 수명과 용접 안정성을 지배함을 의미한다.

**[용접4-6 | 17:10]**

**알루미늄과 핫스탬핑강판의 강건한 이종접합을 위한 Friction Element Welding 연구:** 고세진\*(현대자동차)

**Keywords:** 알루미늄, 핫스탬핑 강판, Friction Element Welding

환경규제에 따라 최근 전기차, 수소전기차 등 내연기관의 전환이 이루어지면서, 엔진변속기를 대체하는 배터리 등 무게증가로 차량 중량이 증가되었다. 차량 중량의 증가는 주행거리를 줄이는 원인이 되므로 중량절감이 매우 중요하여 차체에서도 경량재료를 적극적으로 채용하고 있는데, 강도와 성형이 유리하고 비중이 강판의 30% 수준인 알루미늄 소재가 가장 많이 적용되고 있다. 알루미늄의 차체부품 적용으로 기존의 점용접으로 부품을 접합하던 방식이 알루미늄과 강판의 열특성 차이로 사용할 수 없게 되어, 기계적인 접합 방법으로 부품을 접합하고 있다. 대표적인 알루미늄과 강판의 접합방법으로는 SPR, FDS가 있는데, 이는 글로벌하게 타 OEM에서도 가장 많이 적용하는 방식이다. 그러나, 이 접합법들은 일정한 소재의 강도와 두께를 적용하는 데에 한계가 있다. 기존의 SPR 접합법으로는 핫스탬핑 1.5 mm 이상의 강판은 리벳 피어싱이 되지 않거나, 접합 후 리벳이 휘는 등 강건한 접합을 구현하기 어렵다. 따라서, 초고장력강판과 알루미늄과 강건한 접합을 하기 위해, 새로운 접합법이 필요하여 FEW접합법(Friction Element Welding)을 검토하였다. FEW접합은 상판 경량재료와 하판 강판 부품을 Element가 빠른 RPM으로 회전하며 상판을 피어싱하고, 하판 강판을 만나, Element와 강판이 마찰을 일으키어 그 마찰열로 고상 압착되는 접합하는 방식이다. 따라서, 하판의 강도가 높을수록 엘리먼트와의 마찰을 잘 일으키어 더욱 강건한 접합이 가능하게 된다. 하지만, FEW접합의 메커니즘이나, 접합시 강도 확보 영향 인자가 무엇인지 명확히 보고된 바가 없어, 불량 조건 및 개선방안에 어려움이 있다. 특히, 1760 MPa의 핫스탬핑 강판을 적용했을 때, 어떠한 문제가 있을지에 대한 경험이 없기에 충돌부재의 적용에 우려가 되었다. 따라서, 본 연구에서는 FEW접합의 핫스탬핑 강판적용시 미세조직 및 경도를 확인하여 접합 메커니즘을 규명하고, 접합강도에 미치는 영향인자에 대하여 고찰하였다.

## 차세대메모리 소재 및 공정 심포지엄

Room 2층 202A, 4월 29일

## [메모리1-1 | 09:00] 초청강연

차세대 DRAM향 3차원 Capacitorless 2T 메모리 소자와 공정에 관한 연구: 강대환\*(포항공과대학교)**Keywords:** 차세대 Capacitorless 2T 메모리, 산화물 반도체, 3차원 집적 공정

AI 시대를 맞아 거의 모든 산업계에 엄청난 변화와 진화가 진행되고 있고 특히 인공지능 연산에 활용되는 학습 및 추론에 필요한 메모리 반도체 수요가 급증하고 있는 실정이다. 특히 DRAM 에 대한 수요가 폭발적이어서 관련 산학계에서 DRAM scaling 에 대한 연구들이 그 어느때 보다 활발하다. 이러한 연구들의 한 축은 단위 cell 에 대한 scaling 인데, 크게는 현 구조인 1-transistor + 1-capacitor cell (1T-1C cell) 기술을 최대한 연장하는 방향과 공정 난이도가 높은 capacitor 없이 2개의 transistor 구조인 (Capacitorless 2T cell) 방향으로 나눌 수 있다. 본 강연에서는 capacitorless 2T cell 향으로 최근 제안한 3차원 array architecture 및 동작 원리 그리고 요소 기술에 대한 최근 실험적 결과를 소개하고, 이를 바탕으로 3차원 2T-0C 메모리 소자의 집적 공정을 위해 필요한 핵심 소재 및 공정 기술들에 대해서 알아보고자 한다.

## [메모리1-2 | 09:25] 초청강연

차세대 MRAM을 위한 소재 및 공정 기술 동향과 과제: 백승현\*(한국과학기술연구원)**Keywords:** 자기메모리, 스핀트로닉스, 자기저항

자기저항 메모리(Magnetic Random Access Memory, MRAM)는 스핀트로닉스 기반의 개념에서 출발하여, 현재는 첨단 반도체 플랫폼에 실제로 적용되고 있는 가장 성숙한 차세대 비휘발성 메모리 기술 중 하나이다. MRAM의 비휘발성, 빠른 스위칭 속도, 높은 내구성(endurance) 및 CMOS 공정과의 우수한 호환성은 에너지 효율적인 메모리 구현 및 로직-메모리 융합 구조를 가능하게 하는 핵심 기술로 주목받고 있다. 다양한 MRAM 기술 가운데 스핀 전달 토크 MRAM(STT-MRAM)은 임베디드 메모리 및 standalone 메모리 제품으로 상용화 단계에 도달하였다. 하지만 계속되는 소자 미세화 및 성능 향상은 소재 물성 및 공정 통합 측면에서의 근본적인 한계에 도달하고 있으며, 이에 따라 다양한 공정 기법, 신소재 및 새로운 동작 방식 (스핀-케도 토크 MRAM(SOT-MRAM), 전압 제어 자기 이방성 MRAM(VCMA-MRAM)) 에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 발표에서는 소재 공학 및 반도체 공정 통합 관점에서 MRAM 기술의 현재 수준과 향후 발전 방향을 종합적으로 고찰하고자 한다. 먼저 자기터널접합(Magnetic Tunnel Junction, MTJ)을 구성하는 핵심 소재 스택을 중심으로, 강자성 전극, 터널 장벽층, 증금속 하부층이 스핀 분극, 수직 자기 이방성, 스위칭 효율에 미치는 영향을 살펴본다. 이어서 MRAM을 첨단 CMOS 기술 노드에 집적하는 과정에서 직면하는 주요 공정적 과제를 다룬다. 여기에는 BEOL(Back-End-of-Line) 공정에서의 열 제한, 나노미터 스케일 MTJ 패터닝 과정에서 발생하는 손상, 공정 기반 변동성 등이 포함된다. 본 강연에서는 새로운 패터닝 공정 기법, 소자 제작 과정에서 자기적·수송 특성을 보존하기 위한 캐핑 전략 등 최근의 연구를 소개하고자 한다. 또한 공정 윈도우, 소자 균일성, 대량 생산 적합성 간의 상호 관계를 수율 및 양산 요구 조건의 관점에서도 발표하고자 한다. 마지막으로, MRAM을 기존 메모리 소자를 넘어서는 새로운 활용 가능성, 특히 뉴로모픽 컴퓨팅 및 확률적 컴퓨팅과 같은 데이터 중심-메모리 중심 컴퓨팅 패러다임에서의 응용 가능성을 소개하고자 한다. 스핀트로닉스 소자에서 자기적 특성을 유연하게 조절할 수 있는 능력은 새로운 컴퓨팅 패러다임을 구현하기 매우 유용한 능력이다. 에너지 효율적인 MRAM 기반 컴퓨팅 아키텍처 및 확률론적 컴퓨팅 등 향후 스핀트로닉스 소자의 반도체 기술 전반으로의 확산을 위해 해결되어야 할 주요 과제들을 논의하고자 한다.

## [메모리1-3 | 09:50] 초청강연

Beyond the Cu Interconnect Era: Material Strategies for Sub-10-nm Scaling: KEUN WOOK SHIN\*(Samsung Advanced Institute of Technology)**Keywords:** Interconnect, graphene, alloy, intermetallic compound, anisotropic conductor

As device scaling enters the sub-10-nm regime, parasitic resistance-capacitance (RC) delay in interconnects becomes a primary performance bottleneck [1]. As chip scaling progresses, reduced crosssectional areas increases line resistance, whereas tighter spacing between adjacent lines elevates parasitic capacitance. For over three decades, Cu has been the dominant interconnect conductor due to its low bulk resistivity ( $1.6 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) and long electron mean free path (40 nm) [2]. At sub-10-nm dimensions, however, size-induced electron scattering and limited compatibility with advanced low-k dielectrics impose fundamental scaling limits. As the metal pitch approaches 10 nm, size-induced electron scattering causes a steep rise in resistivity. Guided by the Fuchs-Sondheimer and Mayadas-Shatzkes models [3], which describe resistivity scaling in terms of surface and grain-boundary scattering, several strategies can be developed to improve conventional Cu interconnect structures. Cu remains the leading candidate for the primary interconnect conductor, and its resistivity can be further reduced through interface engineering that enhances surface specularly and suppresses electron scattering. In parallel, alternative conductors such as Ru, Rh, and selected metal alloys—with intrinsically shorter electron mean free paths—have attracted significant interest because they exhibit reduced sensitivity to size-induced scattering at scaled dimensions. Beyond these approaches, anisotropic conductors offer a fundamentally different pathway: their strongly directional transport suppresses out-of-plane scattering, enabling nearly thickness-independent resistivity and improved scaling behavior. In this talk, I present several

strategies to overcome the limitations of conventional Cu interconnects, including Cu extension via graphene capping [4, 5], alternative single-element conductors such as Ru and Rh [6, 7], engineered alloys [8], and graphene as a highly anisotropic transport material [9]. Through systematic exploration of these material platforms, I demonstrate the feasibility of fabricating sub-10-nm interconnects with enhanced electrical performance. [1] J.-S. Kim et al., Science 386, 1238 (2024). [2] D. Gall, J. Appl. Phys. 119, 085101(2016). [3] M.-S. Kim et al., IEEE J. Electron. Dev. Soc. 11, 399 (2023). [4] K. W. Shin et al., ACS Appl. Nano Mater. 6, 4170 (2023). [5] K.W. Shin et al., Mater. Chem. Phys. 318, 129280 (2024). [6] Y. Leem et al., IEDM 2025 (2025). [7] K. W. Shin et al., IITC 2025 (2025). [8] J. Y. Sung et al., ACS Nano 19, 7253 (2025). [9] K. W. Shin et al., IEDM 2024 (2024).

### [메모리2-1 | 10:25] 초청강연

초미세 3차원 반도체 소자 제작을 위한 열화학 반응 기반의 원자층 식각 공정: 남태욱\*(세종대학교)

**Keywords:** 원자층 식각, 식각, 등방성 식각, 표면 화학, 원자 공정, 열화학 원자층 식각

반도체 공정이 미세화 되고 소자의 구조가 3차원으로 변화함에 따라 기존 플라즈마 기반 식각 공정에서 발생하는 표면 손상 발생을 억제하고, 기존의 비등방성 식각으로는 구현하기 어려웠던 3차원 소자 구현을 위한 등방성 식각 공정에 대한 필요성이 급증하고 있음. 이를 위해 2015년 처음 보고된 열화학 반응 기반 원자층 식각 공정(thermal ALE)은 소제 표면과 전구체와의 자기제한적 표면 반응을 기반으로 한 식각 공정으로써, 첫 번째 전구체가 표면을 개질(surface modification)하고, 뒤이어 분사되는 전구체와 개질된 소제와의 화학 반응을 통해 휘발 방출 (volatile release)하는 단계로 구성되어 있음. 열화학 원자층 식각 공정은 플라즈마를 사용하지 않고 전구체와의 열화학 반응을 바탕으로 식각이 이루어지기 때문에 플라즈마 손상 없이 원자수준의 두께 식각이 가능할 뿐만 아니라, 자기제한적 반응으로 인한 등방성 식각 특성으로 인해 높은 종횡비의 구조체에서 우수한 단차피복성 및 균일도를 확보할 수 있어 미래 반도체 소자 제작을 위한 필수 식각 공정으로 특히 주목받고 있음. 본 발표에서는 현재까지 개발된 원자층 식각법의 다양한 식각 메커니즘에 대해 알아보고, 이를 활용하여 차세대 반도체 소자 구현에 어떻게 활용될 수 있는지를 알아보고자 함.

### [메모리2-2 | 10:50] 초청강연

Electronic Devices for Neuromorphic Computing: Joon Young Kwak\*(이화여자대학교)

**Keywords:** 뉴로모픽, 전자소자

The growing demand for high-throughput data processing highlights the inherent limitations of conventional von Neumann architectures, particularly in latency and energy efficiency. Neuromorphic computing, inspired by the event-driven operation of biological neural systems, offers a promising alternative. It fundamentally depends on electronic devices that mimic synaptic modulation and neuronal spike generation. In this talk, I will first briefly go over some electronics device researches based on emerging materials that enable neuromorphic spiking neural network (SNN) operation. I will also briefly discuss interface circuits designed to drive emerging material-based neuromorphic neuron and synapse device arrays, demonstrating pathways toward scalable and low-power SNN hardware platforms.

### [메모리2-3 | 11:15] 초청강연

Sacrificial Atomic Layer Deposition for Nanostructured Chalcogenide Materials: Chanyoung Yoo\*(홍익대학교)

**Keywords:** atomic layer deposition, chalcogenide materials, phase-change memory

Atomic layer deposition (ALD) offers unique advantages for conformal and thickness-controlled growth of functional materials. However, extending ALD to chalcogenide materials remains fundamentally challenging due to severe surface oxidation, limited precursor compatibility, and the tendency toward island growth and phase separation. These issues become more pronounced when targeting low-dimensional, metastable, or superlattice chalcogenide structures required for next-generation memory and neuromorphic devices. In this work, we introduce sacrificial atomic layer deposition (S-ALD) as a general and scalable growth paradigm for nanostructured chalcogenide materials. The key concept of S-ALD is the deliberate incorporation of a sacrificial layer that temporarily mediates metal-chalcogen bonding during ALD cycles and is selectively removed in a subsequent step. This sacrificial process effectively suppresses parasitic oxidation, mitigates ligand incompatibility, and enables controlled chalcogen rearrangement, thereby facilitating the deposition of highly uniform, fully substrate-covering crystalline chalcogenide films with growth behavior approaching layer-by-layer deposition. By applying S-ALD, we demonstrate several representative chalcogenide systems that are difficult to realize using conventional approaches. These include top-to-bottom local epitaxial growth of two-dimensional Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> enabled by controlled sacrificial layer removal, melt-quenching-free Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/GeTe superlattice phase-change films with well-defined interfaces, and ultrathin monatomic antimony and tellurium films with atomic-level thickness control. Structural and spectroscopic analyses reveal that S-ALD promotes uniform, layer-by-layer growth even at reduced deposition temperatures. The versatility of S-ALD highlights its potential as a unified platform for engineering low-dimensional and three-dimensional chalcogenide architectures. This approach provides new opportunities for conformal integration of phase-change materials, ferroelectric-chalcogenide heterostructures, and emerging nanoelectronic devices, where precise control over phase, thickness, and crystallinity is essential.

**[메모리2-4 | 11:40] 초청강연**

**계면층 제어를 통한 초미세 규격 차세대 디램 커패시터 물질 연구: 권대선\*(숙명여자대학교)**

**Keywords:** 메모리 커패시터, 원자층 증착법, 계면층 제어

현대 컴퓨터의 핵심 동작 메모리인 디램 (DRAM; dynamic random-access memory)은 고집적화를 위해 지속적인 미세화가 요구되며, 커패시터의 Design rule은 약 10 nm 수준에 근접하고 있다. 이에 따라 커패시터 내부 유전막은 5 nm 이하로 얇아져야 하고, 동시에 안정적 구동을 위한 신뢰성 확보가 필수적이다. 그러나 현재 산업계에서 널리 적용되는  $\text{ZrO}_2$  기반  $\text{Al}_2\text{O}_3$  도핑 적층 구조(ZAZ;  $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ )는 본질적으로 유전상수가 낮아, 초미세 규격 DRAM에서 0과 1을 구분하기 위한 충분한 Sensing margin을 확보하는 데 점차 한계를 보이고 있다. 따라서 더 높은 유전상수를 갖는 신규 유전막 소재와 이에 적합한 전극 설계에 대한 연구가 요구된다. 본 발표에서는 초미세 규격 DRAM 커패시터 성능 향상을 위해 계면층 제어 (interfacial layer engineering)에 기반한 유전막 및 전극 물질 연구를 소개한다. 특히 미세 소자 공정에 적합한 원자층 증착법 (ALD; atomic layer deposition)을 기반으로 한 공정 설계 전략과 그 특성을 다루며, 도핑과 다중층 구조 설계를 통해 계면에서 발생하는 화학적·구조적 상호작용을 정밀하게 조절하고, 그에 따른 유전막의 물성 변화 및 소자 전기적 특성 변화를 체계적으로 분석한다. 아울러 유전막/전극 물질의 결정성 제어가 커패시터 성능과 신뢰성에 미치는 영향을 논의하며, 계면층 제어 기술이 차세대 DRAM 커패시터 설계에서 갖는 핵심적 의미와 향후 연구 방향을 제시한다.



## 수소재료 II

Room 2층 202A, 4월 29일

## [수소3-1 | 14:00]

인덴테이션 기반 소성변형 거동 분석을 통한 오스테나이트계 스테인리스강의 수소취성 평가: 이승건\*, 이종석, 신희철, 박준호, 이시환(한국재료연구원)

**Keywords:** 압입시험, 수소취성 스크리닝, 압흔형상 분석, 소성변형

수소 에너지 인프라의 확대에 따라 수소 환경에서 사용되는 구조 재료의 신뢰성 확보가 중요한 과제로 대두되고 있다. 특히 재료가 수소 환경에 노출될 경우 수소취성(hydrogen embrittlement)에 의해 기계적 특성 저하 및 파괴 거동 변화가 발생하며, 이에 따른 소성변형 거동 또한 재료별로 상이하게 나타난다. 따라서 수소취성의 정량적 평가 및 조기 진단을 위한 효율적인 시험 기법의 개발이 요구된다. 본 연구에서는 수소 환경에 노출된 오스테나이트계 스테인리스강을 대상으로 압입시험(instrumented indentation test)을 수행하고, 이때 형성되는 압흔 주변의 소성변형 거동을 미세조직 관찰 및 형상 분석을 통해 평가하였다. 특히 압흔의 형상 변화와 소성변형에 따른 전위의 분포 특성을 비교 분석하여 수소취성에 따른 기계적 물성 변화와의 상관관계를 도출하고자 하였다. 이를 통해 수소 노출 전·후 재료의 소성변형 특성 차이를 정량적으로 평가하고, 압입시험 기반 지표를 활용한 수소취성 유무 판별 가능성을 검토하였다. 본 연구 결과는 비파괴적 시험 기법을 활용한 수소취성 평가 방법의 기초 자료로 활용될 수 있으며, 향후 수소 인프라 설비의 건전성 평가를 위한 기반 기술로도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## [수소3-2 | 14:15]

잠호아크용접된 파이프라인강의 In-situ 내수소취성 분석: 선재완, 이승준\*(한국공학대학교), 김성웅(세아제강)

**Keywords:** 잠호아크용접, In-situ, 수소취성, API X65

본 연구에서는 잠호아크용접 (Submerged Arc Welding, SAW)를 이용한 X65급 파이프라인강의 용접부와 모재부의 내수소취성을 분석하였다. 상온에서 인장시험 중 수소의 지속적인 유입과 그에 따른 거동을 모사하기 위해 In-situ 수소취성 인장시험을 수행하여, 변형 과정에서의 수소 영향과 취성 거동을 보다 정밀하게 분석하였다. Silver (Ag) decoration 실험을 통해 수소 트랩 및 확산 거동을 관찰하였으며, 주사전자현미경 (SEM)을 이용하여 모재와 용접부의 미세조직을 분석하였다. 아울러 파단면 분석 및 수소 유품 크랙 경로 관찰을 통해 미세조직 및 수소취성 거동 간의 상관관계를 규명함으로써, 모재와 용접부 간 내수소취성 차이가 발생하는 원인을 밝히고자 하였다.

## [수소3-3 | 14:30]

Investigation of Hot Stamped 1.5 GPa High Performance Ultra High Strength Steels (UHSS) for Effects of (Nb + Mo) Alloying on Mechanical Properties and Hydrogen Embrittlement (HE): EL-JOON SHIM(Tech University of Korea (TU Korea)), Tae-Yang Kwak(RUAN co., Ltd.), Hye-Jin Kim\*(Tech University of Korea (TU Korea))

**Keywords:** Hot stamping, Ultra High Strength Steel (UHSS), Hydrogen embrittlement (HE), Crashworthiness, Strain rate

In order to respond to increasingly stringent regulations on Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions, mass reduction of the body-in-white of automotive vehicles is one of the challenging tasks in automotive industry. Moreover, In recent years, due to the diverse and stricter crashworthiness evaluation standards, it is necessary to apply high-strength and high-toughness steel to automotive along with mass reduction. Ultra high strength thin sheet steel (UHSS) enables a significant mass reduction of 10%-30% compared with other materials of the body-in-white, accompanied by an improved crashworthiness of automotive vehicles. However, conventional hot-stamped martensitic steels which classified as UHSS, exhibit limited ductility, poor bendability, and high susceptibility to delayed fracture caused by hydrogen embrittlement (HE). During steelmaking, hot stamping and application of UHSS grades, hydrogen tends to penetrate into the microstructure, enhancing crack initiation and propagation, which finally can result in unexpected failure of automotive parts. The present study, (Nb+Mo) alloying were introduced by newly developed advanced steel material with an ultimate tensile strength grade of 1.5 GPa after hot stamping. In this presentation, impact of hydrogen on mechanical properties will be discussed in relation to microstructural of (Nb + Mo) alloying through tensile tests at two significantly different strain rates. For this purpose, two UHSS grades (newly developed and conventional) with same ultimate tensile strength of 1.5 GPa are electrochemically hydrogen charged. Afterward, a comparison of the ductile and brittle fracture appearance of the two specimens through fractographic analyses are performed. As well as, grain refinement effect by (Nb + Mo) alloying and this grain refinement resulted in the more deviated crack propagation path and consequently in the more improved resistance to crack propagation will be presented.

## [수소3-4 | 14:45]

STS 347 스테인리스강 및 용접부의 수소취화와 확산 거동 평가: 손시온, 최동현(부산대학교), 김현준, 손영훈(동화엔텍), 강남현\*(부산대학교)

**Keywords:** 오스테나이트계 스테인리스, 수소 취화, 확산성 수소

최근 수소 에너지가 탄소 중립을 실현하기 위한 대체 에너지로서 주목받고 있으며, 이를 저장 및 운반을 위한 관련 설비의 수요가 증가하고 있다. 그러나 수소 원자가 금속 기지 내부로 침투하여 수소취화를 일으키는 현상으로 인해 수소 환경에서 신뢰성과 안

정성을 확보할 수 있는 재료의 중요성이 높아지고 있다. 해당 연구에서는 오스테나이트계 스테인리스 스틸 347을 대상으로 수소 환경 노출에 의한 수소취화 현상 및 수소의 확산 거동을 평가하여, 수소취화의 메커니즘에 대한 이해를 높이고자 한다. 전기화학적 방법으로 수소를 주입하고 온도에 따른 인장 결과를 통해 수소 주입 여부에 따른 특성 변화를 관찰하였다. 미세조직 및 파면, 파단면의 분석은 OM, SEM을 통해 수행하였으며, EBSD를 통한 오스테나이트의 상변태 현상을 파악하였다. TDS, 실버 데코레이션을 통하여 수소량 및 확산 거동을 측정하였다. 해당 결과를 바탕으로 스테인리스 스틸 347의 수소취화 특성 및 확산 거동을 분석하여 수소 주입에 따른 물성과 미세조직 변화 및 취화 메커니즘의 상관관계를 평가하였다.

#### [수소3-5 | 15:00]

**스테인리스강(316L, 310S)의 수소 장입량에 따른 수소 취화 거동 분석:** 조준영, 엄화성\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 스테인리스강, 수소취화, 수소투과

본 연구에서는 수소 에너지 산업의 핵심 소재인 오스테나이트계 스테인리스강인 316L과 310S를 대상으로, 고온 환경에서의 수소 장입에 따른 소재의 수소 취화(Hydrogen Embrittlement, HE) 거동에 미치는 영향을 비교 분석한다. 특히, 외부 수소 압력에 따른 소재 내부 수소 장입량의 차이를 정량화하고, 이에 따른 기계적 물성 변화 거동을 규명하는 데 목적이 있다. 실험을 위해 316L 및 310S 인장 시편을 500°C 온도 조건에서 세 가지 환경에 240시간 동안 노출하였다. 수소 장입 조건은 10 MPa 고압 수소와 0.12 MPa 상압 수소로 설정하였으며, 대조군으로서 동일 온도 및 시간 조건의 Ar 불활성 환경 노출 시험을 병행하였다. 노출 완료 후, 열추출 기법을 활용하여 소재 내부에 침투한 수소 농도를 정량적으로 분석하고, 인장 시험을 통해 응력-변형을 곡선 및 연신율 등 수소 취화 거동을 정량/정성적으로 평가한다. 본 연구에서는 분석 결과를 바탕으로 수소 침투 거동이 316L과 310S의 기계적 물성에 미치는 상관관계를 고찰할 예정이다. 특히 니켈(Ni) 및 크롬(Cr) 함량 차이에 의한 오스테나이트 상 안정도와 소재 내 수소 농도가 미세조직의 파괴 양상에 미치는 영향을 중점적으로 분석한다. 인장실험 후 파면 분석을 통해 수소 유도 균열의 개시 및 전파 경로를 확인하고, 최종적으로 고온·고압 수소 환경용 소재 선정을 위한 기초 건전성 데이터를 제시하고자 한다.

#### [수소3-6 | 15:15]

**Laser powder bed fusion으로 제작된 CoCrFeNi 중엔트로피 합금에서 열처리에 따른 Boron 편석이 수소취성에 미치는 영향:** 전현(충남대학교), Yakai Zhao(A\*STAR FEAT), 이창기, 김세호(고려대학교), 이동현\*(충남대학교)

**Keywords:** 중엔트로피 합금, 수소취성, Laser power bed fusion

FCC 구조의 CoCrFeNi 중엔트로피 합금은 수소 환경에서도 우수한 기계적 특성을 나타내어 수소 에너지 구조재로서 높은 잠재력을 가진다. 기존 주조 방식으로 제작된 CoCrFeNi 합금에서는 Boron이 결정립계에 편석되어 결정립계 응집력을 증가시키고 입계 파괴를 억제함으로써 수소취성을 효과적으로 감소시키는 것으로 보고되었다. 그러나 사전 연구에서 Laser Powder Bed Fusion(LPBF) 방식으로 제작한 CoCrFeNi 합금에 Boron을 첨가한 경우, 급속 응고에 의해 Boron의 결정립계 편석이 충분히 발생하지 않아 수소취성 저항성 향상 효과가 제한적인 것으로 나타났다. 본 연구는 LPBF 방식으로 제작된 CoCrFeNi 중엔트로피 합금에서 열처리를 통한 Boron 편석 유도과 수소취성 저항성 간의 상관관계를 규명하고, 적층 제조 합금의 수소 환경 적용성을 향상시키기 위한 미세조직 설계 전략을 제시하고자 한다. 열처리 온도는 상태도 기반 열역학 분석을 통해 Boron의 chemical potential이 최대가 되는 구간을 선정하여 수행하였다. 열처리 전후 미세조직 변화는 SEM, EBSD 및 BSE 분석을 통해 관찰하였다. 수소취성 거동 평가는 실시간 수소 장입 환경에서 인장시험을 수행하여 수소 미장입 조건과 비교하였으며, Hydrogen Embrittlement index를 통해 수소취성 민감도를 정량적으로 분석하였다. 또한 Thermal Desorption Spectroscopy(TDS)를 이용하여 열처리에 따른 수소 트랩 사이트 변화 및 수소 함량 변화를 평가하였다. 향후 유사한 misorientation을 가지는 결정립계를 대상으로 3D Atom Probe Tomography(3D-APT)를 수행하여 Boron의 결정립계 편석 거동을 직접적으로 확인할 예정이다.

#### [수소4-1 | 15:30]

**TRIP 강의 수소-미세조직 상호작용 규명을 위한 결정소성 기반 수치 해석 모델 개발:** 박진홍(서울과학기술대학교), 송상윤(고려대학교), 신건진(서울대학교), 손석수\*(고려대학교), 이명규\*(서울대학교)

**Keywords:** 변태유기소성강, 수소취성, 변태유기수소방출, 모델링

변태유기소성(TRIP) 강은 우수한 강도와 연성 조합으로 인해 다양한 구조용 소재로 널리 활용되고 있다. 그러나 최근 연구에 따르면 TRIP 강은 수소 환경에 노출될 경우 수소 취성에 매우 취약한 것으로 보고되고 있다. 준안정 오스테나이트는 마르텐사이트에 비해 높은 수소 용해도와 낮은 확산도를 가지며, 변형유기 마르텐사이트 변태(DIMT)가 발생할 경우 오스테나이트에 포획되어 있던 수소가 새롭게 형성된 마르텐사이트로 방출되면서 국부적인 수소 집적이 발생한다. 이는 변태유기 수소 방출(TIHR)이라고 알려져 있으며, 변형과 수소 장입이 동시에 작용하는 조건에서 취성을 크게 가속시킨다. 또한 수소는 DIMT의 반응 속도를 촉진시켜 손상 진화를 더욱 가속화하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 수소 환경 하에서 TRIP 강의 미세조직 수준에서의 화학-기계적 결합 거동을 전산모사할 수 있는 해석 프레임워크를 제안하였다. 제안된 모델은 결정소성 이론, DIMT 모델, 그리고 다중 트랩 기반 수소 확산 모델을 통합한 구조로 구성되며, 수소-미세조직 상호작용을 모사하기 위해 HELP(hydrogen-enhanced localized plasticity) 및 HEPT(hydrogen-enhanced phase transformation) 메커니즘을 함께 고려하였다. 이를 통해 변형, 상변태, 수소 확산 간의 상호 연계를 체계적으로 해석할 수 있으며, TRIP 강에서의 수소취성 발생 메커니즘에 대한 물리적 이해를 제공하고자 한다.

**[수소4-2 | 15:45]**

수소환경에서 배관강의 내수소취성 스크리닝을 위한 외주노치 도입 중공시험편 SSRT를 이용한 상대노치인장강도(RNTS) 연구: 신희섭\*, Richard Pascua(국립경국대학교), 김기석(포스코)

**Keywords:** pipe steel, hydrogen embrittlement, externally notched hollow specimen, SSRT, relative notch tensile strength (RNTS)

AI 데이터센터 확대 등에 따른 신재생에너지 비율 확대는 수소 및 천연가스 물질을 보다 안전하게 대량으로 운송하는 방법을 필요로 하고, NG용 배관망 활용에 관심이 증대하고 있다. 고강도강(high strength steel) 라인 파이프는 배관 벽 두께를 줄이고 작동 압력을 높일 수 있어, 장거리, 대구경, 높은 작동압력의 배관망 구축에 활용이 기대된다. 기존의 천연가스용 배관강(API X52, X65, X70 등)에 대한 수소취성 연구가 수소 전용 또는 혼소 대응으로 활발히 진행되어 오고 있다. 특히 고강도강 API X70, X80 및 X100강의 경우, 합금 원소와 TMCP공정을 적절히 혼합하여 강도, 인성 및 용접성 향상이 가능하도록 개발되어 오고 있다. 배관강에서 수소취성(HE)은 통상적으로 연성저감을 가져오지만, 강도 저하는 미미하다는 것이 알려져 있어서, 강도 기반 고강도강 라인 파이프에 대한 수소취성 평가 노력이 필요하다. 페라이트계 배관강의 수소취성(HE) 민감도는 노치재 인장시험편을 사용한 SSRT를 통해 상대 노치인장강도(RNTS)를 평가하도록 표준(CHMC-1)에 규정하고 있다. 따라서 본 연구는 상온 고압 수소 환경에서 외부 V자형 노치가 있는 중공 시험편을 사용한 저속 변형률 인장 시험(SSRT)이라는 간소화된 방법을 통해 API X70 및 X80 배관강의 RNTS를 측정하는 데 중점을 두었다. 외부 노치는 수소축진 파괴(HAF)에 영향을 미쳐 준벽개(QC)와 미세 공극 합체(MVC)가 혼합된 파괴 패턴을 나타내었다. 본 연구 결과는 페라이트 상 수소용 배관강의 수소 취성 민감도를 평가하기 위해 새롭게 개발된 강도 기반 스크리닝 방법의 신뢰성을 입증하였다. Acknowledgment: This work was supported by the KETEP grants funded by the Korean Government (MOTIE) (Grant No.:RS-2022-KP002825 and RS-2024-00449309) and the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant No.: RS-2023-00245737). The authors thank POSCO Co. for supplying Samples.

**[수소4-3 | 16:00]**

Comparative Evaluation of Small Punch Test (SPT) and Hollow Specimen SSRT for Hydrogen Compatibility Assessment of Austenitic Stainless Steel STS316L under External Hydrogen Environment Across a Wide Temperature Range: Richard Pascua, Hyung-Seop Shin\*, Sang-Heon Lee(Gyeongju National University)

**Keywords:** STS 316L, Hydrogen embrittlement, small punch test (SPT), Slow strain-rate tensile test (SSRT), hollow specimen, strain-induced martensitic transformation, Ferritic content.

Austenitic stainless steel STS316L is widely used in hydrogen-related applications due to its excellent corrosion resistance, high ductility, and relatively good resistance to hydrogen embrittlement (HE) compared to ferritic steels. Its stable face-centered cubic (FCC) structure provides lower hydrogen diffusivity and superior toughness, making it suitable for high-pressure and cryogenic hydrogen environments. However, under severe conditions such as low temperature and plastic deformation, strain-induced martensitic transformation may occur, which can increase hydrogen susceptibility. Therefore, reliable mechanical evaluation methods are essential to assess its hydrogen compatibility across a wide temperature range. This study investigates the temperature-dependent HE behavior of austenitic stainless steel STS316L under different applied stress states using small punch testing (SPT) and hollow-specimen slow strain rate tensile testing (SSRT). The SPT was conducted under compressive biaxial stress condition, while SSRT was performed under uniaxial tensile loading. Its susceptibility to hydrogen was assessed through the relative reduction of thickness (RRT) in SPT and the relative reduction of area (RRA) in SSRT; Both indices measure ductility loss caused by HE. Tests were carried out in 10 MPa nitrogen (N<sub>2</sub>) and hydrogen (H<sub>2</sub>) environments over a temperature range from room temperature (RT) to 77 K. The results revealed a continuous increase in ferrite content with decreasing temperature after both SPT and SSRT, indicating the occurrence of strain-induced martensitic transformation. A pronounced increase in ferrite fraction was observed at -60 °C, corresponding to significant HE effects. Below -100 °C, improved HE resistance was observed, which is attributed to reduced hydrogen diffusivity, and no apparent hydrogen embrittlement was detected at 77 K. Both testing methods exhibited similar temperature dependence on HE trends; However, SPT yielded lower RRT values compared to RRA obtained from SSRT. An empirical correlation of  $RRA \approx RRT + (0.1-0.2)$  was identified at a deformation rate of 0.1 mm/min, particularly from RT to -120 °C where HE was most pronounced. The difference between HE indices suggests that hydrogen diffusion and penetration behaviors are influenced by the applied stress state, notably the complex biaxial stress condition in SPT, which may provide a more sensitive evaluation of HE hydrogen embrittlement and be more conservative than uniaxial SSRT for practical hydrogen service applications. Acknowledgment: This work was supported by the KETEP grants funded by the Korean Government (MOTIE) (Grant No.: RS-2024-00449309 and RS-2022-KP002825). The authors thank POSCO Co. for supplying samples.

**[수소4-4 | 16:15]**

In-situ Reassessment of Hydrogen Embrittlement in CrCoNi Medium-Entropy Alloy: Yoonmoon Chung, Seung Jae Lee, Jeongho Han\*(Hanyang University)

**Keywords:** Medium-entropy alloy, CrCoNi, Hydrogen embrittlement, in-situ

High-entropy alloys (HEAs) have recently emerged as promising structural materials because of their outstanding mechanical properties, particularly under demanding service environments. Among them, face-centered cubic (FCC)-based HEAs such as the Cantor alloy (FeMnCrCoNi) are often highlighted for their resistance to hydrogen embrittlement (HE), which arises from multiple slip

systems, strong atomic-scale interactions, and solid-solution strengthening effects that hinder hydrogen transport to defects. On this basis, attention has shifted to the CrCoNi medium-entropy alloy (MEA), a derivative of the Cantor alloy with fewer principal elements, which has demonstrated enhanced mechanical performance across a variety of conditions. Most prior assessments of HE in advanced alloys have relied on ex-situ pre-charging, where hydrogen is introduced before testing. However, this method may fail to represent the degradation processes occurring during real-time exposure. To address this limitation, the present study employed both pre-charging and in-situ hydrogen charging to investigate fracture behavior. The commercial 316L stainless steel was included as a benchmark reference, enabling direct comparison of materials and charging conditions within a unified framework. The results revealed a striking outcome: rapid fracture occurred only in CrCoNi under in-situ charging, while all other combinations exhibited relatively stable behavior. Through various analytical techniques, the underlying causes of this unexpected HE were investigated in detail.

#### [수소4-5 | 16:30]

A study for alloying effect on hydrogen embrittlement of Al alloys: Sokyun Hong(한양대학교), Jae Hur, Won-Seok Ko(고려대학교), Jeongho Han\*(한양대학교)

**Keywords:** Hydrogen embrittlement, Aluminium, Density Functional Theory

In this study, Density Functional Theory (DFT) calculations were employed to systematically investigate alloying-element-dependent hydrogen effects at an aluminum Σ5 grain boundary, with a focus on hydrogen-induced grain boundary fracture behavior. Al-X (X = Cr, Cu, Mn, Mg, Fe, Ag, Sc, Ti, Ni, Li, Zn, Si, Zr, V) grain boundary models were constructed to evaluate solute-grain boundary segregation energetics and coupled solute-hydrogen-grain boundary binding characteristics. In addition, DFT-based grain boundary tensile separation simulations were performed both in the absence and presence of hydrogen to directly quantify changes in grain boundary cohesive strength and fracture response induced by hydrogen. The results reveal pronounced element-dependent differences in grain boundary segregation and hydrogen trapping behavior. Fe, Mn, and Sc exhibit strong grain boundary segregation combined with high solute-hydrogen binding, resulting in significant reductions in grain boundary fracture resistance under hydrogen. In contrast, Ti, Cr, and Zr show weak or repulsive solute-hydrogen interactions and effectively suppress hydrogen-induced grain boundary decohesion, while Cu and Si display intermediate behavior. These combined energetic and mechanical analyses establish a quantitative atomistic framework linking alloy chemistry to hydrogen-induced grain boundary fracture susceptibility and provide practical guidelines for alloy design aimed at improving hydrogen embrittlement resistance in aluminum alloys.

#### [수소5-1 | 16:45]

액화수소 온도에서 오스테나이트 스테인레스 강의 충격물성 측정에 관한 고찰: 백운봉\*, 박재영(한국표준과학연구원)

**Keywords:** 오스테나이트 스테인레스강, 액화수소, 충격물성

최근 기후변화에 따른 수소에너지의 대량 수요에 대비하여 액화수소에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히 액화수소의 경우 20 K의 온도로 유지하므로 액화수소 수송 및 저장용 소재는 오스테나이트 스테인레스강이 주로 선택되고 있다. 따라서 극저온에 사용되는 금속 소재의 경우 저온취성이 주요 파손 기구이므로 이들 소재는 내충격 특성이 요구된다. 충격실험과 관련된 국제규격에서 규정하는 최저실험온도는 77 K이다. 77 K보다 낮은온도에서의 충격실험은 새로운 규격이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 20 K 이하에서 충격물성을 측정하는 방법에 대해 고찰하고 그 안을 제시하고자 한다.

#### [수소5-2 | 17:00]

고망간강 주조재의 상온과 극저온에서의 수소취성 메커니즘 비교 연구: 이시환, 신희철, 박준호, 이종석, 이승건\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 수소취성, 고망간강 주조재, 수소 강화 국부 소성, 적층 결함 에너지, 마르텐사이트 변태

친환경적인 수소 사회 구현을 위해서는 대용량 수소의 안전한 저장 및 장거리 이송 기술 확보가 필수적이다. 이러한 관점에서 수소를 극저온에서 액화하여 운송 및 저장하는 방식은 체적 에너지 밀도를 크게 향상시킬 수 있어 글로벌 수소 공급망 구축의 핵심 기술로 주목받고 있다. 이에 따라 극저온 환경에서 구조적 신뢰성을 확보할 수 있는 소재 개발과 수소 환경 하에서의 기계적 거동에 대한 이해가 중요한 과제로 대두되고 있다. 고망간강 주조재는 극저온에서도 높은 강도와 우수한 연성을 동시에 확보할 수 있는 소재로, 대형 액화수소 저장탱크용 구조재료의 적용을 위한 연구와 실증이 활발히 이루어지고 있다. 상온에서의 고망간강 수소취성 거동에 대한 연구는 다수 보고되었으나, 극저온 수소 환경에서의 거동에 대한 체계적인 연구는 아직 제한적이다. 극저온에서는 수소 확산이 현저히 억제되므로, 상온과는 다른 수소취성 거동이 나타날 가능성이 있다. 또한 온도 변화는 적층 결함 에너지 및 변형 메커니즘에 영향을 미칠 수 있어, 수소와 변형의 상호작용이 온도에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 고망간강 주조재에 고압으로 수소를 장입한 후 상온, 77 K, 20 K에서 저속인장시험을 수행하여 수소에 의한 기계적 물성 변화를 확인하였다. 또한 EBSD 등의 미세조직 분석을 통하여 각 온도 조건에서의 국부 소성 거동과 상변태를 관찰하였다. 이를 통해 상온과 극저온에서 수소가 유도한 국부 소성 촉진, 원자 결합력 저하, 적층 결함 에너지 변화가 고망간강의 변형 및 파괴 거동에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

#### [수소5-3 | 17:15]

SA-372 Gr. J Class 70 강의 저온 파괴인성 평가와 수소환경을 고려한 최소허용온도(MAT) 산정: 김정환\*, 이화영, 이민경, 하기역, 정성원(한국가스안전공사)

**Keywords:** SA-372 Gr. J Class 70, 저온 파괴인성, 수소취성, 최소허용온도(MAT), Master Curve, FAD, API 579-1/ASME FFS-1

SA-372 Gr. J Class 70 강은 국내 90 MPa급 수소 압력용기에 1,000기 이상 적용되어  $-40^{\circ}\text{C}\sim+85^{\circ}\text{C}$  범위에서 운전 건전성이 축적되어 왔다. 그러나 액화·고체 수소 인프라 확장에 따라,  $-40^{\circ}\text{C}$  이하 전이영역의 준저온 노출이 가능한 버퍼 저장탱크 후보 재료로 SA-372의 적용 가능성이 재조명되고 있으며, 이 경우 기존 샤르피 면제 기준만으로는 수소환경을 포함한 안전여유를 설명하기 어렵다. 본 연구에서는 SA-372 Gr. J Class 70의 저온 파괴거동을 정량화하기 위해  $+23^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$  구간의 Charpy V-notch 충격시험을 수행하고, 흡수에너지 데이터를 tanh 피팅으로 전이곡선화하여 전이온도 및 선반 에너지 등의 매개변수를 도출하였다. 도출된 전이 특성은 API 579-1/ASME FFS-1 Level 3 Option C 및 Master Curve 기반 절차에 결합하여 온도 의존 파괴인성  $K_{mat}(T)$ 을 추정하였고, FAD 해석을 통해 불활성(공기) 및 수소 노출 조건에서의 최소허용온도(MAT)를 산정하였다. 수소취성 영향은 문헌 기반의 보수적 임계 파괴인성 KIH 가정을 통해 반영하였다. 그 결과 공기 조건에서는  $-60^{\circ}\text{C}$  수준까지 인성 여유가 확인된 반면, 수소환경을 고려한 90 MPa 운전 조건의 MAT는  $-24.1^{\circ}\text{C}$ 로 제한되어  $-40^{\circ}\text{C}$  면제 관행이 전이온도에는 비보수적일 수 있음을 시사하였다. 본 연구는 저온-수소환경 연계 MAT를 제시함으로써 SA-372 용기의 기계학적 안전 마진을 정량화하고, 차세대 수소설비의 리스크 기반 설계·검사 전략 수립을 지원한다.

#### [수소5-4 | 17:30]

**극저온용 316LH 스테인리스강의 상온 및 극저온 수소취성 거동 연구:** 이재호(한국재료연구원, 부산대학교), 윤성준, 이준호, 김영균, 나영상\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 스테인리스 강, 극저온 물성, 수소취성, 미세조직, 인장물성

최근 탄소중립 실현을 위한 에너지 전환이 가속화됨에 따라 수소에너지가 차세대 청정 에너지원으로 주목받고 있다. 특히 액체수소는 기체수소 대비 약 1/800 수준의 부피를 가지므로 높은 저장 밀도와 운송 효율을 확보할 수 있어 수소 에너지 저장 및 수송 시스템에 필수적이다. 그러나 액체수소의 저장 및 운송은 약 20 K 수준의 극저온 환경에서 이루어지며, 이와 동시에 금속 재료는 수소취성에 노출될 수 있으므로 극저온 기계적 거동과 수소-변형 상호작용에 대한 심층적 이해가 필요하다. 본 연구에서는 극저온으로 개발된 오스테나이트계 스테인리스강 316LH를 대상으로 상온 및 극저온 조건에서의 수소취성 거동을 체계적으로 분석하였다. 인장시험 및 미세조직 분석을 통해 온도 변화에 따른 변형 특성과 파괴 거동을 비교하였다. 그 결과, 316LH는 기존 316L 대비 우수한 FCC 상 안정성을 나타내었으며, 극저온 변형 시에도 마르텐사이트 변태가 억제되어 연성 감소에 대한 저항성이 향상됨을 확인하였다. 또한 수소 장입 조건에서 316LH는 상온 및 극저온 모두에서 상대적으로 안정적인 변형 거동을 보였으며, 이는 상 안정성 및 변형 메커니즘 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 316LH의 극저온 수소 환경 적용 가능성을 제시하며, 온도 의존적 수소취성 거동과 변형 메커니즘 간의 상관관계를 규명하는 데 중요한 기초 자료를 제공한다.

#### [수소5-5 | 17:45]

**고압비틀림 공정을 통한 Ti-Nb-Cr-Mn-V 고엔트로피합금의 미세조직 제어 및 수소화 속도 향상:** 하효정, 하수빈, 구강희, 천동원(포항공과대학교), Kaveh Edalati(Kyushu University), 김형섭\*(포항공과대학교)

**Keywords:** Hydrogen storage alloy, High-entropy alloy, First hydrogenation kinetics, Severe plastic deformation, Solid-gas reaction

본 연구에서는 고압비틀림 처리 후 어닐링 온도가 Ti<sub>24</sub>Nb<sub>10</sub>Cr<sub>6</sub>Mn<sub>25</sub>V<sub>35</sub> (at%) 고엔트로피 합금의 수소화 거동을 결정립계 밀도와 상 형태 제어를 통해 조절할 수 있음을 규명하였다. 해당 합금은 체심입방 BCC 기지와 제2상의 C14 Laves 상으로 구성된다. 고압비틀림 공정 이후 1150  $^{\circ}\text{C}$  및 1250  $^{\circ}\text{C}$ 에서 5분간 어닐링한 시편과 주조 상태 시편을 대상으로 미세조직 변화와 수소 저장 특성을 체계적으로 분석하였다. 그 결과, 1150  $^{\circ}\text{C}$ 에서 어닐링한 시편이 가장 미세한 결정립 구조를 형성하였으며, 실험조건 중 가장 빠른 수소화 속도를 나타냈다. 이러한 향상은 높은 결정립계 밀도에 기인하며, 결정립계가 수소 원자의 우선적 확산 경로로 작용하기 때문이다. 본 연구 결과는 severe plastic deformation과 최적화된 열처리를 통한 계면 공학적 제어가 HEA에서 수소 흡수 속도를 가속화할 수 있는 미세조직 설계 전략임을 제시한다.

## 적층제조 및 분말 II

Room 2층 202B, 4월 29일

### [적층5-1 | 09:00]

Directed Energy Deposition 공정으로 제조된 Nb-added Stainless Steel의 공정 변수에 따른 미세조직 및 기계적 특성 분석 : 한수빈, 이유리, 김동혁, 조용재, 장진석, 박동용, 이호진, 송혜진\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 적층 제조, 오스테나이트계 스테인리스강, 용고 조직, 미세조직, 기계적 특성

적층 제조 공정은 재료를 층층이 쌓아 올려 3차원 구조물을 제작하는 제조 기술로, 기존 제조 방식으로는 구현이 어려운 복잡하고 경량화된 구조물의 제작이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 특성으로 인해 적층 제조 기술을 항공우주, 자동차 및 에너지 등 다양한 산업 분야에서 중요성이 지속적으로 증가하고 있다. 그 중 directed energy deposition(DED) 공정은 레이저와 같은 고에너지 열원을 이용하여 금속 분말을 실시간으로 용융시켜 기판 또는 기존 부품 위에 직접 증착하는 기술로, 손상된 부품의 수리나 이중 재료 적층을 통한 기능성 부품 제작에 특히 유리하다. DED 공정에서는 레이저 출력, 스캔 속도 및 분말공급량 등과 같은 다양한 공정 변수가 용융 풀의 크기, 형성 및 안정성에 영향을 미치며, 이로 인해 내부 결함을 발생할 수 있다. 최적화되지 않은 공정 조건은 치수 정확도를 저하시킬 뿐만 아니라 기계적 특성을 약화시킬 수 있기 때문에 공정 변수의 제어 및 최적화를 통해 DED 공정의 신뢰성을 향상시키는 것은 중요한 과제이다. 이에 본 연구에서는 스캔 속도와 레이저 출력을 공정 변수로 설정하여 Nb이 첨가된 스테인리스강을 DED 공정으로 제작하였으며, 공정 조건 변화에 따른 미세조직 및 기계적 특성 간의 상관관계를 분석하였다. 본 연구 결과는 Nb 첨가 스테인리스강의 DED 공정 적용 시 미세조직 특성을 고려한 공정 최적화 전략의 필요성을 강조한다.

### [적층5-2 | 09:15]

LPBF 공법으로 적층제조된 스테인리스강 316L 합금의 전위 셀 미세구조가 4.2 K 초저온 환경 인장 거동에 미치는 영향: 박하운(한국재료연구원, 고려대학교), 정희찬, 성민영(고려대학교), 김영균(한국재료연구원), 정재면(한국재료연구원), 이유나, 강남현(부산대학교), 김경태(한국재료연구원), 나영상(한국재료연구원), 손석수\*(고려대학교), 박정민\*(고려대학교, 한국재료연구원)

**Keywords:** Laser powder bed fusion, 316L Stainless steel, Liquefied helium temperature, Tensile behavior, Discontinuous plastic flow behavior

전 세계적으로 심화되는 기후 변화 문제에 대응하여 산업 전반에서는 지속 가능하고 재사용 가능한 자원의 활용이 강조되고 있다. 이러한 흐름에 따라 항공우주 산업에서도 기존의 소모성 발사체에서 재사용 발사체로의 전환이 빠르게 진행되고 있다. 재사용 발사체는 이륙, 궤도 진입, 임무 수행 및 복귀 과정에서 극심한 기계적·열적 하중을 반복적으로 경험하며, 초저온에서 초고온에 이르는 광범위한 온도 환경에 노출된다. 오스테나이트계 스테인리스강은 넓은 온도 범위에서 상 안정성과 우수한 강도 및 연성을 유지하는 대표적 구조재료로 재사용 발사체의 핵심 부품에 적용되고 있다. 한편, 임무 효율 향상과 자원 소모 저감을 위해서는 부품의 경량화와 형상 최적화 설계가 필수적이다. 이러한 복잡 형상 부품을 효과적으로 구현하기 위해 금속 적층제조 기술이 도입되었으며, 그 중 레이저 분말 베드 용융(laser powder bed fusion, LPBF) 공법은 높은 설계 자유도와 형상 정밀도를 바탕으로 항공우주 분야에서 활발히 활용되고 있다. LPBF 공정으로 제조된 316L 스테인리스강은 셀 구조 기반의 불균질한 미세조직과 높은 전위 밀도를 특징으로 하며, 이러한 LPBF 공정 특유의 고유 미세조직이 극저온에서도 우수한 물성을 나타내는데 기여하는 것으로 보고되고 있다. 그러나, 35 K 이하의 초저온 조건에서 나타나는 불연속적 소성 유동(discontinuous plastic flow, DPF) 거동에 LPBF 고유 미세조직(예: 전위 셀 미세조직 등)이 미치는 영향에 대해 체계적인 연구가 많이 보고되지 않았다. 본 연구에서는 LPBF로 제조된 316L 스테인리스강의 4.2 K 인장 거동을 열간 등방성 압축(hot isostatic pressing, HIP) 처리된 시편과 비교 분석하였다. 4.2 K 인장 시험 결과 두 시편 모두 소성 변형 구간에서 DPF 거동이 나타났으며, LPBF 시편은 초기 변형 단계에서 HIP 처리 시편 대비 더 큰 응력 강하를 동반하였다. 이는 나노 크기의 전위 셀 구조에 기인한 미세구조 효과로 해석되며, 초저온에서의 기계적 및 열-기계적 불안정성 거동과 밀접하게 연관됨을 시사한다. 변형이 진행됨에 따라 두 시편 모두 변형 유기 마르텐사이트 변태(deformation induced martensitic transformation)가 점진적으로 활성화되었으나, LPBF 시편에서는 초기 미세구조의 영향으로 DPF 거동이 지속적으로 우세하게 나타났다.

### [적층5-3 | 09:30]

GPR을 활용한 IN718의 DED 공정 분석 및 실험설계: 김성원, 유진영(부산대학교), 김정기(경상국립대학교), 이태경\*(부산대학교)

**Keywords:** IN718, DED, GPR

니켈 기반 초합금은 우수한 내열성, 내산화성, 내식성을 가지며 해양, 우주, 에너지 산업 등에 사용되는 합금이다. 니켈계 초합금의 낮은 가공성으로 인하여 적층 제조 기술을 적용하고자 하는 시도가 활발하다. IN718의 적층 제조에 direct energy deposition(DED) 공정이 사용되고 있으며 높은 공정 자유도를 지녀 MRO 산업에서도 주목받고 있다. 이러한 장점에도 불구하고 DED 공정에서 부적절한 공정 파라미터가 선택될 경우 net shape 확보가 어려울 뿐만 아니라 매우 낮은 형상 정확도를 가지는 적층체가 제조될 수 있다. Net shape 또는 near net shape가 적층 제조 공정이 가지는 장점인 만큼 우수한 형상 정확도를 확보할 수 있는 공정 파라미터의 탐색은 필수적이다. 본 연구에서는 DED 적층 데이터를 활용하여 Gaussian process regression(GPR) 모델을 구축 후 형상 정확도를 기준으로 설계 공간 내 최적 파라미터 영역을 식별하였다. 식별된 두 영역의 volumetric energy density(VED)와 분말 공급량을 확인한 결과 (1) 낮은 VED( $\approx 160 \text{ J/mm}^3$ )와 높은 분말 공급량( $\approx 2.6 \text{ g/min}$ ), (2) 높은 VED( $\approx 240$



J/mm<sup>3</sup>)와 낮은 분말 공급량( $\approx 2.0$  g/min)을 가지는 것을 확인하였다. 또한 식별된 최적 영역이 기존 설계 공간 경계에 위치해 있는 것을 확인하였다. 이에 따라 앞서 확보한 GPR 모델을 활용하여 외삽 실험 설계를 진행하였으며 외삽 영역에서의 GPR 모델 신뢰도를 확보하기 위하여 설계 공간 내부에서 GPR 모델의 최대 변동 계수 값을 추가적인 기준으로 활용하였다. 추가적으로 적층한 시편의 형상 정확도, 밀도, 강도를 측정하였으며 build direction을 따라 SEM, EBSD 분석을 활용하여 melt pool shape, primary dendrite arm spacing, KAM value 등을 확인하였다. 이를 통해 최적 적층 영역에서 공정 파라미터가 적층 과정에 미친 영향을 확인하였다.

#### [적층5-4 | 09:45]

SiO<sub>2</sub> 나노입자 기반 유동 특성 개선 및 구형/HDH Ti-6Al-4V 혼합분말의 L-PBF 공정 최적화: 한지민, 이종익, 이빈\*(경희대학교)  
 Keywords: laser powder bed fusion, Ti-6Al-4V, flow properties

Laser Powder Bed Fusion(L-PBF)는 얇게 도포된 금속 분말층에 레이저를 선택적으로 조사하여 3차원 부품을 적층 제조하는 공정으로, 설계의 자유도가 높고 치수 정밀도가 우수하다는 특징을 가진다. 이러한 특성으로 인해 L-PBF는 가공성이 낮은 Ti 및 Ti 합금 부품 제조에 적합한 공정으로 평가되고 있다. L-PBF 공정에서는 분말이 균일하게 도포되어 안정적인 분말층을 형성하는 것이 중요하며, 분말의 유동 특성은 공정 안정성과 최종 부품 품질에 직접적인 영향을 미친다. 이에 일반적으로 L-PBF 공정에는 유동 특성이 우수한 가스 아토마이징으로 제조된 구형 분말이 사용되고 있다. 그러나 구형 Ti 합금 분말은 제조 공정 특성 상 분말 단가가 높다는 한계가 있다. 한편 수소화-탈수소화(hydrogenation-dehydrogenation, HDH) 방식으로 제조된 Ti 합금 분말은 상대적으로 저렴하여 비용 측면에서 이점이 있으나, 비구형 형상으로 인해 입자 간 응집과 마찰이 증가하고 유동 특성이 저하되어 안정적인 분말층 형성을 저해한다. 이에 본 연구에서는 소수성 SiO<sub>2</sub> 나노입자를 이용한 표면 개질을 통해 HDH Ti-6Al-4V 분말의 유동 특성을 제어하고, 이를 구형 Ti-6Al-4V 분말과 1:1 비율로 혼합한 분말 시스템을 L-PBF 공정에 적용하였다. 또한 Gaussian Process Regression(GPR) 모델을 활용해 최적 공정 조건 후보를 도출하고, 이를 기반으로 실험적 검증 수행하여 최종 공정 조건을 선정하였다. 해당 조건에서 제조된 시편은 상대밀도 99.75%를 확보하였으며, 비커스 경도는 구형 분말 시편 대비 약 24% 향상되었다. 인장시험 결과, 항복강도 1128 MPa, 인장강도 1308 MPa로 ASTM F2924 규격의 요구를 만족하는 기계적 성능을 나타냈다. 본 연구는 HDH 기반 저비용 Ti-6Al-4V 분말의 L-PBF 공정 적용 가능성을 분말 설계와 공정 최적화 관점에서 제시한다.

#### [적층5-5 | 10:00]

Influence of Atmospheric Environments on Spark Plasma Sintering Kinetics, Densification, and Microstructural Evolution in Inconel 718 and 316L Stainless Steel Alloys: Seong Gyu Chung(POSTECH-DANE), Jung Wook Cho\*(POSTECH-GIFT), Hwasung Yeom\*(POSTECH-DANE)

Keywords: Spark Plasma Sintering/ Powder Metallurgy/ Atmospheric Effect/ Interface Stability/ Nickel based super alloy

The understanding of interfacial behavior at boundary junctions between dissimilar alloys has been advanced through both melt-based joining techniques and solid-state approaches such as sintering. In nuclear applications, where phase instability and undesirable precipitate formation during fusion-based processes (e.g., welding) present significant challenges, solid-state joining methods—including cold spray deposition and brazing—have emerged as preferred strategies for fabricating Inconel 718–316L stainless steel hybrid structures. These jointed systems are particularly relevant in the construction of reactor cores and steam generator assemblies within pressurized water reactors (PWRs). The primary objective of this research was to investigate interfacial stability under controlled nitrogen atmospheres, in comparison to conventional inert environments. Experimental findings revealed that nitrogen-assisted spark plasma sintering (SPS) processing promoted the formation of uniformly distributed nitrides along grain boundaries. While hardness variations between nitrogen- and argon-processed samples were relatively minor, the presence of these nitrides imparted significant improvements in isotropy and mitigated interface-related anisotropy. The uniform dispersion and grain-boundary pinning effects collectively enhanced interfacial cohesion and thermal stability, with pronounced benefits observed in sinter-based systems. These results emphasize the potential of nitrogen-assisted processing routes in enabling compatible joint structures between Inconel 718 and 316L stainless steel for advanced nuclear applications.

#### [적층6-1 | 10:25]

직접용융증착법 기반 IN738LC/CM247LC 접합 시 균열 형성 및 성장 기구 분석: 석예찬, 강호성(경상국립대학교), 이형수, 서성문(한국재료연구원), 김정기\*(경상국립대학교)

Keywords: Additive Manufacturing, Directed Energy Deposition, Inconel alloy, Carbide, Interface

고온 환경에서 사용되는 니켈기 초내열합금 부품의 수명 연장을 위해 Directed Energy Deposition(DED) 기반 유지보수 기술에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다. 기존 연구에서는 Hastelloy X, IN625와 같은 상대적으로  $\gamma'$  분율이 낮고 용접성이 우수한 합금을 고등급 니켈합금 위에 적층한 사례들이 보고되어 왔으나,  $\gamma'$  강화상이 풍부한 고등급 니켈기 초내열합금에 대한 직접적인 DED 적층 연구는 아직 많지 않다. 이는 높은 Al 및 Ti 함량으로 인한 응고 구간 확대, 액상 필름 형성, 그리고 이에 따른 고온 균열 발생 가능성으로 인해 공정 안정성이 크게 저하되기 때문인데, 본 연구에서는 기존 연구를 통해 무균열 적층이 검증된 IN738LC 합금을 적층 소재로 선정 후 마찬가지로  $\gamma'$  분율이 높은 일방향응고 CM247LC 합금 위에 DED 공정을 활용해 접합하였다. 적층 공정 중 결함 발생을 최소화하기 위해 공정 변수 최적화를 수행하였으며, 적층 이후 및 열처리 전, 후의 미세조직 변화를

중심으로 계면 안정성, 균열 형성 거동 및 전파 특성을 분석하였다. 그 결과, 접합 영역에서 다량의 고온균열들이 접합 영역 인근의 미세조직적 취약 경로를 따라 형성되는 것이 확인되었으며, 후열처리 적용 후 그 거동이 달라짐을 확인하였다. 본 연구는  $\gamma'$  석출강화형 니켈계 초내열합금 위에 유사 계열의 고강도 합금을 직접 적층한 사례로서, DED 기반 이중합금 적층 기술의 적용 범위를 고등급 소재로 확장하기 위해 필요한 요소에 대해 분석하였다.

#### [적층6-2 | 10:40]

**후속 열처리 없이 직접 에너지 증착 공정으로 제조된 마레이징 중엔트로피 합금의 초고강도 특성:** 김진우, 이재홍, 안성열, 구분우, 이시우, 이정아, 허윤옥(포항공과대학교), 홍순익(충남대학교), 김형섭\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 마레이징 중엔트로피 합금, 직접 에너지 증착, 편석, 고유 열처리, 기계적 물성

마레이징강은 초고강도 특성으로 인해 항공우주, 국방 및 금형 산업에서 폭넓게 활용되고 있으며, 우수한 용접성으로 인해 적층제조 공정에 적용하기에 적합한 재료로 알려져 있다. 그러나 기존 마레이징강은 목표 강도를 확보하기 위해 적층 이후 후속 열처리 공정을 필수적으로 요구한다. 본 연구에서는 직접 에너지 증착(Direct Energy Deposition, DED) 공정을 이용하여 제조한 새로운 60Fe-25Co-10Ni-5Mo 마레이징 중엔트로피 합금을 제시하며, 해당 합금은 별도의 후속 열처리 없이도 적층 직후(as-built) 상태에서 매우 우수한 강도를 나타낸다. 본 합금은 마르텐사이트 시작 온도가 372 °C로 높아, 대기 시간(dwell time)이 없는 조건에서도 적층 도중 마르텐사이트 변태가 발생하였다. 또한 적층 과정 중 셀 경계에서 Mo가 편석되어 해당 영역에서 FCC 상이 국부적으로 안정화되었다. 이에 따라, 마르텐사이트 변태는 적층 도중 셀 내부에서 우선적으로 발생한 반면, Mo가 풍부한 셀 경계에서는 변태가 적층 이후로 지연되었다. 이러한 마르텐사이트 변태 시점의 공간적 이질성은 셀 내부와 구별되는 마르텐사이트 블록의 형성을 유도하여 효과적인 결정립 미세화를 가능하게 하였다. 더 나아가, 적층 공정 중 반복적인 열 사이클에 의해 발생한 고유 열처리는 셀 내부의 마르텐사이트 영역에서  $\mu$ 상의 석출을 촉진하였으며, 이는 전체 강도 향상에 크게 기여하였다. 그 결과, 항복강도  $1549.3 \pm 18.9$  MPa 및 인장강도  $1725.9 \pm 19.0$  MPa의 높은 강도를 확보하였으며, 이는 적층제조된 마레이징 합금의 적층 직후 상태에서 기존에 보고된 강도 수준을 크게 상회하는 수준이다. 본 연구는 적층 공정 중 발생하는 열 이력과 미세조직 거동을 활용하여, 후열처리 없이 초고강도를 달성할 수 있는 새로운 미세조직 제어 접근법을 제시한다.

#### [적층6-3 | 10:55]

**Plate-assist Kelvin type Inconel 718 격자 구조체의 후열처리를 통한 기계적 특성 향상:** 박소연, 오주환(인하대학교), 송영원, 고찬영(인천항공우주산업(주)), 이기안\*(인하대학교)

**Keywords:** Laser powder bed fusion, Inconel 718 superalloy, Lattice structure, Mechanical property, Microstructure, Post heat treatment

Lattice structure는 특정 unit cell이 주기적으로 반복되는 구조로, 기존 다공성 소재 대비 우수한 비강도를 나타낸다. Inconel 718 (이하 718 합금)은 우수한 기계적 특성과 내부식성, 내산화성을 지닌 대표적인 Ni-Cr계 초합금으로 항공 우주 및 에너지 산업 분야에서 널리 활용되고 있다. 격자 구조체 중 하나인 Kelvin truss model은 우수한 에너지 흡수 능력과 하중 분산 특성으로 주목받고 있다. 본 연구에서는 기계적 특성 향상을 위해 Kelvin truss (KT)의 지지 구조를 plate type으로 변형한 Kelvin plate (KP) 구조를 설계하고 적층 제조 공정인 LPBF (laser powder bed fusion) 공정으로 제작하였다. 이후 물성 향상 및 미세조직 제어를 위해 solid solution 및 double aging 후열처리(HT)를 진행하였다. 미세조직 관찰 결과, SR 처리된 시편은 높은 분율의 Laves 및  $\delta$  상으로 구성되어 있었다. HT 이후 Laves 및  $\delta$  상은 거의 완전 용해되었으며, 나노 크기의  $\gamma''$  상의 석출상이 고분율로 존재하였다. 압축 시험 결과, SR 처리된 시편의 경우 항복 강도는 KT: 37.08 MPa, KP: 72.69 MPa였으며, 비강도는 KT: 17.43, KP: 27.88로 확인되었다. HT 시편의 경우 KT: 62.74 MPa, KP: 123.18 MPa, 비강도는 KT: 29.50, KP: 47.24 수준을 보였다. 열처리 조건과 관계없이 KP는 KT보다 1.69배 향상된 비강도를 나타냈으며, 각각 모델에 대해 HT 처리된 시편은 SR 처리된 시편보다 1.60배 향상된 비강도를 달성하였다. 상기 물성들은 finite element analysis, digital image correlation, EBSD, SEM, TEM 등의 분석 tool을 활용하여 multi scale 관점에서 해석되었으며, lattice 형상과 미세조직의 synergy 효과를 고려한 lattice structure의 기계적 특성 향상 방안을 논의하고자 하였다.

#### [적층6-4 | 11:10]

**균열 저항성을 고려한 인코넬 939 계열 적층 제조 내열합금 조성 최적화 전략:** 김동환, 김민석, 김재권, 민현기(서울대학교), 정희찬(한화에어로스페이스), 박은수\*(서울대학교)

**Keywords:** 니켈계 초합금, 적층 제조, 균열 저항성, 비평형 응고, 기계적 특성

인코넬 939는 크립 수명과 산화 저항성이 매우 뛰어난 니켈계 내열합금 소재이다. 그러나 이 합금은 주조 대비 용접 및 적층 제조 조건에서 크게 떨어지는 기계적 특성을 나타내는데, 이는 급격히 응고되는 합금 용탕의 매우 낮은 균열 저항성에 기인한다. 본 연구에서는 인코넬 939 계열 니켈계 내열합금의 구성 원소 분율 제어를 통한 균열 저항성 및 적층성을 개선하고자 하였다. 인코넬 939 및 파생 내열합금들의 비평형 냉각 곡선을 통해 그 적층성을 예측하였다. 또한 Ti, Nb 및 C와 같은 일부 원소들의 분율을 감소시킴으로써  $\gamma'$  석출상 분율 및 기계적 특성의 하락을 최소화하면서도, 응고 및 열처리 과정에서 균열 저항성은 크게 개선되는 신규 개발 합금 조성을 제시하였다. 나아가 기존의 열처리 공정 대신 해당 조성의 적층 소재에 최적화된 전용 HIP 및 후처리 공정을 도입하여 적은 시간과 비용으로 우수한 기계적 특성을 확보할 수 있었다. 이러한 연구 결과를 통해 인코넬 939뿐 아니라 다른 니켈계 초합금에서도 적층성 및 기계적 특성을 모두 확보할 수 있는 합금 설계 방향성을 제시할 수 있을 것으로 기대한다. 이 논문은 2026년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No. KRIT-CT-23-042-03)

**[적층6-5 | 11:25]**

**LPBF 공정으로 제조된 AlSi10Mg 합금의 적층 높이에 따른 기계적 특성과 미세조직 변화의 상관관계:** 이순연, 박하음, 이승용, 유지훈\*(한국재료연구원), 박정민\*(한국재료연구원, 고려대학교)

**Keywords:** 레이저 분말 베드 용융법, AlSi10Mg 합금, 적층높이, 미세조직, 기계적 물성

레이저 분말 베드 용융법(Laser powder bed fusion, LPBF)은 고출력 레이저를 이용해 금속 분말을 국부적으로 용융 및 응고시켜 고정밀 3차원 금속 부품을 제조하는 대표적인 금속 적층 제조 공정으로 최근 항공 우주 및 모빌리티 산업과 같은 첨단 산업분야에서 큰 관심을 받고 있다. 특히, 높은 치수 정밀도와 우수한 설계 자유도가 가능하다는 장점으로 인해 최근에는 소형 부품을 넘어 m 단위 규모의 대형 부품 제조로 적용이 확장되고 있다. LPBF 공정에서는 초고속 냉각과 큰 열구배로 인해 나노 수준의 셀 구조를 포함하는 계층적 불균질 미세조직이 형성되며, 조형체의 크기가 커질수록 적층 높이 및 방향에 따른 열흐름과 열이력 조건의 차이가 달라져 동일한 공정 조건에서도 부위별 미세조직과 기계적 물성의 차이가 나타날 수 있다. AlSi10Mg 합금은 높은 Si 함량에 기인한 우수한 주조성으로 인해 적층제조 산업에서 널리 활용되는 대표적인 알루미늄 합금으로, LPBF공정 도중 금속 응고로 형성되는 미세 셀 구조와 셀 경계의 Si 석출상이 기계적 강도 향상에 기여한다. 그러나 AlSi10Mg 합금을 대상으로 조형체 크기 증가에 따른 적층 높이 별 미세조직과 기계적 특성 변화의 원인을 체계적으로 분석한 연구는 아직 제한적이다. 이에 본 연구에서는 LPBF로 제조된 AlSi10Mg 합금 조형체를 대상으로 적층 높이에 따른 미세조직 및 기계적 물성 변화를 분석하고, 이러한 물성 차이의 미세조직학적 원인을 고찰하였다.

**[적층6-6 | 11:40]**

**Interstitally Stabilized Lattice Modulation and Gum-Metal-Like Plasticity in Additively Manufactured Ti-Zr-Nb  $\beta$ -Titanium Alloy :** Muhammad Akmal, Ho Jin Ryu \*(KAIST)

**Keywords:** Ti-Zr-Nb alloy, additive manufacturing, directed energy deposition, gum-metals

A metastable Ti-Zr-Nb  $\beta$ -Ti alloy was fabricated using laser-directed energy deposition under ambient conditions, enabling in situ incorporation of oxygen and nitrogen interstitials during rapid solidification. The additively manufactured alloy exhibited mechanical behavior distinct from the transformation-induced and twinning-induced plasticity commonly reported in comparable  $\beta$ -Ti systems, even when different printing parameters were applied. Transmission electron microscopy revealed a metastable  $\beta$  matrix containing partially collapsed  $\omega$ -like and  $O'$ -like nanodomains. Diffuse streaking observed in fast Fourier transform patterns indicates elastic lattice modulation consistent with strain-glass-like behavior. High-resolution HAADF-EDS mapping further identified subtle Nb- and Zr-enriched regions associated with oxygen and nitrogen segregation, suggesting strong coupling between interstitial chemistry, lattice instability, and deformation mechanisms. These results demonstrate that small interstitial concentrations ( $\sim 0.5$ – $1$  wt.%) introduced during additive manufacturing can significantly modify deformation pathways in refractory-lean  $\beta$ -Ti alloys, enabling gum-metal-like mechanical behavior without post-processing heat treatment.

**[적층7-1 | 14:00]**

**운항 선박 내 유지 보수 부품 제작을 위한 PBF용 탄소강 분말 개발 및 해상 실증에 관한 연구:** 이영채\*, 김진호, 이재희(HD한국조선해양), 여형성(주식회사 창성)

**Keywords:** 3D 프린팅, 적층 제조, PBF(Powder Bed Fusion), 분말, MRO

선박 운항 중 부품 고장이 발생할 경우, 예비 부품 조달에 장기간이 소요되어 운항 차질 및 경제적 손실이 발생할 우려가 있다. 이를 예방하기 위해 선박에는 약 5,000종 이상의 예비 부품을 적재·운용하고 있으나, 선수·선미 등 여러 위치에 분산 보관됨에 따라 관리 효율성이 낮고 재고 부담이 증가하는 문제가 있다. 실제로 적재된 예비 부품 중 약 70% 이상은 한 번도 사용되지 않은 채 장기간 보관되고 있는 것으로 알려져 있어, 재고 부담을 완화하고 긴급 상황에서도 부품을 단시간 내 제조·공급할 수 있는 기술 확보가 필요한 상황이다. PBF(Powder Bed Fusion)는 금속 분말을 레이저로 선택적으로 용융시켜 부품을 적층 제조하는 공정으로, 운항중인 선박에서 이를 활용하여 부품을 직접 제작 시 예비 부품 재고 감소, 리드타임 단축 및 단종 부품 수급이 가능하다는 장점이 있다. 대표적인 상용 분말로는 주로 스테인리스강이 활용되고 있으나, 이를 기존 탄소강 부품에 적용할 경우 낮은 강도, 원가 상승 및 갈바닉 부식 등의 문제가 발생할 수 있어, 조선 산업 적용을 위해서는 3D 프린팅용 탄소강 분말 개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 조선용 탄소강 부품 적용을 목표로 신규 탄소강 분말을 개발하고, 요구 기계적 물성 확보를 위한 PBF 공정 조건 최적화를 수행하였다. 또한 선박 운항 환경에서의 적용 가능성을 검증하기 위해 해상 실증을 수행하였다. 그 결과, 조선용 예비 부품 요구 물성을 만족하는 탄소강 분말 및 최적 공정 조건을 확보하였으며, 실제 운항 선박 내에서도 3D 프린팅 기반 부품 제작이 가능함을 실증하였다.

**[적층7-2 | 14:15]**

**레이저 클래딩 공정 변수에 따른 Cu 기판의 Ni 합금 코팅층 특성 분석:** 최정민, 최진원, 김정환(JAYTECH), 이운해\*(경성대학교)

**Keywords:** 레이저 클래딩, 구리판, 니켈 합금, 적층, 레이저 클래딩 공정 변수

구리(Cu)는 약 400 W/m·K의 높은 열전도도를 가지는 기능성 금속 소재이나, 낮은 경도와 내마모성으로 인해 표면 손상이 쉽게 발생한다. 이를 개선하기 위한 표면 개질 기술로 레이저 클래딩이 주목받고 있다. 본 연구에서는 구리 기판 위에 니켈 기반 합금 분말을 레이저 클래딩하고, 공정 파라미터 변화에 따른 코팅층의 형상 및 미세조직 특성을 분석하였다. 레이저 출력과 이송 속도 및 분말 공급량을 주요 변수로 설정하였다. 클래딩 후 단면 분석을 통해 용융 깊이, 비드 폭, 비드 높이 및 희석률을 측정하였고, 광학

현미경 및 SEM을 이용하여 미세조직과 계면 결합 상태를 관찰하였다. 또한 경도 시험 및 마모 시험을 통해 기계적 특성을 평가하였다. 그 결과, 레이저 출력 증가에 따라 용융 깊이와 희석률이 증가하는 경향을 보였으며, 과도한 출력 조건에서는 희석을 증가로 인한 조성 변화가 확인되었다. 이송 속도가 증가할 경우 입열량이 감소하여 비드 폭이 감소하였으며, 고속 조건에서는 일부 미융합 결합이 관찰되었다. 적층 입열량 조건에서는 균일한 반타원형 비드 형상과 치밀한 세립 수지상 조직이 형성되었고, 코팅층 경도는 구리 기판(약 90–110 HV)에 비해 550–750 HV 수준으로 크게 향상되었다. 본 연구 결과는 고열전도성 구리 부품의 내마모 표면 강화 및 공정 최적화 설계에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### [적층7-3 | 14:30]

**적층 각도에 따른 LPBF Inconel 718 합금의 Micro-blasting 표면 강화 메커니즘 분석:** 이서진, 고도열(한국생산기술연구원, 성균관대학교), 최민호(한국생산기술연구원, 서울대학교), 김가형(한화에너지스페이스), 이혜진(한국생산기술연구원), 한혁수(성균관대학교, 한양대학교), 김진우, 김다혜, 성지현(한국생산기술연구원), 이병수\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 마이크로 블라스팅, 레이저 분말 적층 융합, Inconel 718, 미세구조, 표면조도

LPBF는 Laser를 분말에 조사하여 Layer-by-Layer 방법으로 3차원 부품을 제작하기 때문에 부품 표면이 완전히 용융되지 않은 분말들이 잔존하고 있으며, 특히 Up-skin 보다는 Down-skin에서 열악한 표면 조도를 나타내고 있다. 거친 표면은 기계적 부하가 가해질 때 응력 집중원으로 작용하여 조기 파손을 유발하며, 결과적으로 적층 제조 부품의 신뢰성과 연성을 저하시키는 원인이 된다. 표면 조도를 개선하기 위한 방법으로 Micro-blasting이 대표적으로 적용되고 있으나 Micro-blasting 공정에 따른 표면조도 개선에 대한 미세조직 및 기계적 물성에 대한 연구는 많이 보고되고 있지 않다. 본 연구는 LPBF 공정으로 제조된 IN718 합금의 표면 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 Micro-blasting의 영향을 연구하였다. 특히, 적층 소재의 각도를 다양하게 하여 적층 각도의 영향도 연구하였다. 적층각도는 30°~55°이며 적층소재의 크기는 2×21×51 mm<sup>3</sup> 크기의 판재 시편을 제작하였다. Micro-blasting을 위해 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bead를 활용하여 4 bar의 압력, 6.9 mm 노즐 직경, 90° 분사각도, 60 mm 분사 거리 조건에서 최대 120초간 마이크로 블라스팅을 수행하여 각 시간별 Up-skin과 Down-skin의 표면조도, 시험편 두께를 측정하였다. 또한, 표면부의 미세조직 관찰을 위해 SEM, EBSD, XRD를 이용하였으며, Micro-blasting이 기계적 물성에 미치는 영향을 확인하기 위해 판상형 인장시험편을 제작하여 상온에서 인장시험을 수행하였다. Micro-blasting은 Down-skin 표면의 거친 peaks와 불규칙한 unmelted powder를 효과적으로 제거하여 표면 품질을 개선하였다. 특히 표면 결합의 영향이 가장 컸던 30° 적층 시편의 경우, 120초간의 처리를 통해 표면 결합이 완전히 제거되면서 응력 집중 현상이 해소되었고, 이로 인해 연신율이 기존 1.7%에서 7.04%로 약 4배 이상 대폭 향상되는 결과를 얻었다. EBSD 및 KAM분석을 통해 파괴 기구를 확인하였다. Micro-blasting 처리는 균열의 기점을 표면 결합에서 기질 내부로 전이시켜 파괴 직전까지 재료 전체에 걸쳐 상당한 소성 변형과 내부 전위 밀도의 축적을 유도하는 연성 확보 기제로 작용하였다. 적층 각도에 따른 표면 특성과 기계적 성질 간의 관계를 정립하였으며, Micro-blasting이 LPBF 부품의 구조적 성능을 최적화하는 후처리 공정임을 입증하였다.

### [적층7-4 | 14:45] Canceled

### [적층7-5 | 15:00]

**와이어 아크 적층제조 Alloy 718의 Laves 상 Dissolution kinetics 기반 열처리 설계 및 고온 기계적 특성 평가:** 위시은(한국재료연구원, 부산대학교), 오동진, 강용준, 송상우(한국재료연구원), 강남현(부산대학교), 박기태\*(한국재료연구원)

**Keywords:** Wire arc additive manufacturing, Alloy 718, Laves phase, Post-deposition heat treatment, High-temperature mechanical properties

Ni 기반 초내열합금 Alloy 718은  $\gamma'$ (Ni<sub>3</sub>Nb) 및  $\gamma'$ (Ni<sub>3</sub>(Al, Ti)) 상의 석출 강화에 의해 우수한 고온 강도와 크리프 저항성을 확보한 대표적인 산업용 구조 소재로, 항공·우주 및 발전 분야에서 광범위하게 활용되고 있다. 최근 제조 비용 절감과 형상 자유도 향상을 목적으로 Alloy 718의 적층제조 적용이 확대되고 있으며, 특히 Wire Arc Additive Manufacturing(WAAM) 공정은 높은 입열량과 우수한 증착 효율을 바탕으로 중·대형 부품 제조에 적합한 공정으로 주목받고 있다. 그러나 WAAM 공정은 아크 기반 열원 특성에 따른 높은 입열량과 열 축적으로 인해 다 적층제조 공정 대비 상대적으로 느린 냉각 속도와 완만한 온도 구배 조건을 형성하며, 이로 인해 응고 말기 inter-dendritic 영역에서 Nb 편석 및 Laves 상 형성이 촉진되어 균열 발생과 기계적 성능 저하의 원인으로 작용할 수 있다. 따라서 WAAM Alloy 718의 산업적 적용을 위해서는 적층물의 열 이력과 응고 편석 특성을 반영한 Laves 상 dissolution kinetics 기반의 열처리 설계 접근이 필요하다. 이에 본 연구에서는 WAAM Alloy 718의 균질화 및 용체화 열처리 조건에 따른 미세조직 변화에 대해 Laves 상 dissolution kinetics 관점에서 분석하였다. 주사전자현미경(SEM) 분석을 통해 열처리 조건에 따른 잔류 Laves 상 분율을 정량화하였으며, 이를 기반으로 다양한 속도론적 모델을 적용하여 Laves 상 용해 거동의 시간-온도 의존성을 체계적으로 평가하였다. 또한 전자 탐침 미량 분석(EPMA)을 통해 열처리 조건에 따른 Nb 재분배 거동을 분석하였고, 전자 후방 산란 회절(EBSD) 분석을 통해 결정립 성장 및 입계 특성 변화를 평가하여 고온 변형 거동과의 연관성을 검토하였다. 투과전자현미경(TEM) 분석을 통해 강화상 석출 및 잔류 석출상의 결정구조를 식별하였으며, 650 °C 고온 인장 및 크리프 시험을 수행하여 kinetics 기반 열처리 조건이 실제 고온 기계적 성능에 미치는 영향을 검증하였다. 이를 바탕으로 WAAM Alloy 718의 산업적 열처리 설계에 적용 가능한 정량적 기준을 제시하고자 한다.

**[적층7-6 | 15:15]**

Understanding the Role of Nanoparticles in Suppressing Gravity-Driven Deflection in thermal de-binding and sintering of 3D Printed Cantilevers beams: Nelson Bayi, Taehyob Im, Minjong Kim, Kanghyun lee, Caroline S. Lee\*(Hanyang University - ERICA Campus)

**Keywords:** Material Extrusion, Thermal de-binding, Gravity induced distortion, Sintering, Nanoparticle.

Gravity-induced distortion during thermal de-binding and sintering step remains a critical challenge in material-extrusion-based metal additive manufacturing, particularly for slender geometries such as cantilever beams other geometries with over hangs. This study investigates the mechanisms by which nanoparticle-enhanced feedstocks improve structural stability during de-binding and sintering step by modifying the rheology, packing behavior, and binder-removal dynamics of the green part. Two feedstock systems—unimodal microscale powder and a bimodal micro-nanopowder blend—were formulated at identical solid loadings to isolate the effect of nanoparticle enrichment. Cantilever beams were fabricated using identical printing parameters and subjected to controlled solvent, thermal de-binding and sintering. The results demonstrate that nanoparticle-enriched feedstocks markedly suppress gravity-induced deflection, achieving a minimum deflection of  $3.94 \pm 0.18\%$ , which reflects a substantial improvement in dimensional stability. Conversely, the pure GA feedstock exhibited the greatest distortion, with deflection values reaching  $17.23 \pm 1.55\%$ . This enhancement is attributed to three synergistic mechanisms: (1) improved particle packing and increased green-body rigidity, (2) formation of a finer and more interconnected capillary network that supports uniform binder extraction, and (3) delayed viscous flow during early thermal de-binding, reducing creep under self-weight. Microstructural analysis confirms that nanoparticles preferentially occupy interstitial spaces, creating a more mechanically stable particle framework during binder burnout. Overall, the study provides a phenomenological understanding of how nanoparticle addition mitigates distortion, offering new guidance for designing stable feedstocks for metal extrusion-based additive manufacturing.

**[적층7-7 | 15:30]**

레이저 분말 용융법으로 제조된 순구리 조형체의 두께별 미세조직 및 물성 분석: 박찬호(한국재료연구원), 박하음(한국재료연구원, 고려대학교), 김연우(한국재료연구원), 박기철, 김예림(파트너스랩(주)), 김상권, 신인선(현대자동차), 박정민\*(한국재료연구원, 고려대학교)

**Keywords:** 레이저 분말 용융법, 순구리 조형체 두께, 미세조직, 전기전도도, 기계적 물성

전동모터의 출력 밀도와 효율 향상은 전동화 모빌리티 시스템 성능을 결정짓는 핵심 요소로 작용하며, 이를 위해 모터 내부 구리 코일의 성능을 극대화할 수 있는 부품 설계가 요구되고 있다. 특히 코일 점착률 향상을 위한 복잡 형상 구리 부품은 기존 제조 공정으로 구현하기에는 어려움이 있으며, 이를 극복하기 위한 새로운 제조 기술에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 그 중 적층제조 공정은 형상 설계 자유도가 높아 전동모터용 구리 부품 제조 기술로 주목받고 있으며, 그 중 레이저 분말 용융법(laser powder bed fusion, LPBF)은 형상 자유도와 치수 정밀도가 우수하여 복잡 형상 구리 부품 제조에 적합한 공정으로 평가되고 있다. 하지만 순구리는 높은 열전도도와 레이저 반사율로 인해 LPBF 공정을 통한 고밀도 부품 제조에 어려움이 있으며, 형상 및 적층 조건 변화에 따라 물성 편차가 발생할 가능성이 높다. 특히 조형체 두께가 증가할 경우 스캔 경로 수와 적층 시간이 함께 증가하게 되며, 이는 미세조직 형성과 물성 변화에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 LPBF 공정을 통해 제조된 순구리 조형체를 대상으로, 적층 두께 변화에 따른 미세조직, 전기전도도, 기계적 특성의 변화를 비교 분석하였다. 동일한 공정 조건에서 제조된 서로 다른 두께의 조형체를 대상으로 두께 증가에 따른 스캔 경로 수 및 적층 시간 변화가 미세조직과 물성에 미치는 영향을 평가하였다. 상대밀도, 전기전도도, 항복강도는 조형체 두께 변화에 따라 큰 차이가 없었으나, 인장강도와 균일 연신율은 두께가 가장 큰 시편에서 가장 높은 값을 보였다. 본 연구에서는 LPBF 공정으로 제조된 순구리 조형체의 두께별 특성을 체계적으로 분석하였으며, 이러한 결과는 전동모터용 순구리 부품의 최적 형상 설계를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**[적층8-1 | 15:55]**

가스터빈 고온부품용 금속 AM 소재 공정기술 개발: 박상은, 이재웅, 조현철\*(두산에너지빌리티)

**Keywords:** Additive manufacturing, Powder Bed Fusion, Heat treatment, Tensile, Stress-Rupture

가스터빈 고온 부품은 극한 환경에서 안정적 운전을 위해 우수한 기계적 특성과 내열성을 확보하는 것이 필수적이다. 또한, 가스터빈의 효율 향상을 위해 복잡한 내부 유로와 성능에 최적화된 형상이 요구되면서 기존 제조 공정보다 적층제조(Additive Manufacturing, AM) 적용이 증가하는 추세이다. 본 연구에서는 L-PBF(Laser Powder Bed Fusion) 방식으로 고온 합금 소재 3종에 대한 AM 공정기술을 개발 사례에 대해 설명하고자 한다. 각 소재별 분말 특성 평가를 기반으로 AM 품질 확보를 위한 공정 변수 범위를 도출하였다. 이를 통해 99.98% 이상의 상대밀도를 달성하였으며, 표면조도 등 형상 품질 개선을 위한 공정 최적화를 수행하였다. 또한, 고온성능 수준을 검증하기 위해 시험편을 제작하여, 상/고온 인장시험과 Stress-rupture 시험을 통해 파단 거동 및 고온 수명에 대하여 분석하였다. 그 결과, 공정 최적화를 기계적 물성의 목표 설계 값을 충족하였으며, AM 공정 변수와 고온 성능 간의 상관관계를 도출하여 소재별 고온 수명 데이터베이스를 구축하였다. 본 연구를 통해 L-PBF 기반 고온 합금 3종에 대한 공정 개발과 기계적·고온 성능 검증을 완료함으로써, 가스터빈 고온 부품 적용을 위한 핵심 적층제조 기술 역량을 확보하였다. 향후 후처리 조건 최적화 및 추가적인 기술 검증을 통해 실제 부품 적용 범위를 확대하고, 가스터빈 고온 부품의 적층제조 기술을 단계적으로 고도화하고자 한다.

**[적층8-2 | 16:10]**

**EIGA로 제조된 ODS 강 분말의 HIP 조건에 따른 산화물 형성 거동 영향:** 서보선, 강장원, 차은빈, 박광석\*(한국생산기술연구원)  
*Keywords:* Ferritic ODS steel, EIGA, HIP, Heat treatment, Yttrium oxide

페라이트 마르텐사이트(FM) 강은 우수한 중성자 조사 특성으로 차세대 원자로 구조재료로 연구되고 있으나, 650–700 °C 이상의 고온에서 미세조직 안정성이 크게 저하되어 크리프 특성이 저해되는 문제가 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 산화물 분산강화(ODS) 강화는 열적 안정성이 우수한 미세한 산화물을 기지내에 분산시켜 분산강화 효과를 통해 고온 강도를 향상시킬 수 있다. 이러한 ODS 강은 전통적으로 기계적 합금화(MA) 공정을 통해 제조되지만, 장시간 밀링에 따른 오염 증가 및 배치 간 편차 등의 한계가 존재한다. MA 공정을 대체하기 위해 FM강에 산화물 분산 형성 원소를 포함한 분말을 직접 생성이 가능한 반응성 가스 분무 공정이 제안되었다. 제조된 분말은 분말 표면에 형성되는 Cr 산화층을 산소 저장소(O reservoir)로 활용하고, 고온 소결(Hot isostatic pressing, HIP)과 후속 열처리 과정을 통해서 미세한 산화물을 형성시키는 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 반응성 가스 분무 공정 기반 ODS 강 제조를 목표로, Fe–15Cr–2W–0.25Ti–0.3Y–0.2Te 조성의 모합금을 제조 후, 고압 가스를 분무하여 고순도의 구형 금속 분말을 제조하기 위해 반응성 가스로 Ar+O(3, 500 ppm O) 혼합가스를 사용하였으며, EIGA (Electrode induction melting gas atomization) 공정을 적용하였다. 이렇게 제조된 분말을 기지 내에 미세 산화물을 형성하기 위해 HIP 공정 조건에 따른 산화물 형성 거동을 규명하고자 하였다. Atomization 과정에서 형성된 분말 표면 Cr 산화물층은 HIP 중 고온에서 해리되며 산소 교환 반응을 통해 내부로 확산되고, 금속 또는 금속간화합물 형태로 존재하는 Y 과 반응하여 나노 분산상을 형성할 것으로 예상된다.

**[적층8-3 | 16:25]**

**적층제조 ODS 합금의 반정합 Y-Ti-O 산화물의 형성 거동과 미세조직 제어 연구:** 서주원(한국원자력연구원, 서울대학교), 정원중(한국기계연구원), 정승문(한국원자력연구원), 한홍남(서울대학교), 류호진(카이스트), 정희석, 한상섭(한국기초과학지원연구원), 김성환(Thermo-Calc Software Korea), 강석훈\*(한국원자력연구원)

*Keywords:* 산화물 분산 강화 (ODS) 합금, 반정합 계면 산화물, 중성자 소각 산란 (SANS), 열역학 계산, 합금 설계  
 차세대 원자로용 구조재료는 고온에서 우수한 기계적 특성, 조사 저항성, 그리고 높은 생산 효율성을 동시에 요구한다. 혁신 제고 공정인 laser-directed energy deposition (L-DED)은 미세조직을 제어할 수 있어, 기존 공정 대비 차별화된 미세구조와 우수한 기계적 특성을 구현할 수 있다. 본 연구에서는 L-DED 공정을 활용하여 in-situ 반응을 통해 산화물을 형성하는 oxide dispersion strengthened (ODS) 합금을 제조하였다. 제작된 합금은 평균 결정립 크기 13.3  $\mu\text{m}$ 의 미세한 결정립 구조와 함께, 4x10<sup>19</sup>/m<sup>3</sup>의 수 밀도를 갖는 Y-Ti-O 나노 산화물이 금속 기지 내에 균일하게 분산되어 있다. 특히 Ti 함량을 조절함으로 기존 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 산화물보다 더욱 미세하며, 기공 (bubble)을 효과적으로 포획할 수 있는 반정합 (semi-coherent) 계면을 가지는 Y-Ti-O 복합 산화물의 형성을 규명하였다. ODS 합금은 산화된 분말과 Ar+O<sub>2</sub> 혼합 가스를 사용하여 적층제조 중 in-situ 산화물 형성을 유도하였다. 적층제조 중 형성된 나노 산화물에 따른 결정립 형태 및 크기 변화는 electron backscatter diffraction을 통하여 확인하였다. 또한 중성자 소각 산란 (small-angle neutron scattering, SANS)을 활용하여 나노 산화물의 평균 크기, 부피 수 밀도, 그리고 산화물 종류를 판단하는 A ratio를 정량적으로 평가하였다. 합금 조성 변화에 따른 산화물 안정성 및 형성 거동은 열역학 계산을 통해 분석하였다. 본 연구는 초기 분말 합금 조성 설계를 통해 산화물을 미세화하였으며, L-DED 공정 중 반정합 계면을 가지는 미세 산화물을 최초로 형성하였다는 점에서 의의가 있다. 이러한 결과는 향후 적층제조용 ODS 합금의 합금 설계 전략에 중요한 방향성을 제시할 것으로 기대된다.

**[적층8-4 | 16:40]**

**HfC 강화재로 강화된 Inconel 718의 적층제조 샘플의 고온 크리프 특성:** Wonjong Jeong(한국기계연구원), Suh Joo Won, Kang Suk Hoon(한국원자력연구원), Ryu Ho Jin\*(한국과학기술원)

*Keywords:* Additive manufacturing, Metal matrix composite, Turbine blade

Ceramic reinforcement has emerged as an effective strategy for enhancing the high-temperature performance of precipitation-hardened superalloys such as Inconel 718. In this work, the high-temperature mechanical properties and creep performance of additively manufactured Inconel 718 reinforced with up to 6 wt% HfC were systematically evaluated. The composite powders were produced using a mechanical alloying-based surface modification and reinforcement transplantation (SMART) technique, and subsequently consolidated into bulk specimens by directed energy deposition (DED) under identical processing conditions. Despite the exceptionally high melting point of HfC, partial decomposition occurred during the additive manufacturing process, resulting in the formation of secondary phases including Ni<sub>5</sub>Hf, (Hf, Nb, Ti)C, and Hf-rich Laves phases. These reaction products modified the local alloy chemistry and significantly influenced grain structure evolution and precipitation behavior following heat treatment. Owing to these microstructural changes, the HfC-reinforced alloys exhibited over a 20% improvement in high-temperature yield strength relative to the unreinforced material, along with more than a twofold increase in creep rupture life. These findings demonstrate that HfC addition is a highly effective approach for simultaneously enhancing high-temperature strength and creep resistance in additively manufactured Inconel 718, underscoring its potential for demanding high-temperature applications.



**[적층8-5 | 16:55]**

Process-Induced Acceleration of Martensitic Transformation and Twinning during Cryogenic Deformation of LPBF SS304L:

Kwangtae Son, 윤성준, 김영균, 나영상\*(한국재료연구원)

Keywords: 적층제조, 스테인리스 강, 저온 물성, 집합조직

The simultaneous enhancement of strength and ductility in additively manufactured metastable alloys requires a precise understanding of phase stability and defect tolerance, particularly under cryogenic conditions. This study investigates the strain-induced martensitic transformation (SIMT) kinetics and fracture mechanisms of laser powder bed fused (LPBF) SS304L with varying crystallographic textures and grain sizes at 298 K and 77 K. The fine-grained microstructure exhibited accelerated SIMT kinetics compared to the coarse-grained counterparts. This rapid transformation resulted in extreme localized work hardening within the gauge section, forcing the macroscopic failure location to shift to the specimen shoulder. Conversely, coarse-grained specimens possessing a strong  $\alpha$ -fiber texture effectively suppressed SIMT, retaining sufficient plastic stability to achieve high ductility and failure within the gauge section at 77 K. However, a Goss-textured specimen of coarse-grain also exhibited an accelerated SIMT and mechanical twinning rates at 77 K, resulting in lower cryogenic strain and unfavorable failure at the specimen shoulder. Fractographic analysis revealed a fundamental temperature-dependent transition in the role of processing defects. While oxide inclusions served as nucleation sites for ductile microvoid coalescence at 298 K, the stiffening of the matrix by  $\alpha'$ -martensite at 77 K transformed these inclusions into fatal stress concentrators. The findings demonstrate that cryogenic structural integrity in LPBF steels is governed by a competition between texture-controlled phase stability and the susceptibility of the hardened matrix to inclusion-induced brittle fracture.

**[적층8-6 | 17:10]**

WAAM 공정 조건이 Al7A48 합금의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향: 장동민, 황원구(인하대학교), 감동혁(한국생산기술연구원), 이기안\*(인하대학교)

Keywords: Wire Arc Additive Manufacturing, Al-Zn-Mg-Cu, Pulsed GMAW, Cold Metal Transfer, Microstructure, Mechanical property

기존 Al7075 합금은 우수한 기계적 특성을 지니나 높은 열균열 민감성으로 인해 적층 제조 적용에 한계가 있다. 본 연구에서는 와이어 아크 적층 제조 (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM)에 적합한 Al7A48 와이어를 사용하여, 대표적인 WAAM 공정인 Pulsed GMAW 와 Cold Metal Transfer (CMT) 공정을 통해 합금을 제조하고 공정별 미세조직 및 기계적 특성을 비교·조사하였다. Pulsed 공정은 상대적으로 높은 열입력과 빠른 적층 속도를 가지는 반면, CMT 공정은 낮은 열입력과 빠른 냉각 속도로 우수한 표면 품질을 확보할 수 있는 특징을 지닌다. 두 공정의 적용에 따라  $MgZn_2$  석출상의 분포 및 석출 자유대 (PFZ, precipitate free zone) 폭에 차이가 관찰되었으며, 이는 T6 열처리 후 미세조직 형성 거동에 영향을 미쳤다. T6 열처리 후 Pulsed 시편은 경도 160.97 HV, 항복 강도 513.15 MPa, 인장 강도 572.19 MPa, 연신율 5.17%를 나타냈으며, CMT 시편은 각각 157.84 HV, 507.01 MPa, 579.43 MPa, 4.48%의 기계적 특성을 보였다. 파단면 분석을 통해 공정 조건에 따른 석출 경화 및 PFZ 형성 메커니즘과 이에 따른 기계적 성능 변화를 규명하였다. 상기 결과들을 바탕으로 WAAM으로 제조된 Al7A48 합금의 구조용 소재로의 적용 가능성을 함께 고찰하였다.

**[적층8-7 | 17:25]**

레이저 분말 베드 용융법으로 제조된 Nd-Fe-B 영구자석의 공정 매개변수에 따른 미세조직 변화와 자기적 특성의 상관관계: 김연우(한국재료연구원, 부산대학교), 이수진(한국재료연구원), 이유나(부산대학교), 설재복(국민대학교), 강남현, 최윤석(부산대학교), 유지훈, 이정구, 김태훈(한국재료연구원), 박정민\*(한국재료연구원, 고려대학교)

Keywords: 적층제조공정, 레이저 분말 용융법, Nd-Fe-B 영구자석, 미세조직, 자기적 특성

Nd-Fe-B 영구자석은 우수한 자기적 특성으로 인해 고성능 전자기 응용 분야에서 널리 활용되고 있다. 소결 및 열간가공과 같은 기존 제조 공정은 광범위하게 연구되어 왔으나, 형상 설계 자유도가 제한되고 공정 구조적 한계로 인해 복잡 형상 구현에 어려움이 있다. 레이저 분말 베드 용융(Laser Powder Bed Fusion, LPBF) 공정은 급속 응고 기반 미세조직 제어가 가능한 적층제조 기술로, 고성능 Nd-Fe-B 영구자석 제조에 새로운 가능성을 제시한다. 특히 LPBF 공정에서의 급속 응고와 큰 열구배는 기존 공정과는 상이한 미세조직 형성 거동을 유도하며, 이에 따른 자기적 특성 발현 메커니즘을 보다 복잡하게 만든다. 그러나 LPBF 공정 매개변수 변화에 따른 자기적 특성 변화를 미세조직과 연계하여 체계적으로 분석한 연구는 여전히 부족한 실정이다. 본 연구에서는 LPBF 공정 매개변수 변화가 Nd-Fe-B 영구자석의 미세조직 형성과 자기적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 규명하였다. 급속 응고 및 국부적 열 이력 차이에 의해 용융물 내부와 경계부에서 계층적 불균일 미세조직이 형성되었으며, 공정 매개변수 변화에 따라 결정립 크기와 형상, 그리고 입계 상 분포가 유의하게 변화함을 확인하였다. 이러한 미세조직 변화는 보자력과 최대에너지곱 등 자기적 특성과 밀접한 상관관계를 나타냈다. 본 연구 결과는 LPBF 공정에서의 공정 매개변수-미세조직-자기적 특성 간 상관관계를 기반으로, 고성능 Nd-Fe-B 영구자석 제조를 위한 공정 설계 방향을 제시한다.

## 제4회 가공심포지엄: 소형모듈원전용 구조재료 가공기술 심포지엄

Room 2층 203, 4월 29일

## [원전1-1 | 09:00] 초청강연

XM19 강재의 무결점 열간성형을 위한 고온 변형 거동 모델링 및 공정지도 최적화 : 정재석\*(두산에너지빌리티), 박성준\*(한국재료연구원), 김국철(두산에너지빌리티), 김성환(Thermo-Calc Software LLC), 문준오(국립창원대학교)

Keywords: XM-19, 고온 변형 거동, 구성방정식 모델링, 음의 변형률 속도 민감도, 가공 공정 지도

고질소 (High-N) 및 니오븀(Nb)이 첨가된 오스테나이트계 스테인리스강 XM-19 (Nitronic 50)는 우수한 기계적 특성을 가지나, 열간 성형 시 동적변형시효 및 질화물 석출 등에 기인한 복잡한 유동 거동으로 인해 최적의 성형 조건을 확보하는데 난점이 있다. 특히 음의 변형률 속도 민감도(Negative Strain Rate Sensitivity)와 비선형적인 온도-속도 커플링 (Temperature-Strain Rate Coupling) 현상은 기존의 구성방정식의 예측 정확도를 떨어뜨려, 결과적으로 공정 설계의 신뢰성을 저하하는 주된 원인이 된다. 본 연구에서는 XM-19 강재의 고온 압축 실험을 통해 확보된 데이터를 바탕으로, 이러한 비선형적 거동을 정밀하게 묘사할 수 있는 새로운 모델을 제안한다. 제안된 모델은 일반적인 오스테나이트계 강재와 달리 복잡한 연화 및 경화 거동을 보이는 XM-19의 유동응력을 높은 정확도로 예측하였다. 나아가, 검증된 모델을 통해 도출된 데이터를 기반으로 동적재료모델 (Dynamic Materials Model, DMM) 이론을 적용하여 열간 성형 공정지도 (Processing Map)를 구축하였다. 이를 통해 유동 불안정 영역을 명확히 배제하고, 미세조직 제어 및 건전한 성형이 가능한 결함 없는 최적의 온도 및 변형률 속도구간 (Processing Window)를 제시하였다. 본 연구는 난가공 소재의 복잡한 물성 모델링이 실제 공정 최적화와 결함 제어에 어떻게 효과적으로 연계될 수 있는지를 실증적으로 보여준다.

## [원전1-2 | 09:20] 초청강연

고질소 스테인리스강의 고온 변형 거동에 대한 연구: 문승현, 김정훈, 문준오\*(국립창원대학교), 정재석(두산에너지빌리티)

Keywords: 고질소 스테인리스강, 고온 변형, 재결정, Z phase

고질소 스테인리스강은 우수한 기계적 성질과 내식성을 가지며, 이에 따라 발전플랜트, 기계부품 등 다양한 산업 및 부품에 적용되고 있다. 특히, 질소(N)는 강력한 오스테나이트 안정화 원소로서 오스테나이트계 스테인리스강의 상안정성에 기여하며, 내식성을 향상시킬 뿐만 아니라 항복강도를 크게 높이는 효과를 나타낸다. 그러나 질소를 과도하게 첨가하는 경우, 단조 및 열처리 공정 중에 입계를 따라 조대한 Cr<sub>2</sub>N을 석출시키거나 입내에 불규칙한 형상의 NbCrN-type Z phase를 생성시킴으로써 연성 및 내식성을 떨어뜨린다. 본 연구에서는 고질소 스테인리스강의 합금원소 변화에 따른 고온 변형거동 변화에 대해 분석하였다. 이를 위해 N, Nb, Cu 함량이 다른 고질소 스테인리스강을 제조하였으며, 각 합금에 대해 Gleeble simulator를 이용하여 고온 압축시험을 실시하였다. 압축시험을 통해 얻은 Flow curves 분석을 통해 각 합금의 고온 변형 중 재결정 거동에 대해 분석하였으며, 마지막으로 압축 시험 후 샘플의 미세조직 관찰을 통해 고질소 스테인리스강 고온 변형거동에 대한 합금원소 첨가 영향에 대해 고찰하였다.

## [원전1-3 | 09:40] 초청강연

고질소 오스테나이트계 스테인리스강의 어닐링에 따른 미세조직 변화: 전상명, 서동우\*(포항공과대학교)

Keywords: 고질소 스테인리스강, 오스테나이트, 어닐링, 미세조직, 시그마상

고질소 오스테나이트계 스테인리스강(HNS)은 기존 오스테나이트계 스테인리스강 대비 높은 강도와 내식성, 우수한 오스테나이트( $\gamma$ ) 안정성을 동시에 확보할 수 있어 발전용 구조재료로서 폭넓은 적용이 기대되고 있다. 일반적으로 고질소 오스테나이트계 스테인리스강은 주조 및 열간 단조 후 용체화 어닐링을 통해  $\gamma$  단상 미세조직을 형성한다. 그러나 열간 단조 공정 중 델타 페라이트( $\delta$ )가 형성되는 경우,  $\delta$ 는 냉각 과정에서 시그마( $\sigma$ )상과  $\gamma$ 로 분해될 수 있으며, 이 과정에서 미세조직 내에 잔류한  $\sigma$ 상은 강재의 내식성을 저해하고 취성 균열의 기점으로 작용할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 따라서 열간 단조 후 미세조직에 잔류하는  $\sigma$ 상은 후속 어닐링 공정을 통해  $\gamma$  기지 내로 완전히 고용시키는 것이 필수적이다. 이러한  $\sigma$ 상의 고용 거동은 듀플렉스 스테인리스강을 대상으로 일부 보고된 바 있으나, 오스테나이트계 스테인리스강, 특히 고질소 오스테나이트강에 대한 연구 사례는 매우 제한적이며 고용 메커니즘에 대한 이해 또한 충분하지 않은 실정이다. 본 연구에서는 고질소 오스테나이트강의 어닐링 과정에서 발생하는  $\sigma$ 상의 고용 거동을 다양한 미세조직 분석 기법을 활용하여 정량적으로 분석하였다. 그 결과, 열간 단조 후 미세조직에 잔류하였던  $\sigma$ 상이 용체화 어닐링 공정 중  $\gamma$ 로 고용되는 과정에서  $\delta$ 로의 중간 천이 단계가 존재함을 확인하였으며, 이를 확산 변태 해석에 기반하여 고찰하였다.

## [원전1-4 | 10:00] 초청강연

고질소 오스테나이트계 강재의 석출거동 해석: 이태호\*, 김성훈\*, 유지성, 하현영, 김승현, 이진중, 조효행(한국재료연구원), 손광석(동아대학교), 정재석(두산에너지빌리티)

Keywords: 스테인리스, 석출거동, 고질소

오스테나이트계 스테인리스강에서 석출거동은 강의 제반 물성을 저하시키는 주된 원인으로 현재까지 많은 연구가 진행되어 왔다. 700-1000°C 온도영역에서 시효처리할 경우 sigma, chi 등 금속간화합물과 다양한 형태의 탄질화물이 생성되어 강재의 기계적 특성 및 부식 특성을 저하시키는 원인으로 알려져 있다. 하지만 석출거동이 1) 화학조성 변화, 열처리 및 시효 상태에 따라 다양한 양상으로 진행되고, 2) TEM 내에서도 형상만으로 석출상 구분이 어렵고, 3) 일부 석출상의 결정학적 특성의 경우 아직 논의가 진행 중이라는 점 등 매우 복잡한 현상으로 알려져 있다. 따라서 정확한 석출상에 대한 분석과 이를 제어하는 연구는 강재의 고기능화를

위해 중요한 테마이다. 본 연구에서는 향후 소형모듈원전용 구조재로 사용이 기대되는 고질소 오스테나이트계 강재를 800°C에서 최대 100 시간까지 시효처리한 후 생성되는 석출상에 대해 전자현미경 분석 기법을 활용하여 정확한 상구분 및 결정학적 특성에 대한 연구를 진행하였다. 주된 석출상은 1) 결정립계를 따라 MX, M<sub>2</sub>X, M<sub>23</sub>X<sub>6</sub> 상이 그리고 2) 입내에서는 미세한 MX 석출상과 MX-Z phase로의 상변태도 확인되었다.

#### [원전2-1 | 10:40] 초청강연

Thermodynamics of slag design for producing heat-resistance steels and Ni-base alloys by electro-slag remelting (ESR) process: JOO HYUN PARK\*(Hanyang University)

**Keywords:** Electro-slag remelting (ESR), Alloy steels, Ni-base alloys, Slag-metal reaction.

To improve net energy efficiency and reduce high CO<sub>2</sub> emissions associated with fossil fuel power plants, the materials with adequate creep strength, toughness, and heat resistance at elevated temperatures are needed. Electro-slag remelting (ESR) is widely performed in the specialty refining process to facilitate the production of clean, fully dense, and homogeneous castings of these important materials such as alloy steels and Ni-base superalloys by removal of undesirable elements and nonmetallic inclusions. However, the strong chemical reactions between reactive elements such as Al, Ti and B in the steels and Ni-alloys and oxide components such as SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc. in slag bath will occur at the slag-metal interface during the ESR process, resulting in the inhomogeneous distribution of the oxidative element from the bottom to top of the resultant ingot. So, in the present lecture, the thermodynamic investigations for slag design to produce 9CrMoCoB heat-resistance steel and Ni-base alloy system containing Al and Ti will be discussed.

#### [원전2-2 | 11:00] 초청강연

Evolution from Clusters to Precipitates in Niobium Micro-Alloyed Ferritic Steel: Sung-Dae Kim\*(Pukyong National University)

**Keywords:** Ferritic/Martensitic Steels, NbC (MX) Precipitation, Early-Stage Clustering, Microstructural Characterization

Niobium-micro-alloyed martensitic/ferritic steels are widely considered for structural applications in advanced nuclear energy systems because of their excellent high-temperature strength and irradiation resistance. A key factor governing their mechanical performance is the formation and evolution of nanoscale MX-type precipitates, particularly NbC carbides, which strongly influence hot workability, precipitation strengthening, and long-term thermal stability. In this presentation, we focus on the early-stage precipitation behavior in Nb-containing ferritic/martensitic steels, emphasizing the transition from solute clusters to fully developed carbide precipitates. Advanced microstructural characterization techniques, including transmission electron microscopy, are employed to analyze the nucleation mechanisms, chemical partitioning, and spatial distribution of Nb-rich phases during aging and thermal exposure. Special attention is given to the initial formation of NbC clusters and their subsequent growth into coherent or semi-coherent precipitates, as well as their interaction with dislocations and matrix defects. Understanding these early precipitation processes provides important insight into controlling precipitate stability and mitigating detrimental phases that can reduce hot formability in forging and welding processes. The results highlight the critical role of nanoscale precipitation in optimizing microstructural design strategies for next-generation nuclear structural materials.

#### [원전2-3 | 11:20] 초청강연

열간 변형 중 고엔트로피 합금의 동적 재결정 및 동적 Sigma상 석출거동: 이윤해\*(경성대학교), 박노근(영남대학교)

**Keywords:** 열간 변형, 동적 재결정, sigma상, 석출거동, 고엔트로피 합금

소형모듈원전(SMR)과 같은 차세대 원자로 구조재의 신뢰성 확보를 위해서는 고온 환경에서의 미세조직 안정성과 가공 공정 중 조직 제어가 핵심적인 요소로 작용한다. 특히 오스테나이트계 금속소재는 열간 단조 및 가공 과정에서 발생하는 동적 재결정(dynamic recrystallization, DRX)과 상변태 거동이 최종 특성을 좌우하므로, 가공 중 미세조직 변화 메커니즘에 대한 정량적 이해가 필요하다. 본 발표에서는 CoCrFeMnNi 계 고엔트로피 합금을 사례로 하여 열간 변형 중 발생하는 동적 재결정 및 동적 Sigma상 석출 거동을 미세조직 분석을 통해 정량적으로 고찰한다. 기존 연구가 주로 응력-변형 거동 및 구성방정식 기반 해석에 초점을 두어 왔다면, 본 연구에서는 EBSD 기반 결정립계 특성, misorientation 분포 및 DRX 분율 변화를 정량적으로 분석하여 동적 재결정 메커니즘을 규명하였다. 또한 열간 변형 온도에 따른 Sigma상 거동을 분석한 결과, 약 800 °C 이상에서는 Sigma상이 관찰되지 않는 반면, 그 미만 온도 영역에서는 동적 Sigma상 석출이 확인되었다. 특히 Sigma상은 변형 중 형성된 재결정 결정립계 인근에서 우선적으로 형성되었으며, 이는 변형에 의해 활성화된 이동 계면과 원소 재분배가 Sigma상 핵생성을 촉진함을 시사한다. 열간 변형 과정에서 형성된 Sigma상은 고온 변형 조건 하에서 계면을 따라 성장하며 입계 이동 및 조직 안정성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 동적 재결정의 진행과 함께 Sigma상 형성이 촉진되는 경향이 관찰되었다. 이와 같은 결과는 동적 재결정과 Sigma상 석출의 상호작용을 정리하고, 이를 소형모듈원전 구조재 가공 기술 관점에서 논의하고자 한다.

#### [원전2-4 | 11:40] 초청강연

SMR 주기기 제작을 위한 초대형 HIP 기술 개발 전략: 김동수\*(두산에너지빌리티)

**Keywords:** 소형모듈원전, 혁신제작기술, 피앰프

최근 탄소중립 목표 달성 및 청정에너지원 증대 요구에 따라 SMR이 유력한 대안으로 떠오르고 있으며, 전 세계적으로 ‘35년까지

최대 97.4조원 규모의 시장이 전망되고 있다. 이로 인해, 미국, 영국 등 SMR 설계를 선도하고 있는 주요 국가들은 SMR 제작기술의 중요성을 사전에 인지하고 제작분야에서도 경쟁 우위를 확보하기 위하여 정부차원에서 혁신 제작기술(PM-HIP, EBW, DLC) 개발 및 설비투자를 적극적으로 지원하고 있다. 이는 SMR이 복잡한 설계와 더 커진 기자재 크기에도 불구하고 대형원전 대비 시공기간 단축을 위해 기자재 제작기간 단축이 지속적으로 요구될 것으로 예상되고, 기자재 제작기간 단축이 글로벌 SMR 경쟁에서 중요한 경쟁 요소가 될 것으로 전망되기 때문이다. PM-HIP(Powder Metallurgy-Hot Isostatic Pressing) 기술은 복잡 형상의 부품을 최종제품과 매우 근접한 형상(Near Net Shape)으로 한번에 제조 가능한 기술로 혁신제작기술 중 적용효과가 가장 크다. PM-HIP 기술개발/상용화는 미국이 가장 빠르게 추진하고 있으며, 2016년부터 EPRI 주관으로 SMR 부품대상 기술개발을 추진하여 1/2 Scale 까지 제작/검증 완료하였고, 현, 자국내 기업 컨소시엄을 통해 양산용 대형 HIP 설비도입 검토를 진행하고 있다. 따라서, 국내에서도 '22년부터 초대형 PM-HIP 기술개발 및 양산용 설비도입을 위한 대책과제를 기획하였고, 기술개발 대책과제를 '24년부터 우선 추진하는 것으로 결정되었다. 본 논문에서는 초대형 PM-HIP 제작기술 개발 대책과제 주요 추진내용 및 상용화 전략을 소개하고자 한다.

### [원전3-1 | 14:00] 초청강연

**한국형 소형모듈원전(SMR) 개발동향 및 로드맵: 마영화\***(두산에너지빌리티)

**Keywords:** 소형모듈원전, 탄소중립, 에너지

소형모듈원전(SMR)은 300MWe 이하의 출력과 모듈화 설계로 건설 기간 단축, 안전성, 탄소 저감 등 다양한 이점을 제공하며, 미래 탄소중립 에너지 전환의 핵심 기술로 주목받고 있다. SMR은 기저부하 전력원 역할과 산업용 열공급, 도심·격오지 전력, 수소·담수 생산 등 다양한 응용이 가능하며, 세계적으로 상업화가 가속화되고 있다. 한국은 2035년까지 700MWe급 SMR 보급 목표를 제시하고, 기술 개발과 국제 협력을 강화하고 있다. 한국수력원자력(KHNP)은 혁신형 SMR 개발 및 2028년 초도호기 착공을 추진 중이며, 정부는 연간 예산 투입을 통해 설계 및 실증기술 개발을 지원하고 있다. 두산에너지빌리티는 원전 핵심 부품 제조 역량을 기반으로 SMR 프로젝트에 참여하고, 글로벌 공급망과 국제 협력 확대에 앞장서고 있다. SMR 상용화를 위해서는 표준설계 인증, 규제 체계 확립, 경제성 향상, 공급망 안정화, 국제 협력 확대가 필요하다. 본 발표는 SMR의 세계적 동향, 한국형 SMR 로드맵, 두산에너지빌리티의 전략적 역할을 종합적으로 조명한다.

### [원전3-2 | 14:20] 초청강연

**PM-HIP으로 제작된 고질소 오스테나이트계 스테인리스강 미세조직 및 기계적 특성 연구: 김정길\*, 김동수, 안세환**(두산에너지빌리티), 문준오(국립창원대학교)

**Keywords:** 고질소 오스테나이트계 스테인리스강, PM-HIP, SMR

최근 탄소배출 저감을 위한 새로운 발전 기술의 하나로 SMR에 대한 관심이 증가하고 있다. 증기발생기와 같은 다양한 기기들이 단일 Vessel내부에 설치되어야 하기 때문에, 단일 기기기준으로 SMR은 기존 대형원자력 발전소에 설치되는 기기보다 더 크고 복잡하다. 그럼에도 불구하고, 발전사들은 SMR이 기존 대형원전보다 더 저렴하게 더 빨리 제작 설치되어야 한다고 요구하고 있는 실정이다. 따라서 수십년간 주기기 제작에 사용되어 오던 주조, 단조 및 용접이 아닌 혁신적인 제작기술의 적용이 필수적으로 요구되고 있으며, 그중 PM-HIP(Powder Metallurgy Hot Isostatic Pressing)이 기존 주조, 단조 기술을 대체할 소재제작을 위한 혁신기술로 고려되고 있다. PM-HIP기술은 최종형상의 Capsule내에 금속분말을 채워넣고 HIP처리를 하여 한번에 최종 제품을 제작하는 기술이며 제작기간의 단축 및 소재 절감 등에 탁월한 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 발표에서는 PM-HIP 기술로 제작된 SMR 주기기용 고질소 오스테나이트계 스테인리스강 XM-19의 미세조직 분석 및 기계적 특성 평가 결과를 공유하고자 한다.

### [원전3-3 | 14:40] 초청강연

**SMR 주기기용 PM-HIP SA508 소재 개발에 관한 연구: 안세환\*, 김정길, 김동수**(두산에너지빌리티)

**Keywords:** Small Modular Reactor(SMR), Powder metallurgy(PM), Hot Isostatic Pressing(HIP), SA508 Gr.3 Cl.2, RPV Lower head, Mechanical properties

최근 탄소중립 목표 달성 및 청정에너지원 증대 요구에 따라 Small Modular Reactor(SMR) 이 유력한 대안으로 떠오르고 있으며, SMR은 우수한 안전성과 함께 낮은 건설 비용, 짧은 건설 기간 등 다양한 장점을 바탕으로 활발히 연구되고 있다. 이로 인해, 미국, 영국 등 SMR 설계를 선도하고 있는 주요 국가들은 SMR 제작기술의 중요성을 사전에 인지하고 제작분야에서도 경쟁 우위를 확보하기 위하여 정부차원에서 혁신 제작기술(PM-HIP, EBW, DLC, Bulk AM 및 가공 기술 등) 개발 및 설비투자를 적극적으로 지원하고 있다. 이는 SMR 이 복잡한 설계와 더 커진 기자재 크기에도 불구하고 대형 원전 대비 시공기간 단축을 위해 기자재 제작기간 단축 이 지속적으로 요구될 것으로 예상되고, 기자재 제작기간 단축이 글로벌 SMR 경쟁에서 중요한 경쟁 요소가 될 것으로 전망되기 때문이다. 본 발표에서는 PM-HIP공정을 고려한 SA508 Gr.3 Cl.2 합금설계를 통해 모함금을 제작하여 NuScale사 RPV(Reactor Pressure Vessel) Lower head를 1/5 Scale 크기의 Mock-up을 제작하였으며, 인장 및 충격 시험을 채취하여 각 샘플의 기계적 특성 평가 간의 상관 관계를 고찰하였다,

### [원전3-4 | 15:00] 초청강연

**소형모듈원전(SMR) 압력용기 적용을 위한 마르텐사이트계 스테인리스강의 저온균열 이해 및 대응기술: 강남현\*, 최정현, 손시우**(부산대학교), 이윤상(두산에너지빌리티), 강용준(한국재료연구원)

**Keywords:** 소형모듈원전, 용접부, 저온균열, 마르텐사이트계 스테인리스강

전 세계적인 에너지 전환 기조에 따라 소형모듈원전(SMR)의 수요가 급증하고 있으며, SMR의 상용화 성공 여부는 기기의 소형화 및 경량화와 제작 기간 단축을 통한 경제성 확보에 달려있다. 기존 대형 원전 압력용기에 사용되는 저합금강(SA-508)은 내식성 확보를 위해 오스테나이트계 스테인리스강의 클래딩(Cladding) 공정이 필수적이며, 이는 제작 비용 상승과 제작 기간 지연의 주된 원인으로 지목된다. 이에 대한 혁신적인 대안으로 고강도와 우수한 내식성을 동시에 보유하여 단일 소재(Mono-material)로 압력용기 제작이 가능한 마르텐사이트계 스테인리스강의 적용이 적극 검토되고 있다. 그러나 이 소재는 용접 후 냉각 시 경한 마르텐사이트 조직으로 변태하는 특성상 저온균열(Cold Cracking) 민감도가 매우 높아, 원자력 기기 제작 요건(ASME Code)을 만족하는 건전성 확보가 필수적이다. 용접 후 냉각과정에서 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태할 때 발생하는 체적 팽창으로 인해 높은 인장 잔류 응력이 형성되며, 용접 과정에서 용접부 및 열영향부에 유입된 수소가 경질 마르텐사이트 조직 내에 포획되어 저온균열 민감도를 급격히 증가시킨다. 본 연구에서는 SMR 압력용기 제조 현장에 적용 가능한 용접공정을 대상으로 소재의 저온균열 민감도를 평가하고, 용접공정에 따른 상변태 및 체적변화 특성과 확산성 수소의 영향을 비교하여 저온균열을 방지할 수 있는 방법을 설명한다.

#### [원전4-1 | 15:30] 초청강연

**SMR용 고강도 오스테나이트계 스테인리스강의 용접성 평가:** 강용준\*(한국재료연구원), 정혜은(한국재료연구원, 국립부경대학교), 박기태, 송상우(한국재료연구원), 천은준(국립부경대학교)

**Keywords:** 소형모듈원자로, XM-19 스테인리스강, 용접 고온균열 민감도

고강도 오스테나이트계 스테인리스강(XM-19)은 질소의 고용강화 효과를 통해 기존에 널리 사용되어 온 Type 304L 및 316L 대비 우수한 강도를 확보할 수 있어, 경량화가 요구되는 소형모듈원자로(SMR) 압력용기 후보 소재로 적극 검토되고 있다. 특히 중성자 조사취화 데이터가 요구되지 않아 노심 영역에도 즉시 적용 가능하며, 부식 방지를 위한 피복 공정이 불필요하고 용접후열처리(PWHT)가 요구되지 않아 원자로 모듈의 제작 및 현장 설치 공정을 단순화할 수 있는 장점이 있다. 그러나 질소 합금화에 따른 응고모드 변화와  $M_2X$ ,  $MX$  등의 탄질화물 형성은 용접 고온균열 민감도 및 용접부 기계적 특성에 영향을 미칠 수 있으며, 이에 대한 체계적인 분석은 아직 충분히 이루어지지 않은 실정이다. 본 연구에서는 XM-19의 용접 고온균열 민감도를 Varestraint 시험을 통해 정량적으로 평가하고, 균열 발생에 영향을 미치는 아금속적 인자를 도출하였다. 또한 XM-19용 상용 용접재(ER209)를 적용하여 GTAW 및 GMAW 용접부를 제작한 후, 인장 및 샤르피 충격 시험을 통해 기계적 특성을 평가하고, 미세조직과의 상관관계를 분석하였다.

#### [원전4-2 | 15:50] 초청강연

**용접방법에 따른 XM-19 용융부 및 열영향부 특성평가:** 장창희\*, 권예진, 김홍덕(한국과학기술원)

**Keywords:** 스테인리스강, 아크용접, 전자빔용접, 열영향부, 예민화

소형 모듈형 원자로(Small Modular Reactor, SMR)는 효율성, 경제성, 그리고 안전성을 동시에 달성할 수 있는 혁신적인 원자로 시스템으로 주목받고 있다. 원자로의 경량화를 실현하기 위해 질소를 함유한 고강도 스테인리스강인 XM-19가 원자로 압력용기 및 격납용기용 금속 재료로 유망한 후보로 제시되고 있다. 또한, 기존의 아크용접 뿐만 아니라 전자빔 용접(Electron Beam Welding, EBW) 기술을 적용하면 제작 시간을 단축하고 비용을 절감할 수 있으며, 낮은 열 변형으로 인해 부품의 기계적 완성도를 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 다양한 용접방법으로 (GTAW, GMAW와 같은 아크용접법, 그리고 전자빔 용접(EBW)) 제작된 XM-19 용융부 및 열영향부의 미세구조, 기계적 특성, 그리고 예민화 특성을 평가하였다. 미세구조 분석 결과, 모재는 주로 오스테나이트 구조로 이루어져 있으며, 용융부에서는 오스테나이트 내에 소량의 골격형 페라이트(Skeletal Ferrite)가 잔류하는 것이 확인되었다. 용융부에는 용접방법 및 시험편에 따라 약 2~7%의 텔타( $\delta$ ) 페라이트가 존재하는 것으로 나타났다. 아크용접의 경우 용융부 및 열영향부의 경도가 모재에 비해 높았으나 전자빔용접의 경우 용융부의 경도가 모재에 비해 낮았다. 이는 아크용접의 경우 용융부에서 질소함량의 감소가 미미하나 전자빔용접에서는 매우 큰 질소함량의 감소가 발생하는 것에 기인한 것으로 보인다. 용융부 및 열영향부의 예민화특성을 평가하기 위해 DL-EPR(Double Loop Electrochemical Potentiokinetic Reactivation) 시험을 수행한 결과 모든 조건에서 예민화가 발생하지 않은 것으로 확인되었다. 추가로 예민화 취약구간을 규명하기 위해 550~750 °C 에서 예민화 모사 시험을 수행한 결과 700 °C 에서 ~50분 노출시 예민화가 발생하는 것으로 확인되었다.

#### [원전4-3 | 16:10] 초청강연

**FXM-19 소재 SAW/GTAW 용접부 미세조직에 따른 기계적 특성:** 서형석\*, 임동용(두산에너지빌리티)

Type XM-19 고질소 오스테나이트 스테인리스강은 높은 내식성과 강도로 인하여 소형 모듈원전(SMR)용 압력용기 후보소재로 고려되고 있으나, 대형 구조물 제작을 위한 용접 특성 검증은 충분하게 이루어지지 못한 상태이다. 본 연구에서는 상용 XM-19 소재 및 ER209 용접 재료의 용접 특성을 확인하기 위하여 GTAW 및 SAW 용접시험편을 제작하고, 미세조직에 따른 기계적 물성의 변화에 대하여 분석을 수행하였다. 용접 공정 변수 조건에 따라 760 MPa 이상의 용접부 인장강도 확보가 가능하였으며, 해당 조건에서 굽힘 시험 시 과도한 용접금속 터짐이나 용접 열영향부 예민화는 확인되지 않았다. 용접 공정 시 입열량이 과다하거나 과소한 경우 미세조직의 변화에 의하여 용접부 강도의 감소 및 열화가 확인되어, 최적 공정 범위의 선정이 적용이 필요할 것으로 판단되었다. 용접부의 파단거동 및 충격인성의 경우 용접재료 및 모재의 화학 성분과 미세조직의 영향을 받는 것으로 확인되어, 향후 소형모듈원전 압력용기에 대한 적용을 위해서는 적 합한 용접재료의 개발 뿐만 아니라, 용접특성이 우수한 모재의 개발이 요구될 것으로 판단되었다.

**[원전5-1 | 16:40] 초청강연**

**고강도 오스테나이트 내식강 대상 조사경화 모사재 제작 및 특성분석:** 진형한\*, 김성우, 김민철(한국원자력연구원), 김용근((주)에이치브이엠)

**Keywords:** 소형모듈형원자로, 조사경화 모사재, 온간압연, 오스테나이트계 내식강

소형 모듈형 원자로(SMR)는 높은 안전성과 경제성을 갖춘 차세대 원자로로 주목받고 있으며, 가동 중 원자로 내부 구조물 및 핵심 부품에는 고신뢰성 소재 적용이 필수적이며 따라서 고강도 오스테나이트계 내식강의 원자로/ 격납용기 적용을 위해서는 방사선 조사 및 고온·고압 성능 평가는 혁신형 원자로 설계와 운영 관리 전략 수립에 필수적으로 요구된다. 중성자 조사 효과 모사를 위한 연구로 조사시험(캡슐 활용)이 필요하나, 시험 수 제한, 고비용·장시간 소요, 핫셀 리모트 시험 등의 여러 제약으로 소수 시험편의 검증시험만 가능하다. 가속기 조사시험시설을 활용한 고에너지 이온 조사 방법도 비교적 빠른 모사재 제작이 장점이나 본질적인 표면 손상층 형성에 의한 매우 섬세한 마이크로 스케일 평가만이 가능하다는 한계가 있다. 이를 보완해 온간압연으로 조사경화 모사재를 제작, 벌크 스케일 시험편이 요구되는 충격·파괴인성·부식균열 시험에 활용하고자 한다. 본 연구는 연구로 조사량을 초과하는 혁신형 소형모듈형 원자로 최대 운전 조건의 벌크 스케일 조사모의재를 고강도 오스테나이트계 내식강 대상으로 온간압연 공정으로 제작하였다. 압하량을 각 면에 균등히 적용해 결정립 연신을 최소화하고, 고온 어닐링 (1100°C, 2시간) 후 300°C 온간압연으로 미세·균질 결정립조직을, 500°C 온간압연으로 다양한 결정립 크기 모사재를 확보하였다. EBSD 분석으로 압연 후 집합조직 및 결정립 크기 분포를 정량화하고, 인장·경도 시험으로 기준 소재 대비 200 MPa 이상의 경화 효과를 확인하였다. 이 모사재는 고온·고압 장기 신뢰성 평가(부식·균열·충격·인성 시험)에 활용되며, 특히 SMR 격납용기 및 원자로 압력용기(RPV) 부품의 장기 운전 중 손상 예측에 기여할 것이다. 특히 연구로 조사재와의 비교 검증을 통해 혁신형 SMR 구조재 신뢰성 향상의 기초자료를 제공하는 등 국내 SMR 상용화 기술 개발에 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다.

**[원전5-2 | 17:00] 초청강연**

**원자로용 구조소재의 용접영역별 조사경화 민감도 평가:** 신중호\*, 김대현, 한성희, 강민성, 진형하(강원대학교)

**Keywords:** 오스테나이트강, 양성자조사, 나노압입, EBW

원자로용 구조소재의 신뢰성 확보를 위해서는 용접부에서 형성되는 미세조직이 조사 환경에서 보이는 경화 민감도를 정량적으로 비교·평가할 필요가 있다. 본 발표에서는 오스테나이트계 고강도 스테인리스강을 대상으로 전자빔용접(EBW)으로 형성된 모재부 및 열영향부/용접부 영역을 구분하고, 조사 환경에서의 기계적 응답 변화를 영역별로 비교한다. 중성자 조사 환경을 모사하기 위해 양성자 조사를 활용하였으며, 전산 모사 및 전자현미경 기반 관찰을 통해 얇은 손상층의 깊이 특성을 확인하였다. 용접 단면 깊이 방향에서의 나노압입 프로파일링을 결합하여, 용접영역별 조사경화의 크기와 깊이 의존 거동을 정량화하고 통계적으로 비교하였다. 본 연구는 용접부의 조사 민감도를 특정 영역별로 스크리닝하고, 향후 중성자 조사 및 고온 조건 평가로 확장 가능한 정량 지표를 제공함으로써 차세대 원자로용 구조소재 개발 및 제조공정 최적화에 기여하고자 한다.

**[원전5-3 | 17:20] 초청강연**

**SMR용 고강도 오스테나이트 내식강의 미세조직 변화에 미치는 장기 열시효 효과:** 김성준, 함준혁, 김지현\*(울산과학기술원)

**Keywords:** Small Modular Reactor(SMR), High-nitrogen austenitic stainless steel, Thermal aging

소형 모듈형 원자로(Small Modular Reactors, SMR)는 높은 안전성과 경제성을 바탕으로 차세대 원자로로 주목받고 있으며, 80년 이상의 장기 운전을 목표로 하고 있다. 이에 따라 기존 대형 원자로에 사용되던 재료보다 우수한 강도와 내부식성을 갖는 첨단 구조용 소재의 적용이 요구된다. 고강도 오스테나이트 내식강은 기존 오스테나이트계 스테인리스강에 비해 높은 질소 함량으로 인해 우수한 기계적 특성과 내식성을 나타내어 SMR 구조재로서 활발히 연구되고 있다. 그러나 운전 중 고온 환경에 장기간 노출될 경우, 용접부 내 델타 페라이트에서 스피노달 분해(spinodal decomposition)와 G-상 석출(G-phase precipitation) 등의 열화 현상이 발생하여 재료의 취화를 유발할 수 있다. 따라서 고강도 오스테나이트 스테인리스강의 열시효 거동을 체계적으로 이해하고 분석하는 것은 SMR 환경에서의 장기적 성능과 신뢰성 확보를 위해 필수적이다. 실제 SMR 운전 조건을 반영한 열시효 거동 분석을 위해서는, 주요 작동 온도 범위인 285~300°C에서의 미세조직 변화 특성을 고려할 필요가 있다. 그러나 이 온도 범위에서는 확산이 제한되어 석출물 형성 속도가 느리며, 이를 실험적으로 재현하기 위해서는 장시간의 열시효가 요구된다. 이러한 한계를 극복하고 300°C에서의 장기 미세조직 변화를 단축된 시간 내에 모사하기 위해, 본 연구에서는 거의 동일한 석출물이 형성되는 400°C 조건에서 가속 열시효를 수행하였다. 또한, 아레니우스 식과 선행연구에서 보고된 활성화 에너지를 활용하여, 300°C에서 80년간의 열시효 조건이 400°C에서 약 8,000시간의 열시효로 모사될 수 있음을 계산하였다. 본 연구에서는 질소 함량이 약 0.4 wt%인 고강도 오스테나이트 내식강 모재를 대상으로 열시효에 따른 미세조직과 기계적 특성 변화 거동을 분석하였다. 이를 위해 시험편을 400°C에서 최대 8,000시간까지 열처리하였으며, 열시효 전·후 시험편의 미세조직을 전자후방산란회절(EBSD), 투과전자현미경(TEM) 및 전자에너지손실분광법(Electron Energy Loss Spectroscopy, EELS)을 통해 결정립 크기와 석출물 거동을 분석하였다. 그 결과, 모재의 입계 및 입내에서 Cr-Nb-N 화학조성을 갖는 Z-phase와 TiN 석출상이 관찰되었으며, 열시효 시간이 증가함에 따라 석출물의 면적 분율에는 뚜렷한 변화가 나타나지 않았다. 기계적 특성 평가를 위해 인장 시험과 경도 시험을 수행하였으나, 열시효 시간에 따른 항복강도 및 인장강도의 뚜렷한 상관관계는 확인되지 않았다. 본 연구는 SMR 구조재로 적용 가능한 고강도 오스테나이트 내식강의 장기 열시효 안정성을 실험적으로 검증함으로써, 차세대 원자력 에너지 시스템의 재료 선정 및 수명 평가를 위한 핵심 기초 자료를 제공한다.



**NEW-HORIZON Inter.: KIM-JIMM Joint Women's Symposium**

Room 3층 삼다A, 4월 29일

**[KJ1-1 | 09:20] Invited Talk**Electronic state observation for half-metallic ferromagnets at NanoTerasu —New synchrotron facility in Japan—: Rie Umetsu(Tohoku University)

Half-metallic ferromagnets (HMFs) have been intensively investigated in field of spintronics, since half-metallic electronic structures brought high spin polarization and were theoretically predicted in some half-Heusler and full-Heusler alloys in 1980s. Recently, we successfully detected the electronic structures of some full-Heusler alloys of bulk single crystals by resonant inelastic X-ray scattering (RIXS) in an external magnetic field and its magnetic circular dichroism (MCD) [1-3]. The RIXS is a photon-in/photon-out spectroscopy by tuning the incoming photon energy to the core-level absorption edges, and the MCD is effective to probe the magnetic excitations in the magnetically ordered states and the spin-polarized electronic structures. Although our group had investigated the RIXS-MCD for some Co-based-Heusler alloys at BL07 of SPring-8, Japanese synchrotron facility, till 2021, we recently restarted the experiments at NanoTerasu which is a new synchrotron facility in Japan after three years suspension. The spectrometer that we had used was completely moved to NanoTerasu, and the operation started in 2024. Because of the brilliant light coming from the new synchrotron facility, the energy resolution becomes to be 2.5 times higher than before even using the same equipment. Bulk single crystals in some full-Heusler alloys ( $\text{Mn}_2\text{VAl}$ ,  $\text{Co}_2\text{MnSi}$ ,  $\text{Co}_2\text{MnGa}$  and  $\text{Co}_2\text{MnGe}$ ) were grown by Bridgman method. Strip shaped specimens with direction  $\langle 100 \rangle$  was used for RIXS experiments. The external magnetic field of 0.25 T was applied by a magnetic circuit with a permanent magnet. In the meeting, I would like to show the new results of RIXS-MCD obtained by NanoTerasu and compare them with the previous data. In addition, I would like to introduce the situation on gender problem in Japan and the efforts at Tohoku University. Acknowledgement The above studies were performed under the cooperated research with Assistant Professor Hidenori Fujiwara, Professor Akira Sekiyama, Emeritus Professor Shigemasa Suga, Dr. Fumiaki Kuroda (currently NIMS), Professor Tamio Oguchi (currently Specially Appointed Professor) in Osaka University, and Assistant Professor Jun Miyawaki (currently QST), Professor Yoshihisa Harada in the University of Tokyo. The author deeply appreciates their kind cooperation. References [1] K. Nagai, et al., “Electronic structure and magnetic properties of the half-metallic ferrimagnet  $\text{Mn}_2\text{VAl}$  probed by soft x-ray spectroscopies”, Phys. Rev. B 97, 035143 (2018). [2] R.Y. Umetsu, et al., “Half-metallicity of the ferrimagnet  $\text{Mn}_2\text{VAl}$  revealed by resonant inelastic soft x-ray scattering in a magnetic field”, Phys. Rev. B 99, 134414 (2019). [3] H. Fujiwara, R.Y. Umetsu, et al., “Detecting halfmetallic electronic structures of spintronic materials in a magnetic field”, Sci. Rep. 11, 18654 (2021).

**[KJ1-2 | 09:45] Invited Talk**Thermokinetic Study of High Entropy Alloy Produced by Green Process: Sun-Young Lee(Hanyang University)*Keywords:*

High-entropy alloys (HEAs), composed of multiple principal elements in near-equiatomic ratios, exhibit outstanding mechanical, thermal, and corrosion-resistant properties. While gas atomization is widely used to produce spherical HEA powders, this process requires high energy input for melting and suffers from significant carbon emissions during powder production. In this study, we propose a green process alternative to gas atomization: a hydrogen reduction-based process for fabricating spherical agglomerates of HEA powders, in which water vapor is generated as the primary reaction byproduct. High-energy milling (2, 400 rpm) was employed to reduce micron-sized oxide powders to the nanoscale and to induce solid-solution formation among the oxide powders. This work explores a Thermokinetic approach for synthesizing equiatomic CoCrFeNi HEA powders through hydrogen-assisted reduction of high-energy milled metal oxide precursors, offering a low-carbon and more efficient processing route. Milling promoted solid solution formation, improving the reducibility of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , a thermodynamically stable oxide by lowering the reduction temperature. Thermogravimetric analysis (TGA) results confirmed that hydrogen reduction is feasible at a relatively low temperature of approximately 1,000 °C, compared to the melting temperature of about 1,900 °C required in conventional gas atomization processes. The high-energy milled powders were subsequently processed into spherical agglomerates via a spray drying process, achieving particle size distributions comparable to those of gas-atomized powders and high sphericity values exceeding 0.9. These findings validate hydrogen-assisted reduction as a green and sustainable alternative for producing fine-grained, high-performance CoCrFeNi HEA powders.

**[KJ1-3 | 10:10] Invited Talk**Quench-Induced Precipitation in 7000 Series Aluminum Alloys: Cluster and GP Zone Formation during Cooling: Mami Mihara-Narita(Nagoya Institute of Technology)*Keywords:* Aluminum alloys, aging, quench-induced precipitation, solute clustering

Aging precipitation in 7000 series aluminum alloys (Al-Zn-Mg series alloys) is governed by the formation of solute clusters and GP

zones at the early stage of aging. While these nanoscale features are generally considered to develop during subsequent aging treatments, recent studies have revealed that precipitation can already occur during cooling after solution treatment. Such quench-induced precipitation, in which clusters or GP zones form even under relatively slow cooling conditions including furnace cooling, represents a unique pathway for microstructure evolution in high-strength aluminum alloys. In this talk, early-stage precipitation phenomena in 7000 series aluminum alloys will be discussed with particular emphasis on quench-induced precipitation and its relationship with cooling conditions. Experimental observations obtained through advanced microstructural characterization techniques will be presented to clarify the mechanisms of cluster and GP zone formation during cooling and the role of vacancy-solute interactions. The influence of these early nanostructures on subsequent precipitation behavior and microstructural development during aging will also be addressed. In addition to the scientific aspects, perspectives on international research experiences and collaborations that have shaped the author's research activities will be briefly introduced, highlighting the importance of sustained international connections in developing a research career.

#### [KJ2-1 | 10:55] **Invited Talk**

Bridging Materials and Borders: Hye Jung Chang\*(Korea Institute of Science and Technology)

**Keywords:** Microstructural analysis, Solid oxide electrolyte cell, Interdisciplinary Materials Integration

This invited talk presents a comprehensive overview of a career dedicated to elucidating material properties through advanced electron microscopy. As a early-generation female researcher in metallurgy research field in Korea, I share the evolution of my research focus and the professional philosophy developed over decades of navigating the materials science landscape. My research trajectory spans a wide array of systems, beginning with amorphous alloys during my doctoral studies, moving to ferroelectric materials during my postdoctoral period, and currently focusing on SOEC and PCFC for next-generation energy solutions. While such a diverse path once brought concerns regarding specialization, it eventually became a core strength, fostering a “convergent perspective” that allows for the integration of cross-disciplinary insights. A significant portion of this journey was shaped by international collaboration, notably a two-month residency at NIMS (Tsukuba), Japan, supported by the NRF-JSPS joint program. Learning 3D-APT and FIB techniques at NIMS was a pivotal experience that not only enhanced my technical expertise but also initiated a lifelong exchange with the Japanese materials and microscopy communities. Reflecting on the challenges and milestones of the past years, I wish to offer a “strategic roadmap” for junior researchers. Beyond technical excellence, the ability to maintain “chameleon-like flexibility” and engage in collaborative fusion is essential in modern science. This presentation aims to provide both technical insights into microstructural analysis and professional encouragement for the next generation of scientists to build resilient and multifaceted careers.

#### [KJ2-2 | 11:20] **Invited Talk**

Effect of mechanical deformation on hydrogen diffusion in steels: Saya Ajito(National Institute for Materials Science)

The development of hydrogen-related technologies requires structural materials that can reliably withstand hydrogen environment. However, hydrogen embrittlement remains a critical issue in steels. Since hydrogen diffusion and segregation play an important role in hydrogen embrittlement phenomena, understanding hydrogen diffusion behavior is essential for clarifying the underlying mechanisms. Although hydrogen diffusion under unstressed conditions have been extensively studied, steels in practical applications are often subjected to mechanical loading, and the influence of mechanical loading on hydrogen diffusion remains insufficiently understood. Therefore, it is essential to clarify how mechanical loading affects hydrogen diffusion behavior. The first part of this presentation focuses on the effects of applied stress and micro-yielding on hydrogen diffusion behavior in tempered martensitic steel, investigated by electrochemical hydrogen permeation tests under constant loading conditions. Particular attention is given to how stress and micro-yielding alters hydrogen diffusion coefficient and hydrogen solubility. The second part addresses the role of dislocation motion in hydrogen transport. Results from slow strain rate tensile tests combined with electrochemical hydrogen detection measurements are presented to demonstrate the contribution of mobile dislocations to hydrogen motion and redistribution during plastic deformation. The results are discussed in terms of the interaction between mechanical deformation and hydrogen diffusion in steels.

#### [KJ2-3 | 11:45] **Invited Talk**

A new strategy for developing interfacial bonding using non-metallic atoms in carbon nanotube-reinforced aluminum composites: Se Eun Shin\*(Sunchon National University)

**Keywords:** Aluminum, Composites, Microstructures, Mechanical properties

The strengthening efficiency of nanocomposites depends on the various characteristics of their interface, encompassing the arrangement of nanoscale reinforcements, interfacial structure, and bonding strength. In this study, we used a new strategy to enhance interfacial bonding using non-metallic atoms in an aluminium matrix composite reinforced with multi-walled carbon nanotubes (hereafter Al-O/MWCNTs). Mechanical milling was used to uniformly disperse MWCNTs within the Al-O matrix while retaining their structural integrity with a carbon-carbon graphitic structure during the high-temperature consolidation process. Notably, oxygen in the Al-O matrix was detected in the form of clusters at the interface between the MWCNTs and matrix. This oxygen plays a pivotal role in anchoring both the MWCNTs and matrix, thereby facilitating additional interfacial bonding and leading to a tightly bonded interface

within composites. Consequently, the Al-O/MWCNT composite exhibits improved hardness, yield strength, and elastic modulus than those of the Al/MWCNT composites. In conclusion, the proposed strategy offers a new pathway for enhancing interfacial bonding and achieving superior performance of composites.

## 학회상 수상기념 강연

Room 3층 삼다A, 4월 29일

### [AW1-1 | 14:00] POSCO학술상 수상기념강연

미세조직에서 성능으로: 금속재료 연구의 여정과 비전 — 소성가공과 고온변형, 초소성 설계, 그리고 에너지소재로의 확장 —: 김우진\* (홍익대학교)

금속재료의 성능은 조성뿐 아니라 결정립 크기, 집합조직, 상 분포, 계면 구조와 같은 미세조직 인자에 의해 본질적으로 좌우된다. 본 강연에서는 미세조직 제어를 중심으로 수행해 온 연구를 바탕으로, 금속재료의 기계적 특성과 기능적 성능을 어떻게 향상시켜 왔는지를 소개하고자 한다. 본 연구의 중요한 한 축은 소성가공을 이용한 경량합금 및 구조용 금속재료의 미세조직 제어와, 그에 따른 강도-연성 균형, 고온 변형, 크리프 및 초소성 거동의 해석에 있다. 특히 결정립 미세화, 이차상 제어, 변형 중 미세조직 진화에 대한 이해를 바탕으로, 고온 성형성과 장기 안정성을 향상시키기 위한 재료설계의 기반을 마련해 왔다. 이와 함께 이러한 연구는 processing map에 기반한 고온가공 해석과 초소성 발현 조건의 통합적 이해로 확장되었으며, 알루미늄 및 마그네슘 합금의 초소성 거동을 폭넓게 정리한 리뷰 연구를 통해 합금계별 공정-미세조직-성능 상관관계를 재조명하는 방향으로 이어지고 있다. 이러한 작업은 개별 재료의 거동 해석을 넘어, 초소성과 고온변형을 관통하는 일반적 설계 원리를 정립하려는 시도라 할 수 있다. 아울러 미세조직 공학적 관점은 에너지소재 분야에도 적용되어, 금속 기반 전극재료의 반응 안정성, 기계적 건전성, 수명 향상 문제를 다루는 연구로 확장되고 있다. 이는 구조재료 분야에서 축적된 미세조직-성능 상관관계에 대한 이해가 차세대 기능성 소재 설계에도 유효하게 적용될 수 있음을 보여준다. 본 강연에서는 소성가공, 크리프, processing map, 초소성, 그리고 에너지소재 연구를 하나의 연속된 학문적 흐름 속에서 조망하면서, 미세조직에서 성능으로 이어지는 금속재료 연구의 현재와 미래를 함께 논의하고자 한다.

### [AW1-2 | 14:25] 현송공학상 수상기념강연

모빌리티용 고비강도 알루미늄 합금 판재 개발: 김형욱\*(한국재료연구원)

알루미늄은 비강도, 전도성, 내식성 등 다양한 물리화학적 성질이 우수하여 다양한 산업 분야에 활용되고 있다. 특히 고강도 알루미늄 합금은 모빌리티 산업의 성장과 더불어 다양한 새로운 운송 시스템이 개발됨에 따라 에너지 효율 극대화 및 환경 보호 차원에서 경량화 소재로 개발되어 왔으며 점차 그 활용도가 높아지고 있다. 알루미늄 합금 판재의 경우 자동차의 경량 차체 적용을 위하여 초기에는 고성형성 및 고강도인 알루미늄 합금 판재 개발되었으며, 강도 및 성형성 뿐만 아니라 재활용성이 우수한 소재 및 에너지 절감형 공정이 개발되어 활용되고 있다. 현재에는, 기계적인 특성뿐만 아니라 기능적인 측면에서도 우수한 다양한 알루미늄 합금이 개발되어 차체용 판재뿐만 아니라 알루미늄의 열전도성 및 경량성을 이용한 경량 고효율 열교환기 소재와 전기차 이차전지용 양극박 및 케이스 소재로까지 활용이 점차 확대되고 있다. 최근 항공기 산업 발달과 더불어 미래 항공교통(AAM, Advanced Air Mobility)의 개발 요구가 증가함에 따라 자동차 및 항공기 산업용 소재를 대표하는 다양한 알루미늄 합금기술들을 활용하여 보다 높은 비강도와 안정성이 우수한 신합금 개발이 진행 중이다. 한국재료연구원에서는 다양한 수요 산업의 요구에 대응하기 위한 알루미늄 합금 기술들이 개발되어 왔으며 소재 생산기업들과 수요산업과의 협업을 통해 첨단 신소재의 국산화 및 상용화하기 위해 노력하고 있다. 본 발표에서는 지난 20여년간 모빌리티 산업의 발전과 이에 대응하는 요구를 만족하기 위해 개발된 몇가지 알루미늄 합금 판재의 제조 기술을 소개하고 향후 미래 모빌리티 산업의 새로운 고비강도 경량소재로서의 활용 가능성에 대하여 논의하고자 한다.

### [AW2-1 | 14:50] 아모공학상 수상기념강연

Innovative multi-material additive manufacturing and its fundamental technological components: Huisuk Yun\*(Korea Institute of Materials Science)

Additive manufacturing (AM) is a fabrication process that uses digital information from a computer-aided design file to stack two-dimensional (2D) layers of various materials to produce 3D objects without requiring part-specific tooling. The use of AM technology in ceramics has attracted significant attention because it can overcome the serious limitation of controlling the complex 3D structure and has advanced remarkably in the last decade. Stereolithography is a representative ceramic AM technology that can produce complex 3D structures with high structural accuracy and precision by using a projector's light source to cure photo-curable polymers mixed with ceramic particles. Despite numerous studies exploring the use of stereolithography for producing complex 3D ceramic devices, significant limitations and challenges persist. It is critical to carefully design the photocurable ceramic mixture by taking into account the final product's structure, including the density and refractive index of the materials, colors, and the conditions after heating, to ensure the ceramic devices are strong and accurate after the sintering process. In addition, the use of multiple materials is both important and difficult. Various approaches should be considered to match the shrinkage behavior of each material, such as adjusting the composition ratios or using additives, to avoid separation, crack formation, or delamination during the sintering process.

**[AW2-2 | 15:15] International Scholar Award Lecture**

Ubiquitous short-range order in multi-principal element alloys and its impact on the mechanical behaviors: Yang Yang\*(The Pennsylvania State University), Penghui Cao, Andrew Minor, Mark Asta(University of California), Wen Chen(University of Massachusetts)

Recent studies on multi-principal element alloys (MPEAs) have increasingly focused on the role of short-range order (SRO) on materials' performance. However, the mechanisms of SRO formation and its impact on the mechanical properties of these alloys remain elusive, hindering advancements in SRO engineering. This presentation will cover two projects aimed at addressing these gaps. First, we integrate additive manufacturing, advanced electron microscopy, and atomistic modeling to demonstrate that significant SRO can form during solidification in several CoCrNi-based face-centered-cubic MPEAs, revealing that SRO is ubiquitous in this class of alloys. Second, we employ in situ nanomechanical testing and energy-filtered four-dimensional scanning transmission electron microscopy (4D-STEM) to observe the rejuvenation process in CrCoNi during cyclic mechanical loading. Molecular dynamics simulations further confirm that these changes in stacking fault reversibility are triggered by the local breakdown of SRO. Together, these studies offer new insights into the formation and dynamical behavior of SRO.

## 표면계면

Room 3층 삼다A 4월 29일

### 표면계면 1-1 | 16:00

**표면조건별 스테인리스강의 중성 수용액환경내 국부부식 특성연구: 김영호\*(포스코)**

**Keywords:** 스테인리스강, 표면, 부동태, 부식, 응력부식

스테인리스강의 내식성은 소재의 성분과 부식환경에 따라 큰 차이를 보일 수 있으며, 특히 표면상태에 따라서도 크게 변화될 수 있다. 이러한 표면상태는 조도와 거칠기등 표면의 물리적인 특성차이, 광택도와 색도등 광학적인 차이, 그리고 표층 원소들의 화학적인 결합형태와 관련된 부동태 피막특성에 차이에 크게 의존한다. 본 연구에서는 기존에 범용적으로 널리 사용된 18Cr-8Ni계의 STS304강종의 중성환경 염수내에서 이러한 표면상태의 변화에 따른 부식반응현상의 차이를 고찰하였다. 통상적으로 스테인리스강 냉연강판을 제조하는 공정에서 냉간압연후 산화성 분위기 로에서 열처리후 산세하여 조질압연하여 일정한 광택을 부여하는 2B의 표면 조건과 냉간압연후 환원성분위기로에서 열처리후 산세를 생략하고 조질압연하여 높은 광택을 보이는 BA의 표면조건의 2가지 표면 상태의 STS304강을 비교 평가하였다. 중성 염수내에서 전기화학적 부동태과파 전위값을 측정하고, ISO기준의 대기환경 모사조건으로 발청성을 상대평가하고, 또한 비등염수내 일정연신율에 의한 응력부식균열저항성을 평가하였다. 이들 평가결과와 표면특성간의 상관성을 규명하여 스테인리스강의 국부부식성에 대한 표면인자의 영향을 해석하였다..

### 표면계면 1-2 | 16:15

**in situ X선 나노토포그래피를 통해 관찰한 용융염 환경에서의 NiCr<sub>20</sub> 합금의 방사선 유도 부식 거동 전이 : 한인성\*(경북대학교)**

**Keywords:** 방사선 유도 부식, 용융염, 광전효과, in situ 나노토포그래피, NiCr 합금

구조재료에서의 방사선 손상은, 취화, 크리프, 팽윤, 경화와 같은 다양한 열화 현상을 유발하며 재료의 성능 저하로 이어진다. 특히 용융염 환경에서 방사선이 재료에 미치는 영향을 이해하는 것은 차세대 용융염 원자로 응용을 위한 구조재료의 성능 예측과 신뢰성 확보 측면에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 X선 조사 하에서 LiCl-KCl 용융염 내 NiCr<sub>20</sub> 모델 합금의 부식 거동을 조사하였으며, 특히 입사 X선 에너지가 부식 거동에 미치는 역할에 주목하였다. 이를 위해 방사광가속기 기반 in situ X선 나노토포그래피를 활용하여, 고온 조건의 LiCl-KCl 용융염 환경에서 NiCr<sub>20</sub> 합금 내부의 미세조직 변화와 부식 과정을 연속적으로 관찰하였다. 또한, 원자로 환경을 모사하기 위한 추가적인 요인으로, 핵분열 생성물인 Cs와 I를 CsI 형태로 첨가하여, 이들이 부식 속도 및 반응 경로에 미치는 영향을 함께 분석하였다. 부식 속도는 획득된 3차원 데이터에 기반하여 정량적으로 측정되었다. 본 연구 결과는 방사선, 화학적 환경, 온도 간의 상호작용이 부식 거동에 복합적으로 작용함을 보여준다. 이러한 결과는 차세대 용융염 원자로 설계 시, 구조재료의 건전성과 원자로 안전성을 확보하기 위해 방사선 유도 부식 메커니즘을 고려하는 것의 중요성을 시사한다.

### 표면계면 1-3 | 16:30

**자동차용 열연강판의 인산염 처리성에 미치는 Cr영향성: 박중철\*(포스코), 김동현(포항공과대학교), 송연균(포스코)**

**Keywords:** 자동차, 인산염, 열연강판, 크롬

최근 자동차 산업에서는 연비 향상, 환경 규제 대응 및 안전성 개선을 위해 고강도·박판 열연강판의 적용이 증가하고 있다. 소재의 두께가 감소함에 따라 내식성 확보가 중요한 과제로 부각되고 있으며, 이에 따라 인산염 처리성은 핵심적인 표면 특성으로 평가된다. 고강도강의 기계적 특성 향상을 위해 첨가되는 크롬(Cr)은 인산염 처리성에 영향을 미칠 수 있으나, 그 구체적인 메커니즘은 아직 명확히 밝혀지지 않았다. 본 연구에서는 Cr 함량이 1.0% 이하인 고강도강 샘플을 대상으로 인산염 처리성을 조사하였다. 실험 결과, Cr 함량이 0.2wt.%인 경우 인산염 처리성이 양호하였으나, 0.8wt.%로 증가할 경우 처리성이 현저히 저하되었다. 이러한 차이를 규명하기 위해 전계 방출 투과 전자 현미경(FE-TEM)과 X선 광전자 분광법(XPS)을 활용하여 표면 생성물을 심층 분석하였으며, 인산염 처리 용액 내 강재의 상대적 반응 특성은 전기화학적 평가 방법을 통해 측정하였다. 본 연구는 Cr 함량 변화가 고강도강의 인산염 처리성에 미치는 영향을 규명함으로써, 자동차용 고강도강의 표면 처리 공정 최적화에 기여할 수 있는 기초 자료를 제공한다.

### 표면계면 1-4 | 16:45

**건식 방식의 디지털 프린팅 컬러 이미지 강판 제조 기술: 박순홍\*, 김수현, 박경난, 지해근, 전영도\*((주) 옴니코트)**

**Keywords:** Dry toner-based printing, Color-image steel plate, Wettability, Toner

금속 소재 판재의 고부가가치를 위하여 이미지 또는 컬러 색상을 구현하는 방법에는 PCM(Pre-Coated Metal) 방식 코팅과 잉크젯 프린팅 방식이 있다. 두 가지 기술 모두 습식의 도료를 사용하여 컬러 색상 및 이미지를 구현하는 방식으로, 습식 도료와 강판 사이의 Wetting 특성에 따라 구현되는 물성이 변화된다. 이에 본 연구에서는 습식 방식의 한계인 Wetting 특성 제어와 정밀 이미지 구현의 문제점을 해결하기 위하여 건식 토너 기반 프린팅 방식을 개발하였다. 건식 토너 방식은 안료를 포함한 토너를 만들고, Pre-Heating된 강판의 표면에 부착 및 열압착을 진행하여 고해상도 이미지를 구현하였다. 구성 성분인 토너는 안료와 수지, 외계제 등으로 구성되어 있고, 시스템은 정전기 제어를 통하여 금속 소재에 부착한 후 열융착 방식이다. 이렇게 구현된 이미지는 열간 압착 후에 표면 Clear 코팅을 통하여 내마모성, 내부식성, 내화학성, 내후성 등의 특성을 확보하였다. 또한 본 연구에서는 컬러 이미지 강판의 특성이 가공성과 내후성 등의 물성을 평가하여 최적의 토너를 개발하고자 하였으며, 강판과 토너의 부착을 최적화하기 위하여 Base 코팅, Clear 코팅등의 화학적 성분을 제어하였다.



**[표면계면 1-5 | 17:00]**

**초상자성 산화철 나노입자 표면개질을 활용한 효과적인 정수 방법:** 박형원\*(중앙대학교)

**Keywords:** 초상자성 산화철 나노입자, 표면개질, 자기조립단분자막

금속 산화물과 강하게 결합하는 포스포산(Phosphonic acid)의 특성으로 인해 유기인산염(organophosphate) 계열 물질은 초자성 산화철 나노입자(Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles, SPION)의 표면에 효과적으로 흡착될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 표면 친화성을 활용하여 수중 오염물을 SPION 표면에 선택적으로 흡착시킨 후, 외부 자기장을 이용해 신속하게 회수하는 간편하고 효율적인 정수 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 적용 가능성을 평가하기 위해 인위적으로 오염시킨 수용액과 실제 지표수 시료에 적용하여 정수 성능을 비교·분석하였다. 오염물 흡착 후 회수된 SPION은 푸리에 변환 적외선 분광법(FTIR), 열중량 분석(TGA), 동적 광산란(DLS)을 통해 특성을 분석하였다. 또한 오염물의 SPION 표면 흡착 거동과 상호작용 기작은 분자동역학 시뮬레이션(MD simulation)을 통해 규명하였다. 정수 효율은 액체 크로마토그래피-질량분석(LC-MS)을 이용하여 정량적으로 평가하였다. 실험적 결과와 이론적 분석 모두, 제안된 방법이 외부 자기장을 이용해 수중 오염물을 효과적으로 제거할 수 있음을 확인하였다. 특히 정수 효율은 기존 상용 정수 기술과 유사한 수준을 보였으며, 간단한 공정과 용이한 회수 특성 측면에서 높은 적용 가능성을 제시한다.

**[표면계면 1-6 | 17:15]**

**레이저 텍스처링 및 열/가압 시스템 활용 금속-복합재 접합기술 연구:** 정준영\*, 권혁민, 김호동, 정연일(현대자동차), 최원호((주)엔트)

**Keywords:** 금속, 복합재, 용접, 접합, 레이저, 텍스처링

자동차 구조부품 경량화를 위해 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) 등의 복합재 적용이 검토되고 있으나, 비싼 가격과 낮은 생산성으로 인해 적용에 한계가 있는 상황이다. 이를 극복하기 위해, 기존 금속으로 구성된 구조 부품에 필요한 부위에만 CFRP를 적용하는 금속-복합재 하이브리드 부품화 기술이 활발히 연구되고 있다. 본 연구에서는, 기존 금속-복합재 하이브리드 부품화 공정 대비 단순하고, 종래 금속 부품을 접합하는 대표 방법인 점 용접과 유사한 형태의 열/가압 시스템 접합법 연구 결과를 소개하고자 한다. 접합력을 높이기 위해 금속 표면을 레이저로 텍스처링하여 패턴을 형성한 후, 패턴 사이에 열가소성 복합재 수지를 열/가압하여 유입하는 방식으로, 다양한 금속 재질에 따른 접합력과 충돌 성능 결과를 평가하였다.

**[표면계면 1-7 | 17:30]**

**레이저 리멜팅과 열처리를 통한 SLM 제작 SS316L의 표면 조도 제어 및 NaCl 환경 부식 거동 평가:** 정세윤, 박창규\*, 김민혜, 김창민, 구본준, 김유신(서울과학기술대학교)

**Keywords:** Selective Laser Melting (SLM), 316L Stainless Steel, Laser Remelting, Heat Treatment, Surface Roughness, Corrosion Behavior

SLM 기술은 대표적인 금속 적층 제조 기술로, 금속 분말 층을 레이저를 이용해 선택적으로 용융·적층하면서 부품을 제조하는 공정이다. 기존의 절삭공정에 비해 복잡한 형상의 부품을 제작할 수 있으며, 소재 사용 효율이 높다는 장점이 있다. 그러나 SLM 공정에서는 갈바노미터 스캐너의 구동 특성으로 인해 가감속 스캔영역이 발생하며, 해당 구간에서의 불안정한 용융풀 거동과 적층 과정에서 레이저 계단 효과, 표면의 미용융 분말에 의한 높은 표면조도가 발생한다. 표면 조도 증가는 유효 반응 면적 증가로 전반적인 부식 속도를 높일 수 있으며, 표면의 흠과 요철 등 미세 형상에 의해 국부 부식의 개시가 용이해져 내부식성이 저하되는 문제가 발생할 수 있다. 또한 잔류응력에 의한 균열 및 뒤틀림 문제를 완화하기 위해 후공정이 요구되고 있다. 열처리는 잔류 응력을 제거할 수 있는 대표적인 공정이며, 레이저 리멜팅은 기존 재료 표면층을 레이저로 재용융시킨 뒤 다시 응고시키는 공정으로, 미세 조직 및 표면 상태 변화와 함께 표면 조도 감소 효과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 SLM으로 제작한 SS316L 시편을 레이저 리멜팅과 열처리를 진행하여 내부식성의 변화를 관찰하고자 하였다. NaCl 수용액 환경에서의 동전위 분극 시험을 통해 부식 속도를 기준으로 내부식성을 측정하였다. 레이저 리멜팅과 열처리가 내부식성에 미치는 영향을 분석하기 위해 공초점 현미경과 SEM으로 표면 형상 관찰 및 조도 측정을 진행하였으며, EDS 분석으로 조성 변화를 분석하였다.

## 전산재료과학 II

Room 3층 삼다B, 4월 29일

## [전산6-1 | 09:00] 초청강연

Rational Design of Support Materials for Durable Electrocatalysis: Doosun Hong\*(University of Seoul)*Keywords:* Electrocatalysis, Support Design, Heteroenergetic Support, Excess Electron Reservoir

The long-term durability of electrocatalysts remains a pivotal challenge in advancing fuel cells and water electrolysis toward commercialization. In this talk, we propose two design rules for support materials to fundamentally mitigate catalyst degradation by integrating density functional theory calculations with experimental validation. Specifically, we demonstrate how the deliberate regulation of metal-support interaction energetics and electronic environments can stabilize catalytic species under harsh electrochemical environments. We discuss the role of heteroenergetic supports—such as mixed tantalum oxide and carbon—in suppressing nanoparticle agglomeration via differential binding affinities. We also examine how interfacial charge replenishment, driven by excess electron reservoirs in doped tin oxide supports, can preserve the optimal oxidation states of catalysts like iridium. Building on these findings, we highlight that the rational design of support materials serves as a key strategy for developing next-generation, ultradurable energy materials.

## [전산6-2 | 09:25]

Quantum Machine Learning for Superalloy Phase Screening: A Benchmark Study: KEUNSU CHOI\*, Daihyun Kwon, Jungmin Bak(Quantum Intelligence Corp.)*Keywords:* Co-based Superalloy, Quantum Machine Learning, Phase Screening, Support Vector Machine

Co-based superalloys derive their exceptional high-temperature mechanical properties from the exclusive presence of  $\gamma/\gamma'$  phases. During alloy design, the formation of detrimental phases severely degrades mechanical performance, making reliable screening of detrimental phases a critical requirement for efficient superalloy development. Failing to detect these phases in the screening stage can lead to significant time and cost losses in downstream experimental validation. In this work, we benchmark quantum support vector machine (QSVM) against classical SVM for screening Co-based superalloy compositions into two categories: those containing only  $\gamma/\gamma'$  phases and those with additional detrimental phases. Comparing different quantum feature maps with the classical RBF kernel, we found that while overall accuracy was comparable, the QSVM with an entanglement-based feature map produced a more favorable confusion matrix — specifically reducing the rate of missing detrimental phases. This suggests that quantum-enhanced feature mapping can improve screening reliability where the cost of false negatives is high. We further validated our approach on IBM quantum hardware, confirming that shallow-depth circuits maintain robust performance under device noise and that error mitigation techniques can effectively recover accuracy for deeper circuits. Our results demonstrate that quantum machine learning is a viable and promising tool for materials screening, offering a new perspective on superalloy design.

## [전산6-3 | 09:40]

Predicting CO<sub>2</sub> Reduction Selectivity on Large-scale Cu-Pd Nanoparticles via a Multi-scale Machine Learning Framework: Wooseok Lee(Sogang Univ.), Seoin Back\*(Korea Univ.)*Keywords:* DFT, MLP, CO<sub>2</sub>RR, selectivity

The conventional computational approach for catalyst evaluation has long been limited by a reliance on simplified slab models that fail to capture the structural complexity of realistic nanoparticles (NPs). To bridge this gap, we present a multiscale computational framework designed to predict the selectivity of realistic NPs by combining machine learning potential (MLP) driven molecular dynamics (MD) simulations with high-throughput evaluation of active sites. Applying this framework to the CO<sub>2</sub> reduction reaction (CO<sub>2</sub>RR) on Cu-Pd alloys, we first generated ensembles of realistic NP morphologies and then predicted the binding energies of key intermediates (CO\*, OH\*, H\*) across the available surface sites using a fine-tuned equivariant model. Our evaluation reveals a composition-dependent shift in product selectivity, from CO<sub>2</sub>RR on Cu-rich NPs to the competing hydrogen evolution reaction (HER) on their Pd-rich counterparts. Notably, we observe a strong synergetic effect at equimolar Cu-Pd composition that maximizes selectivity toward C<sub>1+</sub> products. This work establishes a methodology that bridges the gap between atomistic predictions and the complexity of real-world nanocatalysts, paving the way for more accurate in-silico catalyst discovery.

## [전산6-4 | 09:55]

A Multi-stage Screening Framework for the Accelerated Discovery of Multinary Ferroelectrics: Sang Woo Park, Donghwa Lee\*(POSTECH), Ki-Ha Hong\*(Hanbat National University)*Keywords:* Ferroelectric, High-throughput screening, Machine Learning, First-principles calculation

Wurtzite AlScN is emerging as a key material for next-generation non-volatile memory and neuromorphic computing, as Sc

substitution into AlN lowers the switching barrier while maintaining ferroelectricity. Although compositional engineering offers great potential, the vast search space of elemental combinations and configurational complexity hinders the discovery of new materials. Previous large-scale screenings primarily evaluated the polarization of known compounds by utilizing group-subgroup symmetry relations to identify polar-nonpolar structural pairs. However, these frameworks are restricted to established compositions. Exploring multinary systems requires identifying stable atomic configurations within large supercells and evaluating energy barriers along the polarization reversal pathway. The cost of these first-principles calculations grows exponentially, making previous screening methods impractical for mixed alloys. To overcome these limitations, we propose a strategic multi-stage screening framework that combines machine learning (ML) and first-principles calculations to efficiently explore multinary systems. The framework adopts a step-wise screening approach to effectively compress the extensive chemical space. By using ML to predict key properties such as phase stability, it minimizes the need for first-principles calculations on unpromising compositions. Through this framework, we successfully identified new ferroelectric candidates with switching characteristics similar to AlScN in previously inaccessible chemical domains. This study provides an essential methodology for the design of multinary ferroelectrics.

#### [전산6-5 | 10:10]

Context-Preserving Device-Level Extraction and Consistency Analysis in ReRAM Literature: Hyeongbin Park, Hyeon Kim, Youngjun Park, Junhyeong Gu, Donghwa Lee\*(POSTECH)

**Keywords:** ReRAM, Memristor, NLP, Materials informatics, Bibliography, LLM, IE, Data-driven material science, Table extraction

Device performance metrics in resistive switching memories (ReRAM) depend strongly on measurement conditions such as compliance current, device architecture, and test protocol. However, comparison tables in the literature often report numerical values without preserving this contextual information, leading to systematic ambiguity when integrating data for benchmarking or data-driven modeling. Unlike intrinsic material properties, device metrics are inseparable from experimental configurations. We develop a staged extraction framework, assisted by schema-constrained large language models, to construct device-level records while preserving measurement conditions and metric definitions. Using this framework, we perform cross-reference consistency analysis by resolving reference numbers in comparison tables to DOIs. We identify duplicate reports of identical devices across publications and observe conflicting values for the same (device, DOI) pairs. These discrepancies arise from ambiguous metric definitions (e.g., differing interpretations of “set voltage”) and variations in measurement conditions, particularly compliance current and target application regimes. Our findings indicate that numerical device metrics without contextual metadata are not directly comparable, posing risks for data-driven materials analysis and benchmarking. We formalize a data curation principle in which value, condition, and definition must be preserved as an inseparable unit. Based on this principle, we construct a context-aware ReRAM database that supports traceable, condition-specific comparison of device metrics.

#### [전산7-1 | 10:35]

Multiflake Phase Field Modeling of 2D Materials: HASSAAN, Yongwoo Kwon\*(Hongik Univ.)

**Keywords:** 2D materials, CVD, phase field

While many simulations of 2D material synthesis focus on single grains, they often neglect polycrystalline dynamics. We present a phase-field finite difference framework that incorporates multi-grain interactions and grain boundary evolution. Our approach couples equations for the phase-field, precursor concentration, and crystallographic orientation to simultaneously model phase transformation and grain orientation across a polycrystalline structure. The model captures the complex interplay between precursor redistribution and grain boundary evolution, successfully demonstrating dendrite formation, grain boundary migration, and overall microstructure development. It reveals how precursor concentration influences both interface morphology and grain boundary mobility. This framework provides critical insights for controlling microstructural development and optimizing synthesis conditions for 2D materials.

#### [전산7-2 | 10:50]

Unified Phase-Field Modelling of Mixed Ferroic Phases in Polycrystalline Hafnia Thin Films: P PANKAJ, SANDEEP SUGATHAN(Kookmin Univ.), Si Joon Kim(Kangwon National Univ.), Pil-Ryung Cha\*(Kookmin Univ.)

**Keywords:** Phase-field modelling, Hafnia thin films, Mixed ferroic phases, AFE-FE switching

Hafnia-based thin films exhibit complex ferroic behavior arising from the coexistence of ferroelectric (FE), antiferroelectric (AFE), and dielectric (DE) phases, where microstructure and phase distribution strongly influence switching characteristics. In this work, we present a grain-resolved three-dimensional phase-field framework capable of simultaneously capturing FE, AFE, and DE switching in realistic polycrystalline HfO<sub>2</sub>-based thin films. The model explicitly incorporates crystallographic grain topology, orientation heterogeneity, and coupled evolution of macroscopic and staggered polarization order parameters, enabling direct representation of antipolar kinetics under experimentally calibrated electric-field loading. Simulations reveal that while phase fractions primarily determine hysteresis character, vertical phase arrangement provides an additional degree of control over switching behavior. Introducing AFE-rich layers within FE-dominant films systematically reduces the effective coercive field without proportionally degrading remanent polarization. Grain-resolved analysis shows that this reduction originates from microstructure-assisted nucleation and accelerated

percolation of reversed domains driven by electrostatic coupling between layers. Symmetric multilayer architectures with interior AFE-rich regions exhibit the strongest coercive-field reduction, whereas asymmetric configurations provide intermediate trade-offs. These findings demonstrate that vertical phase engineering, combined with explicit microstructural resolution, offers a viable route to optimize switching performance in hafnia-based ferroic capacitors. The proposed framework provides a predictive platform for microstructure-informed design of next-generation ferroelectric devices and energy-storage materials.

### [전산7-3 | 11:05]

**상장모델 기반 소자 시뮬레이션으로 해석한 양극성 RRAM 전도성 필라멘트 거동:** 오진우(홍익대학교), 정동명(한국표준과학연구원), 권용우\*(홍익대학교)

**Keywords:** 전도성 필라멘트, 칸-힐리어드 방정식, 상장모델

저항메모리 연구에서 가장 도전적인 부분은 전도성 필라멘트의 거동을 해석하는 것이다. 특히 원자가 변화 메커니즘(Valence Change Mechanism, VCM) 저항 메모리의 경우 산소 공공(oxygen vacancy)을 기반으로 전도성 필라멘트를 구성하기 때문에 필라멘트 동작의 관측에 있어 어려움이 존재한다. 따라서 저항 메모리의 전기적 특성뿐만 아니라 전도성 필라멘트의 거동까지도 계산할 수 있는 시뮬레이션 모델의 개발이 필요하다. 선행 연구에서는 이러한 VCM 저항 메모리 내 스위칭 소재를 좁은 구역으로 제한함으로써, 소자의 변동성(Variability)이 감소하는 것을 실험적으로 확인하였다. 본 연구는 서로 다른 소자 아키텍처들에 대해 forming, reset, set 전체 사이클을 시뮬레이션하여 실험 데이터와 비교해 분석한다. 상장 모델 방정식인 칸-힐리어드(Cahn-Hilliard) 방정식과 전기-열 방정식을 유한요소 해석 소프트웨어를 활용하여 완전 연계 수치 해석을 진행하였다. 이를 통해 VCM 저항 메모리 모델에서의 전도성 필라멘트의 거동을 분석하였으며, 하부 전극에서 강하게 발생하는 edge effect가 I-V curve의 산포 증가에 큰 영향을 미치는 현상을 관측하였다. 또한 cycle이 반복될수록 필라멘트가 중앙으로 정렬됨에 따라 set voltage가 큰 폭으로 감소하는 것을 확인하였다.

### [전산7-4 | 11:20]

**Thermo-Fluid Simulation-Based Sensitivity Analysis of Thermophysical Properties Affecting Keyhole Depth in Metal Additive Manufacturing:** Matae Lee, Byeong-Joo Lee\*(POSTECH)

**Keywords:** Additive Manufacturing, Melt pool simulation, Computational Fluid Dynamics, Keyhole Dynamics

Keyhole formation plays a critical role in determining product quality and defect formation in metal additive manufacturing (AM), whereas the influence of a broad range of alloy thermophysical properties on keyhole behavior remains insufficiently explored. In this study, a quantitative sensitivity analysis of thermophysical properties affecting keyhole depth was performed using thermo-fluid simulations with a high-fidelity multi-physics model. The model was validated against experimental data for Ti-6Al-4V (Ti64), and a systematic sensitivity analysis was conducted to evaluate the influence of thermophysical properties on keyhole depth under both stationary and scanning laser conditions. The results indicate that keyhole depth is predominantly governed by energy-related properties, particularly vaporization temperature, density, absorptivity, and specific heat, whereas momentum-related properties such as surface tension and viscosity have only a minor influence. Application of the quantified sensitivities to SS304L, IN718, and AlSi10Mg further confirms that variations in keyhole behavior across alloys are primarily controlled by core energy-related properties, including density, specific heat, thermal conductivity, and absorptivity. These findings provide quantitative insight into the role of thermophysical properties in governing keyhole dynamics and a valuable foundation for selecting appropriate thermophysical parameters in future alloy and process design.

### [전산7-5 | 11:35]

**AAS 기반 설계 데이터 표준화를 통한 금속 적층제조용 LLM 설계 환각 억제 프레임워크:** 유재원, 오영석, 김현기\*(인하대학교)

**Keywords:** 금속 적층제조, 대규모 언어모델, 설계 환각, AAS, ISO 규격, 설계 자동화

최근 대규모 언어모델(LLM)을 활용한 CAD 모델 자동 생성 및 설계 보조 기술이 빠르게 확산되고 있으나, 금속 적층제조 분야에서는 치수 추정 오류 및 설계 환각(hallucination) 문제로 인해 산업적 활용에 한계가 존재한다. 특히 금속 3D 프린팅 공정에서는 미세한 치수 오차가 조립 불량이나 공정 실패로 직결되기 때문에, 생성형 AI의 비결정적 특성은 실사용에 큰 제약 요인이 된다. 본 연구에서는 ISO 규격 기반 설계 치수 정보를 Asset Administration Shell(AAS) 구조로 표준화하고, 이를 LLM 입력 이전 단계에서 설계 계약(Design Contract) 형태로 고정하는 프레임워크를 제안한다. 제안된 방법은 부품군 선택, ISO 규격 기반 치수 입력, AAS JSON 생성, 규칙 기반 프롬프트 자동 생성의 순차적 흐름을 통해 LLM의 임의 추정을 구조적으로 차단한다. 또한 설계 결과의 재현성을 정량적으로 평가하기 위해 DHR(Dimension Hit Rate), CVR(Constraint Violation Rate) 지표를 정의하고 실험을 통해 제안 방식의 유효성을 검증하였다. 본 연구는 금속 적층제조용 LLM 설계 자동화의 신뢰성을 확보하기 위한 데이터 표준화 기반 접근법을 제시한다.

## 학생분과 심포지엄

Room 3층 삼다B, 4월 29일

### [학문1-1 | 14:00] 초청강연

논문 작성을 위한 생성형 AI 활용 가이드: 전빈(AUR Lab)

Keywords: .

강연에서는 재료공학 분야 연구자를 대상으로 논문 작성에 실질적으로 도움이 되는 생성형 AI 도구들의 특성과 활용 예시를 소개한다. 문헌 및 자료 조사 단계에서의 AI 활용, 연구 내용 구조화와 논문 초안 작성, 문장 개선 및 표현 보완 과정은 물론, 논문에 활용 가능한 이미지 및 도식 제작까지 연구 전반의 흐름을 단계별로 다룬다. 이를 통해 학부 및 대학원생들이 생성형 AI를 연구 보조 도구로 효과적으로 활용함과 동시에, 올바른 사용 기준과 연구 윤리를 함께 이해할 수 있도록 돕고자 한다.

### [학문1-2 | 14:25] 초청강연

거인의 어깨에 올라서서 더 넓은 세상을 바라보라: 성효경\*(국민대학교)

Keywords: 인공지능, 도메인 지식, 재료공학, 설계자

인공지능이 인간의 언어를 이해하고 복잡한 코딩과 데이터 분석을 수행하는 시대가 도래했다. 이러한 특이점 앞에서, 많은 이공계 학생들은 “인공지능이 연구의 많은 부분을 대체한다면, 인간 연구자의 역할은 무엇인가?”라는 근본적인 질문을 마주하고 있다. 본 강연에서는 인공지능 기술의 단순한 사용법을 넘어, 급변하는 연구 환경 속에서 우리가 갖추어야 할 새로운 태도와 연구자로서의 방향성에 대해 논의하고자 한다. 과거의 연구 경쟁력이 이론적 배경을 암기하거나 실험 장비를 다루는 숙련도와 같은 기능적 역량에 의존했다면, 미래의 경쟁력은 인공지능이라는 강력한 도구를 적재적소에 배치하여 해답을 찾아가는 설계 역량으로 이동하고 있다. 이를 위해 필요한 것이 바로 엔지니어링 마인드다. 이는 막연한 문제를 해결 가능한 단위로 쪼개고, 논리적 구조를 설계하여, 인공지능 에이전트에게 명확한 방향을 제시하는 지휘자의 역량이다. 본 강연에서는 재료공학이라는 도메인 지식을 가진 연구자가 엔지니어링 마인드를 장착했을 때 발휘될 수 있는 시너지를 함께 탐색해 볼 예정이다. 이제 막 연구의 길에 들어선 대학생과 대학원생들이 인공지능이라는 거인의 어깨 위에 올라타 더 넓은 시야로 재료 과학의 미래를 조망하는 설계자로 거듭나기를 바란다.

### [학문1-3 | 14:50] 초청강연

연구실 밖에서 만난 공학인으로 성장하는 과정이야기: 정은진\*(포항산업과학연구원)

Keywords: 공학인, 진로, 연구

본 발표에서는 실용화 전문연구기관에서의 경험을 바탕으로, 공학인이 연구와 산업 현장에서의 연결점을 찾아가는 과정에 대해 다룬다. 연구자로서 학문적 성과를 산업 현장에 실제로 적용하기 위한 도전과 성취를 중심으로, 실용화 가능한 연구 결과를 도출하는데 필요한 접근 방법을 소개하고자 한다. 특히, 연구개발 단계에서 산업계와의 소통과 협업을 통해 기술을 실용화하는 과정에서 겪은 어려움과 그 해결 방법을 사례를 들어 공유하고자 한다. 또한, 연구 기관에 취업한 후 적용하기 위한 전략과 팀워크, 조직 내 소통 방법에 대한 경험을 나누며, 면접 과정에서 중요하게 여겨지는 기술적 역량뿐만 아니라 커뮤니케이션 및 협업 능력의 중요성에 대해 강조한다. 이를 통해 연구자가 산업 현장에 원활하게 적응하고, 조직 내에서 효율적으로 소통하며 기여할 수 있는 방법들을 공유할 것이다. 마지막으로, 연구자가 연구 현장에서 겪을 수 있는 다양한 상황을 극복하고, 실용적인 연구 결과를 도출하는 과정에서 중요한 점들을 소개하여, 현업에 진출을 원하는 대학원생들에게 실질적인 조언을 제공하고자 한다.

### [학문2-1 | 15:25] 초청강연

Finding small joys in research life: Se-Ho Kim\*(Korea University)

Keywords: .

Research is a continuous process of trial and error, repetition, and uncertainty. Yet within this process, there are small moments of joy that bring researchers back to the laboratory each day. In this talk, I share personal experiences from my graduate studies, focusing on small achievements and moments of satisfaction that sustained my motivation for research. I discuss the joy of finding new insights from unexpected results, the experience of seeing complex data come together as a coherent picture, and the sense of growth and connection gained through discussions with colleagues. In addition, I introduce examples from previous researchers who found meaning and enjoyment even amid significant challenges.

### [학문2-2 | 15:50] 초청강연

금속·재료 연구에서 스타트업까지: 실험실 기술의 사업화 여정: 이상훈\*(주식회사 렉시온)

Keywords: 스타트업, 창업, 이차전지, 재활용

금속재료 분야의 혁신은 에너지, 반도체, 모빌리티, 바이오 등 다양한 산업과 맞닿아 있다. 본 강연에서는 전공 지식을 기반으로 스타트업을 창업하게 된 배경과 의사결정 과정, 그리고 연구 중심 사고에서 고객 중심 사고로 전환하는 경험을 공유한다. 기술 차별화 전략, 파일럿 양산과 스케일업 이슈, 대기업 및 연구기관과의 협업 구조 등 소재 스타트업이 직면하는 현실적 과제를 다룬다. 이를 통해 학생들에게 연구 커리어와 창업 커리어를 연결하는 새로운 경로를 제시하고자 한다.

## 역학 측정

Room 3층 300, 4월 29일

### [역학1-1 | 09:00]

**17-4PH 스테인리스강의 적층 제조 미세조직에 따른 상별 수소 민감도 및 나노기계적 특성 분석:** 김보균(강원대학교), 김재우(서울대학교), 한성희, 김대현, 강민성, 윤수빈, 장지훈, 서태현, 한준희, 이류경, 신승우(강원대학교), 최인석(서울대학교), 신중호\*(강원대학교)

**Keywords:** 스테인리스

본 연구에서는 선택적 레이저 용융(SLM) 공정으로 제조된 17-4PH 스테인리스강의 미세조직 제어와 그에 따른 수소 취성 거동을 고찰하였다. SLM 공정 특성상 전통 제조 방식 대비 오스테나이트 분율이 25% 이상 높게 형성됨에 착안하여, 레이저 스캔 속도 (300-1400 mm/s) 조절을 통해 오스테나이트의 입도 및 상 분율을 최적화하였다. 그 결과, 항복강도 416-635 MPa, 인장강도 881-958 MPa, 연신율 8.1-22.5% 범위의 기계적 물성을 확보하였다. 수소 취성 저항성을 평가하기 위해 전기화학적 수소 충전과 승온탈리분석(TDS)을 수행하여 수소량을 정량화 하였다. 인장 시험을 통해 전체적인 수소 영향을 파악하였다. 이를 기반으로 나노인덴테이션을 통해 각 상별 수소 민감도를 정밀하게 조사하였다. 이를 바탕으로 스캔 속도에 따른 미세조직 변화가 수소 취성에 미치는 영향을 규명하고, 우수한 강도와 연성, 수소 저항성을 동시에 확보할 수 있는 공정 설계 지침을 제시하고자 한다.

### [역학1-2 | 09:15]

**하이브리드 본딩의 유전체 접합에 대한 DCB 시험법 기반 접합력 평가:** 김동현, 박지윤, 심영주, 김수정(UNIST), 김인주, 이시예, 김성동(서울과학기술대학교), 김주영\*(UNIST)

**Keywords:** 하이브리드 본딩, 유전체 접합, 접합력 평가, DCB 시험

기존 반도체 기술은 성능 향상을 위해 전공정(Front-end process)에서 소자 선폴을 축소함으로써 트랜지스터 집적도를 증가시켜 왔다. 그러나 소자 미세화가 진행됨에 따라 누설전류 증가와 같은 물리적 한계가 나타났으며, 공정 복잡도 및 개발 비용 또한 급격히 상승하였다. 이러한 한계를 극복하기 위해 최근에는 후공정(Back-end process)인 패키징 기술을 중심으로 다수의 칩을 효과적으로 통합하여 시스템 성능을 향상시키는 접근법이 주목받고 있다. 특히 칩 간 연결 효율을 높이기 위해 수직 적층 구조를 적용하여 시스템 부피를 줄이고, 전기적 손실과 발열을 최소화할 수 있도록 인터커넥트 길이를 단축하는 기술이 요구되고 있다. 현재 이를 구현하기 위한 기술로 구리와 구리를 직접 접합하는 하이브리드 본딩 기술이 주목받고 있다. 하이브리드 본딩은 구리 접합부를 보호하기 위해 유전체 접합과 구리 접합이 동시에 일어난다는 것이 특징이며, 이 과정에서 유전체 접합이 구리 접합보다 먼저 발생하게 된다. 따라서 유전체 접합의 품질은 최종적인 구리 접합 특성에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이에 따라 본 연구에서는 파괴 mode I을 이용한 DCB(Double cantilever beam) 시험법을 적용하여 접합에너지를 계산함으로써 유전체 접합에 대한 접합력을 정량적으로 평가하고자 한다. DCB시험은 SiO<sub>2</sub> 접합 시편을 대상으로 인장 하중을 가하여 크랙 진전을 유도한 후 인장과 압축을 반복하며 생성되는 포인트를 통해 접합에너지를 계산한다. 이때 시험 장비의 탄성 변형에 따른 영향을 배제하기 위해 machine compliance를 수행하였으며, 보정 전, 후 결과 비교를 통해 계면 접합력 평가의 정확도를 향상시키고자 하였다.

### [역학1-3 | 09:30]

**Breaking the upper limit of fatigue strength via atomic-scale planar-defect engineering in columnar-grained thin films:** JungHun Park, Yuhyun Park, Sunkun Choi, Sunkyung Lee, Gi-Dong Sim\*(KAIST)

**Keywords:** Fatigue damage mechanism, Fatigue strength, Nanotwins, Stacking faults, Thin films

Fatigue failure remains one of the most pervasive yet intractable challenges in structural materials. Unlike monotonic deformation, where failure is mainly driven by the global plasticity, cyclic damage is dominated by highly localized stress concentrations. Even microstructural heterogeneities or surface asperities that barely affect the tensile response can serve as undesirable crack initiation sites under repeated cyclic loading. This sensitivity to inhomogeneous deformation makes metal fatigue a critical bottleneck for reliable engineering systems across scales ranging from bulk components to micro-scale metallic interconnects. As a result, microstructures optimized for high monotonic strength do not necessarily translate into commensurate fatigue strength enhancement. Barriers that effectively impede dislocation motion – grain boundaries (GBs), precipitates, and other interfaces – may simultaneously promote strain incompatibility and localization under cyclic loading. Therefore, for many classes of alloys, fatigue strength often exhibits a plateau, or even a declining trend beyond a certain tensile strength. To overcome this dilemma in designing fatigue-resistant metals, several studies have delved into nanostructured metals that suppress slip localization. Nanocrystalline (nc) metals, for instance, can forestall persistent slip band (PSB) formation and enhance the crack initiation life. However, their practical implementation is often constrained by poor microstructural stability, as grain coarsening may occur thermally or mechanically via fatigue-assisted grain growth. Here, we conduct a systematic study of columnar-grained Ni–Mo–W thin films spanning dilute and concentrated alloying regimes, designed to tune the stacking fault energy (SFE) and hence introduce densely packed twin boundaries and stacking faults as more stable alternatives to conventional high-angle grain boundaries. The dilute alloys predominantly comprise nanoscale coherent twin boundaries, whereas the concentrated alloys exhibit atomic-scale stacking faults as the primary planar defect. By directly comparing their monotonic and fatigue strengths under identical geometry and cyclic loading conditions, we aim to isolate the origin of extraordinary fatigue resistance in



stacking-fault-dominant films. Through this comparative framework, the present work establishes planar-defect engineering as a pathway toward simultaneously achieving superb tensile strength and unprecedented fatigue endurance in nanostructured metals, thereby defying the conventional upper limit of fatigue strength.

#### [역학1-4 | 09:45]

**나노결정립 중엔트로피 합금의 역학특성 및 수소 영향에 대한 FCC와 BCC 구조 비교 연구 :** 최재혁, 이시연, Zhe Gao(한양대학교), 서진유(한국과학기술연구원), 장재일\*(한양대학교)

**Keywords:** medium-entropy alloy, high pressure torsion, nanoindentation, hydrogen

본 연구에서는 면심입방구조(FCC)와 체심입방구조(BCC)를 가지는 CoCrNi 및 NbTiZr 중엔트로피 합금에 대하여 고압비틀림(high pressure torsion, HPT) 공정을 수행하였고, 투과전자현미경 분석을 통해 HPT 공정에 따라 결정립이 수십 나노미터까지 미세화될 수 있음을 관찰하였다. 이와 같은 나노결정립(nanocrystalline, NC)은 가장 큰 변형률이 인가되는 HPT 디스크 가장자리에서만 형성되는 만큼, 나노압입시험을 수행하여 경도, 변형률속도민감도 및 활성화 부피를 구하였고, FCC와 BCC의 결과를 비교 분석하였다. 또한, 열탈착 분석과 나노압입시험을 수행하여 수소가 FCC와 BCC 중엔트로피 합금의 기계적 물성에 미치는 영향을 정량적으로 비교 평가하였다.

#### [역학2-1 | 10:10]

**전이학습 기반 인공신경망을 이용한 압입시험 물성 예측 신뢰성 향상:** 박시현, 박준태, 김광희, 최재영, 김종형\*(국립부경대학교)

**Keywords:** 압입시험, 인장물성, 머신러닝, 전이학습, 금속

재료의 기계적 특성 평가는 전통적으로 인장시험과 같은 파괴적 방법에 의존해 왔으나, 국부 물성 평가의 한계와 시편 손상이 불가피하다는 문제가 있다. 이를 보완하기 위해 압입시험이 도입되었고, 최근에는 인공신경망(ANN)을 활용하여 압입 데이터를 기반으로 인장물성을 예측하려는 시도가 활발하다. 그러나 이러한 모델은 학습에 사용된 특정 압입자 형상이나 시험기에 과적합되는 경향이 있어, 실제 실험에서 압입자 형상이나 물성에 작은 차이가 발생하면 예측 정확도가 크게 저하된다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 전이학습(transfer learning)을 도입하였다. 우선 구형 압입 데이터를 기반으로 범용 ANN “mother model”을 구축한 뒤, 실제 비이상적 형상이나 다른 물성 조건에서 얻은 소량의 압입 데이터를 추가 학습하여 장비·압입자 조건에 최적화된 모델을 구현하였다. 유한요소해석(FEA)으로 다양한 조건에서 압입 곡선을 생성해 검증한 결과, 탄성계수, 항복강도, 가공경화지수 등 주요 물성 예측에서 평균 절대백분율오차(MAPE)가 기존 ANN 대비 현저히 감소하였다. 이 연구는 압입자의 형상 불확실성과 같은 실험적 변동성 속에서도 신뢰성 있는 물성 평가를 가능하게 하며, 실제 압입-인장 실험 데이터 기반 검증을 통해 연구의 타당성을 확보하였다.

#### [역학2-2 | 10:25]

**미세침습 자가전개형 기관 구조 기반의 고집적 설계:** 조지현, 김수민(UNIST), 황경석(Harvard University), 배재영, 강승균(서울대학교), 김주영\*(UNIST)

**Keywords:** 미세침습, 자가전개, 생체분해성, 형상기억고분자, BMI

최근 뇌와 외부 장치가 직접적으로 상호작용하는 뇌-컴퓨터 인터페이스(Brain-Machine Interface, BMI)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 높은 시간적·공간적 해상도를 확보하기 위해서는 뇌 신경에서 발생하는 신호를 직접 측정하는 침습형 BMI가 요구되며, 이를 위해 소자의 생체적합성, 뇌 표면과의 등각 접촉성, 그리고 미세침습적 전달 방식이 핵심적인 설계 요소로 작용한다. 체내 삽입 이후 소자가 체액에 의해 분해되는 거동을 보일 경우, 장기간 안정적인 BMI 운용과 함께 추가적인 제거 수술의 필요성을 구조적으로 배제할 수 있다. 본 연구에서는 미세침습 삽입 후 자가전개를 통해 대면적·고밀도 신경 신호 측정이 가능하도록 기관 구조를 설계하였다. 소자는 좁은 직경의 주사기에 패키징된 상태로 삽입된 후, 뇌와 두개골 사이의 제한된 공간에서도 안정적으로 전개될 수 있도록 체온에 의해 형상 회복이 가능한 생분해성 형상기억고분자를 구조 재료로 적용하였다. 자가전개 거동의 신뢰성을 확보하기 위해 패키징 과정을 단계적으로 제어하였으며, 특히 전개 과정에서 발생할 수 있는 국부 변형을 최소화하기 위해 최외곽 기관 구조를 집중적으로 최적화하였다. 기관의 전개 거동 및 응력 분포는 3차원 유한요소해석을 통해 정량적으로 분석되었으며, 이를 바탕으로 대면적 기관의 내부 영역까지 기관을 채우더라도 좁은 갭 환경에서 안정적인 자가전개가 가능한 구조 설계 전략을 도출하였다. 본 연구는 자가전개형 생분해성 전자소자의 기관 구조 및 패키징 설계를 통해 미세침습·대면적·고밀도 BMI 구현을 가능하게 하는 기계적 설계 지침을 제시한다.

#### [역학2-3 | 10:40]

**새로운 인장 시험편을 이용한 전기화학적 장입 수소의 영향 평가:** 이시연, Zhe Gao, 최재혁(한양대학교), 김형섭(포항공과대학교), 장재일\*(한양대학교)

**Keywords:** medium-entropy alloy, hydrogen, tensile property

본 연구에서는 수소의 확산 속도가 상이한 면심입방(FCC) 및 체심입방(BCC) 구조 합금을 대상으로, 전기화학적 수소 장입 후 일축 인장 거동을 체계적으로 평가하였다. 일반적으로 FCC 구조 합금에서는 낮은 수소 확산 계수로 인해 전기화학적으로 장입된 수소가 표면 근처에 국한되는 경향이 있으며, 이로 인해 일축 인장 시험 결과에서 수소 효과가 과소평가될 가능성이 보고된 바 있다. 이를 극복하고자, 선행 연구에서는 일축 인장 조건을 만족하면서도 수소의 영향을 더 잘 나타낼 수 있는 새로운 형상의 인장 시험편을 설계·제작하였고, 이를 통해 수소 영향 평가가 보다 명확하게 이루어질 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 이러한 시험편 설계 개념을 BCC 합금에도 적용하여, FCC 합금의 경우와의 인장 거동 차이를 비교·분석하였다.

**[역학2-4 | 10:55]**

**BCP 나노 패턴과 DIC-FIB 기법을 이용한 국부 잔류 응력 측정:** 장서현(국립부경대학교), 강은빈(울산과학기술원), 강승균(서울대학교), 박운익, 김종형\*(국립부경대학교)

**Keywords:** block-copolymer, self assembly, micropatterning, DIC, residual stress, FIB

반도체 소자의 집적도가 증가함에 따라 3D IC 및 고대역폭 메모리(HBM)와 같은 복잡한 구조와 다중 계면을 갖는 첨단 패키징 기술이 도입되고 있다. 이러한 구조에서는 증착 공정, 재료 간 격자 불일치 및 열팽창 계수(CTE) 차이로 인해 잔류 응력이 발생하게 된다. 이 응력은 균열(Crack)이나 계면 박리(Delamination)와 같은 기계적 결함을 유발하여 소자의 신뢰성을 저하시킨다. 따라서 다층 재료와 복잡한 기하학적 구조가 공존하는 패키징 환경에서 국부적인 잔류 응력 분포를 정밀하게 평가하는 것은 소자의 구조적 무결성과 안정적인 동작을 확보하기 위해 필수적이다. 웨이퍼 곡률 측정, X선 회절(XRD), 라만 분광법 등 기존의 잔류 응력 측정 기법은 주로 시편 전체의 평균 응력 상태를 파악하는 데 적합하며, 미세 영역에 대한 공간 분해능이 제한적이라는 단점을 가진다. 따라서, 패턴화된 3D 구조나 초박막 소자에 대해서는 국부 응력 분석 적용이 어렵다. 본 연구에서는 디지털 이미지 상관법(DIC)과 집속 이온빔(FIB)을 결합하여 나노미터 수준의 분해능으로 국부 막막 응력을 측정하는 기술을 제안한다. 고정밀 DIC 분석을 위해 블록 공중합체(BCP, Block Copolymer)의 자기조립 특성을 활용하여 20~30 nm 수준의 미세 나노 패턴을 형성하였다. 형성된 BCP 기반 나노 패턴은 스핀 코팅, 열처리 및 이온 식각(RIE) 공정만으로 제작 가능하다. 이는 고가의 E-beam lithography에 비해 공정 비용이 저렴하다는 장점이 있다. 이후 FIB로 틸(Slit)을 형성하고, 절단으로 인해 발생하는 응력 완화 변형을 DIC로 분석하였다. 선형 탄성 해석을 통해 해당 영역의 국부 잔류 응력을 정량적으로 평가하였다. 본 발표에서는 BCP 나노 패턴 형성 원리 및 실험 절차를 소개하고, DIC-FIB 기법을 이용한 실제 잔류 응력 평가 결과를 제시한다. 이 방식은 소자의 구조적 무결성 검증과 신뢰성 평가를 위한 실질적인 분석 방법으로 활용될 것으로 기대된다.

**[역학3-1 | 11:20]**

**Fe-Si 합금 최종 열처리 분위기에 따른 표면 미세구조 형성 메커니즘 규명:** 진지현, 이소현(UNIST), 유성현, 안용근, 강춘구(현대제철), 김주영\*(UNIST)

**Keywords:** Fe-Si 합금, 철손, 최종 열처리, 대기 분위기, 표면 미세구조

Fe-Si계 합금의 철손을 저감하는 것은 고성능 전기 모터의 효율 향상을 위해 매우 중요하다. 철손은 재료의 미세구조에 크게 의존하는데, 결정학적 집합조직과 결정립 크기와 같은 벌크 미세구조 인자들이 철손에 중요한 영향을 미친다는 점은 잘 알려져 있다. 반면, 최종 열처리 과정에서 형성되는 표면 미세구조의 역할은 상대적으로 충분한 주목을 받지 못해왔다. 특히 최종 열처리 시의 대기 분위기는 표면과 직접적인 화학 반응을 유도하여 표면 미세구조 형성에 결정적인 영향을 미치며, 불균일한 표면 미세구조는 자구 이동을 방해하여 자화 과정에서 철손을 증가시킬 수 있다. 따라서 전기 모터의 성능 향상을 위해서는 철손을 저감할 수 있는 표면 미세구조의 구현이 필수적이며, 이에 중요한 영향을 미치는 최종 열처리 대기 분위기와 표면 미세구조 형성 간의 상관관계를 규명할 필요가 있다. 본 연구에서는 수소와 질소의 혼합 비율을 조절하여 열처리 대기 분위기에 따른 표면 미세구조의 변화를 관찰하고, 그 형성 메커니즘을 분석하였다. 60 × 60 mm 정사각형 시편을 이용한 Single Sheet Test를 통해 철손을 정량적으로 평가하였으며, SEM, TEM, EBSD, XPS 분석을 통해 표면 미세구조의 형상과 화학적 특성을 조사하였다. 이러한 결과를 바탕으로, 열처리 분위기와 표면 미세구조 간의 직접적인 연관성을 입증하고, 철손 저감을 위한 효과적인 공정 제어 전략으로서 열처리 분위기 제어의 가능성을 제시한다.

**[역학3-2 | 11:35]**

**전자빔 용접된 XM-19 재질의 용접 조직에 따른 양성자 조사 효과:** 김대현, 한성희, 김보규, 한준희, 강민성(강원대학교), 진형하(한국원자력연구원), 신중호\*(강원대학교)

**Keywords:** XM-19 Stainless Steel, Electron Beam Welding, Proton Irradiation, Irradiation Hardening, Nanoindentation

XM-19 Stainless steel은 높은 항복강도와 우수한 고온 내식성을 보유하고 있을 뿐만 아니라, 중성자 조사 후에도 높은 연성 유지력과 우수한 방사선 저항성을 나타내어 소형모듈원자로(SMR) 구조물 적용에 매우 적합하다. 이러한 고합금강의 접합을 위해 적용된 전자빔용접(EBW, Electron Beam Welding)은 입열량을 최소화하여 열영향부(HAZ, Heat Affected Zone)의 폭을 획기적으로 줄이고 용접부의 구조적 건전성을 확보하는데 유리하다. 본 연구는 SMR의 구조용 소재인 XM-19 스테인리스강을 대상으로, 전자빔 용접(EBW) 공정에 의한 용접조직에 중성자 조사 환경을 모사하기 위해 2 MeV, H<sup>+</sup>(360°C)을 가속 실험으로 사용하여 EBW XM-19의 용접 영역별 상대 경화 민감도를 평가하였다. 본 결과는 얇은 손상층(~15 μm)에서의 정량 비교이며, 중성자조사 효과를 모사함에 목적이 있다. SRIM(Stopping and Range of Ions in Matter) 전산모사와 ECCI(Electron Channeling Contrast Imaging) 분석을 통해 표면으로부터 약 20 μm 깊이까지의 결함층 형성을 실험적으로 검증하였습니다. 양성자 조사 방향(ND)으로 마이크로 비커스 경도 측정 결과 각 조직별 유의미한 경화가 관찰되었으며, 모재부(BM)가 25.2%로 가장 높은 경도 상승률을 보인 반면, 조대립 열영향부(CG-HAZ)는 14.6%로 가장 낮은 경도 상승률이 나타났다. 측면 방향(TD) Nanoindentation을 통해 깊이별 Hardness 측정 결과, 깊이 의존적 경화 거동은 end-of-range(EOR) 근방에서 정점을 보였으며, 이는 SRIM/ECCI로 검증된 깊이 특성과 일관되었다. 0 DPA 대비 1 DPA일 때 모재부(BM)가 27.7%로 가장 높은 경도 상승률을 보였으며, 조대립 열영향부(CG-HAZ)는 8.0%로 가장 낮은 경도 상승률이 나타났다. 미세립 열영향부(FG-HAZ)는 17.6% 경도 상승률이 나타났는데, 모재부(BM)와 유사한 결정립 크기(각각 51 μm, 58 μm)를 가짐에도 불구하고 조사 경화 민감도에서 차이가 나타났다. FG-HAZ의 경화 민감도 차이는 전위구조의 차이와 일관됨을 시사한다. 위 연구를 통해 Nanoindentation 프로파일링이 양성자 조사에 의한 경화 민감도를 정밀하게 비교, 분석하는데 매우 효과적임을 입증하고자 하였으며, 향후 SMR 구조재의 장기 건전성 평가를 위한 중요한 실험 결과를 제공한다.

**[역학3-3 | 11:50]**

**압입시험 기반 ANN 모델을 통한 박막 기계적 물성 평가:** 조현욱, 박태현, 석일현(국립부경대학교), 황경석(하버드대학교), 이우진, 강승균(서울대학교), 김종형\*(국립부경대학교)

**Keywords:** 박막, 나노압입시험, 탄성계수, 기판효과, 인공신경망, 유한요소해석

반도체 산업의 급속한 발전으로 소자 제조 공정은 마이크로미터에서 나노미터 수준으로 전환되고 있다. 고집적화된 반도체 소자는 복잡한 구조와 이질적 소재 구성으로 인해 위치별 잔류응력이 발생하며, 이는 소자의 변형 및 파괴와 같은 역학적 거동에 직접적인 영향을 주어 신뢰성에 중대한 영향을 미친다. 특히 박막-기판 시스템에서 발생하는 잔류응력은 wafer warpage를 유발하여 기능적 특성 및 후공정 수율을 저하시키며, 이러한 위치별 거동 분석에는 유한요소해석(FEA)이 널리 활용된다. 그러나 정확한 FEA 예측을 위해서는 각 소재, 특히 초박막의 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 계장화 압입시험이 간편성으로 대안적 방법으로 자리 잡았으며, 박막의 탄성계수와 경도와 같은 국부적 기계적 특성 평가에 널리 활용된다. 나노 압입시험으로 탄성계수와 경도를 평가할 때 통상적으로 박막 두께의 10% 수준 압입 깊이를 권장하나, 박막 두께가 극도로 얇아짐에 따라 얇은 압입에서는 장비의 noise floor 등으로 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. 제안된 모델은 기존에 권장되던 박막 두께의 10% 이하 압입 조건을 넘어, 박막 두께 대비 25-50% 수준의 상대적으로 깊은 압입에서도 기판의 탄성계수가 주어질 경우 박막 고유 물성을 효과적으로 추정할 수 있도록 설계되었다. 해당 모델은 다양한 기계적 대비를 갖는 여러 박막-기판 조합에 대해 실험적으로 검증되어 그 적용 가능성을 확인하였다. 또한 ANN 기반 접근법의 특성상 학습 데이터 구성에 따라 적용 범위를 유연하게 확장할 수 있으며, 전이학습을 통해 다른 압입자 형상에도 손쉽게 확장 적용이 가능하다는 장점을 갖는다. 이러한 점에서 본 연구는 초박막 기계적 물성 평가를 위한 범용적 기판 효과 보정 프레임워크를 제시한다.

## 가공-표면처리

Room 3층 300, 4월 29일

### [표면처리 1-1 | 14:00]

**착화제 종류에 따른 니켈 치환 도금을 이용한 알루미늄 분말 발열특성 향상 연구:** 안서영, 손인준\*(경북대학교)

**Keywords:** Aluminium powder, Complexing agent, Nickel displacement plating

알루미늄 분말은 연소 시 높은 발열량을 보이는 대표적인 에너지원 물질이다. 그러나 자연상태에서 생성되어 있는 알루미늄 산화막으로 인해 발열 성능이 제한된다. 본 연구에서는 알루미늄과 니켈의 전위차를 활용하여 니켈 치환 도금을 적용함으로써 알루미늄 분말의 발열 특성을 향상시켰다. 3 wt% 불산(HF) 수용액으로 산화막을 제거한 후, 평균 입자 크기 7  $\mu\text{m}$ 의 알루미늄 분말에 니켈 치환 도금을 수행하였다. 도금 거동을 제어하기 위해 구연산, 구연산 암모늄, 말릭산을 착화제로 사용하였다. Air 분위기에서 TGA-DSC (Thermogravimetric Analysis Differential Scanning Calorimetry, STA 9) 분석 결과, 구연산 암모늄을 착화제로 니켈 도금을 한 시편이 순수 알루미늄 분말 대비 총 열 방출량이 138.7% 증가하고 발열 시작 온도가 낮아진 것으로 나타났다. 이러한 발열 증가는 산화 과정에서 알루미늄-니켈 금속간 화합물 형성과 관련된 자가 전파 고온 합성(SHS) 반응에 기인한다. 또한, FE-SEM/EDS (Field emission scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy, and atomic absorption spectroscopy, JEOL) 을 통해 착화제 종류에 따른 니켈 도금층 형성을 확인하였다.

### [표면처리 1-2 | 14:15]

**Development of Zn-Ni Hot-Dip Coatings with Enhanced High-Temperature Stability for Hot-Stamping:** Wang EunChan(Korea Institute of Industrial Technology, Chonnam Univ.), Yun-Il Choi\*(Korea Institute of Industrial Technology), Chan-Jin Park(Chonnam Univ.)

**Keywords:** hot press forming (HPF), Zn-Ni hot-dip coating, high-temperature stability, corrosion resistance

Hot press forming (HPF) steels are subjected to austenitizing heat treatment at 900 °C for 5-8 min, followed by die quenching to achieve an ultra-high-strength martensitic microstructure. However, surface decarburization and oxidation occur during austenitization. To mitigate these problems, protective coating processes have been applied to HPF steels. In conventional Zn coating, liquid Zn penetrates the steel substrate during HPF, resulting in liquid metal embrittlement (LME). In this study, Zn-Ni hot-dip coatings with enhanced high-temperature stability were applied to investigate microstructural evolution, corrosion performance before and after austenitization and high-temperature tensile testing. The as-coated layer consisted of  $\delta$ -NiZn<sub>9</sub> and  $\zeta$ -FeZn<sub>13</sub> intermetallic compounds formed in the coating layer. During austenitization, Fe diffused into coating layer to form the  $\alpha$ -Fe(Zn) phase, while Ni was incorporated into  $\gamma$ -FeZn phase in solid solution, contributing to enhanced high-temperature stability. The stabilization of the  $\gamma$ -phase by Ni suppressed extensive liquid Zn formation and appeared to delay the alloying reaction associated with  $\alpha$ -Fe(Zn) formation at elevated temperatures. As a result, no cracks extending to the steel substrate associated with LME were observed during high-temperature tensile testing. Electrochemical tests using potentiodynamic polarization and zero resistance ammeter (ZRA) were conducted to evaluate the sacrificial protection behavior. The presence of the  $\gamma$ -FeZn phase in the coating layer resulted in a potential difference of 0.25-0.35 V relative to the steel substrate. ZRA measurements showed sustained galvanic currents of 4.8-5.2  $\mu\text{A}$  for over 100 h, suggesting stable sacrificial protection behavior.

### [표면처리 1-3 | 14:30]

**다중물리모델을 활용한 금속 표면 건식 정전스프레이 공정 디지털화(DX):** 서승원, 양현진\*(인하대학교)

**Keywords:** 도막두께 분포, Discrete Phase Model(DPM), 자기유체역학(MHD), 가상 테스트베드

건식 정전스프레이 공정에서의 도막 형성 거동은 분체 입자의 유동 특성, 전기장 분포 및 표면 부착 메커니즘이 상호 연계되어 결정되며, 공정 조건과 장치 형상에 따라 다양한 양상을 보인다. 이러한 공정 특성을 체계적으로 이해하고 예측하기 위해서는 공기 유동, 입자 거동 및 전기장을 통합적으로 고려한 다중물리(Multiphysics) 기반 해석 접근이 요구된다. 본 연구에서는 건식 정전스프레이 공정을 대상으로, 실제 운전 조건을 반영한 다중물리 기반 시뮬레이션 환경을 구축하여 공기 유동, 분체 입자 거동, 전기장 및 도막 형성 과정을 가상 환경에서 구현하였다. 전기장 모사를 위해 자기유체역학(Magneto-hydrodynamics, MHD) 기반 접근을 적용하였으며, 분체 입자 거동은 DPM(Discrete Phase Model) 기반 라그랑지안 해석을 통해 개별 입자의 이동 및 표면 부착 특성을 모사하였다. 개발된 모델은 실공정 데이터를 기반으로 정합성을 확보하였고, 이를 통해 전기장 세기, 분사 유량 및 분사 시간 변화에 따른 금속 표면의 도막 두께 분포 특성을 예측하였다. 본 연구는 건식 정전스프레이 공정을 디지털화 함으로써 디지털 기반 공정 설계 및 최적화에 기여할 뿐 아니라, 향후 퍼지컬 AI 학습을 위한 가상 테스트베드로의 활용 가능성을 제시한다.

### [표면처리 1-4 | 14:45]

**마이크로-나노 다공성 산화층 기반의 C2680 합금과 폴리프로필렌의 이중 접합 기술 개발:** 양수미(한국재료연구원, 부산대학교), 박상민(부산대학교), 한병준, 김정환\*(한밭대학교), 신다슬\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 금속-폴리머 이중 접합, Anchoring effect, Covalent bonding, C2680, Polypropylene

친환경 차량의 확대와 함께 MR 댐퍼의 신뢰성과 내구성 요구 수준이 높아지고 있으나, 전력공급 커넥터 내부의 금속 단자와 폴

리머 사이의 계면에서 발생하는 기밀 불량은 여전히 상용화의 주요 한계로 남아 있다. 특히 금속과 폴리머 간의 물성 차이로 인해 기밀 유지 문제가 발생하며, 이는 부품의 상용화 및 내구 성능 확보에 병목 기술로 작용하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 황동(brass, C2680)과 30% 유리 섬유를 함유한 폴리프로필렌(PP-GF30)을 기계적·화학적으로 접합하는 연구를 진행하였다. 접합 전 황동 기판에 산 및 알칼리 전처리를 수행하여 표면 불순물을 제거한 후, 에칭을 통해 마이크로 기공 및 polygonal 구조를 확보하였다. 화학 산화 과정을 거쳐 1차 산화막을 형성하였으며, 이후 KOH 전해질 내에서 전압 조건을 달리하여 양극 산화를 수행하였고, 그 결과 마이크로-나노 다공성 구조 및 2차 산화막을 형성하였다. 최종적으로 트리아진 유도체 기반 전해 코팅을 적용하여 황동과 폴리프로필렌 사이의 공유결합을 유도함으로써 접합하였다. 각 표면 처리 단계 및 양극산화 전압 조건에 따른 황동 표면 특성을 분석하였다. 각 단계별 황동의 미세조직 변화 및 마이크로-나노 다공성 구조의 형성에 대하여 주사전자현미경(SEM)과 원자현미경(AFM)을 이용해 비교 분석하였다. 마이크로 기공 내부에 약 100 nm의 나노 기공이 형성되어 폴리머의 침투를 촉진하고, 기계적으로 결합하여 앵커링 효과(anchoring effect)에 의해 접합 강도를 높였다. 또한 X-선 광전자 분광법(XPS), 접촉각 분석을 통해 표면의 화학적 상태를 확인하였다. 양극 산화 후 표면에  $\text{CuO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ 의 산화층이 형성되었으며, 이는 트리아진 코팅층 및 폴리프로필렌과 화학 결합을 촉진하였다. 폴리프로필렌 과단면에서 Cu 피크가 검출된 것은 계면에서 화학적 결합이 형성된 후 과과가 발생했음을 시사한다. 그 결과, 황동-폴리프로필렌 계면에서 기계적 결합과 화학적 결합이 동시에 작용하여 최대 29.38 MPa의 접합 강도를 달성하였다.

[표면처리 1-5 | 15:00] Canceled

[표면처리 1-6 | 15:15]

레이저 표면처리를 이용한 탄소코팅 타이타늄 연료전지 분리판의 표면특성 개선: 김성욱\*, 장경현, 천창근(RIST), 이동준(디에스피), 김대성(테라릭스)

Keywords: 레이저, 탄소코팅, 타이타늄, 연료전지 분리판

연료전지(PEM방식)는 컴팩트한 특성으로 전력이 필요한 분야 특히, 육상 및 항공 등 모빌리티 분야에 많이 활용되고 있다. PEM 연료전지 스택은 분리판, MEA, GDL 등으로 구성되며, 이 중 분리판은 금속판재가 적용되고 있다. 스테인레스강 판재는 가장 많이 사용되고 있는 소재로, 내식성과 전도성을 확보하기 위해 표면에 금코팅을 적용한다. 타이타늄 판재는 기존 스테인레스강의 내식성과 경량성을 향상시키기 위해 검토되고 있으며, 탄소코팅을 이용하여 전도성을 부여한다. 탄소판재는 기존 분리판에 많이 사용되고 있으나, 연료전지 사용 중 발생하는 응축수의 배출이 용이하지 않으며, 탄소코팅을 적용하더라도 동일한 현상이 발생한다. 따라서 응축수의 배출 및 냉각성능을 향상시킴으로써 연료전지 효율을 높이려 하는 연구가 진행되었다. 본 연구에서는 타이타늄 박판 위에 탄소 표면코팅을 적용하여 분리판을 제작하고, 연료전지 특성을 평가하였다. 두께 0.08t 타이타늄 판재의 표면에 PVD 공정으로 탄소코팅을 진행하였으며, 공정조건에 따라 30~70 nm 두께의 코팅층이 형성되어 있는 것을 확인하였다. 탄소코팅 후에는 표면의 친수특성이 감소하여 이를 향상시키기 위한 방안으로 레이저 표면처리를 부가하여 적용하였다. 레이저 표면처리 공정변수에 따른 표면 변화를 파악하였으며, 친수성 개선을 평가하였다. 시험 결과, 레이저 표면처리를 통하여 기존 탄소코팅 대비 친수성이 향상되는 결과를 확인하였으며, 레이저 조사시 코팅층의 계면확산을 통한 접합특성도 향상되어 프레스 성형시 박리되지 않는 것을 확인하였다. 이를 기반으로 10 kW급 소형 연료전지 스택을 제조하여 성능평가를 진행한 결과 충분한 효율을 확보할 수 있는 것으로 평가되었다.

[표면처리 2-1 | 15:40]

압력과 온도에 따른 황동의 탈합금 거동: 최문수, 황지인, 최은애(한국재료연구원), 주수현(단국대학교), 한승전\*(한국재료연구원)

Keywords: Porous material, Brass, Dealloying, Low air pressure oxidation

황동이 고온에 노출될 경우, 구리에 비해 아연의 높은 증기압과 빠른 확산 속도로 인해 아연이 선택적으로 빠져나가는 탈아연(de-zincification)이 일어난다. 그런데, 이러한 탈아연현상은 표면에 비표면적이 넓은 프로파일을 만들 수 있다. 이것에 착안하여 저기압 열처리를 통해 자연 탈합금(natural dealloying)을 유도하여 다공성 구리를 제조하고자 하였다. 상용 C26000 (70Cu30Zn) 과 C27000 (65Cu35Zn) 황동을 사용하여 500°C ~ 700°C 그리고 1 atm ~ 1/10, 000 atm 하에서 24 시간 동안 산화시켰다. 각 기압에서 산화된 황동은 표면에 ZnO 산화층이 생성되었으며 압력에 따라 산화물의 형태가 다름을 확인하였다. 대기압에서는 1차원 나노 구조로 성장하였고 저기압에서는 그 후 10M HCl을 이용해 산화물을 제거하였다. 산화물 제거 후 황동 표면에 규칙적인 기공이 생성되었음을 확인하였다. 산화 온도가 높아질수록 기공은 더 작고 균일하게 분포되는 경향을 보였고 저기압에서의 산화는 고립된 미세 기공을 형성하였다. 이는 낮은 기압에서는 산화물 성장이 제한적이기 때문에 아연의 확산에 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다.

[표면처리 2-2 | 15:55]

Defect Analysis of Nickel-Plated Steel via Hyperspectral Imaging: MinGyun Kim(POSTECH), KiSu Kim, SeungHee Roh, DongHwan Roh(DeepAI), HwaSung Yeom\*(POSTECH)

Keywords: Hyperspectral Imaging, Nickel-plated Steel, Surface Defect Detection, Pinhole, Scratch, Data Augmentation, Spectral Signature

Rigorous quality control of nickel-plated steel, a critical material for secondary battery casings, is essential to ensure product durability and operational safety. Currently, industrial standards rely on RGB line-scan cameras and manual visual inspection. However, these conventional methods show limitations in detecting low-contrast micro-defects, such as pinholes or early-stage oxidation, due to

the high specular reflectivity of metallic surfaces. Furthermore, they often suffer from inconsistent reliability caused by the subjectivity of human assessment. To overcome these challenges, this study investigates a novel defect analysis strategy utilizing hyperspectral imaging (HSI) in the visible and near-infrared range (400–1000 nm). We fabricated industrial-grade plated samples containing various defects, including scratches, pinholes, oxidation, and delamination. The HSI analysis was validated against ground truth data from metallurgical characterizations, confirming its reliability alongside established analytical techniques. The results demonstrated that the HSI system, utilizing high-dimensional spectral data, significantly outperformed standard RGB intensity-based methods. It successfully identified sub-pixel defects that remain visually ambiguous in conventional imaging, thereby overcoming the limitations of reflective metal surfaces. Additionally, by integrating a convolutional neural network (CNN), the proposed framework achieved superior classification accuracy and processing speed, offering an objective, quantitative alternative to labor-intensive inspection. In conclusion, this research confirmed that machine learning-enhanced HSI effectively addressed the constraints of existing systems, paving the way for automated and reliable quality assurance in the metallic coating industry.

#### [표면처리2-3 | 16:10]

**자동차 구동 샤프트 스플라인 내구수명 향상을 위한 피닝공법 연구:** 김민규\*(현대자동차), 반원규(서한이노빌리티)

**Keywords:** 드라이브샤프트, 보론강, 레이저 피닝, 초음파 쇼크 피닝, 마이크로 피닝

자동차의 구동 샤프트는 연결되는 상대 부품과 스플라인 구조로 체결되어 구동 토크를 전달한다. 내연기관 차량은 전진 주행 방향의 편진 구동 토크를 인가받아, 차량의 출발 및 정차 시에만 체결부의 부하가 증가한다. 그러나, 전동화 전환은 스플라인 체결부의 부품 가혹도가 증가된다. 전기차의 회생 제동은 전진방향의 정방향과 회생제동의 역방향 토크를 번갈아가며 받게된다. 이로 인해 스플라인 체결부는 양방향 토크에 의해 가혹한 환경에서 구동된다. 기계적으로 가장 취약한 스플라인의 내구성 향상은 시스템 전체의 부품 향상에 기여할 수 있다. 본 연구에서는 스플라인의 치저부와 같은 좁은 구조에 압축응력을 형성하여 내구 수명 향상시키기 위한 피닝 공법에 관하여 연구하였다. 적용된 공법은 레이저 피닝 공법, 초음파 쇼크 피닝 공법과 마이크로 피닝공법 등을 적용하여 연구하였다.

#### [표면처리2-4 | 16:25]

**고엔트로피 합금의 역 그라디언트 구조를 통한 미세구조 차폐를 통한 우수한 고강도-수소 취성 저항성 획득 전략:** 김래언, 이호형, 김재훈, 서동우, Zaigham Saeed Toor(포항공과대학교), 정차희, 손석수(고려대학교), 김형섭\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 고엔트로피 합금, 헤테로 구조, 수소취성, 인장 강도

고강도 합금은 수소 함유 환경에서 급격한 취성 파괴를 겪는 경우가 많다. 이는 강도 향상을 위해 설계된 미세구조가 일반적으로 수소취성 저항성에는 불리하게 작용하여, 기계적 물성과 수소취성 저항성 간의 상충관계(Trade-off)를 야기하기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하고자 역 그라디언트 구조를 통한 미세구조적 차폐를 통한 새로운 설계 전략을 제안합니다. 표면 레이저 처리를 통하여, 완전 재결정된 표면과 냉간 압연된 중심부로 구성된 역 그라디언트 구조를 도입함으로써, 표면부의 높은 수소취성 저항성이 수소에 취약한 중심부를 효과적으로 보호하도록 설계하였다. 동시에 내부 냉간 압연 조직은 우수한 고강도에 기여한다. 또한, 그라디언트 층의 미세구조적 헤테로구조는 우수한 시너지 경화 효과를 유도하여 강도와 연성의 우수한 조합을 기여한다. 그 결과, 역경사 시편은 완전 재결정된 시편 대비 약 2.4배 높은 항복 강도를 유지하면서도, 수소 차징 후 연성 손실은 재결정된 시편과 유사한 수준으로 억제되었습니다. 본 연구는 고성능과 수소 취성 내성을 동시에 확보할 수 있는 새로운 공정 설계 전략을 제시한다

#### [표면처리2-5 | 16:40]

**X70 파이프라인 강재에서의 수소 취성 방지를 위한 금속과 유기 화합물 간의 결합 분석:** 신좌열, 최동현, 강남현\*(부산대학교)

**Keywords:** 수소취성, 유기계 인히비터, 흡착, 수소 투과 시험, X70

화석연료 중심의 에너지 소비는 온실가스 배출의 주요 원인으로, 지속가능한 산업과 에너지 전환을 위해 배출 저감이 필수적이다. 이러한 배경에서 수소는 저탄소 에너지원으로서 활용 가능성이 커지고 있으며 기존 가스 인프라를 활용할 수 있는 수소 혼합 가스는 전환 초기의 현실적 대안으로 제시된다. 수소 혼합 가스는 주로 파이프라인을 통해 운반되며, 가스 수송용 파이프라인 강재로는 페라이트계 X70 강이 널리 사용된다. 그러나 운송 과정에서 가스 내 수소가 강재에 유입될 경우 수소 취성(hydrogen embrittlement)이 유발되어 기계적 물성 저하 및 구조 건전성 문제로 이어질 수 있다는 한계가 있다. 이러한 문제를 완화하기 위해 수소의 흡착 및 확산 경로를 물리·화학적으로 차단하는 인히비터(inhibitor) 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 최근에는 유기화합물-금속 상호작용을 기반으로 한 접근이 유망한 전략으로 부각되고 있다. 본 연구에서는 유기화합물이 수소 취성을 완화하는 메커니즘을 고찰하고, 유기화합물 간 상호작용 및 유기-금속 결합에 따른 구조적 특징을 IR 분석(Infrared spectroscopy), XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy), XRD 분석(X-ray Diffraction spectroscopy)을 통해 규명하고자 한다. 또한 Devanathan-Stachurski (D-S) 셀 기반 수소 투과 시험을 수행하여 억제제의 수소 침투 저감 효과를 정량적으로 평가한다. 이를 통해 수소로 인한 강재 물성 저하를 효과적으로 억제하고, 수소 연료 활용 산업의 안전성과 운영 효율 향상에 기여하고자 한다.

#### [표면처리2-6 | 16:55]

**레이저 클래딩 공정으로 제조된 NiAl-WC 코팅의 고온 마모 거동:** 홍성준(한국생산기술연구원, 국립순천대학교), 신우철, 김태범(한국생산기술연구원), 이동근(국립순천대학교), 조균택\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** Metal Matrix Composite(MMC), 레이저 클래딩, 표면처리, 고온 마모

다이캐스팅에 사용되는 플런저 피스톤은 고온의 금속 용융을 고압으로 주입하는 공정에 노출되며, 고온 환경에서의 내마모성이 요구

되기 때문에 이에 대응하기 위한 표면 코팅 기술이 주목받고 있다. 그 중, 레이저 클래딩으로 형성된 Ni-based metal matrix composite(MMC) coating은 니켈의 우수한 고온 안정성과 함께, 공정 특성에 기인한 치밀한 미세조직 및 모재와의 우수한 금속학적 결합을 통해 고온 환경에서도 안정적인 코팅층을 제공할 수 있다. 이에 본 연구에서는 레이저 클래딩 공정을 이용하여 Ni-based WC composite coating을 제조하고, 다이캐스팅과 유사한 고온 조건에서 H13 강과의 고온 마모 특성을 비교·분석하였다. 실험에 앞서 기판은 350 °C로 예열하였으며, 레이저 클래딩으로 제조된 Ni-based WC composite coating의 미세구조와 특성은 SEM, X-선 회절(XRD), 그리고 비커스 경도 시험을 통해 평가하였다. Ni-based WC composite coating은 H13 기판 대비 현저히 높은 경도를 나타내었으며, 이는 SEM 분석에서 관찰된 코팅층 전반에 걸쳐 균일하게 분포된 WC 입자와 치밀하고 결합이 억제된 미세구조에 기인한 것으로 해석된다. 이러한 미세조직적 특성은 WC 강화재에 의한 분산 강화 및 하중 지지 효과를 통해 Ni 기반 매트릭스의 소성 변형을 효과적으로 억제하였으며, 그 결과 1000 °C에서 수행한 ball-on-disk 고온 마모 시험에서 우수한 내마모성을 나타내었다.



## NEW-HORIZON: 희토류 심포지엄

Room 3층 301, 4월 29일

## [희토류1-1 | 10:00] 초청강연

미·중 기술패권 시대, 희토류 영구자석의 전략적 전환: 이우영\*(연세대학교)

Keywords: 희토류, 미·중 기술 패권, 국내 동향

미국과 중국 간 기술 패권 경쟁은 반도체를 넘어 핵심 소재 영역으로 확산되며 글로벌 공급망의 구조적 재편을 가속화하고 있다. 첨단기술은 더 이상 산업 경쟁력에 국한되지 않으며, 경제 안보와 군사적 전략성까지 포괄하는 국가 생존의 문제로 확장되고 있다. 그 중심에 희토류와 같은 전략 광물 자원이 자리한다. 전기차와 해상풍력 산업의 급성장으로 고성능 구동 모터 수요가 폭증하면서, 희토류 기반 영구자석은 에너지 전환 시대의 핵심 전략 소재로 부상하였다. 그러나 희토류 분리·정련 및 영구자석 제조 분야에서 중국이 약 90% 수준의 점유율을 유지하고 있는 현실은 공급망 리스크와 지정학적 불확실성을 동시에 내포한다. 이에 대응하여 미국과 유럽연합은 역내 가공·정련·자석 제조 역량 복원을 위한 대규모 투자와 국제 협력을 추진하며 공급망 다변화를 가속화하고 있다. 우리나라 역시 호주산 희토류 도입과 국내 제련·영구자석 제조를 연계하는 새로운 공급망 구축을 추진하고 있으며, 독자 공정 기술 확보를 통해 전기차용 고성능 자석의 국산화를 본격화하고 있다. 이는 단순한 수입 대체를 넘어 기술 주권 확보와 전략 산업 경쟁력 강화를 의미한다. 본 강연에서는 미·중 기술 패권 경쟁이라는 거시적 환경 속에서 국내 희토류 영구자석 산업이 직면한 구조적 리스크를 분석하고, 공급망 재편 과정에서 창출되는 전략적 기회를 조망한다. 나아가 국가 차원의 희토류 전략 수립 방향과 차세대 자석 기술 확보 로드맵을 제안한다.

## [희토류1-2 | 10:40] 초청강연

희토자원 효율적 활용 &amp; 안정적 희토자석 공급망 구축을 위한 3R 기술개발 전략: 김동환\*(성림첨단산업(주))

희토자석은 전류의 소비 없이 지속적으로 자기장을 발생시키는 기능을 하는 소재로서 다양한 산업분야에서 기존 전자석을 대체하면서 모터, 액츄에이터, 발전기 등 동력변환기기의 고성능 구현, 에너지 절감 및 소형화 개발에 많은 기여를 하고 있다. 최근에는 친환경 자동차의 구동모터, 풍력발전기의 제너레이터 등 생산량이 급격히 증가함에 따라 2025년 기준 30~35 만톤의 자석이 생산되고 있고, 2035년까지 매년 8.3%의 시장 성장이 예상된다. 이들 RE-Fe-B계 희토자석을 생산하기 위한 원재료로서 Nd, Pr의 경희토(28~30 wt%)와 Dy, Tb의 중희토(1~3 wt%)가 사용되고 있는데, 2025년 기준 세계 희토 생산량의 약 70%가 중국에 편중되어 있고 특히 중희토의 경우 광물 중 함유량이 낮아 대량 생산규모를 갖춘 중국에서 대부분 공급이 되는 실정이다. 또한, 미·중 무역분쟁이 첨예하게 대립하는 상황에서 2025년 4월 중국의 중희토 및 중희토 함유 희토자석의 이중용도 규제조치를 실시함에 따라 희토자석 조달이 더욱 어려운 상황으로 전개되고 있다. 따라서 대한민국은 경제성 있는 희토부존자원이 없는 상황에서 안정적 탈중국 희토 공급망 구축을 위해 ①베트남, 말레이, 라오스 등과 같은 국가를 통해 희토자원을 확보하는 노력과 더불어 ②국가차원의 3R 기술개발전략, 즉 부존자원이 적은 중희토 사용량저감(reduction), Ce & La 등 비교적 공급이 용이한 경희토 사용량확대(replacement) 및 폐품으로부터 희토자원 재생(recycle)을 적극적으로 추진하는 것이 필수적이다. 본 발표에서는 희토자원을 효율적으로 활용함으로써 안정적 희토자석 공급망 구축을 위한 3R 기술전략에 대한 방안을 제안하고자 한다.

## [희토류1-3 | 11:10] 초청강연

Predictive Modeling of Hard/Soft Nanocomposite Magnets: A Mass Fraction Approach: Jihoon Park\*(Korea Institute of Materials Science)

Keywords: Exchange coupling, core/shell, Predictive Modeling, Mass Fraction

Rare-earth (RE) permanent magnets are facing significant challenges, including mineral security issues and the low Curie temperature of Nd-Fe-B magnets. To address these concerns, there is an urgent need to develop high-performance magnets that are either RE-free or utilize cost-effective alternatives. One of the most promising strategies is the development of exchange-coupled hard/soft nanocomposite magnets, which aim to combine the high coercivity ( $H_{ci}$ ) of a hard magnetic phase with the high magnetic flux density ( $B_r$ ) of a soft magnetic phase. While previous theoretical models for these composites were based on volume fractions, they presented practical limitations because measuring the precise volume of hard or soft phases in powdered or bulk materials is experimentally difficult. In this presentation, we introduce a simple and practical analytical model to estimate the magnetization ( $s_s$ ) and  $H_{ci}$  of hard/soft nanocomposite magnets using the mass fraction ( $f_m$ ). This model allows for the prediction of magnetic properties using experimentally accessible weight ratios, making it directly applicable to powdered and bulk composite systems. To validate the efficacy of this model, we synthesized and characterized various composite systems, including  $Sm_2Co_7/Fe$ ,  $MnAl/Fe-Co$ ,  $MnBi/Fe-Co$ , and  $BaFe_{12}O_{19}/Fe-Co$ . Our experimental results for both  $s_s$  and  $H_{ci}$  are in excellent agreement with the proposed analytical model across these diverse material systems. Notably, the model remains robust regardless of the degree of exchange coupling, providing a reliable tool for predicting the maximum energy product  $(BH)_{max}$  of two-phase magnetic composites. Therefore, in this presentation, we will discuss the derivation of these mass-fraction-based equations and demonstrate their utility in guiding the design of next-generation, high-performance permanent magnets. We will share our research results on how this model can be used to optimize the composition of hard/soft composites for superior magnetic performance.

**[히토류2-1 | 14:00] 초청강연**

**히토류 선풍/제련 기술 : 정경우\***(한국지질자원연구원, 과학기술연합대학원대학교), 최준현, 이수경, 신동주, 서주범(한국지질자원연구원)

히토류는 재생에너지, 전기자동차, 반도체, 방위산업 등 첨단 전략 산업 전반에 걸쳐 대체 불가한 핵심 원소군이다. 특히 고성능 영구자석, 첨단 센서, 레이저 및 미사일 유도 시스템에 필수적인 중희토류(디스프로슘, 터븀, 사마륨 등)는 국가 안보와 산업 경쟁력을 동시에 좌우하는 전략 자원으로서 그 중요성이 갈수록 증대되고 있다. 현재 전 세계 히토류 공급망의 90% 이상이 중국에 집중되어 있으며, 이는 단순한 자원 편중을 넘어 지정학적 리스크로 가시화되고 있다. 중국은 2023년 히토류 제련·가공·이용 기술을 「수출금지 및 제한 기술 목록」에 포함시키고, 관련 설비 및 전문 인력의 해외 이전을 제한하는 한편, 역외 생산품이라 하더라도 중국산 원료 또는 기술이 포함될 경우 사전 수출 허가를 의무화하는 조치를 시행하였다. 이는 미국의 반도체 수출통제 전략에서 활용된 '기술 통제' 개념을 히토류 분야에 본격 적용한 것으로, 자원 지배 중심의 전략에서 기술 지배 중심의 전략으로 전환하고 있음을 의미한다. 역사적으로 1980년대 이후 히토류 생산 중심이 미국에서 중국으로 이동한 배경에는 저렴한 인건비와 낮은 환경 비용이 작용하였다. 당시 시장 수요는 매장량이 풍부하고 분리·정제가 비교적 용이한 경희토류(세륨, 란탄) 중심이었다. 그러나 오늘날 첨단 산업 및 방위산업의 핵심 수요는 분리·정제 난이도가 현저히 높은 중희토류로 이동하였다. 중국은 지난 40여 년간 사실상 유일한 중희토류 대규모 생산국으로서 선풍, 용매추출, 고순도 분리·정제에 이르는 전 공정 기술을 체계적으로 축적하였으며, 이는 단순한 비용 경쟁력을 넘어선 구조적 기술 경쟁력의 결과라 할 수 있다. 본 강연에서는 히토류 광물의 광물학적 특성과 선풍 공정의 원리, 제련 및 용매추출 기반 분리 정제 기술의 발전 과정과 기술적 난이도를 체계적으로 검토한다. 아울러 중희토류 확보를 가로막는 기술적 병목 요소에 대해서 논하고자 한다

**[히토류2-2 | 14:30] 초청강연**

**차량 모터용 영구자석 적용 현황: 하석\***(현대자동차)

**Keywords:** 차량 모터용 영구자석

전동화 확대에 따라 구동모터를 비롯한 다양한 전동 부품에는 높은 자기에너지밀도와 우수한 고온 특성을 가진 NdFeB 기반 영구자석이 필수 소재로 사용되고 있다. 특히 HEV 및 EV 구동모터는 높은 보자력이 요구되어 중희토류(Dy, Tb) 기반의 입계확산 기술이 적용되어 왔다. 그러나 중국 중심의 공급망 편중과 최근 중국의 수출 규제 강화로 Dy·Tb 공급 불안정성이 증가함에 따라 중희토류 저감·삭제 기술은 핵심 연구 분야로 부상하고 있다. 이에 따라 고성능 영구자석 유지와 히토류 사용량 최소화를 동시에 만족하기 위한 기술 개발이 진행되고 있다. 첫째, 구동모터용 자석에서는 결정립 미세화, 선택적 입계확산(부분 확산), 경희토 기반 확산 등 중희토류 대체 기술이 빠르게 고도화되고 있다. 분할 자석 기반 와전류 손실 저감 기술은 자석 온도를 낮추고 모터 효율을 향상시키며, Dy 사용량을 크게 줄이는 효과가 확인되었다. 둘째, EV 구동모터에서는 상대적으로 낮은 보자력 요구 특성을 활용해 중희토류-free 소재에 경희토 확산 기술을 적용하는 구조적·재료적 최적화가 확산되고 있다. 더불어 중장기적으로는 NdFeB 공급망 제약을 해소하기 위해 신규 자석 소재 개발이 본격화되고 있다. SmFeN 기반 본드 자석은 높은 형상 자유도와 저손실 특성을 활용하여 AFPM, PMa-SynRM 등 차세대 모터 구조에 도입될 수 있으며, FeN기반 비희토류 자석은 높은 이론 자화( $M_s$ )를 바탕으로 장기적 대안으로 주목받고 있다. 또한 탄소중립과 원가 안정성을 고려한 히토류 재활용 기술은 전동화 시대의 필수 기술로 자리매김하고 있다. 폐구동모터에서 영구자석을 분리하고, 습식·건식 경로를 활용해 Nd·Pr 등 구성 원소를 회수하는 기술이 Pilot 단계에서 빠르게 고도화되고 있으며, 향후 CRMA 규제 대응의 핵심 수단이 될 전망이다. 금속열환원 기반 중희토 금속 회수, 재활용 분말 혼합 자석 제조 등도 공급망 안정성을 뒷받침하는 기반기술로 개발되고 있다. 요약하면, 차량 모터용 영구자석 기술은 △고성능화(NdFeB 특성 향상), △중희토류 저감·삭제 기술, △재활용 기반 순환 공급망 구축, △비희토류 차세대 자석 개발이라는 네 가지 축을 중심으로 진화하고 있다. 전동화 확대와 글로벌 규제 변화 속에서 이러한 기술 경쟁력 확보는 고성능 모터 개발뿐 아니라 미래 공급망의 안정성 확보를 위한 필수 전략으로 평가된다.

**[히토류2-3 | 15:00] 초청강연**

**고속 전동기용 영구자석의 포화 착자 거동과 자기회로 통합 설계: 김효준\*, 배준영((주)맥스막), 윤명환(한국전자기술연구원)**

**Keywords:** 고속 전동기, 조립후 착자, 자기회로 설계

고속 전동기는 회전자 기계적 강도 확보, 자속 집중 구조 적용, 고보자력 자석 사용 등 설계 제약이 동시에 요구되는 대표적인 응용 분야이다. 특히 IPM 및 Spoke 구조와 같이 자석이 철심 내부에 배치되는 경우, 조립 후 착자(Post-Assembly Magnetization)는 전기기기 성능을 결정하는 핵심 설계 변수로 작용한다. 완전 포화 착자를 달성하기 위해서는 자석의 초기 자화곡선(First Magnetization Curve), 보자력( $iH_c$ ), 자속 포화 특성뿐 아니라 로터 철심의 자기포화 거동과 자속 경로까지 동시에 고려해야 한다. Ferrite, Sintered NdFeB, Injection Bonded SmFeN 자석은 각각 서로 다른 자화 임계 자계(Hmag) 조건을 가지며, 고속 회전자 구조 내에서는 Eddy current 차폐 효과 및 다극 한계성으로 인해 실제 자화 자계가 이상 조건과 다르게 분포한다. 본 강연에서는 감쇠진동형 RLC 방전 기반 착자 시스템의 자계 형성 특성과 자석 재질별 포화 착자 조건을 비교 분석하고, 고속 모터 로터 구조에서 자속 분포 해석을 통해 완전 착자 달성을 위한 설계 조건을 도출한다. 특히 Ferrite 자석의 상대적으로 낮은 포화 자계 조건과 NdFeB/SmFeN 자석의 고보자력 특성 차이를 구조적 설계 관점에서 비교하고, 고속 로터에서의 자속 집중 및 철심 포화 영향까지 고찰한다. 이를 통해 자석 소재 특성, 착자 조건, 자기회로 설계를 통합적으로 고려하는 Magnetic Engineering 기반의 고속 전동기 설계 전략을 제안하고자 한다. [감사의 글] 본 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT)-소재·부품 기술개발사업 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00432477).

**[히트류2-4 | 15:30] 초청강연**

Can we realize high-coercivity in Nd-Fe-B sintered magnets without using heavy rare-earth?: Ji-Hyeon An, Sujin Lee, Seol-mi Lee(Korea Institute of Materials Science), Ganghui Kim(Ulsan National Institute of Science and Technology), Su-min Kim, Tae-Hoon Kim\*(Korea Institute of Materials Science), Kyoung-Hoon Bae, Dong-Hwan Kim(Star Group Industry), Ki-Suk Lee(Ulsan National Institute of Science and Technology), Jung-Goo Lee(Korea Institute of Materials Science)

**Keywords:** Nd-Fe-B sintered magnets, Grain boundary diffusion process, Heavy rare-erath free

The Pr-based grain boundary diffusion process (GBDP), which forms the high-anisotropy Pr-rich shell within the Nd-Fe-B magnets, is the most promising method for obtaining high-coercivity in the magnets without use of heavy rare-earths (HRE, Tb or Dy). However, the coercivity gain by the current Pr-GBDP is only 0.2–0.3 T, which is insufficient to realize a high-coercivity above 2.5 T that can be achieved by the HRE-GBDP. To overcome this limitation, most researchers have focused on increasing the GBD-depth of Pr and controlling the Pr-concentration of shell to be higher by reducing the thickness of shell. However, such microstructures are difficult to be realized simultaneously by the conventional approach. A recent report by Kim et al. provides a novel insight into increasing both the GBD-depth of Pr and Pr-concentration of shell. They found that shell formation induces undesirable grain growth during the GBDP because a unique grain boundary migration phenomenon, termed chemically induced liquid film migration (CILFM), is dominantly involved in the shell formation. By the CILFM, Nd-rich GBP migrates while consuming the GBD source, leaving the shell behind. Based on such a phenomenological feature, the CILFM can be defined as 1) GBD source consuming and 2) grain coarsening phenomenon. This directly indicates that if the CILFM is hindered during GBDP, the GBD-depth of HRE can be increased and thickness of the shell can be controlled to be thinner, which could lead to an increase in the HRE-concentration of shell. Thus, to breakthrough the limit of the coercivity gain by the Pr-GBDP, a CILFM-inhibited GBDP should be developed. In this presentation, a current development of our HRE-free two-step GBDP consisting of the 1st-step GBDP with refractory metal (RM)-compounds or -alloys for forming the intergranular precipitates to hinder the CILFM, and the 2nd-step GBDP with low-melting Pr-containing alloys for forming the high-anisotropy Pr-rich shell will be introduced. The coercivity and their temperature dependence ( $\beta$ ) of HRE-free magnets achieved in this work are sufficient to replace the commercial HRE-GBDP magnets that is used for traction motors of hybrid or electric vehicles. We believe that the CILFM-inhibited GBDP is a solution for eliminating the need for HRE in obtaining high-coercivity in Nd-Fe-B sintered magnets.

**[히트류2-5 | 16:00] 초청강연**

Development of a Knowledge-Driven Platform for the Design of Next-Generation Permanent Magnet Materials: Woosun Jang\*(Yonsei University)

**Keywords:** Rare-earth elements, Artificial intelligence, Knowledge-driven materials design

The rapid global transition toward electrification has intensified the demand for high-performance permanent magnets. However, the industry faces severe supply chain risks due to a heavy reliance on critical rare earth elements. Conventional material discovery, dependent on trial-and-error experimentation, is inefficient and struggles to predict complex extrinsic properties like coercivity, a challenge often referred to as Brown's Paradox. To overcome these bottlenecks, an AI-driven materials design platform is necessary, especially when targeting next-generation low-rare-earth-element or rare-earth-element-free magnetic materials. Key of this approach is the development of a domain-specific Materials Ontology and Knowledge Graph. Unlike traditional data-driven methods that often suffer from data fragmentation and lack of interpretability, our framework semantically integrates heterogeneous data sources, ranging from first-principles calculations to experimental literature, into a unified knowledge structure. This semantic standardization allows the AI to not merely correlate inputs and outputs but to reason about the complex causal relationships between electronic structures, microstructural evolutions, and magnetic properties. Consequently, this enables explainable AI capabilities, providing researchers with physical insights into material behaviors rather than opaque "black-box" predictions. Building upon this robust knowledge foundation, the platform employs physically sound neural networks and multi-objective Pareto optimization to simultaneously maximize conflicting properties such as saturation magnetization and thermal stability. Furthermore, an active learning-based closed-loop system utilizes the knowledge graph to autonomously identify high-uncertainty compositional spaces and suggest optimal synthesis pathways. Ultimately, this ontology-driven paradigm overcomes data scarcity in exploration, significantly reducing the R&D lifecycle and securing a sustainable, data-driven future for magnetic material technology.

**NEW-HORIZON Inter.: Nano Convergence Materials Symposium**

Room 3층 303, 4월 29일

**[NCM1-1 | 10:00] Invited Talk**New ways to (try to) grow diamond and cubic boron nitride: Rodney Ruoff\*(UNIST)*Keywords:* diamond, cubic boron nitride, metal flux, low pressure, crystal growth, kinetics

On Earth circa 2025 significantly more natural graphite (G) than diamond (D) is mined/processed, and significantly more synthetic G than D is made. In metric tons: ~1, 500, 000 to ~24 (G to D, natural) and ~3, 500, 000 to ~3, 100 (G to D, synthetic). D&G are almost isoenergetic at 273K and 1 atm and the same is true for hexagonal boron nitride (hBN) and cubic boron nitride (cBN). E.g.,  $\Delta H_f^\circ$  of D is about the same as  $\Delta H_{vap}$  of liquid neon at its boiling point of 27K, and about 1/10 the enthalpy of an H-bond in liquid water. (Graphite is the standard state at STP.)  $\Delta G_f^\circ$  and  $\Delta H_f^\circ$  of cBN are even smaller (it is currently suggested that hBN is just barely more stable than cBN.). And Prof. Gibbs taught something of interest related to phase equilibria—I will mention this. RSR: Kinetic control and not thermodynamic control is why it has been simpler to synthesize G than D at 1 atm pressure. But the ‘standard’ explanation (e.g., in textbooks, the published literature, etc.) has been based on thermodynamics (“It is hard to obtain diamond because graphite is “so much more stable.”): This is simply wrong—in my opinion. I discuss possible paths to synthesize D (please note [1]) in new ways. The parameter space for the elemental compositions of metal fluxes that might dissolve the needed amount of C (or for cBN the needed amount(s) of B and/or N) at ~1 atm pressure is very large. This is appealing. Fortunately (for basic science i.e. frontier research, as well as new technology opportunities) there is a great deal that is “not studied at all” about dissolution of carbon, phase equilibria, and other interesting issues, for almost all choices of metal fluxes (liquid metal alloys, but other elements can participate—S, P, Si, Ge, Se, Te, etc.—not only strictly metals; thus the preferred term might be ‘metal flux’). Apart from D or cBN grown by new methods, we open the question from recent modeling results of liquid metals possibly serving as a (new type of) solvent for molecular synthesis (Dr. Daniel Hedman and RSR). With retrosynthesis (terms such as inverse design and/or inverse optimization are also used and perhaps more apt for materials?) and achieving kinetic control in mind, I foresee a new—and very promising—horizon for synthesis of diamond and cubic boron nitride (and polymorphs such as hexagonal diamond and wurtzite BN) and new approaches with metal fluxes for crystal growth in general. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1). 1] Yan Gong, Da Luo, Myeonggi Choe, Won Kyung Seong, Pavel Bakharev, Meihui Wang, Seulyi Lee, Tae Joo Shin Zonghoon Lee, Rodney Ruoff. Growth of diamond in liquid metal at 1 atmosphere pressure. Nature. 2023, 629, 348-354.

**[NCM1-2 | 10:25] Invited Talk**New Insights into Ultrathin Carbides and Carbide-Dichalcogenide Heterostructures: Synthesis, Superconductivity, Electrocatalysis and more: Mauricio Terrones\*(The Pennsylvania State University)*Keywords:* Metal carbide, 2D, superconductivity, dichalcogenide, platelet

This talk will summarize the progress in the synthesis, characterization, and computational studies of transition metal carbides (TMCs) and TMC - transition metal dichalcogenides (TMDs) heterostructures. We will first introduce TMDs and ultrathin TMCs (UTHtMCs) and deposition synthesis routes towards isolating these ultrathin materials. Then, we will discuss the synthesis of Mo<sub>2</sub>C, WC, and W<sub>2</sub>C and their heterostructures with TMDs. In particular, we will discuss an enhancement of superconductivity in  $\bar{a}$ -Mo<sub>2</sub>C/ $\bar{a}$ '-MoC<sub>1-x</sub>/MoS<sub>2</sub> heterostructures obtained by controlled sulfurization of thin flakes of  $\bar{a}$ -Mo<sub>2</sub>C. The heterostructures displayed a more than 50% greater T<sub>c</sub> (6.8 K) when compared to pristine  $\bar{a}$ -Mo<sub>2</sub>C crystal (4.0 K). The reasons that lead to T<sub>c</sub> enhancement are attributed to the interfacial strain and the presence of the metastable  $\bar{a}$ '-MoC<sub>1-x</sub> phase that was stabilized by sulfurization of the  $\bar{a}$ -Mo<sub>2</sub>C, which may favor a higher T<sub>c</sub> by increasing the frequency of relevant phonon modes and/or increasing the electron-phonon coupling. We will also discuss the synthesis of ultrathin WC and W<sub>2</sub>C single crystals using copper and gallium, respectively. We will report the first low temperature measurements of electronic transport in WC below 300 mK and ultrathin W<sub>2</sub>C down to 1.8 K. We find that WC does not enter a superconducting state, while UThTMCs of W<sub>2</sub>C enter a 2D superconducting state below 2.8 K. Our results provide new ground on the synthesis of UThTMCs with controlled crystal phases. Further research will be motivated by this work to isolate novel carbide and nitride phases in this ultrathin limit. Finally, it is important to note that the electronic transport of UThTMCs follows a 2D regime. These UThTMCs and their heterointerfaces could find important applications in electrocatalysis, carbide plasmonics, transparent conducting films, and materials for effective radiation shielding due to their high density and ability to absorb neutrons and gamma rays. [1] Sredenschek, A.J., Terrones, M., et al. Heterostructures coupling ultrathin metal carbides and chalcogenides. Nature Materials 2024/4/1.

**[NCM2-1 | 11:00] Invited Talk**Vapor-Liquid-Solid Synthesis of one-dimensional nanomaterials via Rapid Joule Heating: Yan Li\*(Peking University)*Keywords:* Joule heating, vapor-liquid-solid, 1D nanomaterials, catalysts

Rapid Joule Heating (RJH) has brought about a paradigm shift in ultrafast materials synthesis, leveraging its instantaneous ultra-high

temperatures, rapid reaction kinetics, and exceptional energy efficiency. In this work, we establish a catalytic RJH strategy by incorporating nanocatalysts, which merges the precise control of the vapor-liquid-solid (VLS) growth mechanism with the ultrafast dynamics of Joule heating, enabling the controlled synthesis of one-dimensional nanomaterials within seconds. We verify that the VLS mechanism remains effective even under extreme RJH conditions exceeding 2500 °C. This distinctive reaction environment not only promotes the rapid formation of 1D nanostructures but also allows active regulation of their diameters. Using this approach, we have successfully synthesized a range of nanowires, including refractory carbides, II–VI and III–V semiconductors, high-entropy carbides, as well as multi-walled and single-walled carbon nanotubes, demonstrating the broad applicability of the RJH–VLS strategy. Notably, the instantaneous ultra-high temperature regime unlocks simultaneous carbothermal reduction of multiple precursors by kinetically bypassing thermodynamic equilibrium limitations, overcoming a long-standing challenge in multi-component material synthesis. This catalytic RJH strategy has already been scaled to tens of grams per batch with an energy consumption as low as several kilojoules per gram. Combined with the precise morphological and structural control afforded by nanocatalysts, the technique opens a highly promising pathway toward controllable, efficient, and scalable production of advanced materials.

#### [NCM2-2 | 11:25] Invited Talk

Liquid Metal-Mediated Growth and Properties of Multidimensional Carbon Crystals: Won Kyung Seong\*(Institute for Basic Science)

*Keywords:* Liquid metal catalysis, carbon crystallization, and atomic diffusion

We present unified studies advancing the fundamental understanding and growth of high-quality carbon crystals through liquid-metal catalysis and rapid crystallization techniques. For diamond ( $sp^3$ -bonded carbon systems), synthesis at atmospheric pressure was achieved using liquid Ga–Ni–Fe–Si alloys. Subsurface carbon supersaturation and Si-assisted stabilization of  $sp^3$  clusters enable nucleation without seeds. Liquid Cu surfaces allow faceted diamond nanoparticles to reorganize into crystalline films. In  $sp^2$ -bonded carbon systems, we report the growth of single-crystal graphite through a Co metal flux and mirror-like graphite films on Ni–Mo melts. Centimeter-scale, ultra-flat single-crystal graphene was realized on Ni(111) via rapid subsurface diffusion. The synthesized graphene exhibits direction-dependent mechanical strength, particularly strong along the zigzag edge. Electromigration experiments uncovered directional isotope fractionation, providing evidence that electric fields selectively drive  $^{12}C/^{13}C$  migration. Rapid Joule heating combined with two-step sintering controls microstructural evolution in high-Ni cathodes. These results advance the fundamental understanding of crystallization kinetics and atomic diffusion in liquid metal and rapid thermal processing environments. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

#### [NCM2-3 | 11:50] Invited Talk

Using MLFFs to Search for Low Pressure c-BN Growth Modes in Liquid Metals: Izaak Mitchell, Daniel Hedman(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST)

*Keywords:* Liquid Metal Solvent, liquid metal catalyst, metal flux, c-BN, Crystal Growth, MLFFs

Here, we describe our recent work on developing machine learned force fields (MLFFs) for investigating cubic boron nitride (c-BN) growth in liquid metal melts (particularly Li based) with the goal of low-pressure growth. Boron nitride (BN) based materials are BN based analogues to carbon (C) based materials such as hexagonal BN (h-BN, graphene analog), cubic BN (c-BN, diamond analog) or wurtzite BN (w-BN, lonsdaleite analog). As such, BN materials share some of the technologically significant properties of C materials such as extremely high strengths and hardnesses while also sharing the significant optical properties such as high refractive indices and ability to form color centers. BN materials are always electronic insulators and are more chemically stable. These properties mean BN based materials often either compete or complement C based technologies. Like C based materials, BN based materials can be grown via chemical vapor deposition, and analogous to C material growth where diamond only forms under pressure, c-BN (and w-BN) are almost only achieved under pressures of 6GPa, greatly limiting production upscale. (In the past year, reports have appeared of CVD growth on single crystal diamond of very thin cBN epitaxial layers.) However, recent developments by the CMCM have found that at 1 atm or less, diamond can be grown from a multi-element liquid metal solvent/catalyst. This gives hope for finding a similar setup for c-BN, particularly given liquid metal solvents (liquid lithium, for example) under pressure are the current main mode of growth. But how can we figure out what concoction of metals and additives facilitate c-BN growth under atmospheric pressures? Potentially, theoretical methods could be leveraged to explore the chemical space before experimentation, but these have their limits. DFT is too slow to investigate large systems where processes are slow or rare, pre-existing FF (force fields) are at best inaccurate and at worst non-existent and despite being a middle ground universal FFs solve neither problem sufficiently. Recently machine learned FFs have become prominent owing to improvements in GPU technology, allowing fast, DFT accurate methods at the cost of generality. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

#### [NCM3-1 | 14:00] Invited Talk

Inside and Outside Modifications of Single Walled Carbon Nanotubes: Shigeo Maruyama\*(Zhejiang University, The University of Tokyo, Nagoya University), Abid(Zhejiang University), Wanyu Dai, Chingmei Hu(The University of Tokyo), Chunxia Yang(Zhejiang

University), Yongjia Zheng, Rong Xiang(Zhejiang University, The University of Tokyo)

**Keywords:** single-walled carbon nanotube, confined carbyne, 1D vdW heterostructure, boron nitride nanotubes, transition metal dichalcogenides nanotube

For 35 years, we have been enjoying single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) with the diverse optical and electronic properties (metallic or semiconducting) depending on chiral indices ( $n$ ,  $m$ ). Properties of SWCNTs can be modified from inside or outside [1]. Confined carbyne inside of SWCNTs represents the inside modification. We have achieved the most ideal weakly-confined carbyne by low-temperature processing [2]. Scaling up process and weakly confined carbyne for chirality-sorted SWCNTs will be discussed. As for the outside modifications, we have demonstrated the atomically precise 1D vdW heterostructures: SWCNTs, boron nitride nanotubes (BNNTs), and molybdenum disulfide (MoS<sub>2</sub>) sequentially wrapped in the radial direction [3-5]. For the BNNT-SWCNT, we have developed the growth mechanism, optical characterizations, and FET characterizations [6-7]. Recently, photoluminescence from defects of BN nanotubes has been identified. SWCNT-BNNT templated growth of transition metal dichalcogenides (TMD) can be extended to various TMD nanotubes, Janus TMD, and TMD junctions. We have optimized CVD conditions for various TMD such as tungsten disulfide (WS<sub>2</sub>), molybdenum diselenide (MoSe<sub>2</sub>) and niobium disulfide (NbS<sub>2</sub>). The remote salt technique [8] was developed for WS<sub>2</sub> and NbS<sub>2</sub> growth. Metallic NbS<sub>2</sub> nanotubes prefer the double-walled structure suggesting the favorable inter-tube interaction by the coulomb interaction due to charge transfer. The Janus TMD nanotubes MoSSe can be demonstrated by the selenidation of MoS<sub>2</sub> nanotubes by hydrogen plasma technique. The single-walled Janus MoSSe with a diameter of around 8-10 nm is preferably produced in good agreement with DFT prediction [9]. The TMD axial junctions and TMD alloy can be achieved by the sequential CVD process [10]. Axial junction of WS<sub>2</sub>-MoS<sub>2</sub> nanotubes and alloyed nanotubes in {W<sub>x</sub>Mo(1-x)}S<sub>2</sub> are demonstrated. However, when we change both metal and chalcogen at the same time such as WS<sub>2</sub> and MoSe<sub>2</sub>, interesting buffer layers could be formed. In addition to the templated growth outside of SWCNT-BNNT, inside of BNNT can be used as a good template. SnS<sub>2</sub> nanotubes inside BNNT showed strong armchair preference indicating that SnS<sub>2</sub> nanotubes are formed from SnS<sub>2</sub> nanoribbons [11]. Similar process was also demonstrated for MoS<sub>2</sub> nanotubes. References [1] S. Cambré, M. Liu, D. Levshov, K. Otsuka, S. Maruyama, R. Xiang, Small, 17 (2021) 2102585. [2] B-W. Zhang, et al., ACS Nano, 19 (2025) 12996. [3] R. Xiang, et al., Science, 367 (2020) 537. [4] Y. Zheng, et al., P. Natl. Acad. Sci., 118 (2021) e2107295118. [5] M. Lu, Y. Zheng, S. Maruyama, R. Xiang, Acc. Mater. Res., (2026) in press. [6] M. Liu, et al., ACS Nano, 15 (2021) 8418. [7] S. Wang, et al., ACS Nano, 18 (2024) 9917. [8] W. Dai, et al., ACS Nano, 19 (2025) 32800. [9] C. Yang, et al., Small, 21 (2025) 2412454. [10] Y. Zheng, et al., in preparation (2026). [11] Abid, et al., submitted (2026) [DOI: 10.48550/arXiv.2506.16346].

#### [NCM3-2 | 14:25] Invited Talk

Strain-Defect Engineered Layered Chalcogenide Electrocatalysts: Won-Kyu Lee\*(홍익대학교)

**Keywords:** Transition Metal Chalcogenides, Electrocatalysis, Strain-engineering, Defect-engineering, Water electrolysis

Layered transition metal chalcogenides (LTMCs) have emerged as promising electrocatalytic materials for water electrolysis owing to their tunable crystal phases, rich defect chemistry, and strong coupling between lattice structure and electronic properties. Despite these advantages, their intrinsic catalytic activity is often constrained by electrochemically inert basal planes, limited active-site density, and inefficient charge-transfer pathways. Recent advances demonstrate that strain engineering coupled with defect engineering provides a unified and scalable framework to activate LTMCs, simultaneously inducing phase transitions, electronic structure modulation, and the spontaneous formation of catalytically functional heterointerfaces.<sup>1-6</sup> Across multilayer MoS<sub>2</sub>, MoTe<sub>2</sub>, and PtSe<sub>2</sub>, mechanically induced lattice strain introduced via substrate-supported buckling and surface wrinkling generates spatially heterogeneous tensile and compressive strain fields. These strain fields drive local semiconducting-to-metallic phase transitions (e.g., 2H to 1T or 1T'), modulate band structures, and redistribute charge density at the nanoscale.<sup>1-3</sup> In strained MoS<sub>2</sub> and MoTe<sub>2</sub>, strain-assisted electrochemical activation promotes chalcogen vacancy formation and stabilizes metallic domains, significantly reducing charge-transfer resistance and enhancing basal-plane reactivity. As a result, hydrogen evolution reaction (HER) activities comparable to or exceeding those of platinum electrocatalysts are achieved.<sup>1,2</sup> In layered PtSe<sub>2</sub>, controlled tensile and compressive strain induces band overlap between the valence and conduction bands, yielding near-thermoneutral hydrogen adsorption and ultralow-overpotential HER performance.<sup>3</sup> Defect generation under strain not only increases the density of active sites but also drives local compositional and structural reconstruction, giving rise to heterophase and heterostructured domains within originally homogeneous LTMC crystals. In WS<sub>2</sub>, plasma-assisted defect formation and strain-induced surface reconstruction produce mixed domains of WS<sub>2</sub>, tungsten oxysulfide, and WO<sub>3</sub>, creating abundant atomic-scale active sites and interfacial regions with optimized adsorption energetics and enhanced HER stability.<sup>4</sup> In telluride-based systems, electrochemical chalcogen dissolution followed by strain-modulated oxidation leads to oxygen-modified NiTe<sub>2</sub>/NiO<sub>x</sub> and defect-engineered MoTe<sub>x</sub>/Ni(OH)<sub>2</sub> architectures.<sup>5,6</sup> In these systems, heterointerfaces emerge as a direct consequence of defect chemistry and lattice distortion, rather than through independent assembly. Such strain-defect-driven heterointerfaces enable reaction pathways that are inaccessible in single-phase materials. Electronically polarized phase boundaries facilitate hydrogen adsorption and charge transfer for HER, while defect-rich oxide or hydroxide domains formed under strain promote intermediate stabilization and spillover during the oxygen evolution reaction (OER). Consequently, these materials exhibit efficient and durable bifunctional alkaline water electrolysis, with OER performance surpassing noble-metal benchmarks and stable operation at industrially relevant current densities.<sup>5,6</sup>

Comprehensive characterization—including Raman spectroscopy, X-ray and ultraviolet photoelectron spectroscopy, electron microscopy, and electrochemical analysis—combined with density functional theory and machine-learning-assisted atomistic simulations reveals how strain–defect coupling governs phase stability, electronic structure modulation, and interfacial reaction energetics. These insights establish clear structure–property–performance relationships linking lattice distortion, defect chemistry, and emergent heterointerfaces. Overall, this work establishes strain and defect engineering as a unified design paradigm for activating layered transition metal chalcogenides, in which heterostructure formation arises naturally from controlled lattice and chemical perturbations, enabling high-performance electrocatalysts for sustainable water electrolysis.<sup>1–6</sup> References 1. D. Rhuy, Y. Lee, J. Y. Kim, C. Kim, Y. Kwon, D. J. Preston, I. S. Kim, T. W. Odom, K. Kang, D. Lee, and W. K. Lee, *Nano Lett.*, 22(15), 5742–5750 (2022). 2. Y. Lee, S. H. Lee, S. K. Han, J. Park, D. Lee, D. J. Preston, I. S. Kim, M. C. Hersam, Y. Kwon, B. Shong, and W. K. Lee, *ACS Energy Lett.*, 8(11), 4716–4725 (2023). 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). 4. J. Park, I. Cho, H. Jeon, Y. Lee, J. Zhang, D. Lee, M. K. Cho, D. J. Preston, B. Shong, I. S. Kim, and W. K. Lee, *Adv. Mater.*, 36(10), 2314031 (2024). 5. 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 (2025). 6. 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).

### [NCM3-3 | 14:50] Invited Talk

Blending “interesting” and “important”, theory insights on carbon, borophene, and... ceramics: Boris I. Yakobson(Rice University)

**Keywords:** Carbon, boron, metal, ceramics, modeling

In research, an interesting intellectually compelling problem or even its elegant solution does not always lead to practical impact. In reversal, challenging practical problems are rarely easily articulated as scientific questions, before good answers can be even contemplated. Our examples involve carbon, boron, and ceramics materials, which in spite of their striking differences all can be metals—the theme central to his forum. Carbon nanotubes’ electronic band gap (zero for metallic) depends on helicity, while syntheses notoriously produce mixtures all. Producing nanotubes of one type by choice has been of great practical importance (to make interconnects or FET channels in electronics) but an insurmountable challenge. We will sketch one approach relying on kinetic differentiation in “evolutionary selection” growth. Borophene, a two-dimensional boron, has sprung to the research arena following our prediction of the boron fullerene B<sub>80</sub>. All borophene phases are metals, although depend on the substrate electron donation. Recent studies demonstrate hard bilayer borophene with promising superconductivity (predicted T<sub>c</sub> = 25–45 K), and low work function. Will this fascinating material, already synthesized, remain in the realm of scientific quest, rewarding yet ultimately academic, or it may eventually impact our daily life—on this question the jury is still out. On the other side of “important” are ceramics, born in the heat of kilns, not academic debates, offering a challenge to unravel molecular mechanisms of synthesis and sintering. It came to the fore with demand for UHTC, ultra-high temperature ceramics for aerospace and supersonics shields. I will share experience in developing theory of so-called flash synthesis, accelerated by a Joule-heat spike, which we started from rapid graphene production. Focusing rather on an important iconic YSZ, yttria-stabilized zirconia, we now argue that there is a feedback-loop involving thermal sublimation of mobile O-sublattice, creating the vacancies VO<sub>2</sub><sup>+</sup> (e-donors), to shift the Fermi level above the charge-transition level, CTL (EF > ECTL). This triggers the charge-state change of the Zr-vacancies, VZr<sup>0</sup> → VZr<sup>4</sup>-, reducing its hopping barrier, and giving it higher diffusivity, which thus accelerates its dynamics and overall speeds up the kinetics of sintering.

### [NCM4-1 | 15:30] Invited Talk

Van der Waals gate stack engineering for high-performance 2D electronics: Chul-Ho Lee(Seoul National University)

Gate stack engineering has been pivotal for aggressive scaling in modern CMOS technologies, enabling high-performance and low-power transistors through superior interface quality and precise electrostatic control [1]. However, achieving these requirements in 2D semiconductor-based devices remains challenging due to difficulties in forming high-quality gate dielectrics. In this talk, recent progress and key issues in gate stack engineering for 2D transistors will be discussed. Specifically, a gate-dielectric-less van der Waals Schottky-gated metal-semiconductor field-effect transistor (MESFET) utilizing pinning-free metal gates [2], and metal-oxide-semiconductor FETs (MOSFETs) and ferroelectric-based Fe-FETs employing interlayer-assisted dielectric integration will be presented. [1] Y. H. Kim and C.-H. Lee et al., *Nature Electron.* 8, 770 (2025). [2] Y. H. Kim and C.-H. Lee et al., *Adv. Mater.* 36, 2314274 (2024).

### [NCM4-2 | 15:55] Invited Talk

Future Technologies Based on Mimicking Nature with Control of Charge, Spin, and Heat: Paul S. Weiss(University of California,)

**Keywords:** Interfaces, self-assembly, polarizability, chirality, thermal conductivity

Many interactions and processes in nature operate at low energy and with critical energy balance, enabling repeated cycling and highly efficient transport. Inspired by these processes, we try to understand them, and to replicate them in synthetic systems. The



energies involved are well below those of visible photon energies; thus, we predominantly use tunneling spectroscopies and imaging to probe them. If we could replicate such systems in our devices, we could save most of the energy required to run them. If we could mimic biochemical cycling, we could develop efficient recycling at large scales rather than the extremely labor- and energy-intensive processes of today. We look for underlying principles and what we are currently missing in our understanding. Two of the areas we are exploring are spin conservation in chiral molecules and the roles of polarizability in biological, and now synthetic, systems. Taking this perspective has already led to novel discoveries and inventions, including thermal control with orders of magnitude improvements, in scale, speed, and effect.

**[NCM4-3 | 16:20] Invited Talk**

Electrochemical Synthesis and Modification of Carbon-Based Materials: Sun Hwa Lee\*(Institute for Basic Science)

*Keywords:* Electrochemistry, carbon material, synthesis, functionalization

I present electrochemical methods for the synthesis and modification of various carbon-based materials. We first discuss the electrochemical synthesis of well-aligned carbon nanowalls on single crystal metal foils in molten salts. This method offers an alternative to traditional vapor deposition techniques that often result in randomly oriented nanowalls, allowing for greater control over material architecture. The presentation will detail the growth mechanism of these well-aligned carbon nanowalls. Additionally, we will explore nitrogen (N) doping of the carbon nanowalls and the crucial role played by the sacrificial oxidation layer of the substrate in influencing this doping process. Next, we introduce covalent functionalization by organic molecules of single-crystal, single-layer graphene directly on its Cu(111) foil substrate. This eliminates the need for typical transfer processes, allowing us to study the inherent reaction behavior of pristine graphene without the common interferences and contamination associated with transfer steps. Thus, I present the versatility of electrochemical methods in the synthesis and modification of carbon-based materials, opening doors for future research and applications in various fields. This work is supported by Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

## NEW-HORIZON: 첨단항공엔진 소재·부품 자립화 심포지엄

Room 3층 한라A, 4월 29일

**[첨단1-1 | 10:20] 초청강연**

첨단항공엔진 소재부품 기술개발 추진계획: 이선혜(산업부)

**[첨단1-2 | 10:45] 초청강연**

국내 항공 산업 육성 위한 소재부품 개발 추진계획: 이광병(우주항공청)

**[첨단1-3 | 11:15] 초청강연**

항공기용 소재부품 국산화 실적과 소재시장 활성화를 위한 제언: 정유인\*(한국항공우주산업)

Keywords: 항공, 소재, 국산화

항공기용 소재는 도입 후 30년 이상 장기간 사용되는 항공기의 운용 특성을 고려해서 소재 개발 및 적용 시 매우 높은 수준의 신뢰성을 근간으로 하는 감항인증 기준을 충족함을 보여야 한다. 이러한 제약으로 인해 2020년 이전까지 국내에서 개발된 항공기는 모든 소재를 해외 제조사에 의존하였으며, 이로 인해 국내 항공소재시장은 침체될 수 밖에 없었다. 그러나 코로나 사태를 겪으면서 국내 항공산업의 발전을 위해서는 소재 국산화가 필수임을 알게 되었고, 이후 국내 소재업체, 연구기관, 시험평가기관, 체계업체가 연합하여 소재 국산화를 추진하였다. 이를 통해 국산 소재를 국내 개발 항공기에 적용할 수 있었으며, 또한 해당 실적을 바탕으로 해외 완제기 업체에 국산 소재를 수출하는 가시적인 성과를 올릴수 있었다. 그러나 지속적인 품목 확대를 통한 국내 소재 시장 활성화를 위해서는 소재 생산 역량 확대가 필요한것으로 판단되며, 해당 설비 및 장비 구축에 소요되는 비용과 향후 가동율을 고려하였을 때, 이는 특정 업체의 단독 투자가 아니라 정부 주도의 협력 체계의 구축을 바탕으로 우주항공산업 발전로드맵과 연계하여 진행되어야 할 것으로 판단된다.항공기용 소재는 도입 후 30년 이상 장기간 사용되는 항공기의 운용 특성을 고려해서 소재 개발 및 적용 시 매우 높은 수준의 신뢰성을 근간으로 하는 감항인증 기준을 충족함을 보여야 한다. 이러한 제약으로 인해 2020년 이전까지 국내에서 개발된 항공기는 모든 소재를 해외 제조사에 의존하였으며, 이로 인해 국내 항공소재시장은 침체될 수 밖에 없었다. 그러나 코로나 사태를 겪으면서 국내 항공산업의 발전을 위해서는 소재 국산화가 필수임을 알게 되었고, 이후 국내 소재업체, 연구기관, 시험평가기관, 체계업체가 연합하여 소재 국산화를 추진하였다. 이를 통해 국산 소재를 국내 개발 항공기에 적용할 수 있었으며, 또한 해당 실적을 바탕으로 해외 완제기 업체에 국산 소재를 수출하는 가시적인 성과를 올릴수 있었다. 그러나 지속적인 품목 확대를 통한 국내 소재 시장 활성화를 위해서는 소재 생산 역량 확대가 필요한것으로 판단되며, 해당 설비 및 장비 구축에 소요되는 비용과 향후 가동율을 고려하였을 때, 이는 특정 업체의 단독 투자가 아니라 정부 주도의 협력 체계의 구축을 바탕으로 우주항공산업 발전로드맵과 연계하여 진행되어야 할 것으로 판단된다.

**[첨단1-4 | 11:35] 초청강연**

항공엔진 기술 발전과 소재 및 부품 개발의 전략적 중요성: 이홍철\*(한화에어로스페이스)

Keywords: 항공엔진, 추력대중량비, 연료소모율

항공엔진은 항공기 성능과 안전성을 좌우하는 핵심 시스템으로 추력대중량비, 연료소모율, 고신뢰성이라는 상반된 요구를 동시에 만족해야 한다. 이러한 기술 발전의 중심에는 극한 운용 환경을 견디는 첨단 소재와 이를 정밀하게 구현하는 핵심 부품 기술이 존재한다. 본 논문에서는 항공엔진 기술 발전의 흐름을 고찰하고 그 과정에서 소재와 부품 개발이 항공기 성능, 비행 안전, 그리고 수명주기 비용이라는 핵심 지표에 어떻게 기여하고 있는지 설명하였다. 항공엔진 기술의 경쟁력은 설계 기술을 넘어 소재와 부품의 신뢰성에서 결정된다. 또한 상대적으로 항공엔진의 소재와 부품 개발에는 많은 비용과 시간이 소요되지만 일단 개발이 되면 세대를 넘어 축적되는 전략 자산이 된다. 따라서 지속적이고 체계적인 소재와 부품 중심의 기술 축적이 항공엔진 기술 발전의 핵심임을 강조하였다.

**[첨단2-1 | 14:00] 초청강연**

첨단 항공엔진 소재부품 국산화 개발 로드맵 및 상생 전략: 손인수\*(한화에어로스페이스)

Keywords: 항공엔진, 가스터빈, 소재부품, 국산화, 신뢰성, 산학연 협력, 상생

첨단 항공엔진 개발 계획이 수립되면서 이의 성공적인 개발을 위해 핵심 소재부품의 기술자립화는 가장 시급히 해결해야 할 과제입니다. 첨단 항공엔진 소재부품의 성공적인 개발 및 이를 통한 글로벌 공급망 진입을 위해, 국내 항공엔진 설계 및 개발사인 한화에어로스페이스의 첨단항공엔진 개발 전략과 소재 국산화 그리고 국내 개발 생태계 상생 전략에 대해서 발표하고자 한다.

**[첨단2-2 | 14:20] 초청강연**

항공용 대형 구조재 및 엔진 소재 국산화 성과와 자립화 비전: 신정호\*(세아창원특수강), 김수택\*(세아창원특수강), 장창범\*(세아항공방산소재)

Keywords: 우주항공산업, 항공엔진, 초내열합금, 소재국산화

우주항공 산업의 패러다임이 민간 주도의 'Space 4.0'으로 전환됨에 따라, 핵심 소재의 기술 자립화는 국가 산업 경쟁력을 결정짓

는 필수 과제가 되었습니다. 특히 항공기 엔진은 소재 비중이 전체의 50~60%를 차지하고 있어, 선진국의 수출 규제 및 글로벌 공급망 불안정에 대응하기 위한 국산화 개발이 매우 시급한 실정입니다. 그간의 기술 개발은 정부 주도의 국책 과제를 통해 엔진의 핵심 부위인 'Hot Section'에 적용되는 니켈기(Ni-base) 초내열합금의 국산화 과제를 성공적으로 수행해 왔습니다. 엔진 무게의 약 47%를 점유하는 니켈 합금의 청정성을 확보하기 위해 VIM, ESR, VAR 등 고도화된 정련 공정을 최적화하였으며, 이를 통해 Waspaloy, IN718, IN625 등 고부가가치 제품 제조 기술을 확보해왔습니다. 또한, 기체 구조물의 핵심인 고강도 알루미늄(Al) 합금 분야에서는 항공기 Wing spar와 같은 대형 단조품의 경우, 그간 100% 수입에 의존하던 것을 With Korea 컨소시엄 구성을 통한 기술력으로 국산화 개발을 완료하는 성과를 거두었습니다. 향후 비전은 향후 비전은 단순한 소재 제조를 넘어선 '첨단 금속 소재 테크 기업'으로의 퀀텀 점프입니다. 중장기 로드맵에 따라 2세대 단결정(SX) 주조재 및 차세대 엔진 코어 부품용 소재 개발을 가속화하여 대한민국이 세계 7대 우주강국으로 도약하는 데 소재 국산화에 중추적인 역할을 수행하고, 글로벌 시장에서의 소재 주권을 확고히 해 나갈 것입니다

### [첨단2-3 | 14:40] 초청강연

**항공엔진용 고온소재 개발 현황:** 최백균\*, 도정현, 정중은, 이상원, 김인수(한국재료연구원)

**Keywords:** 항공엔진, 고온소재

항공기 엔진은 고온에 노출되므로 여러 종류의 고온재료가 적용된다. 엔진의 작동온도가 높아지면 효율과 추력이 향상되어 기체의 성능도 향상되므로 엔진의 온도를 높이기 위한 노력들이 지속되어 왔다. 엔진에서 터빈에 진입되는 가스의 온도는 초내열합금의 녹는점 보다 높기 때문에 이를 견디게 하기 위해 고온부품 내외부에 냉각공기를 흘려주게 되는데 이는 엔진의 효율에 영향을 미치게 된다. 온도 수용성이 더 높은 소재를 사용하게 되면 엔진의 작동온도 향상 효과 뿐 아니라 냉각공기 감소로 인한 효율 향상도 기대할 수 있게 된다. 엔진 성능의 핵심은 사용되는 재료가 고온 환경에 얼마나 잘 견디는가에 좌우될 수 있으므로 우수한 효율의 항공엔진의 국산화를 위해서는 높은 온도에서 견딜 수 있는 고온재료의 개발이 필수적이다. 본 발표에서는 이러한 흐름에 맞추어 국내외 고온소재 개발 현황에 대해 소개하고자 한다.

### [첨단2-4 | 15:00] 초청강연

**항공 산업용 타이타늄합금 개발 현황 및 발전 방향:** 홍재근\*, 김재혁, 양준하, 이상원, 박찬희, 염종택(한국재료연구원)

**Keywords:** 타이타늄, 항공산업

타이타늄합금은 고비강도, 고내식 등의 특성으로 항공우주, 첨단바이오, 수소 등 전략산업에 활용되고 있고, 각 산업에서 요구되는 타이타늄합금의 물성은 해당 산업의 환경에 부응하는 특성이 발현되어야 한다. 최근 항공 산업용 타이타늄합금 관련해서는 콜드 드웰 피로(cold dwell fatigue) 파단에 영향을 미치는 마이크로텍스처 영역(MTRs : Microtextured regions) 제어를 위한 기술개발이 미국과 유럽을 중심으로 이루어지고 있다. 국내에서도 항공용 회전체 부품에 사용되는 타이타늄합금은 프리미엄 품질 등급(PQ ; Premium Quality) 타이타늄 제조 요건에 충족되는 기술 확보가 필요하다. 국내 항공산업 밸류체인 완성을 위해서는 타이타늄합금 및 고온용 금속소재의 국산화가 필수적으로 요구된다. 이를 위해서는 국내 타이타늄합금 소재 제조 기업에서 항공급 고청정 용해기술, 물성 DB 확보와 항공인증 취득 등이 요구된다. 또한, 지속적으로 제기되어온 타이타늄 원소재 공급망 이슈 해결 및 선순환이 가능한 생태계 조성을 위해서는 PAM/EBM 용해기술 활용을 통한 저비용 고청정 재자원화 기술개발이 필요하다. 본 발표에서는 항공용 타이타늄 합금개발, 타이타늄합금 업사이클링 기술에 대한 정보를 소개하고 관련 연구 결과를 공유하고자 한다.

### [첨단3-1 | 15:40] 초청강연

**첨단항공엔진용 고청정 모합금 개발기술 현황 및 발전방안:** 김홍균\*, 권혁주, 최규창, 정창근((주)한스코)

**Keywords:** 첨단항공엔진, 고청정 모합금, 진공용해, 진공정련, 초내열합금, 타이타늄합금, 고강도강

본 논문에서는 첨단항공엔진 개발 및 핵심부품 제작에 필수적으로 소요되는 고청정 모합금 개발과 관련된 국내외 기술현황 및 발전방안에 대하여 검토하고자 하였다. 미국을 비롯한 선진외국에서 개발하여 실용 항공엔진에 적용 중인 초내열합금, 타이타늄합금 및 고강도강 등 주요 핵심소재를 대상으로 항공용 소재로서의 안정적인 특성 확보에 필수적인 고청정 모합금 제조를 위한 진공용해 및 진공정련 등 핵심 공정기술 현황을 살펴보고, 공정별 주요 결함 및 발생 억제를 위한 공정기술 및 모합금 특성 최적화를 위한 공정변수 제어방안에 대하여 검토하였다. 또한, 최근 관심이 집중되는 국내 첨단항공엔진 개발과 관련하여 항공용 핵심 소재·부품 개발 및 국내 생산기반 구축을 위한 몇 가지 발전방안에 대하여 논하였다.

### [첨단3-2 | 16:00] 초청강연

**첨단 항공엔진 가스터빈 고온부품 기술개발 현황:** 정의석\*, 권석환(한국로스트왁스(주))

**Keywords:** 가스터빈, 블레이드, 노즐, 단결정

항공기용 가스터빈 엔진은 높은 추력과 연료 효율을 확보하기 위해 연소가스 온도가 지속적으로 상승하고 있으며, 이에 따라 터빈 블레이드, 베인, 연소기 라이너 등 고온부품의 성능과 신뢰성이 엔진 성능을 좌우하는 핵심 요소로 자리 잡고 있다. 이러한 고온부품은 복잡한 내부 냉각 구조와 정밀한 형상 구현이 요구되므로 진공정밀주조(Vacuum Precision Casting) 기술이 필수적인 제조 공정으로 활용되고 있다. 특히 Ni, Co계 초내열합금 기반의 진공정밀주조품은 현재 상용 항공기 엔진의 주력 기술로 매우 중요하게 자리 잡고 있다. 항공기용 가스터빈 고온부품 정밀주조 기술은 단순 형상 구현을 넘어, 고온 기계적 특성 향상과 미세조직 제어를 중심으로 발전해 왔다. 초기의 등방성 다결정 주조 방식에서 발전하여, 현재는 방향성 응고(Directionally Solidified, DS) 및 단결정(Single Crystal, SX) 주조 기술이 주류를 이루고 있다. 방향성 응고 주조는 결정립을 응력 방향으로 정렬시켜 크리프 수명과 고온

강도를 향상시키며, 단결정 주조는 결정립계를 제거함으로써 고온 크리프, 열피로, 산화 저항성을 획기적으로 개선한다. 이러한 기술은 고압 터빈 블레이드와 같이 극한 환경에 노출되는 부품에 필수적으로 적용되고 있다. 글로벌 항공엔진 제조사 및 소재 기업들은 이미 단결정 정밀주조 기술을 상용화 단계까지 발전시켜 고성능 항공엔진에 적용하고 있다. 반면, 국내에서는 항공기 엔진 핵심 부품의 해외 의존도를 낮추기 위해 진공정밀주조 기술을 바탕으로 국산화를 진행중에 있다. 향후 항공기용 가스터빈 고온부품 정밀주조 기술은 고온 한계 극복을 위한 초내열합금 고도화, 공정 자동화 및 디지털화, 신뢰성 기반 설계 기술을 중심으로 발전할 것으로 전망된다. 이러한 기술 발전은 차세대 항공엔진의 고효율·저연비·고신뢰성 달성에 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다.

### [첨단3-3 | 16:20] 초청강연

**첨단 항공엔진 초내열합금 형단조품 개발현황:** 이기영\*, 권용혁, 주경준, 김종식((주)케이피씨엠)

**Keywords:** 초내열합금, 터보팬 엔진, 근사정형, EVS, Critical Parts

단련재 초내열합금(Wrought Superalloy)는 화학조성의 구성에 따라 감마프라임( $\gamma'$ )에 의한 석출경화를 일으키는 합금과 Co에 의한 고용강화를 일으키는 합금 등으로 분류되어, 650°C 이상의 고온 내산화 환경에서 크리프저항성(Creep Resistance) 및 높은 피로강도(Fatigue Strength)를 동시에 요구받고 있다. 본 과제에서는 16, 000lbf 첨단 항공엔진의 디스크 및 블리스크 Critical Parts 적용 가능성이 높은 단련재 초내열합금 빌렛과 근사정형 형단조 부품의 EVS(Engineering Vender Substantiation)수요가 인증을 위한 국산화 일괄라인 공정의 선행연구 내용을 소개하고자 한다.

### [첨단3-4 | 16:40] 초청강연

**첨단 항공엔진 경량 초고온내열 세라믹 복합재 개발과 성과:** 김정일\*, 임동원((주)테크카본)

**Keywords:** 세라믹 복합재, 첨단항공엔진, 초고온 복합재료, SiC 섬유, SiC 매트릭스

항공우주 및 방위 산업의 비약적인 발전에 따라, 엔진의 열효율 극대화와 기체 경량화를 위한 혁신적인 소재 도입이 필수적인 과제로 대두되고 있다. 세라믹 기질 복합재(Ceramic Matrix Composites, CMC)는 1970년대 로켓 추진 시스템을 위해 초기 개발된 이래, 기존 금속 초합금(Superalloys)의 내열 한계를 극복할 수 있는 유일한 대안으로 주목받고 있다. 본 발표에서는 항공엔진의 연소 환경 및 고온 구조 부품에 적용 가능한 CMC의 핵심 특성인 초고온 내열성, 저밀도 경량성, 그리고 단일 구조 세라믹의 취성을 극복한 손상 허용(Damage Tolerance) 기술에 대해 논의한다. 특히 국내 CMC 기술 개발의 선두에 있는 테크카본(DACC Carbon)의 지난 30년간의 연구 실적을 바탕으로, 브레이크 시스템에서 추진체 구조물에 이르기까지의 산업화 과정을 고찰한다. 또한, 차세대 항공엔진 소재의 핵심인 고분자 유도 SiC 섬유(Polymer-derived SiC fibers) 제조 공정과 개발현황을 소개한다. 또한 이런 SiC 섬유로 제작된 SiC/SiC 복합재의 제작공법과 최신 개발 현황을 소개한다. 이를 통해 CMC 소재의 시스템 설계부터 공정 최적화, 그리고 실질적인 응용 중심 요구 사항(Application-driven requirements)에 대한 논의를 통해서 한국형 CMC 기술의 진화 방향을 고찰해보해보고자 한다.

### [첨단3-5 | 17:00] 초청강연

**첨단 항공엔진 적용을 위한 열차폐코팅 공정 기술:** 최현준\*, 박정남, 박창연((주)단단), 김진형, 김기근(국방과학연구소)

**Keywords:** 열차폐코팅, 용사코팅, EB-PVD

국산 항공엔진 개발은 국가 안보 역량 강화, 항공우주 산업 경쟁력 확보, 기술 주권 확립 등의 전략적 목표 달성을 위해 추진되어야 할 핵심 국가 기술 과제이다. 첨단항공엔진으로 명명된 고성능 항공엔진의 전주기 독자 기술 체계 구축은 도전적인 과제이나 정부, 산업계, 연구기관, 학계 등이 다양한 협력 구조를 이루고 국산 엔진 개발 체계 구축을 위해 노력하고 있다. 고온화·고출력화되는 터빈 부품의 열적 안정성과 수명 확보를 위해 고내열 소재를 적용한 고신뢰성 부품의 확보가 필요하며, 고온 운전 환경에서 금속 부품의 내열 한계를 극복하고 운용환경에서의 엔진 신뢰성 확보를 위한 핵심 기반 기술로서 열차폐 기술의 적용이 필수적이다. 본 발표에서는 고신뢰성 항공엔진용 열차폐 코팅(Thermal Barrier Coating, TBC)의 확보를 위한 열용사 코팅 및 EB-PVD의 공정의 변수 변화에 따른 다양한 코팅층의 특성을 비교하고 반복 고온 노출 시험(Furnace Cycle Test)을 실시하여 내구성을 확인하였다. 본 연구는 대한민국 정부(산업통상자원부 및 방위사업청) 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. (협약번호 UM24308RD3)

## 제103회 철강기술심포지엄

Room 3층 한라B, 4월 29일

### [기술-1-1 | 09:40] Keynote

국가인공지능 전략과 제조 AX: 철강 산업의 미래: 최재식\*((주)인이지, KAIST)

Keywords: 산업AI, AX, 철강, XAI

철강 산업은 대한민국 산업 발전을 견인해 온 기반 산업이자 국가 안보의 핵심 자산입니다. 그러나 최근 글로벌 탄소 규제 강화와 저가 수입재 확산으로 산업 생태계는 중대한 전환기에 직면해 있습니다. 특히 국내 온실가스 배출의 약 17.8%를 차지하는 철강 산업에서 탈탄소화는 선택이 아닌 생존 전략입니다. 본 강연에서는 정부의 국가 인공지능 전략에 발맞춰 추진 중인 철강 공정 자율 제조 지능화 사업의 현황과 비전을 소개합니다. 나아가 철강 산업 내 AI 예측 기술을 통한 AX(AI Transformation) 사례를 중심으로 제조 AX를 통해 인공지능이 에너지 효율을 최적화하고 탄소 배출을 제어하는 자율 제조 체계로의 전환 사례를 공유하며, AI 기반 녹색 철강 산업의 미래 전략을 제시합니다.

### [기술-1-2 | 10:20] Keynote

비디오로부터 학습하는 휴머노이드: VLA 모델의 물리세계 적응과 온디바이스 가속화: 임화섭\*(한국과학기술연구원)

Keywords: VLA, 휴머노이드, 비디오 학습, 물리세계, 온디바이스

최근 인공지능 기술의 발전은 정해진 규칙을 따르는 기존 로봇 제어 방식을 넘어, 시각(Vision)과 언어(Language)를 행동(Action)과 결합한 VLA(Vision-Language-Action) 모델을 통해 스스로 학습하는 휴머노이드 시대를 앞당기고 있습니다. 본 발표에서는 사람의 방대한 작업 비디오 데이터를 활용하여 로봇의 행동 지능을 구현하는 최신 기술 동향과 이를 실제 물리 환경에 성공적으로 전이하기 위한 핵심 요소들을 제시합니다. 특히, 2차원 비디오 데이터가 갖는 한계를 극복하고 실제 로봇 하드웨어의 동역학적 특성을 반영하는 물리세계 적응(Physical Adaptation)의 중요성을 강조합니다. 아울러, 거대해지는 인공지능 모델을 제한된 자원을 가진 로봇 엣지 디바이스에서 효율적으로 구동하기 위한 온디바이스 가속화(On-Device Acceleration) 전략을 소개합니다. 이를 통해 소프트웨어(AI)와 하드웨어(Robot)의 융합이 가져올 미래 제조 및 서비스 로봇의 발전 방향을 제시하고자 합니다.

### [기술-1-3 | 11:00] Keynote

Physical AI 시대, 로봇은 어떻게 산업을 재정의하는가: 정현준\*(한국로봇융합연구원)

Keywords: Physical AI, Robotics

생성형 AI와 대규모 파운데이션 모델의 발전은 텍스트와 이미지 이해를 넘어, 이제 물리 세계에서의 행동 생성으로 확장되고 있다. 이러한 흐름 속에서 등장한 Physical AI는 로봇이 환경을 인지하고, 언어적 지시를 이해하며, 상황에 맞는 행동을 스스로 계획·수행하도록 하는 차세대 지능 패러다임이다. 본 강연에서는 Physical AI의 개념적 배경과 기술적 구조를 정리하고, Vision-Language-Action(VLA) 모델과 월드모델 기반 접근이 로봇 지능에 어떤 변화를 가져오는지 설명한다. 특히 제조 및 산업 현장의 비정형 환경을 중심으로, 데이터 수집과 학습 전략, 시뮬레이션과 실환경 전이(sim-to-real), 물리 제약을 반영한 모델링, 안전성과 신뢰성 확보 문제 등 실제 적용에서 마주하는 핵심 과제를 다룬다. 또한 Physics-Informed 접근과 학습 기반 제어의 융합 가능성을 논의하며, 기업 관점에서의 도입 전략과 향후 산업 생태계 변화 방향을 제시하고자 한다.

### [기술-2-1 | 14:00] 초청강연

제조 AI 모델 학습에서의 데이터 한계와 대응 방법: 이종석\*(한국과학기술원)

Keywords: 제조인공지능, 기계학습, 신뢰성, 형상제약, 물리정보신경망

제조 현장에서 수집되는 데이터는 본질적으로 불확실성이 크며, 이를 고려하지 않은 단순한 데이터 기반 학습은 실제 공정 적용에 한계를 가집니다. 특히 제조 AI는 예측 성능뿐 아니라, 결과의 일관성과 물리적 타당성을 함께 만족해야 활용될 수 있습니다. 본 발표에서는 실제 프로젝트 경험을 바탕으로, 데이터 불확실성이 모델 학습과 현장 적용에 어떤 문제를 야기하는지 사례를 들어 설명합니다. 또한 이러한 한계를 극복하기 위해, 제한된 데이터 환경에서도 안정적으로 학습할 수 있는 모델 설계 및 학습 전략을 소개합니다.

### [기술-2-2 | 14:30] 초청강연

제조 도메인의 품질/생산성/안전 특화 AI 개발 사례와 시사점: 김기훈\*(부산대학교 / Pusan National University)

Keywords: 인공지능, 제조, 품질, 생산성, 안전

최근 Vertical AI와 Domain-specific Language Model 등 특정 도메인에 특화된 인공지능 기술이 주목받고 있다. 이러한 접근은 범용 인공지능에 비해 도메인 지식을 효과적으로 반영함으로써 성능과 운영 효율성 측면에서 우수한 결과를 보이기 때문이다. 본 발표에서는 제조 산업의 핵심 영역인 품질, 생산성, 안전 관련 특화 인공지능의 최신 개발 사례들을 소개한다. 또한 사례별 분석을 통해 제조 특화 인공지능의 개발 및 도입 과정에서 고려해야 할 주요 기술적 사항을 도출한다. 본 발표에서 제시하는 사례들과 시사점은 향후 제조 특화 인공지능을 개발하거나 현장에 적용하고자 하는 연구자 및 실무자에게 보다 효과적이고 성공적인 인공지능 개발 및 도입을 위한 유용한 참고 자료가 될 것으로 기대된다.

**[기술2-3 | 15:00] 초청강연****제조 AI 기술의 한계점과 극복 방향:** 윤종필\*(한국생산기술연구원)**Keywords:** 자율제조, 인공지능, 결합검사, 설비진단

제조업에서 인공지능(AI)은 품질 검사, 설비 진단, 공정 최적화 등 다양한 영역으로 빠르게 확산되며 제조 경쟁력 강화를 위한 핵심 기술로 주목받고 있다. 그러나 실제 제조 현장에서는 데이터 부족과 불균형, 공정 및 설비 간 이질성, 모델의 일반화 한계, 설명 가능성과 신뢰성 요구 등으로 인해 인공지능 기술의 적용과 확산에 어려움이 존재한다. 본 강연에서는 제조업에서의 인공지능 적용 현황과 주요 사례를 통해 기술적 성과와 함께 현장에서 마주한 한계와 도전 과제를 분석한다. 또한 데이터 중심 AI, 제조 도메인 특화 모델, 디지털 트윈 기반 학습과 검증 등 제조 AI 적용을 위한 실질적인 해결 방안에 대해 논의하고자 한다.

**[기술2-4 | 15:20] 초청강연****구매하는 AI와 직접 개발하는 AI:** 이창선\*(인하대학교), 이상철((주)캠지컨설팅)**Keywords:** 제조 인공지능, 생산-검사 통합 AI, 인과 예측 AI, 체험 지식, 논리 지식, 지식 조립, KAMG

최근 제조 현장에서는 AI 도입이 빠르게 확산되고 있으나, 개발 단계에서는 우수한 성능을 보이던 AI 모델이 실제 현장 적용 시에는 성능 저하를 보이거나 의사결정에 활용되기 어려운 사례가 빈번하게 보고되고 있다. 이러한 문제는 단순한 데이터 품질이나 알고리즘 선택의 문제가 아니라, AI가 적용되는 문제의 범위와 구조, 그리고 그 안에 도메인 지식과 인과 관계가 적절히 반영되었는지 여부와 밀접하게 관련되어 있다. 현재 제조 AI는 크게 생산 AI, 검사 AI, 그리고 생산-검사 통합 AI로 구분할 수 있다. 설비 예지 정비나 단일 공정 이상 감지와 같은 생산 AI, 그리고 표면 내부 결함 판정을 수행하는 검사 AI는 대부분 단일 설비 또는 단일 공정을 대상으로 하며, 데이터 패턴 기반의 귀납적 상관 관계 학습에 의해 충분한 성능을 확보할 수 있다. 이러한 AI는 도메인 지식이나 인과 구조의 개입이 상대적으로 적어 ROI 관점에서 구매를 통해 도입하는 것이 합리적이다. 그러나 생산 조건 변화에 따른 품질 변동, 안전 전조 변수, 환경 지표를 동시에 다루는 생산-검사 통합 AI의 경우 문제의 성격이 근본적으로 달라진다. 이 영역에서는 복수 공정과 설비가 하나의 시스템으로 연결되며, 변수 간의 인과 관계에 대한 이해 없이는 안정적인 예측이 불가능하다. 단순한 데이터 상관 모델은 학습 데이터 범위를 벗어나는 순간 성능이 급격히 저하되며, 현장 조건 변화에 취약한 한계를 가진다. 따라서 생산-검사 통합 AI는 구매만으로 해결될 수 없으며, 도메인 전문가가 개발과 활용의 주체가 되는 직접 개발형 AI 접근이 요구된다. 이 과정에서 중요한 문제는 지식에 대한 인식이다. 현재 일부 제조 기업에서는 도메인 전문가의 체험 기반 지식을 ‘암묵지’로 간주하고 이를 논리 지식으로 변환하려는 데 과도한 노력을 기울이고 있다. 그러나 말하기나 걷기와 같은 인간의 기본 능력이 설명 가능하지 않더라도 명백한 지식인 것처럼, 대부분의 체험 지식은 본질적으로 논리 지식화가 불가능하다. 논리 지식화가 가능한 영역은 이미 상당 부분 정리되어 있다. 영미권에서 tacit knowledge(암묵지)는 불완전한 지식이 아니라 경험을 통해 획득된 정당한 지식으로 인식되며, 지식은 설명이 아니라 능력으로 정의된다. 이에 따라 본 연구에서는 ‘암묵지’라는 용어 대신 ‘체험 지식’을 사용하여 지식 개념을 복원할 필요성을 제기한다. 체험 지식과 논리 지식은 상하 관계가 아닌 동등한 차원의 지식이며, 각자의 강점을 유지한 채 조립될 때 비로소 현장에서 안정적으로 작동하는 인과 예측 AI를 구현할 수 있다. 이러한 문제의식 하에, 본 연구에서는 도메인 전문가의 인과 논리 지식과 AI의 데이터 기반 체험 학습 능력을 조립하여 인과 예측 모델을 생성하는 KAMG(Knowledge-Assembled Model Generation) 접근을 제안한다. 또한 인과 지식을 사람 간에 공유하기 위해 사용되는 인과 서술 문서, 인과 지식을 기계학습 모델에 전달하기 위한 인과 엑셀 문서, 그리고 대형언어모델(LLM)에 전달하기 위한 인과 표기 문서를 소개하고, 이들 문서가 지식 조립 과정에서 수행하는 역할과 상호 연계를 논의한다. 이를 통해 제조 현장에서 실제로 활용 가능한 생산-검사 통합 AI 구축을 위한 현실적인 방향성을 제시하고자 한다.

**[기술2-5 | 15:40] 초청강연****철강제조기업의 디지털 전환(DX)과 Physical AI: 8년의 혁신 여정과 본질적 대응 전략:** 채민석\*(세아창원특수강)**Keywords:** 철강산업, AI, Physical AI

철강제조기업의 디지털 전환(DX)과 Physical AI: 8년의 혁신 여정과 본질적 대응 전략 1. 서론: Physical AI의 부상과 금속 제조업의 실질적 전개 방향 최근 CES에서 공개된 휴머노이드 로봇 아틀라스(Atlas)가 시사하듯, 전 세계 산업계의 화두는 실재하는 물리적 환경에 지능을 부여하는 Physical AI로 급격히 이동하고 있습니다. 이재용 삼성전자 회장, 젠슨 황 NVIDIA CEO, 정의선 현대차그룹 회장의 이른바 ‘치맥 회동’은 AI, 반도체, 그리고 모빌리티라는 이중 산업 간의 결합이 더 이상 선택이 아닌 생존을 위한 필연적 흐름임을 상징적으로 보여줍니다. 반도체나 전자 기기 조립 등 자동화가 완숙 단계에 접어든 산업과 달리, 철강 및 금속 제조 현장의 Physical AI 도입에 있어 고유의 본질적 한계를 지닙니다. 중후장대한 장치 산업 특유의 고정된 생산 경로와 열악한 공정 환경은 데이터 확보의 불연속성을 초래하기 때문입니다. 따라서 철강 DX의 성패는 단순한 기술 도입이 아니라, ‘데이터 연결을 통한 새로운 가치 창출’이라는 본질적 아키텍처의 재정의에 달려 있습니다. 이는 2~3년 내의 단기 성과가 아닌, 최소 10년 이상의 지속적 투자가 선행되어야 하는 고도의 전략적 여정입니다. 2. 본론 (1) 철강 산업의 난제와 기회: GPU 경제와 우주항공 소재의 국산화 철강 산업은 GPU 수요 폭증으로 대변되는 AI 경제권의 확대 속에서 새로운 기회 요인을 맞이하고 있습니다. • 시장 기회 및 소재 Needs의 다변화: AI 전용 데이터 센터의 폭발적 건립은 고속 전력 케이블과 반도체 FAB용 EP관, STS VIM-VAR 봉강 등의 수요를 견인하고 있습니다. 특히 전력 수요 급증에 대응하기 위한 SMR(소형 모듈 원자로) 소재 및 발전용 내열 터빈 소재는 향후 핵심 수익원이 될 것입니다. • 우주항공 전략 (K-Space): KF21이 국산 기술의 결정체임에도 불구하고 엔진 소재의 대부분을 외산에 의존하고 있는 현실은 소재 기업에 무거운 과제를 던집니다. 보잉이나 에어버스의 높은 인증 장벽을 우회하기 위해, SpaceX와 같이 자체 규격을 지향하는 ‘K-Space’ 밸류체인을 구축하여 소재 국산화와 독자적 생태계 확보를 병행해야 합니다. • 현장의 기술적 고착점: • 표준화 아키텍처의 부재: 방대한 고객 규격을 제조 설계 및 공정 표준(Control Plan)으로 치환하는 작업의 복잡성.

• 측정의 불확실성 극복: 가열로 내부의 분위기 온도와 실제 소재 온도 사이의 편차, 전기로 내 화학 반응의 간접 센싱 한계 등 물리적 측정의 불투명성. • 연속 공정의 데이터 정합성: 일관 생산 공정에서 재료의 길이 방향 매칭(Lengthwise Matching)과 최종 제품에서 제강 Heat까지 이르는 추적성(Traceability) 확보의 기술적 난제. (2) AX의 정의와 산업 구조의 변혁: 스타벅스 사례의 시사점 AX(AI Experience)는 단순한 자동화를 넘어 도메인 지식과 IT 기술이 결합된 'Connected, Data-driven, Intelligent'의 상태를 의미합니다. • 스타벅스 사이렌 오더를 통한 구조적 통찰: • 입력 및 처리: 고객의 음료 욕구를 디지털 데이터화하여 연결하고, 대기 시간 분석 및 개인화 마케팅을 통해 구매 패턴을 학습했습니다. • 결과와 변혁: 주문 대기 불편 해소로 매출이 30% 신장되었을 뿐만 아니라, 글로벌 트렌드 예측을 통한 원가 절감을 달성했습니다. 특히 단순 노동자가 아닌 전문 인력을 양성하는 '바리스타 스쿨' 설립으로 이어지며 산업의 인적 구조 자체를 재편했습니다. • 철강 현장으로의 전이: 이는 철강업에서도 동일하게 적용됩니다. '고객 지향 소재 데이터'를 설계, 생산, 품질, 설비 상태와 유기적으로 연결함으로써, 최적의 납기와 품질을 보장하는 스마트 팩토리의 실질적 메커니즘을 완성해야 합니다. (3) 데이터 통합 플랫폼: Data Forge와 숙련 지능의 인자화데이터의 연결 없이 AI 모델링에만 집중하는 것은 사상누각에 불과합니다. 전 공정 데이터를 흐르게 하는 통로(Conduit)로서 Digital Platform의 구축은 필수적입니다. • L1-ERP 통합 및 인자화(Digitization): 센서(L1), 제어(L2), MES, ERP로 이어지는 수직적 데이터 통합뿐만 아니라, 현장 고숙련자가 보유한 '감(Feeling)'과 노하우를 데이터로 인자화하여 모델에 반영하는 작업이 핵심입니다. • 고부가가치 업무 전환: 데이터 완결성이 확보될 때 비로소 설비 예지 정비, 품질 예측, 실시간 생산 경로 변경 등 공정 유연성을 극대화하는 고도화 업무 수행이 가능해집니다. (4) 인적 자원 역량: 데이터 리터러시(Data Literacy)의 내재화-Physical AI 시대의 주역은 기술이 아닌, 기술을 다루는 사람입니다. 데이터를 읽고 분석하며 이를 의사결정에 투영하는 데이터 리터러시 역량은 조직의 필수 생존 역량입니다. • 전문가 육성 및 문화 확산: 체계적인 데이터 교육 커리큘럼을 운영하고, 사내 데이터 분석 경진대회를 통해 현장 도메인 지식과 데이터 분석 역량이 결합된 '시민 데이터 과학자'를 양성해야 합니다. 이는 고숙련자의 경험 지식을 디지털 자산으로 전환하는 속도를 가속화할 것입니다. 3. 결론: 8년간의 혁신 여정과 향후 제인국내외 선도적 수준의 DX 활동을 전개해 온 지난 8년의 여정은 '보이지 않던 데이터를 연결하여 새로운 가치를 찾아내는 과정'이었습니다. 철강 제조 기업은 이제 단순한 소재 공급자(Supplier)의 지위를 넘어, 제품 설계 초기 단계부터 수요 기업과 데이터를 공유하고 공동 개발하는 '데이터 연결 기반의 파트너'로 거듭나야 합니다. 철강 Physical AI의 본질은 단순 자동화를 넘어, 전 공정 데이터의 완결성(Data Integrity)과 도메인 지식을 결합하여 가치 사슬 전체를 유기적 지능체로 전환하는 것입니다. 이를 통해 물리적 제조 환경의 한계를 극복하고, 초격차 경쟁력을 보유한 지능형 제조 기업으로의 진화를 완수해야 할 것입니다.

### [기술3-1 | 16:10] 초청강연

**열연 품질, 공정연계 제조AI 기술개발 방향:** 이준형(포스코 기술연구원)

제철산업에서의 제품개발은 오랜 기간 동안 금속 야금 이론에 기반한 실험적 방법론에 의존해 왔다. 제품의 품질에 대한 확실한 보증과 현장 생산 체계를 마련하기 위해서는 지금도 여전히 실험적인 검증(실험실, 시험생산 등)은 필수적인 과정이다. 하지만, 제품의 품질에 대한 고객의 요구사항은 더욱 엄격해지고 있고, 이미 포화 상태인 철강제품의 시장 경쟁력 확보를 위해서는 품질, 생산 그리고 원가를 동시에 고려한 고부가가치 제품 개발 방법론이 필요하다. 당시는 이러한 배경하에 실험 외에도 이론 기반 물리야금 모델과 인공지능(AI)을 활용한 데이터 기반 재질예측 모델링 기술들을 개발해 왔으며, 제품개발에 적극적으로 활용하고 있다. 다만, 개발된 예측 기술을 통해 제안된 후보 합금 및 조업조건들로 구성된 시험생산 강종들은 실제 현장 투입 시에 예상하지 못했던 많은 문제들에 직면할 가능성이 크다. 시장 경쟁력을 확보하기 위한 제품개발은 단지 제품의 재질측면 뿐만 아니라 공정 관련 품질(형상, 치수 등)과 생산성(직진 압연성 등)을 동시에 만족시킬 수 있어야 하는데, 기존에 생산되지 않았던 조업 영역의 신제품 일수록 현장에서는 안정적인 조업 운용에 어려움을 겪는 경우가 많다. 따라서, 제품측면 품질과 공정측면 품질 및 생산 안정성이 동시에 고려된 제품개발이 필요하다. 품질과 공정 이상 발생시 담당자는 수많은 데이터를 조회하고 분석하여 이상 발생의 원인규명과 조치에 많은 노력을 기울이게 된다. 본 발표에서는 제품 개발을 위한 재질 예측 모델링 방법론과 그 한계점을 고찰하고, 제품 및 공정 측면 품질과 생산 안정성을 동시에 고려한 기술의 중요성을 논의한다. 아울러 품질 및 공정 이상 상황을 자동으로 모니터링하고 분석하여, 적절한 조치 방향을 제시하는 시스템 개발에 대한 계획을 소개하고자 한다.

### [기술3-2 | 16:30] 초청강연

**Decision AI를 활용한 철강 물류 혁신: 수학적최적화 기반의 슬라브 야드 관제 지능화:** 신규현\*, 이명호, 김학용, 김주찬(엘지씨엔에스), 노지성, 소현진(포스코홀딩스)

**Keywords:** AI, Decision AI, 수학적최적화, 슬라브 야드, 관제 지능화, 의사결정, 스케줄링

1. 배경 및 목적 철강 제조 공정의 핵심 물류 거점인 슬라브 야드는 복잡한 제약 조건과 실시간으로 변동하는 조업 상황으로 인해 운영 효율 극대화가 매우 어려운 영역입니다. 기존의 경험 기반 혹은 단순 규칙 기반 관제는 최적의 의사결정을 내리는 데 한계가 있으며, 이는 물류 병목 현상과 불필요한 이적 작업의 증가로 이어집니다. 본 발표에서는 이러한 난제를 해결하기 위해 수학적최적화(Mathematical Optimization) 기술을 의사결정 AI(Decision AI) 관점에서 재해석하고, 이를 현장에 적용하여 관제 지능화를 구현한 사례를 공유합니다. 2. 주요 내용 및 방법론 본 연구에서는 슬라브 야드 내 크레인과 대차의 가동 효율을 높이고 적치 공간을 최적으로 관리하기 위한 수리 모델링 기반의 의사결정 엔진을 구축하였습니다. - 단위 물류의 수리 모델화: 연주 수입, 정정 장입/수입, 압연 장입 등 주요 공정별로 이동할 슬라브 단위와 최적의 적치 위치를 결정하는 최적화 모델을 설계하였습니다. - 통합 물류의 수리 모델화: 전체 야드 관점에서 이동 자원(크레인, 대차)의 할당과 작업 우선순위를 고려한 최적의 작업 순서를 결정하는 통합 최적화 모델을 구현하였습니다. - 지능형 관제 시스템: 위 모델들은 실시간 조업 데이터를 바탕으로 최적의 판단을 내리는 의사결정 AI로 작동하며, 단순 자동화를 넘어선 판단 중심의 지능형 관제를 실현하였습니다. 3. 성과 및 시사점 현재 본 최적화 엔진을 적용



한 차세대 시스템으로의 전환이 진행 중이며, 실제 작업 환경을 재구성하여 분석한 결과 야드 내 이적률 감소와 작업 효율 개선 등 주요 운영 지표에서 유의미한 향상을 확인하였습니다. 최근 많은 기업이 AI를 적극 도입하고 있으나, 이를 실질적인 비즈니스 가치로 연결하는 데 어려움을 겪고 있습니다. 본 사례는 수학적최적화가 AI 도입의 실질적 가치를 증명하는 핵심 도구임을 보여주며, 이를 통해 제조 물류 분야의 AI 전환(AI, AI Transformation)을 위한 기술적 통찰과 실질적인 적용 방안을 제시하고자 합니다.

### [기술3-3 | 16:50] 초청강연

선석 스케줄링 최적화: 박재우\*(현대제철)

Keywords: 스케줄링, 인공지능, 항만 운영, 제철원료

본 연구는 원료하역부두의 선석계획 수립을 데이터 기반으로 표준화하고 자동화하여 항만 운영의 효율성과 안정성을 확보하기 위한 것이다. 기존에는 작업자의 경험과 수작업에 의존하여 계획 편차와 체선료 증가, 자원 낭비 등의 문제가 반복되었다. 이를 해결하기 위해 Ant Colony Optimization 알고리즘을 활용한 최적화 모델을 개발하고, 입항 선박, 기상, 설비 상태 등 다양한 변수와 제약조건을 반영한 시뮬레이션 기반 의사결정 체계를 구축하였다. 분석 결과, 동일 조건에서도 계획에 따라 수역원의 체선료 차이가 발생하며, 선석계획 수립시간 70% 이상 단축이 기대된다. 향후 원료 반입·저장고·공급망까지 확장하여 스마트팩토리 구현을 목표로 한다.

### [기술3-4 | 17:10] 초청강연

연속 도금 공정의 AI 자율제조 구현(Implementing a continuous plating process using AI-based autonomous manufacturing):

심경태\*(KG스틸)

Keywords: 용융 아연도금, 전기주석 도금, 열처리, 인공지능, 자율제조

철강 표면처리 공정은 열처리 온도, 성분비, 공정 속도, 강종 등 다변수 조건의 실시간 제어가 요구되는 고난이도 제조 환경으로, 전통적으로 숙련 작업자의 경험과 판단에 의존해 왔다. 그러나 작업자 피로도 증가, 공정 변수 제어의 한계, 실시간 품질 예측 불가능성 등의 문제로 인해 생산 품질의 일관성 확보와 에너지 절감에 제한적이었다. 본 내용은 연속도금공정 라인에서 AI 기반 자율제조 전환의 주요 개발 사례인 연속용융아연도금 라인(CGL, Continuous Galvanized Line) 열처리 자율제어, 연속 어닐링 라인(CAL, Continuous Annealing Line) 소재 열처리, 전기주석도금(TP) 공정 자율화로 이어지는 단계적 구현 사례를 제시하고자 한다. AI 자율제조를 구현함에 있어 인지(Perception)·판단(Decision)·행동(Action)의 3단 AI 아키텍처를 일관되게 적용하여 소재 열처리에서 도금 공정으로, 단일 라인에서 전공정으로 확장하는 스케일업 전략을 구현하고자 하였다. CAL에서는 일정 주기로 공정상태를 수집(인지)하고 시계열 모델이 목표한 시간의 제품 물성을 예측(판단)하여 가열로 최적 온도를 자율 설정(행동)하며, 강화학습 기반으로 에너지 사용량을 가중치로 반영한 보상 함수를 통해 더 최적화된 제어 패턴을 도출하였다. CGL에서는 가열로 존별 온도 예측 제어에 설명가능 인공지능을 반영하여 제어 변경에 대한 원인과 이유를 보완함으로써 딥러닝의 학습 조건을 보완함으로써 최적 조건 도출을 진행하였다. 상기의 단위 공정 라인의 자율제조 구현 사례를 기반으로 전기주석 도금라인의 전공정 AI 자율제조의 파운데이션 모델을 개발중이다. 본 사례를 통해 중견 철강사가 AI 기술을 단계적으로 내재화하여 자율제조 체계를 구축한 실증 사례로, 인지·판단·행동 아키텍처는 철강 산업뿐 아니라 연속 공정 기반 제조업 전반의 자율제조 전환에 적용 가능한 범용 모델로 확장될 수 있을 것이다.

### [기술3-5 | 17:30] 초청강연

용선 운반 기관차 자율주행 기술 개발: 이형용\*(POSCO)

Keywords: 용선운반, 자율주행, 기관차 제어, 장애물 인지, 판단

본 강연은 제철소 내, 고로 공장에서 제강 공장까지 쇳물을 이동시키는 용선 운반 기관차의 무인화 및 자율주행 기술에 관한 강연입니다. 용선 운반 기관차의 자율주행 기술은 퇴직 인력에 대비한 운영 효율화, 인당 생산성 향상, 철도내 안전 리스크 절감 및 안전성 확보를 위하여 연구되고 있습니다. 기관차의 자율주행 기술은 일반적인 자율주행 기술인 인지, 판단, 제어 기술, 관제-인터랙션 기술을 포함하고 있으며, 현재 포스코에서는 기관차를 활용한 자율주행 기술을 연구, 개발하고 있습니다. 기관차 인지 기술은 기관차의 위치를 추정하는 측위 기술과 기관차의 탑재된 센서 및 외부 센서를 이용한 객체 인식 기술로 나뉩니다. 측위 기술의 경우, 다중 센서 데이터의 융합을 통해 위치 정확도를 향상시켰고, 객체 인식 기술은 AI 학습 모델을 이용하여 인지 영역 구분 및 객체 인식 기술을 개발하였습니다. 기관차 판단 기술은 인지 기술 기반으로한 제철소 환경에 맞는 룰 기반 의사결정으로 기관차의 주행 가능 여부, 주행 환경 등을 판단합니다. 기관차 제어 기술은 기관차의 주행 데이터를 기반으로 하여 기관차의 물리 모델을 구성하고, 기관차의 주행 패턴을 활용한 속도 계획 생성 및 속도 추적 제어 알고리즘을 포함하고 있습니다. 또한 전체 시스템 무인화를 위한 기관차와 TLC 체결 및 체결해제 기능을 개발하였습니다. 기관차 관제-인터랙션 기술은 현재 제철소에서 사용 중인 관제 시스템과의 연동 및 태블릿 PC를 활용한 자율주행 상태 모니터링 시스템을 의미합니다. 개발된 기관차 자율주행 시스템은 기능 테스트 및 실제 시나리오 주행 테스트를 통하여 인지, 판단, 제어, 관제 통합 시스템에 대한 성능을 검증하였으며, 제철소 내 시험구간을 선정하여, 자율주행 기술 적용을 계획하고 있습니다.

## 재료강도

Room 4층 400, 4월 29일

### [재료강도 1-1 | 09:00]

**Cu 첨가와 다단계 시효 조건이 6xxx계 Al 합금의 기계적 특성 및 부식·석출 거동에 미치는 영향:** 홍현빈, Raj Narayan Hajra(국립한밭대학교), 신은주(한국원자력연구원), 김정한(국립한밭대학교), 김재황(한국생산기술연구원), 조훈휘\*(국립한밭대학교)  
**Keywords:** Al alloys, Cu addition, artificial aging, electrochemical behavior, precipitation behavior

세계적으로 온실가스 배출을 줄이기 위한 노력이 지속되고 있으며, 이로 인해 연비 규제가 강화되고 경량 소재에 대한 수요가 증가하는 추세이다. 그 중, 6xxx계 Al 합금은 철강 대비 높은 비강도와 가공성, 내식성으로 차량 및 항공기의 경량 소재로 널리 사용되고 있다. 차량 및 항공기 이용의 안전성을 위해 Cu를 첨가하여 강도 특성을 향상시키는 연구가 진행되었으나 내식성의 저하 문제가 대두되고 있다. 특히, 실제 자동차 제조 공정에서는 운송 등 실질적인 이유로 용체화 처리 후 자연 시효가 불가피하게 진행되는 경우가 있으며, 이로 인한 부정적인 효과를 최소화하기 위한 인공 시효 공정에 대한 연구가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 강도와 내식성의 최적화를 위해 다양한 열처리 조건 및 Cu 첨가 조건에 따른 6xxx계 Al 합금의 미세조직 및 전기화학적 거동을 분석한다. Cu의 첨가 여부에 따른 Al 합금을 제작하고, 인공 시효 조건을 다양하게 설정하였다. 전기화학 계측기(Potentiostat)를 사용하여 전기화학적 거동을 측정하였으며, 인공 시효 시간이 증가할수록 높은 부식 속도를 보였으나 Cu가 첨가된 경우 반대의 양상을 보였다. 반면, 자연 시효가 추가된 경우에는 단일 시효 대비 부식 속도가 전반적으로 크게 증가하였다. 광학 현미경(Optical Microscope, OM)과 레이저 주사 현미경(Confocal Laser Scanning Microscope, CLSM)으로 부식된 시편의 단면과 표면을 관찰하였으며 부식 형태와 깊이를 확인하였다. 시차 주사 열량계(Differential Scanning Calorimetry, DSC)와 투과 전자 현미경(Transmission Electron Microscope, TEM), 소각 중성자 산란 장치(Small Angle Neutron Scattering, SANS)를 이용하여 각 조건별 석출물에 따른 미세조직 거동 차이를 비교하고 분석하였다.

### [재료강도 1-2 | 09:15]

**Effect of Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification on Precipitation Behavior and Mechanical Properties of Rolled AZ91 Magnesium Alloy:** Won Pyo Hong, Gun Woong An(Kyungpook National Univ.), Jongbin Go(Tsukuba Univ.), Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National Univ.)

**Keywords:** AZ91 alloy, Ultrasonic nanocrystalline surface modification, Age hardening, precipitation, Mechanical properties.

In highly alloyed Mg alloys, mechanical strength can be effectively enhanced through precipitation strengthening. Among Mg-Al-based alloys, Mg-9Al-1Zn (AZ91) exhibits a strong age-hardening response associated with the formation of  $Mg_{17}Al_{12}$  precipitates during aging. However, coarse discontinuous precipitates (DPs) formed along grain boundaries can act as crack initiation sites and significantly degrade ductility. Therefore, promoting fine intragranular continuous precipitates (CPs) while suppressing DP formation is essential for achieving a superior strength-ductility balance. Pre-deformation prior to aging is known to increase dislocation density and stored strain energy, thereby accelerating precipitation kinetics and favoring CP formation over DPs. Ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) is a severe surface plastic deformation technique that introduces ultrafine grains, high dislocation densities, deformation twins, and compressive residual stresses in the near-surface region. In this study, UNSM was applied to rolled AZ91 Mg alloy sheets prior to aging at 200 °C to control precipitation behavior and enhance mechanical properties. The aging response and mechanical performance of UNSM-treated specimens were compared with those of the as-rolled condition using microhardness measurements and uniaxial tensile testing. The results demonstrate that UNSM effectively suppresses DP formation, promotes fine CP formation, and improves age-hardening efficiency and tensile properties.

### [재료강도 1-3 | 09:30]

**Enhanced fatigue properties of extruded SEN6 magnesium alloy via ultrasonic nanocrystalline surface modification:** Hyung Jun Kim, Du Hyeon Woo(Kyungpook National Univ.), Jun Ho Bae(Korea Institute of Materials Science), Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National Univ.)

**Keywords:** SEN magnesium alloy, Ultrasonic nanocrystalline surface modification, Surface microstructure, High-cycle fatigue, Fatigue strength

SEN (stainless, environment-friendly, and nonflammable) magnesium alloys are Mg-Al-based alloys containing small additions of Ca and Y (<1 wt.% each), which provide improved ignition resistance and corrosion performance. For their broader industrial application, ensuring mechanical reliability under cyclic loading is essential. High-cycle fatigue (HCF) behavior in wrought Mg alloys is typically governed by surface-initiated fatigue crack formation, suggesting that effective control of surface-layer microstructure and residual stress is critical for fatigue enhancement. Ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) is a severe surface plastic deformation technique that induces grain refinement to the nano/ultrafine scale, increases surface hardness, and introduces beneficial compressive residual stress. In this study, UNSM was applied to an extruded SEN6 (Mg-6Al-0.9Zn-0.3Ca-0.2Y, wt.%) alloy, and the relationship between surface microstructural characteristics and HCF behavior was systematically investigated. Stress-controlled

uniaxial fatigue tests demonstrated a pronounced improvement in both finite fatigue life and fatigue strength in the UNSM-treated specimens compared with the untreated condition. Fractographic analyses further revealed delayed surface crack initiation and suppressed early-stage crack propagation after UNSM treatment. These results demonstrate that UNSM effectively strengthens the surface layer of extruded SEN6 Mg alloys, reduces surface-dominated fatigue damage, and significantly enhances HCF performance.

#### [재료강도 1-4 | 09:45]

Improvement in high-cycle fatigue properties of extruded SEN10 magnesium alloy through post-extrusion heat treatment: Je Hyeong An(Kyungpook National University), Joung Sik Suh, Jun Ho Bae(Korea Institute of Materials Science), Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National University)

**Keywords:** SEN magnesium alloy, Extrusion, Heat treatment, High-cycle fatigue, Second-phase control

Magnesium alloys are attractive for lightweight structural applications owing to their low density and high specific strength; however, extruded Mg alloys with high Al content often exhibit degraded high-cycle fatigue (HCF) strength. This degradation is primarily attributed to coarse  $Mg_{17}Al_{12}$  phase particles and second-phase clusters, which serve as preferential sites for fatigue crack initiation. In this study, an extruded SEN10 alloy ( $Mg-9.7Al-0.1Zn-0.14Mn-0.20Ca-0.14Y$ , wt.%), which exhibits enhanced ignition resistance and corrosion performance, was subjected to heat treatments to improve both tensile and HCF properties through controlled modification of second-phase characteristics. A two-step solution (T4; 420 °C for 4 h followed by 450 °C for 8h) was employed to dissolve coarse  $Mg_{17}Al_{12}$  phases and particle clusters, followed by artificial aging (T6) at 180 °C to introduce fine precipitates and restore strengthening. 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 (stress ratio of -1) were conducted along the extrusion direction. The results demonstrate that appropriate post-extrusion heat treatment effectively tailors second-phase characteristics, leading to a balanced improvement in tensile strength and fatigue resistance in high-Al SEN alloy extrudates.

#### [재료강도 1-5 | 10:00]

Effect of Bi content on microstructure and mechanical properties of Mg–Bi–Al alloys extruded at high temperature and high speed: To Hai Ha Nguyen, Gun Woong An(Kyungpook National Univ.), Jeonghong Ha(Korea Institute of Industrial Technology), Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National Univ.)

**Keywords:** Mg–Bi–Al alloy, High-speed extrusion, Bi content, Microstructure, Mechanical properties

Mg–Bi–Al alloys have recently attracted significant attention because their capability for high-temperature, high-speed extrusion has been demonstrated, enabling the fabrication of extruded products at reduced extrusion loads and with high productivity. In these alloys, Bi addition promotes the formation of a thermally stable  $Mg_3Bi_2$  phase, which effectively suppresses hot cracking under severe extrusion conditions, enabling the production of defect-free extrudates. The presence of  $Mg_3Bi_2$  particles also inhibits grain growth during extrusion and contributes to strengthening through particle-assisted mechanisms, resulting in a refined microstructure and enhanced mechanical properties. For practical and industrial applications, optimizing alloy composition is essential, particularly to clarify how variations in Bi content influence the fraction, distribution, and strengthening role of  $Mg_3Bi_2$  phases, as well as the associated microstructural evolution and mechanical response. In this study,  $Mg-xBi-2Al$  alloys ( $Bax_2$ ;  $x = 3, 5$ , and  $7$  wt.%) were fabricated by casting and homogenization, followed by high-temperature, high-speed extrusion at 400 °C with a die-exit speed of 42 m/min. To elucidate microstructural evolution immediately after exiting the extrusion die, both naturally air-cooled and water-quenched extrudates were examined, with particular emphasis on grain structure and texture development. Comprehensive microstructural characterization, combined with uniaxial tension and compression testing, was conducted to systematically assess the effects of Bi content on grain refinement, texture evolution, phase distribution, and mechanical properties. The results provide quantitative insight into the role of Bi in governing microstructure–property relationships and establish a robust basis for compositional design of Mg–Bi–Al alloys for high-temperature, high-speed extrusion applications.

#### [재료강도 1-6 | 10:15]

Significant Improvement in Ductility of High-Speed-Extruded Mg–Bi Alloys through Al Addition and Its Underlying Mechanisms: Gunwoong An, Seoung-yoon Yu, To Hai Ha Nguyen(Kyungpook National University), Jeong Hong Ha(Korea Institute of Industrial Technology), Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National University)

**Keywords:** Mg–Bi alloy, Al addition, High-speed extrusion, Ductility enhancement, Fracture behavior

Mg alloys are attractive lightweight structural materials owing to their low density and high specific strength; however, conventional Mg–Al and Mg–Zn-based alloys exhibit limited extrudability and are susceptible to hot cracking under high-speed extrusion, which constrains their industrial application. Mg–Bi-based alloys have recently emerged as promising alternatives, as the formation of a thermally stable  $Mg_3Bi_2$  phase enables crack-free extrusion even under severe processing conditions. Despite this advantage, extruded binary Mg–Bi alloys are known to suffer from intergranular fracture during room-temperature tensile deformation, leading to limited ductility. Previous studies have reported that Al addition to Mg–Bi alloys improves mechanical properties by altering fracture behavior, yet the underlying microstructural mechanisms remain insufficiently understood. Elucidating these mechanisms is essential for

establishing alloy design strategies that simultaneously ensure high extrudability and improved mechanical properties. In this study, Mg-xBi and Mg-xBi-2Al alloys ( $x = 3, 5, \text{ and } 7 \text{ wt.}\%$ ) were extruded at 400 °C with a die-exit speed of 42 m/min. The microstructure, tensile properties, and fracture behavior of the extruded alloys were systematically investigated, with particular emphasis on the roles of Bi content and Al addition in governing secondary phase distribution and fracture characteristics. The results provide fundamental insights into the mechanisms controlling fracture behavior and ductility in Mg-Bi-based alloys subjected to high-temperature, high-speed extrusion.

#### [재료강도2-1 | 10:40] 초청강연

**1.5GPa급 강재 용접금속의 내식성 및 수소취화 저항성에 미치는 합금 설계와 미세조직 특성의 상관성 연구:** 배규열\*, 한도경, 홍석현, 유윤하, 홍수직, 정연승, 황아인(포스코 기술연구원)

**Keywords:** 1.5GPa급 기가스틸, 용접금속, 내식성, 수소취화 저항성, 합금 설계, 미세조직 특성

본 연구에서는 1.5GPa급 마르텐사이트계 강재 용접부의 내식성과 수소취화 저항성에 대한 합금 설계 및 미세조직 특성의 상관성을 평가하였다. 용접부는 Nb 첨가(Ni-free) 성분계와 Nb 미첨가(3%Ni 첨가) 용접금속으로 제작하였으며, 내식성은 GMW14872 CCT 부식가속시험을 통해 부식 외관(녹발생 정도)과 부식 깊이를 측정하였다. Nb 첨가 용접금속은 장기(45cycle) 시험에서 부식깊이가 감소하여 내식성이 향상되었으며, Ti 첨가 시 Nb의 부식 저감 효과가 일부 상쇄되는 경향을 보였다. 수소취화 저항성 평가는 VDA238-201 규격을 기반으로 한 Step Load Test(SLT)로 수행하였으며, 0.1N HCl 수용액 환경에서 Nb 첨가(Ni-free) 용접금속의 파단응력이 Nb 미첨가(3%Ni 첨가) 용접금속 대비 약 8~15% 향상되었다. 이러한 개선은 유효 결정립 크기 감소로 인한 수소 분산 트랩 효과, 염산 환경에서의 내식성 증가로 인한 수소 발생량 및 부식깊이 저감, 그리고 비드 형상 개선에 따른 응력 집중 완화에 기인하는 것으로 판단된다. 종합적으로, Nb 미량 합금화는 1.5GPa급 초고강도 용접금속의 내식성과 수소취화 저항성을 동시에 개선할 수 있으며, 본 결과는 자동차 부품의 경량·고강도화 설계에서 용접부의 신뢰성 확보를 위한 합금 설계에 중요한 근거가 될 것으로 전망된다.

#### [재료강도2-2 | 11:05]

**Effects of Alloying Elements on the Microstructure and Mechanical Properties of Weld Metal in Overlap Joints of 1.0 GPa-Grade Complex Phase Steels:** Seok-Hyun Hong, Gyuyeol Bae\*(POSCO)

**Keywords:** AHSS, Complex phase (CP) steel, Gas metal arc welding (GMAW), Weld metal, fatigue

1 GPa-grade complex phase (CP) steels are increasingly applied in automotive components due to their excellent balance of strength, ductility, and crashworthiness. While the base metal properties of CP steels are well documented, the performance of weld metals remains a key factor in ensuring the structural integrity of welded joints. In this study, the mechanical properties of weld metals in 1 GPa-grade CP steel sheets were investigated, with a focus on comparing Ni-containing welds and Nb-Ti-containing welds. Gas metal arc welding (GMAW) was employed under controlled conditions to fabricate overlap joints. Three types of filler wires were employed: one with a tensile strength grade of 50 kgf/mm<sup>2</sup>, and two with a tensile strength grade of 80 kgf/mm<sup>2</sup> - one alloyed with Ni and the other alloyed with Nb (Ni free). Tensile tests were conducted to evaluate static strength, while tensile fatigue tests were performed to assess cyclic loading performance. Microstructural characterization of the weld metals was carried out using optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), and electron backscatter diffraction (EBSD). The results indicate that welds produced with 80 kgf/mm<sup>2</sup>-grade wires exhibited comparable high static strength, whereas their fatigue performance showed noticeable differences depending on the alloying strategy. These findings enhance the understanding of alloy design for weld metals in 1GPa-grade CP steels and provide guidance for selecting cost-effective compositions without compromising either mechanical or fatigue performance.

#### [재료강도2-3 | 11:20]

**고강도 라인파이프강의 내수소취성에 미치는 Nb 및 V 첨가의 영향:** 오동균, 정민섭(서울과학기술대학교), 이정훈, 이창희(포항산업과학연구원), 황병철\*(서울과학기술대학교)

**Keywords:** Linepipe steel, Microalloying element, Hydrogen embrittlement, Notch tensile strength

탄소중립 실현을 위한 수소 기반 에너지 시스템의 확산에 따라 수소를 안전하고 효율적으로 운송하기 위한 고압수소 운송용 라인파이프강 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 설치 효율 및 구조적 안정성 확보를 위해 고강도로 설계된 라인파이프강은 높은 전위 밀도와 다양한 내부 결함을 포함하게 되고, 수소 환경에서는 수소가 결함과 상호작용하여 강도와 연성이 저하되는 수소취성 현상이 발생할 수 있다. 이러한 문제를 저감하기 위해서는 적절한 미량합금원소 첨가와 공정 변수를 설정하여 수소의 확산 및 트랩 거동을 효과적으로 제어하는 미세조직 설계가 필수적이다. 특히 Nb 및 V 첨가에 의해 형성되는 MC 탄화물은 그 자체로 비가역적 수소 트랩 사이트로 작용하여 수소의 확산을 억제하며 국부적 집적을 완화할 수 있다. 또한 MC 탄화물은 고온에서 형성되어 공정 중에 미세조직적 결함의 특성을 변화시켜 수소취성에 복합적인 영향을 미칠 수 있어 내수소취성이 우수한 강재 개발을 위해서는 체계적인 이해가 필요하다. 본 연구에서는 Nb 및 V가 서로 다른 분율로 첨가된 고강도 API 라인파이프강을 3종 제조하였으며, 각 강재에 대해 전기화학적 수소 환경에서 수소 주입과 동시에 저속 변형을 시험을 수행하였다. 이로부터 내수소취성을 평가하고 파면 관찰 및 수소 트랩 거동 분석을 통해 미세조직과 내수소취성 간의 상관관계를 고찰하였다.

**[재료강도2-4 | 11:35]**

**Fe-Mn-Al-C 경량철강 주조재의 Ni 첨가에 따른 시효경화 거동:** 김치원(한국재료연구원), 홍현욱\*(국립창원대학교), 이창훈\*, 박성준(한국재료연구원)

**Keywords:** FeMnAlC, Lightweight steel,  $\kappa$ -carbide, Ni addition, B2

최근 탄소중립 이슈와 함께 민간겸용 수송기기 체계의 효율성 향상이 요구되면서 석출경화형 FeMnAlC 합금계 경량철강에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 경량철강의 기계적 성능 향상을 위해 Mo, Cr, Ni 등의 첨가 효과에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그러나 기존 연구는 주로 단조재에 집중되어 있으며, 복잡 형상 부품 제조에 적합한 주조재에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 본 연구에서는 Fe-30Mn-10Al-0.9C-0.5Si-1.5Mo(wt.%) 기반 경량철강 주조재에서 Ni 첨가에 따른 상변태 거동에 대해 연구하였다. 고용강화 및 석출거동 변화를 확인하기 위해 Ni를 1.5 wt.% (1.5Ni 합금) 및 3 wt.% (3Ni 합금) 첨가하였다. 주조 후 1050°C에서 2시간 용체화 처리한 결과, 두 합금 모두  $\gamma$ -matrix와 BCC 구조의 2차상으로 구성되었다. 특히 3Ni 합금에서는 Ni 첨가에 의해 규칙화된 BCC 구조의 B2 (NiAl) 및 DO<sub>3</sub> (Fe<sub>3</sub>Al) 상 형성이 촉진되었으며, 이에 따라 BCC 구조의 2차상의 분율이 증가하였다. 본 합금은 550°C에서 시효열처리를 통해  $\kappa$ -carbide ((Fe, Mn)<sub>3</sub>AlC) 석출을 유도하는 석출경화형 합금이다. 시효 시간에 따른 Ni 첨가 효과를 평가하기 위해 경도 변화를 측정하고, 1.5Ni 합금과 달리 3Ni 합금에서는 peak aging 없이 지속적인 경화 거동(continuous hardening)이 나타났다. 이는 Ni 첨가에 따른 상변태 거동의 변화와 관련되며, 열처리 과정에서 기존과 상이한 미세 석출물 분포가 관찰되었다. 따라서 본 연구에서는 새로운 석출상의 형성 및 성장 거동을 분석하고, 소성변형 시의 변형 거동을 해석함으로써 Ni 첨가가 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 논의하고자 한다.

**[재료강도2-5 | 11:50]**

**고질소 오스테나이트계 스테인리스강의 고온 변형 중 동적 재결정 거동 분석:** 문승현, 문준오\*(국립창원대학교), 정재석(두산에너지빌리티)

**Keywords:** 소형모듈원자로(SMR), HNSS, Dynamic Recrystallization(DRX), 고온 변형

최근 소형모듈원자로(SMR)는 대형 원자로 대비 향상된 안전성과 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 구조 재료는 우수한 기계적 특성과 내식성을 요구한다. 이러한 측면에서 고질소 오스테나이트계 스테인리스강(HNSS)은 최근 SMR 압력 용기의 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 HNSS에 대해 다양한 변형을 및 온도 조건에서 Gleeble 고온 압축 시험을 수행하였다. 고온 압축 시험에서 얻어진 유동 곡선 분석을 통해 HNSS의 DRX 거동을 분석하였다. 열간 변형 후 광학 현미경(OM), 주사전자현미경(SEM) 및 전자후방 산란회절(EBSD)을 활용하여 변형률과 온도에 따른 미세조직의 변화 및 동적 재결정 거동을 집중적으로 분석하였다.

**[재료강도3-1 | 14:00]**

**전류가열 기반 시효처리에 따른 Inconel 718 합금의 석출 거동 및 기계적 물성 연구:** 김이재, 이종호, 최동인(서울대학교), 이시환(한국재료연구원), 한홍남\*(서울대학교)

**Keywords:** Inconel 718, Electric current-assisted aging, Precipitation behavior, Microstructure evolution, Mechanical properties

Inconel 718 합금은 석출강화형 니켈계 초합금으로, 고온 강도가 우수하여 항공-우주 산업에서 널리 활용된다. Inconel 718 합금의 고온 강도는  $\gamma''$  및  $\gamma'$  석출물의 크기와 분포에 의해 결정되며, 이를 최적화하기 위해 두 온도에서 순차적으로 시효를 진행하는 2-step 시효처리가 일반적으로 활용되고 있다. 그러나, 이러한 2-step 시효처리는 수십 시간에 달하는 긴 공정 시간이 요구된다는 한계를 지닌다. 본 연구에서는 Inconel 718 합금에 전류가열을 적용한 시효처리를 수행하여  $\gamma''$  및  $\gamma'$  상의 석출 거동을 조절함으로써, 기존 일반가열 기반 시효처리 대비 단시간 내 우수한 강도를 구현하고자 하였다. 이를 위해, 여러 전류밀도 및 온도 조건에서 전류가열식 시효처리를 수행하였다. 주사전자현미경 및 투과전자현미경을 활용하여 시효처리된 시편들의 미세조직을 분석하여  $\gamma''$  및  $\gamma'$  석출물의 형상, 크기 및 분포를 확인하였으며, 이러한 미세조직적 특성과 기계적 물성과의 관계를 분석하였다. 그 결과, 전류가열식 시효처리가 석출을 가속화함으로써 단시간 내 우수한 강도를 갖는 Inconel 718 합금을 구현할 수 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로 최적화된 전류가열식 시효처리 공정 조건을 도출하였으며, 전류 인가가 석출물의 형성에 미치는 영향을 고찰하였다.

**[재료강도3-2 | 14:15]**

**알루미늄 아노다이징층에 대한 펄스 레이저 클리닝이 용접부 강도에 미치는 영향:** 이찬표, 박창규\*, 이준재, 강현식, 김해탄, 성연수(서울과학기술대학교)

**Keywords:** 각형배터리, 알루미늄, 아노다이징, 알루미늄, 펄스 레이저 클리닝, 레이저 용접, 용접부 강도

배터리 산업의 성장과 함께 각형 배터리 캔·캡에 적용되는 알루미늄 합금의 용접 공정 중요성이 커지고 있다. 특히 다양한 전해질 환경에서의 내부식성 확보를 위해 캔 및 캡 소재에 대한 아노다이징 공정 적용이 주목받고 있다. 또한 최근 ESS 분야에서 전면 수냉식 설비 도입이 확대되면서 냉각수 환경에서도 알루미늄 합금의 내부식성 요구가 증가하였고, 이에 따라 아노다이징 처리 알루미늄 합금의 적용 가능성 역시 높아지고 있다. 그러나 아노다이징 이후 표면에 형성되는 두꺼운 알루미늄 산화층은 레이저 용접 시 용융물 거동에 영향을 주어 용접부에 기공 및 결함을 형성하여 강도를 저하시키는 문제가 있다. 이를 개선하기 위해 기계적 연마나 화학적 용액 처리로 산화층을 제거할 수 있으나, 용접부만을 국부적으로 선택 제거하기 어렵고 공정 효율 측면에서도 제약이 따른다. 반면 레이저 클리닝은 펄스 레이저를 이용해 금속 표면의 오염물 및 산화층을 비접촉 방식으로 선택적으로

제거할 수 있어 이러한 한계를 보완할 수 있는 효율적인 표면처리 기술로 제시된다. 본 연구에서는 알루미늄 3003 합금의 아노다이징층을 레이저로 선택적으로 제거한 뒤 용접성을 평가하였다. 아노다이징 처리된 Al 3003 표면에 펄스 레이저를 조사하여 아노다이징층을 클리닝하고, 이후 그린 레이저를 이용해 맞대기 용접을 수행하였다. 이를 통해 표면 산화층 제거에 따른 용접 공정 안정성 및 접합 특성 변화를 비교·분석하였다. 레이저 파라미터가 클리닝 정도 및 용접성에 미치는 영향을 분석하기 위해 클리닝 후 주사전자현미경(SEM)을 통한 표면 및 단면 관찰과 EDS 분석, 그리고 표면 EPMA 분석을 진행하였고, 공초점 현미경을 통해 표면의 거칠기를 측정하였다. 용접성 평가는 레이저 용접 중 초고속 카메라 촬영을 통해 용융풀 거동을 관찰하고, 용접 후에는 용접비드 및 용접부 단면 분석과 EBSD 기반 미세조직 관찰을 진행하였다. 또한, 마이크로 비커스 경도 시험과 인장 시험을 통해 기계적 특성을 평가하였다.

#### [재료강도3-3 | 14:30]

**Investigation of Microstructure and Mechanical Properties in Pure Tantalum Processed by Friction Stir Spot Welding:** Hyo-joo Lee, Min-Ho Kim(Hanbat National University), Van Cong Phan(University of Ulsan), Min Cheol Jo, Keunho Lee, Leeju Park(Agency for Defense Development), Sung-Tae Hong(University of Ulsan), Hoon-Hwe Cho\*(Hanbat National University)

**Keywords:** Tantalum (Ta), friction stir spot welding, microstructure, mechanical properties

Friction stir spot welding (FSSW), a solid-state joining technique, is applied to pure Ta sheets. The tool rotation speed and plunge rate are held constant, while the plunge depth is varied to identify the optimal welding parameters. The fundamental welding behavior of Ta is elucidated by examining the microstructural and mechanical differences between the upper and lower regions of the single-metal joint. Dynamic recrystallization in the stir zone (SZ) is confirmed by electron backscatter diffraction (EBSD) analysis, with the average grain size reduced to approximately one-twentieth of that of the base metal. Vickers hardness testing verifies that this microstructural refinement results in increased hardness within the welded zone. The present study represents an initial systematic investigation of FSSW for Ta, highlighting its feasibility for high-integrity joining applications.

#### [재료강도3-4 | 14:45]

**Mn-Cu 합금의 부식 피로 거동에 미치는 해수환경 영향 분석:** 박준열, 목승민, 이준민(경상국립대학교), 김대경(한화오션), 김상식, 강성규\*(경상국립대학교)

**Keywords:** Mn-Cu alloy, High Cycle Fatigue, Corrosion, Microstructure

Mn-Cu 합금은 우수한 기계적 물성과 진동 감쇠 성능으로 인해 조선·해양 및 우주·항공 분야의 진동 및 소음 제어용 핵심 소재로 주목받고 있다. 최근 해양 부품 상용화가 확대되면서 공정 및 열처리를 통한 성능 최적화 연구가 활발히 진행되고 있으나, 부식과 반복 하중이 복합적으로 작용하는 환경에서의 부식 피로 거동에 관한 체계적인 연구는 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서는 주조된 Mn-Cu 합금을 대상으로 3.5 wt.% NaCl 수용액을 모사 해수 환경으로 사용하여 사전 침지 및 실시간 해수 노출이 피로 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 피로 시험 결과, 피로 저항성은 대기 중, 사전 침지, 실시간 해수 노출 순으로 유의미하게 감소하였다. 피로 시험 후 미세조직 분석을 통해 Mn-rich 영역에서의 선택적 부식을 확인하였으며, 부식층 분석(XPS) 결과 주요 부식 생성물은 Mn 산화물인 것으로 나타났다. 또한 해당 부식 영역을 기점으로 다수의 이차 균열이 발생하는 양상을 관찰하였다. 이러한 결과는 사전 침지에 의해 발생한 공식이 응력 집중원으로 작용하여 균열 개시를 촉진한 것으로 판단된다. 특히 실시간 해수 노출 환경에서는 반복적인 하중 인가로 인해 안정적인 부식 생성물 형성이 억제되면서 내부 Mn-rich 영역이 해수에 직접 노출되고, 이에 따라 부식 손상이 내부로 전파되어 피로 수명이 크게 감소한 것으로 분석된다. 본 연구 결과는 향후 Mn-Cu 합금 기반 해양 부품의 수명 예측과 내식성 향상 설계에 필요한 기초 자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.

#### [재료강도3-5 | 15:00]

**화학적 절단 공정으로 중형비가 균일한 SUS316L 단섬유 제조:** 염진석, 김권후\*(국립부경대학교)

**Keywords:** 가스 필터, 단섬유, SUS316L, 화학적 절단, 중형비

최근 첨단 기술 분야에서의 자국 우선주의 정책이 강화되면서, 반도체 산업 전반적으로 제품 공급망 안정성이 주요 과제로 대두되고 있다. 이에 따라, 필수 제품에 대한 제조 기술 국산화의 필요성이 대두되고 있는 상황이다. 반도체 가스필터 내 섬유는 기계적 절단 시 전단 응력에 의한 소성 변형으로 인해 불균일한 단면이 형성되고, 이는 국부적인 결함 발생 가능성을 증가시킨다. 본 연구에서는 화학적 절단 공정을 통해 중형비가 균일한 SUS316L 단섬유를 제조하고자 한다. 직경 2.5  $\mu\text{m}$ 의 장섬유로 실험을 진행하였다. 재결정 열처리 공정을 통해, 섬유 내부의 결정립이 길이 방향에 평행하게 배열되도록 유도하였다. 이후, 민감화 열처리 공정을 통해, 결정립 내부의 탄소 및 크롬 원자를 결정립계로 확산시켜 크롬탄화물을 형성시켰다. 열처리 공정을 완료한 섬유의 표면은 철 산화물이 형성된 상태이다. HF 기반 용액을 이용한 에칭 공정을 통해 철산화물을 제거하였으며, 크롬의 부동태화를 유도하기 위해  $\text{HNO}_3$  기반 용액을 사용하였다. 최종적으로, 증류수 세척 및 건조 공정을 통해 균일한 중형비의 단섬유를 회수하였다. 회수한 단섬유의 SEM 분석을 수행하였다. 단면 분석을 통해 화학적 절단 공정간 섬유 직경에 대한 영향을 확인하였으며, 측면 분석을 통해 중형비를 계산하였다. 단섬유들은 평균 10 내외의 중형비를 가지는 것으로 나타났다. EBSD 분석을 통해 화학적 절단 공정간 상변화를 분석하였다. 공정간 오스테나이트상이 유지되는 것을 확인하였다. 최종적으로, 중형비가 10 내외인 오스테나이트계 SUS316L 단섬유를 제조하였다.

**[재료강도3-6 | 15:15]**

**선재(Wire rod)용 탄소강 (0.2~0.6Cwt%)의 고온 압축 거동 및 열간압연 미세조직 분석**: 홍창완\*, 윤국태, 이락규, 김주엽, 서창희, 전효원(대구기계부품연구원), 손동민(주)세아창원특수강)

**Keywords**: Low-Carbon Steel, Wire Rod, High temperature Compression test, SEM-EBSD, Grain Refinement

자동차 경량화에 부합하기 위해 단일소재 간 부품 조립보다는 이종소재가 널리 쓰이는데 이종소재의 접합은 열물성 차이로 인해 일반 점용접 (Spot welding) 방식 보다는 하드웨어 기반의 기계적 체결방식이 적용되고 있다. Al-alloy, Steel, 복합재료 등 이종소재 간 체결 (접합)에 요구되는 다양한 연구 (체결소재 합금 설계, 열처리, 신선 가공, 접합부 파단 특성, 체결 공정 개발 등)가 필요하며, 본 연구에서는 자동차 다양한 기계적 체결공정 중 가장 대표적으로 사용되는 선재 (Wire rod)용 탄소강(0.2~0.6Cwt%) - (FDS, FEW, SPR, Rivet용 소재) 대해 알아보고자 하였다. 해당 소재는 Ingot (용해) - 원소재 Wire rod (Billet 열연) - 신선재 Wire (냉연, 피막) - 하드웨어 H/W (전조/단조/열처리/표면처리/절삭가공) 공정을 통해 생산된다. 그 중에서도 Wire rod는 Billet-선재 열연 공정으로 생산되는데 이는 일반 열연공정과 달리 고온에서 상당한 단면적 감소 (Billet → Wire rod, diameter : 5.50 ~ 7.50)에 따른 동적 재결정, Matrix (Grain) refinement, 불균일 조직 (Sub-grain, high-dislocation density) 등이 발생된다. 따라서 선재용 탄소강의 기지조직은 극심한 소성변형이 가해져 높은 전위밀도를 가지는 Martensite, Bainite, Ferrite, Pearlite, Residual austenite 복합조직으로, 가령 펄라이트 조직 내의 동적재결정, Sub-grain 구조, Cementite 체적율의 증가, Pearlite 층상 간격 및 블록의 미세화 등의 matrix의 미세조직 해석이 필수이며, 이는 곧 열간 가공성 향상을 위한 선재의 인장 강도 및 연성 최적화와 직결된다. 현재 국내 이종소재 기계적 체결 접합용 소재 시장은 100% 수입에 의존하는 상황이며, 해당 Wire rod (선재) 양산공정은 아직까지 국내에서 표준화, 정량화가 부족한 실정이며 소재 별 물성을 만족하는 합금 조성, 열간압연공정 및 열처리공정 최적화가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 탄소강 (0.2~0.6Cwt%) (FDS, FEW, SPR, Rivet) 소재의 열간 압연 모사를 하여 ① 고온 압축 거동 해석과 ② Wire rod (선재)의 열간 압연 미세조직 분석을 진행하였다. VIM으로 용해된 조성 변화 (탄소 및 탄화물 형성원소)에 따른 탄소강(0.2~0.6Cwt%) - (FDS, FEW, SPR, Rivet용 소재)에 대해 고온 압축 시험 (온도(°C) : 850, 950, 1050, 1150, 변형률 속도(/s) : 0.01, 0.1, 1, 10)을 진행하였으며 압축 강도(S-S curve), 균일 조직 및 동적재결정 및 변형 공정 지도 해석을 통해 고온 압축 거동을 해석하였으며, Wire rod의 열간 압연 미세조직 (grain size, dislocation-related sub-grain, grain-boundary structure, precipitation 등)을 조성별로 비교 분석하였다. Acknowledgement : 본 연구는 산업기술평가관리원의 소재부품기술개발 패키지형 사업 (RS-2024-00433210)의 지원을 받아 수행된 연구임.

**[재료강도4-1 | 15:40]**

**Physics-informed machine learning for stress-strain reconstruction from indentation via Kocks-Mecking-Estrin approach**:

Tae Young Go, Jeong Ah Lee, Jihye Kwon, Renhao Wu, Hyoung Seop Kim\*(POSTECH)

**Keywords**: Physics-informed machine learning, Kocks-Mecking-Estrin approach, indentation

Reconstructing the stress-strain behavior of metallic materials from nanoindentation experiments remains a longstanding inverse problem due to the complexity of plasticity mechanisms and the nonlinear nature of load-displacement (P-h) responses. In this study, we propose a novel framework that integrates physics-informed machine learning (PIML) and finite element modeling (FEM) to directly extract the constitutive parameters of the Kocks-Mecking-Estrin (KME) model from nanoindentation data. By systematically generating a diverse synthetic dataset of P-h curves via FEM simulations incorporating the KME model, we train a neural network to learn the inverse mapping from indentation response to the six constitutive parameters governing strain hardening and plastic flow. To reduce the computational burden associated with high-dimensional FEM sampling, we employ Latin Hypercube Sampling and sensitivity analysis, enabling efficient coverage of the KME parameter space with minimal simulations. The framework was validated using experimental nanoindentation and tensile testing on a metallic material, demonstrating strong agreement between AI-reconstructed and experimentally measured stress-strain curves. The trained model demonstrates high accuracy in recovering stress-strain curves across a range of deformation behaviors. This hybrid framework not only offers a fast and scalable alternative to traditional fitting methods but also paves the way for data-driven digital twins in indentation-based materials characterization. Compared to conventional iterative fitting approaches, the proposed method offers significant improvements in computational efficiency, automation, and mechanistic interpretability. This study demonstrates that physically guided machine learning can transcend traditional limitations of inverse materials characterization, offering a scalable, interpretable, and experimentally validated path toward non-destructive mechanical property extraction and digital twin integration

**[재료강도4-2 | 15:55]**

**적층 제조 AlSi10Mg 합금의 열처리 조건에 따른 석출 거동과 강화 기여 메커니즘 분석**: 한재연, 김준혁(국립창원대학교), 이지원, 조현철(두산에너지빌리티), 홍현욱\*(국립창원대학교)

**Keywords**: AlSi10Mg, Selective Laser Melting (SLM), Nanoscale precipitates, Heat treatment design, 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 주로 합금에 일반적으로 적용되는 T6 열처리와, 생산성 향상을 목적으로 열처리 시간을 단축한 Annealing 조건이 주로 적용되나, 이들 조건은 연신을 향상에는 효과적인 반면 as-built 대비 강도



가 크게 감소하는 한계를 가진다. 이에 따라 적층 제조재의 특성을 고려한 새로운 열처리 조건 설계가 요구된다. 본 연구에서는 SLM으로 제조된 AISi10Mg 합금을 대상으로 T6 및 Annealing 조건에서의 미세조직 변화와 상온 인장 특성을 고찰하였으며, 이를 바탕으로 강도 저하를 완화하면서 연신을 개선 효과를 확보하기 위한 신규 열처리 조건을 설계하였다. As-built 합금은  $\alpha$ -Al 결정립 (약 20  $\mu\text{m}$ )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  $\beta''$  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 나노 스케일 분석과 강화 기구별 강도 기여분의 정량적 평가를 통해 그 원인을 분석하였다. 본 연구로부터 적층제조 AISi10Mg 합금의 특성을 고려한 열처리 설계 전략 수립의 가능성을 제시하고자 한다.

#### [재료강도4-3 | 16:10]

**적층제조 Ni-Cr-Co-Fe-Al-Ti계 합금에서 공정 고유 석출상 셀 네트워크 기반 인장 변형 거동:** 박효진, 렌하우, 이재홍, 허윤옥, 이도원, 이지수, 김진규(포항공과대학교), 파라나즈 하프트랑(Northwestern University), 정상국, 이병주, 이동화, 김형섭\*(포항공과대학교)  
**Keywords:** 적층제조, 석출상

레이저 기반 적층제조(LAM)는 극한 환경용 Ni 기반 고엔트로피합금을 구현할 수 있는 혁신적 공정 경로를 제공한다. 기존  $\gamma'$  강화형 합금은 석출상 형성을 위해 후열처리를 필요로 하지만, 이러한 공정은 미세조직 제어와 기계적 특성의 균형 확보에 한계가 있다. 본 연구에서는 LAM 공정 조건에 의해 공정 중 생성된 석출상 셀 네트워크를 갖는 Ni-Co-Cr-Fe-Al-Ti-V-Ta MPEA를 설계하였다. 반정합 석출상 계면을 통한 슬립 전달과 배압 경화(back-stress hardening)가 활성화되며, 그 결과 항복강도 1 GPa 이상과 20% 이상의 균일 연신율을 동시에 확보하였다. 이러한 공정 고유(process-intrinsic) 미세조직 형성 경로는 별도의 후처리 없이 구현 가능하며, 계면 매개(interface-mediated) 변형 메커니즘을 기반으로 강도와 연성을 동시에 향상시킬 수 있음을 보여준다. 본 연구는 LAM 기반 합금 설계에서 계면 정합성 공학이 고강도·고연성 합금 개발의 핵심 원리임을 제시한다.

#### [재료강도4-4 | 16:25]

**열적 및 기계적 조건에 따른 나노다공성 금 리가먼트 재부착 거동과 기계적 물성 분석:** 홍석원, 김영훈(UNIST), 전한솔(계명대학교), 김주영\*(UNIST)

**Keywords:** 기계적 물성(mechanical properties), 나노다공성 금(nanoporous gold), 나노압입시험(nanoindentation), 리가먼트 네트워크(ligament network), 열-기계적 조건(thermo-mechanical condition), 연결성(connectivity), 재부착 거동(reattachment behavior)

나노다공성 금(nanoporous gold, np-Au)은 탈합금(dealloying) 공정을 통해 형성되는 나노스케일 리가먼트(ligament)와 기공(pore)이 3차원적으로 연결된 복연속적(bicontinuous) 개방형(open-cell) 구조를 갖는 다공성 금속이다. 그러나 이러한 구조는 형성 과정의 특성상 무작위적이고 공간적으로 불균일한 네트워크를 가지며, 동일한 상대밀도(relative density) 조건에서도 구조적으로 고립된 리가먼트가 존재하여 실제 하중 전달(load-bearing)에 기여하는 리가먼트의 비율은 제한될 수 있다. 일반적으로 나노다공성 금을 포함한 개방형 다공성 금속의 기계적 물성은 Gibson-Ashby 관계에 따라 상대밀도에 의해 지배되며, 기존 연구들은 주로 리가먼트 크기(ligament size)와 같은 형태학적(morphological) 특성 제어를 통해 물성 향상을 시도해왔다. 그러나 동일한 상대밀도 조건에서 네트워크 연결성 차이에 따른 기계적 물성 변동성은 충분히 해결되지 못하였다. 본 연구는 형태학적 특성 제어가 아닌 위상학적(topological) 관점에서의 구조 제어에 주목하여, 낮은 상대밀도의 나노다공성 금에서 열적 조건과 기계적 작용이 결합된 환경에서의 열처리를 통해 구조적으로 고립된 dangling ligament 간의 재부착(reattachment)을 유도하고자 한다. 이를 통해 리가먼트 네트워크의 연결성을 향상시키고, 동일한 상대밀도 조건에서도 하중 전달에 기여하는 리가먼트의 비율, 즉 effective relative density를 증가시킴으로써, 나노압입시험(nanoindentation)을 기반으로 한 탄성계수 및 경도 변화를 정량적으로 비교·분석하고자 한다.

#### [재료강도4-5 | 16:40]

**고밀도 센서 배열을 위한 최소침습형 전자소자의 구조 최적화:** 김수민, 조지현(UNIST), 황경석(Harvard University), 배재영, 강승균\*(서울대학교), 김주영\*(UNIST)

**Keywords:** 최소침습, 형상기억재료, 생분해성

뇌-기계 인터페이스(BCI)는 뇌에서 발생하는 신경 신호를 실시간 모니터링하고 해석함으로써 신경계 질환의 진단 및 신경 재활을 지원하는 기술이다. BCI 구현을 위한 다양한 뇌 신호 획득 방식 중에서도, 높은 공간 분해능을 바탕으로 정밀한 뇌 신호 측정이 가능한 뇌피질전도(electrocorticography, ECoG)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대면적 피질에서 발생하는 신경 활동을 정밀하게 구분하기 위해서 고밀도 배열의 전극 소자가 요구되지만, 전극 수 증가에 따른 소자 면적 증가는 절개 범위 증가와 연부 조직과의 기계적 불일치를 심화시켜 조직 손상 및 신호 안정성 저하를 야기할 수 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서 본 연구에서는 생체적합성 및 생분해성 특성을 지닌 형상기억고분자를 적용하여 최소 침습 및 체내에서 자가 전개가 가능한 전자소자 구조를 제안하고자 한다. 유한요소해석을 기반으로 다양한 기하학적 인자를 조절함으로써 체내 삽입 및 삽입 후 전개 과정에서 전자소자에 인가되는 변형률을 최소화하고, 전극 간격을 효과적으로 감소시켜 공간 분해능을 향상시킬 수 있는 고밀도 배열 구조를 최적화하고자 한다.

**[재료강도4-6 | 16:55]**

**변형에너지 제어를 이용한 구리 결정 방향 제어 기술:** 판지윤, 심영주, 김동현, 김수정, 김주영\*(UNIST)

**Keywords:** (111) 결정 방향 구리, 변형에너지, 구리-구리 접합, 반도체 패키징

저전력·고성능 반도체에 대한 수요가 급증함에 따라 소자 회로의 미세화뿐만 아니라 첨단 패키징 기술을 통한 시스템 수준의 성능 향상이 중요한 과제로 대두되고 있다. 특히 구리-구리(Cu-Cu) 직접 접합은 기존 솔더 범프를 대체할 수 있는 핵심 기술로, 금속간 화합물 형성을 억제하여 접합 신뢰성을 향상시키고 범프 피치 축소를 통해 고집적화를 구현할 수 있다는 장점을 가진다. 그러나 구리는 높은 녹는점을 가지므로 충분한 원자 확산을 유도하기 위해 고온 공정이 요구되며, 이는 패키징이 공정의 마지막 단계임을 고려할 때 소자 열 손상 및 공정 신뢰성 저하의 주요 원인으로 작용한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 저온에서 접합 특성을 향상시킬 수 있는 표면 확산 촉진 기술이 요구되며, 그 중에서도 표면 확산 계수가 가장 높은 (111) 결정방향을 갖는 구리 텍스처 형성은 효과적인 접근법으로 주목받고 있다. 본 연구에서는 (111) 우선배향 구리 박막을 형성하기 위한 방법으로, 결정 성장 구동력 중 하나인 변형에너지(strain energy)에 주목하여 응력 제어 어닐링(stress-controlled annealing) 공정을 제안하였다. 어닐링 과정에서 외부 응력을 조절함으로써 박막 내 결정립 성장 거동 및 텍스처 진화를 제어하고자 하였다.

## 인공지능재료과학

Room 4층 401, 4월 29일

### [인공1-1 | 09:00]

**딥러닝을 이용한 철강 소재 열처리 공정-미세조직-기계적 물성 연계 모델링 기법 개발:** 김호혁, 오세혁, 정재면, 김세종, 이호원, 강성훈\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 금속, 열처리, 미세조직, 물성, 인공지능

굴삭기의 상부 차체와 하부 주행체를 연결하는 핵심 구동 부품인 슬루잉 베어링 모듈은 다양한 공정을 통해 생산된다. 이 가운데 단조 공정에서의 주요 공정 변수인 단조 온도는 베어링의 미세조직 형성과 기계적 특성에 지대한 영향을 미친다. 기존에는 단조 온도가 미세조직 및 물성에 미치는 영향을 규명하기 위해 반복적인 실험에 의존해 왔으나, 이러한 접근법은 막대한 시간과 비용이 요구된다는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 딥러닝 기반의 방법을 활용하여 단조 온도에 따른 미세조직 및 기계적 특성을 예측·평가하는 새로운 프레임워크를 제안한다. 이를 위해 슬루잉 베어링에 널리 사용되는 42CrMo4 강을 다양한 단조 온도 조건에서 가공하고, 이에 따른 미세조직 관찰 및 물성 측정을 통해 학습용 데이터셋을 구축하였다. 수집된 데이터를 바탕으로 생성적 적대 신경망(GAN)을 적용하여 단조 온도와 미세조직 간의 상관관계를 모델링하였으며, 합성곱 신경망(CNN)을 이용해 미세조직으로부터 기계적 물성을 예측하는 모델을 개발하였다. 학습된 딥러닝 모델은 기존 실험 데이터에 포함되지 않은 단조 온도 조건에서도 미세조직과 물성을 효과적으로 생성·예측할 수 있었으며, 실험 결과와의 비교를 통해 높은 예측 정확도를 확인하였다. 이러한 결과는 딥러닝을 활용한 공정-미세조직-물성 간 연계 모델링이 단조 공정 설계 및 최적화에 있어 효율적인 대안이 될 수 있음을 시사한다.

### [인공1-2 | 09:12]

**데이터 기반 실시간 열연코일 냉각 거동 예측 및 최적 배치 추천 시스템 :** 이치현\*, 이호원, 오세혁, 김호혁, 정재면, 김세종(한국재료연구원)

**Keywords:** 열연코일, 냉각, 배치 최적화, 인공지능, 야드 냉각, FEM

열연코일(hot-rolled coil, HRC)은 자동차, 건설 및 기계 산업 등 다양한 분야에서 핵심 소재로 활용되고 있다. 그러나 열연 공정 이후 저장 야드에서 수행되는 냉각 과정은 인접 코일 간의 열적 상호작용과 주변 환경 조건의 영향으로 인해 냉각이 비균일하게 발생하며, 이는 최종 제품의 기계적 특성과 품질 편차를 유발한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 실시간 열연코일 배치 추천 시스템을 제안하였다. 현실적인 냉각 거동을 반영하기 위해 유한요소법(finite element method, FEM) 기반의 단순화된 열전달 모델을 구축하고, 이를 통해 냉각 시뮬레이션 데이터를 생성하였다. FEM의 높은 계산 비용으로 인한 실시간 적용 한계를 극복하기 위해, 하이퍼파라미터 튜닝을 적용한 인공신경망(artificial neural network, ANN) 기반 예측 모델을 개발하였다. 본 시스템은 열연 이후 이송 구간의 냉각 거동을 예측하는 이송 냉각 모델과, 야드 내 인접 코일 배치를 고려하여 대상 코일 표면 12개 지점의 온도 변화를 예측하는 야드 냉각 모델로 구성된다. 특히 심층 신경망과 광범위 신경망을 결합한 하이브리드 구조를 적용하여 예측 정확도를 향상시켰다. 제안된 시스템은 야드 내 가능한 배치 후보별 냉각 거동을 실시간으로 예측하고, 시간에 따른 온도 편차를 최소화하는 최적 배치를 추천함으로써 추가적인 냉각 설비 없이 냉각 균일성을 개선한다. 사례 연구를 통해 시스템의 유효성을 검증한 결과, 평균 절대 오차는 3.44, 평균 절대 백분율 오차는 0.24%로 기존 회귀 기반 기법 대비 우수한 성능을 보였다. 본 연구는 실제 열연코일 냉각 공정을 정밀하게 모사하고, 철강 제조 공정에서 실시간 냉각 최적화 및 야드 운영 자동화의 가능성을 제시한다.

### [인공1-3 | 09:24]

**이방성 스테인리스강 용접부의 초음파 전파 예측을 위한 Softmin-Fremat Time-of-Flight 손실 기반 물리정보 딥러닝:** 김현준, 박익근, 강동찬\*(서울과학기술대학교)

**Keywords:** Softmin-Fermat Time-of-Flight, 물리정보 딥러닝, 위상배열초음파검사, 이방성 용접부, 스테인리스강

이방성 재료, 특히 오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 초음파 비파괴검사에서 결합 위치 추정 정확도와 영상 품질은 비행시간(Time-of-Flight, ToF) 예측의 물리적 정합성에 크게 의존한다. 그러나 기존의 데이터 기반 딥러닝 모델은 복잡한 초음파 신호를 효과적으로 학습할 수 있음에도 불구하고, 파동 전파의 물리 법칙을 명시적으로 반영하지 못하여 물리적으로 일관되지 않은 ToF 예측을 생성하는 한계를 가진다. 본 연구에서는 Fermat의 최소 시간 원리를 미분 가능한 Softmin 연산으로 재정의화한 Softmin-Fermat ToF 손실 함수를 제안하고, 이를 물리정보 기반 딥러닝(Physics-Informed Deep Learning, PIDL) 프레임워크에 통합하였다. 제안된 손실 함수는 학습 과정에서 전파 경로에 대한 명시적 물리 제약을 부여하여, 네트워크가 물리적으로 타당한 경로를 따르는 ToF를 학습하도록 유도한다. 이방성 용접부를 모사한 시뮬레이션 Full Matrix Capture(FMC) 데이터를 활용하여 ResUNet, CRNN, ConvLSTM 세 가지 대표적 구조를 비교 분석하였다. 그 결과, SF-ToF 손실을 적용한 모델은 기존 손실 함수 대비 평균 30% 이상의 물리 위반 사례 감소를 보였으며, ToF 예측 RMSE 또한 최대 25%까지 감소하였다. 특히 ConvLSTM 구조에서는 시공간 상관성을 효과적으로 반영하여 Out-of-Distribution(OOD) 조건에서도 예측 오차가 약 28% 감소하는 향상을 보였다. 또한, 최적화된 모델이 예측한 결정 배향 맵을 이방성 ray-bending Total Focusing Method(TFM)에 적용한 결과, 기존 등방성 가정 기반 영상 대비 공간 해상도가 약 20% 향상되었고, 신호대잡음비(SNR)는 평균 3 dB 이상 증가하였다. 이는 물리적으로 정합한 ToF 예측이 영상 품질 개선으로 나타남을 정량적으로 입증한다.

**[인공1-4 | 09:36]**

Prediction of Mechanical Properties in Automotive Steel Coils Using a Machine Learning Approach: JUNHO PARK\*, JAEHYUN CHOI, DAEGEON LEE, TAEKYO HAN, SUNGKYU KIM, SUNGIL KIM(POSCO)

**Keywords:** automotive steel, machine learning, mechanical property prediction, high-strength steels

In recent years, the applications of data-driven machine learning (ML) techniques in the field of metallurgy have been increasingly reported. In particular, the integration of ML into continuous annealing and galvanizing lines is essential for the digitalization of steel manufacturing plants. This study presents a strategy and illustrative examples for predicting and controlling the mechanical properties—such as yield strength, ultimate tensile strength, and elongation—of steel coils for automotive applications. The proposed model is trained using many variables, including chemical compositions, coil dimensions, and annealing process parameters. It enables the prediction of mechanical properties along the entire length of steel coils and determines optimal annealing conditions after cold rolling by employing a metaheuristic algorithm.

**[인공1-5 | 09:48]**

오스테나이트 탄소 변화를 반영한 철강의 경로 의존적 상변태 예측을 위한 물리 기반 순환 신경망 모델: 이혁재, 정든봄, 한홍남\*(서울대학교)

**Keywords:** Phase transformation, Physics-Embedded Neural Network, Austenite Carbon Redistribution, LSTM, Dilatometry-Based Validation

복잡한 열처리 이력을 가지는 철강의 상변태를 정확히 예측하기 위해서는, 상변태의 본질적 특성인 경로 의존성(path dependency)을 정량적으로 표현할 수 있는 모델이 필요하다. 이러한 경로 의존성은 단순한 온도 변화뿐 아니라, 상변태 과정에서 발생하는 탄소 재분배에 의해 유도된다. 이 과정에서 잔류 오스테나이트의 화학 조성은 지속적으로 변화하며, 이는 이후 발생하는 상변태의 구동력과 동역학에 중대한 영향을 미친다. 가산 법칙(Additivity rule)에 기반한 기존 동역학 모델 역시 형식적으로는 이러한 효과를 포함할 수 있으나, 이를 구현하기 위해서는 상별로 복잡하게 결합된 수식 체계와 광범위한 매개변수 피팅이 요구되며, 강종이 변경될 때마다 이러한 과정을 반복해야 하는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, 각 시간 증분에서 오스테나이트의 탄소 농도 변화를 계산하고 이를 예측 과정에 반영하는 물리 기반 인공신경망을 개발하였다. 열적 및 화학적 이력을 모델에 효과적으로 반영하기 위해 LSTM(Long Short-Term Memory) 구조를 도입하였으며, 이를 통해 탄소 재분배가 이후 각 상의 변태 거동에 미치는 영향을 학습하도록 설계하였다. 학습용 데이터는 상업용 열역학/상변태 해석 소프트웨어인 JMatPro로부터 다양한 열이력 및 합금 조성 조건에 대해 생성하였으며, HSIC 기반 가중치와 D-optimal 설계를 결합한 실험계획 전략을 통해 효율적으로 구축하였다. 제안된 접근법은 강종별 매개변수화 없이도 경로 의존적 변태 거동을 일관되게 예측할 수 있었다. 모델 검증을 위해 딜라토미터 실험을 수행하고, 물리 기반 해석 기법을 활용하여 측정된 팽창 곡선으로부터 상변태 거동을 추출하였다. 이를 JMatPro 기반 학습 모델의 예측 결과와 비교함으로써, 제안된 모델이 실제 열처리 조건에서 관찰되는 변태 경향을 일관되게 반영함을 확인하였다. 이러한 결과는 LSTM 기반 접근이 철강의 경로 의존적 상변태를 효과적으로 기술할 수 있는 물리 기반 예측 프레임워크임을 보여준다.

**[인공1-6 | 10:00]**

기계학습모델을 활용한 CrMnFeCoNi 고엔트로피합금의 형상기억특성 예측: 임진수량, 이제인\*(부산대학교), 신동원\*(Oak Ridge National Laboratory)

**Keywords:** High-entropy alloy, Shape memory alloy, Machine learning, Artificial Intelligence

최근 소성변형 후 회복거동이 보고된 CrMnFeCoNi 합금이 차세대 형상기억합금계로 주목받고 있다. 그러나 조성 선정의 자유도가 큰 고엔트로피 합금계에서 형상기억특성이 주요하게 발현되는 조성역에 대한 이해는 상당히 제한적인데, 이는 시행착오를 거치는 방법으로 막대한 조성 영역을 일일이 탐색하는 데 많은 시간과 비용이 요구되기 때문이다. 이에 본 연구에서는 기계학습을 활용한 데이터 기반 설계법을 제시하며, 이를 통해 효율적인 형상기억합금 조성영역 탐색 및 회복특성이 우수한 실험금 설계를 진행하고자 한다. 본 연구에서는 모델 예측 성능을 높이려 형상기억특성 값 자체가 아니라, 열기계 분석(TMA)에서 얻은 열 사이클링 곡선의 가열/냉각 거동을 학습하는 모델을 구축했다. 상안정성, 모상 강도 및 미세조직 등 다양한 변수의 영향으로 155개 합금의 형상기억 특성 데이터를 직접 학습한 모델은 낮은 예측 성능을 보인 반면, 제안한 TMA 곡선 학습 방식은 동일 데이터 수로도 기존의 직접 학습 대비 우수한 예측 성능을 보여주었다. 이를 바탕으로 미지 합금의 TMA 곡선을 가열/냉각 구간으로 분리하여 각각 예측하고, 예측된 TMA 곡선으로부터 형상기억특성 값을 정량적으로 도출했다. 본 모델을 통해 CrMnFeCoNi 조성 공간에서 고성능 후보 조성 영역을 효율적으로 탐색하였으며, 예측 후보 조성에서 실제로 높은 수준의 형상기억특성이 나타남을 확인하여 본 방법의 유효성을 입증했다. 본 설계 방법론은 CrMnFeCoNi계 형상기억 실험금 개발을 가속화할 수 있으며, 더 나아가 타 형상기억합금계에도 확장 적용 가능할 것으로 기대된다.

**[인공2-1 | 10:22]**

물리규약 기반 ZK60 공형압연재의 Voce 경화모델 계수 식별: 유진영, 천세호, 이성호(부산대학교), 이재성, 정영웅(국립창원대학교), 이태경\*(부산대학교)

**Keywords:** 결정소성, 다목적 최적화, 군집화

마그네슘 합금은 소성가공 공정에서 발달하는 집합조직과 제한적인 변형기구의 조합으로 인해 강한 변형 이방성을 나타내며, 이에 따라 거동 예측을 위한 구성방정식의 신뢰성 확보가 핵심 과제로 남아 있다. 특히 변형기구별 경화 거동을 포함하는 EVPSC 기반

결정소성 모델에서는 Voce 경화모델 계수의 선택이 응력 변형을 곡선의 재현성과 변형기구 활성화 예측에 직접적인 영향을 미치지만, 고차원 파라미터 공간에서 단일 해로 수렴하는 계수 식별은 난이도가 높고 비유일성 문제가 빈번히 발생한다. 본 연구에서는 ZK60 공형압연재를 대상으로 방향별 인장 및 압축 거동을 동시에 적합하는 물리 기반 손실함수와, 특정 변형률 구간에서 예상되는 변형기구의 상대적 우세 관계를 제약으로 반영한 물리규약항을 결합하여, 변형기구별 Voce 경화계수의 다목적 식별을 수행하였다. 또한 다목적 탐색으로 얻어진 다수의 준최적 해를 변형기구 활성화 패턴 중심의 특징공간에서 군집화함으로써, 주어진 목적함수 조건 하에서 공존 가능한 복수의 파라미터 집합과 각 군집의 거동적 특징을 체계적으로 도출하고자 하였다. 이를 통해 유일한 최적해 제시를 넘어, 물리 적합과 변형기구 제약의 균형이 달라질 때 나타나는 해의 구조와 해석 가능성을 정량적으로 제시한다.

#### [인공2-2 | 10:34]

Physics-Guided Diffusion Model for EBSD Pattern Quality Improvement: Chi-hun Lee(Korea Institute of Materials Science), Hoang Hai Nam Nguyen, Ho Won Lee\*(Korea Institute of Materials Science, University of Science and Technology)

**Keywords:** denoising diffusion models, electron backscatter diffraction, image denoising

Electron Backscatter Diffraction (EBSD) indexing accuracy depends critically on the quality of Electron Backscatter Patterns (EBSPs), which are frequently degraded by acquisition settings (e.g., exposure time, gain) and surface preparation. We propose a physics-informed diffusion framework for EBSP refinement that leverages the structured, orientation-dependent band geometry underlying Radon-based indexing. Our approach builds on a denoising diffusion probabilistic model (DDPM) and introduces a differentiable Radon-transform consistency loss to preserve and sharpen Kikuchi-band evidence in an angle-domain representation, enabling gradient-based enforcement of physically relevant line structure. In addition, we incorporate an orientation-aware supervision term via a pretrained proxy indexer regressor that predicts Euler angles, encouraging reconstructions that remain consistent with physically meaningful orientations. We evaluate on a Nickel dataset of 29, 800 patterns with controlled varying levels and a Ti-6Al-4V dataset with 279, 000 patterns spanning multiple acquisition settings. Across experiments, the proposed physics-informed objective improves band-structure preservation and yields competitive reconstruction and indexing-related behavior relative to diffusion baseline and image-restoration baseline.

#### [인공2-3 | 10:46]

Toward Real-Time Conversational Control of Digital Mechanical Metamaterials: Jun Kyu Choe\*, Heekyu Kim, Junhyeong Lee(KAIST), Minjeong Kim(UNIST), Donggeun Park, Seunghwa Ryu\*(KAIST), Jiyun Kim\*(UNIST)

**Keywords:** Digital mechanical metamaterial, Inverse design, programmable material, LLM

Digital mechanical metamaterials offer unprecedented opportunities for adaptive mechanical performance, yet their design remains largely static and iterative, relying on one-shot optimization within highly complex and combinatorial design spaces. Such workflows limit continuous interaction between human intent and material response. Here, we introduce a real-time conversational framework that enables direct and continuous interaction with digital mechanical metamaterials. By integrating AI-driven inverse modeling with an LLM-based conversational interface, the system translates high-level natural language intent into digital configuration states that are realized in real time. This work outlines a paradigm shift from static material design toward conversational, real-time material control, opening new directions for adaptive matter and human-material interaction.

#### [인공2-4 | 10:58]

Transformer-enabled surrogate model for efficient prediction of mechanical behavior under complex loading paths: Joo Mooyeong(University of Science and Technology, Korea Institute of Materials Science), Minh Tien Tran(Korea Institute of Materials Science), Sehyeok Oh(University of Science and Technology, Korea Institute of Materials Science), Seongjun Bae(Korea Institute of Materials Science), Howon Lee\*(University of Science and Technology, Korea Institute of Materials Science)

**Keywords:** Deep learning, Transformer architecture, Crystal plasticity, Homogeneous effective medium

Multi-scale modeling of polycrystalline metals requires efficient computational tools to bridge micro-scale crystallographic information and macro-scale mechanical responses. While the incremental elasto-visco-plastic self-consistent ( $\Delta$ EVSPC) model efficiently predicted the mechanical behavior of polycrystal metals under complex deformation using the homogeneous effective medium (HEM) approach, its implementation into finite element method (FEM) frameworks still entailed significant computational costs. This study proposes a transformer-based surrogate model designed to substitute the HEM scheme within the  $\Delta$ EVSPC framework, utilizing loading conditions and grain representations to predict stress-strain behavior and texture evolution under complex loading paths. Unlike sequential models like recurrent neural networks, the transformer was selected for its parallel processing efficiency, enabling high-speed simulations and seamless scalability via a transfer learning strategy from 100 to 500 grains with significantly reduced data requirements. This surrogate model achieved a drastic reduction in computation time compared to the  $\Delta$ EVSPC model while maintaining accuracy. This work establishes a high-efficiency framework that serves as a scalable, accelerated alternative for large-scale crystal plasticity simulations in computational materials design.

**[인공2-5 | 11:10]**

**데이터와 인공지능 기법을 활용한 초내열 신합금 설계:** 이태주, 이제인, 임진수<sup>†</sup>(부산대학교), 정희원, 윤대원(한국재료연구원), 이병주(포항공과대학교), 최벽파(한국과학기술원), 설재복(국민대학교), 전중배(동아대학교), 박노근(영남대학교), 홍현욱(국립창원대학교), 최윤석<sup>\*</sup>(부산대학교)

**Keywords:** 초내열합금, 인공지능, 신합금 설계

초내열합금은 고온·고압 환경에서 사용되는 핵심 구조재료로서, 목표 물성을 만족시키기 위한 조성 및 공정 설계가 중요하다. 그러나 실제 합금 제조와 장시간 고온 시험에는 상당한 비용이 소요되어, 전통적인 실험 중심 접근만으로는 설계 효율과 탐색 속도에 한계가 있다. 이에 따라 최근에는 적은 수의 실험 데이터와 인공지능 모델을 기반으로 신합금 조성 탐색 및 공정 최적화를 수행하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 초내열합금 설계를 가속하기 위해, 합금 조성 및 공정 변수를 입력으로 물성을 예측하는 순방향 예측 모델을 구축하였으며, 생성형 모델을 활용하여 목표 물성을 만족하는 신합금 후보를 탐색하는 인공지능 모델 기반 탐색 방법을 제안하였다. 또한, 이를 실험을 통해 구축된 초내열합금 데이터에 적용하여 신합금 탐색 가능성과 활용방안을 검토하였다.

**[인공2-6 | 11:22]**

**EBSD 파라미터 기반 기계학습 모델을 이용한 AZ31 마그네슘 합금의 재결정 거동 분석:** 천세호, 유진영, 이정훈, 이태경<sup>\*</sup>(부산대학교)

**Keywords:** 마그네슘, 재결정, 쌍정, 기계학습

본 연구에서는 선변형된 AZ31 마그네슘 합금의 어닐링 과정에서 발생하는 복잡한 미세조직 변화를 정량적으로 분석하기 위해 기계학습 기반의 판별 방법론을 제안한다. 일반적으로 마그네슘 합금의 정적 재결정(SRX) 분율 산출에는 grain orientation spread(GOS)의 단일 임계치를 기준으로 하는 이진 판별 방식이 널리 사용된다. 그러나 {10-12} 인장 쌍정(extension twin)이나 변형유기경계이동(SIBM) 영역은 SRX 영역과 유사하게 낮은 GOS 값을 나타내는 특성이 있다. 이로 인해 기존의 단일 임계치 방식은 연구자의 주관에 따라 결과의 편차가 크게 달라질 뿐만 아니라, SRX와 타 미세조직 영역들을 정밀하게 구분해내는 데 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 GOS 이외에도 결정립 크기, 결정립 종횡비, 인접 결정립 간 방위차 등 다중 결정학적 파라미터를 입력으로 하고, 미세조직 상태를 출력으로 하는 기계학습 모델을 구축하였다. 그 결과, 제안된 모델은 육안이나 단순 수치로 구분이 어려운 SIBM 및 SRX 영역을 성공적으로 분리해 내었으며, 전 변형률 범위에서 재결정 거동을 객관적으로 추적하는 데 성공했다. 이러한 접근을 통해 단일 임계치에 의존한 주관적 판별을 최소화하고, 미세조직 데이터를 기반으로 한 정량적이고 재현성 있는 재결정 분율 평가가 가능함을 확인하였다.

**[인공2-7 | 11:34]**

**Token-Level Parameter Encoding in Stable Diffusion for Process-Conditioned Microstructure Synthesis:** HOANG CUONG PHAN(University of Science and Technology, Korea Institute of Materials Science), Chihun Lee, Hoheok Kim(Korea Institute of Materials Science), Ho Won Lee<sup>\*</sup>(University of Science and Technology, Korea Institute of Materials Science)

**Keywords:** Token-level conditioning, Stable diffusion, Parameter-efficient fine-tuning, Materials informatics.

Foundation diffusion models can synthesize microstructure-like images, yet quantitative control over processing parameters remains unreliable when parameters are expressed as plain text. We introduce parameter-token conditioning for Stable Diffusion 3.5 Large (SD3.5-L), converting mixed continuous and categorical metadata into learned token embeddings within the CLIP-L and CLIP-G streams while keeping the backbone frozen. Continuous variables (temperature, annealing time, magnification) are robustly normalized and mapped by small multilayer perceptrons; categorical variables (cooling method, microconstituent class) use learned lookup embeddings. We adapt SD3.5-L with DreamBooth and LoRA for data-efficient specialization to spheroidized steel SEM micrographs. Ablations show that full-text prompts (text plus parameter tokens) outperform text-only and parameter-only prompting in fidelity and controllability. Beyond visual metrics, we validate structural realism using two-point correlation and lineal-path functions, achieving low normalized errors ( $\epsilon_S \leq 2.1\%$ ,  $\epsilon_L \approx 0.6\%$ ). The schema-driven interface also generalizes to unseen parameter combinations and transfers to an independent steel dataset with minimal changes.

**[인공3-1 | 14:00]**

**AWLab: Autonomous Multi-Agent Closed-Loop Inverse Design Framework for Hybrid Architected Metamaterials:** Nguyen Duc Hieu Phan, Ho Won Lee<sup>\*</sup>(University of Science and Technology, Korea Institute of Materials Science)

**Keywords:** Hybrid Architected Metamaterials, Inverse Design, Multi-Agent Systems, Physics-Based Simulation, Closed-Loop Optimization, Parametric CAD

The inverse design of hybrid architected metamaterials remains a challenging and time-consuming task due to the vast design space, strong coupling between geometry and mechanical performance, and reliance on manual trial-and-error workflows. This proposal presents AWLab, an autonomous multi-agent framework for closed-loop inverse design of hybrid structural metamaterials that tightly integrates parametric CAD generation, physics-based simulation, and performance-driven optimization. AWLab employs collaborative large-language-model (LLM) agents that directly manipulate CAD feature parameters to generate manufacturable geometries, execute finite-element simulations for rigorous physical validation, and analyze stress, stiffness, and failure mechanisms to extract quantitative feedback. These agents interact through a traceable closed-loop feedback system, enabling iterative refinement

of designs based on physics-consistent performance signals rather than pass/fail heuristics. Unlike conventional generative design or topology optimization approaches that operate on mesh or voxel representations, the proposed framework operates at the CAD feature level, ensuring immediate editability, engineering consistency, and manufacturability of generated structures. By automating CAD–simulation–optimization workflows and leveraging shared design memory across agents, AWLab significantly reduces repetitive engineering effort and accelerates convergence toward optimal metamaterial architectures.

### [인공3-2 | 14:12]

Self-driving Lab as an Interpreter for Scientific Language: NAYEON KIM(한국과학기술연구원, 고려대학교), Sang Soo Han\*(한국과학기술연구원)

**Keywords:** Data alignment, Self driving Lab, Scientific language modeling, Attention

Scientific language encodes procedural and contextual nuances that numerical parameters alone cannot capture. This study introduces an autonomous laboratory framework that interprets and validates scientific language as an experimental variable. A condition–text fusion model aligns linguistic expressions and quantitative conditions within a shared latent space, allowing multimodal reasoning across literature and laboratory domains. Through the integration of co-attention and flow-matching mechanisms, the model learns to reflect procedural variations that yield divergent outcomes even under identical experimental settings, achieving a prediction accuracy of  $R^2 = 0.96$ . Attention analysis further reveals that the model selectively focuses on experimentally meaningful terms, such as reagents, procedural verbs, instruments, and environmental descriptors, indicating an understanding of causal semantics embedded in scientific text. By transforming descriptive language into experimentally verifiable representations, this framework bridges linguistic knowledge and numerical experimentation, advancing autonomous laboratories toward interpretable and language guided scientific discovery.

### [인공3-3 | 14:24]

Autonomous Multi-Objective Optimization of Cost-Effective and Durable OER Catalysts for PEM Water Electrolysis: Daeho Kim(Korea Institute of Science and Technology, Korea Univ.), Hyobin Nam, Sae Yane Paek(Korea Institute of Science and Technology), Nayeon Kim, Heeseung Lee, Hyuk Jun Yoo(Korea Institute of Science and Technology, Korea Univ.), Sang Kyu Kwak\*(Korea Univ.), Jong Min Kim\*, Seung Yong Lee\*, Sang Soo Han\*(Korea Institute of Science and Technology)

**Keywords:** Self-driving laboratory, nanoparticle catalyst, oxygen evolution reaction, PEMWE, multi-objective optimization

Proton exchange membrane water electrolysis (PEMWE) offers a viable route to sustainable hydrogen production, but its deployment is limited by the sluggish oxygen evolution reaction (OER) in acidic media and the reliance on costly precious-metal catalysts. Here we present a self-driving laboratory (SDL) for the autonomous discovery of OER catalysts that explicitly balances catalytic activity, electrochemical stability, and material cost. The platform integrates automated batch synthesis, fully unattended half-cell evaluation, and AI-guided multi-objective optimization. We introduce three algorithmic components: a composition-constrained discrete design space, a clustering-based batch selection strategy, and a relaxed-percentile Pareto filtering scheme to identify well-balanced candidates. Applied to ternary Ir–Ru–M (M = Ni, Co, Fe) systems, the SDL enabled rapid exploration of complex trade-offs and identified Ir<sub>10</sub>Ru<sub>65</sub>Ni<sub>25</sub> as the optimal composition within 24 experiments. This catalyst achieves an overpotential of 211.8 mV at 10 mA cm<sup>-2</sup>, negligible degradation under accelerated durability testing, and significantly reduced Ir content. In a PEMWE device, it delivers 3.90 A cm<sup>-2</sup> at 1.8 V and sustains stable operation for 1000 h at 1.0 A cm<sup>-2</sup>. These results demonstrate a scalable SDL framework for data-efficient electrocatalyst optimization and economically viable hydrogen production.

### [인공3-4 | 14:36]

Design of High-Capacity NASICON-Type Cathode Materials through an Element Mapping-Based Bayesian Optimization Framework: Sanghyeon Park, Yoonsu Shim, Junpyo Hur, Sanghyeon Ji(KAIST), Dongmin Jeon(KIER), Jong Min Yuk\*(KAIST), Chan-Woo Lee\*(KIER)

**Keywords:** Data-driven materials design, Bayesian optimization, Sodium-ion battery, Density functional theory

Bayesian optimization (BO) helps in efficiently navigating complex and high-dimensional design spaces. Recently, it has been applied to material science to discover novel materials with high performances. However, the application of BO to material design has been hindered by the challenges in handling discrete input variables, such as elements. This study introduces a novel element mapping strategy that encodes elemental identities into chemically meaningful continuous values, enabling the creation of easy-to-predict chemical spaces. This new framework is used to design high-capacity Na<sub>3</sub>V<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>F<sub>3</sub> cathode materials for sodium-ion batteries, aiming to shift all working voltages into the desired operational voltage window (2.5–4.3 V). The proposed framework successfully suggested 16 optimal compositions within 50 iterations. The proposed approach can overcome the limitation of categorical input and broaden the applicability of BO to a wider range of material discoveries.



**[인공3-5 | 14:48]**

Physics-Latent Representational Alignment for Uncertainty Quantification and Active Learning in High-Entropy Alloy Catalysis: Wongyu Park, Jeong Woo Han\*(Seoul National University)

**Keywords:** High-entropy alloys, Machine learning Interatomic Potential, Uncertainty quantification

High-entropy alloys (HEAs) provide a near-continuum distribution of adsorption energies due to their extreme structural and chemical disorder. While machine learning interatomic potentials (MLIPs) such as UMA and EquiFormerV2 offer a scalable alternative to first-principles calculations, their performance degrades significantly in the disordered local environments of HEAs that lie outside their primary training distribution. This study proposes a novel active learning framework based on the Centered Kernel Nearest-Neighbor Alignment (CKNNA) between physics-based descriptors and latent representations to efficiently quantify model uncertainty. The working hypothesis defines the Smooth Overlap of Atomic Positions (SOAP) as the physical ground truth representation of the local environment. We demonstrate that the degree of alignment (CKNNA) between this physical reference and the MLIP's internal latent representation serves as a robust, zero-overhead uncertainty proxy. This approach extends the "Representational Convergence" hypothesis to a physical coordinate space, proving that as a model's understanding approaches the physical reality captured by SOAP, the prediction error decreases linearly. Technical analysis reveals that the physical context of HEA adsorption sites saturates at a cutoff radius ( $R_{\text{max}}$ ) of 12–14 Å, defining the necessary range for representational completeness. By targeting the "knowledge gap"—regions of low CKNNA—our active learning strategy achieves superior data efficiency compared to random sampling, effectively navigating the vast chemical space with minimal Density Functional Theory (DFT) overhead. This methodology is model-agnostic and enables the accelerated fine-tuning of large-scale foundation models for complex, disordered catalytic systems.

**[인공4-1 | 15:10]**

Machine-Learning Interatomic Potential-Enabled Exploration of  $\text{Li}_7\text{M}_3\text{X}_2\text{O}_{12}$  Garnet-Type Oxides for Solid-State Electrolyte: Mingyu Jeon(KIST), Donghun Kim\*(KAIST), Jung-Hoon Lee\*(KIST, Korea University)

**Keywords:** Oxide-based solid-state electrolyte,  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  Garnet, Machine learning interatomic potential

Solid-state electrolytes (SSEs), particularly oxide-based garnets such as  $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$  (LLZO), have emerged as promising candidates for next-generation all-solid-state batteries due to their excellent thermal stability, high energy density, and wide electrochemical stability window. However, the relatively low ionic conductivity of oxide SSEs remains a major barrier to widespread adoption. In this study, we comprehensively explore the  $\text{Li}_7\text{M}_3\text{X}_2\text{O}_{12}$  composition space across five polymorphs with distinct structural frameworks using a universal machine-learning interatomic potential (uMLIP). We systematically screen these candidates based on thermodynamic stability and ionic conductivity, identifying promising compositions that surpass the ionic conductivity of conventional LLZO. Rigorous first-principles density functional theory calculations and large-scale, long-timescale molecular dynamics simulations further validate the mechanisms underlying the enhanced conductivity by elucidating lithium-ion migration pathways and structural factors that enable rapid ion transport. Overall, this work underscores the potential of uMLIP to accelerate the discovery of highly conductive oxide-based SSEs and establishes a robust pathway for identifying and optimizing garnet-variant oxides for advanced energy storage applications.

**[인공4-2 | 15:22]**

Universal MLIPs in Practice for Realistic Modeling of Energy Materials: Cross-Domain Validation and Potential-Aware Simulations: Jinwoong Chae, Hyeseung Kim, Hyun-Jae Lee, Sojeong Yang(KIST), Yang-Jun Lee(Seoul National University), Jungwoo Choi(KIST), Byung Chul Yeo(Pukyong National University), Donghun Kim(KAIST), Byungju Lee\*(KIST, University of Science and Technology (UST)), Stefan Ringe\*(Korea University), Sungwoo Kang\*(KIST, University of Science and Technology (UST))

**Keywords:** Universal machine learning interatomic potentials, Energy materials, Cross-domain validation, Chemical potential prediction

Universal machine-learning interatomic potentials (uMLIPs) have demonstrated transferable atomistic accuracy across chemical domains. Nevertheless, concerns persist regarding their reliability for complex, application-specific energy-material interfaces. In this study, we assess the pre-trained uMLIP SevenNet-Omni<sup>1</sup> in realistic interfacial and reactive environments that are not explicitly represented in the training set, thereby probing its transferability and extrapolative performance. Specifically, we validate SevenNet-Omni on diverse datasets, spanning (i) liquid-electrolyte catalyst environments, (ii) thermal catalysis on metal-support interfaces, (iii) materials relevant to proton ceramic fuel cells (PCFCs), (iv) ligand-quantum-dot interactions (v) solid-state battery surfaces and interfaces, and observe good agreement with our reference data across these domains without any fine tuning. We further extend the validation to representative large-scale energy-material simulations. Motivated by this transferability, we developed a task-specific model for potential-aware simulations in liquid electrolytes using a data-generation pipeline that couples uMLIP-driven structure sampling with single-shot DFT calculations of electrode work function. The resulting model well predicts work functions of the electrode material, which enables predicting electrode potential of a given configuration during the molecular dynamics simulations with uMLIPs. Overall, our results suggest that pre-trained uMLIPs can serve not only as accurate force-field surrogates but also as practical enablers of out-of-distribution, realistic simulations and potential-aware modeling across catalysis, batteries, and electrochemical energy systems. [1] J. Kim, J. You, Y. Park, Y. Lim, Y. Kang, J. Kim, H. Jeon, S. Ju, D. Hong, S. Y. Lee, S. Choi, Y. Kim, J. W. Lee, and S. Han, arXiv preprint arXiv:2510.11241, 2025.

**[인공4-3 | 15:34]**

Distilling Machine Learning Interatomic Potentials for Scalable Catalyst Discovery: Seokhyun Choung, Hyukjun Lim, Jeong Woo Han\*(Seoul National Univ.)

**Keywords:** Machine learning interatomic potentials, Knowledge distillation, Graph Neural Network, High-throughput catalyst screening

Discovering active and stable catalysts for electrochemical reactions demands evaluation of vast compositional and configurational spaces. State-of-the-art machine learning interatomic potentials (MLIPs) provide DFT-level accuracy for predicting adsorption energies and forces, but the computational cost of MLIPs is becoming an increasingly critical bottleneck for large-scale exploration. Existing knowledge distillation approaches, which rely on atom-wise feature matching, have struggled to retain the relational physics governing the potential energy surface (PES). We present First-Order Relational Knowledge (FORK) distillation, a contrastive framework that compresses pretrained MLIPs by preserving the relational geometry of the learned PES. The FORK-distilled student model consistently outperforms baselines across catalysis (OC20), bulk materials (OMat24), and molecular (SPICE) benchmarks while operating at a fraction of the original computational cost. We apply the student model to a funnel-type screening workflow targeting oxygen reduction reaction catalysts. Across 580,329 candidate structures, FORK reduces total computational cost from 34.9 CPU-years to 11.6 GPU-hours, while preserving chemical coherency throughout the screening pipeline. This accelerated search identifies 30 theoretically viable catalyst candidates, with tellurium-containing materials emerging as a prominent motif among the top performers. These results establish FORK distillation as a domain-agnostic compression strategy well suited for multi-fidelity screening, where models of varying cost and accuracy are combined to efficiently navigate large candidate spaces.

**[인공4-4 | 15:46]**

Quantum Computing Based Design of Multivariate Porous Materials: Shinyoung Kang, Jihan Kim\*(KAIST)

**Keywords:** Quantum computing, Multivariate porous materials, Variational Quantum Eigensolver (VQE)

Multivariate (MTV) porous materials exhibit unique structural complexities based on their diverse spatial arrangements of multiple building block combinations. These materials possess potential synergistic functionalities that exceed the sum of their individual components. However, the exponentially increasing design complexity of these materials poses significant challenges for accurate ground-state configuration prediction and design. To address this, we propose a Hamiltonian model for quantum computing that integrates compositional, structural, and balance constraints directly into the Hamiltonian, enabling efficient optimization of the MTV configurations. The model employs a graph-based representation to encode linker types as qubits. Our framework leads to exponentially efficient exploration of a vast search space of the linkers to identify optimal configurations based on predefined design variables. To validate our model, a variational quantum circuit was constructed and executed using the Sampling VQE algorithm in the IBM Qiskit. Simulations on experimentally known MTV porous materials (e.g. Cu-THQ-HHTP, Py-MV-DBA-COF, MUF-7, and SIOC-COF2) successfully reproduced their ground-state configurations, demonstrating the validity of our model. Furthermore, VQE calculations were performed on a real IBM 127-qubit quantum hardware for validation purposes signaling a first step toward a practical quantum algorithm for the rational design of porous materials.

**[인공4-5 | 15:58]**

Synergistic Effect of Oxygen Evolution Mechanism and Interfacial Water Dynamics Revealed by Large Scale Simulation: Jinuk Moon(Seoul National Univ.), Hyunwoo Jun, Jinwoo Lee\*(KAIST), Jeong Woo Han\*(Seoul National Univ.)

**Keywords:** machine learning interatomic potential, large-scale molecular dynamics, oxygen evolution reaction, interfacial water, oxide path mechanism

The development of active and durable oxygen evolution reaction (OER) catalysts is essential for the commercialization of proton exchange membrane water electrolyzers (PEMWEs). While ruthenium-based oxides exhibit excellent intrinsic activity, their practical deployment is hindered by poor stability arising from overoxidation to soluble RuO<sub>4</sub>. Moreover, conventional rutile RuO<sub>2</sub> possesses Ru-Ru distances (~3.11 Å) too large to enable direct O-O coupling via the oxide path mechanism (OPM), limiting both activity and stability improvements through mechanism engineering. In this work, we present a combined experimental and computational study of Ru-substituted spinel Co<sub>2</sub>MnO<sub>4</sub> (RuMnO), in which surface Co atoms are selectively replaced by Ru through cation exchange. Density functional theory (DFT) calculations reveal that the shortened Ru-Ru distance (~2.85 Å) at octahedral sites enables the OPM pathway with a significantly reduced overpotential compared to the adsorbate evolution mechanism, while Mn stabilizes the spinel framework and suppresses lattice oxygen participation. Beyond the reaction mechanism, understanding the catalyst-water interface has emerged as a critical frontier in electrocatalysis, yet atomistic characterization of interfacial water remains challenging due to the limited time and length scales accessible by ab initio molecular dynamics. To overcome this limitation, we employ machine learning interatomic potential-based molecular dynamics (MLIP-MD) to perform large-scale simulations of the RuMnO-water interface. Layer-resolved analyses reveal that RuMnO promotes a higher fraction of weakly hydrogen-bonded free water at the interface compared to pristine Co<sub>2</sub>MnO<sub>4</sub>, a finding corroborated by in-situ ATR-SEIRAS measurements. The synergistic interplay between the tuned reaction mechanism and enhanced interfacial water dynamics results in a low overpotential of 276 mV at 50 mA cm<sup>-2</sup> and remarkable stability exceeding 2500 h, highlighting the importance of concurrently engineering both factors for acidic OER catalysis.

**[인공4-6 | 16:10]**

Physics-guided Graph Neural Networks for Data-efficient Prediction of Structure-property Relationship in Polycrystal Metals: Minh Tien Tran, Jaimyun Jung, Se-Jong Kim, Seong-Hoon Kang(Korea Institute of Materials Science), Ho Won Lee\*(Korea Institute of Materials Science, University of Science and Technology)

**Keywords:** Graph neural network, transfer learning, crystal plasticity, microstructure, anisotropic properties

This study proposes a multi-fidelity physics-guided graph neural network (PGNN) surrogate that maps microstructure graphs to anisotropic mechanical responses while substantially reducing high-fidelity data requirements. Polycrystals are represented as grain-adjacency graphs with node descriptors capturing microstructural characteristics and loading-conditioned descriptors. To embed mechanistic bias and preserve interpretability, we introduce an end-to-end learnable Hall–Petch module that augments node features with grain-size strengthening terms, whose parameters are trained jointly with the GNN. The model is pretrained on a large set of low-fidelity crystal plasticity simulations and fine-tuned using a small high-fidelity dataset to bridge resolution and morphology gaps between fidelities. Across uniaxial loading directions and proportional biaxial states, the proposed multi-fidelity PGNN achieves accurate predictions of yield strength, ultimate tensile strength, and yield loci, and significantly improves high-fidelity sample efficiency relative to baselines trained only on high-fidelity data. The approach delivers sub-second evaluation of complete anisotropic responses, enabling rapid prediction of structure–property linkage in polycrystals metals.

**[인공5-1 | 16:32]**

Analysis of Diffusion Models for Inorganic Materials Discovery: Gihyeon Jeon\*(KIST), Sanghyun Kim(Kumho Petrochemical), Seungwoo Hwang, Jiho Lee(Seoul National University), Jisu Jung(Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology (KICET)), Seungwu Han(Seoul National University, Korea Institute of Advanced Study (KIAS)), Sungwoo Kang(KIST, University of Science and Technology (UST))

**Keywords:** Diffusion model, Inverse Design, Machine learning potential, Crystal structure prediction

While diffusion models are attracting increasing attention for the design of novel materials, their ability to generate low-energy structures in unexplored chemical spaces has not been systematically assessed. Here, we evaluate the performance of two diffusion models, MatterGen and DiffCSP, including the equivariant variant EquiCSP. Specifically, we focus on analyzing the size-extrapolation capability of these models. Despite having similar architectures and being trained on similar datasets, machine learning interatomic potentials (MLIPs) often extrapolate successfully to unseen structures, whereas diffusion models fail dramatically when applied to larger unit cells. We demonstrate that this failure is distinct from conventional out-of-distribution (OOD) issues; rather, it is attributed to limitations imposed by periodic boundary conditions, a phenomenon we term the “curse of periodicity.” Our work provides both mathematical demonstrations and empirical evidence to support this finding. This study paves the way for future developments in materials design by highlighting both the strengths and the fundamental limitations of diffusion models.

**[인공5-2 | 16:44]**

Toward Inverse Materials Design via Reinforcement Learning Approach: HyoChan Ahn, Hsu Myat Noe, Joo-Hyoung Lee\*(Gwangju Institute of Science and Technology)

**Keywords:** Inverse materials design, Reinforcement Learning, Group Relative Policy Optimization

Generative models show strong potential to accelerate materials discovery by proposing novel candidate structures. However, they often struggle to achieve sufficient fidelity to a target property during materials generation. Here, we show that high fidelity inverse generation can be accomplished through reinforcement learning (RL) by incorporating feedback from surrogate property predictors. By employing Group Relative Policy Optimization and the text representation of a crystal structure, a small GPT style model trained from scratch learns to generate candidate materials conditioned on user-specified band gaps across a wide target range. Validation with first-principles calculations confirms high fidelity to the requested band gaps while maintaining structural novelty. Interestingly, when only a small amount of data is available for pretraining, the model develops a human-like generation strategy during the RL process: it preserves a fixed structural pattern and modulates band gaps primarily through element substitution, which is sufficient to reach targets. This framework is readily extendable to other properties and leaves substantial room for further improvements through modern LLM techniques.

**[인공5-3 | 16:56]**

과학기술 R&D 특화 초거대 인공지능 기술 개발: 대규모 과학 문헌 데이터베이스 및 시각-언어 파운데이션 모델 구축: 나주원\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 과학기술 인공지능

초거대 언어 모델의 등장과 함께, 현대 인공지능의 트렌드는 대규모 데이터셋에 대해 사전학습된 파운데이션 모델(Foundation Model)을 개발하여, 어떠한 질문이나 문제에 대해서도 적절한 응답과 해결책을 제시할 수 있는 범용적 지능을 구현하는 데 방점을 둔다. 최근 이러한 파운데이션 모델은 재료공학, 기계공학 등 이공계 분야의 연구를 가속화할 수 있는 핵심 기술로 부상하고 있는 가운데, 과학기술 특화 파운데이션 모델의 개발을 위해서는 두 가지 기반 기술 개발이 선행되어야 한다: (1) 웹 스케일(web-scale) 규모의 과학문헌 데이터베이스 구축, 그리고 (2) 이를 기반으로 사전학습된 거대 시각-언어 모델의 개발이다. 본 연구에서는 학술 논문의 네 가지 핵심 구성 요

소인 본문(Textual Contents), 도식(Visual Contents), 수식(Mathematical Contents), 표(Tabular Contents)를 원문의 계층적 구조(섹션, 문단 등)와 함께 보존하는 대규모 과학 문헌 코퍼스 ScienceCorpus를 제안한다. ScienceCorpus는 45개 주요 과학 분야의 92만 편의 논문으로 구성되며, 90억 토큰, 420만 그림, 360만 수식, 150만 표를 포함하는 세계 최대 규모의 공개 과학문헌 코퍼스이다. 나아가, ScienceCorpus를 기반으로 사후 사전학습(post-pretraining)한 3B/7B/32B/72B 규모의 과학기술 R&D 특화 시각-언어 모델 ScienceVLM 패밀리를 제안하며, 폐쇄형 및 개방형 평가 환경에서의 실험을 통해 과학적 추론 벤치마크에서 유의미한 성능 향상을 달성함을 검증한다. 본 연구에서 제안하는 ScienceCorpus와 ScienceVLM은 재료공학을 비롯한 이공계 전 분야에서 인공지능 기반 R&D 혁신을 촉진하기 위한 범용적 기반 기술로 활용될 것으로 기대된다.

#### [인공5-4 | 17:08]

OPSI: An On-premises LLM-based Schema-Inductive Framework for CPSP Database Construction of Ni-based Superalloys: Sejin Park, Yeji Won(Kookmin Univ.), Youngbeum Song, Daewoong Kim(Agency for Defense Development), Kisub Cho\*(Kookmin Univ.)

**Keywords:** Ni-based superalloys, Natural Language Processing (NLP), Large Language Model (LLM), Contrastive Learning

The demand for large-scale, structured Composition–Processing–Structure–Property (CPSP) databases is intensifying in AI-driven materials design. However, cloud-based LLM extraction introduces risks of output variability and limited environmental control, undermining long-term reproducibility. Transitioning to on-premises LLMs, while essential for data security and sovereign control, often reveals a critical failure in complex relational extraction due to Instruction Loss, a phenomenon where the model’s attention to formatting directives diminishes during long-context processing. To address these structural and operational limitations, we propose OPSI (On-premises Schema-Inductive), an interpretability-driven framework that enables robust data structuring without predefined templates. Leveraging a controlled on-premises LLM, OPSI adopts a modularized TASK-splitting pipeline to mitigate attention dispersion and expert resource contention. By decomposing the CPSP mapping into sequential stages, such as Source Tracking with evidence extraction and hierarchical relational structuring, OPSI effectively overcomes the inherent performance degradation of naive on-premises extraction. This framework ensures the integrity of complex data links in Ni-based superalloys, managing CPSP interdependencies while ensuring structural reproducibility and adaptive data consistency for advanced alloy research.

#### [인공5-5 | 17:20]

Solomon: Toward an AI Co-Scientist for Materials Science: Jisu Kim, Hyunsung Cho, Seyong Im, Euitae Lee, Haekwan Jeon, Seungwu Han\*(Seoul National Univ.)

**Keywords:** AI co-scientist, Agentic AI, Large language model

Large language models (LLMs) have recently demonstrated remarkable progress in reasoning, tool use, and scientific question answering, drawing widespread attention as potential research assistants. Despite these advances, current LLMs remain insufficient as research collaborators in materials science. Materials research demands comprehensive understanding of prior literature and the ability to synthesize evidence across multiple studies. A true research collaborator must not only interpret individual experimental results but also connect dispersed findings to analyze why specific synthesis routes, structural features, and processing conditions lead to observed property and device-level performance trends. In practice, critical evidence is fragmented across separate publications, making corpus-level causal integration inherently difficult. Additionally, embedding-based retrieval and general-purpose reasoning alone therefore do not provide the reliability or relational depth required for materials-aware scientific collaboration. The growing interest in agentic AI systems, together with Google’s “AI co-scientist” paradigm and Microsoft’s GraphRAG framework, suggests that coordinated reasoning and graph-structured representations may offer a path forward. However, such systems depend fundamentally on the existence of structured, evidence-grounded, and machine-interpretable knowledge infrastructures. To overcome literature-level data silos, we develop ContExtra, a multi-agent extraction pipeline that reorganizes scientific papers and normalizes quantitative information into structured knowledge base with explicit evidence linkage. This process constructs an AI-ready knowledge base designed for relational reasoning rather than isolated document retrieval. Built upon this infrastructure, we introduce “Solomon”, a materials-domain AI co-scientist that utilizes the AI-ready knowledge base through a hybrid vector–Graph RAG architecture. Within Solomon, structured knowledge base enables quantitative filtering and aggregation, reorganized paper preserves experimental context, and the knowledge graph supports multi-hop reasoning across materials, processes, and device performance. By separating knowledge construction from reasoning orchestration, Solomon establishes a scalable framework for mechanism-aware comparison, trade-off analysis, and exploratory hypothesis suggestion in realistic materials design spaces.

#### [인공5-6 | 17:32]

AGNES: An Agentic Framework for Automated Reconstruction of Numerical Data from Scientific Figures: Eui Tae Lee\*, Haekwan Jeon, Hyunsung Cho, Jisu Kim(Seoul National University), Seungwu Han(Seoul National University, Korea Institute of Advanced Study)

**Keywords:** AGNES, Agentic framework, Figure data reconstruction, Large Language Models

While scientific figures in materials science and engineering contains quantitative evidence, current text-centric literature mining

systems cannot effectively process the key information. For instance, plots, used to represent the key numerical results cannot be integrated into machine-readable knowledge bases, leaving a large fraction of figure-resident data effectively “dark”. Here in, we present AGNES (Agentic Graph Navigation & Extraction System), a fully automated figure-to-table pipeline that reconstructs highly accurate numerical tables from scientific plots, extending literature extraction beyond text. AGNES targets challenging real-world figures including multi-panel layouts, logarithmic axes, inset plots, and heterogeneous visual encodings, where single-pass vision models frequently fail. AGNES combines multimodal large language models with an agentic workflow that dynamically selects extraction strategies and invokes specialized utilities (e.g., panel separation, tick/axis parsing, data point digitization, and consistency checks). The system comprises: (i) Separator to decompose complex figures into subplots, (ii) Orchestrator to choose plot-specific extraction plans, and (iii) iterative Extractor–Critic–Digitizer loop that progressively recovers values while detecting and correcting inconsistencies. Experimental evaluations demonstrate that AGNES achieves a high success rate with low numerical reconstruction error across a wide range of figures. We emphasize the performance in challenging tasks such as multi-panel figures containing inset plots and dense visual elements. Overall, AGNES provides a scalable and reliable framework for automated figure understanding, with strong potential to accelerate scientific data curation, meta-analysis, and knowledge extraction from published literature. By enabling lossless extraction of quantitative data embedded in figures, AGNES can make downstream AI training corpora more complete by turning previously missing evidence into usable supervision and improving the fidelity of data-driven scientific modeling.

## 극한소재 실증연구 기반 및 R&D 전략 심포지엄

Room 4층 402A, 4월 29일

### [극한1-1 | 09:30] 초청강연

**발전용 가스터빈 터빈 고온부품 소재개발:** 이의중\*(두산에너지빌리티(주))

**Keywords:** Gas turbine(가스터빈), Turbine Blade(터빈 블레이드), Vane(베인), Disk(디스크), Investment casting(정밀주조), Single crystal(단결정), Directional solidified(일방향응고)

본 개발은 두산에너지빌리티의 독자 엔진 모델인 380MW급 대용량 가스터빈에 적용되는 고온부품을 대상으로 한 소재 국산개발에 대한 내용임. 지금까지 국내 관련 산업은 국내 수요기업의 부재로 인해서 발전사를 통한 Non-OEM 부품 개발만 국책과제로 일부 수행되었으며 사업화까지는 연결되지 못했다는 한계가 있었음. 본 개발에서는 두산에너지빌리티의 엔진 모델을 대상으로 함으로 목표가 명확하고, 총괄 및 수요기업으로 직접 참여함으로 바로 사업화로 연결될 수 있다는 점에서 기존 개발 과제와는 차별성이 있다. 대상 부품은 터빈 1단 블레이드, 2단 블레이드, 2단 베인, 4단 터빈 디스크이며, 각각 적용된 소재는 1세대 단결정 초내열합금, 일방향응고 초내열합금, 다결정 초내열합금 및 Inconel 소재가 디스크에 적용이 되었다. 블레이드 및 베인은 내부의 복잡한 냉각유로로 구성 되어 있어 제작방법으로는 정밀주조 공정이 적용 되었으며, Inconel 디스크는 단조 공정이 적용 되었다. 과제를 통해서 개발된 핵심 요소 기술로는 복잡한 냉각유로를 구현하기 위한 Ceramic core 제작 기술, Wall thickness control을 위한 core 활용 기술, 단결정 Orientation 및 grain defect control 기술, 조직 미세화 기술이 포함 되었다. 특히 본 개발은 각각의 부품에 적용되는 Masteralloy 개발이 함께 진행되었으며, Chemistry 및 trace element를 조절, 고정정도의 Ingot 제작기술 개발이 수행되었다. 본 발표에서는 380MW급 대용량 가스터빈에 적용된 고온부품의 기술동향과 국산개발 현황을 소개하고자 한다.

### [극한1-2 | 10:00] 초청강연

**우주항공 및 국방분야 극한환경세라믹 소재기술:** 오윤석\*, 김성원, 김종일(한국세라믹기술원)

**Keywords:** 극한환경용 세라믹, 고온세라믹, 고온내식 세라믹, TPS, TBC, EBC

항공, 우주, 국방 및 에너지 산업등과 같은 극한의 소재사용 환경에 적용되는 세라믹 소재는 초고온 대응성, 고온부식 환경 저항성 등과 같은 극한의 물성이 요구되고 있다. 예를 들어 항공기 엔진에 활용되는 세라믹 기술은 고온의 엔진작동 환경에서 급속히 소재의 보호를 위한 열차폐 코팅기술등을 개발되어 적용되고 있으며, 부식성 연료 및 산화 환경에서의 성능유지를 위한 고온내부식 세라믹 코팅기술등도 최근의 세라믹 복합체의 개발에 따라 동반되어 적용이 요구되고 있다. 최근의 우주항공 산업분야의 부상으로 관련산업의 요구도에 따른 적절한 대응소재 요구가 대두되고 있으며, 대표적으로 우주 발사체, 발사체무기 등에 요구되는 열보호 시스템 (TPS, Thermal protection system)등에 대한 연구가 활발해 지는 상황이다. 열보호 시스템에는 카본계 등 대표적 삭마형 소재와 최근 스페이스-X 등에서 보여진 재사용형 소재에 대한 연구가 관심을 받고 있다. 본 발표에서는 TPS 시스템과 항공엔진에 적용되는 세라믹 코팅기술 등 전반적인 우주항공 및 국방용 세라믹 구조소재에 대한 연구동향에 대한 고찰을 논의하고자 한다.

### [극한1-3 | 10:30] 초청강연

**초고온 환경에서의 극한소재 국산화 개발 현황과 한국재료연구원 협력:** 손인수\*(한화에어로스페이스)

**Keywords:** 초고온, 극한환경, 시험평가, 파일럿라인, 기술 고도화

항공우주 및 방산 분야의 극한 소재 개발을 한화에어로스페이스에서는 주도적으로 국내 산학연과 협력하고 있다. 항공우주는 극한 초고온에서의 소재 수요가 많으며, 초고온 환경에서의 소재 신뢰성 확보를 위한 개발과 시험평가가 중요하다. 극한소재 실증연구 기반 활용한 한화에어로스페이스 개발 현황과 계획에 대해서 공유하며, 시너지 확보를 위한 논의를 하고자 한다.

### [극한1-4 | 11:00] 초청강연

**Advancing High-Temperature Materials and Coatings for Gas Turbine Applications: Overview of NRC R&D Capabilities**  
: Dongyi Seo(Canada NRC)

**Keywords:** fatigue crack growth rate tests, fatigue tests, thermomechanical fatigue tests, and high temperature materials and protective coatings

The National Research Council of Canada's (NRC) Aerospace Research Centre advances aerospace technologies in aerodynamics, flight research, gas turbines, structures and materials, and manufacturing. Within it, the high temperature materials (HTM) group within the structures and materials performance laboratory (SMPL) has over 60 years of expertise in developing and testing high-temperature materials and coatings for gas turbine applications, focusing on fracture mechanics, fatigue, and thermomechanical testing. Equipped with standard and non-standard test facilities including spin-rig and high-velocity burner rig facilities, the HTM Group leads research in designing, characterizing, and validating high temperature materials and protective coatings that enhance gas turbine performance and durability. The HTM Group operates state-of-the-art testing facilities that conform to ASTM standards, enabling monotonic, fatigue, fracture, and creep testing under extreme conditions. Specialized capabilities include thermomechanical fatigue, ultrasonic high cycle fatigue, high-temperature fracture mechanics, and non-standard fretting and thermal fatigue tests. NRC's high-temperature coatings research focuses on the assessment and optimization of advanced thermal barrier and environmental barrier coatings using electron

beam physical vapor deposition processes. Durability and performance assessments are performed through furnace cyclic testing, thermal gradient shock testing, high-velocity burner rig testing, and supersonic flame testing, replicating engine-like conditions. The integration of materials modeling, experimental validation, and advanced testing infrastructure positions NRC as a national leader in developing high-performance materials and coatings that enhance the efficiency, reliability, and lifespan of gas turbine engines for aerospace and energy applications. This presentation outlines NRC's extensive R&D capabilities in high-temperature materials and coatings.

### [극한2-1 | 14:10] 초청강연

**극저온용 고Mn강 제품개발 현황:** 이순기\*(포스코), 한일옥(포스웰딩), 이상철, 소태일, 김상석(포스코)

**Keywords:** 고망간강, 극저온, 액화천연가스, 액화수소

본 발표는 용접성이 우수하고 기존 소재 대비 경제성이 뛰어난 극저온용 오스테나이트계 고망간강 및 용접재 개발, 표준화, 그리고 에너지 산업 전반에서의 상용화 사례를 다룬다. 포스코는 국내외 연구기관 및 산업계와의 장기간 협력을 통해 세계 최초로 고망간강을 상용화하였으며, 이를 LNG 추진선 연료탱크(용량 500 m<sup>3</sup>)에 최초 적용하여 2018년 3월부터 상업 운항을 시작하였으며, 선급의 연료탱크 검사 결과, 해당 소재의 신뢰성과 운항 성능이 성공적으로 입증되었다. 이러한 성과와 기술적 검증을 바탕으로 국제 해사기구(IMO) 화물·컨테이너 운송 소위원회(CCC)는 제7차 회의에서 IGC/IGF 코드 개정을 승인하여 고망간강을 공식 규격에 포함시켰다. 이후 운영 및 가격 경쟁력에서의 우위를 바탕으로, 고망간강 연료탱크를 적용한 LNG 추진 컨테이너선과 초대형 원유운반선 수십 척의 건조 계약이 체결되었으며, 적용 범위가 지속적으로 확대되고 있다. 또한 KGS 및 API 규격 등록을 통해 국내외 대형 LNG 육상저장탱크 적용이 본격화되었고, 최근에는 카타르 액화에틸렌 저장탱크 소재로 채택되면서 육·해상 전반에서 활용이 확산되고 있다. 본 발표에서는 더 나아가 탄소배출 제로 달성을 목표로 한 액화수소(LH<sub>2</sub>) 저장탱크용 고망간강 개발 현황과 향후 전망에 대해서도 논의한다.

### [극한2-2 | 14:40] 초청강연

**액체수소 저장용 금속 소재의 초극저온 기계적 신뢰성 평가:** 이수열\*(충남대학교)

**Keywords:** 액체수소, 금속소재, 소성변형, 수소취성

액체수소 저장용 금속소재의 신뢰성 확보를 위해서는 20 K 이하 극저온 환경에서의 기계적 특성과 수소취성 거동에 대한 체계적인 평가가 필수적이다. 일반적으로 금속의 수소취성은 상온에서 두드러지며, 온도가 낮아질수록 수소 확산도가 감소하여 그 영향이 완화되는 것으로 알려져 있다. 그러나 초극저온 영역에서는 전위 사태에 의해 유발되는 불연속적 소성변형으로 인해 국부적 온도 상승이 유발된다. 이러한 국부적 열적 상승은 수소 확산을 재활성화하여 수소의 국부적 집적을 촉진함으로써 수소취성에 대한 민감도를 증가시킬 수 있다. 본 연구에서는 초극저온 환경에서의 불연속적 소성변형 거동과 미세조직 의존적 수소 확산 및 집적 특성을 규명하고, 이들이 다양한 미세조직을 포함하는 금속 용접부의 수소취성 거동에 미치는 영향을 살펴보았다. 본 연구 결과는 액체수소 저장 시스템에 적용되는 금속소재의 기계적 신뢰성 향상을 위한 중요한 설계 지침을 제공할 것으로 기대된다.

### [극한2-3 | 15:10] 초청강연

**국제 환경 변화 대응을 위한 친환경 선박용 소재:** 이동준\*, 이창민, 김범철, 김진호(HD한국조선해양)

**Keywords:** 수소 저장 탱크, 암모니아 저장 탱크, LNG 저장 탱크

국제해사기구(IMO)의 환경 규제 강화와 전 세계적인 탄소중립 흐름은 조선 산업에 친환경 선박으로의 신속한 전환을 요구하고 있습니다. 본 발표에서는 이러한 패러다임 변화에 대응하기 위한 핵심 솔루션으로서의 선박용 차세대 소재 기술에 대해 조선소의 입장에서 분석해보았습니다. 특히 LNG, 암모니아, 액화수소 등 청정 연료의 안전한 저장과 운송을 위한 극저온용 소재 및 단열 소재 뿐만 아니라 선박 제조 기술의 최신 개발 동향과 적용 사례를 중점적으로 발표하고자 합니다. 이를 통해 급변하는 시장 환경 속에서 우리 조선 산업이 초격차 경쟁력을 확보하기 위해 소재 관점에서의 미래 방향성을 제시하고자 합니다.

### [극한3-1 | 16:00] 초청강연

**극한 소재 실증을 위한 금속 적층 제조 공정 기술 개발 현황 및 물성 제어 방안:** 이기안\*(인하대학교)

**Keywords:** 적층 제조, 극한 소재, 금속, 미세조직, 물성, 한계 돌파

최근 우주 항공, 에너지, 국방 등 첨단 산업 분야에서 요구되는 부품들은 초고온, 고압, 부식 등 극한 환경에서의 신뢰성 확보가 필수적이다. 적층 제조 (Additive Manufacturing, AM) 기술은 복잡한 형상의 자유로운 구현 뿐만 아니라, 급냉 공정의 특성을 활용하여 기존 주조 및 단조 공정으로는 구현하기 어려운 독특한 미세조직을 형성할 수 있다는 점에서 극한 소재 개발의 핵심 기술로 주목받고 있다. 본 발표에서는 그동안 본 연구 그룹의 연구 결과를 중심으로 금속 적층 제조 공정 기술의 최신 개발 현황을 공유하고, 이를 활용한 극한 환경용 고온, 고강도, 극저온 금속 소재의 실증 연구 전략을 토의하고자 한다. 관련하여 다양한 적층 제조 공정(Powder bed fusion, direct energy deposition, wire arc additive manufacturing, material extrusion additive manufacturing, cold spray additive manufacturing 등)을 활용한 금속 소재들(철강, Al 계 합금, 고엔트로피 합금, Ti 계 합금, Ni계 합금, 고온용 금속 합금 등)의 제조 가능성과 그 미세조직 및 극한 물성 평가 결과와 후처리 공정을 포함한 물성 제어 방안을 제시하고자 한다.



**[극한3-2 | 16:30] 초청강연**

**Big-Data-Empowered Electron Microscopy for Extreme-Condition Materials Research: Current Trends in Advanced Characterization and Evaluation: Jae Hyuck Jang\***(Korea Basic Science Institute, Chungnam National University)

**Keywords:** Electron Microscopy, Machine Learning, Big-Data Spectroscopy, Extreme-Environment Characterization, 4D-STEM

Recent advances in electron microscopy and spectroscopy have fundamentally reshaped the characterization of functional materials under extreme operational environments. With aberration-corrected optics, monochromated electron sources, and advanced in-situ stages, atomic-scale observation now closely mirrors real service conditions—from high-temperature catalysis to cryogenic operation under oxidizing and reducing atmospheres. At the same time, the explosive growth of high-dimensional spectroscopic datasets has created an urgent demand for machine learning and big-data analytics that extract statistically robust insights far beyond conventional manual interpretation. This presentation surveys these rapidly converging trends in advanced characterization and evaluation, and demonstrates how coupling extreme-environment experimentation with data-driven analysis opens new pathways for engineering next-generation functional materials. This presentation highlights a machine-learning-driven workflow that utilizes large-scale datasets from scanning transmission electron microscopy–electron energy-loss spectroscopy (STEM-EELS) to decode complex material behaviors. By combining unsupervised algorithms—such as NMF+ICA—with deep learning-based image segmentation, we precisely deconvolve subtle spectral features and quantify the spatial distribution of distinct phases within composite materials. Beyond spectroscopy, 4D-STEM further expands this big-data framework by capturing full diffraction patterns at every scan position, enabling simultaneous mapping of local strain, crystal orientation, and phase distribution. This methodology is demonstrated through the statistical analysis of cycling-induced degradation in PEMFC cathodes, where changes in ionomer coverage and catalyst contact ratios are quantitatively tracked [1]. Furthermore, monochromated EELS maps fine chemical bonding states—such as aromatic carbon and pyridinic nitrogen in OLEDs—differentiating organic layers indistinguishable under conventional imaging [2]. This high-resolution spectroscopic approach, coupled with local electron-beam irradiation, also reveals strain-dependent defect dynamics, showing how tensile and compressive strains respectively promote or suppress oxygen vacancy formation in perovskite oxides [3]. Finally, this talk surveys recent trends in in-situ characterization under extreme conditions—including high-temperature heating and cryogenic cooling (LN<sub>2</sub> & liquid He)—where researchers are increasingly probing material behavior in simulated operational environments. Together, these converging analytical strategies are providing unprecedented insights into structure–property relationships, driving the rational design of high-performance materials for demanding applications. References D. Yang, Y.-H. Kim, H. J. Lee, et al., “Integrated probing of cycling-induced degradation of multi-component electrode in hydrogen fuel cells via machine learning-empowered spectroscopic imaging,” *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 382, 125911 (2026). K. S. Dae, K.-S. Jang, C. M. Choi, and J. H. Jang, “Spatially Resolved Functional Group Analysis of OLED Materials Using EELS and ToF-SIMS,” *Analytical Chemistry* (2024). S. J. Yoo, J. Hwang, J. Jang, et al., “Comparing the Impacts of Strain Types on Oxygen-Vacancy Formation in a Perovskite Oxide via Nanometer-Scale Strain Fields,” *ACS Nano*, 18, 18465–18476 (2024). Funding This work was supported by the Korea Basic Science Institute (KBSI) grant (C624100).

**[극한3-3 | 17:00] 초청강연**

**SiC 화학조성 평가기술 고도화 및 표준화: 최기인\*, 김현구, 함주희, 김지민, 채윤미**(한국세라믹기술원)

**Keywords:** SiC, 실리콘 카바이드, 화학분석, 유리탄소, 총탄소

탄화규소(silicon carbide, SiC) 소재는 강도와 내열성, 고온 특성이 매우 우수한 엔지니어링 세라믹 소재로, 연마재, 야금 등 전통적인 분야부터 전자, 항공우주, 에너지 분야의 첨단 응용까지 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 최근에는 고전력, 고효율 전력 변환 시스템, 전기차, 태양광 발전 등에 핵심 소재로 사용되고 있다. 2023년 글로벌 SiC 분말 시장 규모는 6억 3,641만 달러로 추산되며, 2029년에는 8억 9,347만 달러로 성장할 것으로 예측되고 있다. 또한, 고순도 SiC 분말 시장 규모 역시 2024년도 기준 8,495만 달러에 달했으며, 2024년부터 2033년까지 연평균 성장률은 9.36 %로 높은 성장률을 보이는 등 고순도 SiC 분말 시장은 반도체, 전력 전자, 자동차 산업의 성장과 함께 꾸준히 성장하고 있다. SiC 분말의 특징/특성을 규정하는 항목들은 다양하지만, 그 중에서도 소재의 특성을 결정하는 한편, 소결 이후 최종 부품/제품에 대한 품질관리에 영향을 미치는 화학조성(chemical composition)은 가장 중요한 인자 중 하나이다. 특히, 고순도 SiC 분말의 품질을 확인하기 위해서는 불순물 원소를 정확하게 파악해야 하지만, 난용해성 소재인 SiC 분말의 화학조성 분석은 평가 방법이 복잡하고, 난이도가 높아 관련 기업에서는 분석기술 부족으로 인해 품질 보증에 어려움을 겪고 있다. 이번 발표에서는 국내외의 SiC 소재에 대한 평가와 관련된 표준을 살펴보고, 각 표준이 가지는 특징과 한계, 그리고 유리탄소, 유리 규소, 이산화규소 등 고순도 SiC 분말에서 불순물로 작용하는 항목에 대한 분석 및 표준화 방향에 대해서 살펴보고자 한다.

## 고신뢰성 소재 AI혁신: 공정-소재상태-디지털 통합 심포지엄

Room 4층 402B, 4월 29일

**[신뢰1-1 | 10:10] 초청강연****실험계획법과 인공지능을 활용한 초내열합금 개발:** 윤대원\*, 유영수, 정희원, 서성문, 이형수, 이호원, 정재면(한국재료연구원), 최윤석(부산대학교)**Keywords:** 인공지능, 초내열합금

초내열합금은 고온에서의 높은 기계적 강도와 내환경성을 가지고 있어 가스터빈, 화학 플랜트, 에너지 플랜트 등 다양한 고온 환경에서 구조재로 사용되고 있다. 그러나 초내열합금에는 고온 강도, 크리프 강도, 내산화성 등 다양한 물성이 요구되며, 이러한 요구 물성을 만족시키기 위해 다른 합금 대비 많은 종류의 합금 원소들이 첨가되어 새로운 합금의 개발에 높은 비용과 많은 시간이 소요되고 실패의 위험도 크다. 이러한 문제를 해결하기 위해 초내열합금 개발에 인공지능을 활용하려는 다양한 시도들이 이루어지고 있다. 현재 인공지능 모델들은 다양한 것들이 개발되어 사용되고 있으나 학습에 필요한 양질의 데이터 확보가 인공지능 활용의 주요한 걸림돌이 되고 있다. 본 발표에서는 한국재료연구원에서 진행된 실험계획법과 인공지능을 활용한 초내열합금 개발 사례를 소개한다. 특히, 실험계획법을 활용하여 실험을 설계하고 다양한 조성의 소형 시편을 이용해서 단기간에 인공지능 학습에 필요한 양질의 실험 데이터를 확보하는 방법과 인공지능 학습 활용 가능성을 보여준다.

**[신뢰1-2 | 10:30] 초청강연****인공신경망을 활용한 항공용 소재의 미세조직과 기계적물성 상관관계 개발방안 제언:** 정유인\*(한국항공우주산업)**Keywords:** .

인공신경망 기술의 발달에 따라 다양한 산업에서 해당 기술을 활용한 응용연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 일반적인 산업 대비 높은 수준의 신뢰도를 요구되는 항공산업에서는 해당 기술의 적용연구가 여전히 제한적이며, 특히 30년 이상의 기체수명 보장을 위해 요구되는 감항인증 기준을 충족하기 위해서는 해당 기술의 적용을 위한 체계적인 연구 및 개발이 필요할 것으로 판단된다. 본 제언에서는 업체, 학계, 연구기관이 참여해서 해당 기술을 개발하고 이를 항공기 개발 시 적용되는 Building Block Approach 기법 적용을 통해서 입증하는 방안을 제시해보고자 한다.

**[신뢰1-3 | 10:50] 초청강연****국가전략 알루미늄 판재 개발 (부재) 및 지능화 뿌리기술:** 김봉환, 김세광\*(한국생산기술연구원)**Keywords:** 알루미늄 판재, 공급망 부재, 지능화 뿌리기술

미국, 중국, 일본, 독일 등 글로벌 자동차 기업 및 방산 기업이 있는 국가 중 알루미늄 판재를 생산하지 못하는 나라는 대한민국이 유일. 철기 (Steel Age)에서 알기 (Aluminum Age)로의 변화를 묵인한채, 여전히 스틸 중심의 소재 - 뿌리기술 - 부품 산업 경쟁력에 집중. 현재 비록 알루미늄 판재를 수입에 의존하지만, 알루미늄 판재의 공급망을 확보하는 것과 알루미늄 판재의 뿌리기술 (생산기술) 경쟁력을 확보하는 2가지 트랙에 대한 KITECH의 의무와 노력을 발표하고자 함.

**[신뢰1-4 | 11:10] 초청강연****용융염원자로용 초고내식 소재 및 Ni 피복기기 개발 현황:** 최민재(한국원자력연구원)**Keywords:** 소형 원전, 용융염원자로, 초고내식 소재, Ni합금, 피복기기

용융염원자로(Molten Salt Reactor, 이하 MSR)는 높은 안전성과 경제성으로 주목받는 차세대 소형 원전 노형 중 하나이다. 하지만, 650°C 이상의 높은 운전 온도에서의 염화물계 용융염에 대한 기존 원전 구조재의 낮은 부식 저항성은 MSR 개발의 가장 큰 난제로서, 특히 염화물계 용융염은 불화물계 용융염에 비해 구조재에 대한 부식민감도가 높아 현재 ASME Section III, Division 5에서 정의하는 고온원자로용 구조재만으로는 MSR의 가혹한 운전 환경에서의 장기 내식성 및 건전성을 확보하기 어려운 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Fe 및 Ni를 기반으로 한 초고내식 신소재의 개발 연구가 수행되고 있으며, 기존 고온원자로용 구조재를 활용할 수 있도록 하는 내식성 피복층에 대한 연구 역시 활발히 진행되고 있다. 초고내식 신소재 개발 연구의 경우, 합금 조성 최적화, 650°C 용융염 환경에서의 부식 거동 평가, 침지 시험에 의한 부식 속도 정량화를 통해 MSR용 구조재로서의 적용 가능성을 평가하고 있다. 기존 구조재에 적용 가능한 내식성 피복층 개발 연구의 경우, Ni 기반 재료를 피복재로 선정하여 weld overlay, thermal spray, explosion bonding, plating, Ni forming 기술 등의 피복층 형성 공정 적용을 통한 피복기기 개발이 이루어지고 있다. MSR의 성공적인 실용화를 위해서는 장기 가동 건전성이 확보되는 초고내식 구조재 혹은 피복기기의 개발이 필수적이며, 이를 위해 개발중인 재료의 핵연료와의 상호작용에 따른 부식 기구 규명 및 연료염이 포함된 실제 운전조건에서의 장기 부식수명 평가에 대한 연구 역시 필수적으로 수행되어야 한다.

**[신뢰2-1 | 14:00] 초청강연****국가 전략소재 공정 사전설계를 위한 소재상태 기반 AI 연계:** 방산, 패키징, 수소취성 사례: 권동일\*(서울대학교)**Keywords:** 국가 핵심 소재, 고신뢰성, 공정, 소재상태, 디지털 데이터

방산, 원전, 항공우주, 반도체 등 국가 핵심 산업 소재는 단순 고성능 확보를 넘어 전 수명주기에서의 예측 가능성과 구조적 신뢰

성을 요구받고 있다. 그러나 현재의 소재 개발 체계는 최종 물성 평가 중심의 사후 평가에 의존하고 있으며, 공정 단계 간 소재 상태의 정량적 연계가 부족하여 공정 최적화와 신뢰성 확보에 한계를 보이고 있다. 본 발표에서는 나노-마이크로 다중스케일 소재 상태 규명과 디지털 데이터 통합을 기반으로 한 고신뢰성 사전설계 프레임워크를 제안한다. 주조, 단조, 열처리, 표면처리, 적층제조, 패키징 등 각 단위 공정 단계에서 소재의 물리적 상태를 정량화하고, 이를 연속적인 디지털 상태 데이터로 축적·연계하는 구조를 제시한다. IIT 기반 국부 물성 평가, 미세조직 분석, 열역학·동역학 시뮬레이션을 통합하여 기계적 물성을 공정 이력과 열화 진화를 반영하는 상태 변수로 재정의하고, 압입 하중-변위 기반 상태 민감 인자와 미세조직 지표를 연계함으로써 소재 상태 변화와 구조 신뢰성 간의 디지털 연결을 구현한다. 이와 같이 구축된 소재 상태 데이터는 AI 학습이 가능한 구조로 확장되며, 제조 공정 최적화, 수명 예측, RUL 정량화에 활용될 수 있다. 또한 제조-운용-정비 전 주기를 연결하는 Material Digital Twin으로 확장되어 실제 상태와 동기화된 신뢰성 예측을 가능하게 한다. 본 연구는 소재 개발 패러다임을 사후 검증 중심에서 상태 기반 사전설계 및 디지털 예측 중심으로 전환하기 위한 접근으로, 국가 전략소재의 고신뢰성 확보를 위한 기술 인프라 방향을 제안한다.

### [신화2-2 | 14:30] 초청강연

**Nano/Micro/Macro IIT 기반 다중스케일 소재 상태 데이터 생성 및 AI 기반 해석: 홍정화\*(프론틱스)**

**Keywords:** Nano/Micro/Macro, 계장화 압입시험(IIT), AI 기반 해석법

차세대 고신뢰성 소재 개발은 나노-마이크로 수준의 공정 제어와 거시적 구조 성능 및 신뢰성 간의 정량적 연결을 요구한다. 그러나 실험실적 기계적 평가는 파괴적인 기법으로 최종 물성 중심의 검증에 치우쳐 있어 공정별 단계에서 변화하는 국부 소재 상태를 설계 변수로 연계에 어려움이 있다. 본 발표에서는 Nano-Micro-Macro 스케일을 포괄하는 Instrumented Indentation Test(IIT)를 기반으로 소재 상태를 정량화하고 이를 디지털 데이터로 구조화하여 데이터 기반 해석과 연계하는 통합 접근을 제안한다. 압입 하중-변위 응답으로부터 탄성·소성 거동, 경화 특성, 시간 의존 변형 등 상태 민감 지표를 추출하고, 이를 미세조직 지표 및 공정 이력 정보와 함께 해석함으로써 강화 메커니즘과 상태 변화를 정량적으로 표현한다. 또한 동일한 지표 체계를 대표 위치에 적용하여 부품 수준에서의 강도-연성 변화, 취성과 경향 및 열화 축적 상태를 비교·추적할 수 있는 가능성을 제시한다. 이와 같이 구조화된 IIT 기반 데이터는 공정 조건의 사전 선별, 개발 과정에서 반복 실험 부담 완화, 현장 부품의 국부 열화 상태 정량 평가, 그리고 연구실 분석과 현장 진단 간 데이터 일관성 확보에 활용될 수 있다. 본 접근은 다중스케일 IIT를 공정-미세조직-물성-신뢰성 간 관계를 잇는 상태 기반 데이터 구조로 확장함으로써, 소재 개발과 운용 단계의 상태 진단을 연결하는 데이터 기반 평가 플랫폼으로의 발전 방향을 제시한다.

### [신화2-3 | 14:50] 초청강연

**계장화 압입시험(IIT)-전산모사기반 디지털 트윈-AI 연계 프레임워크를 활용한 소재물성측정: 한홍남\*, 박민우, 정든봄(서울대학교)**

**Keywords:** 계장화 압입시험, 디지털 트윈, 인공지능, 물성 측정

고신뢰성 부품에서 발생하는 성능 편차와 파손 위험은 공정 이력에 의해 형성된 미세조직·잔류응력 등 소재 상태의 불균일성에서 기인한다. 따라서 공정-성능 연계를 위해서는 부품 내 위치별 소재 상태를 정량화하는 방법론이 필요하다. 계장화 압입시험(Instrumented Indentation Test, IIT)은 국부 거동을 비파괴적으로 계측할 수 있어 이러한 요구에 부합하는 유효한 수단이다. 다만 압입 응답에는 소성 경화 특성, 잔류응력, 이방성이 비선형적으로 중첩되어 나타나며, 압입시험에서 도출되는 다양한 데이터는 복잡한 상관관계를 가진다. 본 발표에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 압입 데이터에서 나타나는 물리정보를 기반으로 하는 디지털 트윈과 데이터 기반 AI를 결합한 해석 프레임워크를 제안한다. 유한요소해석(FEA)을 활용하여 실제 압입 조건과 동일한 경계 조건 및 구성 방정식을 구현한 디지털 트윈 환경을 구축하고, 경화 파라미터, 이방성 계수, 다축 잔류응력 성분 등으로 정의되는 상태 공간을 체계적으로 샘플링하여 대규모 데이터베이스를 생성한다. 이 데이터는 공정에 의해 형성된 소재 상태를 물리적으로 반영하는 디지털 표현으로 기능한다. 학습된 AI 모델은 하중-변위 곡선 전 구간 형상과 압입 후 표면 프로파일을 동시에 입력받아, 다차원 응답에 내재된 패턴을 추출한다. 이를 통해 기존 지표 기반 해석으로는 분리하기 어려웠던 소성 경화 특성과 이방성 파라미터 혹은 잔류응력을 동시 식별한다. 또한 압입자 반경 및 침투 깊이에 따른 민감도 분석을 통해, 소재 상태 식별에 가장 효과적인 시험 조건을 제시한다. 본 프레임워크는 공정에서 기인한 소재 상태를 디지털 데이터로 변환하고, 이를 AI 기반 역추론을 통해 재해석함으로써 공정-소재 상태-디지털 데이터의 연계를 기반으로 한 고신뢰성 소재 평가·관리의 실용적 로드맵을 제안한다.

### [신화2-4 | 15:10] 초청강연

**소재·부품 품질 고도화를 위한 이미지 기반 지능형 이상 탐지 연구: 초경 합금 조성 편차 분석 및 반도체 웨이퍼 결함 능동 검출을 중심으로: 노우란\*, 윤지강, 전용제, 강선아, 김영천, 김지현, 박성호, 정민석(국립경국대학교)**

**Keywords:** 지능형 이상 탐지, 딥러닝 기반 이미지 정량 분석, 능동 학습, 초경 합금, 반도체 웨이퍼

소재·부품 제조 현장에서는 제품 성능과 신뢰성을 결정 짓는 조성 편차 및 결함 패턴을 초기에 식별하는 것이 필수적이다. 그러나 산업 데이터의 편중성과 희소성으로 인해 기존의 규칙 기반 또는 정적 분류 체계로는 품질 고도화에 따른 공정 변화에 유연하게 대응하는 데 한계가 있다. 본 연구는 이미지 기반 특징 학습(embedding)과 불확실성 기반 선별을 핵심 축으로 하여, 초경합금(WC-Co) 미세조직의 조성 편차 분석과 반도체 웨이퍼 빈 맵(WBM, Wafer Bin Map)의 결함 패턴 능동 검출을 지능형 이상 탐지 관점에서 제시한다. 먼저, 초경합금(WC-Co) 사례에서는 한정된 불연속적 조성(17, 20, 22, 23 wt% Co) 데이터 환경에서 연속적인 조성 추정 및 품질 편차를 정량화하는 방법론을 다룬다. EfficientNet-B0를 통해 추출된 고차원 특징 벡터를 UMAP/t-SNE(Uniform Manifold Approximation and Projection/t-distributed Stochastic Neighbor Embedding)로 시각화하여 조성별 군집 구조와 경계 샘플을 식별함으로써 조성이 불명확한 샘플에 대한 판정 근거를 확보하였다. 또한, 데이터 부족 문제를 해결하기 위해

조건부 생성적 적대 신경망(cGAN, Conditional Generative Adversarial Network)으로 중간 조성의 미세조직을 합성하고, 판별기(Discriminator) 점수와 임베딩(Embedding) 공간 내 인접도를 기준으로 유효 샘플을 선별하여 학습에 반영하였다. 이를 통해 구축된 앙상블(Ensemble) 회귀 모델은 미지의 시편에서 Co 조성을 연속값으로 정밀하게 추정하여 소재 내부의 불균질성을 정량적으로 평가할 수 있음을 확인하였다. 반도체 WBM 사례에서는 기존 패턴의 정밀 분류와 신규 패턴의 실시간 대응을 위한 다단계 능동 학습(Active Learning) 루프를 제안한다. Radon 변환으로 추출된 회전 불변 특징을 바탕으로, 1차적으로 OC-SVM(One Class Support Vector Machine)과 EEOC-SVM(Entropy Estimation One Class Support Vector Machine)을 결합한 2단계 구조의 판별기를 통해 기존 패턴과 신규 이상 패턴을 분리한다. 기존 패턴으로 판정된 샘플은 ResNet50 기반의 다중 클래스 분류기(Multi-class Classifier)를 통해 Center, Donut, Scratch 등 세부 결함 유형으로 자동 분류된다. 특히, 신규 패턴의 오분류 유입을 억제하기 위해 마할라노비스 거리 기반의 이상치 탐지를 적용하였으며, 탐지된 신규 샘플은 DBSCAN(Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise)을 통해 새로운 결함 클래스로 정의된다. 이렇게 정의된 신규 클래스는 라벨링 후 판별기와 분류기의 출력 레이어 업데이트 및 재학습 공정에 투입되어, 시스템이 스스로 결함 범주를 확장해 나가는 선순환 구조를 구축하였다. WM-811k 데이터셋 적용 결과, 초기 3개 패턴에서 9개 패턴까지 세부 클래스를 단계적으로 확장하는 과정에서 높은 분류 정확도와 순차적 식별 가능성을 확인하였다. 본 연구는 데이터 제약이 큰 제조 현장에서 이미지 기반의 지능형 전략이 조성 편차 분석과 신규 패턴 대응에 효과적임을 보여준다. 제안된 기술은 소재-부품 품질 고도화를 위한 핵심적인 기반 기술로서 품질 관리 자동화와 공정 신뢰성 향상에 활용될 것으로 기대된다. Acknowledgments: This work was supported by a Research Grant of Gyeongbuk National University.

### [신뢰3-1 | 15:50] 초청강연

**재료시험의 디지털 전환을 위한 AI 도입 현황과 전망:** 민기득\*, 안종기, 최현선((주)피레타)

**Keywords:** 재료시험, 인공지능, 디지털 전환

재료시험평가는 오랫동안 다수의 시편을 반복적으로 소모하는 방식으로 신뢰성을 확보해 왔으며, 이는 개발 비용, 일정, 자원 투입 측면에서 점점 더 큰 부담으로 작용하고 있다. 글로벌 산업 환경이 고도화·고속화됨에 따라, 시험평가 역시 단순한 품질 확인 수단을 넘어 기업의 기술 경쟁력과 개발 전략을 좌우하는 핵심 인프라로 전환되고 있다. 최근 인공지능(AI), 데이터 인프라, 시뮬레이션 기술의 결합은 대리 모델(Surrogate Model), 물리 기반 머신러닝(PINN), AI 기반 디지털 이미지 상관법(AI-DIC)과 같은 새로운 시험 패러다임을 가능하게 하며, 시험 횟수 절감, 개발 기간 단축, 의사결정의 정밀도 향상이라는 경영적 가치를 동시에 창출하고 있다. 미국 NIAR/NCAMP의 동등성(Equivalency) 기반 인증 접근, 일본 NIMS의 자율 실험 플랫폼, 독일 Fraunhofer 및 NASA의 적용 사례는 AI 기반 시험평가가 연구 효율 개선을 넘어, 개발 리스크 관리와 투자 효율 극대화의 전략적 수단으로 기능하고 있음을 보여준다. 디지털 트윈과 디지털 스레드를 중심으로 한 시험평가 체계의 전환은, 기업과 시험기관이 ‘얼마나 많이 시험하느냐’가 아니라 ‘얼마나 정교한 데이터와 모델을 보유하고느냐’로 경쟁하는 구조로의 변화를 의미한다. 향후 재료시험 분야에서의 경쟁력은 데이터 자산화, 물리 기반 AI 모델 내재화, 그리고 AI 예측 결과를 신뢰성 평가 체계에 제도적으로 연결하는 전략적 실행력에 의해 결정될 것이다.

### [신뢰3-2 | 16:10] 초청강연

**AI 기반 압입-인장 변환: 실험-시뮬레이션 하이브리드 접근과 불확도 고려:** 김중형\*, 박시현, 박준태, 김광희(국립부경대학교), 유스트블 라작(하버드대학교)

**Keywords:** 압입시험, 인장물성, 인공지능, 측정불확도

압입시험(instrumented indentation test)은 마이크로·나노 스케일에서 국부 기계적 거동을 정량화할 수 있는 시험 기법으로, 최근에는 고속·자동화 기술의 발전과 함께 맵핑(mapping)을 통한 멀티스케일 물성 평가가 가능해지고 있다. 이를 통해 소재의 국부 역학 물성뿐 아니라 미세조직 분포 및 이질성에 대한 정보까지 확보할 수 있어, 압입시험은 차세대 소재 분석 도구로서 활용 가능성이 더욱 확대되고 있다. 또한 시편 크기 제한이나 형상 제약으로 인해 표준 인장시험 적용이 어려운 경우, 압입시험은 비파괴적 또는 준비 파괴적 대안 시험법으로 유용하다. 최근에는 컴퓨터 계산 성 및 해석 기술의 발전으로 압입 거동과 인장 물성 간의 복잡한 비선형 관계를 데이터 기반으로 학습하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 인공지능망 모델을 이용하여 압입 곡선으로부터 항복강도, 인장강도, 가공경화 거동 등 인장 특성을 예측하려는 시도가 증가하고 있다. 그러나 압입-인장 변환을 위한 인공지능망 모델은 압입 데이터의 측정 불확도 및 노이즈에 민감할 수 있으며, 작은 실험 오차가 예측 결과의 큰 편차로 이어질 가능성이 존재한다. 또한 학습에 활용되는 이상화된 시뮬레이션 데이터와 실제 실험 데이터 사이에는 경계조건, 재료 모델 단순화, 계측 오차 등으로 인한 차이가 발생하며, 이는 모델의 일반화 성능을 저하시킬 수 있다. 본 연구에서는 실험 데이터와 시뮬레이션 데이터를 결합한 하이브리드 학습 전략을 기반으로 압입-인장 변환 인공지능망 모델을 구축하고, 측정 불확도에 대한 민감도를 완화하여 보다 노이즈에 견고한(robust) 예측 성능을 확보하고자 하였다. 이를 위해 시뮬레이션 기반 압입 데이터에 실제 실험에서 발생 가능한 변동성을 반영한 perturbation을 도입하여 데이터 증강(data augmentation)을 수행하였다. 이러한 접근은 압입 신호의 불확도를 모사함으로써 학습 데이터 분포를 확장하고, 실험-시뮬레이션 간의 gap을 완화하는 데 기여하였다. 결과적으로 제안된 방법론은 압입시험 기반 인장 물성 예측의 신뢰성을 향상시키며, 공정-소재 상태-디지털 데이터 연계 관점에서 AI 기반 역학 물성 추정의 적용 가능성과 한계를 함께 제시한다.

### [신뢰3-3 | 16:30] 초청강연

**금속재료의 내구성 및 성능 예측을 위한 미세구조 데이터 정량화:** 김수현\*, 박지원, 오창석(한국재료연구원)

**Keywords:** 금속, 미세구조, 데이터, 정량화, 내구성, 성능, 예측

금속재료의 내구성과 성능을 예측하기 위해서는 재료의 화학적 성분, 공정 조건 뿐만 아니라 미세구조적인 인자를 표현하는 데이

터를 필요로 한다. 특히, 피로특성, 내식성, 변형거동, 파괴거동 등의 경우 재료의 미세구조에 크게 영향을 받으며, 사용 환경에서의 수명과 성능을 정확히 예측하기 위해서는 미세구조 데이터를 정량화하는 과정이 필수적으로 요구된다. 금속재료의 미세구조적인 특징은 결정립 크기/형상, 분산상 크기/분포, 집합조직, 결함 등이 있으며, 이를 데이터화하기 위해서는 광학현미경, 전자현미경, EBSD, XRD 등의 기법을 이용하여 원시 데이터를 획득하고 이를 정량적인 수치로 가공하는 과정을 거치게 된다. 미세구조 데이터를 획득하고 가공하는 과정의 신뢰도를 확보하고 재료의 특성을 표현할 수 있는 미세구조적인 인자를 빠르고 정확하게 추출하는 프로토콜을 확립하는 것이 보다 정확한 물성 예측 모델 개발에 핵심이라 할 수 있다. 본 연구에서는 주조, 가공, 열처리 등의 공정을 거친 금속재료에 대해서 이미지 관찰, 측정 분석 등의 방법으로 미세구조 데이터를 획득하고 다양한 방법을 이용하여 정량화하였다. 모빌리티, 항공, 국방 등 경량화를 위한 대표 소재인 알루미늄 합금에 대하여 결정구조 및 강화상의 데이터를 정량화하고 이를 이용한 물성 예측 모델 적용 가능성을 고찰하였다.

### [선택3-4 | 16:50] 초청강연

Foundation AI models in materials science: simulation and inverse design: Sungwoo Kang\*(KIST)

*Keywords:* 인공지능, 머신러닝 포텐셜, 생성모델

Foundation AI models are reshaping materials science by enabling both realistic simulations and efficient inverse design. Recent universal machine-learning interatomic potentials (MLIPs) achieve high generalizability while being fast enough for large-scale atomistic calculations. We show that such models can reliably reproduce near-DFT behavior even for diverse chemical reactions and realistic nanostructures. We further discuss how model distillation and fine-tuning improve efficiency, how coupling with kinetic Monte Carlo extends accessible time scales, and how potential-aware approaches enable practical electrochemical and reaction simulations. We also highlight diffusion-based generative models. We have recently demonstrated strong capability in predicting promising photovoltaic materials by exploring vast structural and compositional spaces. Despite these successes, important limitations remain, including reduced reliability in under-sampled chemical spaces and challenges with physical consistency. Finally, we discuss future opportunities for further develop foundation models toward more robust and autonomous materials discovery.

[나노융합1-1 | 09:00] 초청강연

Non-destructive dispersion of SWCNT and its application in Si-CNT Binary Component Li-battery anode: Jungmo Kim(Electrotechnology Research Institute)

**Keywords:** Carbon Nanotube, Dispersion, Li-ion Battery, Silicon

Following the successful commercialization of multi-walled CNTs (MWCNTs) as the conductive agents in Li-ion battery (LIB) cathodes, the industries are currently making approaches to use single-walled CNTs (SWCNTs). In order to fully utilize SWCNTs in the LIB electrodes, they must be prepared in a highly-dispersed state while maintaining their morphology and crystallinity. Unfortunately, the conventional procedures used for the MWCNTs are ineffective in the cases of SWCNTs, requiring alternative strategies. Herein, I introduce a simple and non-destructive method for the fabrication of highly concentrated SWCNT dispersion and present and its application for realizing a silicon(Si) based electrode with extremely high Si loading. The SWCNTs were dispersed using an electron solution, in which the SWCNTs are spontaneously charged. The charged SWCNTs could be easily dispersed through a simple stirring, resulting in individually debundled SWCNT dispersion with concentration up to 20 mg/ml. The dispersed SWCNTs maintained their crystallinity and electrical properties, while being able to be fabricated into freestanding films through a simple coating and lift-off process. The coating process can be applied to the fabrication of a freestanding electrode solely composed of the SWCNTs and Si microparticles. A mechanically robust electrode with Si loading up to 98 wt% could be obtained, and subsequently exposed to a rapid Joule heating. The process resulted in an interfacial bond between the SWCNTs and the Si, which induces mechanical strengthening and a facilitated charge transfer into the Si, leading to a record-high electrochemical performances (i.e., capacity, Coulombic efficiency, areal current density) with superior electromechanical stability.

[나노융합1-2 | 09:25]

Coherency-Driven Stabilization of Metastable oxide Interfaces for Highly Selective Gas Sensing: Hyeuk Jin Han\*(Sungshin Women's University)

**Keywords:** Metastable materials, Coherency-driven interface engineering, Metal oxide, Gas sensor

Metastable materials offer a versatile platform for realizing emergent properties and functionalities that are inaccessible in thermodynamically stable phases, as exemplified by diamond and the 1T' phase of MoS<sub>2</sub>. However, stabilizing metastable phases under sensor operating and processing temperatures remains a central challenge, severely limiting the practical use of their unique surface electronic structures for highly sensitive and selective gas detection. Here, we demonstrate a coherency-driven stabilization of metastable PtO<sub>2</sub> through atomic-scale engineering of Pt-SnO<sub>2</sub> interfaces, enabling independent control of the Pt oxidation state without inducing morphological disruption of oxide nanostructures. This stabilization is achieved via substitutional incorporation of Pt<sup>4+</sup> ions into the SnO<sub>2</sub> lattice at 900 °C, forming highly coherent and thermodynamically robust interfaces, as confirmed by X-ray photoelectron spectroscopy and atomic-scale imaging. As a result, metastable PtO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> sensors exhibit exceptionally high H<sub>2</sub>S detection performance, with a 75-fold enhancement in sensitivity (response ≈ 753 at 1 ppm) and outstanding selectivity (selectivity factor > 500) compared to conventional noble-metal-based sensor designs. Density functional theory calculations further reveal that this performance enhancement originates from preferential H<sub>2</sub>S adsorption and interface-induced modification of charge-transfer dynamics at the coherently stabilized PtO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub> heterointerface. Acknowledgment This research was supported by the Nano & Material Technology Development Program (RS-2024-00407291) and by a grant (RS-2025-16069787), both through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT), Republic of Korea.

[나노융합1-3 | 09:40]

Investigation of  $\pi$ -Conjugated Anions at SnO<sub>2</sub>/Perovskite Interfaces in Perovskite Solar Cells: Wonjin Jang, Soo Young Kim\*(Korea University)

**Keywords:** Perovskite Solar Cells, SnO<sub>2</sub>/Perovskite Interface

Defect-rich buried interfaces, particularly oxygen vacancies at the SnO<sub>2</sub>/perovskite interface that act as dominant nonradiative recombination centers, remain a critical bottleneck limiting the efficiency and stability of perovskite solar cells (PSCs). While conventional interfacial passivation relies on simple anions with localized coordination, how the electronic structure of anions modulates interfacial defect suppression remains poorly understood. Here, we establish a conjugated anion modulation strategy by comparing potassium acetate (KAc) and potassium sorbate (KSb), which share identical K<sup>+</sup>-carboxylate frameworks but differ in anion conjugation, thereby revealing the role of  $\pi$ -conjugation at buried interfaces. Owing to its  $\pi$ -conjugated backbone, KSb provides favorable work function tuning of SnO<sub>2</sub> films and enables spatially extended defect passivation through additional coordination with both oxygen vacancies in SnO<sub>2</sub> and undercoordinated Pb<sup>2+</sup> in the perovskite. Beyond conventional coordination passivation, the  $\pi$ -

conjugated anion of KSb effectively suppresses nonradiative recombination and leads to improved crystallinity with reduced lattice distortion in the overlying perovskite layer. Consequently, KSb-modified devices deliver a relatively high open-circuit voltage of 1.183 V and a fill factor of 84.30%, achieving an efficiency of 22.16%, exceeding that of both the control devices (21.04%) and the KAc-modified devices (21.95%). Moreover, unencapsulated KSb devices retain 97% of their initial efficiency after 1000 h under dark ambient storage and exhibit superior thermal robustness, highlighting conjugated anion modulation as a powerful strategy for advancing perovskite photovoltaics.

#### [나노융합1-4 | 09:55]

High-Sensitivity Acetone Sensor Based on CeO<sub>2</sub>-Decorated NiO Nanodomes: The Effect of Ce<sup>3+</sup>/Ce<sup>4+</sup> Ratio: Junho Hwang(Yonsei Univ.), Young-Seok Shim\*(Koreatech Univ.), Wooyong Lee\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** NiO, CeO<sub>2</sub>, Nanostructure, Catalyst, Gas sensor

Exhaled breath analysis has emerged as a promising, non-invasive approach for disease diagnosis through the detection of specific biomarkers. Acetone in exhaled breath is a critical biomarker of diabetes, driving demand for highly sensitive and selective acetone gas sensors[1-2]. In this study, CeO<sub>2</sub>-decorated NiO nanodomes (NDs) were developed to enhance acetone detection response and selectivity. Optimal performance was achieved with NDs decorated with a 5 nm-thick CeO<sub>2</sub> layer at an operating temperature of 400 °C. This configuration yielded a 25.4 response (R<sub>gas</sub>/R<sub>air</sub>) to 50 ppm of acetone, representing a 15.5-fold increase compared to pristine sensors. This enhanced performance enabled a ppb-level theoretical detection limit that remained robust under humid conditions. The improvement is primarily attributed to the formation of p-n heterojunctions. Increased oxygen defects within the sensing layers, driven by a higher Ce<sup>3+</sup>/Ce<sup>4+</sup> ratio. These defects facilitate superior adsorption of oxygen ions onto the CeO<sub>2</sub> and NiO surfaces, thereby significantly boosting gas-sensing sensitivity. These results demonstrate the potential of CeO<sub>2</sub>-decorated NiO NDs for highly selective acetone detection, paving the way for advanced non-invasive breath-based diagnostics.

#### [나노융합1-5 | 10:10]

Abnormal Melting and Thermal Properties of Spiky Gold Mesoparticles: Effects of Complex Dimensions and Morphology: Jieun Lee, Jiyoung Kim, Minkyung Kwak, Hyungi Min, Eunsoo Park\*(Seoul National University)

**Keywords:** Gold particle, Surface plasmon resonance, Spiky nanoparticle, Melting-point depression

Gold nanoparticles display size- and shape-dependent optical responses governed by surface plasmon resonance (SPR), enabling tunable color and photophysical behavior through synthesis variables such as temperature, pH, and reducing conditions. In addition, as the characteristic dimension of gold decreases toward the nano/meso scale, its melting temperature can deviate markedly from the bulk value, commonly referred to as melting-point depression. These coupled optical and thermal size effects have motivated growing interest in morphology controlled gold particles and their structure-property relationships. Here, we recover high-purity gold from dental gold inlay alloys via a chemical reduction route, producing gold mesoparticles with a pronounced spiky, branched morphology. We examine the formation pathway of these complex-shaped particles and track their thermally induced evolution, including changes in color and morphology during heat treatment. Notably, abnormal melting behavior is observed even within the mesoscopic size range, highlighting that melting-point depression can persist beyond the conventional nanoparticle scale. The thermal and microstructural characteristics are analyzed using differential scanning calorimetry (DSC) in conjunction with electron microscopy (SEM and TEM). This work seeks to clarify the thermodynamic factors underlying melting-point depression in spiky mesoparticles with complex dimensions, considering contributions from morphology-enhanced surface/edge atom populations and weakened cohesive bonding at reduced length scales. Overall, the results connect particle size, branched morphology, and color variation to thermal behavior, providing design-relevant insights for functional nanostructured materials with tailored optical and heat-response characteristics.

#### [나노융합2-1 | 10:35] 초청강연

Efficient Photoelectrochemical System for the Production of Green Hydrogen and High Value-Added Chemicals: Sanghan Lee\*(광주과학기술원)

**Keywords:** Photoelectrochemical, High value-added chemicals, Hydrogen

Solar-driven photoelectrochemical (PEC) systems have emerged as a promising platform for producing green hydrogen and enabling sustainable chemical upcycling, offering solutions to pressing environmental challenges such as global warming and resource imbalances. Among various materials, organometal halide perovskites (OHPs) and organic semiconductors (OSs) have attracted growing attention due to their excellent optoelectronic properties, low-temperature processability, and tunable functionality. However, their vulnerability to moisture, heat, and photodegradation presents major hurdles for long-term PEC operation. In this talk, two advanced PEC systems based on OHP and OS photoelectrodes will be introduced, each demonstrating breakthroughs in stability, efficiency, and functional versatility. First, highly stable and efficient OHP-based photoelectrodes were developed using eutectic gallium-indium (EGaIn) alloy encapsulation, which offers complete protection from external degradation while enabling efficient charge transport. These photoelectrodes delivered a high photocurrent density of 21.2 mA cm<sup>-2</sup> with minimal voltage losses between photovoltaic and PEC modes, maintaining excellent operational stability over 100 hours in acidic electrolyte. Building on this, a dual



OHP photoelectrode system was fabricated, achieving the highest reported solar-to-hydrogen (STH) efficiency among OHP-based PEC systems. Second, a bias-free PEC upcycling platform was developed to simultaneously valorize biodiesel byproducts—nitrate and glycerol—into ammonia and formate. This system integrates a bifunctional Ni-Fe-P electrocatalyst with OS-based photoanodes and photocathodes, employing a metal-foil encapsulation approach for long-term stability under continuous solar illumination. The dual-photoelectrode configuration exhibited a high reaction current density of  $11.04 \text{ mA cm}^{-2}$  and >95% Faradaic efficiencies with excellent selectivity. These results collectively highlight the potential of next-generation PEC systems, combining material innovations with device engineering, to achieve stable, efficient, and bias-free solar-driven hydrogen production and selective chemical upcycling.

#### [나노융합2-2 | 11:00] 초청강연

Two-dimensional materials for electronic devices: Min Sup Choi\*(Chungnam National University)

**Keywords:** Two-dimensional materials, flash memory, oxidation, Janus TMDs, contact engineering

This study presents strategies for achieving reliable and high-performance next-generation electronics based on two-dimensional (2D) materials. A van der Waals flash memory device was developed by utilizing the self-limiting oxidation of  $\text{TaS}_2$  to form a  $\text{TaO}_x$  tunneling barrier via ultraviolet ozone (UVO) treatment. The precisely controlled  $\text{TaO}_x$  layer enabled stable hysteresis behavior and robust data retention. Furthermore, a non-volatile memory employing Janus  $\text{MoSSe}$  as a charge-trapping layer and atomically thin h-BN as a tunneling insulator demonstrated enhanced retention and endurance due to the strong vertical dipole of the asymmetric Janus structure. In parallel, iodination was introduced as an effective polarity modulation technique for  $\text{WSe}_2$  transistors. Cu-contacted  $\text{WSe}_2$  FETs exhibited a transition from ambipolar to stable p-type conduction after iodine exposure, attributed to  $\text{CuI}$  formation and defect passivation that reduced contact resistance. These results highlight chemical engineering as promising routes for optimizing 2D memory and logic device performance.

#### [나노융합2-3 | 11:25]

주사열탐침현미경(SThM)을 사용한 나노스케일 열물성 측정 및 정량화 기술: 구승희(한국표준과학연구원), 신호선\*(한국표준과학연구원, 과학기술연합대학원대학교)

**Keywords:** 주사열탐침현미경(Scanning thermal microscopy), 정량적 열 맵핑(Quantitative Thermal Mapping), 레일리 불안정성(Rayleigh instability), 열 접촉 저항(thermal contact resistance)

차세대 전자 소자의 고집적화에 따라 나노스케일에서 국부적 발열 및 열전달을 이해하는 것은 소자의 신뢰성과 성능향상 관점에서 중요성이 증가하고 있다. 나노스케일의 미세 영역에서 국소적 온도 및 열물성 계측을 위한 방법 중 주사열탐침현미경(SThM)은 탐침의 구조적 한계로 인한 정량화의 어려움에도 불구하고 높은 공간분해능과 열물성과 표면형상을 동시에 측정 가능하다는 장점으로 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 SThM을 활용하여 나노 소자 구동 시 발생하는 발열과 그로 인한 소자 성능저하 문제를 나노스케일에서 관찰하고자 했다. 첫째로, 유연한 투명 전극으로 활용될 수 있는 은 나노와이어(AgNW) 네트워크 소자에서 발생하는 미세한 줄열(Joule heat)을 계측하였다. 그 결과, 단순 환경 가열에 의한 파괴 온도( $523 \text{ K}$  이상)보다 현저히 낮은 약  $453 \text{ K}$ 에서 전자 이동(Electromigration)과 레일리 불안정성(Rayleigh instability)이 복합적으로 작용하여 나노와이어가 파괴됨을 규명하였다. 둘째로, 확률적 컴퓨팅 소자로 주목받는 TS 맴리스터의 다중 전도성 필라멘트(CFs)의 점멸 현상을 실시간 열 맵핑으로 관찰하였고, 이를 시뮬레이션과 비교하여 집중된 줄열에 의한 열적 파괴가 소자의 확률론적 저항 스위칭 거동을 일으키는 핵심 원리임을 실험적으로 입증하였다. 또한 일반적으로 SThM을 이용한 측정에서 문제가 되는 열 접촉 저항을 정량화하기 위해 교류와 직류신호를 동시에 사용해 열 접촉 저항을 실시간 측정하는 연구를 수행했다. 이상으로부터 SThM을 활용한 나노스케일 정량화 기술은 차세대 나노융합소재 및 기능성 소자 연구에 매우 강력한 도구로 쓰일 수 있을 것이라 기대한다.

#### [나노융합2-4 | 11:40]

Freestanding, Ultrasmooth Diamond Membranes by Simple Delamination via  $\text{HF(aq)}$  Etching: VIJAY GUPTA, Anirban kundu(Institute for Basic Science (IBS)), Paulius Pobedinskas, Ken Haenen\*(Hasselt University), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST)

**Keywords:** Nanocrystalline Diamond, Delamination, Chemical Etching

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  $\text{HF}$  etching of the underlying  $\text{SiO}_2$ -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  $\text{SiO}_2$  release chemistry in microfabrication and diamond MEMS/NEMS release flows that employ  $\text{HF}$  vapor for oxide under-etching, we demonstrated 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  $1 \text{ nm}$ ), 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).

## 재료분석

Room 2층 201B, 4월 30일

### [분석 1-1 | 09:00]

EBSD-EDS 분석을 활용한 이종 금속 계면 금속간화합물(IMC)의 정량적 해석: 강주희\*, 김민성(웨이브센스)

**Keywords:** EBSD, EDS, 금속간화합물, 버스바, 이온밀링, IMC

최근 전기자동차 및 인공지능 산업의 급격한 성장에 따른 대전류 전송용 버스바(Bus bar)의 사용이 확대되고 있다. 특히 경량화, 경제성 및 내식성 확보를 위해 Cu-Sn도금 및 Al-Cu 이종 금속 접합 소재가 사용되며, 계면에서 형성되는 금속간화합물 (Intermetallic Compound, IMC)의 제어는 제품의 전기적 저항과 기계적 신뢰성을 결정짓는 핵심 요소로 부상하였다. 또한 내식성과 강도 확보를 위한 삼원계합금(Zn-Mg-Al) 도금강판 활용에서도 IMC 미세구조 이해가 매우 중요하다. 본 연구에서는 Sn 도금 Cu 버스바, 열처리된 Al-Cu 클래드재, 그리고 삼원계합금 도금강판의 계면 미세조직을 분석하였다. 계면에서 형성된 IMC는 금속 기지와 기계적 성질 차이가 크므로, 시편 제작시 기계 연마 한계를 극복하기 위해 이온밀링 중심의 전처리 기법을 사용하였다. 또한, 대칭성이 낮은 IMC 결정상을 정밀 분석하고자 EBSD-EDS 동시 분석법을 활용하였으며, 정밀한 상구분을 위해 pattern matching indexing 후처리를 수행하였다. 연구 결과, EBSD-EDS 분석을 통해 수 마이크론( $\mu\text{m}$ ) 두께의 얇은 IMC층 미세조직을 정량화할 수 있었으며, 조성 변화와 변형량 해석을 통해 소재의 기계적, 전기적 특성 저하의 미세구조 간의 상관관계를 확인하였다.

### [분석 1-2 | 09:15]

3D Surface Reconstruction from Multiple BSE Images for Microstructure Visualization: Hoon Kang, Haewon Jung, In-Yong Park\*(한국표준과학연구원)

**Keywords:** 3D Reconstruction, Backscattered electron, Surface shape, Microstructure Analysis

A 3D surface reconstruction algorithm based on principal component analysis (PCA) is presented in this work. The algorithm extracts the three principal components from multiple BSE images. The first principal component represents a compositional image, while the other two correspond to topographical images in the x and y directions, respectively. This approach works robustly regardless of the BSE detector configuration, and requires a minimum of three BSE images. To evaluate reconstruction performance, BSE image sets were obtained through Monte Carlo simulations using Nebula software, followed by 3D reconstruction. The reconstructed 3D surfaces closely matched the shapes of Monte-Carlo simulation models. Additionally, the algorithm was modified to enhance reconstruction performance for curved surfaces. Finally, actual BSE image sets obtained from a certified AFM sample and segmented BSE detectors were used to validate the reconstruction capability. The results demonstrate that the algorithm can precisely visualize microstructure as 3D surfaces. These visualized 3D shapes can provide a more intuitive understanding of microstructures compared to conventional 2D SE or BSE images.

### [분석 1-3 | 09:30]

Practical considerations for In-Situ and Cryo-TEM applications: Seungmin Lee, Yunseong Jeon, Choongbog Kim, Sung Kang, Yoon Huh, Jungjae Park\*(Research Institute of Industrial Science & Technology)

**Keywords:** TEM, in-situ TEM, cryo-TEM, Experimental considerations

Transmission electron microscopy (TEM) is a representative analytical technique that enables observation of the microstructure, interfaces, and crystal structures of materials with nanometer-scale spatial resolution by utilizing a high-vacuum environment and a high-energy electron beam as an illumination source. However, the high-vacuum condition of TEM differs from actual processing or operating environments, and the irradiation of high-energy electrons can induce structural modifications in specimens, such as structural changes, radiation damage. To address these limitations, advanced TEM techniques such as in-situ TEM and cryo-TEM have been actively developed. in-situ TEM enables real-time observation of the dynamic behavior of materials by simulating actual operating conditions inside the microscope. Its capability to apply various external stimuli within the microscope, such as heating, cooling, electrical biasing, mechanical loading, and liquid/gas environment, makes it possible to analyze phase transformations, corrosion and oxidation-reduction reactions. Meanwhile, cryo-TEM suppresses electron beam-induced damage by cooling specimens to cryogenic temperatures, thereby preserving their intrinsic structures. This approach is particularly effective for beam-sensitive materials, including metal oxides, battery materials, and nanostructured materials. In this presentation, we will discuss practical considerations for performing in-situ and cryo-TEM analyses, including specimen preparation strategies, environmental control, and instrumentation requirements. Furthermore, representative case studies will be introduced to highlight potential applications in materials research and industrial fields.

### [분석 1-4 | 09:45]

Overview of cryogenic atom probe tomography for hydrogen analysis: GUNYOUNG YOON, JI-SUNG YOO, TAE-HYEON JEONG, IH-HO PARK\*(Korea Institute of Materials Science)

**Keywords:** atom probe tomography, focused ion beam, cryogenic transfer, deuterium

Atom probe tomography (APT) enables near-atomic-scale, three-dimensional mapping of elemental distributions in nanoscale

microstructures. Reliable hydrogen (H) analysis, however, is often challenged by residual-gas background and handling-induced artifacts during specimen preparation and transfer. This presentation reviews cryogenic APT workflows for H (and deuterium) analysis, focusing on (1) APT tip preparation using focused ion beam (FIB) machining and electropolishing, (2) deuterium charging as a tracer strategy to assess signal origin, and (3) minimizing air exposure and managing thermal history using cryo-glovebox and cryogenic transfer systems.

#### [분석 1-5 | 10:00]

**열간단조 후 조질열처리 삭제를 위한 열간단조 후 조질열처리 삭제를 위한 강종별 기계적 특성 및 미세조직 비교 연구:** 한춘수\*(에이치엘만도)

**Keywords:** 열간단조, 노멀라이징, QT, 석출강화

열간단조 부품은 일반적으로 S45C 재질이 많이 사용되며, 1250도에서 가열 후 냉각되는 과정에서 조대한 페라이트와 펄라이트 등의 불균일한 미세조직이 형성된다. 이러한 불균일하고 조대한 미세조직은 강도 저하와 취성을 증가시키기 때문에 열간단조 후에는 대부분 미세조직을 균질하게 만드는 노멀라이징이나 조질 열처리(QT)가 함께 진행된다. 그러나 최근 전세계적으로 탄소중립 이슈가 부각되면서, 탄소 저감을 위한 다양한 시도들이 이루어지고 있다. 일부 산업에서는 합금 성분을 통해 결정립 미세화와 석출상 형성을 유도하여, 열간단조 후 조질 열처리를 생략하고 사용되고 있다. 이는 형상에 제약이 적고, 단순 작동을 하는 부품에서 가능하지만, 자동차 부품과 같이 형상에 제약이 있고 다양한 환경 및 작동부하를 받는 부품에서는 물성 저하를 보상하기 어렵다. 이 연구에서는 조질 열처리를 생략했을 때 기계적 물성 및 미세조직을 비교하여, 가장 유리한 합금성분계를 같은 재질을 찾기 위한 연구를 진행하였다.

#### [분석 1-6 | 10:15]

**Comparative Analysis of Atom Probe Tomography for SiC: Impact of Laser Wavelength:** Won-Hyoung LEE, Chang-Gi Lee, Yeon Ha Jo, Se-Ho Kim\*(Korea University)

**Keywords:** Atom probe tomography, APT, Silicon carbide

Silicon carbide (SiC) has become a key material in high-performance electronic applications such as power semiconductors, electric vehicles, and aerospace, due to its wide bandgap, high electrical thermal stability, and excellent thermal conductivity. The performance and reliability of SiC-based devices are closely linked to impurities, dopant distributions, and crystallographic defects within their microstructure, making precise analysis and understanding essential. Atom Probe Tomography (APT) is a powerful analytical tool that provides sub-nanometer compositional information and enables three-dimensional visualization of atomic arrangements, making it well suited to analyze subtle variations in impurity and dopant distributions within SiC. In this study, a comparative analysis was conducted on single-crystalline SiC wafer using two APT systems: LEAP 4000X HR with an ultraviolet (UV) laser and LEAP 6000 XR with a deep-ultraviolet (DUV) laser. The influence of laser wavelength on field evaporation behavior and compositional analysis accuracy was evaluated. This study is expected to enhance the understanding of SiC microstructural characteristics and contribute to improving the reliability and accuracy of APT analyses across various material research fields.

#### [분석 1-7 | 10:30]

**Atomic-Scale Characterization of Electrolyte-Induced Corrosion in 316 Stainless Steel:** CHANGGI LEE, Won-Hyoung Lee, Se-Ho Kim\*(Korea University)

**Keywords:** Stainless steel, Atom probe tomography

Stainless steel is one of the most industrially important structural materials due to its excellent corrosion resistance arising from the formation of a thin chromium oxide passive film on its surface. In the battery industry, stainless steel is widely used as a battery cell housing material because of its good formability and high mechanical strength. However, interactions with fluorine based electrolyte induce corrosion in stainless steel, potentially affecting the long-term stability and reliability of battery systems. Despite its vulnerability to corrosion by fluorine, understanding the nanoscale chemical degradation mechanisms of stainless steel under electrolyte exposure remain insufficient. In this study, atomic-scale chemical change occurring in stainless steel exposed to fluoride-containing battery electrolyte environments were investigated using atom probe tomography (APT). The results reveal that fluoride species destruct the protective chromium oxide passive layer, leading to chromium depletion and the preferential dissolution of nickel from the underlying alloy. These findings provide direct nanoscale evidence for electrolyte-induced corrosion mechanisms in stainless steel and offer new insights into the chemical processes in stainless steel under fluoride-containing environments.

#### [분석 2-1 | 10:50]

**TEM 회절패턴 자동해석 프로그램 (REDI, RIST Electron Diffraction Interpreter):** 강성\*(포항산업과학연구원)

**Keywords:** TEM, Diffraction, SAED, microstructure, phase

TEM을 이용하여 어떤 재료의 국소 영역에 대한 미세 결정구조 분석을 위해서는 SAED나 NBD와 같은 전자 회절상을 얻거나, atomic level의 고분해능 이미지를 얻어 FFT 변환 후 획득한 회절 이미지를 통하여 결정상을 해석해야 한다. 이러한 결정상 해석을 위해서는 획득한 이미지 속 회절점(Spot) 사이 거리 및 각도, 그리고 특정 면에 대한 면간거리를 측정하기 위한 Digital-micrograph와 같은 별도의 S/W 등이 필요하며, 회절 패턴을 해석하는 연구자의 경험에 크게 의존한다는 단점이 있다. 이에, 그동안

회절패턴을 해석하며 느껴왔던 불편한 점들을 해결하고자, 1) 회절패턴 해석을 위해 사용했던 SW들을 하나의 플랫폼으로 통합하고, 2) 필요한 소재 정보(DB)를 결합시켜, 3) 회절패턴 이미지와 성분의 입력만으로도 결정상에 대한 해석 정보를 얻을 수 있는 시스템을 개발 하였다. 본 발표에서는 TEM으로부터 획득한 회절패턴 이미지 내 Spot 간 거리와 각도를 정확하게 인식하고 측정하여 성분 입력만으로 어떤 결정상인지를 자동으로 해석해주는 TEM 회절패턴 자동해석 프로그램인 REDI를 소개하고자 한다.

### [분석2-2 | 11:05]

**국내 소재산업 경쟁력 강화를 위한 표준물질 개발 및 활용:** 김성남\*(포항산업과학연구원)

**Keywords:** 금속, 표준물질, CRM, 스테인리스강, 이차전지 소재, 양극재

표준물질(Reference Material, RM)은 분석과 측정의 정확성과 신뢰도를 확보하는 핵심 인프라로, 금속 및 이차전지 산업 전반의 품질관리, 연구개발, 공정검증, 규제 대응에 필수적으로 활용된다. 정확한 분석 데이터와 국제적으로 비교 가능한 측정 결과를 확보하기 위해서는 대상 소재의 물리·화학적 특성을 대표할 수 있는 표준물질이 반드시 필요하며, 이는 실험실 수준의 품질 보증을 넘어 산업 경쟁력과 기술 자립을 뒷받침하는 전략적 자산이다. 최근 철강 산업은 고부가가치화와 고기능화가 빠르게 진행되며 고강도강, 고망간강(LNG 탱크용), 고내식강 등 특수강 소재의 적용 범위가 확대되고 있다. 이러한 첨단 소재는 미량 불순물 제어, 복합 합금 조성 설계, 코팅층 및 계면 특성 관리가 제품 성능과 직결되므로 기존의 단순 조성 기반 표준물질만으로는 분석·검증에 한계가 뚜렷하다. 더욱이 탄소중립과 수소환원 제철 등 미래 친환경 제철공정의 도입은 새로운 합금계와 제조 조건에 적합한 표준물질 수요를 크게 증가시키고 있으며, 이는 철강 산업의 분석·검증 체계 전반에 변화를 요구하고 있다. 이차전지 분야 역시 전기차(EV)와 에너지 저장장치(ESS) 시장의 급성장에 따라 표준물질 개발 수요가 폭발적으로 늘고 있다. 양극재(NCA, NCMA, NCM, LFP, Li-rich 등), 음극재(흑연, Si계 복합체, 리튬 금속층)뿐 아니라 전구체(황산니켈 등), 전해질 및 첨가제(LiPF<sub>6</sub> 등)에서도 고순도·고정밀 표준물질이 요구되며, 복잡한 조성체의 정확한 분석과 국제 비교 가능성을 확보하기 위해서는 전이금속 비율, 불순물 농도, 입도 분포, 표면 코팅층 및 계면 구조까지 반영된 고도화된 표준물질 개발이 필수적이다. 그러나 국내 기업과 연구기관은 여전히 해외 표준기관(NIST, JRC 등)에서 공급하는 표준물질에 의존하고 있으며, 최근 단종, 공급 지연, 가격 상승, 환율 변동 등으로 인한 비용 부담이 심화되고 있다. 이러한 공급 불안정은 분석 비용 증가와 인증 지연을 초래하여 특히 중소·중견기업의 소재 분석 및 품질 보증 활동에 큰 장애 요인이 되고 있다. 이에 따라 국내 연구기관과 산업계는 철강 및 배터리 소재 표준물질의 국산화와 자립화를 적극 추진하고 있으며, 본 발표에서는 고망간강과 전기강판(규소강) 등 특수강 표준물질 개발, 이차전지 리사이클링 블랙파우더·전구체·양극재 표준물질 개발 사례를 중심으로 최신 연구·산업 동향을 소개하고, 표준물질 국산화가 분석 신뢰성 확보와 비용 안정화, 나아가 국제 경쟁력 강화와 기술 자립 실현에 기여하는 전략적 기반임을 논의한다.

### [분석2-3 | 11:20]

**마르텐사이트 강의 템퍼링 시 연신을 변화의 미세조직적 원인 분석:** 이재원, 이승호, 이혁재, 이도형(서울대학교), 일철, 김성일(POSCO), 홍남\*(서울대학교)

**Keywords:** 마르텐사이트 강, 템퍼링 파라미터, 균일 연신율, 전위 밀도, 탄화물 성장

마르텐사이트 강은 차체 경량화를 위한 초고강도강(AHSS)으로 널리 활용되지만 가공 시 취성이 주요 제한 요인으로 작용한다. 이를 완화하기 위해 템퍼링 열처리가 적용되며, 열처리 조건에 따라 강도와 연신율이 동시에 변화한다. 강도 변화는 Hollomon-Jaffe parameter 기반의 템퍼링 파라미터를 통해 비교적 예측 가능하나 균일 연신율의 변화 거동과 이를 지배하는 미세조직 인자는 충분히 규명되지 않았다. 본 연구에서는 다양한 템퍼링 조건에서 나타나는 인장강도와 균일 연신율 변화의 원인을 미세조직 관점에서 분석하였다. 등온 열처리와 코일 열처리 시 내부 온도 이력을 모사한 비등온 열처리를 수행하였다. 열처리 조건 간 비교를 위해 템퍼링 파라미터를 적용하였다. 열처리 후 XRD, SEM, EBSD, TEM 분석과 나노 압입 시험을 통해 전위 밀도 변화, 탄화물 성장 거동, 나노 경도 분포를 평가하였다. 인장강도는 템퍼링 파라미터 증가에 따라 등온 및 비등온 조건 모두에서 선형적으로 감소하였다. 이는 템퍼링 파라미터가 강도 변화를 평가하는 지표로 활용될 수 있음을 의미한다. 반면 균일 연신율은 템퍼링 파라미터와 일정한 상관관계를 나타내지 않았다. XRD 분석 결과 열처리 진행에 따라 전위 밀도 감소가 확인되었다. TEM 관찰과 나노 압입 시험에서는 탄화물 성장이 확인되었다. 전위 밀도 감소는 연신을 향상에 기여하며, 탄화물 성장은 변형 거동을 제한한다. 균일 연신율은 두 요인의 상호 경쟁에 의해 결정되는 것으로 해석된다. 본 연구는 템퍼링 과정에서의 미세조직 변화와 기계적 특성 간 상관관계를 제시하였다. 향후 각 미세조직 인자의 정량화를 통해 균일 연신율 예측 지표로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

### [분석2-4 | 11:35]

**0.15 mm 방향성 전기강판의 표면 에너지 선택적 결정립 성장 및 자구 거동에 관한 연구:** 안종현, 이귀영, 이한솔(한양대학교), 유성현(한양대학교, 현대제철연구소), 안용근, 강춘구(현대제철연구소), 김종렬\*(한양대학교)

**Keywords:** 연자성, 방향성 전기강판, 표면 에너지, 자구

최근 AI 인프라 확대에 따른 고효율 변압기 수요 증가로 방향성 전기강판(GOES)의 박판화가 가속화되고 있다. 하지만 기존 역제재 기반 공정은 강판 두께가 얇아질수록 pinning 효과가 약화되어 2차 재결정을 제어하는데 한계가 있다. 본 연구에서는 황(S)의 표면 편석을 이용한 표면 에너지 제어형 2단계 어닐링 공정(TSAP)을 도입하여 0.15 mm 두께에서 우수한 Goss 집합조직을 구현하고 그 메커니즘을 규명하고자한다. 실험 결과, 0.15 mm 박판에서 {100} 결정립의 성장을 억제하고 Goss 결정립의 선택적 성장을 유도하기 위해서는 낮은 냉간 압하율이 핵심적인 공정 변수임을 확인하였다. TSAP를 통해 제조된 0.15 mm 시편은 결정 배향 편차 각이 0.20 mm 시편 대비 약 20% 감소하였으며, 이를 통해 800 A/m 조건에서 향상된 자속 밀도(B8)를 나타내었다. 철손 측면에서는 W17/50 기준 약 13% 감소하였다. 이는 박판화에 따른 와전류 손실 저감뿐만 아니라, 결정립 조대화와 배향성 개선으로 인해

자구 벽 이동에 대한 저항이 줄어들며 이력 손실이 억제되었기 때문이다. 특히 면외 편차각의 개선은 보조 도메인 형성을 억제하고 180도 자구 분율을 높임으로써 80 Hz 이상의 고주파 대역에서 이상 철손을 유의미하게 낮추는 결과를 보였다. 본 연구를 통해 표면 에너지를 활용한 TSAP 공정으로 0.15 mm 두께에서도 결정 배향성과 철손 특성을 유효하게 제어할 수 있음을 확인하였다.

#### [분석2-5 | 11:50]

**나노압입시험과 딥러닝을 활용한 Q&P강의 복합 저온 변태 미세조직 자동화 분석 방법:** 박태찬\*(현대제철), 임용수, 김진경\*(한양대학교), 강훈철(현대제철)

**Keywords:** 나노압입시험, 딥러닝, Q&P강, 미세조직, 마르텐사이트

DP강이나 마르텐사이트강과 비교하여 강도와 연성을 동시에 향상시킨 Q&P강은 페라이트, 마르텐사이트, 잔류 오스테나이트 등 복수의 미세조직들로 구성되어 있다. 특히 마르텐사이트 조직 중 템퍼드 마르텐사이트(Tempered Martensite)는 Q&P강의 인성 및 연성에, 프레스 마르텐사이트(Fresh Martensite)는 강도에 기여하는 서로 상보적인 역할을 하기 때문에, 이들의 존재 및 분율에 따라 Q&P강의 기계적 성질은 달라지게 된다. 하지만 미세하고 유사한 조직적인 특징으로 인하여 기존의 현미경 관찰을 통한 육안분석으로는 마르텐사이트를 종류별로 구분하는 것이 매우 어려우며, 현재 이들을 명확하게 구분할 수 있는 객관적인 기준도 확립되어 있지 않은 상황이다. 본 발표에서는 Q&P강의 두 마르텐사이트 조직을 나노압입시험과 딥러닝 기술을 활용하여 자동으로 구분하기 위한 목적으로 수행한 연구내용을 공유하고자 한다. 나노압입시험을 활용해 산출한 경도값에 따라 미세조직별 SEM 이미지를 구분한 후 딥러닝 학습을 위한 데이터셋으로 준비하였다. 그 다음 다양한 딥러닝 네트워크와 하이퍼파라미터 조합을 적용하여, 두 마르텐사이트 조직을 자동으로 구분할 수 있는 최적 모델을 도출하였다.

#### [분석2-6 | 12:05]

**Quantitative XRD Analysis and JMAK-based Prediction of Isothermal Bainitic Transformation:** Jangjung Kim, Kisub Cho\*(Kookmin Univ.)

**Keywords:** CHQ wire rod, Austempering, Bainite, XRD, Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov

Bainitic microstructures produced through the austempering process have attracted considerable industrial interest owing to their superior mechanical properties. Conventionally, the bainite fraction has been evaluated using hardness reduction measurements or microstructural characterization; however, these approaches are limited by subjective threshold selection, ambiguous phase discrimination, and indirect estimation, which collectively reduce quantitative reliability. In this study, a quantitative evaluation framework for bainite fraction was established based on lattice parameter variations measured by X-ray diffraction (XRD). The evolution of lattice parameters arising from carbon redistribution during the austenite-to-bainite transformation was systematically analyzed, and the phase fraction was determined using a Vegard's law-based approach, providing an objective and reproducible alternative to conventional hardness- or morphology-based methods. The bainite fraction evaluated under various isothermal temperatures and holding times were subsequently incorporated into the Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) model to extract transformation kinetic parameters. Based on the calibrated model, a phase transformation map was constructed to predict bainite fraction as a function of isothermal conditions, enabling integrated prediction of transformation behavior and mechanical properties across a range of austempering parameters.

#### [분석2-7 | 12:20]

**Evaluating stretch-flangeability of AA7075 through integrated mechanical testing and validated finite element simulations:** Zaigham Saeed Toor(POSTECH), Kali Prasad(Indian Institute of Technology Madras), Jaehun Kim, Hyoung Seop Kim\*(POSTECH)

**Keywords:** Formability, 7075 Aluminum Alloy, Finite Element Modeling, Notch Sensitivity

A7075 aluminum alloy offers promising lightweight potential for automotive structural components requiring high strength and edge formability. However, the influence of temper condition on edge fracture behavior, poorly captured by conventional forming limit diagrams remains insufficiently understood. This study systematically investigates the local formability of AA7075 across three thermal states i.e., solution-treated (ST), under-aged (UA), and peak-aged (PA). A comprehensive experimental program comprising uniaxial tensile, hole tension, notched tension, double notch shear, and hole expansion tests was conducted on specimens with drilled and punched holes. Experimental flow curves calibrated the Swift hardening model for each temper, enabling finite element simulations in ABAQUS/Standard for all test configurations. Numerical predictions showed excellent agreement with experimental measurements, accurately capturing force-displacement responses, strain evolution, and fracture initiation across all specimen types. Results reveal pronounced temper dependence of edge fracture: ST exhibits superior ductility, PA displays highest strength but poorest formability, while UA offers an optimal balance between strength and edge fracture resistance. Hole preparation significantly influenced performance, with drilled holes consistently yielding higher expansion ratios than punched holes due to reduced edge damage. This validated experimental-numerical framework provides practical insights for material selection and process design in automotive applications requiring stretch-flangeability.

## 생체재료

Room 2층 202A, 4월 30일

### [생체 1-1 | 09:00] 초청강연

**첨단 Laser-driven HA/PEEK 기술의 검증 및 임상 적용:** 이강식\*, 채민성(서울아산병원), 전호정, 김유찬(한국과학기술원), 정화철, 구동규(시지메드텍), 이동호\*(서울아산병원)

**Keywords:** PEEK, Cervical interbody cage, Hydroxyapatite coating, Early stabilization, fusion stability

Poly(ether ether ketone) (PEEK)은 골과 유사한 탄성계수와 우수한 기계적 안정성으로 인해 추간체 유합 케이지에 널리 사용되고 있다. 그러나 표면의 생체비활성(bioinert) 특성은 초기 골유착을 지연시키고, 생리적 하중이 가해지는 환경에서 조기 고정 안정성 확보에 한계를 초래한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 레이저 기반 hydroxyapatite(HA) 침투합성(laser-driven HA penetration-synthesis) 기술을 개발하였다. 이 기술은 레이저 에너지를 이용해 HA를 PEEK 표면 및 근계면에 침투·합성함으로써, 기존 코팅 방식과 달리 박리 위험 없이 기계적 무결성을 유지하면서도 생체활성을 부여하는 계면공학적 접근법이다. 토끼 경골 파일릿 모델에서 hollow tube-type HA/PEEK 임플란트는 내강 표면을 따라 뚜렷한 bone bridging을 유도하여 cage 유사 구조에서의 조기 골형성 가능성을 입증하였다. 이어 수행된 비글 경추 전방 경추간 유합(ACDF) 모델에서는 HA/PEEK 케이지가 12주 이내 분절 미세운동을 감소시키고, 방사선학적 및 조직학적 분석에서 더 빠른 골형성 경향을 보였다. 특히 케이지 내부 mineralized new bone area fraction은 HA/PEEK군에서 약 40%로, 기존 PEEK군(약 23%) 대비 유의하게 증가하여 기능적으로 안정화된 조기 유합을 달성하였다. 이러한 결과는 Laser-driven HA/PEEK 기술이 단순 표면 개질을 넘어, 하중 지지 환경에서 “biological activation → early stabilization → functional fusion”으로 이어지는 기전적 경로를 구현함을 시사한다. 본 강연에서는 레이저-유도 계면 반응 메커니즘, 기계적 특성 유지 원리, 전임상 검증 결과, 그리고 임상 적용 시 고려사항을 종합적으로 논의하고자 한다. 이를 통해 PEEK 기반 척추 유합 케이지의 조기 고정 안정성과 임상 성능 향상을 위한 차세대 계면공학 플랫폼의 가능성을 제시한다.

### [생체 1-2 | 09:25] 초청강연

**CMOS 칩 기반 신경망 모니터링을 통한 시냅스 지도화:** 정우빈\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 반도체, 신경망, 시냅스

최근 반도체 집적회로 기술의 발전은 생체전자 인터페이스의 공간-시간 해상도를 획기적으로 향상시키며, 대규모 신경망의 정밀 계측과 제어를 가능하게 하고 있다. 본 발표에서는 CMOS 칩 기반 고집적 마이크로전극 어레이를 활용한 신경망 모니터링 및 시냅스 지도화 기술을 소개하고자 한다. 신경 회로의 기능적 연결성과 시냅스 가소성의 동적 변화를 정량적으로 이해하는 것은 신경과학 및 차세대 바이오전자 시스템 개발의 핵심 과제이다. 기존의 수동형 마이크로전극 어레이나 광학 이미징 기반 기술은 공간 해상도, 시간 해상도, 채널 수, 장기 안정성 측면에서 상호 제약을 갖는다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 수천 개 이상의 전극을 집적한 CMOS 기반 능동형 신경 인터페이스 칩을 설계·제작하였다. 각 전극은 개별적으로 주소 지정이 가능하며, 온칩 증폭기, 멀티플렉서, 자극 회로를 통합하여 기록과 자극을 동시에 수행할 수 있도록 구성하였다. 제한된 플랫폼은 고밀도 전극 배열을 통해 배양 신경망에서 발생하는 세포의 활동전위를 대규모로 동시 기록하고, 특정 전극을 선택적으로 자극함으로써 기능적 연결성을 능동적으로 탐색할 수 있다. 반도체 공정을 기반으로 구현된 미세 전극 구조는 소형화와 확장성을 동시에 확보하였으며, 전극 표면의 재료 및 형상 최적화를 통해 임피던스를 낮추고 세포-전극 결합을 향상시켜 장기 안정적인 측정을 가능하게 하였다. 수집된 대규모 스파이크 데이터로부터 버스트 동기화, 신호 전파 경로, 자극-유발 반응 확률 및 지연 시간 분포 등을 분석하여 기능적 시냅스 연결 지도를 재구성하였다. 특히, 시간 상관 분석과 자극-응답 매핑을 결합함으로써 네트워크 내 흥분성 연결 구조와 그 변화 양상을 정량화할 수 있었다. 높은 채널 수는 통계적 신뢰도를 크게 향상시켜, 기존 기술로는 관찰하기 어려웠던 메조스케일 수준의 네트워크 구조를 규명하는 데 기여하였다. 본 연구는 CMOS 회로 설계, 전극 재료 공학, 패키징 기술, 생체 인터페이스 공학이 융합된 사례로서, 반도체 기반 능동형 생체전자 시스템이 단순 계측을 넘어 기능적 지도화와 동적 제어가 가능한 플랫폼으로 확장될 수 있음을 제시한다. 이러한 기술은 향후 고성능 뇌-기계 인터페이스, 뉴로모픽 바이오하이브리드 시스템, 차세대 신경질환 진단 및 치료 기술로의 응용 가능성을 가질 것으로 기대된다.

### [생체 1-3 | 09:50] 초청강연

**Thermo-Responsive Bioelectricity in Engineered M13 Viruses:** Han Kim\*(Tech University of Korea)

**Keywords:** Pyroelectricity, Bioelectricity, M13 Virus

Pyroelectricity serves important biological functions in sensing the temperature of living organisms. However, the molecular mechanisms of pyroelectricity in biomaterials are not fully understood. Here, we exploit the M13 bacteriophage (phage) as a model system to investigate the structure–function relationship of biological pyroelectricity. The M13 phage possesses intrinsically aligned dipole structures originating from the  $\alpha$ -helical major coat protein (pVIII), which is arranged in a five-fold helical symmetry without an inversion center. We genetically engineer the tail region of the phage with a six-histidine tag to fabricate vertically standing, unidirectionally polarized phage structures on gold substrates. Through additional engineering of the major coat protein with varying numbers of negatively charged glutamate residues, we investigate the chemical structure–dependent pyroelectric properties of the phage. The M13 phage exhibits a pyroelectric coefficient of  $0.13 \mu\text{C m}^{-2} \text{K}^{-1}$  upon heating. We further genetically modify the phage to sense

different chemical environments based on a pyroelectric sensing modality. Computational modeling and circular dichroism spectroscopy confirm that unfolding of the  $\alpha$ -helices in pVIII proteins induces changes in phage polarization upon heating. This phage-based approach to investigating bio-pyroelectricity enhances our understanding of the thermoresponsive electrical behavior of biomaterials and enables the development of novel biomaterials for future applications in biosensors and electrical energy generators.

#### [생체]2-1 | 10:25

Bioinspired Active Encapsulation for Implantable Electronics: Myung-kyun Choi, Yi-Jeong Choi, Woo Mi Ryu, Seungha Lee(Seoul National Univ.), Seongu Kim(Kwangwoon Univ.), Yeon-Gyu Kim, Jun-Hyeok Jeon, Young-Seo Kim, Se-bin Park, Yong-Wu Kim, Jae-Hwan Lee(Seoul National Univ.), Jeonghyun Kim\*(Kwangwoon Univ.), Seongjun Park\*, Ho-Young Kim\*, Sung Jae Kim\*, Seung-Kyun Kang\*(Seoul National Univ.)

**Keywords:** Encapsulation, Implantable device, Polyelectrolyte, Osmosis, Membrane

Ensuring the long-term functionality of implantable electronic devices is essential for continuous monitoring and accurate diagnosis of chronic conditions in biological environments. Because these devices are constantly exposed to biological fluids, effective encapsulation is critical to protect them from biofouling, electrical leakage, corrosion, and performance degradation. However, encapsulating soft implantable electronics remains challenging, as conventional encapsulation strategies often require relatively thick organic layers or complex fabrication processes involving inorganic materials, which limit mechanical flexibility, biological compatibility, and long-term stability. In this work, we propose a novel active encapsulation system inspired by the active transport of ions and water molecules in alveolar membranes. Unlike conventional passive waterproof barriers that simply block water diffusion, Our active waterproofing barrier possesses enhanced waterproofing properties. Furthermore, by integrating the active encapsulation with conventional passive encapsulation layers, the overall waterproofing capability is significantly improved while preserving the excellent passive barrier properties. To quantitatively elucidate the underlying active encapsulation mechanism, we develop a physical model that combines diffusion and osmosis effects. The proposed model provides a quantitative description of the active encapsulation behavior and can serve as a physics-based tool for the design and performance prediction of diverse active encapsulation architectures. Finally, in vivo experiments using actively encapsulated pressure sensors in animal models demonstrate reliable long-term pressure monitoring under highly aqueous biological conditions, highlighting the potential of the proposed encapsulation strategy for chronic biomedical monitoring applications.

#### [생체]2-2 | 10:40

Ring-Structured Hybrid Antibacterial Contact Lenses Fabricated Using a Sol-Gel Methods Antibacterial Solution and Nephrite Powder: BYEONGSEON KIM, DongHee Hong, WoongBi Park, Tae-Sik Jang\*(Pusan National Univ.)

**Keywords:** Contact lense, Antibacterial, Sol-gel method, Nephrite powder

The incidence of ocular infections associated with contact lens wear remains a significant clinical issue, particularly due to bacterial adhesion on the lens surface, biofilm formation, and subsequent inflammation. Conventional contact lenses based on poly(2-hydroxyethyl methacrylate) (pHEMA) provide excellent comfort and hydration but have limited inherent antimicrobial activity. Consequently, recent research has focused on imparting antimicrobial functionality while maintaining the essential optical and mechanical properties required for safe, wearable lenses. In this study, an Antibacterial Solution (AS) was synthesized via a sol-gel process to achieve enhanced antimicrobial performance without compromising transparency or biocompatibility. Additionally, Nephrite Powder was incorporated onto the lens surface to fabricate pHEMA contact lenses with a ring-shaped structure. The Si/Ca/Mg-containing AS was prepared via the sol-gel process and then combined with the pHEMA lens at room temperature. A ring-shaped structure was designed to control surface characteristics and bacterial interactions. The fabricated lens was characterized for its overall structure and ring features via optical imaging and microscopic analysis. Surface morphology and elemental distribution were analyzed using field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). Thermal gravimetric analysis (TGA) showed the inorganic content of the designed lens exhibited a similar trend to EDS. The performance of the hybrid lens was evaluated through mechanical property testing, optical transmittance measurements, and contact angle measurements. Compared to pure pHEMA, the composite lens exhibited similar transmittance values. Contact angle measurements confirmed that the introduction of AS and Nephrite powder contributed to the lens's hydrophilicity, which was maintained for up to 10 days. Quantification of reactive oxygen species (ROS) production showed that the amount of  $H_2O_2$  increased proportionally with the lens's inorganic content, suggesting the lens may possess antimicrobial effects. Lens toxicity was evaluated through cell proliferation analysis. The hybrid lens exhibited similar cell proliferation levels compared to pure pHEMA, confirming the lens's non-toxicity. Antimicrobial performance was investigated via fluorescence microscopy using Live/Dead staining for bacterial attachment to *Staphylococcus aureus*, demonstrating a significant reduction in viable bacteria on the composite lens surface compared to the control. Additionally, post-culture FE-SEM observation confirmed markedly reduced bacterial adhesion and disrupted bacterial morphology on the composite lens surface, supporting enhanced bactericidal/anti-adhesion effects. Collectively, the organic/inorganic hybrid lens incorporating AS and Nephrite suggests it can impart potent antimicrobial properties while maintaining essential optical clarity, wettability, and biocompatibility. This strategy demonstrates strong potential for developing next-generation antimicrobial contact lenses to reduce lens-related infections and enhance user safety.



**[생체2-3 | 10:55]**

Enzyme-regulated extended swelling of hydrogels for dehiscence-less tissue expansions: Byung Ik Park, Jeong-Yun Sun\*(Seoul National Univ.)

**Keywords:** Tissue Expansion, Hydrogel, Ideal Elastomeric Gel Model, Mechanotransduction

Tissue expansion traditionally relies on periodic saline injection into implanted silicone balloons via external tubing, causing patient discomfort. Although self-swelling hydrogels eliminate the need for tubing, their immediate post-implantation swelling leads to suture wound dehiscence. We developed an interpenetrating hydrogel network consisting of enzymatically degradable hyaluronic acid network and non-degradable polyacrylic acid network. The hydrogel remains structurally intact and initiates swelling only after enzyme injection, with controllable onset and rate. Furthermore, a generalized ideal elastomeric gel model confirms the hydrogel's ability to generate sufficient pressure for tissue expansion. The theoretical framework aligns with experimental observations, demonstrating that the tissue expansion is induced by yes1-associated protein-mediated epidermal proliferation. This approach establishes its potential as a next-generation tissue expander for clinical applications.

**[생체2-4 | 11:10]**

GelMA-Based Electroconductive Hydrogel Nanocomposite for Accelerating Diabetic Wound Regeneration: Gyungmin Ryu, Hyeong Seok Kang, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

**Keywords:** Electrical stimulation therapy, MXene, DNA, Polydopamine, Electroconductivity, Skin regeneration

Diabetes induces microvascular impairment, immune dysfunction, and reduced cellular activity, which collectively hinder normal wound healing. Consequently, diabetic wounds frequently progress to secondary infection, ulceration, and tissue necrosis. Current clinical treatments, including debridement, wound dressing, and antibiotic administration, remain limited in achieving complete and functional wound repair. Therefore, alternative therapeutic strategies for effective diabetic wound healing are urgently required. Electrical stimulation therapy (EST) is increasingly utilized in a wide range of clinical and research settings. Beyond promoting tissue regeneration, EST has been reported to enhance tissue differentiation, exert anti-inflammatory effects, stimulate angiogenesis, and increase cellular activity. To apply EST in biological systems, electrically conductive materials must be implanted in vivo. For effective application, such materials are required to exhibit adequate mechanical and electrical performance, along with ensured biocompatibility and biodegradability. Metal-based electrodes possess excellent electrical conductivity and mechanical rigidity; however, their high stiffness, limited biocompatibility, and lack of biodegradability necessitate secondary surgical removal after treatment. Synthetic polymers offer favorable electrical conductivity, mechanical properties, and improved biocompatibility, yet their biodegradability remains insufficient. In contrast, natural polymers exhibit outstanding biocompatibility and biodegradability but suffer from limited functionality as well as inferior mechanical and electrical properties. In this study, gelatin methacryloyl (GelMA), a naturally derived polymer with tunable mechanical properties via photoinitiated crosslinking, was employed as the primary matrix. To enhance the mechanical strength and electrical conductivity of GelMA, a composite hydrogel incorporating the two-dimensional nanomaterial MXene was developed. To address the potential cytotoxicity of MXene arising from its high oxidation reactivity, MXene was surface modified with polydopamine, followed by additional DNA coating to enhance tissue regenerative functionality. Surface modification of MXene was confirmed using FT-IR, XPS, and DLS analyses. The resulting composite hydrogel exhibited significantly enhanced mechanical and electrical properties, as evaluated by a universal testing machine and an LCR meter. In vitro studies demonstrated that polydopamine-coated MXene effectively reduced oxidative stress-induced cytotoxicity, while DNA incorporation improved cellular viability. Furthermore, electrical stimulation promoted cell proliferation and adhesion in MXene-containing groups, as confirmed by fluorescence microscopy and CyQuant DNA assays. In vivo studies demonstrated the therapeutic efficacy of the composite hydrogel combined with electrical stimulation in wound healing. Diabetes was induced in mice, followed by the creation of skin wounds through surgical procedures. The hydrogel patch was then applied, and electrical stimulation was administered to monitor the wound healing process over a two-week period. The results confirmed that the incorporation of DNA and the application of electrical stimulation significantly enhanced wound healing performance in diabetic wound models. Collectively, these results demonstrate that the developed composite hydrogel provides enhanced electrical conductivity, biocompatibility, and regenerative potential. Owing to its improved properties, this hydrogel composite is expected to serve as an effective alternative to conventional invasive electrical stimulation materials, enabling more efficient bone tissue regeneration. This material represents a promising theragenerative strategy for overcoming the challenges associated with critical-sized bone defect repair and for the development of biocompatible electroconductive platforms for personalized electrical stimulation therapy.

**[생체2-5 | 11:25]**

체내삽입형 이온트로닉스를 위한 초저팽윤 생분해성 이온다이크로닉스: 한지은, 최이정, 강승균\*(서울대학교)

**Keywords:** 생분해성 이온다이크로닉스, 체내삽입형 이온트로닉스, 고분자 전해질, 초저팽윤 이온교환막

체내의 다양한 생리 신호는 이온의 흐름을 기반으로 전달되며, 이를 모사하고 제어하기 위한 이온트로닉스 기술이 빠르게 발전하고 있다. 특히 이온의 흐름을 비대칭적으로 제어하는 이온다이크로닉스는 정밀한 이온 수송 조절이 가능하여 다양한 바이오전자소자 분야에서 주목받고 있다. 그러나 기존 이온다이크로닉스는 대부분 비생분해성 소재로 제작되어 체내 잔존 및 2차 제거 수술이 필요하기 때문에 실

제 적용에 제약이 있다. 이를 극복하기 위해 생분해성 이온다이크로이드가 제안되었으나, 체내 수계 환경에서의 물성 저하와 구조적 불안정성으로 인해 사용기간 동안 성능을 안정적으로 유지하기 어렵다는 한계가 존재한다. 본 발표에서는 초저팽윤 특성을 기반으로 높은 안정성을 확보한 생분해성 이온다이크로이드에 대해 소개하고자 한다. 제안된 다이크로이드는 구조적 안정성을 부여하는 합성 고분자와 고정전하 채널을 형성하는 천연 고분자를 혼합하여, 각각 양전하 및 음전하를 띠는 고분자 전해질 막을 제작한 후 이를 접합하여 구현하였다. 개발된 다이크로이드는 전기화학적, 기계적, 생분해 특성이 분석되었으며, 체내 모사 환경에서도 안정적인 이온 정류 특성을 유지하였다. 더불어 약물 방출 조절 성능을 검증함으로써 체내삽입형 이온트로닉스 시스템으로의 응용 가능성을 확인하였다.

#### [생체]2-6 | 11:40

Gyroid-Structured WE43 Magnesium Scaffolds with Surface Functionalization for Bone Regeneration: Nayoung Lee(Hanyang Univ.), Hyun Lee(Korea Institute of Industrial Technology), Jin-Yeong Kim, Junhyung Kim(Kangwon National Univ.), Hyun-Doo Jung\*(Hanyang Univ.)

**Keywords:** Magnesium, WE43, Triply Periodic Minimal Surface, Osteogenesis

Magnesium (Mg) has attracted increasing attention as a biodegradable metallic material for bone tissue engineering due to its mechanical properties resembling those of natural bone and its ability to gradually degrade under physiological conditions. Unlike permanent metallic implants such as titanium or stainless steel alloys, magnesium-based materials undergo controlled degradation after providing temporary mechanical support, potentially eliminating the need for secondary removal surgeries and associated patient morbidity. Previous studies have reported that magnesium ions released during degradation positively influence osteoblast activity and bone metabolism, indicating potential applicability in orthopedic applications such as bone defect repair and fracture fixation. In this study, WE43 magnesium alloy scaffolds with gyroid architecture were fabricated using 3D printing technology for bone defect repair. WE43, a rare-earth-containing magnesium alloy with yttrium and neodymium additions, was selected due to its superior mechanical strength and improved corrosion resistance compared to pure magnesium. The gyroid architecture, classified as a triply periodic minimal surface (TPMS), provides a highly interconnected porous network with uniform porosity and favorable mechanical characteristics. This structure facilitates cell infiltration, nutrient and oxygen transport, and vascular ingrowth—essential factors for bone regeneration, particularly in large or critical-sized defects. Hydroxyapatite (HA) coatings were applied to the 3D-printed WE43 scaffolds to improve corrosion resistance and biological performance. HA, chemically and structurally similar to natural bone mineral, functions as a protective barrier that enhances corrosion resistance while providing osteoconductive and cell-adhesive surface properties. The corrosion behavior of coated and uncoated scaffolds was evaluated through immersion tests in simulated body fluid (SBF) for up to 4 weeks. Phase composition, surface morphology, and elemental distribution after immersion were analyzed using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive spectroscopy (EDS). The results demonstrated that HA-coated WE43 scaffolds exhibited improved corrosion resistance compared to uncoated controls throughout the immersion period. The HA-coated scaffolds were further surface-functionalized with a biofunctional nanocomplex comprising bone morphogenetic protein-2 (BMP-2) and polydeoxyribonucleotide (PDRN) to promote bone regeneration. BMP-2, a well-known osteoinductive growth factor, induces osteoblast differentiation and bone formation, while PDRN, a DNA-derived biomolecule, supports tissue regeneration and angiogenesis. This combined functionalization provides complementary osteogenic and angiogenic effects. In vitro biological evaluations demonstrated enhanced osteogenic differentiation of osteoblasts on BMP-2/PDRN-functionalized HA-coated WE43 scaffolds compared to uncoated and HA-coated-only controls. Human umbilical vein endothelial cell (HUVEC) studies confirmed improved vascularization-related cellular responses. These results suggest that gyroid-structured WE43 magnesium scaffolds with HA coating and BMP-2/PDRN functionalization exhibit improved corrosion resistance, enhanced osteogenic differentiation, and favorable angiogenic potential. This materials design strategy offers valuable insights for developing biodegradable magnesium-based scaffolds for bone defect repair.

## 항공재료

Room 2층 202B, 4월 30일

### [항공1-1 | 09:00]

**항공기 주요부위의 반복 검사주기 최적화를 위한 비파괴검사 탐지능력 연구:** 유건아\*, 전일, 이호용(한국항공우주산업), 이두열(부산대학교)

**Keywords:** 비파괴검사, 와전류탐상검사, 모델지원탐지확률

항공기 주요 구조 부위의 반복 검사 주기 최적화를 위해 비파괴검사(NDI)의 탐지 능력을 분석하였다. 항공기 구조물은 손상허용 설계(Damage Tolerance Design) 개념에 따라 초기 결함의 존재를 가정하고 균열 성장 해석을 통해 검사 주기를 설정하므로, 검출 가능한 최소 결함 크기를 정확히 산출하는 것이 필수적이다. 이를 위해 평판 표면의 피로 균열을 대상으로 와전류탐상검사(ECI)를 수행하였으며, 방전 가공 및 피로 하중 부하를 통해 정밀한 인공 결함 시편을 제작하였다. 수집된 데이터를 바탕으로 탐지확률(POD) 곡선을 도출하였으며, 모델지원 탐지확률(MAPOD) 기법을 적용하여 실험 데이터의 물리적 한계를 보완하고 신뢰성을 향상하였다. 이는 비파괴검사 탐지 능력의 정확성을 확보하고, 향후 실제 정비 현장의 검사 기량 검증 체계를 고도화하는 데 기여할 것으로 기대된다.

### [항공1-2 | 09:15]

**직접용융증착법으로 제조된 Inconel 625 / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 경사기능재의 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, Thermal Barrier Coating, Functionally Graded Material, Directed Energy Deposition, Flame Thermal gradient test

가스터빈의 열효율 향상을 위해 터빈 작동 온도가 지속적으로 상승함에 따라, 터빈 부품은 더욱 가혹한 고온 환경에 노출되고 있다. 이에 따라 고온 환경에서 부품 파손에 대한 유지·보수·정비(Maintenance, Repair and Overhaul, MRO)의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 최근 초내열합금 부품에는 열영향부가 작은 적층제조 기술이 적용되어 부분 보수가 가능해졌으나, 열차폐 코팅(Thermal Barrier Coating, TBC)은 여전히 기존 용사코팅(Thermal Spray) 공정에 의존하고 있어 부분 보수 시 금속-세라믹 계면 박리가 발생하는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 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 강점을 가진다. 이에 본 연구에서는 DED 공정을 이용하여 Inconel 625/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FGM을 제조하고, TBC로서의 적용 가능성을 평가하였다. 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 층은 1300 °C의 고온 환경에서도 Inconel625 기판의 온도를 효과적으로 저감시키는 것으로 나타났다. 상기 결과를 통해 DED 공정이 가스터빈 고온 부품의 TBC 및 부분 보수를 위한 대안 전략으로 활용될 수 있음을 확인했다.

### [항공1-3 | 09:30]

**직접용융증착법으로 제조된 항복강도 1.5 GPa급 IN718 합금 특성 평가:** 권시은(경상국립대학교), 서성문, 이형수(한국재료연구원), 김형섭(포항공과대학교), 김정기\*(경상국립대학교)

**Keywords:** Additive manufacturing, Inconel alloy, Heat treatment, Mechanical property, Microstructure

복합 화력 발전 산업의 고효율화에 따른 가스터빈 작동 온도 상승은 내열소재/부품의 성능 향상을 요구하고 있다. Ni 기반 초내열합금인 Inconel 718(IN718) 합금은 우수한 고온 강도와 내산화성으로 인해 항공우주 및 가스터빈 부품에 널리 사용되고 있으며, 기계적 특성 향상을 위해서는 기지 내 화학 원소의 재분배를 유도하는 후열처리가 핵심적이다. 기존 IN718 합금에서는 γ 상 석출을 통한 강도 확보를 위한 직접 시효 처리(DA)나, 취성 Laves 상의 제어를 위한 용체화 후 시효 처리(STA)가 적용되어 왔다. 반면, 적층제조된 IN718 합금은 빠른 응고 속도로 인해 Laves 상의 성장이 억제되므로 용체화 처리를 생략할 수 있는 여지가 생겼으나 아직까지 이에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 이에 본 연구에서는 직접용융증착법(DED) 방식으로 제조된 IN718 합금에 후열처리를 적용하고, 체적 에너지 밀도(VED)와 반응표면분석법을 결합하여 높은 상대밀도와 우수한 치수 정확도를 동시에 만족하는 최적 공정 조건을 도출하였다. 그 결과, 낮은 VED 조건에서 미세한 이차상이 좁은 수치상 간 영역에 형성되었으며, 이로 인해 적층 직후(AB) 상태 대비 연성 저하가 최소화되었다. 특히 DA 소재는 기지 내 나노 크기의 γ 상 석출이 효과적으로 촉진되었으며, γ 상 분율은 16.88%로 STA 시편(9%)보다 높게 나타났다. 상기 높은 γ 상 분율로 인해 DA 소재는 1.5 GPa 이상의 항복강도를 확보했으며, 각각의 강화기구 기여를 계산한 결과, γ 상의 석출 강화가 IN718 합금의 강도 향상에 가장 지배적임을 확인하였다. 본 연구 결과는 적층제조 공정 조건과 후열처리 전략을 통해 Ni 기반 초내열합금의 고강도 특성의 확보가 가능함을 보여주며, AB 상태에서의 화학적 불균일성과 이차상 분포가 열처리 후 부품 성능에 미치는 중요성을 제시한다.

**[항공2-1 | 09:55]**

**AI 기반 Al-Zn-Mg-Cu 합금 주조공정 최적화를 위한 해석 DB 구축 및 DOE 활용:** 신윤우, 최현성, 박현일, 석무영, 이동준, 권용남\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 알루미늄, 주조, 결함, 데이터베이스, 설계실험법

항공기 구조용 고강도 Al-Zn-Mg-Cu 계열 합금은 높은 비강도와 우수한 파괴 인성으로 인해 주요 항공 구조재로 널리 사용되고 있다. 그러나 대형 DC(Direct Chill) 주조 공정에서는 응고 과정 중 발생하는 열응력과 수축 거동으로 인해 열균열(hot tearing), 수축 결함 및 편석 등이 발생할 수 있으며, 이는 소재 신뢰성과 후속 가공 품질에 큰 영향을 미친다. 따라서 항공용 대형 빌렛의 품질 안정성을 확보하기 위한 공정 조건 최적화가 요구된다. 본 연구에서는 Al-Zn-Mg-Cu 계열 합금 주조공정의 결함 최소화를 위한 인공지능(AI) 기반 공정 최적화용 데이터베이스(DB) 구축 방법과 DOE 전략을 제안하였다. 데이터는 열-변형 해석을 통해 지름 0.28 m, 길이 3 m인 빌렛을 생성하였다. 합금 조성(Zn, Mg, Cu), 주조 속도, 냉각 속도, 대류 및 복사 조건 등을 주요 입력 변수로 설정하였으며, Optimization tool을 통해 설계실험법(DOE)을 자동 생성하였다. 생성된 공정 조건에 대해 DC 주조 해석을 수행하여 공정 변수 변화에 따른 응고 거동과 결함 발생 특성을 정량적으로 평가하였다. 해석 결과를 기반으로 열균열 민감도(Yamanaka 지수), 수축 기공 발생 가능성(Niyama 지수), 편석 발생 경향(Suzuki 지수)과 공정 변수 간의 상관관계를 분석하고 응답표면(response surface)을 구축하였다. 본 연구에서 제안한 DB 구축 및 DOE 활용 방법은 고비용 주조 실험을 대체하는 디지털 공정 설계 기반을 제공하며, 항공용 대형 AI 빌렛의 결함 저감과 품질 균일성 확보에 효과적인 접근법으로 판단된다.

**[항공2-2 | 10:10]**

**기계가공 해석을 위한 파단 물성 평가 및 역해석 기반 내부 파단변형을 정량화:** 심현보(한국재료연구원), 정찬욱((주) 동양에이케이코리아), 오석근(한국항공우주산업), 박현일, 석무영, 이동준, 권용남, 최현성\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 알루미늄 합금, 물성평가

알루미늄 2xxx 계열 합금은 우수한 강도, 피로 저항성, 내열성 및 기계가공성을 바탕으로 항공기 구조 부품에 널리 적용되고 있다. 특히 압출재는 복잡 형상 제작의 효율성과 높은 치수 정밀도를 동시에 확보할 수 있어 wing rib, stringer, frame 등 핵심 구조 부품의 주요 소재로 활용된다. 그러나 압출 후 기계가공을 통해 최종 형상을 구현하는 과정에서 발생하는 가공변형과 잔류응력은 부품의 치수 정밀도 및 피로 성능에 직접적인 영향을 미치므로, 이를 최소화하기 위한 최적 가공 조건 도출이 필수적이다. 이를 위해 가공변형과 잔류응력의 정확한 예측이 요구되며, 짧은 시간 내에 변형이 급격히 발생하고 실험 비용·시간 부담이 큰 절삭 공정의 특성상 유한요소해석(FEA)이 효과적인 대안으로 주목받고 있다. 다만, 기계가공 시의 국부 고온 및 고변형률 속도, 소재 이방성, 하중 경로에 따른 파단 거동 등을 적절히 반영하지 못할 경우 해석 신뢰성이 저하될 수 있다. 2D-DIC로 측정되는 파단 변형률은 표면 변형률에 한정되며, 실제 파단은 시편 내부에서 시작되는 경우가 많다. 따라서 해석 입력값으로 표면 기반 파단 변형률을 적용하면 실제 파단 거동을 과소/과대 평가하여 예측 정확도가 저하될 가능성이 있다. 본 발표에서는 (1) 압출재의 방향별 물성 확보를 위한 실험 설계 및 분석 절차를 제시하고, (2) 시편 내부에서 발생하는 실제 파단 변형률을 정량화하는 측정 접근법을 소개함으로써, 항공용 압출재 기계가공 공정의 변형 및 잔류응력 예측 정확도 향상을 위한 기반을 제공하고자 한다.

**[항공3-1 | 10:35]**

**적층 가공 기술을 활용한 가스터빈 엔진부품 수리기법 개발:** 이병현, 김시호\*, 권혁준(공군 항공기술연구소), 이홍철(한화에어로스페이스)

**Keywords:** 적층 가공, 엔진, 마모

본 연구는 항공엔진의 핵심인 고부가가치 금속 부품의 수리기법 국산화 사례를 다룬다. 운영군은 엔진 핵심 부품의 손상 발생 시, 해외 원제작사에 수리를 의존함에 따라 막대한 비용과 긴 수리 기간으로 인한 운영 효율성 저하 문제를 겪는 경우가 많다. 이에 따라 엔진 압축기 핵심 구성품 마모 부위에 대해 금속 3D 프린팅 기술을 적용하여 민군 협업으로 수리기법을 개발하였다. 수리 대상 구성품에 대한 내마모 특성 시험, 평가 기준 및 작업절차 수립 등을 통해 수리기법 개발 과정을 설명한다.

**[항공3-2 | 10:50]**

**IOD에 의한 J85 엔진 압축기 파손 사례:** 김홍석, 권혁준, 김영찬(공군 항공기술연구소), 이두열\*(부산대학교)

**Keywords:** Internal object damage(IOD), Compressor, Fatigue, Superalloy, J85

본 연구는 널리 사용되는 J85 엔진에서 발생한 극히 드문 내부 물체 손상(IOD) 사건 두 건을 분석하였으며, 이는 압축기 부품의 장기 사용에 기인한 것으로 판단됩니다. 두 사례 모두 손상된 부품(고정 링, 압축기 7단계 베인)은 동일한 합금 718 재질로 제작되었으며, 먼저 재료 결함의 존재 여부를 조사하였습니다. 첫 번째 사례는 고정링을 고정하는 핀이 반으로 파단되어 충돌한 후 로터 블레이드 선단부에 박힌 사건입니다. 핀 파손의 근본 원인은 미세조직 결함으로 확인되었습니다. 두 번째 사례인 압축기 7단계 스테이터 베인 파손은 공진 현상으로 인해 피로 수명이 감소하여 조기 파손으로 이어진 것으로 분석되었습니다. 특히 항공엔진 작동 중 발생하는 진동 모드 변화와 미세조직 결함이 피로 균열 발생 및 전파의 주요 원인으로 작용할 수 있습니다.

**[항공3-3 | 11:05]**

**전투기 캐노피 제작 기술 개발:** 조대호, 김덕성, 정유인\*(한국항공우주산업)

**Keywords:** 스트레치드 아크릴, 캐노피

전투기 캐노피는 조종사의 생존성과 직결되는 투명 구조 부품으로, 넓은 시야 확보와 함께 내충격성, 경량화, 내환경성을 동시에 만족해야 한다. 이러한 복합 요구는 소재 특성에 대한 이해와 정밀한 성형 공정 제어 기술을 동시에 요구한다. 본 연구에서는 스트

레치드 아크릴 적용 캐노피를 대상으로 열성형 기술을 개발하고 있으며, 성형 조건에 따른 두께 균일도, 형상 정밀도 및 광학 특성 변화를 분석하여 공정 안정화 기준을 정립하고자 하였다. 본 발표에서는 이러한 연구 내용과 추진 현황을 소개하고자 한다.

#### [항공4-1 | 11:30]

**항공부품 적층제조 사례 및 품질인증 발전방향:** 전병철\*, 김용세, 박종민(공군 항공기술연구소), 이동훈(공군 항공자원관리단)

**Keywords:** 적층제조, 항공부품, 품질인증

최근 항공무기체계 운용 단계에서는 단종 부품 증가와 조달 지연, 재고 유지 비용 증가가 주요 군수 문제로 대두되고 있다. 이에 본 연구에서는 금속 적층제조 기술을 활용한 항공기 발전기 점검용 어댑터 개발 사례를 기반으로 항공부품 적용 가능성과 발전 방향을 도출하였다. 제작 대상품의 개발 계획과 개발요구도를 수립하고 부품 도면 역설계를 수행하였으며, 대상품목의 기능, 특성, 운용 환경, 결함양상 등을 고려한 자체 품질인증 방안(시험평가 방안)을 검토·선정해 부품개발에 성공하였다. 적층제조 기술은 소량 다품종 항공부품의 신속한 생산과 정비 효율 향상에 효과적인 대안이며, 향후 소재 데이터베이스 구축, 공정 표준화, 품질 인증 체계 고도화 및 군·산·학 협력 기반 기술 생태계 조성이 필요하다.

#### [항공4-2 | 11:45]

**항공기 구성품 마모 발생유형 및 메커니즘:** 김연찬, 정희성, 김용세\*(항공기술연구소)

**Keywords:** 항공기 구성품, 마모, 마모사례, 마모유형

항공기 구성품은 고하중, 반복하중, 진동 등 복합적인 작동 환경에 지속적으로 노출되며, 이에 따른 마모 손상은 구조 건전성 및 신뢰성 저하와 직결된다. 특히 마모는 초기에는 미세 손상으로 시작되지만, 장기 운용 시 기능 저하 및 2차 손상으로 확대될 수 있어 체계적인 이해와 관리가 필요하다. 본 연구는 운영중인 항공기 구성품에서 빈번하게 발생하는 대표적 마모 유형인 연마 마모(Abrasion Wear), 응착 마모(Adhesive Wear), 피로 마모(Fatigue Wear), 프레팅 마모(Fretting Wear)의 이론적 배경을 체계적으로 정리하고, 각 마모 형태의 물리적, 재료학적 발생 메커니즘을 분석하였다. 연마 마모는 접촉 표면 간 경도 차이 또는 이물질 개입에 의해 발생하는 절삭 및 미세 가공 작용으로 설명된다. 응착 마모는 실접촉면에서의 국부적인 용착과 전단파괴 과정을 통해 발생하며, 접촉 압력 및 윤활 조건이 주요 영향 인자로 작용한다. 피로 마모는 반복 접촉 응력에 따른 균열 개시 및 전파, 그리고 Flaking 및 표면박리 현상으로 설명된다. 프레팅 마모의 경우, 미소 진동에 의해 발생하는 산화 및 응착의 복합적인 메커니즘을 중심으로 고찰하였다. 또한 각 마모 유형별로 실제 항공기 구성품에 발생한 대표적 마모 결함사례와 메커니즘을 분석하였다. 본 연구는 항공기 구성품 마모 현상을 이론, 메커니즘, 실제 사례 관점에서 통합적으로 분석함으로써, 향후 항공기 구성품 결함원인 분석능력 확대와 예방정비 수립에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 복합재료

Room 2층 203, 4월 30일

### [복합1-1 | 09:00]

Microstructural control and hardness enhancement of bicontinuous Mg–Ti composites through liquid metal dealloying in AZ31 alloy melt: Su Rin Cho, Hyun Jun Youn(Kyungpook National Univ.), Soo-Hyun Joo(Dankook Univ.), Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National Univ.)

**Keywords:** Mg–Ti composite, Liquid metal dealloying, AZ31 alloy melt, Microstructure, Hardness

Three-dimensional (3D) bicontinuous Mg–Ti composites fabricated by liquid metal dealloying (LMD) have attracted increasing interest due to their high specific strength and continuous dual-phase architecture. To date, most LMD studies on Mg–Ti systems have been conducted using pure Mg melts, while the influence of alloyed Mg melts representative of industrial processing conditions has received little attention. Since melt composition can strongly affect dealloying kinetics, interfacial reactions, and microstructural evolution, extending LMD processing to commercial Mg alloy melts is essential for both fundamental understanding and practical application. In this study, a commercial AZ31 magnesium alloy melt was employed as the dealloying medium to fabricate 3D bicontinuous Mg–Ti composites, with a particular focus on the resulting changes in dealloying behavior, microstructure, and mechanical properties. Ti<sub>30</sub>Cu<sub>70</sub> precursor alloys were immersed in molten AZ31 to induce selective dissolution and bicontinuous structure formation. The evolution of phase morphology, ligament connectivity, and crystallographic features was systematically characterized using scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, X-ray diffraction, and electron backscatter diffraction. Mechanical performance was evaluated through Vickers hardness measurements. The results reveal that the use of an AZ31 melt significantly modifies the dealloying process compared with pure Mg melts, leading to distinct bicontinuous microstructural features and a noticeable enhancement in hardness. These findings demonstrate that Mg melt composition is a critical parameter governing LMD-induced microstructural evolution and mechanical response. This work establishes LMD using a commercial AZ31 alloy melt as a viable and industry-relevant approach for tailoring the microstructure and performance of bicontinuous Mg–Ti composites.

### [복합1-2 | 09:15]

Effect of immersion time on microstructure and mechanical properties of bicontinuous Mg–Ti composites fabricated by liquid metal dealloying: Hyun Jun Youn, Bo Hyun Park, Su Rin Cho(Kyungpook National Univ.), Soo-Hyun Joo(Dankook Univ.), Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National Univ.)

**Keywords:** Mg–Ti composites, Liquid metal dealloying, Bicontinuous microstructure, Immersion time, Tensile properties

Magnesium–Titanium (Mg–Ti) composites are metal–metal systems that combine the low density and biodegradability of Mg with the high mechanical strength and biocompatibility of Ti, making them attractive for lightweight structural and biomedical applications. The liquid metal dealloying (LMD) process provides an effective route for fabricating three-dimensional bicontinuous Mg–Ti composites with interpenetrating metallic networks. In this study, bicontinuous Mg–Ti composites were fabricated by immersing a Ti–Cu precursor alloy into molten Mg at 840 °C, and the effect of immersion time on microstructural evolution and mechanical behavior was investigated. Two immersion times (10 and 60 min) were employed, revealing pronounced microstructural coarsening with increasing immersion time. The average Ti ligament width increased from 1.7 to 3.2 μm, while the Mg matrix width increased from 1.2 to 2.1 μm. To elucidate the influence of these microstructural changes on deformation and fracture behavior, uniaxial tensile testing combined with digital image correlation (DIC) was conducted to analyze full-field strain evolution and strain localization. The strain distributions were correlated with detailed microstructural characterization and fracture surface analyses to identify crack initiation sites and propagation pathways. This study establishes quantitative correlations between LMD processing time, characteristic width scales of the bicontinuous microstructure, and tensile deformation and fracture behaviors in Mg–Ti composites.

### [복합1-3 | 09:30]

입방정 질화붕소 강화 마그네슘 기지 금속복합소재의 열처리에 따른 미세조직-특성 상관관계 분석: 이태호, 정다운, 박현재(한국재료연구원, 부산대학교), 조승찬, 이상복, 이상관(한국재료연구원), 김양도(부산대학교), 김정환\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 금속, 복합소재, 세라믹, 마그네슘

우주환경에서 사용되는 위성체 구조·방열 소재는 경량성, 우수한 기계적 특성, 높은 열전도도, 낮은 열팽창계수(CTE)를 동시에 요구한다. 마그네슘(Mg)은 상용 금속 중 가장 낮은 밀도로 인해 비강도 특성이 우수하지만, 절대 강도 부족, 비교적 낮은 열전도도, 높은 열팽창계수로 인해 단일 소재로 적용하기에는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 제약을 극복하기 위한 방안으로 열전도도와 강성이 우수하며 낮은 열팽창계수를 갖는 입방정 질화붕소(cBN)를 강화상으로 적용한 cBN/Mg 금속복합소재를 개발하였다. 액상가압공정 제조된 복합소재에 대해 기계적 특성 및 열적 특성을 평가하고, 강화상 분산 및 계면 상태 등 미세조직 특성과의 상관관계를 분석하였다. 또한 열처리를 통해 세라믹-금속 복합소재에서 발생 가능한 미세조직 변화(강화상/기지상 간의 분포, 계면 반응, 결합 유무, 반응상 형성, 석출물 분석 등)를 관찰하고, 이에 따른 특성 변화의 원인을 미세조직 관점에서 해석하여 메커니즘을 제시하였다.

본 연구는 cBN으로 강화된 금속복합소재의 열처리 기반 미세조직 제어를 통해 Mg 기반 복합소재의 위성체 적용 가능성을 평가하고, 특성 최적화를 위한 설계 및 공정을 제시하고자 한다.

#### [복합1-4 | 09:45]

**Al-BNNB(Boron nitride Nano Barb) 복합재의 공정-미세조직-물성 상관관계에 관한 연구:** 이효정, 한주연(국민대학교), 구자연, 박은수(주식회사이엠엘), 최현주\*(국민대학교)

**Keywords:** 알루미늄, BNNB, 복합재

본 연구에서는 Boron Nitride NanoBarb(BNNB)를 강화상으로 도입한 알루미늄 기반 복합재를 제조하고, BNNB 첨가에 따른 미세조직 변화가 기계적 및 열적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 고찰하였다. BNNB는 독특한 가시(barb) 구조와 우수한 열적·기계적 안정성을 갖는 나노 구조체로, 금속 기지 내에서 효과적인 강화 거동을 유도할 수 있는 잠재력을 가진다. 특히, 판상 또는 관상 구조를 가지는 기존 BN 계열 강화재와 비교할 때, BNNB의 입체적 가시 구조는 기지와 기계적 interlocking을 보다 효과적으로 유도할 수 있어 향상된 강화 효과를 나타낼 것으로 기대된다. Al-BNNB 복합재는 순수 Al 분말과 BNNB 분말을 이용하여 두 단계의 볼 밀링 공정을 통해 균일 분산을 유도한 후, 열간 압연 공정을 통해 벌크 판재 형태로 제조하였다. BNNB 함량은 1.5, 3.0, 4.5 vol.%로 조절하였으며, 조성 변화에 따른 미세조직 및 물성 변화를 비교 분석하였다. 미세조직 평가는 X선 회절(XRD), 주사전자현미경(SEM), 투과전자현미경(TEM) 등을 통해 수행하였다. TEM 분석 결과, BNNB는 Al 매트릭스 내에 균일하게 분산되었으며, 결정립 내부와 입계 부근에서 안정적으로 존재하였다. 평균 결정립 크기는 약 122 nm 수준으로 감소하였고, 이는 BNNB에 의한 입계 피닝 및 전위 밀도 증가에 기인한 것으로 해석된다. 또한 Al-BNNB 계면에서  $AlB_2$  또는  $AlN$ 과 같은 취성 2차상은 관찰되지 않았으며, 기공이나 균열 없이 치밀한 계면 결합이 형성되었다. 다만 일부 영역에서 BNNB의 부분적 구조 변화로 판단되는 h-BN 계열 구조가 관찰되었으며, 이는 국부적인 열적·기계적 상호작용에 기인한 것으로 추정된다. 기계적 특성 평가 결과, BNNB 함량 증가에 따라 경도와 강도가 순수 Al 대비 향상되었으며, 3.0 vol.% 첨가 시 강도-연신을 균형이 가장 우수하였다. 이는 결정립 미세화, 전위 강화 및 계면 기반 하중 전달 효과가 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 열기계 분석(TMA)을 통한 열적 거동 평가에서는 BNNB 첨가에 따라 열팽창 계수가 감소하는 경향을 보였으며, 이는 열적 안정성 향상과 치수 안정성 확보 측면에서 유의미한 결과로 판단된다. 본 연구는 BNNB 첨가에 따른 미세조직 변화와 강화 메커니즘을 정량적으로 규명하고, 분말야금 기반 공정을 통해 기계적·열적 특성이 동시에 향상된 Al 복합재를 제조할 수 있음을 제시한다.

#### [복합1-5 | 10:00]

**TiC/Fe 복합재료의 (Ti, Mo) $C_x$  형성 거동과 기계적 특성에 미치는 Mo 함량의 영향:** 박현재, 이태호, 정다운(한국재료연구원, 부산대학교), 조승찬, 이상복, 이상관(한국재료연구원), 김양도(부산대학교), 김정환\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 금속복합재료, 코어-립 구조, 기계적특성, 계면 특성

철강소재는 금형, 가이드롤, 공작기계 부품 등 고하중, 고마모 환경에 노출되는 핵심 부품에 적용되며 다양한 산업 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 최근 산업 기술 고도화에 따라 요구 물성이 지속적으로 강화되면서 합금 설계 및 열처리 기반 강화 기술이 발전해 왔음에도 단일 철강 소재만으로는 성능 향상에 한계가 존재한다. 이에 따라 세라믹 강화재를 첨가한 철강 기반 금속 복합재료가 대체 소재로 주목받고 있다. TiC는 높은 경도와 탄성계수, 낮은 밀도, 우수한 고온 안정성을 갖는 강화재로 알려져 있으며, TiC/Fe 금속복합재료는 높은 경도, 내마모성, 고온안정성을 동시에 확보할 수 있다. 다만 최종 물성은 강화재 분산 상태와 치밀화 그리고 강화재/기지 계면에서 형성되는 반응상 및 결합에 의해 크게 좌우되므로, 공정 설계와 계면 제어가 핵심 과제이다. TiC/Fe 금속복합재료는 고상 기반 소결 또는 액상 공정으로 제조되는데, 고상 공정은 확산 및 계면 반응이 제한되어 잔류 기공과 입자 응집이 발생하기 쉬운 반면, 액상 공정은 치밀화에는 유리하나 과도한 반응 및 응고 수축 결합이 발생할 수 있다. 따라서 액상 공정의 장점을 활용하면서도 결합 발생을 억제하고 강화재의 균일 분산을 동시에 달성할 수 있는 전략이 중요하다. 한편, 액상 공정에서 용융 강 내 TiC 입자는 용해-재석출 과정 중 (Ti, Mo) $C_x$  림이 형성된 코어-립 구조로 발달할 수 있으며, 이는 계면 결합과 하중 전달, 파단 거동을 변화시킬 수 있다. 특히 Mo는 TiC/Fe계면 안정화 및 기계적 특성 향상에 유효한 원소로 제시되어 왔으나, Mo 함량 변화에 따른 코어-립 형성 및 계면 구조 변화와 물성의 상관관계를 체계적으로 다룬 연구는 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 액상 소결 공정을 통해 TiC/Fe 금속복합재료를 제조하고, 기지 내 Mo 함량을 0-4 at.% 범위에서 조절하여 (Ti, Mo) $C_x$  림을 갖는 코어-립 구조의 형성을 유도하였다. 이후 기계적 특성 평가와 TEM 기반 계면 분석을 통해 계면 미스핏 거동과 기계적 특성의 상관관계를 규명하고 Mo 기반 계면 설계의 최적 범위를 제시하고자 한다. 본 연구는 중소기업혁신개발사업 ‘수출지향형(Tech-Bridge)’(RS-2024-00487614)과 나노소재기술개발사업(RS-2024-00444649)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### [복합1-6 | 10:15]

**연성-취성 천이온도(DBTT) 및 산화저항성이 향상된 핵융합로 플라즈마 대면부품용 3차원 네트워크 구조 W-Cr 복합재 개발:** 이성민, 김정석, 광노준, 한홍남\*(서울대학교)

**Keywords:** 플라즈마 대면부품(PFCs), 텅스텐 중합금, 통전활성소결(spark plasma sintering), 연성-취성 천이온도(DBTT), 산화저항성

높은 용점, 높은 열전도도, 낮은 스퍼터링을 등의 특성을 갖춘 텅스텐은 유망한 핵융합로 플라즈마 대면부품(plasma facing components, PFCs)용 소재로 주목받고 있다. 하지만 순수 텅스텐은 연성-취성 천이온도(ductile-to-brittle transition temperature, DBTT)가 높아 PFC의 냉각관 주변부를 비롯한 저온부에서는 취성 파괴 거동을 보여 활용이 제한된다. 취성 보안을 위해 연성 상(Ni-Fe)을 도입한 텅스텐 중합금(tungsten heavy alloy) 복합재가 고안되었으나, 핵융합로를 비롯한 중성자 조사 환경에서 Ni는 장반감기 방사성 폐기물을 생성하여 핵융합로 응용에 부적합하다. 본 연구에서는 단반감기 방사성 폐기물을 생성하는 Cr을 연성 상으로



활용한 3차원 네트워크 구조의 W-Cr 복합재를 개발하고 그 특성을 평가하였다. 고에너지 밀링(high-energy milling)을 통해 W-Cr 코어-셸(core-shell) 분말을 제조하고, 동전활성소결(spark plasma sintering)로 치밀화하는 공정을 수립하여 높은 상대밀도의 W-Cr 복합재를 제작하였다. 제작된 W-Cr 복합재는 일축인장시험 결과 순수 텅스텐 대비 낮은 DBTT를 확인하였다. 단계적 인장 과정에서 수행한 KAM(kernel average misorientation) 분석을 통해 향상된 인성의 원인은 저장도, 연성 상인 Cr이 주로 변형을 수용했기 때문으로 판단된다. 또한 사고 환경 하 재료의 안전성을 평가하기 위해 고온, 산소 노출 환경 하 질량변화 및 미세구조를 분석하였다. 개발된 W-Cr 복합재는 순수 텅스텐 소재 대비 산화 저항성이 크게 향상된 것을 확인하였다. 개발된 W-Cr 복합재는 순수 텅스텐에 비해 개선된 DBTT와 산화저항성을 바탕으로 안전한 핵융합로 플라즈마 대면소재로서 기능하리라 기대된다.

#### [복합1-7 | 10:30]

**Cu-Ti 합금의 In-situ 산화를 이용한 복합재료 제조 및 물성 연구:** 문하영(한국재료연구원, 과학기술연합대학원대학교), 정현우, 황지인, 최은애\*, 한승전\*(한국재료연구원)

**Keywords:** Cu-Ti alloy, composites, In-situ oxidation, drawing, dispersion strengthening

일반적인 석출 경화형 동합금은 금속 원소 자체 또는 화합물의 석출로 강도를 향상시키나, 첨가 원소의 기지 내 잔류 고용에 의해 전기전도도 향상이 억제된다. 강도 향상을 위한 석출 과정은 과포화 고용체 형성을 위해 고온 열처리를 요구한다. 따라서 동합금은 장시간 고온 노출 시 표면 스케일 형성을 필연적으로 야기한다. 그런데 Cu-Ti계 합금을 고온에서 열처리하는 과정에서 스케일과 함께 표면에 분산 반응층이 형성되었다. 직경 0.7 mm의 Cu-Ti, Cu-Ti-Fe 및 Cu-Ti-Cr 합금을 885°C에서 열처리한 결과, Cu-Ti-Cr 합금에서 스케일이 가장 많이 발생하였으며 특히, 3시간 산화 시 내부 기지 대비 분산 반응층이 가장 크게 나타났다. 분산 반응층의 전기전도도는 반응하지 않은 코어층에 비해 10배 이상 높게 나타났다. 이는 분산 반응층 내부에 산화물이 형성되었으며, 분산 상이 분포된 영역임을 의미한다. 산소와 반응성이 높은 Ti, Cr, Fe를 포함한 합금은 고온 열처리 시 분산상을 형성하며, 와이어 형태로 제조하여 열처리한 경우 분산 반응층과 반응하지 않은 기지층이 결합된 복합재료를 만들 수 있음을 시사한다. 특히 Cu-Ti-Fe 합금을 885°C에서 1 시간 산화한 경우 반응층과 비반응층이 공존하는 복합구조에서 전기전도도는 19.84% IACS, 인장 강도는 544 MPa를 나타내었다. 이는 일반 합금 대비 높은 전기전도도의 분산 강화형 동합금 제조 가능성을 제시한다.

#### [복합1-8 | 10:45]

**Ti-6Al-4V/CFRP 접합 강도 향상을 위한 Liquid Metal Dealloying 공정 최적화 및 계면 미세조직 제어:** 권혁민(단국대학교), 와다타케시, 카토 히데미(도호쿠대학), 박성혁(경북대학교), 주수현\*(단국대학교)

**Keywords:** 금속 용탕 탈성분, 이중 접합, 다공성 구조, Ti-6Al-4V, CFRP

항공우주 및 액체수소 저장용 구조체의 경량화를 위해 탄소섬유강화플라스틱(CFRP)과 고강도 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)의 이중 소재 접합 기술이 연구되고 있으나 [1], 두 소재 간의 열팽창계수 불일치와 화학적 불활성 특성은 접합 계면의 신뢰성을 저하시키는 주요 원인으로 작용한다. 본 연구에서는 기존 그릿블라스팅과 같은 표면처리의 한계를 극복하기 위해 금속 용탕 탈성분(Liquid Metal Dealloying, LMD) 공정을 적용하여 Ti-6Al-4V 표면에 3차원적으로 연속 연결된 다공성 구조를 형성하고, 이를 통한 접합 강도 향상 가능성을 평가하였다. 실험은 Ti-6Al-4V 시편을 용융된 마그네슘(Mg) 용탕에 침지하여 선택적 용해(selective dissolution) 반응을 유도한 후, 질산을 이용한 선택적 에칭으로 잔류 Mg를 제거하였으며 [2], 공정 최적화를 위해 침지 온도(700-900°C), 침지 시간(10-80분)을 변화시켜 표면 미세구조를 SEM, EDS, EBSD 및 XRD로 분석하였다. 그 결과, 고온 및 장시간 처리 조건에서 표면 리가먼트(ligament) 구조의 조대화 경향이 관찰되었고, 900°C, 40분 조건에서 최적의 open-pore 구조가 형성되는 것을 확인하였다. 최종적으로 LMD로 표면 처리된 Ti-6Al-4V와 CFRP를 극저온용 구조용 접착제(3M 2216 B/A)로 접합하고, 만능 재료시험기를 이용해 접합 강도를 평가하였다. [1] Olsson, Robin, et al. "Design, manufacture, and cryogenic testing of a linerless composite tank for liquid hydrogen." Applied Composite Materials 31.4 (2024). [2] Fukuzumi Yuichi, Takeshi Wada, and Hidemi Kato. "Surface improvement for biocompatibility of Ti-6Al-4V by dealloying in metallic melt." Interface Oral Health Science 2014: Innovative Research on Biosis-Abiosis Intelligent Interface. Springer Japan, 2015.

#### [복합1-9 | 11:00]

**금속복합소재 기반 차세대 고성능 반도체용 고방열, 고내구성 baseplate-heatsink 일체형 소재 연구:** 김민수(한국재료연구원), 조은서, 정다운(한국재료연구원, 부산대학교), 이지윤(한국재료연구원, 부경대학교), 김정환\*, 이상복, 이상관, 조승찬\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 알루미늄 복합소재, 일체형 방열소재, 입방정 질화붕소, 방열판, 열전도도

반도체 소자의 고성능, 고집적화가 일어날수록 높은 전력소모에 따라 높은 열이 동반되게 된다. 온도가 상승함에 따라서 수명이 단축되고, 고장이 증가하며 소자 성능이 저하되는 기능적인 문제와, 반도체가 휘거나, wire bonding이 탈락되거나, solder interface가 파괴되는 물리적인 문제가 발생할 수 있다. 이 때문에, 반도체에서 발생하는 열을 효과적으로 배출할 수 있는 솔루션을 개발하는 것은 오랜 도전과제였다. 특히 방열성능이 비교적 낮은 baseplate의 성능을 보완하기 위해 heatsink를 solder로 접합하게 되면, pump-out이나 dry-out 같은 접합 계면의 신뢰성 문제가 발생하게 되기 때문에 baseplate-heatsink 2in1(일체형) 소재의 개발이 필수적이라 여겨진다. 금속복합재료(MMCs, Metal Matrix Composites)는 금속 기지(matrix)와 세라믹 강화재(reinforcement)의 조합을 통해 우수한 치수 안정성을 가지면서도 온도에 따른 열적 특성을 제어하기가 용이하여 반도체 패키징, 우주항공소재, 공작기계 부품 등 다양한 분야에서 주목받고 있다. 본 연구에서는 높은 열전도도를 보유하면서도 열충격 환경에서 변형을 최소화시킨 복합소재 base plate를 목표로 하며, 공정 조건 제어를 통해 baseplate(복합소재)와 heatsink pin(or fin, 금속소재)가 solder없이 일체형 구조를 가지는 heatsink를 제조하는 것을 목표로 한다. 제조된 MMCs는 액상가압공정(Liquid Pressing Process)을 이용하여 제작되었

며, 복합소재의 미세구조 및 열전도도, 열팽창, 굽힘강도를 관찰하였다. 제조된 복합소재는 균일한 강화재 배열의 미세조직을 보였으며 우수한 열전도 특성, 열팽창 및 굽힘강도를 나타내었다. 또한 2in1 소재는 액상가압공정을 통해 자체 레시피로 제조되었으며, 같은 구조의 solder 접합 시편과 비교하기 위해 미세구조 및 열전도도, 열팽창, 접합강도를 측정하였다. 본 연구는 고방열 복합소재를 제조함으로써, 온도에 따른 치수 안정성과 높은 열전도도를 보여주어 고성능 반도체의 방열에 효과적인 특성을 볼 수 있었다. 또한 baseplate-heatsink 일체형 소재를 통해 제조 공정의 간소화와 접합 대비 방열 효율 향상 등의 효과를 얻을 것으로 기대된다. 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 나노 및 소재기술개발사업의 지원을 받아 수행됨(RS-2022-NR068258, RS-2024-00444649)

#### [복합1-10 | 11:15]

**코어-셸 구조를 통한  $Gd_2O_3$  자기차폐 억제 및  $B_4C$ -Al 복합재료 성능 향상 연구:** 김민우, 조승찬\*, 이동현, 조은서, 김정환, 이상복, 이상관(한국재료연구원), 권한상(부경대학교), 이태규(한밭대학교)

**Keywords:** 금속복합재료, 알루미늄, 중성자 흡수 소재

원자력 발전소 내 사용후핵연료 저장시설의 포화가 예상됨에 따라, 사용후핵연료를 안전하게 저장·운송할 수 있는 운반/저장 용기에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 사용후핵연료는 원자로에서 발생하는 방사성 폐기물의 한 형태로 중성자와 붕괴열을 계속 방출하기 때문에 안전한 저장을 위해 엄격한 관리가 필요하다. 특히 저장 시스템에 사용되는 중성자 흡수재의 중성자 흡수능과 열전도도는 저장 안정성에 핵심적이므로 우수한 물성을 갖는 소재 개발이 필수적이다. 현재 상용 중성자 흡수재로는 주로 Boron carbide ( $B_4C$ )-Al 복합소재가 사용되고 있으며, 성능 향상을 위해  $B_4C$  보다 더 높은 중성자 흡수능을 보이는 Gadolinium oxide( $Gd_2O_3$ ) 등의 소재를 적용하려는 연구가 진행되어 왔다. 그러나  $Gd_2O_3$ 의 경우, 자기 차폐(self-shielding) 및 중성자 채널링(neutron channeling) 효과로 인해 이론적으로 기대되는 성능 대비 실제 성능이 제한되는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해,  $Gd_2O_3$  입자를  $B_4C$  와 단순 혼합하는 대신  $B_4C$  표면에  $Gd_2O_3$ 를 균일하게 Al 기지 코팅한 중성자 흡수재를 개발하고 중성자 차폐 성능 및 열전도도를 평가하였다.  $Gd_2O_3$  코팅층 형성을 위해 MOF (Metal Organic Framework) 기반 산화물 코팅 기술을 적용하였으며, 이를 통해  $B_4C$  표면에 약 100 nm 수준의 균일한  $Gd_2O_3$  층을 형성하고 복합소재를 제조할 수 있었다. 제조된 복합소재의 미세구조 분석 결과,  $Gd_2O_3$  상이  $B_4C$  입자 표면에 균일하게 형성된 것이 확인되었다. 또한 거시적 중성자 흡수 단면적( $\Sigma$ )과 열전도도를 비교한 결과,  $B_4C@Gd_2O_3$  복합소재는 단순  $Gd_2O_3$  입자를 포함한 복합소재 대비 각각 약 20%, 약 10%의 향상을 보였다. 특히  $Gd_2O_3$ 의 중성자 흡수 성능은 이론적으로 기대되는 거시적 중성자 흡수 단면적의 약 96.6% 수준을 나타냈으며, 흡수 효율이 크게 향상되었음을 입증하였다. 본 연구는 MOF 기반 산화물 코팅을 이용해  $B_4C$  표면에  $Gd_2O_3$ 를 균일하게 코팅함으로써 높은 중성자 흡수 효율을 달성할 수 있음을 보여주며, 기존  $B_4C$ /Al 복합소재의 성능을 향상시키는 새로운 접근법을 제시하였다. 본 연구는 과학기술정보통신부 나노 및 소재기술개발사업 (RS-2022-NR068258) 및 기후에너지환경부 에너지기술개발사업(RS-2022-KP002838)의 지원으로 수행되었음.

## 금속역사

Room 3층 삼다A, 4월 30일

## [역사1-1 | 09:00]

**전라북도 지리산 인근 제철유적 출토 슬래그의 재료학적 특성:** 조남철\*, 정희수(국립공주대학교)**Keywords:** 전라북도 제철유적, 직접제련, 조제제, 전철량

지리산은 경상도와 전라도를 넓게 분포하고 있으며, 그 곳에는 시대별 다양한 제철유적들이 발굴되었다. 특히 대표적인 전라북도 제철유적으로 전북 장수 대적골, 남원 고기리, 남원 아막성, 완주 가천리, 장수 비룡리, 무주 삼공리 등 다양한 지역에서 제철 관련 부산물들이 출토되었다. 본 연구에서는 전라북도 제철유적에서 출토된 제철 부산물에 대하여 WD-WRF를 이용한 주요성분, 각 부산물의 미세조직은 금속현미경과 SEM-EDS, 결정구조는 XRD로 분석하여 재료학적 특징을 알아보았다. 분석결과 조업 시기가 이른 남원 아막성 유적이 다른 유적에 비해 철회수율이 낮고, 철과 슬래그의 분리가 잘 이루어지지 못했음을 확인하였으며, 대부분 조선시대 제철 유적에서는 제련기술의 발달로 철과 슬래그의 분리가 보다 원활하게 이루어진 것으로 판단된다. 전철량과 조제량을 통해 제련 방식은 모든 유적에서 직접제련을 통해 철을 생산한 것으로 보인다. CaO 성분의 조제제 첨가 여부를 확인한 결과 이번에 분석한 전북 지역 제철유적에서는 조제제를 첨가하지 않은 것으로 추정되며 유사한 조건과 환경에서 조업이 이루어졌을 가능성이 큼을 확인하였다. 그러나 본 연구에서는 시료의 수와 출토 유적 수가 적어 일부 유적의 슬래그에서는 상이한 결과도 보여주고 있다. 향후 좀 더 다양한 유적과 슬래그를 분석하면 시대별 전라북도 제철 유적의 특징을 파악하는데 있어 중요한 데이터를 제공할 것으로 본다.

## [역사1-2 | 09:15]

**청동거울의 제작에 사용된 재료와 기술의 변화:** 김소진\*, 홍주현(국립문화유산연구원)**Keywords:** 청동, 거울, 재료, 제작기술, 주조, 표면처리

본 연구는 초기철기시대부터 조선시대로 제작 편년이 분류되는 청동거울 36점을 대상으로, 미세조직 관찰과 성분 분석을 활용하여 제작 재료와 기술의 시대적 변화 양상을 확인하는데 목적이 있다. 청동거울은 대부분 Cu-Sn-Pb의 3원계 청동으로 제작되었으며 Sn의 함량은 29 wt.% 이하이며 Pb는 평균 12 wt.% 포함되었다. 청동거울의 미세조직은 Cu의 함량이 높은  $\alpha$ 상의 바탕조직에  $\alpha+\delta$ 상 또는  $\delta$ 상으로 구성되어 있으며 Pb의 함량이 높을수록 Pb 편석물의 수와 크기가 증가함을 알 수 있었다. 분석 결과를 바탕으로 청동거울 제작에 사용된 재료와 기술의 시대적 변화 양상을 확인한 결과는 다음과 같다. 초기철기시대의 청동거울은 Sn이 20~30 wt.%, Pb의 함량이 5~6 wt.% 이내였으며 전체가  $\alpha+\delta$ 상으로 구성된 미세조직이 관찰되었다. 청동거울의 성분비는 삼국~통일신라시대까지 이어진다. 하지만 이러한 성분비는 고려에 들어와 크게 변화된다. Pb의 함량이 5~30 wt.%로 크게 증가하여 Pb의 함량이 Sn의 함량을 능가하게 된다. 조선시대의 청동거울 역시 Pb의 함량이 22 wt.% 이내로, Sn의 함량보다 높다. 납은 주석보다 값이 싸고 쉽게 구할 수 있으며 또한 합금 시 백색도를 높이는 경향이 있어 주석의 대체품으로 사용되었을 것이다. 하지만 납의 함량이 높아지면 납 편석의 크기와 수가 증가하여 경면의 광택에는 좋지 않은 영향을 미친다. 이러한 단점을 해결하고자 거울의 제작 기술에 표면처리가 추가되게 된다. 청동 합금을 만들어 거꾸집을 이용하여 주조한 이후, 광택성을 높이기 위해 주석과 수은으로 주석칠도금, 주석아말감도금, 수은 도금과 같은 표면처리를 적용했음을 확인할 수 있었다.

## [역사1-3 | 09:30]

**해안 환경에서 야의 청동 조형물의 부식 거동 연구:** 권희홍(한국전통문화대학교), 조남철\*(국립공주대학교)**Keywords:** 야의 부식, 야의 조형물, 파티나, 청동병

야의 청동 조형물의 파티나(patina)는 대기 환경으로부터 보호 장벽 역할을 하는 ‘부동태(passivation)’로 여겨지지만, ‘청동병(bronze disease)’으로 잘 알려진 atacamite, paratacamite, clinoatacamite와 같이 copper trihydroxychloride는 안정성과 보존에 있어서 위험한 부식 인자이다. 본 연구에서는 야의 청동 조형물과 유사한 화학조성과 금속학적 특성을 가진 4원계 청동(Cu-Zn-Sn-Pb)을 대상으로 해양 환경에서 일반적으로 확인되는 염화물 파티나의 부식 거동에서 나타나는 특성을 확인하기 위해 인공 파티나 부식 실험을 실시하였다. 파티나의 색도·반사도와 부식생성물의 상관관계를 확인한 결과, 한가지 색상으로 해양 대기 환경에서 일반적으로 생성되는 copper trihydroxychloride가 부식 실험 초기에 생성되었다. 4원계 청동의 대기부식은 부식 거동에 따라 바탕 금속 Cu, Zn의 화학조성이 감소했지만, Sn, Pb의 원소는 상대적으로 증가하여 순 구리 부식과 다르게 청동의 부식 과정은 합금원소에 다르게 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 염화물 파티나는 atacamite, paratacamite, clinoatacamite와 같은 copper trihydroxychloride의 단일 파티나 층을 형성하였으며, 외곽의 분말 층과 내부의 균일 층으로 구분되며, 대기 중의 산소와 부식층의 상호작용, 합금 내 Sn의 내부 산화가 분말화를 더욱 촉진하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 향후 야의 청동 조형물의 파티나 표면의 색상, 화학조성, 부식생성물의 변화와 같은 부식 특성 및 보존을 위한 중요한 기본 데이터를 제공할 것으로 본다.

## [역사1-4 | 09:45]

**양양 선림원지 출토 금동보살입상의 수은 아말감 도금층 미세구조 및 재질 특성:** 이재성\*, 윤혜성(국립문화유산연구원)**Keywords:** 양양 선림원지, 금동보살입상, 수은 아말감 도금법, 도금층, 금분

양양 선림원지 출토 금동보살입상은 출토지가 명확하고 대좌와 광배, 영락장식, 정병 등 구성 요소가 비교적 온전하게 남아 있는 불상으로, 통일신라시기 금동불상 제작기술을 종합적으로 고찰할 수 있는 중요한 금속유물이다. 출토 당시 표면에는 토사와 부식물이

두껍게 부착되어 있었으나 보존처리를 통해 제작 당시의 구성과 표면 상태를 확인할 수 있었으며, 이를 바탕으로 과학적 분석을 실시하였다. 불상 본체와 대좌, 광배, 영락장식, 정병 등 전 구성품을 대상으로 X선 형광분석(XRF)을 통한 비파괴 성분조사를 수행하였고, 파손편에서 채취한 시편에 대해 금속현미경 및 SEM-EDS 분석을 실시하여 도금층의 조성, 두께 및 소지금속의 재질 특성을 확인하였다. 비파괴 성분분석 결과, 도금층에서는 금(Au) 28-65 wt%와 수은(Hg) 7-21 wt%가 검출되어 수은 아말감 도금법이 적용되었음을 확인하였다. 부위별 금과 수은의 함량 차이는 도금 상태와 마감 정도의 차이를 보여준다. 소지금속은 보살입상, 대좌, 정병에서 주석 3-5 wt%를 포함한 구리합금으로 분석되었으며, 광배와 영락장식은 순구리 기반으로 제작된 것으로 확인되었다. 이는 구성품의 형태와 기능에 따른 재질 선택이 이루어졌음을 보여준다. 단면 미세조직 관찰 결과, 도금층은 약 6-11  $\mu\text{m}$  두께로 비교적 균일하게 형성되어 있으며 여러 겹으로 중첩된 구조를 보인다. 금 입자가 눌러 층을 이루고 있으며, 표면은 평탄하게 마감되어 있다. 금속현미경과 SEM 관찰에서 도금층은 소지금속의 표면 요철을 따라 밀착된 상태를 보인다. 평면부에서는 금 입자가 서로 압착되어 치밀한 층을 이루는 반면, 음각 내부나 측면과 같이 마감이 어려운 부위에서는 금 알갱이 상태가 부분적으로 남아 있다. 이는 금분과 수은을 혼합한 아말감을 도포한 뒤 반복 가열을 통해 수은을 기화·제거하고, 이후 광쇠질 등 마감 공정으로 도금층을 치밀화했음을 시사한다. 특히 표면 평탄화 흔적과 금 입자의 중첩 조직은 도금 후 마감이 정교하게 수행되었음을 보여준다. 도금층에서는 10 wt% 이상의 수은이 검출되어 금분과 수은을 혼합한 아말감 도금법이 적용되었음을 재확인하였다. 이상의 분석 결과는 양양 선림원지 출토 금동보살입상이 금분과 수은을 이용한 아말감 도금법으로 제작되었고, 도금층의 금속을 강조하는 마감 공정이 이루어졌음을 보여준다. 특히 반복 도금과 정교한 마감 공정을 체계적으로 수행하여 치밀한 도금층을 구현했음이 금속학적으로 확인되었다. 또한 구성품별 재질의 차이는 통일신라시기 금동불상 제작에서 재료 선택과 제작기법이 체계적으로 이루어졌음을 시사한다. 본 연구는 국립문화유산연구원의 문화유산 연구개발사업(R&D)의 일환으로 수행되었다.

## 타이타늄

Room 3층 삼다A, 4월 30일

## [타이타늄 1-1 | 10:20]

Grade 1 순수 티타늄 판재의 소성 거동 중 집합조직 변화에 대한 결정소성 모델 기반 접근: 유제현, 이명규\*(서울대학교), 봉혁중(경상국립대학교), 홍중화, 민경문(한국재료연구원)

**Keywords:** 티타늄, 집합조직, 결정소성, 쌍정

본 연구에서는 0.1 mm 두께의 순수 티타늄(CP-Ti) 판재에서 나타나는 이방성 소성 거동을 규명하기 위해 결정소성 유한요소법(Crystal Plasticity Finite Element Method, CPFEM) 기반의 수치해석 모델을 개발하였다. 순수 티타늄은 육방 밀집 결정구조(hexagonal close-packed, HCP)를 갖는 금속으로서, 제한된 슬립계와 쌍정의 활성화로 인해 하중 방향에 따른 이방성과 급격한 집합조직 변화가 나타난다. 본 연구에서는 이러한 재료 특성을 정밀하게 반영하기 위해 결정 수준에서 소성 변형 메커니즘을 고려한 수치해석 모델을 구축하였다. 개발된 수치해석 모델에서는 HCP 금속의 소성 변형 과정에서 주요하게 작용하는 변형 쌍정(twinning) 및 역쌍정(detwinning) 현상을 도입하였으며, 쌍정 영역 내에서 발생하는 소성 변형을 함께 고려하여 하중 모드에 따른 비대칭적인 소성 거동을 정확히 모사하고자 하였다. 특히, 하나의 유한요소 내에 다수의 쌍정 영역이 공존할 수 있도록 가정하고 각 영역에 대해 독립적인 계산을 수행하는 체적 평균화 기반 접근법을 적용하였다. 변형의 진행에 따라 쌍정 영역의 체적 분율을 지속적으로 갱신함으로써 미세조직의 변화와 거시적 응력 변화 등을 일관성 있게 구현하였다. 이를 통해 슬립에 의한 완전한 집합조직 변화와 쌍정 및 2차 쌍정에 의해 발생하는 급격한 집합조직 변화를 동시에 모사하였고 실험 결과와의 비교를 통해 본 연구에서 제안된 유한요소해석 모델이 순수 티타늄 판재의 기계적 거동을 효과적으로 재현할 수 있음을 검증하였다.

## [타이타늄 1-2 | 10:35]

Ti-6Al-4V의 반복 열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화와 hot-dip 알루미늄이징을 통한 산화 억제 효과: 이종현, 장병록\*(인하대학교)

**Keywords:** Ti-6Al-4V, 반복 열처리,  $\alpha$ -case, 안정화 원소, 알루미늄이징

일반적으로 2차전지 원재료 열처리 공정에서 트레이 소재로 알루미늄이징 세라믹 소재를 사용하는데, 이 소재를 대체하여 티타늄 합금으로 트레이를 개발하고자 한다. 실제 산업 공정과 유사한 조건에서 Ti-6Al-4V에 대해 900°C에서 6시간 유지 후 공냉하는 반복(사이클) 열처리를 수행하고, 이에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화를 분석하였다. 또한 반복 열처리 중 산화 억제 효과를 검증하기 위해 hot-dip 알루미늄이징을 적용한 시편을 제작하여 무처리 시편과 비교하였다. 반복 열처리 후 조직 분석 결과,  $\alpha$ 상과 마르텐사이트  $\beta$ 상뿐 아니라 준안정  $\alpha'$  및  $\alpha''$  마르텐사이트 상이 함께 형성되었다. 열처리가 진행됨에 따라  $\alpha$ 상 및  $\beta$ 상 안정화 원소의 거동은 표면과 내부에서 서로 다르게 나타났다. 재료 내부에서는  $\alpha$ 상과  $\beta$ 상 내 원자 확산 속도의 차이로 인해  $\beta$ 상 안정화 원소가  $\alpha$ 상에서 배출되면서  $\beta$ 상 분율이 증가하였다. 반면 재료 표면에서는 산화에 의해  $\alpha$ 상 안정화 원소인 산소가 확산되면서  $\alpha$ -case가 형성되었고, 특히 15회 반복 열처리 이후부터는 산소의 영향이 내부까지 확대되면서 미세조직과 기계적 특성 변화가 뚜렷해졌다. 한편 hot-dip 알루미늄이징을 적용한 시편에서는 반복 열처리 과정에서 표면 산화가 억제되었으며, 미세조직 관찰을 통한  $\alpha$ -case 형성 여부와 경도 측정을 통해 확인하였다. 결론적으로, 반복 열처리 동안  $\alpha/\beta$  안정화 원소의 확산 거동과 표면 산화에 따른  $\alpha$ -case 형성이 Ti-6Al-4V의 미세조직 및 기계적 특성 변화에 주요한 영향을 미치며, hot-dip 알루미늄이징은 표면 산화를 억제하여  $\alpha$ -case 형성을 감소시키는 효과적인 방법임을 제시하였다. 본 연구는 알루미늄이징을 통한 산화 억제는 고온 반복 열처리 환경에서 소재 열화를 완화할 수 있는 가능성을 보여주며, Ti-6Al-4V의 2차전지 원재료 열처리용 트레이 적용 가능성을 시사한다.

## [타이타늄 1-3 | 10:50]

Investigating cold creep behaviour and mechanism for Near- $\alpha$  Ti-6242: HaSeong Baek(Incheon National University), Yong-Taek Hyun(Korea Institute of Materials Science), Tea-Sung Jun\*(Incheon National University)

**Keywords:** Creep mechanism, Cold creep, Near- $\alpha$  titanium

Titanium and its alloys are widely used in the automotive and aerospace industries due to their excellent strength-to-weight ratio and corrosion resistance [1-2]. However, dwell fatigue has been reported in  $\alpha$ -Ti, near- $\alpha$ , and  $\alpha+\beta$  titanium alloys, significantly reducing fatigue life. Dwell fatigue is particularly pronounced in the temperature range of around 90 to 120°C and decreases above approximately 230°C [3]. This behaviour is closely related to cold creep, the time-dependent plastic deformation that occurs during the dwell or creep [4]. In this study, cold creep tests were conducted on a near- $\alpha$  alloy, Ti-6242, at 20°C, 120°C, and 240°C, with the deformation behaviour quantitatively analysed using digital image correlation (DIC). The experimental results showed that the creep resistance increased with a higher test temperature. To elucidate the creep mechanism, the stress exponent ( $n$ ) was evaluated and found to be 30.6, 12.7, and 9.4 at 20°C, 120°C, and 240°C, respectively. Applying the effective stress-based strain rate equation,  $\dot{\epsilon} = A\sigma^n \exp(-Q/RT)$  which takes into account the critical stress, and assuming a stress exponent  $p = 5$  for a dislocation-controlled creep mechanism, the effective stress exponents were determined to be 4.1, 5.0, and 5.1, respectively. The estimated threshold stresses were approximately 740 MPa, 446 MPa, and 333 MPa, respectively. Furthermore, the activation volume was determined by applying the activation volume equation ( $V = MkT(\partial \ln \dot{\epsilon} / \partial \sigma - \sigma)$ ), and it was found to be in the range of approximately 1 to 10b<sup>3</sup>. This implies that the cold creep deformation observed in the studied conditions is primarily influenced by dislocation glide and/or dislocation nucleation. This study systematically analysed the cold

creep behaviour of Ti-6242 using quantitative indicators such as stress exponent, threshold stress, and activation volume. This study provides fundamental data for understanding the correlation between temperature-dependent deformation mechanisms and dwell-related strain accumulation behaviour.

#### [타이타늄 1-4 | 11:05]

**$\beta$ 상 안정도 제어를 통한 TRIP  $\alpha+\beta$  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 항공 우주 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  $\beta$  상 안정화 원소를 첨가함으로써  $\beta$ 상의 안정도를 체계적으로 증대시켜 TRIP 기작을 보일 수 있는  $\alpha+\beta$  타이타늄 합금을 설계하고자 한다. 이를 위해 기존  $\beta$ -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  $\beta$ 상의 조성을 기준으로 Bo-Md 상 안정성 도표를 확장할 수 있는 전략을 제시하였다. 계산된  $\beta$  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  $\beta$ 상의 안정성을 정밀하게 제어하고, Ti-6Al-4V 합금 조성 중심으로 Bo-Md 상 안정성 도표를 체계적으로 확장함으로써, TRIP 기작을 보이는  $\alpha+\beta$  타이타늄 합금의 설계를 가능하게 하였다. 본 연구는 Bo-Md 도표와 열역학 모델링의 통합 활용 범위를 확장함으로써, 첨단 타이타늄 합금 설계를 위한 프레임워크를 제시한다.

#### [타이타늄 1-5 | 11:20]

**부분재결정 미세조직을 통한 우수한 강도-연성 특성을 갖는 경량 Ti 기반 중엔트로피 합금:** 이시우, 손수정, Renhao Wu, 이재홍, 하수빈, 홍순익, 김형섭\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 타이타늄, 중엔트로피합금, 부분재결정, 기계적 특성

항공우주 및 수송 산업 등에서 경량 구조재료에 대한 수요가 증가함에 따라, 높은 비강도와 우수한 연성을 동시에 확보할 수 있는 Ti 기반 중엔트로피 합금에 대한 관심이 증가하고 있다. 본 연구에서는 열역학 계산과 전자구조 기반 Bo-Md 설계를 통해  $Ti_{62}Al_{12}V_{20}Mo_3Zr_3$  (at%) 조성을 설계하고, 공정 제어를 통해 미세조직을 최적화하였다. 설계된 합금은 단상 body-centered cubic 구조를 나타내었으며, 부분재결정 미세조직을 갖는 조건에서 가장 우수한 강도-연성 시너지를 보였다. 특히 항복강도 약 1121 MPa와 연신율 약 33.8%를 동시에 달성하였으며, Ti와 Al의 낮은 밀도로 인해  $233.5 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$ 의 높은 비강도를 나타냈다. 강화 기구 분석 결과, 고용강화가 높은 항복강도에 기여하였으며, 이질 미세조직에서 유도된 헤테로 강화와 각 영역에서의 전위 슬립 상호작용, 변형 twin 및 kink 밴드 형성이 시너지적으로 작용하여 가공경화능과 연성을 향상시켰다. 본 연구는 조성 설계와 열기계적 공정 제어의 통합적 접근이 경량 Ti 기반 중엔트로피 합금에서 강도-연성 균형을 구현하는 효과적인 설계 방향임을 제시한다.

#### [타이타늄 2-1 | 11:40]

**Effect of precursor composition ratio on elastic modulus and biological properties of porous Ti fabricated by liquid metal dealloying:** Bo Hyun Park, Hyun Jun Youn, Jeong Hun Lee(Kyungpook National University), In-Chul Choi(Kumoh National Institute of Technology), Sung Hyuk Park\*(Kyungpook National University)

**Keywords:** Porous Ti, Liquid metal dealloying, Precursor composition, Elastic modulus, Biological properties

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 (~110 GPa) remains substantially higher than that of natural bone, which can lead to stress shielding, reduced load transfer to surrounding tissue, and subsequent bone resorption, ultimately compromising implant fixation. Porous Ti structures have therefore been widely investigated as an effective strategy to reduce elastic modulus while providing interconnected pore networks that promote osseointegration and tissue ingrowth. Considering the broad elastic modulus range of cortical bone (3–30 GPa) and cancellous bone (0.02–2 GPa), precise control over pore morphology and ligament size is critical to achieving bone-compatible mechanical behavior. In this study, three-dimensional interconnected porous Ti was fabricated via liquid metal dealloying (LMD), and the influence of Ti-Cu precursor composition on microstructural evolution, elastic modulus, and biological response was systematically examined. Microstructural characterization revealed composition-dependent variations in ligament size and pore fraction, which directly governed the effective elastic modulus of the porous Ti. Mechanical properties were evaluated by compression testing, while in vitro biological assessments were conducted to evaluate cell response, with direct comparisons to bulk Ti. The results demonstrate clear correlations between precursor composition, pore fraction, mechanical properties, and biological performance. These findings provide mechanistic insight into the design of LMD-derived porous Ti with tailored mechanical and biological properties, highlighting its potential for next-generation implant applications with improved bone-implant integration.

**[타이타늄2-2 | 11:55]**

**Evaluation of Mechanical Properties and Anisotropy of Ti-6Al-4V Alloy Fabricated by Laser Wire Directed Energy Deposition (LW-DED):** 이종익, 김세훈(Kyunghee Univ.), 최준혁, 장연하, 주효문(Hyundai Motor Group), 이빈\*(Kyunghee Univ.)  
**Keywords:** Laser Wire Directed Energy Deposition (LW-DED), Ti-6Al-4V, Mechanical properties, Microstructural analysis

Additive Manufacturing (AM) is a technology that enables the production of metallic components directly from 3D models without the need for conventional mold-based casting or subtractive machining. However, powder-based metal AM processes, while suitable for the fabrication of small and high-precision parts, face limitations in productivity when applied to medium- and large-scale components. As an alternative to overcome these limitations, Laser Wire Directed Energy Deposition (LW-DED), a laser-based metal 3D printing method, has gained attention for its ability to combine the high deposition efficiency of wire feeding with the precision of a laser heat source. In this study, Ti-6Al-4V alloy specimens were fabricated using the LW-DED process, and both the optimization of deposition conditions and the evaluation of mechanical properties were conducted. Based on the optimized processing conditions, standard tensile specimens were manufactured along the horizontal and vertical directions. The horizontal specimens exhibited a yield strength of 884MPa, an ultimate tensile strength of 954MPa, and an elongation of 12.3%, whereas the vertical specimens showed a yield strength of 849MPa, an ultimate tensile strength of 931MPa, and an elongation of 11.4%. The mechanical properties of the horizontal and vertical specimens were generally comparable, indicating that mechanical anisotropy was limited. EBSD analysis revealed that both specimens exhibited relatively homogeneous  $\alpha/\alpha'$  lath distributions and crystallographic textures. These results demonstrate that the LW-DED process enables the fabrication of Ti-6Al-4V components with reliable mechanical properties in the as-built condition, regardless of the deposition direction, suggesting its applicability to medium- and large-scale structural components.

**[타이타늄2-3 | 12:10]**

**사용후핵연료 저장용 타이타늄계 중성자흡수 구조재의 기계적특성과 임계제어성능:** 천영범\*, 강지훈, 박선영, 정승문(한국원자력연구원)

**Keywords:** 타이타늄 합금, 중성자흡수 구조재, 사용후핵연료 저장, 임계제어

중성자흡수재는 핵연료의 임계도를 제어하기 위해 필수적으로 사용되는 소재로서, 특히 원자력 산업의 쟁점 중의 하나인 사용후핵연료 관리 기술에 있어서 사용후핵연료 저장시설의 안전성과 제조 경제성에 큰 영향을 주는 핵심 소재이다. 중성자흡수재가 나타내는 중성자 흡수능, 강도, 인성, 제작성, 용접성 등의 성능은 사용후핵연료를 조밀하고 안전하게 저장하기 위한 사용후핵연료 저장시스템의 핵심적 설계 요소라 할 수 있다. 현재까지 널리 사용되고 있는 중성자흡수재는 알루미늄-보론탄화물 복합재로서 우수한 임계제어능을 갖고 있으나, 구조적 성능의 결핍으로 인해 저장시설 적용을 위해서는 별도의 구조체와 함께 설치되어야 하는 문제점이 있다. 이 연구에서는 임계제어 성능과 구조성능을 겸비한 신개념의 중성자흡수재 도출을 위한 방안으로, 타이타늄 기반의 중성자흡수재에 대한 합금개발이 시도되었다. 타이타늄과 중성자 독이 다양하게 조합된 중성자흡수 구조재 실험합금이 설계 및 제조되었고, 이에 대한 기계적특성 평가와 임계제어능 평가가 수행되었으며, 1톤급 대응량으로 제조된 최종 후보소재에 제반 물성평가를 통해 본 개발소재가 중성자흡수 구조재로 활용될 수 있을 가능성을 확인하였다.

**[타이타늄2-4 | 12:25]**

**초고내식 Zr702 합금의 고온 변형 거동 및 가공 공정 지도 분석:** 이현석, 최미선, 장경현(포항산업과학연구원)

**Keywords:** Zr702 합금, 고온 변형 거동, 가공 공정 지도, 열간 가공성, 베타 변태 온도

본 연구에서는 철(Fe) 함량을 0.05% 이하로 극소화한 초고내식 Zr702 합금의 대형 잉곳 및 슬라브 제조 공정 최적화를 위해 고온 변형 거동을 분석하고 가공 공정 지도(Processing Map)를 구축하였다. 원자로 및 고농도 부식 환경용 핵심 소재로 사용되는 Zr702 합금의 열간 가공성 평가를 위해, Gleeble를 활용하여 550~900°C의 온도 범위와 0.1~30/s의 변형률 속도 조건에서 등온 고온 압축 시험을 수행하였다. 실험 결과, 유동 응력(Flow stress)은 온도가 상승하고 변형률 속도가 감소함에 따라 저하되는 전형적인 동적 연화 거동을 보였으며, 특히 863°C의 베타 변태 온도(Beta-transus) 전후에서 결정구조 변화에 따른 응력 급감 현상이 관찰되었다. Dynamic Materials Model(DMM)에 근거하여 작성된 가공 공정 지도를 분석한 결과, 전력 소성 효율( $\eta$ )이 극대화되는 영역은 베타 변태 온도 이상의 고온 영역과 700~800°C 범위의 저변형률 속도 영역에서 나타났으며, 이는 동적 재결정(DRX)에 의한 미세조직 미세화가 활발히 일어나는 안정 영역임을 확인하였다. 반면, 고변형률 속도 및 저온 영역에서는 유동 불안정성(Flow instability)에 의한 균열 발생 가능성이 확인되어 실제 단조 공정에서 회피해야 할 조건을 도출하였다.



## 적층제조 활용 경사기능형 내열소재 심포지엄

Room 3층 삼다B, 4월 30일

### [내열-1-1 | 09:00] 초청강연

PBF로 제조된 IN738 alloy에서의 응고크랙 발생거동 및 방지대책: 조중욱\*, 이승훈, 전하늘(포항공과대학교)

**Keywords:** IN738, 금속적층제조, 응고크랙, 나노입자강화

IN738 초내열합금은 가스터빈, 항공재료 등으로 각광받는 소재이며 특히 레이저를 이용한 금속적층제조를 통한 부품제작이 활발하게 추진되고 있다. 그러나 IN738 합금은 응고크랙을 형성하기 쉬워서 최적의 printing 조건을 실현하는데에 제약이 존재한다. IN738을 비롯하여 많은 합금성분을 포함하는 재료는 일반적으로 응고완료 단계에서의 고/액 공존구간이 길어져서 crack susceptibility가 커지므로 solidification crack 또는 liquation crack의 형태로 크랙이 발현되기 쉽다. 본 연구에서는 IN738 초내열합금을 L-PBF (Laser Powder Bed Fusion) 공정으로 프린팅하면서, 분위기 가스를 적절하게 제어하여 산화물 또는 질화물 나노입자를 형성시키고 분산시킴으로써 crack susceptibility를 감소시키는 동시에 응고조직을 등방화하는 방안을 제시하였다. 본 연구를 통하여 제안된 기술은 IN738 이외에도 다양한 금속접합 및 적층제조에 적용될 수 있으며, 특히 ODS (Oxide Dispersion Strengthened) 합금제조 시 고질적인 문제인 공정난이도를 해소하는 효과도 기대된다.

### [내열-1-2 | 09:25] 초청강연

금속 3D 프린팅 기반 고강도 IN738 초내열 합금의 공정 최적화 및 열처리 제어 기술 개발: 안성열, 서혜진, 김형섭\*(포항공과대학교)

**Keywords:** Laser Powder Bed Fusion (PBF-LB/M), IN738 Superalloy, Active Learning, Process Optimization, Heat Treatment

본 연구는 국방 분야의 극한 환경에 적용 가능한 고강도 내열 소재 개발을 위해 PBF-LB/M 금속 3D 프린팅 공정을 활용하여 난용접성 IN738 초내열 합금의 공정 및 후처리 기술을 최적화하였다. 특히 머신러닝 기반의 능동학습(Active Learning)과 Symbolic Regression을 도입하여 단순 기계적 물성뿐만 아니라 결합 종류, 결정립 형상 등 미세조직적 특성을 고려한 3차원 공정 최적화를 수행하였으며, 용력제거 및 시효 처리 단계를 과감히 조절한 새로운 열처리 공정을 설계하여  $\gamma'$  상 과도 형성 및 MC 탄화물에 의한 취성 파괴 문제를 해결하였다. 그 결과 항복강도 1198 MPa, 인장강도 1513 MPa라는 목표를 상회하는 우수한 물성을 달성하였으며, 액상 역채움 효과를 강화한 수정 합금(LEG-mod) 설계를 통해 미세 균열을 저감함으로써 AI 기반 공정 최적화와 금속 3D 프린팅 기술의 융합을 통한 국방 특화 소재의 실용화 가능성을 입증하였다.

### [내열-1-3 | 09:50] 초청강연

레이저 기반 직접용융증착법을 활용한 경사기능형 금속-세라믹 내열소재 제조: 김정기\*, 유현용(경상국립대학교), 유진영(부산대학교), 김태현, 이진수(경남대학교), 안성열(포항공과대학교), 김형섭(포항공과대학교, Tohoku University), 이태경(부산대학교), 김세윤(경남대학교)

**Keywords:** 적층제조, 경사기능재료, 초내열합금, 세라믹

레이저 기반 적층제조 공정은 기존 용접 공정 대비 작은 입열량을 가지고 있어 가스터빈 등 난용접 부품의 이종접합 및 유지보수에 강점을 가지고 있다. 위의 강점에 의해 최근 Ni기 초내열합금 분말 및 와이어를 적층제조에 적용하여 이종접합에 관한 연구는 다수 수행되었으나, 가스터빈 및 엔진의 연소부 온도 저감을 위한 열차폐 코팅의 유지보수는 여전히 용사코팅에 의존하고 있는 상황이다. 열차폐 코팅은 상대적으로 낮은 접합강도로 인해 운용 중 자주 손상이 되므로 코팅 손상영역의 부분적인 수리를 위한 대체 공정이 중요하기에 본 연구에서는 직접용융증착법을 활용한 금속-세라믹 경사기능형 소재 제작 후 기본적인 열적-기계적 특성 평가를 수행하였다. 적층제조 공정 중 형성되는 표면장력 및 열 대류는 용융 영역에서 IN625 초내열합금과 알루미늄 산화물의 혼합을 가속화시킴에 따라 혼합영역에서의 접합력을 유지하고, 이로 인해 접합 코팅을 적용하지 않더라도 10 MPa 내외의 접합강도를 확보할 수 있었다. 열적 특성 평가 결과, 제조된 금속-세라믹 경사기능형 소재는 1300도 환경에서 220도의 열차폐 효과를 보여 고온 환경에서도 열차폐 코팅으로 충분한 역할을 하였다. 해당 연구에서 사용한 IN625 및 알루미늄 산화물이 실제 터빈 운용 환경 대비 낮은 온도에 적합한 소재이므로 추후 소재 변경 및 접합강도 향상을 위한 코팅층 개선이 필요하나, 본 연구 결과는 레이저 기반 적층제조 공정이 내열소재/부품의 손상부위에 국부적으로 열차폐 코팅을 수행할 수 있는 대체 공정으로 활용 가능함을 보여준데 의의가 있다.

### [내열-1-4 | 10:15] 초청강연

상장모델링과 평균장 이론 모델링을 활용한 L-PBF IN738LC 상변화 미세조직 분석: 김경덕\*, 샤일렌드라 쿠마르 베르마, 안성열, 김형섭(포항공과대학교)

**Keywords:** 니켈기 초내열 합금, 적층제조, 상장모델, 평균장 이론 모델

본 연구에서는 적층 제조 공정 및 후속 열처리 공정에서 INCONEL 738LC의 미세조직 상변화 메커니즘을 상장 모델링과 평균장 이론 모델링을 활용하여 분석하였다. 이전에 제안된 적층 제조 공정 조건 중 결합이 가장 적은 세 가지 조건을 선정하여 모델링과 실험을 정밀 분석하였으며, 그 결과 가장 최적의 적층 제조 공정 조건(290 W, 1, 500 mm/s)을 도출하였다. 최적의 공정 조건을 적용한 시편에서 가장 낮은 기공 분율과 균열 발생이 관찰되었다. 3차원 상장 모델링을 통해 최적의 적층 제조 공정 조건을 적용할 경우, 낮은 열구배로 인해 덴드라이트 미세조직 간 충돌이 발생함을 예측하였다. 이러한 덴드라이트 충돌은 낮은 과냉각과 낮은 고용 원소 응집을 유발하는 것으로 분석되었다. 그 결과, 적층 제조 공정 중 탄화물 성장이 억제되고 후속 열처리 과정에서 강

화상인 감마프라이임( $\gamma'$ ) 상의 분율이 증가할 것으로 예상된다. 높은 기계적 물성을 확보하기 위한 합금 설계에서는 후속 열처리 공정을 통한 감마프라이임 상변화 메커니즘에 대한 이해가 중요하다. 평균장 이론 모델링을 활용하여 적층 제조 후 900 °C 열처리 시 감마프라이임 상변화 메커니즘을 분석하였다. 초기에는 이봉 거동을 보이던 입자 크기 분포가 168시간 이후 단일 분포 거동으로 전이됨을 확인하였으며, 이는 주조 합금의 평형 상변화 거동에 비해 빠른 동역학적 상변화로 판단된다. 분포 거동 변화에 있어 감마프라이임 상 분율, 계면에너지, z 보정 계수가 이동도보다 더 중요한 인자임을 모델링을 통해 규명하였다. 본 연구 결과를 통해 상장 모델링과 평균장 이론 모델링을 결합함으로써 새로운 적층 제조용 니켈기 초내열 합금 설계가 가능함을 제안한다.

#### [내열2-1 | 10:50] 초청강연

**화염 분사에 노출된 내열 열방호 합금의 소재성능 변화:** 이태경\*, 유진영, 김성원, 천세호, 이정훈(부산대학교), 김정기(경상국립대학교)

**Keywords:** 내열, 열방호, 화염시험, 미세조직

항공, 우주 및 국방 분야의 추진 시스템과 기계 구조물은 초고온 화염 및 급격한 열 충격 환경에 상시 노출되며, 이에 따라 소재의 고온 안정성과 구조적 무결성 확보가 중요하다. 특히 극초음속 비행체나 차세대 가스터빈 엔진의 경우, 단순한 내열성을 넘어 고온 산화 저항성과 고온 크립 특성이 복합적으로 요구된다. 화염 시험(Flame test)은 이러한 극한 환경에서의 소재 생존성을 평가하는 필수적인 공정이지만 현재까지의 연구는 주로 완제품의 화염 관통 여부를 확인하는 인증 수준에 머물러 왔으며 화염 노출 시 소재 내부에서 발생하는 미세조직 열화 기전에 대한 데이터는 부족한 실정이다. 본 연구는 대표적 내열 소재인 타이타늄 합금과 니켈기 초합금, 그리고 차세대 열방호 소재를 대상으로 체계적인 화염 시험을 수행하여 소재 단에서의 열화 거동을 심층 분석하였다. 국제 표준 화염 조건을 모사하여 데이터를 수집하였으며, 화염 중심부로부터의 거리에 따른 온도 구배가 미세조직에 미치는 영향을 전자현미경 및 EBSD로 분석하였다. 또한 미세조직과 기계적 특성 간 영향을 규명하고자 마이크로 경도 맵핑을 수행하였다.

#### [내열2-2 | 11:15] 초청강연

**이종소재 DED-LB 활용 국방 보수부품 품질평가 방법 표준화 연구:** 어두림\*, 이협, 손용(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 이종소재, DED, 보수부품, 접합계면

금속분말 기반의 L-DED 적층제조 공정은 레이저 헤드를 통하여 금속 분말과 고출력 레이저를 모재의 특정 위치에 조사할 때, 모재와 금속 분말이 순간 용융 및 응고되는 원리를 이용한 적층제조 기술로, 곡면 형상 적층 및 보수 적층에 유리하여, 기존 CNC 절삭가공과의 시스템 통합이 수월하여 조달 애로 (노후 및 단종 등) 국방부품 보수를 위한 방법으로 활발히 적용되고 있다. 하지만 이를 통해 보수된 부품에 대한 품질평가 가이드라인 및 관련 표준의 부재로 인하여 기술의 적용이 제한되고 있는 실정이다. 특별히 적층부와 모재부의 접합 계면은 이종소재, 이종조직 계면을 형성하므로 특별히 품질평가 방법에 주의하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 L-DED 적용 부품 보수 공정의 절차서 및 품질 평가 가이드라인을 도출하고 이를 표준화하고자 한다. 기존 적층제조 관련 표준들과의 합치성 및 본 표준만의 신규성이 인정될 수 있는 표준개발의 과정 및 내용을 논의한다.

#### [내열2-3 | 11:30] 초청강연

**항공엔진 MRO 적용을 위한 IN718 적층재 특성 데이터베이스 구축:** 김가형, 김영무\*, 윤종진, 한정민, 김진영, 김광년(한화에어로스페이스)

**Keywords:** Additive Manufacturing(적층제조), L-PBF(Laser-Powder Bed Fusion), Aircraft Engines(항공엔진)

금속 적층제조 기술은 주조, 단조, 기계가공과 같은 전통적인 제조 방식을 대체할 수 있는 혁신적인 제조 기술로 최근 여러 산업 분야에서 각광받고 있다. 그 중 항공엔진 MRO 분야에서 금속 적층제조 기술의 적용을 확대하기 위해서는 기존 단조 및 주조 소재와 동등한 수준의 신뢰성 있는 소재 물성 데이터베이스 구축이 필수적이다. 특히 항공인증체계에서는 설계 및 해석에 사용되는 설계 허용치 설정 근거에 통계적 신뢰성을 가진 재료 특성이 파악되어야 한다. 이를 위해 MMPDS(Metallic Material Properties Development and Standardization, 금속 재료 물성 개발 표준화)를 기반으로 한 체계적인 소재 물성 표준화가 요구된다. 본 발표에서는 L-PBF(Laser Powder Bed Fusion) 공정으로 제작된 IN718 적층재의 소재 물성 데이터베이스 구축 과정을 소개한다. 먼저 MMPDS Handbook에 수록된 소재 물성 데이터 요구사항을 분석하여, 인장, 피로, 균열 성장 속도 등 핵심 기계적 물성 항목을 포함한 DB Matrix를 정의하였다. 이를 바탕으로 적층재 물성 평가에 필요한 빌드 방향, 위치, 반복성 확보를 고려한 적층 빌드 설계를 수행하고, 제작 및 시험평가를 진행하였다. 이 과정을 통하여 L-PBF 적층재 특성 데이터베이스 구축의 실질적인 접근 방법을 제시하는 바이다.

#### [내열2-4 | 11:45] 초청강연

**항공엔진 부품 제작을 위한 적층제조 공정 파라미터 영향:** 한정민, 김가형, 윤종진, 김진영, 김광년, 김영무\*(한화에어로스페이스)

**Keywords:** Additive Manufacturing(적층제조), L-PBF(Laser-Powder Bed Fusion), Aircraft Engines(항공엔진)

적층제조 기술은 레이저, 아크 등의 열원으로 공급된 금속분말이나 와이어를 녹여 부품을 제작하는 기술이며 부품 제작 정밀도 및 물성이 우수한 L-PBF 기술(레이저 열원으로 도포된 금속분말을 녹임)을 가장 많이 활용하고 있다. 특히 L-PBF 기술을 이용한 항공엔진 부품 개발 및 양산하는 사례가 증가하고 있으며, 다양한 항공엔진 개발 시 해당 기술을 적극적으로 활용하는 업체가 많다. 이러한 부품 제작을 위해서는 단순 제작 가능 여부를 검토하는 것이 아닌 적층제조 공정의 파라미터에 대한 영향에 따른 성능(치수, 표면조도 등)과 구조 부품 활용을 위한 물성 확보가 필수적이다. 본 발표에서는 이러한 공정 파라미터에 따른 확보 가능한 성능을 소개하고 부품 제작에 활용하고 있는 방안을 제안하고자 한다. 또한 항공엔진 OEM으로써 적층제조 공정 개발의 범위와 물성 DB 구축에 따른 부품 제작 제한 등을 설명하고자 한다.

**[내일2-5 | 12:00] 초청강연****적층제조 공정의 항공기 적용 사례 및 확대 전략:** 박주영, 정유인\*(한국항공우주산업)**Keywords:** 적층제조, 항공기, 적용사례, 공정 최적화

본 발표는 한국항공우주산업 내 운용/개발 항공기 분야에 적층제조 공정 기술을 적용한 사례를 분석하고, 향후 기술 확대를 위한 전략을 제시한다. 금속 적층제조 공정 중 타이타늄 합금 금속 분말 국산화 과정과 그 과정에서의 기술적 애로사항을 공유하고, 운용/개발 항공기에 금속/비금속 적층제조 부품을 적용한 성공 및 실패 사례를 심층적으로 분석하여 설계 적용 기준에 대해 설명한다. 더 나아가, 현재 타이타늄 합금 금속 분말 외 다른 금속 합금계 확장, 적층제조품의 건전성 평가를 위한 비파괴 검사 승인 기준 정립 등과 같은 항공산업에서 AM 기술의 적용 범위를 넓히기 위한 물성 개선 및 공정 최적화 방안을 제시한다.

## 가공-용접 및 접합 II

Room 3층 300, 4월 30일

### [용접5-1 | 09:00]

**계층적 미세조직을 통한 GTAW 용접 STS 316L의 극저온 강도-연성 동시 향상:** 전승민, 손광태, 김영균, 나영상\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 극저온 인장특성, 스테인리스 강, 미세조직, GTAW 용접, 변형유기소성

가스 텅스텐 아크 용접(GTAW)으로 접합된 STS 316L 스테인리스강의 극저온 기계적 성능은 전통적으로 모재에 비해 열등한 것으로 여겨져 왔다. 이는 용접 과정에서 발생하는 미세조직 이질성에 기인한다. 그러나 본 연구에서는 이러한 이질성이 오히려 극저온(4.2 K)에서 뛰어난 강도-연성 조합을 가능하게 한다는 것을 밝혀냈다. 298 K, 77 K, 20 K, 4.2 K에서 수행한 인장 시험 결과, 용접금속은 모재 대비 현저히 높은 항복강도와 인장강도를 나타냈으며, 동시에 극저온에서 연신을 40% 이상을 유지하여 우수한 강도-연성 균형을 달성하였다. DIC 및 미세경도 분석 결과, 상온에서는 용접부(Fusion zone) 내에서 파단이 발생하였으며, 이는  $\delta$ -ferrite와 성분 편석, Columnar 형태의 조대한 결정립에 의한 것으로 확인된다. 반면 극저온 조건에서는 국부적인 적층결합에너지(SFE) 저하로 인해 편석된 오스테나이트 영역에서 TRIP이 우선적으로 활성화되었으며, EBSD와 ECCI 분석 결과  $\alpha'$ -마르텐사이트 체적분율이 40% 이상으로 급증하는 것이 관찰되었다. 이러한 마르텐사이트 변태는 용접부 뿐만 아니라, 열영향부(HAZ), 모재(Base)에서 모두 발생함으로써 단계적 변형 경화(stage-wise hardening)가 작용하면서 변형을 재분배하고 조기 국부화를 억제한 결과로 해석된다. 이러한 결과는 용접 유발 미세조직 이질성이 극저온 환경에서 TRIP 기반의 계층적 변형 메커니즘을 촉진하여 기존의 한계를 극복할 수 있음을 보여준다. 본 연구는 액체수소 저장용 탱크와 같은 극저온 구조물의 용접 설계에 새로운 패러다임을 제시한다.

### [용접5-2 | 09:15]

**Nb이 저탄소강의 대입열용접 열영향부의 미세조직과 저온 충격인성에 미치는 영향:** 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 결정립 성장이 일어나고, DP (degenerated pearlite) 또는 MA (martensite-austenite) constituents와 같은 단단한 2차상이 형성되면서 저온 충격인성이 열화되는 것으로 알려져 있다. 이는 Ti와 Nb와 같은 microalloying 원소를 첨가함으로써 해결할 수 있는데, Ti는 고온에서 안정한 탄질화물을 형성함으로써 결정립 성장을 억제하고, Nb는 냉각 시에 상변태를 지연시켜 2차상의 거동을 제어할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 FEM과 GLEEBLE 시뮬레이션으로 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.

### [용접5-3 | 09:30]

**핵융합로 구조용 저방사화강의 Ti 첨가에 따른 탄화물 석출 거동과 용접 공정별 HAZ 폭 차이가 고온 기계적 특성 및 크리프-피로 거동에 미치는 영향:** 박정현, 한재연, 이상현(국립창원대학교), 김치원, 박형권(한국재료연구원), 정승진(조선선재 기술연구소), 홍현욱\*(국립 창원대학교)

**Keywords:** Reduced-Activation Ferritic/Martensite (RAFM) steel, EBW, GTAW, Heat-Affected-Zone (HAZ), Thermal stability, MX precipitate

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 Ti를 첨가하였고 높은 전위 밀도를 위해 낮은 tempering 온도(730 °C)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 °C에서 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 변형을 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.

#### [용접5-4 | 09:45] Canceled

#### [용접5-5 | 10:00]

API X70 파이프라인강 용접부의 미세조직 이질성이 SSRT 기반 응력부식균열 거동에 미치는 영향: 박중현, 설재복, 성효경\*(국민대학교)

**Keywords:** API X70 파이프라인강, 열영향부(HAZ), 응력부식균열(SCC), 미세조직적 건전성, 구조 건전성

최근 에너지 수요 증가로 고강도 라인파이프 강재의 적용이 확대되고 있으나, 용접 열영향부(HAZ)에서의 응력부식균열(SCC)로 인한 파손 사례가 보고되고 있다. HAZ의 미세조직적 불균일성은 부식 및 SCC 거동을 지배하는 핵심 요인으로 작용한다. 기존 연구들은 주로 재현(simulated) 시편이나 미시적 분석에 의존하여 실제 산업용 용접부의 복합적인 환경 손상 기구를 설명하는 데 한계가 있었다. 따라서 본 연구에서는 실제 서브머지드 아크 용접(SAW)된 API 5L X70 용접부를 대상으로 미세조직 분석, 전기화학적 부식 시험, 그리고 정전위 SSRT(Slow Strain Rate Test)를 통합적으로 수행하여 용접부 각 영역 모재(BM), 용접금속(WM), 열영향부(HAZ)의 SCC 저항성을 평가하고, 미세조직적 불균일성이 균열 발생 및 전파에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

#### [용접5-6 | 10:15]

Threshold-tree coupled k-means clustering 모델을 활용한 대입열 용접 열영향부 국부취성영역의 기하학적 특성과 인성 열화 메커니즘 규명: 유성훈, 최정현, 박현준, 강남현\*(부산대학교)

**Keywords:** Bainitic structure, Machine learning, Coarse-grained heat-affected zone, martensite-austenite constituents

대형 구조물(조선 선박, 해양 플랜트 등)용 후판의 경우 용접품의 성능 향상과 생산성 확보를 위해 고강도 저합금강 (HSLA steel, high-strength low-alloyed steel)의 사용이 필수적이다. HSLA 강은 낮은 탄소 당량 ( $C_{eq}$ )을 가지며, 기존 강재에 비해 우수한 용접성을 갖는다. 또한, 티타늄 (Ti), 니오븀 (Nb) 그리고 바나듐 (V)과 같은 미세 합금을 첨가하여 석출 강화 (precipitation hardening) 효과를 유발하거나 상변태를 제어하여 우수한 기계적 특성을 얻을 수 있다. 그러나 대형 구조물용 고입열 용접 (입열량 > 200 kJ/cm)은 조대립 열영향부 (coarse-grained heat affected zone, CGHAZ) 내 결정립 성장 혹은 국부 취성영역 (LBZ, local brittle zone)을 형성해 충격 인성을 저하시키며, 이는 미세 합금 원소에 의해 촉진되는 것으로 알려져있다. 특히 저탄소강의 LBZ로 주로 알려진 martensite-austenite (MA) constituents가 cleavage fracture를 야기하는 메커니즘은 그 조직의 크기, 양, 형상, 내부 결정 구조 등의 복합적인 상호작용으로 결정되어 오랜 논쟁으로 남아있다. 본 연구에서는 CGHAZ 내 MA constituents의 거동 변화를 구현하기 위해 Nb 함량이 다른 4가지 후판 강재를 설계하였다. 대입열 용접 방법인 tandem EGW (electro-gas welding) 용접 시 열영향부의 열이력을 계산해 Gleeble을 통해 모사된 CGHAZ 시험편을 제작했다. LBZ로 알려진 중간상 거동 (크기, 형상 등)을 머신 러닝을 통해 분류하고, 파괴분석과 병행하여 충격 인성을 저하시키는 원인을 규명하였다. 따라서 CGHAZ 인성 열화를 억제하기 위한 MA constituents의 최적 범위를 제시하고, 야금학 전반에서 적용될 수 있는 미세조직 거동 분류 접근법을 제안했다.

## 가공-열처리

Room 3층 300, 4월 30일

### [열처리1-1 | 10:40]

**FCD800 합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 Q/T 열처리 영향:** 김성진, 이준호, 최승혁, 이석재\*(전북대학교)

**Keywords:** 구상흑연주철, Q/T 열처리, 오스테나이트 안정성, 경도

최근 로봇 기술은 단순 반복 작업을 수행하는 자동화 장비의 수준을 넘어 피지컬 AI 기반의 지능형 로봇 시스템으로 빠르게 진화하고 있다. 이와 함께 로봇 구동 시스템의 핵심 요소 중 하나인 감속기에 사용되는 구상흑연주철 합금의 기계적 성질 향상에 대한 관심도 높아지고 있다. 지금까지 구상흑연주철에 대한 여러 연구들은 강도와 연성의 균형, 피로 특성의 향상을 목적으로 오스테나이트 공정을 중심으로 수행되어 왔다. 오히려 급냉 및 템퍼링 (Q/T) 처리된 구상흑연주철의 미세조직 및 기계적 특성을 분석한 연구는 현저히 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 급냉 및 템퍼링 온도 변화가 구상흑연주철의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 조사하였다. 사용된 FCD800 합금을 900~1000 °C 범위에서 오스테나이트화 처리 후 급냉하였고, 이후 200 °C 및 600 °C에서 템퍼링 하였다. 열처리 조건에 따라 열처리된 시편의 경도, 잔류 오스테나이트 분율, 오스테나이트 내 탄소 농도 및 미세조직 변화를 정량적으로 분석하였다. 급냉된 시편의 경도는 오스테나이트화 온도가 증가함에 따라 58.6에서 53.5 HRC로 감소하였다. 200°C에서 템퍼링 한 경우에도 경도는 오스테나이트화 온도에 따라 동일하게 감소하는 경향이 나타났다. 이는 잔류 오스테나이트 분율과 미세조직적 차이에 기인한다. 반면, 600°C에서 템퍼링 한 경우에는 오스테나이트화 온도와 무관하게 35.4~35.9 HRC의 일정한 경도값을 나타냈다. 템퍼링 과정에서 시멘타이트가 아닌 2차 흑연의 석출이 관찰되었으며, 2차 흑연은 600°C의 템퍼링 조건에서만 형성되었다. 2차 흑연의 크기와 분율은 오스테나이트화 온도가 증가함에 따라 증가하였으나, 경도 변화에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Q/T 처리된 구상흑연주철의 경도 거동이 2차 흑연 석출보다는 잔류 오스테나이트의 안정성과 기지 연화 거동에 의해 주로 지배됨을 시사한다.

### [열처리1-2 | 10:55]

**Effects of Solute Atoms on Recrystallization Behavior of Platinum Alloys:** Gaeun Song(Seoul National Univ.), Young-Kyun Kwon(Kyung Hee Univ.), So-Yeon Lee(Inha Univ.), In-Suk Choi\*(Seoul National Univ.)

**Keywords:** Platinum alloys, Recrystallization temperature, Vacancy diffusivity, Stacking fault energy

Platinum (Pt) is a representative noble metal known for its excellent physical and chemical stability and high melting point, making it a good model system for investigating fundamental recrystallization behavior. This study examines the influence of solute atoms commercially used in the jewelry industry—copper (Cu) and tungsten (W)—on the recrystallization kinetics of Pt alloys. The Pt alloys investigated here maintain a single solid-solution phase, allowing us to focus on how minor solute additions can drastically alter microstructures and mechanical properties. Three specimens (pure Pt, Pt-5 wt.% Cu, and Pt-5 wt.% W) were prepared, and changes in hardness and microstructure during annealing were analyzed. As a result, the recrystallization temperatures varied significantly depending on solute type and concentration: Pt (~600 °C) < Pt-Cu (~700 °C) < Pt-W (~1100 °C). Through extensive microstructural characterization and computational analysis, we identified vacancy diffusivity and stacking fault energy (SFE) as the key factors controlling recrystallization kinetics. The effects of diffusivity and SFE on recrystallization were quantitatively evaluated. Furthermore, a modified JMAK-based model incorporating these two parameters successfully predicted the recrystallization behavior of other Pt alloys, such as Pt-Co and Pt-Mo. We believe that this research provides an in-depth, quantitative understanding of recrystallization behavior in Pt alloys and offers a validated, extensible modeling approach for predictive alloy design and process optimization across a broader range of alloy systems.

### [열처리1-3 | 11:10]

**고질소 오스테나이트계 스테인리스강의 시효 시 석출 거동 및 기계적 물성 분석:** 김승현(한국재료연구원, 동아대학교), 김성훈\*, 이태호, 이진중, 조호형(한국재료연구원), 정재석(두산에너지리티), 전중배\*(동아대학교)

**Keywords:** high nitrogen austenitic stainless steel, aging, precipitate, mechanical properties

고질소 오스테나이트계 스테인리스강(high nitrogen austenitic stainless steel, HNASS)은 니켈(Ni) 함량을 줄이고 질소(N) 함량을 높여 우수한 기계적 특성을 확보한 합금으로 현재 발전소 구조 소재로서 상용되고 있다. 해당 강종은 열처리 가열 및 냉각 시 상변태가 발생하지 않아 열처리를 통한 강화가 어렵기 때문에, N에 의한 고용강화나 Nb, V첨가를 통한 석출 강화에 의존하게 된다. 이러한 합금성분이 첨가될 경우 고온에서 탄질화물 형성이 촉진되며 일부 석출상들은 기계적 물성을 저하시키는 유해상으로 작용하여 소재의 신뢰성 저하로 이어질 가능성이 있다. 본 연구에서는 N과 Nb 함량을 달리한 3종의 강을 용체화처리하여 준비하였으며, 이후 900°C에서 최대 100시간 동안 진공 봉입 환경에서 시효를 수행하였다. Thermo-Calc 및 Matcalc를 통하여 열처리 조건을 설계하였고, OM, SEM, TEM 및 EPMA 분석을 통해 미세조직 변화와 석출 거동을 규명하였으며, 이에 따른 기계적 물성 변화를 인장 시험을 통해 평가하였다. 그 결과, 초기 용체화처리 상태에서는 N과 Nb 함량이 높을수록 항복 강도 및 인장 강도가 증가하였으나, Nb 함량이 높은 조성에서는 상대적으로 낮은 연신율을 보였다. 900°C 시효 시, 상대적으로 N 및 Nb 함량이 낮은 조성에서는 초기 MX상이 석출되었으나 시효 100시간 후  $\sigma$ -phase로 형성되어 연신율이 급격하게 저하되었다. 질소 함량이 높은 조성의 경우,

시효 초기부터 입계에  $\text{Cr}_2\text{N}$ 이 다량 석출 및 포화되어 연신율이 하락 후 최종 100시간까지 정체되는 양상을 보였다. 반면 N 및 Nb 함량이 높은 합금에서는 입계에  $\text{Cr}_2\text{N}$ 이 일부 존재함에도 불구하고 열적으로 안정한 z-phase가 지배적으로 석출되었으며, 100시간 시점에서는 입내 석출이 동반되면서 연신율이 다시 회복되었다.

#### [열처리1-4 | 11:25]

**냉간가공된 AISI 316L의 고용화 열처리 시간에 따른 회복 및 재결정이 저온침탄에 미치는 영향:** 김현진(한국생산기술연구원, 부산대학교), 김준호\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 스테인리스강, 열처리, 표면처리, 저온진공침탄

AISI 316L은 우수한 내식성을 바탕으로 기계, 발전설비, 화학플랜트 등 다양한 산업에서 핵심 소재로 활용되고 있으나, 상대적으로 낮은 항복 강도와 내구성으로 인해 냉간가공을 수행하거나 저온침탄과 같은 열화학 표면경화를 실시한다. 냉간가공에 의해 형성된 초미세립, 변형 유기 마르텐사이트 등의 결함은 원소의 확산 및 고용을 방해하여 열화학 표면경화 공정에서 문제점으로 작용한다. 특히 과도한 냉간가공이 적용된 경우, 고용화 열처리를 적용하여도 저온침탄 후 물성이 부족한 결과가 보고되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 냉간가공된 AISI 316L에 고용화열처리 시간의 변화를 주어 회복 및 재결정 정도를 확인하였다. 그 이후 저온침탄을 실시하여 경화층 형성과 물성의 변화를 조사하였다. EBSD(IPF map) 및 XRD를 통해 상 변화와 우선성장방위를 확인하였으며, 비커스 경도기와 광학현미경을 이용하여 표면경도와 경화층을 관찰하였다. 본 연구의 결과, 고용화 열처리 적용 후 변형 유기 마르텐사이트의 소멸과 XRD를 통해 우선성장방위의 변화가 확인되었다. 하지만 냉간가공에 의해 형성된 결함들은 고용화 열처리 10시간까지 완전히 해소되지 않아 저온침탄 후 낮은 탄소 고용도와 표면경도가 측정되었다. 고용화열처리 20시간 이후에는 모든 결함이 해소되었고 저온침탄 층의 높은 탄소고용도와 표면경도가 확인되었다. 저온침탄의 침입형 과고용으로 인해 발생하는 높은 압축응력은 재료 내 잔류결함을 회복시키는 역할을 하였고, 결정방위를 회전시키며 잔류응력을 해소하였다. 이를 통해 냉간가공으로 형성된 변형 조직 및 결함의 해소는 장시간의 고용화열처리가 요구되고 잔류된 결함은 저온침탄의 속도에 영향을 끼침을 확인하였다.

#### [열처리1-5 | 11:40]

**SOFC interconnect용 Nb 첨가 페라이트계 스테인리스강의 고온 cyclic 및 static 산화 거동:** 서성지, 김성준\*(포항공과대학교)

**Keywords:** Cyclic oxidation, Static oxidation, Niobium, Ferritic stainless steel, Solid oxide fuel cell

본 연구에서는 Nb가 첨가된 페라이트계 스테인리스강의 800 °C에서 고온 산화 거동을 조사하였다. Solid oxide fuel cell (SOFC) 구동 환경을 고려한 열사이클링의 영향을 규명하기 위해 cyclic 및 static 산화를 수행하였다. Cyclic 공정은 800 °C에서 25 시간 유지 후 1시간 동안 공기중에서 냉각하는 것을 1 cycle로 하여 총 4 회 반복 수행하였으며, static공정은 800 °C에서 100시간 동안 등온 유지 후 공냉하였다. 두 공정 모두 각 사이클에 따른 질량 변화 측정을 통해 oxidation rate coefficient를 얻었으며, 산화층 및 계면 미세조직은 SEM과 EPMA를 통해 관찰하였다. 산화층과 모재 부근의 화학적 상태변화를 통한 산화거동 규명을 위해 XPS 분석을 수행하였으며, 산화 조건에 따른 전기적 특성 변화를 함께 평가하였다. 그 결과, Nb는 산화막과 모재 계면에서 Nb-rich oxide와 모재 내 Laves 상의 형성을 촉진하였으며, 특히 cyclic산화 된 시편의 경우, 반복적인 열팽창 및 수축에 의해 계면 응력 상태가 변화되기 때문에 최종적인 Laves 상의 분포 및 성장 형태가 static 산화된 시편과 다른 경향을 나타내었다. 이러한 계면 미세조직 차이는 산화 조건에 따른 전기적 특성 변화와 밀접한 관련이 있을 것으로 예상된다.

#### [열처리1-6 | 11:55]

**이동 경계조건을 적용한 모터코어의 연속가열 해석:** 복현호\*(포스코)

**Keywords:** Continuous Heating, Induction Heating, Heat Transfer Analysis, Moving Boundary Condition, Motor Core Stack, Non-Oriented Electrical Steel

전기차용 구동모터의 제조공정에는 응력제거나 접착제 경화 등을 위해 열처리가 적용되는 경우가 많다. 모터의 우수한 자기적 특성을 보장하기 위해 모터코어 라미네이션을 적층 스택으로 결합하는 단계에서 잔류응력이 발생하는 용접이나 기계적 압입 체결(Interlocking) 대신 라미네이션 표면에 도포된 접착제로 체결하는 공법이 자주 채택되고 있다. 접착제가 열경화성 수지일 경우 타발 프레스금형 내부 혹은 프레스장치 외부에 별도로 설치된 유도코일(Inductor Coil)에 적층체를 연속적으로 통과시키는 방법으로 경화 개시온도까지 빠르고 경제적으로 가열할 수 있다. 고주파 가열은 표피효과(Skin Effect)로 인해 피가열체 내부의 가열은 외측 열원으로부터의 열전도에만 의존하게 되므로 재료의 열확산이 느리거나 형상이 복잡할 경우 균일한 가열이 어려워지는 단점이 있다. 규소(Si)가 다량 포함된 모터코어용 전기강판은 탄소강 대비 소재의 열전도율이 낮고 적층체 상태가 되면 절연코팅층의 영향으로 열확산이 추가적으로 느려지는 경향을 보인다. 형상적인 측면에서 회전자 코어(Rotor Core)와 같이 반경방향 열전도 경로 상에 영구자석 Slot으로 빈 공간이 있는 경우 외부가 과열되어 접착층이 탄화되거나 내부는 온도가 낮아 접착층의 경화도(Degree of Curing)가 불충분해지는 문제가 발생될 수 있다. 또한 온도불균일로 인한 과도한 열변형으로 Lamination이 뒤트리면 접착강도뿐만 아니라 형상품질(평면도, 원통도 등의 기하공차)에도 영향을 미칠 수도 있다. 이러한 영향을 최소화하기 위해 FEM 열전달 해석을 통한 영향인자의 정량적인 분석 및 가열공정의 최적화가 요구된다. 열전달 해석에 필요한 피가열체 표면 열원(Heat Source) 생성 방법으로 실제 가열수단과 동일한 기구인 전자기유도 와전류 해석(Eddy Current Analysis)을 고려해볼 수 있다. 그러나 열전달 매 해석시간단계(Time Step)마다 맥스웰 방정식(Maxwell's Equation)으로 표현되는 전자기장(Electromagnetic Field)의 계산이 수행되어야 한다. 전자기장이 펼쳐져 나갈 수 있도록 충분한 크기의 Air 영역을 해석모델에 포함시켜야 하고, 표면효과를 고려하기 위해 Air/피가열체 경계면 근처의 요소 크기(Mesh Size)를 매우 세밀하게 정의해야 하므로 계산점 또한 크게 증가한다. 연속가열과 같이 유도코일(Inductor Coil)과 피가열체가 축을 따라 상대운동을 할 경우 Air Mesh에 대한 각 구성품 Mesh들의 상대적 위치변화와 중첩도 처



리되어야 한다. 때문에 전체적인 계산 부담이 가중되어 가열공정 최적화와 같이 많은 Case의 해석을 수행하기에는 해석시간적 측면에서 불리한 점이 있다. 본 연구는 이와 같은 문제를 해결하기 위해 모터코어 표면에 임의의 속도로 이동할 수 있는 열속(Surface Heat Flux) 분포를 직접 적용하는 방법으로 와전류해석 생략과 해석 신뢰도 유지를 양립시키는 방법을 제시하고자 한다.

## 적층제조 및 분말 III

Room 3층 301, 4월 30일

### [적층9-1 | 09:00]

Elucidation of the Mechanisms of Enhanced Cryogenic Strength in Additively Manufactured 316L Stainless Steel: Chohyeon Lee, Won Hui Jo, Hyeong Jin Park(Kookmin Univ.), Haeum Park(Korea Institute of Materials Science, Korea Univ.), Hyun Joong Kim(Kongju National Univ.), Jaimyun Jung(Korea Institute of Materials Science), Jeong Min Park(Korea Institute of Materials Science, Korea Univ.), Soom-Jik Hong(Kongju National Univ.), Jae Bok Seol\*(Kookmin Univ.)

**Keywords:** Oxidation, Nitrogen, TRIP, TWIP, and Cryogenic

Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) is pivotal in aerospace and medical sectors for producing complex, high-precision parts. However, L-PBF efficiency strongly depends on maximizing the reusability of the residual feedstock. Since repeated high-temperature exposure alters feedstock properties, understanding these changes and their impact on final part performance is crucial. We highlight the property evolution of stainless steel 316L powder and the cryogenic (77 K) mechanical properties of printed samples. The powder was recovered, sieved, and reused up to 15 times without adding fresh powder. Characterization revealed that oxide particles in the reused powder became finer and diffused towards the surface as reuse cycles increased. Microstructural analysis of the final parts confirmed that these nanoscale oxides were uniformly dispersed within the deposited layers. Tensile testing demonstrated a remarkable increase in yield strength for reused powder parts compared to their fresh powder counterparts. This enhancement is attributed to the dispersed nanoscale oxides acting as effective obstacles to dislocation motion in the cryogenic environment. This study proposes utilizing powder degradation not as a cause for disposal, but as a design variable to induce oxide dispersion strengthening (ODS). This contributes to sustainable additive manufacturing technologies that simultaneously increase material yield and improve component performance.

### [적층9-2 | 09:15]

MSR용 고내부식성 Ni계 합금 설계를 위한 SMART 및 DED 기반 신속 소재 개발 및 입계 부식 제어 전략: 이태규\*, 정성훈, 이재훈, 이민제(국립한밭대학교)

**Keywords:** DED, SMART, MSR, Ni계 합금

용융염 원자로(Molten Salt Reactor, MSR)는 우수한 열효율과 고유의 안전성을 지닌 차세대 원자로로 주목받고 있다. 그러나 냉각재 및 연료 매질로 사용되는 염화물 용융염(Chloride Molten Salt)은 고온에서 극심한 부식 환경을 조성하므로, 원자로 시스템의 장기 건전성을 보장하기 위해서는 이에 견딜 수 있는 구조재 개발이 필수적이다. Ni계 합금은 뛰어난 고온 기계적 특성과 내부식성으로 인해 MSR 구조재의 핵심 후보군으로 연구되고 있으나, 최적의 내염화물 부식성을 달성하기 위한 다성분계 합금의 조성 최적화는 방대한 실험적 시간과 비용이 소모된다는 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하고 신속한 신소재 개발을 도모하기 위해, 합금 분말 제조 DED) 공정을 연계한 새로운 소재 개발 방법론을 제시한다. 먼저, 다성분계 합금 조성을 단기간에 구현할 수 있는 SMART 방식을 활용하여 DED 공정에 필요한 다양한 조성의 금속 분말을 효율적으로 제조하였다. 이를 바탕으로 DED 공정의 높은 합금화 자유도를 활용하여 여러 원소 비율을 갖는 Ni계 합금 프로토타입 시편들을 신속하게 조형하였다. 제조된 시편들은 고온의 염화물 용융염 환경에서 부식 시험을 거쳤으며, 각 합금 조성에 따른 단위 면적당 무게 변화량 및 부식 속도에 대한 정량적인 실험 데이터를 확보하였다. 특히, 본 연구에서는 합금의 결정립계(Grain boundary)에 탄화물(Carbide)을 의도적으로 석출 및 제어하여 염화물에 대한 내부식성을 향상시키는 핵심 아이디어를 적용하였다. 입계에 형성된 탄화물은 부식에 취약한 특정 합금 원소가 용융염 내로 선택적으로 용출되는 것을 억제하는 방벽 역할을 수행한다. 부식 시험 후 미세조직 분석을 통해 입계 탄화물의 생성 거동 및 분포 형태가 합금의 내염화물 부식 특성에 미치는 영향을 규명하고, 최적의 내부식성을 발현하는 조성 및 미세조직 요건을 도출하였다. 본 연구는 SMART 분말 제조 방식과 DED 공정을 통한 고속 시편 제조 기술을 결합하여 기존의 시행착오 기반 소재 개발 방식에서 벗어나 합금 개발 속도를 획기적으로 단축하였다. 또한, 입계 탄화물 제어라는 구체적인 미세조직적 설계 방향을 제시함으로써 MSR용 고성능 구조재를 효과적으로 개발할 수 있는 실험적 기반을 마련하였다. 도출된 고내부식성 Ni계 합금 소재는 향후 염화물 기반 차세대 원자로 시스템의 안정성 확보 및 수명 연장에 크게 기여할 것으로 기대된다.

### [적층9-3 | 09:30]

레이저 분말 베드 용융법으로 적층제조된 Fe-6.5Si 합금의 미세조직 및 자성 특성에 미치는 공정 변수의 영향: 윤지산(한국재료연구원, 국립부경대학교), 김연우(한국재료연구원), 박규현(한국재료연구원), 배재웅\*(국립부경대학교), 정재원(한국재료연구원), 박정민\*(한국재료연구원, 고려대학교)

**Keywords:** Fe-6.5Si 합금, 적층제조, 레이저 분말 베드 용융법, 미세조직, 자기적 특성

Fe-6.5Si 합금은 우수한 투자율과 낮은 철손을 나타내는 대표적인 연자성 합금으로, 고효율 전동기 및 변압기 코어용 소재로 주목받고 있다. 그러나 6.5 wt%에 이르는 높은 Si 함량은 소재에 취성을 유발하여 압연성 및 가공성을 저하시키며, 기존 압연 공정을 통한 2차원 코어용 강판 제조는 물론 3차원 복잡형상 코어 제작에도 한계를 초래한다. 최근 이러한 가공 한계를 극복하기 위하여 적층제조 공법, 특히 레이저 분말 베드 용융법(laser powder bed fusion, LPBF)을 Fe-Si 소재에 적용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 해당 공정은 금속 분말의 완전한 용융을 수반하므로 Fe-Si 합금의 Si 함량 증가에 대한 한계를 극복할 수 있으며, 복잡한 형

상의 3차원 부품 제조에 대한 자유도가 높아 형상 최적화를 통하여 경량화와 우수한 성능을 동시에 구현한 연자성 코어의 제조를 가능하게 한다. 특히 LPBF 공정에서는 층간 회전각과 입열량 변화에 따라 미세조직 형태와 결정학적 텍스처가 달라지며, 이는 자기적 특성에 직접적인 영향을 미친다. 기존 연구에서는 층간 회전각 또는 입열량과 같은 개별 공정 변수에 따른 미세조직 및 자기적 특성 변화를 보고한 바 있으나, 두 변수가 복합적으로 작용하는 공정-미세조직-자기적 특성 간 상관관계에 대한 체계적인 분석은 아직 부족한 실정이다. 따라서 고품성 연자성 코어의 제조를 위하여 층간 회전각과 입열량을 동시에 고려한 공정 제어 전략이 요구된다. 본 연구에서는 구형 Fe-6.5wt%Si 분말을 활용하여 층간 회전각 및 입열량을 달리한 LPBF 공정 조건에서 시편을 적층제조하였다. 제조된 시편들의 미세조직 형성 양상과 직류 및 교류 자기적 특성 변화를 체계적으로 분석하였으며, 공정 변수 조합에 따른 미세조직 형성과 자기적 특성 간의 상관관계를 제시하였다.

#### [적층9-4 | 09:45]

**Ti-6Al-4V 옥텟트러스 격자구조체의 미세조직 제어 및 압축 변형 안정성 연구:** 차다운, 박준영, 전찬혁, Muhammad Ishtiaq(경상국립대학교), 박민우(서울대학교), 안지혁(한국재료연구원), 김종형(국립부경대학교), 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, 적층제조로 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 a' 상, a 상, 그리고 b 상의 분율을 다양화하였으며, 압축시험을 통해 변형거동과 기계적 물성에 미치는 미세조직의 영향을 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 격자구조체 모두 탄성변형 후 조기파단이 억제됨을 확인하였다. 구체적으로, 열처리를 하지 않은 격자구조체는 스트럿의 조기파단으로 인한 응력-변형을 곡선 상의 급격한 응력감소가 일어난 반면 열처리한 격자구조체는 응력감소 기울기가 감소하여 압축 변형시 기계적 안정성이 향상되었음을 확인하였다. 본 연구를 통해 적층제조 기반 금속 격자구조체의 기계적 특성 향상을 위한 전략을 제시할 수 있을 것이라 기대한다.

#### [적층9-5 | 10:00]

**Directed energy deposition 공정으로 제조한 TiC 첨가된 316L 스테인리스강의 극저온 미세조직 및 기계적 특성 평가:** 한구미, Levin Sebastian Cahyaputra, 김진우(포항공과대학교), 김정기(경상국립대학교), 김형섭\*(포항공과대학교)

**Keywords:** Additive Manufacturing, Direct energy deposition, Stainless steel, TiC nanoparticles, Cryogenic temperature

적층제조된 316L 스테인리스강의 극저온에서 우수한 강도와 연신율을 동시에 달성하는 것은 여전히 도전적인 과제이며, 특히 세라믹 강화재 도입 시 그 난이도는 더욱 증가한다. 본 연구에서는 Directed Energy Deposition (DED) 공정을 적용하여 2 wt% TiC 나노입자를 첨가한 316L/TiC 복합재를 제조하였으며, 상온(298 K)과 극저온(77 K)에서의 인장 거동과 미세조직 간의 상관관계를 체계적으로 분석하였다. 316L/TiC의 경우, TiC 첨가로 인해 결정립 크기가 효과적으로 미세화되었고, 전위 밀도 또한 유의미하게 증가하였다. 그 결과, 316L/TiC 복합재는 상온(298 K) 및 극저온(77 K) 모두에서 316L 대비 더 높은 항복강도와 인장강도를 나타내었으며, 이러한 강도 향상에도 불구하고 우수한 연신율을 유지하였다. 극저온(77 K) 조건에서는 316L, 316L/TiC 모두 변형 유기 마르텐사이트 변태와 변형 쌍정이 동시에 활성화되어 뚜렷한 가공경화를 유발하였다. 또한, TiC 세라믹 강화재 첨가에도 불구하고 상온(298 K), 극저온(77 K) 모두 연성 파괴 특성을 유지하였다. 이러한 결과는 TiC 첨가를 통해 Directed Energy Deposition (DED) 공정으로 제조된 316L의 극저온 기계적 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 보여주며, 저온 구조용 금속-세라믹 복합재 설계를 위한 변형 메커니즘 기반의 유용한 지침을 제공한다.

#### [적층9-6 | 10:15]

**이종 분말 동시분사 레이저 직접 적층 공정을 통한 Al/Ni 경사기능재료의 설계 및 제조:** 조해주, 정종욱, 이주영, 이옥진\*(부산대학교)  
**Keywords:** Al alloy, Ni alloy, L-DED, FGMs

Ni계 초내열 합금은 우수한 고온강도와 내식성을 가지기 때문에 고온 구조 부품에 널리 사용되지만, 높은 밀도와 비용적 측면에서 한계가 있다. 반면, Al 합금은 낮은 밀도와 높은 열전도성의 특징을 가진다. 이러한 상이한 두 합금의 장점을 동시에 취하기 위해 Al/Ni 이종 접합에 대한 다수의 선행연구가 있었으나, 두 합금은 용점 및 열팽창계수에서 극심한 격차를 가지고 있어 용융접합이 어려우며 반응 중 생성되는 취성적인 금속간화합물로 크랙이 발생하는 문제가 있어 직접 접합이 매우 어려운 문제가 있었다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해, 이종 분말의 동시 분사가 가능한 레이저 직접 적층 공정(Laser directed energy deposition, L-DED)을 이용하여 Al10Si1Mg 와 Inconel 625 기반의 Al/Ni 경사기능재료(functionally graded materials, FGMs)를 제조하였다. FGMs는 이종 재료 사이에 물질 및 조성이 점진적으로 변화하는 경사 영역을 추가하여 재료의 급격한 조성 및 물성 변화를 완화시켜 계면의 안정성을 향상시킨 재료로, L-DED는 이종 금속 분말의 동시분사를 통해 유연한 조성 제어가 가능하여 경사 영역을 구현하기에 매우 적합하다고 판단된다. FGMs 제작에 앞서, Al/Ni의 혼합비를 단계적으로 변화시킨 단일 조성 적층재를 다양한 공정 변수로 제작하여 각 혼합비의 최적 레이저 공정변수를 도출하고, 적층 가능 혼합비 구간을 정의하였다. 적층 가능한 혼합비의 미세조직 및 기계적 물성을 분석하였으며, 해당 데이터를 기반으로 기계적 물성 경사 설계를 수행하였다. 또한, 기계적 물성 경사 설계, 화학조성 경사 설계 및 직접 접합 설계를 각각 L-DED로 제조하여 굽힘 거동을 비교하였다. 이를 통해 Al/Ni의 혼합비에 따른 공정변수-미세조직-기계적 물성의 상관관계를 규명하고, Al/Ni FGMs의 설계 전략을 제안하고자 한다.

**[적층9-7 | 10:30]**

High-Strength L-PBF Ti-6Al-4V via Mechanofusion-Based  $Y_2O_3$  Dispersion Strengthening: Sanghee Jeong, Sehun Kim, Bin Lee\*(Kyunghee University)

**Keywords:** Ti-6Al-4V, Mechanofusion, L-PBF,  $Y_2O_3$  dispersion strengthening, Mechanical properties

In this study, a scalable powder-processing strategy was developed to achieve uniform  $Y_2O_3$  dispersion in Ti-6Al-4V for laser powder bed fusion (L-PBF). Composite powders were prepared via mechanofusion dry-coating using high-energy shear and impact forces, resulting in a uniform  $Y_2O_3$  surface layer (~30 nm) at 0.3 wt% addition without degrading powder flowability. During mechanofusion, repeated compressive and shear stresses effectively deagglomerate  $Y_2O_3$  particles and promote their uniform adhesion onto Ti-6Al-4V powder surfaces, forming a stable coating layer. The sealed and water-cooled chamber further suppresses oxidation and contamination, ensuring reproducible powder quality. Correlative transmission electron microscopy (TEM) and atom probe tomography (APT) confirmed the formation of uniformly distributed spherical Y-O oxide nanoparticles with diameters of ~3 nm after L-PBF processing. These nanoscale oxides remained well dispersed within the Ti matrix, contributing to enhanced strengthening and improved thermal stability. The ultimate tensile strength increased from 995.2 to 1071.1 MPa (7.6%) with a moderate reduction in elongation from 16.0% to 14.8%. At elevated temperatures, strength improved from 847.1 to 906.8 MPa at 300 °C and from 855.2 to 907.3 MPa at 500 °C, while maintaining reasonable ductility. The resulting alloy exhibited tensile strengths among the highest reported for ODS Ti-6Al-4V systems. This superior performance is attributed to uniform  $Y_2O_3$  coating achieved through the mechanofusion (Nobilta-130) process, which promoted homogeneous nanoscale oxide dispersion during L-PBF and enabled effective dispersion strengthening throughout the matrix. These results demonstrate that mechanofusion-based powder processing provides a practical and scalable route for producing oxide-dispersion-strengthened Ti-6Al-4V alloys for high-performance additive manufacturing applications.

**[적층9-8 | 10:45]**

Binder jetting 적층 제조 공정으로 제조된 Modified 17-4PH 스테인리스강의 미세조직과 인장 및 충격 특성: 강민재, 황원구(인하대학교), 전호성(자이브솔루션즈), 이기안\*(인하대학교)

**Keywords:** Additive Manufacturing, binder jetting, 17-4PH, heat treatment, tensile properties, impact toughness

Binder jetting 적층 제조 공정은 금속 분말층 위에 바인더를 선택적으로 분사하여 성형체(green body)를 제조한 뒤, 탈지(debinding) 및 소결(sintering) 과정을 통해 치밀화하여 부품을 제작하는 기술이다. 본 공정은 용융 기반 적층 제조 공정들(laser powder bed fusion, direct energy deposition 등) 대비 공정 중 온도 구배로 인한 잔류응력 및 변형 위험이 낮고, 높은 생산성과 비용 효율성을 갖는 장점이 있다. 본 연구에서는 binder jetting 공정을 이용하여 17-4PH(SUS 630) 기반 스테인리스강의 프리폼과 소결체를 제조한 후 HIP 처리를 진행하여 시편을 준비하였다(이하 BJ\_H900). 이때 분말의 화학조성 중 Ni 함량을 기존 소재와 달리 조정하여 제조하였다. 17-4PH가 시효열처리를 필수로 하는 소재임을 고려하여 Ni 함량 증가를 통해 열처리 시 역변태 오스테나이트(reverted austenite) 형성을 유도함으로써 연신을 및 충격인성 향상을 도모하였다. 또한 동일한 H900 열처리를 적용한 17-4PH wrought 소재(이하 Wrought\_H900)와 미세조직 및 기계적 물성을 비교하여 상관관계를 규명하였다. BJ\_H900 시편의 상대밀도는 99.87%로 완전 소결체에 근접한 수준을 보였다. 미세조직은 마르텐사이트 기지를 기반으로  $\delta$ -ferrite 및 austenite가 형성되었으며, 이는 높은 소결 온도와 Ni 함량의 영향으로 판단된다. 경도는 BJ\_H900:  $394.3 \pm 9.7$  HV<sub>0.3</sub>, Wrought\_H900:  $435.6 \pm 5.3$  HV<sub>0.3</sub>으로 확인되었다. 인장강도는 BJ\_H900:  $1227.6 \pm 3.0$  MPa, Wrought\_H900:  $1324.5 \pm 8.2$  MPa였으며, 항복강도는 BJ\_H900:  $921.5 \pm 14.6$  MPa, Wrought\_H900:  $1013.0 \pm 18.6$  MPa로 BJ\_H900에서 상대적으로 감소하였다. 반면 연신율은 BJ\_H900:  $20.89 \pm 2.09\%$ , Wrought\_H900:  $9.8 \pm 0.52\%$ 로 BJ\_H900에서 2배 이상 높게 나타났으며, 이는 역변태 austenite의 TRIP 효과에 기인한 것으로 제시되었다. 충격특성 또한 BJ\_H900:  $15.7 \pm 1.6$  J, Wrought\_H900:  $0.75 \pm 0.2$  J로 BJ\_H900에서 현저하게 높은 값이 확인되었다. 상기 결과를 바탕으로 binder jetting 공정으로 제조된 17-4PH 스테인리스강의 변형 및 파괴 기구를 미세조직적 특징과 연계하여 고찰하고, 향후 금속 소재 제조 분야에서 binder jetting 공정 적용 가능성을 검토하였다.

**[적층9-9 | 11:00]**

Mechanical Behavior of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V: Experimental Observations: Amir Aghababaei(Isfahan University of Technology, POSTECH), Ali Maleki\*, Abbas Ghaei, Mohsen Badrossamay(Isfahan University of Technology), Eun Seong Kim, Hyoungh Seop Kim(POSTECH)

**Keywords:** Ti-6Al-4V, Selective laser melting, Mechanical behavior, Strain hardening, Adiabatic shear bands

This study presented quasi-static and high strain rate mechanical test results for Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting (SLM), and correlated the mechanical responses with as-built microstructural observations. Quasi-static tests established baseline behavior in which strain hardening dominated throughout deformation. In contrast, dynamic experiments exhibited a rate-dependent sequence: an initial transient stage of strain hardening was followed by progressive thermally-driven softening that eventually prevailed. This transition promoted the development of localized adiabatic shear bands (ASBs), which served as preferential sites for strain concentration. Microstructural examination showed that these localized zones nucleated microcracks that subsequently coalesced and propagated to macroscopic fracture. The results demonstrated that dynamic failure was governed by the competition between strain hardening and thermal softening, and that mitigating the initiation and growth of ASBs could delay premature dynamic failure. Dynamic stress-strain data and representative micrographs were used to illustrate these mechanisms and to discuss implications for the design and application of SLM Ti-6Al-4V components under severe, high-rate loading.

**[ENGE1-1 | 09:00] 초청강연**

Vapor-Deposited Perovskite Solar Cells: Jin-Wook Lee\*(Seoul National University)

**Keywords:** halide perovskite, vapor deposition, phase formation, crystal growth

In recent years, vacuum-based deposition of halide perovskites has attracted increasing attention as a promising route toward large-area, scalable, and reproducible fabrication of perovskite solar cells (PSCs). Despite these advantages, translating the high performance achieved in solution-processed PSCs to their vacuum-processed counterparts remains challenging, owing to fundamental differences in precursor states, processing environments, and crystallization kinetics. In this presentation, I will discuss our recent progress in phase formation and crystal growth engineering of vapor-deposited halide perovskites. We demonstrate vacuum-compatible strategies for forming wide-bandgap perovskite thin films ( $\text{FA}_{1-x}\text{Cs}_x\text{PbI}_{3-y}\text{Br}_y$  and  $\text{CsPbI}_3$ ) with high optoelectronic quality. Comprehensive in situ and ex situ analyses are employed to elucidate phase evolution and crystal growth behavior during vapor deposition processes. Based on these approaches, high-performance wide-bandgap PSCs are successfully demonstrated.

**[ENGE1-2 | 09:25] 초청강연**

Development of Sodium-ion Battery Cathodes for Sustainable Energy Storage: Se Young Kim\*(Korea Institute of Science and Technology, University of Science & Technology)

**Keywords:** Sodium ion Battery, Layered structure cathodes, Oxygen redox, Pair distribution Function

Low-cost and environmentally benign sodium-ion batteries (NIBs) employing earth-abundant transition metals such as Mn and Fe have emerged as promising alternatives to conventional Li-ion systems. Compared to Li-based positive electrodes like  $\text{LiFeO}_2$ , Na-based layered oxides exhibit superior electrochemical reversibility, highlighting their potential for achieving high energy density using sustainable and non-toxic materials. Yabuuchi et al. demonstrated the layered oxide  $\text{P2-Na}_{2/3}[\text{Fe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}]\text{O}_2$  as a high-performance positive electrode, delivering a reversible capacity of  $190 \text{ mAh g}^{-1}$  at room temperature, primarily associated with  $\text{Fe}^{3+/4+}$  redox reactions. Building upon these findings, recent studies have revealed that capacity enhancement in Na-ion layered transition metal oxides can be achieved by engaging both cationic and anionic redox processes. In this work, we explore the high-valent oxygen redox activity in the P2-type  $\text{Na}_{0.67-x}[\text{Fe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}]\text{O}_2$  (NMF) positive electrode and its Fe- and Cu-substituted derivatives. Particular attention is given to the structural evolution and redox mechanisms under electrochemical cycling, elucidated through combined electrochemical and spectroscopic analyses. Furthermore, we discuss how the oxygen redox mechanism in these materials contrasts with that of the P1-type layered  $\text{Na}_{2-x}\text{Mn}_3\text{O}_7$  system, which contains ordered Mn vacancies and exhibits fundamentally different redox dynamics. The insights obtained from this study provide a deeper understanding of oxygen redox chemistry in sodium-based layered oxides and offer design principles for developing high-capacity and sustainable positive electrode materials for next-generation sodium-ion batteries.

**[ENGE1-3 | 09:50] 초청강연**

차세대 페로브스카이트 태양전지 및 LED의 광분석 및 설계: 조창순\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 페로브스카이트, 태양전지, LED, 레이저, 분광분석, 광학모델링

금속-할라이드 페로브스카이트는 태양전지와 LED를 아우르는 차세대 광전자소자로서 급격한 성능 향상을 보여왔다. 본 발표에서는 페로브스카이트 광전자소자의 성능을 결정하는 전하 수송과 광자 거동의 물리를 규명하고, 이를 기반으로 한 소자 설계 전략을 제시한다. 첫째, 4차원(x, y, z, t) 전하 추적 분광법을 통해 다결정 박막 내 전하 확산의 이방성 및 공간적 불균일성을 정량화하고, 기존 분광학적 확산계수와 실제 소자 성능 간의 불일치를 해소하였다. 둘째, 광자 재활용(photon recycling) 효과를 체계적으로 정립하여 페로브스카이트 LED의 광추출 효율을 기존 고전적 한계를 넘어 향상시킬 수 있음을 보였다. 마지막으로, “효율적인 태양전지는 효율적인 LED여야 한다”는 관점에서 태양전지의 전계발광 특성을 분석하고, 계면에서의 복사 손실을 억제함으로써 광전변환 효율을 향상시키는 설계 원리를 제안한다. 본 연구는 페로브스카이트 광전자소자의 광물리 이해를 심화시키고, 태양전지와 LED의 통합적 설계 패러다임을 제시한다.

**[ENGE2-1 | 10:25] 초청강연**

Operando TEM investigation of polar domain dynamics in sliding ferroelectrics: Hyobin Yoo\*(Seoul National University)

**Keywords:** Operando TEM, sliding ferroelectrics, 2d materials

Twisted interfaces between two-dimensional (2D) van der Waals (vdW) materials enable control of structural symmetry and functionality at the atomic scale. Varying the stacking angle produces moiré superlattices and lattice reconstruction, where interlayer registry competes with intralayer strain to form ordered domains with emergent electronic, optical, or ferroic properties. This talk will show how stacking configurations and reconstruction govern domain formation and functionality, examined by electron diffraction contrast in transmission electron microscopy (TEM). By integrating TEM with semiconductor device fabrication, we perform operando

measurements of domain dynamics in working devices, directly linking local symmetry breaking to macroscopic responses such as ferroelectric switching in twisted bilayer TMDs. Extending to multilayers introduces additional interfaces and symmetry degrees of freedom, yielding complex tessellations with distinctive structural and functional characteristics. Understanding these reconstructions is key to controlling emergent phenomena in twisted vdW materials.

#### [ENGE2-2 | 10:50] 초청강연

Scalable Electronics from Solution-Processed Low-Dimensional Materials: Dongjoon Rhee\*(Kookmin Univ.)

**Keywords:** 저차원소재, 반도체 소자, 메모리 소자

Low-dimensional nanomaterials, such as one-dimensional (1D) carbon nanotubes (CNTs) and two-dimensional (2D) transition metal dichalcogenides (TMDCs), have attracted significant attention for next-generation electronic and optoelectronic devices. For practical applications, these materials must be produced at wafer-scale areas in the form of continuous films. Chemical vapor deposition (CVD) is the most commonly used method for large-area synthesis of low-dimensional materials; however, the high process temperatures and challenges in optimizing reaction conditions limit its widespread applicability. As an alternative strategy, solution-based processing has been actively explored due to its simplicity and cost-effectiveness. Despite the advantages in processing, solution-processed low-dimensional material films have long been considered unsuitable for device applications due to their electronic properties, which are significantly inferior to those produced by CVD. Specifically, the limited gate tunability of these nanomaterial thin-film assembly and large junction resistances arising from poor stacking morphology have hindered the production of high-quality films suitable for electronic and optoelectronic devices. In this seminar, I will present my research progress on advancing solution-processed materials and demonstrate how these advancements have enabled the development of scalable electronic and optoelectronic devices, such as field-effect transistors, photodetectors, and memory devices.

#### [ENGE3-1 | 11:25] 초청강연

Enhanced Triboelectric Nanogenerator via Polarization and Discharge Technologies: Jihye Kim\*(Ajou University)

**Keywords:** Triboelectric Nanogenerator, Energy harvesting, Polarization, Discharge

Triboelectric nanogenerators (TENGs) have emerged as a highly promising technology for harvesting mechanical energy and converting it into electricity across a wide range of environmental conditions. However, their practical deployment remains limited by two major challenges: the need for substantial enhancement of power output and the assurance of long-term operational stability. This presentation introduces an integrated strategy to address these challenges through the combined application of material innovation and structural engineering. First, a materials-driven approach is employed to intensify internal polarization and enhance charge induction by incorporating high-permittivity  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  particles into various polymer matrices. This strategy achieves up to a threefold increase in polarization compared to conventional polymers, leading to significant improvements in both output voltage and current density. Notably, the enhancement demonstrates broad applicability and is largely independent of the specific polymer matrix used. In parallel with material optimization, a structural design based on spark-discharge mechanisms is introduced to further amplify energy output. A micro-patterned aluminum wool architecture enables the development of a high-performance TENG capable of directly powering a Crookes tube and generating plasma under vacuum conditions. These results highlight the potential of TENGs for high-voltage applications in extreme environments, including aerospace, defense, and remote field operations. Overall, this multifaceted approach, which integrates advanced dielectric engineering with functional device architecture, provides a viable pathway for overcoming the intrinsic limitations of TENGs and accelerating their translation into practical next-generation energy harvesting technologies.

#### [ENGE3-2 | 11:50] 초청강연

Ion-Motion-Driven Memristors: Deterministic and Stochastic Switching for Emerging Computing Applications: Jung Ho Yoon\*(Sungkyunkwan Univ.)

**Keywords:** Memristor, Emerging computing, Neuromorphic computing, probabilistic computing

Ion-motion-mediated memristors provide a unique physical platform in which the same underlying ionic dynamics can be engineered toward two seemingly opposite goals: deterministic, repeatable conductance modulation for neuromorphic computing, and stochastic, intrinsically unpredictable switching for probabilistic computing and security-oriented applications. This talk surveys emerging computing paradigms enabled by ion motion and then delineates deterministic versus stochastic switching as two regimes defined by the controllability of ion motion and filamentary evolution. First, we present an ion-motion control strategy for reliable nonvolatile memristors using a Ru active electrode and a  $\text{SiO}_2$  nanorod matrix. By reducing the activation barrier for Ru ion diffusion and stabilizing redox reactions, precise tuning of Ru ion dynamics yields electroforming-free operation, low-power switching, highly linear conductance modulation, and inherent on-state nonlinearity. Mechanistically, the nanorod architecture promotes a sparse nanocluster-based conduction path, shifting transport toward Fowler-Nordheim tunneling and thereby suppressing sneak currents. We further discuss crossbar-level implications, including selector-less scalability and a  $16 \times 16$  array demonstration with multi-bit uniformity, supported by an integrated spiking neural network simulator that accounts for line resistance and sneak-current effects. Second, we shift to ion-motion-mediated volatile threshold-switching memristors as physical entropy sources. Using a porous nanorod oxide layer to enhance

cation pathways and tuning the effective Ag-ion supply, we obtain rapid, device-centric digital and analog random outputs without post-processing. To uncover the origin of stochasticity, we directly visualize multi-filament dynamics via scanning thermal microscopy and corroborate the coupled electrothermal mechanism with simulations, clarifying how electromigration, Joule heating, and surface-energy-driven filament instability shape switching statistics. Finally, we highlight system-level implementations, including a bimodal true random number generator and a probabilistic computing platform (p-bit) enabled by controllable stochastic behaviors.



## 차세대 에너지재료 심포지엄

Room 3층 한라A, 4월 30일

### [차세대1-1 | 09:00] 초청강연

Interfacial Chemistry-Governed Reaction Dynamics and Microstructural Evolution in All-Solid-State Batteries: Sung-Kyun Jung\*(Seoul National University)

**Keywords:** All-Solid-State Batteries, Solid Electrolyte, Interface

A thorough understanding of battery systems requires analysis across multiple length scales from the atomic to the macroscopic level to capture the intricate interactions governing performance. In all-solid-state batteries (ASSBs), however, such investigations are particularly difficult due to the complex microstructural changes that occur, including pore formation, contact loss driven by cathode volume changes, interfacial chemical degradation, and their coupled effects. In this work, we examine how interfacial chemical degradation at the cathode/solid electrolyte boundary influences both particle-level reactions and microstructural evolution within sulfide-based composite cathodes. To elucidate it, we employ a model system with a non-decomposable coating layer that can selectively modify interfacial chemistry. Introducing lithium difluorophosphate (LiDFP) to suppress chemical degradation, we find that degradation suppression improves particle reaction uniformity and leads to more homogeneous mechanical degradation, though at the expense of increased pore generation and tortuosity. In contrast, unmitigated chemical degradation results in pronounced reaction heterogeneity and uneven mechanical degradation but yields fewer pores and lower tortuosity. These results extend conventional descriptions of mechanical degradation, typically framed in terms of contact loss and tortuosity, and highlight the essential role of interfacial coatings in sustaining lithium transport by preserving contact with cathode surfaces. Overall, this study provides fresh insights into the coupled chemo-mechanical degradation processes and the function of coating materials, offering a foundation for the multi-scale understanding necessary to advance ASSB design.

### [차세대1-2 | 09:20] 초청강연

Calcination process design for layered oxide cathodes toward advanced lithium ion batteries: Hyeokjun Park\*(Korea University)

**Keywords:** lithium ion batteries, cathode, calcination, heterogeneity, advanced characterizations

Lithium transition metal layered oxide cathodes play a critical role on determining overall performance and price of lithium ion batteries, some of which with nickel-rich or cobalt-less compositions have garnered particular interests as the most promising high-energy and sustainable cathode materials. However, those cathode materials commonly suffer from rapid capacity decay along with structural and morphological degradation. Such chemo-mechanical failures are triggered and aggravated by various structural defects, including internal void spaces, surface reconstruction layers, and intragranular nanopores, typical features of the conventionally synthesized layered oxide materials. However, it still remains elusive how these defects are formed during synthesis though all of these layered oxide type cathodes are now produced by high-temperature solid-state calcination in the production line. A fundamental understanding of the general defect formations is thus indispensable to clarify how the synthesis process induces the formation of intrinsic defects from the precursor to the final product stage and how these defects affect the electrochemical degradation at the primary- and secondary-particle levels. Critical questions that require in-depth study include how the spatially inhomogeneous solid-state reaction begins at the interface of reacting precursors, propagates during the synthesis, and triggers the generation of defects. In this presentation, I will show the hidden synthetic mechanism of layered oxide materials using a combination of high-end and multi-length-scale analysis methods. The kinetic interplay in synthesis of lithium layered oxide and its implications will be discussed in detail. Universal synthesis principle through comprehensive studies from conventional to high-nickel and cobalt-free layered oxide cathodes will be also discussed. Based on our mechanistic understanding, I propose a redesign of solid-state synthesis pathway to achieve structurally integrated layered oxide cathodes.

### [차세대1-3 | 09:40] 초청강연

무음극 전고체전지 다공성 전극에서 리튬 금속의 creep 흐름 분석: Se Hwan Park\*(Kookmin Univ.)

**Keywords:** 전고체전지, 리튬금속, creep

무음극 전고체전지(ASSBs)에서는 Ag-C 보호층과 같은 다공성 구조를 활용하여 치밀하고 균일한 리튬 전착을 유도해왔다. 액체 전해질 시스템에서는 리튬 이온이 다공성 구조 내부로 전해질을 통해 직접 전달되어 환원될 수 있는 반면, 전고체전지에서는 고체 전해질의 비가동성 특성으로 인해 구조 내부에서의 직접적인 리튬 이온 전달 및 금속 리튬으로의 환원이 제한된다. 따라서 다공성 구조 내부로의 리튬 이동에는 리튬 금속의 creep 거동이 핵심 메커니즘으로 작용한다. 본 발표에서는 리튬 금속 creep의 주요 메커니즘과 이를 결정하는 인자들을 논의하고, 이러한 메커니즘에 대한 이해를 바탕으로 가역적이고 안정적인 3차원 다공성 음극을 개발한 연구를 소개하고자 한다.

**[자세대 1-4 | 10:00] 초청강연**Towards energy-efficient and stable blue and near-infrared OLEDs: Hwan-Hee Cho\*(Yonsei Univ.)**Keywords:** Blue, near-infrared, OLED

In this talk, recent advances that can boost organic light-emitting diode (OLED) performance will be presented. First, hyperfluorescence has been proposed as a promising approach for next-generation organic light-emitting diodes (OLEDs), offering the potential to achieve high efficiency, stability, brightness, and color purity in OLED displays. In the recent study, nearly 100% internal quantum efficiency was achieved in a two-component matrix-free hyperfluorescence with deep, pure-blue emission for the first time by combining efficient nondoped TADF materials with ultranarrow deep-blue emitters, covalently encapsulated to suppress Dexter transfer. This result is a significant step towards substantially improved blue OLED performance, potentially resolving or minimizing burn-in in OLED displays. Second, the development of luminescent organic radicals has led to excellent spin and optical properties for efficient near-infrared (NIR) emission. Recent research results on high-performance doublet fluorescent NIR OLEDs that exploit energy-transfer design in nonradical host-radical guest systems will be presented. Highly efficient NIR emission beyond 800 nm based on doublet fluorescence is demonstrated by reversible triplet-doublet energy transfer achieved by energy resonance of host triplets and radical doublets. As the doublet energy level of a tris(2, 4, 6-trichlorophenyl)methyl (TTM)-based radical emitter is energy-matched to the triplet state of an anthracene-based nonradical host, host triplet excitons are efficiently harvested by reversible triplet-doublet energy transfer. The new energy-transfer design boosts performance in radical-based OLEDs and has broad implications for reducing nonradiative losses in devices beyond light-emitting applications, including NIR light.

**[자세대 2-1 | 10:30] 초청강연**머신러닝 기반 촉매소재 개발 가속화: 김동훈\*(한국과학기술원)**Keywords:** 기계학습 기반 촉매 소재 개발 가속화

전통적인 에디슨이안(Edisonian) 방식의 소재 개발은 매우 느리고 비용이 많이 드는 과정으로, 하나의 소재가 발견에서 상용화에 이르기까지 20년 이상의 시간과 수십억 달러의 비용이 소요되는 경우가 많다. 이에 반해 데이터 과학과 기계학습(ML)은 이러한 과정을 기하급수적으로 가속할 수 있는 잠재력을 지니고 있으며, 지난 10여 년간 재료과학 분야에서 큰 주목을 받아왔다. 본 강연은 기계학습을 활용한 촉매 개발 가속화 사례를 두 개의 장으로 나누어 소개한다. 첫 번째 장에서는 그래프 신경망(Graph Neural Networks)을 활용하여 새로운 촉매를 신속하게 발굴하는 방법을 다루며, 특히 수소에너지 관련 촉매 (수전해, 연료전지, 암모니아 분해)를 사례로 설명한다. 또한 기존 방법으로는 접근이 어려웠던 전기화학 환경에서 실제 크기 나노입자의 안정성 문제를 기계학습 기반으로 분석한 연구 결과를 소개한다. 두 번째 장에서는 베이지안 능동학습(Bayesian active learning)과 같은 기계학습 최적화 기법을 기반으로 한 자율 소재 합성 전략을 다룬다.

**[자세대 2-2 | 10:50] 초청강연**In Silico Analysis of Surface Reactions on Energy Materials: Soonho Kwon\*(POSTECH)**Keywords:** DFT, CO<sub>2</sub> conversion, IR spectrum

Intensive research efforts have recently focused on CO<sub>2</sub> conversion toward value-added chemicals and fuels. However, in CO<sub>2</sub> reduction, the complexity of reaction networks and the dynamic microenvironment near catalyst surfaces make it challenging to identify what truly occurs at the atomic scale. Although advanced spectroscopic techniques have been widely employed to probe reaction intermediates, interpreting the often convoluted and overlapping signals remains a significant challenge. In this talk, I will discuss how theoretical approaches can assist in this effort. In particular, I will present how first-principles calculations enable interpretation of operando IR spectra during photocatalytic CO<sub>2</sub> conversion and how ab initio molecular dynamics provides insight into spectral features arising from solid-liquid interfaces. Through direct comparison between theory and experiment, I will show how a deeper understanding of the system can be achieved and how diverse physicochemical factors can be systematically examined and validated using theory.

**[자세대 2-3 | 11:10] 초청강연**Low-Iridium Based Electrocatalysts and Electrodes for High-Performance PEMWE: HyukSu Han\*(Hanyang Univ.)**Keywords:**

Polymer electrolyte membrane (PEM) water electrolysis is one of the key technologies converting renewable energy into highly pure green hydrogen, which is an ecofriendly high-value chemical, due to fast operational response and large current density. In PEM water electrolyzer (PEMWE), iridium (Ir) based oxides such as IrO<sub>2</sub> are being widely used as electrocatalysts at anode to promote the sluggish oxygen evolution reaction (OER). Unfortunately, scarcity of Ir, coupled with the rapidly increasing demand, raises serious concerns on minimizing Ir usage at the anode to realize practical use of PEMWE. Here, we present some promising catalyst design strategies for effectively lowering Ir contents in anode catalyst layers while maintaining high performance of PEMWE. Specifically, results for developing low-Ir based porous transport electrode will be presented in more details. In addition, strategies for designing a supported-electrocatalytic compound will be briefly discussed with recently achieved outcomes.

**[차세대2-4 | 11:30] 초청강연**

Advanced Electrochemical Systems for Environmental Remediation and Green Chemical Synthesis: Jeonghoon Lim\*(Chungnam National Univ.)

*Keywords:* electrochemical remediation, nitrate reduction, hydrogen, hydrogen peroxide, CO<sub>2</sub> sorbent regeneration

My research focuses on the development of sustainable electrochemical systems through advances in materials science, electrochemical engineering, and product analysis. This includes designing and synthesizing nanomaterials, employing advanced characterization techniques, and developing efficient mechanical system designs. Key applications involve oxygen reduction reaction(ORR) electrocatalysts for fuel cells and hydrogen peroxide production, nitrogen electrochemistry such as nitrate reduction for water purification and ammonia synthesis, alkaline sorbent regeneration for CO<sub>2</sub> capture, and bipolar membrane electrolyzers/electrodialysis. Moving forward, I aim to advance technologies such as scalable electrolyzer design to enable ammonia production and seawater splitting for hydrogen generation. Additionally, I plan to expand research on in-situ gas/ion product analysis for understanding reaction mechanisms. These efforts will pave the way for more sustainable solutions to energy, water, and environmental challenges, contributing to global sustainability goals in renewable energy and chemical production.

**[차세대2-5 | 11:50] 초청강연**

Surface Engineering: Controlling Surface Enrichment of Cations in Complex Oxides towards Carbon-Neutral Society: Jun Kyu Kim\*(Ajou Univ.)

*Keywords:* Heterogeneous catalysis, Environmental and energy materials, segregation, ex-solution, hydrogen energy

Surface enrichment of certain cations in complex oxides system (e.g., segregation, ex-solution) critically influences the activity and durability of various electrochemical and chemical reactions. However, their fundamental origins and control strategies remain incompletely understood. In this work, we systematically elucidate the thermodynamic driving forces, mechanisms, and material design principles governing surface cation enrichment, and demonstrate their implications for energy and environmental applications. Specifically, we show that (i) lattice strain engineering (tensile vs. compressive) and B-site doping of perovskites effectively suppress Ba surface segregation in Ba-based solid oxide fuel cell (SOFC) cathodes while enhancing oxygen reduction reaction (ORR) activity; (ii) integrated particle ex-solution and phosphorization yields metal phosphide nanoparticles that significantly improve hydrogen evolution reaction (HER) kinetics. Overall, these studies demonstrate that thermodynamics-guided surface and bulk engineering of complex oxides provide a valuable framework for designing high-performance materials for chemical and electrochemical devices, offering a viable materials pathway toward a carbon-neutral society.

## 미래 모빌리티 경량금속 소재 데이터 플랫폼 심포지엄

Room 2층 202A, 4월 30일

**[모빌-1-1 | 09:00] 초청강연****경량금속 소재 데이터 허브 구축: 어광준\***(한국재료연구원)**Keywords:** 경량금속, 알루미늄, 인공지능, 데이터, 소재허브

본 연구는 미래 모빌리티의 에너지 효율과 안전성을 결정짓는 핵심 요소인 고강도 경량 비철 금속소재를 인공지능과 데이터 기반으로 개발하고, 이를 위한 소재 데이터 HUB 구축 및 연구 프로세스 공유 체계 마련을 최종 목표로 진행 중이다. 기존의 시행착오 중심적인 소재 개발 방식을 탈피하기 위해, 거대언어모델(LLM)을 활용한 문헌데이터 처리기술과 능동학습 기반의 소재 설계 방법론을 도입하고, 이를 통해 알루미늄, 마그네슘, 타이타늄 등 고강도 경량 합금에 대한 최적의 합성안을 도출하고, 실험실 규모를 넘어선 준양산 수준의 공정 설계 및 최적화 기법을 개발할 계획이다. 1단계에서는 AI 모델 확립과 개발 합금의 공정 검증 및 DB 구축에 집중하였으며, 2단계에서는 데이터 기반 물성 결정인자 도출을 통해 합금계를 확장하고 준양산 규모의 제작과 성능 검증을 수행하고자 한다. 이러한 인공지능 및 데이터 기반 소재 개발 연구는 전주기 데이터 체계 구축을 통해 소재 산업의 디지털 전환을 선도하고, 차세대 모빌리티 구조용 소재의 국산화 및 기술 경쟁력 확보에 기여할 것으로 기대된다.

**[모빌-1-2 | 09:20] 초청강연****문헌 기반 알루미늄 합금 미세조직 이미지의 자동 정제 및 열역학 제약 세그멘테이션을 통한 정량 분석: 진준현\*, 이근효, 이정훈, 김문조, 김동웅**(한국생산기술연구원)**Keywords:** 알루미늄 합금, 인공지능, 세그멘테이션, 열역학, 미세조직

최근 소재 데이터 플랫폼 구축을 위한 미세조직 이미지의 대규모 확보 필요성이 증가하고 있으나, 문헌에 포함된 미세조직 이미지는 스케일바, 상 라벨, 화살표 및 텍스트 오버레이 등 다양한 비구조적 노이즈를 포함하고 있어 직접적인 정량 분석에 한계가 있다. 또한 기존 딥러닝 기반 세그멘테이션은 합금 조성 및 열처리 조건과 무관하게 모든 상을 동등하게 예측하는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 문헌 기반 알루미늄 합금 미세조직 이미지로부터 정량 정보를 신뢰성 있게 추출하기 위해, 오버레이 자동 탐지 및 제거 모델을 통한 이미지 정제 단계와 열역학 계산 결과를 활용한 상 존재 가능성 예측 모델을 결합한 물리 제약 기반 세그멘테이션 프레임워크를 제안한다. 합금 조성으로부터 열역학 기반 상 안정성 예측을 수행하고, 해당 상 정보만을 세그멘테이션의 클래스 제약 조건으로 활용함으로써 물리적으로 타당한 상 분류를 유도하였다. 정제된 이미지와 제약 기반 세그멘테이션 결과를 통해 상 분율을 자동 산출하였다. 제안 프레임워크는 기존 범용 세그멘테이션 대비 물리적으로 불가능한 상 예측을 감소시키고, 문헌 이미지 기반 정량 지표의 재현성을 향상시켰다. 본 연구는 문헌 데이터의 자동 정제와 물리 기반 제약을 결합한 미세조직 정량화 접근으로, 향후 경량금속 소재 데이터 플랫폼 구축에 활용 가능한 자동 분석 체계로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

**[모빌-1-3 | 09:40] 초청강연****APT 기반 미세 석출물 3D 원자수준 정량분석과 강화 메커니즘 규명: 김세호\*, 이원형, 노이준, 조모현, 박규민**(고려대학교)**Keywords:** 첨단분석, 알루미늄 합금, Atom probe, cluster analysis

AI 합금의 기계적 특성은 나노미터 크기의 미세 석출물의 크기·밀도·조성 및 계면 특성에 의해 좌우된다. 특히 석출물 내 조성 불균일성과 모재/석출물 계면의 화학적 구배는 전위 이동을 제어하여 항복강도 및 가공경화 거동에 직접적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 Atom Probe Tomography(APT)를 이용하여 AI 기반 합금 내 나노 석출물의 3차원 원자 분포를 정량적으로 분석하고, 석출상 메커니즘을 열역학, 미세조직 관점에서 규명하였다. APT 재구성을 통해 석출물의 크기 분포, number density, 조성 편차 및 계면 화학적 구배를 정량화하였으며, cluster 분석 및 등농도면(isoconcentration surface) 기반의 통계 처리로 석출 거동을 평가하였다. 더 나아가 APT로 획득한 국부 조성 데이터를 기반으로 모재/석출물 및 계면 영역의 혼합 Gibbs 자유에너지를 계산하여, 조성 변동에 따른 열역학적 안정성 및 상분리 구동력을 정량적으로 비교분석하여, 석출물 내부의 조성 구배와 계면 segregation이 유요 화학적 구동력을 변화시키며, 상호작용의 에너지 장벽을 조절함을 확인하였다. 이는 향후 경량 고강도 AI 합금에서 석출물 조성/계면 설계를 통한 강화 전략 수립에 핵심적인 정량 지표와 방법론을 제공한다.

**[모빌-1-4 | 10:00] 초청강연****소재 데이터 고속 생성을 위한 미니어처 인장 시험법: 정혜지, 신선호, 박윤지, 정다운, 심효경\***(국민대학교)**Keywords:** 소재 데이터, 알루미늄 합금, 미니어처 인장

최근 데이터 기반 소재 설계 및 AI 모델 개발이 가속화됨에 따라, 신뢰성 있는 소재 물성 데이터의 대량 확보가 핵심 과제로 부상하고 있다. 그러나 표준 규격 시편을 이용한 인장 시험은 시편이 많이 소요되고, 시편의 수량이 제한되어, AI 학습에 필요한 빅데이터 구축에 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 시편을 소형화한 미니어처 인장 평가 방안을 제안하고, 데이터 고속 생성을 위한 체계적인 방법론을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 알루미늄 합금을 대상으로 표준 인장 시편과 다양한 스케일의 미니어처 시편을 제작하여 기계적 물성을 비교 분석하였다. 시편 소형화에 따른 치수 효과를 정밀하게 보정하기 위해 유한요소해석 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 통해 표준 시편과의 상관관계를 정밀할 수 있는 최적의 보정 계수를 도출하였다. 실험 및 해석 결과, 미니어처 시편의 응력-변형률 곡선은 보정 계수 적용 시 표준 시편과 매우 높은 상관관계를 나타냈다. 특히, 도출된 보정 계수를 적

용했을 때 항복 강도 및 인장 강도의 오차 범위를 5% 이내로 제어할 수 있음을 확인하여 시험법의 신뢰성을 검증하였다. 또한, 이를 자동화된 시험 장악 시스템과 연계할 경우, 기존 표준 시험 대비 단위 시간당 데이터 생성 효율을 획기적으로 향상시킬 수 있음을 입증하였다. 본 연구에서 확립된 미니어처 인장 시험법은 미세 조직별 국부 물성 평가뿐만 아니라, 향후 소재 성분 및 공정 조합에 따른 대량의 물성 데이터베이스를 신속하게 구축하는 데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

#### [모빌2-1 | 10:30] 초청강연

**Al-Si 고유동성 합금 설계 및 부식성 평가:** 이병덕\*, 백의현, 이찬기(고등기술연구원)

**Keywords:** 알루미늄 합금, 부식 저항성, 갈바닉 부식, 염수분무 시험

주조용 알루미늄 합금은 가볍고 주조성이 우수하여 자동차 부품, 항공우주 부품 등 다양한 산업 분야에서 사용되는 합금으로, 주로 알루미늄에 실리콘(Si), 구리(Cu), 마그네슘(Mg) 등을 첨가하여 내열성, 내마모성, 강도 등을 향상시킨 소재입니다. 특히 실리콘을 첨가한 Al-Si 합금은 주조성이 뛰어나 엔진 부품 등에 많이 쓰이고, 구리와 마그네슘은 강도와 내식성을 더 향상시킬 수 있습니다. 본 연구에서는 우수한 내부식성과 유동성을 가지는 Al-Si계(< 12.6% Si) 합금의 주조 조직 제어를 목표로 하였다. 특히, 알루미늄 합금에서 치명적인 단점인 거대한 초정 Si의 전위차 부식을 지연시키기 위해 3원계 및 4원계 합금을 미세하게 성분조정 하였다. 전기화학적 분극 실험(Potentiodynamic Polarization) 및 염수분무시험(Salt Spray Test)을 통해 부식 거동을 분석한 결과, 개선된 합금은 미세화된 공정 조직과 구형의 Si 입자로 인해 갈바닉 부식(Galvanic Corrosion)이 현저히 감소하였다. 특히, 치밀한 산화피막 형성을 통해 국부 부식(Pitting)에 대한 저항성이 기존 ALDC12 합금 대비 약 40% 이상 향상됨을 확인하였다. 본 연구 결과는 해양 및 자동차 부품으로 사용되는 고내식성 알루미늄 주조 합금 개발에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### [모빌2-2 | 10:50] 초청강연

**경량금속 소재 열간성형 공정 데이터 확보 방안:** 정영길\*, 김세훈, 신재혁, 김진평, 권교민, 김동규(한국자동차연구원)

**Keywords:** 경량금속, 소재 데이터, 인공지능, 열간성형 공정

경량금속 소재는 미래 모빌리티와 항공우주 등 국가 주력산업의 공급망을 활성화하는 핵심 요소이다. 또한 국가 혁신성장에 지속적으로 기여할 수 있는 전략적 안정화 품목으로서, 지속적인 기술개발이 필요하다. 최근 인공지능 기술이 빠르게 발전함에 따라, 이를 활용한 국가전략기술 초격차 확보와 미래 공급망 이슈 대응 역량을 강화하는 것이 중요해졌다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 경량금속 소재 개발을 최적화하고 개발 속도를 가속할 수 있는 새로운 제조 공정 인프라 구축과 체계적인 소재 데이터 확보가 반드시 뒷받침되어야 한다. 이에 본 연구그룹에서는 고신뢰성 데이터를 생산하기 위한 자율 주조 및 고속/고압 압출 플랫폼을 기획하고 구축중에 있으며, 이를 통해 미래 경량금속 소재 개발 가속화를 지원하고자 한다. 경량금속 소재 데이터는 크게 메타데이터-조성-공정-물성으로 구분할 수 있다. 이 중 공정 데이터는 조성이나 물성처럼 단순 평가·분석만으로 확보되기 어려우며, 공정 조건 최적화를 위한 수많은 시행착오와 외부 유입 변수(설비 편차, 온도·속도 제어 오차, 마찰·열전달 조건 등)의 영향을 함께 고려해야 한다. 따라서 다양한 변수들을 체계적으로 검토하고, 신뢰성 있는 데이터로 축적하기 위한 전략이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 변수 영향을 가능한 최소화하고, 객관적이며 고신뢰성의 열간성형 공정 데이터를 확보하기 위해 전산모사와 고온압축 실험을 병행하였다. 이를 바탕으로 열간성형맵(Hot Working/Processing Map)을 구축하고, 두 방법의 결과를 비교·분석하여 공정 데이터의 신뢰성을 검증하였다. 나아가 확보된 열간성형 공정 데이터가 인공지능 기반 공정 최적화를 비롯해 다양한 분야에서 어떻게 활용될 수 있는지에 대해서도 고찰하고자 한다.

#### [모빌2-3 | 11:10] 초청강연

**고강도 알루미늄 합금의 기계적 특성 향상을 위한 열처리 기술:** 조용희\*(한국재료연구원, 전남대학교), 이동윤, 황효진(한국재료연구원), 김세호(고려대학교), 이제인, 강남현(부산대학교), 김형욱, 어광준(한국재료연구원)

**Keywords:** Al-Zn-Mg-Cu alloy, Heat treatment, Tensile properties, Corrosion, Fatigue

7000계 Al-Zn-Mg-Cu 합금은 2xxx계 및 6xxx계 열처리형 알루미늄 합금 대비 우수한 비강도와 열처리 유연성을 바탕으로 로봇 및 항공기 구조 부품에 폭넓게 적용되고 있다. 본 합금계는 일반적으로 T6 시효 조건에서  $\eta'$ -Mg(Zn, Cu, Al)<sub>2</sub> 석출물의 형성을 통해 최대 강도를 확보할 수 있으나, 결정립계 석출물의 연속화 및 협소한 PFZ 형성으로 인해 내식성 저하가 동반되는 한계를 가진다. 이에 따라 과시효(T7X) 열처리를 통해 결정립계에 조대한  $\eta$ 상을 불연속적으로 석출시켜 내식성을 개선하는 접근이 시도되어 왔으나, 기지 내 석출물 조대화로 인한 강도 저하가 불가피하다. 본 연구에서는 Al-Zn-Mg-Cu계 7000계 합금 판재를 대상으로, RRA(Retrogression and Re-ageing) 열처리와 과시효 열처리에 따른 석출거동 변화를 체계적으로 분석하고, 이에 따른 인장특성, 내식성 및 피로특성 변화를 종합적으로 고찰하였다. RRA 열처리는 삼단 시효 공정을 통해 기지 내  $\eta'$  석출물 분율을 유지·회복시키는 동시에, 결정립계 석출물의 불연속화 및 PFZ 확장을 유도함으로써 T6 수준의 강도와 T7X 수준의 내식성을 동시에 달성할 수 있는 가능성을 제시하였다. 반면, 과시효 열처리는  $\eta'$  석출물의 조대화 및 밀도 감소를 통해 항복강도와 인장강도를 저하시켰으나, 균열 선단에서의 소성변형 거동 변화로 인해 피로 균열 형성 및 전파 거동에 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 석출거동은 TEM 및 APT 분석을 통해 정량적으로 평가하였으며, 인장시험, 경도시험, 부식시험, 피로시험 및 피로균열전파시험을 통해 열처리 조건별 기계적·환경적 특성 변화를 비교 분석하였다. 본 연구는 7000계 알루미늄 합금에서 시효 열처리 조건에 따른 석출 미세조직 제어가 강도-내식성-피로특성 간의 트레이드오프를 조절하는 핵심 인자임을 규명하고, 고강도·고내구 수송기기용 알루미늄 합금 설계를 위한 열처리 전략 수립에 기초 자료를 제공한다.

**[모빌2-4 | 11:30] 초청강연**

**AI 기반 문헌 데이터 자동추출 및 후처리를 통한 소재 설계 프레임워크:** 천재은, 박세진(국민대학교), 어광준, 조용희(한국재료연구원), 조 기섭\*(국민대학교)

**Keywords:** 거대언어모델, 데이터베이스, 데이터 후처리, 기계학습, 역설계

최근 인공지능, 특히 거대언어모델(LLM)을 활용한 학술 문헌 데이터 자동추출 기술이 소재 설계 및 데이터 기반 소재 연구 분야에서 중요한 도구로 주목받고 있다. 본 연구에서는 AI 기반 문헌 데이터 자동추출과 체계적인 후처리 과정을 통합한 소재 설계 프레임워크를 제안하고, 이를 알루미늄 합금 시스템에 적용하였다. 우선 키워드 기반 문헌 수집을 통해 알루미늄 합금 관련 논문을 확보한 후, 연구 목적 적합성 및 목표 물성 포함 여부를 기준으로 유효 문헌을 선별하였다. 이후 LLM을 활용하여 문헌으로부터 조성-공정-구조-물성(C-P-S-P) 정보를 자동으로 추출하였으며, 다양한 합금 조성과 공정 조건을 수용할 수 있도록 유연한 데이터 템플릿을 설계하였다. 추출된 원시 문헌 데이터는 기계학습 적용을 위해 용어 및 단위 불일치, 결측값, 비정형 표현 등의 문제를 포함하고 있어, 이를 해결하기 위한 데이터 정제 및 피처 엔지니어링 기반 후처리 과정을 수행하였다. 해당 후처리를 통해 데이터 일관성과 신뢰성을 확보한 정제 데이터셋을 구축하였다. 최종적으로 정제된 문헌 데이터베이스를 기반으로 순방향 물성 예측 모델과 역설계 모델을 포함하는 머신러닝 기반 소재 설계를 수행하였으며, 이를 통해 목표 물성을 만족하는 고성능 알루미늄 합금 후보군을 도출하였다.

## 제3회 RIST-KICET 고도분석기술 심포지엄

Room 4층 400, 4월 30일

## [RK1-1 | 09:05] 초청강연

나노인덴테이션의 원리와 응용: 김주영\*(UNIST)

Keywords: 나노인덴테이션, 나노역학, 기계적 물성

나노스케일에서 재료의 강도, 연성, 탄성계수와 같은 기계적 물성은 벌크 재료와는 다른 거동을 보이며, 재료의 크기와 형상에 따라 크게 달라지는 특성을 나타낸다. 이러한 크기 의존적 기계적 거동은 미세구조, 결함 분포, 표면 및 계면 효과와 밀접하게 연관되어 있으며, 기존의 거시적 시험 방법만으로는 정확한 해석에 한계가 있다. 나노스케일에서의 기계적 거동을 이해하기 위해서는 나노역학(nanomechanics)에 기반한 정밀 측정 기술이 필수적이다. 대표적인 나노역학 시험법으로는 나노인장, 나노압축, 나노압입(nanoindentation) 시험 등이 있으며, 이들은 미세 영역의 국부적 기계적 물성을 정량화할 수 있는 장점을 가진다. 나노역학 측정을 통해 확보된 데이터는 나노구조 재료, 복합재료, 박막 및 코팅재료 등에서의 기계적 성능을 예측하고 설계하는 데 핵심적인 기초 자료로 활용된다. 특히 나노스케일 구성 요소의 기계적 거동을 정확히 이해하면, 이를 기반으로 강도와 신뢰성이 향상된 차세대 구조·기능 재료 개발이 가능하다. 본 발표에서는 미세 및 나노 영역의 기계적 물성 측정에 널리 활용되는 나노인덴테이션 시험법의 기본 원리와 이론적 배경을 먼저 소개한다. 하중-변위 곡선을 이용한 탄성계수 및 경도 산출 방법과, 압입자 형상에 따른 해석 차이에 대해 설명한다. 시험 결과에 영향을 미치는 표면 거칠기, 산화층, 잔류응력 등의 요인에 대해서도 함께 논의한다. 본 발표에서는 연마 및 폴리싱 조건, 변형층 제거, 표면 품질 관리 방법 등 시험편 준비 시 고려해야 할 핵심 사항을 구체적으로 소개한다. 아울러 압입 깊이와 조직 크기 간의 관계에 따라 나타나는 압입 크기 효과(indentation size effect, ISE)에 대한 해석 방법을 다룬다. 실험 결과를 기반으로, 미세조직 크기, 결정립 경계, 석출물, 잔류 밀도 등이 나노인덴테이션 응답에 미치는 영향을 분석한다. 이를 통해 구조용 금속재료의 미세조직 설계와 기계적 성능 간의 상관관계를 제시한다. 나노인덴테이션 시험의 한계와 향후 발전 방향에 대해 논의하고, 다중 스케일 기계적 물성 평가를 위한 나노역학 시험의 역할과 응용 가능성을 전망하고자 한다.

## [RK1-2 | 09:25] 초청강연

Graphite oxidation in water ingress accidental conditions of high temperature gas-cooled reactors: Yi Je Cho\*(Sunchon National University)

Keywords: Graphite, water vapor, oxidation experiment, numerical simulation, HTGR

Graphite is an essential material in high-temperature gas-cooled reactors (HTGRs), serving as both a neutron moderator and the structural matrix for TRISO fuel compacts. However, graphite can oxidize rapidly during off-normal events, particularly water ingress accidents, which can threaten fuel integrity and reduce fission-product retention. In this work, oxidation phenomena in both nuclear and matrix graphites are examined systematically, and the results are extended to component-scale prediction through numerical simulation. First, oxidation of nuclear graphite (IG-110) was examined at ~1400 °C in water vapor-containing atmospheres by analyzing mass loss, pore structure evolution, and gas phase products. In parallel, matrix graphite (ARB-B1) with a partially graphitized binder was tested at ~1200 °C under similar conditions, and microstructural changes, gas evolution, and mechanical degradation were quantified to evaluate performance during water ingress events. Then, a numerical framework was established to scale these findings to prismatic fuel blocks (component). Transient simulations evaluated the influence of inlet and fuel temperatures on water vapor transport and distribution and predicted graphite gasification fractions under severe accident conditions, providing an integrated basis for HTGR safety-oriented fuel design.

## [RK1-3 | 09:45] 초청강연

Investigating the Water-Forming Catalytic Reaction with Gas-Phase Transmission Electron Microscopy: Kunmo Koo\*(Pusan National University)

Keywords: 수소저장, 팔라듐, 투과전자현미경

Closed-cell gas environmental transmission electron microscopy (TEM) enables high-pressure operation and wide collection angles in scanning TEM (STEM) mode, surpassing the capabilities of conventional open-cell environmental TEM. Recent progress in ultrathin (<10 nm) SiNx membranes, featuring a stress-relief supporting structure, provides exceptional signal quality and permits probing of the electronic structure at solid-gas interfaces with high spatio-temporal resolution. These advances make closed-cell gas TEM an indispensable tool for nanoscale studies in energy and environmental science. For example, plasmon localization at metal nanocubes under atmospheric conditions can now be directly visualized, and low-concentration gas species (~0.5%) can be detected by electron energy loss spectroscopy (EELS). Here, we apply this platform to investigate the Pd-catalyzed, water-forming hydrogen oxidation reaction in situ. Using gas-cell TEM, we directly capture the dynamic process of water generation and its coupling with reversible palladium hydride formation at the nanoscale. Our results reveal that the oxidation rate is strongly influenced by the sequence of gas introduction. Supported by electron diffraction and density functional theory calculations, we show that the rate-limiting step arises from adsorption of precursor molecules. These insights provide direct nanoscale evidence of the underlying mechanism and suggest optimal



conditions for Pd-catalyzed hydrogen oxidation. Beyond water formation, the findings highlight broader opportunities for understanding analogous pathways in other metal-catalyzed reactions.

#### [RK1-4 | 10:05] 초청강연

첨단세라믹의 파손저항성 측정 방법: 파괴저항성과 파괴인성 비교: 손경식\*, 김동현\*(한국세라믹기술원)

**Keywords:** 세라믹

첨단세라믹은 우수한 내구성, 열적 안정성 및 높은 강성을 바탕으로 반도체, 디스플레이, 에너지, 방산 등 국가전략산업의 핵심 부품 소재로 활용되고 있다. 고성능화·고집적화가 요구되는 산업 환경에서 세라믹 부품의 장기 신뢰성 확보는 필수적 요소이며, 이에 따라 균열에 대한 저항성을 정량적으로 평가하는 시험방법의 중요성이 증대되고 있다. 세라믹의 균열 저항성 평가는 인텐테이션 기반 파괴저항성(Indentation Fracture, IF) 시험과 선균열 기반의 파괴인성 평가법(SEPB, Single Edge Precrack Beam)으로 대표된다. IF 법은 간편하고 산업 적용성이 높으나, 균열 형상 및 유효성에 대한 민감도가 크다는 한계가 있다. 반면 SEPB법은 선균열을 도입하여 선형탄성파괴역학(LEFM)에 기반한 파괴인성(K<sub>IC</sub>)을 직접 평가할 수 있어 국제표준으로 인정되고 있다. 본 연구에서는 대표적 고방열 세라믹 소재인 질화알루미늄(AlN)을 대상으로 IF법과 SEPB법을 적용하여 균열 저항 특성을 정량적으로 비교하였다. 두 시험법에서 도출된 결과의 차이를 균열 형상, 하중 조건 및 유효 균열 길이 관점에서 분석하고, 각 방법의 적용 범위와 산업적 활용 가능성을 고찰하였다.

#### [RK2-1 | 10:40] 초청강연

수소 생산용 Ni-Cr-Al 다공체의 구조 및 기계적 특성: 강태훈(포항산업과학연구원, 인하대학교), 김규식(인하대학교), 박만호((주)에너지치), 윤중열(한국재료연구원), 공만식(고등기술연구원), 안지혜((주)에코프로), 이기안\*(인하대학교)

**Keywords:** Ni-Cr-Al, Metallic foam, Mechanical property, high-temperature

Ni-Cr-Al계 초내열합금 다공체(금속폼)는 높은 비표면적과 우수한 고온 내산화·내식 특성을 기반으로, 수소 생산 공정(SMR 등)에서 촉매 지지체 및 고온 필터 소재로의 적용 가능성이 확대되고 있다. 그러나 실제 적용 환경에서는 다공체가 다층 적층(stack)된 상태로 장시간 압축 하중을 받으며, 이때 발생하는 시간의존 변형(크리프) 및 densification 거동은 단일 시편 기반 평가만으로 충분히 설명하기 어렵다. 본 발표에서는 Ni-Cr-Al 다공체의 구조적 특성과 고온 기계적 특성 및 시간의존 변형 거동을 종합적으로 분석하였다. 제조된 Ni-Cr-Al 다공체는 약 95% 이상의 기공률을 나타내었으며, 적층 공정에 의해 sheet interface 영역에서 스트럿 접촉(contact) 및 교차(intersection)가 형성되는 특징적 구조가 관찰되었다. 고온 압축 및 일정 하중 기반 시간의존 변형 시험 결과, 온도 상승에 따라 변형률이 증가하였으며, 변형률 증가에 따른 densification 진행은 변형률 속도 저하 및 응력 민감도 변화에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 또한 실제 적용 조건을 모사한 random stack 기반 고온 적층 크리프 시험을 통해 적층 구조가 변형 거동에 미치는 영향을 평가하였다. 전술한 결과들로부터 Ni-Cr-Al 다공체의 구조적 특성과 고온 기계적 특성 간 상관관계를 기반으로 변형 거동을 규명하고자 하였다.

#### [RK2-2 | 11:00] 초청강연

통계학적 방법을 통한 Nb-Mo based thin film의 공정변수-다중 특성 연관성 분석: 이경훈, 김준태, 성창원\*(주식회사 코웰)

**Keywords:** 박막, 실험계획법, 특성분석, 물리적기상증착법, 요인분석

친환경 하이브리드 차량의 배기열회수장치(Exhaust Heat Recirculation System, EHRS) 요소 부품은 반복적인 열피로와 기계적 응력에 노출되며, 기존 PVD와 스프레이 코팅을 병행한 duplex treatment 공정은 계면 신뢰성 및 공정 비용 증가의 한계를 가진다. 본 연구에서는 Nb-Mo 기반 박막 시스템을 설계하고, cathodic arc deposition 공정을 적용한 단일 공정 박막 코팅을 제안하였다. 공정 변수에 따른 박막 특성 변화를 체계적으로 분석하기 위해 3인자 2수준의 완전요인설계법(full factorial design)을 적용하였으며, 전력(power), 바이어스 전압(bias), 가스 유량(gas flow)을 주요 인자로 설정하였다. 박막의 두께(thickness), 표면 조도(surface roughness), 경도(hardness)를 반응 변수로 평가한 결과, 박막 두께에는 전력이 주요한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 표면 조도에는 전력과 바이어스 전압 및 이들의 교호작용이 유의한 영향을 미쳤다. 반면, 경도는 바이어스 전압에 의해 지배적으로 결정되었다. 나노인텐테이션 시험 결과, 박막의 경도는 공정 조건에 따라 최대 약 3, 400 Hv 수준까지 확보되었다. 반응 최적화(Response Optimization)를 통해 박막 두께와 경도는 최대화하고 표면 조도는 최소화하는 공정 조건을 도출하였으며, 해당 조건에서 수행된 실험적 검증 결과 모든 응답 값이 95% prediction interval 내에서 예측된 결과와 일치함을 확인하였다. 본 연구 결과는 완전요인설계법을 기반으로 한 실험 설계가 공정 변수와 박막 특성 간의 관계를 신뢰성 있게 설명할 수 있음을 보여주며, 예측 결과와 실험 결과 간의 높은 일치도를 통해 제안된 DOE 모델의 타당성과 결과 신뢰도를 검증하였다.

#### [RK2-3 | 11:20] 초청강연

Utilizing Graphene Nanoribbons to Identify Molecular States of Isomers through Electrical Interactions: Shinyoung Choi\*(포항산업과학연구원)

Various types of molecular isomers, which possess localized valence electrons, can be generated through specific interactions with external stimuli. Although the electrical differentiation of these isomers holds the potential for creating compact and reusable sensors, their effectiveness is often limited by poor sensitivity due to the similar electronic properties of different isomer states. In this study, we present an electrical method for detecting isomer states in photo-switchable diarylethene (DAE) molecules. These molecules are attached to an electrically conductive grid channel made of graphene nanoribbons (GNRs) with widths sub-10 nm [1]. The bi-stable

molecular states can be toggled reversibly by illuminating them with specific wavelengths of light, resulting in a dark-conductivity change of over  $10^7$ . This significant improvement surpasses the previously reported record of approximately  $10^2$  in a single DAE molecule channel [2]. We attribute this change in conductivity to the modifiable van der Waals gaps that occur between GNRs and electrodes as a result of structural alterations in the ultra-soft GNRs. These alterations are induced by interactions with DAE superlayers, which are deliberately designed to have substantially different molecular sizes in the various isomer states. Our findings propose an advanced electronic device platform for nano-sensors that exhibit both high selectivity and sensitivity. [1] Kim, N et al. ACS Appl. Mater. & Interfaces, 24 28593-28599 (2021) [2] Jia, C. et al. Science, 6292 1443–1445 (2016).

#### [RK2-4 | 11:40] 초청강연

Enhancing Structural Stability and Mechanical Performance of Boron Carbide via Si/B Co-Doping for Amorphization Suppression: 이재화\*(한국세라믹기술원)

**Keywords:** Boron carbide, Si/B co-doping, Stress-induced amorphization, Fracture toughness, Raman mapping analysis

Boron carbide ( $B_4C$ ) is a critical ceramic material for advanced defense and aerospace applications, particularly in ballistic armor systems and space components, due to its exceptional hardness and low density. However, its performance in high-velocity impact scenarios is often compromised by brittle failure resulting from stress-induced amorphization. This study investigates the effects of Si and B co-doping on the structural and mechanical properties of  $B_4C$  to enhance its survivability in extreme environments. Using X-ray diffraction (XRD) and Raman spectroscopy, we confirmed that the presence of amorphous boron (aB) serves as a critical diffusion medium that facilitates the successful integration of Si into the  $B_4C$  matrix. This co-doping strategy effectively prevents the formation of secondary SiC phases, which are typically observed in Si-only doped samples. Furthermore, quantitative Raman mapping of indented regions demonstrated a substantial reduction in the amorphization ratio, decreasing from 62% to 52% in  $B_4C$  and from 50% to 35% in  $B_5C$ . Resultingly, mechanical testing revealed that Si/B co-doping significantly enhances the material's structural integrity. The fracture toughness increased to  $3.32 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  and flexural strength exceeded 600 MPa, while maintaining a high hardness of 29 GPa. These findings demonstrate that Si/B co-doping is a highly effective strategy for improving the reliability and ballistic performance of  $B_4C$ -based defense components, provided that sintering and doping concentrations are precisely optimized to balance structural stability and processability.

## 이차전지용 니켈 원료소재 심포지엄

Room 2층 202A, 4월 30일

### [니켈 1-1 | 09:00] 초청강연

순수 수소 분위기에서 사프로라이트 니켈 광석의 광물학적 특성 및 환원 거동: 박태준\*, 한성수(한국지질자원연구원, 과학기술연합대학 원대학교), 이원재, 정인철, 서주범, 노기민(한국지질자원연구원)

Keywords: Nickel, Laterite, Hydrogen reduction, Saprolite, Nickel pig iron

사프로라이트(주요 라테라이트 원료)로부터의 니켈 생산은 전기차 배터리 공급망에 중요하나, 기존 회전로-전기용광로(RKEF) 공정의 높은 탄소 발자국으로 인해 제약받고 있다. 수소 기반 환원법은 지속 가능한 대안을 제시하나, 반응 동역학 및 상분리 효율 최적화는 산업적 적용에 있어 여전히 과제이다. 본 연구에서는 니켈 피그 아이언(NPI) 회수율을 극대화하기 위해 동적 환원 시스템을 활용하여 사프로라이트 광석의 수소 환원 거동을 조사하였다. 환원 시간, 온도, 가스 유량 및 입자 크기의 영향을 체계적으로 평가한 결과, 마그네슘이 풍부한 규산염 매트릭스 내 확산 저항을 극복하는 데 있어 입자 크기가 지배적 요인임을 확인하였다. 입자 크기 -45  $\mu\text{m}$  조건에서 900°C에서 15분 이내에 최적 환원 효율(~20 wt% 질량 손실)을 신속히 달성하였다. 또한 규산염 슬래그 상과 명확히 분리된 고품위 NPI(Fe~73 wt%, Ni~25 wt%) 생산에 성공하였다. 이러한 결과는 광물학적 제약에 기반한 물리적 매개변수 제어는 수소 환원 효율 향상의 핵심이며, 저탄소 니켈 제련 공정을 위한 실행 가능한 경로를 제공함을 입증한다. Translated with DeepL.com (free version)

### [니켈 1-2 | 09:15] 초청강연

Top Submerged Lance Furnace pilot 설비 활용 Ni matte 제조: 선민석\*, 박진균, 김종호, 우광선, 김영우(포항산업과학연구원)

Keywords: 이차전지, 니켈, 매트, 탈철

니켈 황화광은 건식 공정을 통해 이차전지용 니켈 매트를 제조하고 있으며, 니켈 산화광은 리모나이트와 사프로라이트로 나뉘어, 리모나이트는 HPAL 습식 공정을 통해 MHP 제조를 통해 이차전지용 니켈을 제조하고, 사프로라이트는 RKEF 건식 공정을 통해 STS용 중간물을 제조한다. 2025년도 세계 니켈 시장은 340만톤으로 2040년도에는 약 580만톤 수준으로 성장이 예상되는 상황에서, 이차전지용 니켈 확보를 위해 기존 STS용 중간물을 황화·탈철하여 니켈 매트를 제조하는 공정이 개발되고 있다. 기존 동제련에서 활용되던 PSC(peirce-smith converter)를 활용하여 니켈 매트를 제조하는 공정이 있으나, 설비 구조상 SOx를 포함하는 배가스 처리에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 배가스 처리가 용이한 (Tob Submerged Lancing) Furnace를 활용하여 니켈 매트를 제조하는 연구를 진행하였으며, Pilot-scale의 설비를 통해 이를 검증한 내용에 대해 발표하고자 한다. [사사문구] 본 발표내용은 2022년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원 신사업맞춤형핵심 광물 개발·활용 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(20227A10100010), 이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00438519, 탄소 발생 저감을 위한 수소 환원 기반 니켈 산화광으로부터 니켈 원료 제조 기술 개발)

### [니켈 1-3 | 09:30] 초청강연

니켈 선철의 산화에 따른 미세조직 변화: 박광석\*, 서보성, 차은빈(한국생산기술연구원)

Keywords: 니켈 선철, 니켈 회수, 산화, 미세조직, 상

이차전지 양극(cathode) 핵심 원소인 Ni은 이차전지 산업 성장과 함께 성능 향상을 대응하기 위해 그 수요가 점점 증가하고 있다. 반면, 이차전지 양극재용 고순도 Ni 생산을 위해 주로 사용되고 있는 니켈 황화광(nickel sulfide ore)은 점차 고갈되고 있어, 고순도 Ni 생산을 위한 대체 원료가 필요한 상황이다. 이를 해결하기 위한 방안 중 하나로 페로니켈(ferronickel) 생산에 주로 사용되고 있던 니켈 산화광인 라테라이트광(nickeliferous laterite ore)으로부터 이차전지용 고순도 Ni을 제조하는 것이 검토되고 있다. 라테라이트광은 철이 주성분이 리모나이트광(limonite)과 규산염광물인 사프로라이트광(saprolite)으로 나눌 수 있는데, 상대적으로 Ni 함량이 높은 사프로라이트광이 건식제련 원료로 많이 사용되고 있다. 대략 Ni 품위가 2% 수준인 사프로라이트를 이차전지용 고순도 Ni 제조에 사용하기 위해서는 보다 Ni 품위를 높일 필요가 있으며, 이를 위해 수소환원 기술을 통해 Ni 품위 10% 이상의 니켈 선철(nickel pig iron)을 제조하기 위한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 Ni 품위 13% 수준의 니켈 선철을 진공 유도 용해(VIM) 공정을 통해 제조한 후, 니켈 선철로부터 Ni을 효과적으로 회수하기 위해 일반 대기 산화를 진행하였다. 니켈 선철의 높은 철 함유로 인해 산화 속도가 느리기 때문에 니켈 선철은 수분사 아토마이즈 공정을 통해 D50 기준 약 50  $\mu\text{m}$  크기의 분말을 제조하여 대기 산화를 진행하였다. 분말의 경우, 산화 거리가 짧고 분말 표면 모든 방향에서 산화가 진행되기 때문에, 분말 형태에서의 산화가 판재 대비 대기 산화 중 미세조직 및 상 형성에서 어떻게 차이가 나는지 확인하였다.

### [니켈 1-4 | 09:45] 초청강연

니켈 금속 분말의 철(III) 이온 함유 황산 용액 침출에 대한 실험 인자들의 영향 연구: 김민석\*, 이혜미, 이원재, 장운재, 이수경, 이돈우, 정경우(한국지질자원연구원)

Keywords: 니켈, 황산침출, Fe(III) 이온

본 연구에서는 니켈 금속 분말의 철(III) 이온을 함유한 황산 침출 시 실험인자들의 영향에 대하여 조사하였다. 철(III) 이온은 Fe(II)/Fe(III) 표준전극전위가 0.771 VSHE로 니켈, 철, 구리 등과 같이 표준전극전위가 상대적으로 낮은 금속들에 대해 침출제 또

는 산화제로 작용이 가능하다. 모든 침출온도에서 1 mol/L 황산용액이 동일 농도의 철(III) 이온 용액보다 침출 속도가 높았으며, 침출온도 80 °C, 고액비 4 g/L, 교반속도 300 rpm 조건에서 80분 경과 시 1 mol/L 황산용액과 Fe(III) 이온 용액은 각각 89, 55 %를 나타내었다. 1 mol/L 황산 용액의 수소이온을 일부 Fe(III)로 치환함에 따라 침출거동에 변화가 나타났으며, 이는 침출온도의 영향을 크게 받았다. 1 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 450 mL + 1 mol/L Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 50 mL 혼합 용액을 사용하여 30 - 90 °C 온도 조건에서 침출한 실시한 결과 55 °C 미만의 온도에서는 고액비 4 g/L, 교반 속도 300 rpm 조건에서 80분 경과 시 황산 용액에 비하여 혼합 용액의 침출율이 낮았으나 55 도 °C 이상의 조건에서는 혼합 용액의 침출 속도가 높아졌다. 80분 경과 시 황산용액 대비 혼합용액의 침출율은 55, 65, 90 °C에서 각각 16.3, 26.6, 13.7 % 높아졌다. 이로부터 Fe(III)의 첨가에 의한 황산 니켈 침출은 침출 온도의 영향을 크게 받음을 확인하였다.

#### [니켈2-1 | 10:10] 초청강연

**니켈매트 제조기술 동향 및 황화 원료소재 영향성 연구:** 김준호\*, 서민석, 최준성, 박진균(포항산업과학연구원)

**Keywords:** 니켈선철, 페로니켈, 니켈매트, 황화, 탈철

최근 전기차 및 이차전지 산업의 급격한 성장으로 인해 배터리 핵심 소재인 니켈의 수요가 전 세계적으로 크게 증가하고 있다. 이에 따라 니켈 매트를 고순도 니켈 및 황산니켈로 전환하는 습식제련 공정이 주목받고 있으며, 기존 페로니켈을 황화 처리하여 니켈 매트를 제조하는 공정이 새로운 원료 공급 방안으로 부상하고 있다. 그러나 황화 공정에서 사용되는 황의 원료는 공정 효율, 비용, 환경적 측면에서 다양한 특성을 가지므로, 원료별 적용 가능성에 대한 체계적인 평가가 요구된다. 본 연구에서는 황의 공급원으로 고체황, 석고 및 황산나트륨을 각각 선정하여 페로니켈의 황화 반응 특성을 비교·평가하였다. 각 황 원료에 대해 반응 온도, 원료 배합비, 반응 시간 등 주요 공정 변수를 체계적으로 조절하며 황화 거동을 분석하였으며, 생성된 니켈 매트의 니켈 품위 및 상 구성을 검토하였다. 실험 결과, 세 가지 황 원료 모두 페로니켈의 황화를 통한 니켈 매트 제조에 적용 가능한 것으로 확인되었으며, 각 원료별 최적 조건 하에서 목표 품위 이상의 니켈 매트 생성이 가능함을 확인하였다. 본 연구는 황 원료 수급의 유연성 확보와 산업 부산물의 자원화 측면에서 니켈 매트 제조 공정 다양화에 기여할 것으로 기대된다. 감사의 글 이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(과제번호: RS-2024-00438520)

#### [니켈2-2 | 10:25] 초청강연

**니켈 회수 용매추출 공정 후 여액 내 탈염기술 연구:** 송준근, 이재령\*, 김승현, 친빅하(강원대학교)

**Keywords:** 폐수처리, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 저장, 습식제련, 폐수 재사용

니켈(Ni)과 같은 유가금속의 습식제련 회수 시 침출을 위한 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 사용과 이후 금속 침전 및 공정 pH 조절로 수산화나트륨(NaOH)이 주로 사용됨에 따라 용매추출 후 최종 여액 내 과량의 황산나트륨(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)이 발생한다. 니켈 도금 슬러지의 경우 실제 폐수 내 5.5%의 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 이외 분리되지 못한 금속이온들이 용해되어 존재한다. 이러한 산업 폐수처리와 공정수로써 재사용을 위해 실제 폐수와 유사한 농도 조건의 합성용액으로 침전제를 사용한 화학적 침전과 NF 멤브레인 실험을 통한 최적조건 도출 연구를 진행하였다. 화학적 침전 실험의 경우 CaCl<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>, Ca(OH)<sub>2</sub>를 사용하여 평균 92%의 SO<sub>4</sub> 제거를 확인하였고 이후 제거된 농도 조건에서 NF 멤브레인의 50% 물 회수 시 최대 93%의 SO<sub>4</sub> 와 97%의 Ni 제거율을 확인하였다. 이러한 폐액 재자원화를 통해 최종 폐수 발생량을 줄여 환경부하를 최소화하고 습식제련 공정의 지속가능성을 제고한다.

#### [니켈2-3 | 10:40] 초청강연

**니켈 슬러지 내 크롬 선 회수를 위한 알칼리 로스팅 공정 최적화:** 신재호\*, 김명석, 페브리나와르타 부르한(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 도금 슬러지, 니켈, 크롬, 알칼리 로스팅, 수침출, 선택적 크롬 회수

니켈 도금 슬러지는 도금 폐수 처리 과정에서 발생하는 유해 산업 폐기물로 크롬, 니켈 등 다량의 중금속이 함유되어 있다. 이러한 중금속들은 높은 독성과 대규모 연간 발생량으로 인해 엄격한 환경 규제 하에서 지속적인 관리가 요구된다. 한편, 슬러지에 함유된 금속은 전략적·경제적 가치가 높아, 자원 안보 확보 및 순환경제로의 전환을 위해 핵심 금속의 회수 및 재자원화가 중요해지고 있다. 특히 금속 자원은 특정 국가에 집중되어 있어 원료 확보의 불균형이 존재하며, 최근 자원 무기화 현상이 가속화되면서 원자재 공급망 불안정성이 심화되고 있다. 따라서, 원료의 안정적인 확보와 환경 보호를 위해, 국내에서 발생하는 폐기물의 재자원화 기술 개발이 필수적이다. 그러나 기존의 건식 및 습식 제련 공정에서는 크롬의 복잡한 화학적 거동으로 인해 선택적 회수에 여전히 어려움이 존재한다. 본 연구에서는 알칼리 로스팅-수침출 공정을 통해 도금 슬러지로부터 크롬을 선택적으로 회수하는 공정을 최적화하고자 하였다. 알칼리 로스팅 공정에서 슬러지는 알칼리제와 함께 열처리되어 크롬을 수용성 크로메이트 상으로 선택적으로 전환시킨다. 하지만 로스팅 조건에 따라 슬러지 내 탄소질 성분 등에 의해 금속 수산화물 및 산화물의 탄소열 환원 반응이 유발될 수 있으며, 이는 크로메이트 생성 반응과 경쟁하여 크롬의 선택적 전환을 저해시킨다. 이에 본 연구에서는 알칼리 첨가량과 로스팅 온도가 크로메이트 형성 및 환원 반응에 미치는 영향을 평가하였으며, 탄소질 성분과 관련된 환원 반응을 억제하면서 크로메이트 생성을 촉진하는 최적 운전 조건을 도출하였다.

#### [니켈2-4 | 10:55] 초청강연

**니켈슬러지로부터 황산니켈 회수 공정 연구:** 이수현, 최인혁\*, 구분우, 이환수, 양지수(주에스쓰리알)

**Keywords:** 도금 슬러지, 침출, 세멘테이션, 중화침전, 용매추출

본 연구의 목적은 니켈 함유 도금 슬러지 ([NiO] = 15~20 wt.%)로부터 배터리급 황산니켈 6수화물 (NiSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O)을 제조하고, 동시에 주요 금속성분인 Cu와 Cr을 회수하기 위한 재활용 공정을 개발하는 데 있다. 공정은 침출, 세멘테이션, 중화침전, 용매추출

및 결정화 단계로 구성된다. 황산 침출 공정에서는 산 농도, 펄프 농도(S/L), 온도의 영향을 평가하였으며, 실용 조건에서 반응이 약 15분 이내에 완료되어 Ni가 정량적으로 용해됨을 확인하였다. 다만, 과도한 고액비(S/L)는 여과성을 저해하는 것으로 나타났다. Cu 회수를 위해 Fe 기반 세멘테이션을 적용한 결과, 금속 Cu 분말로 회수가 가능하였고, Ni 손실은 효과적으로 억제되었다. 이어  $\text{CaCO}_3$ 를 이용한 중화 공정을 통해 Cr을 회수하고 Ni가 용액상에 안정적으로 잔류하는 운전 pH 범위를 도출하였다. 정제된 침출액은 ISE-272 (Cyanex 272 계열) 유기상을 이용한 용매추출 공정으로 처리하여 니켈을 농축하였으며, 추출제 농도, O/A 비, pH 및 단수의 영향을 평가하였다. 또한 McCabe-Thiele 해석을 통해 공정 단수 설계를 수행하였다. 적재 유기상은 황산 용액을 사용해 단시간 내 탈거가 가능하였고, 유기상의 반복 재사용성과 함께 후속 공정인 결정화에 적합한 니켈 농축 용액을 확보하였다. 이상의 결과는 니켈의 용해, 주요 금속 성분의 선택적 회수, 니켈 농축 공정을 통합하여 연계한 공정을 제시하며, 니켈 슬러지의 자원화 및 재배출 폐기물 최소화를 동시에 달성할 수 있는 친환경 공정 개발 가능성을 입증한다.

## 상 변 태

Room 4층 402A, 4월 30일

## [상변태1-1 | 08:30] 초청강연

Self-Constructed Bi-continuous RHEA-Cu Composites via LMD process for Nuclear Reactors: Kooknoh Yoon(Seoul National University, UC Berkeley, Hanbat National University), Il hwan Kim, Ji Young Kim(Seoul National University), Peter Hosemann(UC Berkeley), Eun Soo Park\*(Seoul National University)

**Keywords:** HEA, Composite, LMD process, Thermal conductivity, Irradiation resistance

Refractory high-entropy alloys (RHEAs) are elite candidates for next-generation nuclear reactors due to their exceptional high-temperature strength and irradiation resistance. However, the extreme immiscibility between refractory elements and Cu has long hindered the fabrication of high-performance composite cooling systems. This study reports a breakthrough via the spontaneous formation of a bi-continuous RHEA-Cu composite using the liquid metal dealloying (LMD) process. By reacting a quaternary WTaVTi precursor with a molten Cu bath, a unique hierarchical structure is self-constructed through selective atomic exchange. During this process, Ti-rich interdendritic channels are replaced by high-purity Cu, while a stable W-rich interlayer forms autonomously at the interface, effectively minimizing interfacial defects and ensuring robust bonding. Evaluation of the composite reveals exceptional irradiation resistance, showing 30% less swelling under  $\gamma$ -ion irradiation compared to pure W and superior resistance to blistering-induced failure even at high helium concentrations. Thermally, the composite exhibits a remarkable positive temperature gradient with its thermal conductivity reaching  $\approx 120 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  at to surpass that of pure W. These findings demonstrate that self-engineered RHEA-Cu composites provide a scalable and robust material solution for the extreme thermal and radiative environments of next-generation nuclear and fusion reactors.

## [상변태1-2 | 08:55]

탄소 첨가 CrMnFeCo 고엔트로피 합금의 형상기억 특성: 정휘윤, 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 유리 마르텐사이트 상변태가 일어날 때 비가역적인 슬립 변형이 억제되어야 한다. 탄소와 같은 침입형 원소는 오스테나이트 강에서 격자 왜곡 극대화를 통한 고용 강화 효과를 증가시킨다. 하지만, 탄소가 고용한 이상으로 첨가될 경우 입계 및 입내에 탄화물이 형성되어 형상기억 특성을 저하시킨다. 따라서 본 연구에서는 상용합금에 비해 고용한이 큰 고엔트로피 합금에 탄소를 첨가시켜 고용강화 효과를 극대화함으로써 슬립변형을 억제하고 형상기억 특성을 향상시키고자 한다. 탄소 함량이 증가할수록 마르텐사이트 변태 개시 온도( $M_s$ )가 급격하게 감소하여 FCC 모상이 안정화되었고, 1.5 at.% 이상 첨가되는 경우 입계에 미세한 탄화물이 형성됨을 확인하였다. 탄소 함량이 0.7 at.%인 합금에서 최대 회복 연신율인 5.8 %를 보였는데, 이는 기존에 보고된 CrMnFeCoNi 합금보다 약 1.0 % 증가한 결과이다. 이는 온도-응력 의존성 결과를 통해 탄소가 첨가될 때, 비가역적인 슬립 개시 변형률이 2.8 %에서 약 4.0 %까지 확장됨에 기인함을 알 수 있었다.

## [상변태1-3 | 09:10]

C 및 Ti 첨가가 CrMnFeCoNi 고엔트로피 합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향: 장성현, 박성현, 정재길\*(전북대학교)

**Keywords:** high entropy alloy, vacuum induction melting, microstructure, hardness, transmission electron microscopy

고엔트로피 합금(high entropy alloy, HEA)은 5가지 이상의 주요 원소를 동일하거나 유사한 원자 비율로 혼합하여 제조된 합금으로, 다원계 조성에 의해 높은 배열 엔트로피를 갖는 것이 특징이다. 이러한 높은 혼합 엔트로피는 금속간 화합물의 형성을 억제하고 단순 고용체 상을 안정화시키는 경향을 보이며, 그 결과 FCC 또는 BCC 기반의 단일상 구조를 형성하는 경우가 많다. Cr, Mn, Fe, Co, Ni이 동등한 원자비를 이루는 대표적인 FCC 계열 합금인 Cantor 합금은 실온 및 극저온 환경에서 우수한 인성과 파괴인성을 나타내며, 동시에 높은 강도, 열적 안정성, 내부식성 및 내마모성과 같은 우수한 특성을 갖는 것으로 보고되어 왔다. 고엔트로피 합금은 아크 용해, 진공 유도 용해, 레이저 클래딩 등 다양한 공정을 통해 제조되며, 제조 조건 및 첨가 원소에 따라 미세조직과 상 안정성이 크게 변화한다. 본 연구에서는 진공 유도 용해를 이용하여 CrMnFeCoNi 합금을 제조하고, 탄소(C) 및 티타늄(Ti)을 첨가하여 합금을 설계하였다. 특히 C 및 Ti 첨가에 따른 원소의 편석 거동과 탄화물 석출 특성을 체계적으로 분석하고자 하였다. 열역학 계산을 통해 온도에 따른 평형 상 분율을 예측하였으며, 이를 바탕으로 800°C에서 8시간 열처리를 수행하여 석출상 형성 거동을 분석하였다. 열처리 전후의 미세조직을 비교함으로써 원소의 편석 분포와 결정립계 및 기지 내부에서의 탄화물 석출 양상을 평가하였다. 또한 각 석출상과 FCC 기지 사이의 결정학적 정합성 및 orientation relationship을 규명하여, 석출상의 형성과 성장 거동을 분석하였다. 미세조직 분석은 X선 회절 분석(X-ray diffraction, XRD), 광학현미경(optical microscopy, OM), 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM), 전자 후방산란 회절(electron backscatter diffraction, EBSD), 투과전자현미경(transmission electron microscopy, TEM)을 이용하여 수행하였다. 이를 통해 원소 편석 특성, 석출물의 형상 및 분포, 그리고 석출상과 기지 사이의 계면 특성을 종합적으로 분석하였다. 기계적 특성은 비커스 경도 시험과 압축 시험을 통해 평가하였으며, 석출상의 형성과 편석 거동이 강도와 변형 거동에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하였다. 특히 석출 강화 메커니즘을 기반으로 각 강화 기구의 강도

기여분을 분석하여, C 및 Ti 첨가에 따른 기계적 특성 향상 원인을 체계적으로 규명하였다. 본 연구는 C 및 Ti 첨가에 의해 유도되는 원소 편석 및 탄화물 석출 거동을 중심으로 CrMnFeCoNi 고엔트로피 합금의 미세조직 진화와 기계적 특성 간의 상관관계를 규명하는 데 목적이 있다.

#### [상변태1-4 | 09:25]

**CoCrNi계 중엔트로피 합금에서의 전위 밀도 기반 다상 석출 거동 정량적 분석:** 한상윤, 박은수\*(서울대학교), 류채우\*(홍익대학교)

**Keywords:** Dislocation density, In-situ synchrotron X-ray diffraction, Precipitation behavior, Medium-entropy alloy

전위는 결정 내 선형 결함으로서, 저장 변형에너지와 탄성 변형장을 수반하며, 석출 과정에서 불균일 핵생성 위치로 작용할 수 있다. 이러한 전위의 에너지적 기여는 제2상 석출의 개시, 성장 및 분율 변화에 영향을 미친다. 따라서 전위 밀도 변화와 석출 거동 간의 정량적 상관관계를 규명하는 것은 합금의 미세조직 제어와 기계적 물성 향상을 위한 핵심 과제이다. 본 연구에서는 CoCrNi계 중엔트로피 합금(Medium-entropy alloy)에서 정합 석출 상( $\gamma$ )과 비정합 석출 상( $\sigma$ )이 공존하는 조성을 대상으로 냉간 압연 변형률을 단계적으로 변화시켜 전위 밀도를 제어하고, 이에 따른 상(phase)별 석출 거동의 차이를 비교·분석하였다. 냉간 압연 시편과 재결정 시편을 대상으로, 실시간 싱크로트론 X선 회절(In-situ synchrotron X-ray diffraction) 실험을 수행하여, 가열 과정 중 석출 개시 온도 및 분율 변화를 정량적으로 분석하였다. 그 결과,  $\sigma$ 상은 전위 밀도 변화에 민감하게 반응하여 석출 개시 온도와 분율에서 뚜렷한 차이를 보인 반면,  $\gamma$ 상은 전위 밀도 의존성이 미비하며, 석출 관련 회절 피크의 점진적 변화가 관찰되었다. 이러한 결과는 CoCrNi계 중엔트로피 합금에서 전위 밀도가 상별 석출 메커니즘에 서로 다른 방식으로 작용함을 시사한다. 본 연구는 실시간 회절 기반 분석을 통해 전위 밀도와 다상 석출 거동 간의 정량적 관계를 규명함으로써, 다상 미세조직 합금 설계를 위한 열·가공 공정의 정밀 제어 전략 수립에 기여할 것으로 기대된다.

#### [상변태1-5 | 09:40]

**CoCrNi계 중엔트로피 합금의 석출물 크기와 부식 특성 간의 상관관계 분석:** 강승연, 류채우\*(홍익대학교)

**Keywords:** 중엔트로피 합금,  $L_{12}$  석출물, 부식 저항성, 부동태 피막

고강도-고연성 합금에 대한 산업적 수요가 증가함에 따라, 이를 구현하기 위한 방안으로 석출강화형 고엔트로피 및 중엔트로피 합금에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 FCC 기지와 정합 계면을 이루는  $L_{12}$  석출물을 형성하는 CoCrNi계 중엔트로피 합금은 우수한 강도-연성 균형을 보여 차세대 구조재료로서 각광받고 있다. 그러나 열처리 과정에서 석출상이 성장함에 따라 합금 내부에 국부적인 화학적 불균일성이 형성될 수 있으며, 이는 부동태 피막의 연속성을 저해하거나, 석출물-기지 계면에서의 전위 차에 기인한 국부적인 갈바닉 부식을 유발하여 전기화학적 안정성을 저하시킬 수 있다. 따라서 기계적 물성과 내식성을 동시에 확보하기 위해서는 석출상의 크기, 형상 및 분포를 정밀하게 제어하는 미세구조 설계가 필수적이다. 본 연구에서는  $(\text{CoCrNi})_{94}\text{Al}_3\text{Ti}_3$  중엔트로피 합금을 대상으로 열처리 조건에 따른  $L_{12}$  석출물의 조대화 거동을 분석하고, 석출물의 크기 변화가 부식 환경에서의 피막 안정성 및 부식 저항성에 미치는 영향을 규명하였다. 본 연구의 결과는 내식성이 확보된 고성능 중엔트로피 합금 설계 및 열처리 공정 최적화를 위한 초석을 제공할 것으로 기대된다.

#### [상변태2-1 | 10:00] 초청강연

**Nano-Coring-Engineered Functionally Graded Ti-Based Shape Memory Alloy:** Wook Ha Ryu(Kumoh National Institute of Technology), Eun Soo Park\*(Seoul National University)

**Keywords:** Shape memory alloy, Functionally graded alloy, Casting

Ti-based shape memory alloys (SMAs) are attractive candidate materials for functional engineering applications because of their reversible martensitic transformation (MT). For thermally induced MT, Ti-based SMAs have a narrow transformation interval, typically ~ 20 K, which confines the controlling factors such as transformation stress and characteristic temperatures. Moreover, the MT behavior with narrow window is characterized by a flat stress plateau, which presents a typical condition of mechanical instability for strain under load-controlled deformation. One of the solutions to the problems is to design functionally graded SMAs, which may transform over a wide transformation interval. Traditionally, a functionally graded SMAs were developed by manufacturing a shape to have asymmetric geometry, or by designing microstructures with compositional and microstructural gradients. However, in this case, the structure has a directionality, and there is a fatal disadvantage in that a specific part is weak or causes non-uniform deformation, resulting in poor fatigue characteristics. In this study, we developed a functionally graded TiCuNiSi SMA that has a wide transformation interval with isotropic MT and mechanical response. We introduced Ti-rich nano-precipitation to have nano-coring structures that represent compositional fluctuation in as-cast alloy. The characteristic temperature of MT varies depending on the content of Ti in the nano-coring structure. We propose a new alloy development method that allows narrow or broad control of the transformation interval, which can be utilized in a wide range of future-oriented applications such as wearable devices, smart closing, and actuators.

#### [상변태2-2 | 10:25]

**압연율과 열처리 조건 변화에 따른 Invar 합금의 미세조직 및 물성 거동:** 장준호, 류채우\*(홍익대학교)

**Keywords:** Invar 합금, 열팽창계수(CTE), 기계적 물성, 열처리 및 압연

Fe-36 wt. % Ni Invar 합금은 극히 낮은 열팽창계수 (Coefficient of thermal expansion, CTE) 를 나타내는 특성으로 인해 파인 메탈 마스크 (FMM) 및 항공우주 부품과 같은 고정밀 응용 분야에서 널리 사용되고 있다. 그러나 높은 연성과 낮은 경도로 인해 가



공성이 제한되며, 특히 박판 적용 시 surface waviness 발생 등 형상 안정성 저하 문제가 보고되고 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해 냉간 압연 및 후열처리 공정이 적용되지만, 이 과정에서 발생하는 미세조직 및 잔류응력 변화는 매우 민감하여 정밀한 공정 제어가 요구된다. 본 연구에서는 Fe-36 wt. % Ni Invar 합금을 대상으로 냉간 압연율과 열처리 조건 변화에 따른 미세조직 변화와 기계적 물성 및 열팽창 특성 간의 상관관계를 체계적으로 분석하였다. 기계적 물성 변화는 인장시험을 통해 평가하였고, 결정 구조 변화는 X-ray diffraction (XRD) 분석을 통해 확인하였다. 또한 Electron backscatter diffraction (EBSD) 및 Scanning electron microscopy (SEM) 분석을 통해 압연 및 열처리에 따른 미세조직 변화를 관찰하였다. 열팽창 특성은 Dilatometer (DIL)를 활용하여 측정하였으며, 각 조건에서의 CTE 변화를 비교·분석하였다. 이를 통해 미세조직 및 기계적 물성 변화가 열팽창 거동에 미치는 영향을 규명하고, 저열팽창 특성을 유지하면서 기계적 성능과 형상 안정성을 동시에 향상시킬 수 있는 최적 공정 조건을 제시하고자 한다. 본 연구는 고정밀 Invar 소재의 열팽창 거동과 형상 안정성 최적화를 위한 공정 설계 지침을 제공할 것으로 기대된다.

### [상변태2-3 | 10:40]

**냉각속도에 따른 Cu-15Fe 합금의 응고 거동 이해:** 김점운(포항공과대학교), 이재현(국립창원대학교), 김성준\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 액상분리, Cu-Fe 합금, 응고

Cu-Fe 합금은 대표적인 immiscible 합금으로, 주조 및 응고 과정에서 액상분리가 발생한다. 그 결과 Cu-rich 상과 Fe-rich 상이 복합재료와 같이 분포하는 미세조직이 형성되며, Cu의 높은 전기전도도와 Fe의 고강도 특성을 동시에 확보할 수 있다. 이러한 전기적·기계적 특성을 극대화하기 위해서는 Fe-rich 상의 미세하고 균일한 분포가 필수적이다. 이를 달성하기 위해 많은 선행 연구에서는 매우 높은 냉각속도를 제공하는 3D 프린팅 기반 공정을 활용해 왔으며, 해당 공정은 균일한 Fe 상 분포를 유도할 수 있으나 공정 비용 및 생산성 측면에서 상용화에 한계가 있다. 한편, 냉각속도가 상대적으로 느린 조건에서는 Cu-Fe 합금의 응고가 단순한 액상 분리뿐 아니라  $\gamma$ -Fe 수지상 성장을 동반할 수 있다. 하지만, 이에 대한 체계적 연구는 충분하지 않다. 본 연구에서는 냉각속도를 제어하면서 Cu-Fe 합금의 실시간 응고 거동을 직접 관찰하고, 냉각속도에 따른 미세조직 형성 메커니즘을 규명하고자 하였다. 관찰 결과, 느린 냉각 조건에서는 Cu liquid matrix로부터  $\gamma$ -Fe 수지상이 성장하며, 성장 과정에서 Fe-rich 액적과 맞닿으며 액적을 붙잡게 된다. 반면, 빠른 냉각 조건에서는 Cu-rich liquid에서의  $\gamma$ -Fe 수지상 핵생성 및 성장이 억제되었고, 대신 Fe-rich 액적의 직접적인 응고가 지배적으로 관찰되었다. 이러한 차이를 해석하기 위해  $\gamma$ -Fe 상변태에 대한 열역학적 구동력을 계산한 결과, Cu-rich liquid와 Fe-rich 액적에서  $\gamma$ -Fe 핵생성에 대한 구동력은 본질적으로 동일함을 확인하였다. 따라서 냉각속도에 따른 거동 차이는 구동력의 크기 자체보다는, 냉각 과정에서 Fe-rich 액적의 이동 및 공간 분포 변화와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 특히 빠른 냉각 조건에서는 Marangoni 이동에 의해 Fe-rich 액적이 고온 영역으로 이동하기 전에 응고 개시 온도에 도달함으로써, 액적이  $\gamma$ -Fe로 응고가 된다. 반면 느린 냉각 조건에서는 다수의 Fe-rich 액적이 응고 개시 온도 이전에 고온 영역에 도달하여 저온 영역에서의 Fe-rich 액적 존재가 감소하고, 그 결과 저온 영역의 Cu-rich liquid에서  $\gamma$ -Fe가 수지상 형태로 핵생성 후 성장하는 경향이 강화된다. 즉, 본 연구는 냉각속도에 따라 (i) Fe-rich 액적의 직접 응고와 (ii) Cu-rich liquid에서의  $\gamma$ -Fe 수지상 성장 사이의 지배 메커니즘이 전환되며, 이 전환이 Fe-rich 액적의 이동/분포와 관련 있음을 확인하였다.

### [상변태2-4 | 10:55]

**DC 마그네트론 스퍼터링 기반 타겟 공정 변수에 따른 AlCrFeNi 고엔트로피 합금 코팅의 미세조직 및 기계적 물성 분석:** 현명우, 이유진, 서진오, 정민섭, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범\*(세종대학교)

**Keywords:** 스퍼터링 공정, 고엔트로피 합금 코팅, 타겟 공정 변수, 미세 구조, 기계적 물성

최근 고엔트로피 합금(HEA)은 탁월한 경도와 내마모성 및 내산화성을 바탕으로 금속 코팅 분야에서 주목받고 있으며, 특히 스퍼터링 공정을 통한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존 연구들은 주로 증착 공정 변수에 집중해왔으나, 본 연구는 코팅의 핵심 원재료인 타겟 자체의 제조 공정 변수에 주목하고자 한다. 타겟 제조 방식에 따른 특성 차이는 코팅 증착 과정 중 원자들의 확산 및 재배열에 직접적인 영향을 미치며, 이는 최종 코팅의 미세조직을 결정짓는 근본적인 인자로 작용한다. 우리는 선행연구를 통해 동일 조성 내에서도 타겟 제조 방식에 따라 결정질 또는 비정질 코팅이 선택적으로 형성되는 상 제어 거동을 규명한 바 있다. 이러한 현상은 타겟 제조 방식에 따른 원소 간 화학적 균일도 및 상 분포가 기판 표면 원자의 확산 구동력을 변화시키기 때문으로 판단된다. 더불어 증착 과정 중 나타나는 상 전이 거동은 타겟별 혼합 에너지 차이가 원자의 재배열에 미치는 영향이 두께 증가에 따라 누적되면서 나타나는 결과로 예측된다. 본 연구에서는 원소들을 용융·응고시킨 주조타겟, 순수 원소 분말을 혼합 후 소결한 혼합분말 타겟과 합금화 된 분말을 소결한 합금 분말 타겟 등 총 3가지 타겟 제조 공정에 따른 특성 차이에 주목하였다. 이러한 타겟 제조방식의 차이가 코팅층에 미치는 영향을 규명하기 위해 각 타겟별 AlCrFeNi코팅의 미세조직과 기계적 물성을 두께에 따라 비교·분석하였다. 이를 통해 타겟별 코팅의 상 형성 및 성장 기구에 대한 학술적 근거를 도출하고 두께 증가에 따른 코팅의 특성 변화를 고찰하였다.

### [상변태2-5 | 11:10]

**Si 확산 코팅된 HfMoNbTaTi 고엔트로피 합금의 내산화성 고찰 및 속도론적 분석:** 김선진, 김성진, 최지성(국립한밭대학교), 박지니(고등기술연구원), 박준식\*(국립한밭대학교)

**Keywords:** 고엔트로피 합금, Pack cementation Coating, 코팅 수명, 내산화성, 미세구조

Ni가 초합금은 항공 우주 및 국방 분야에서 터보 엔진으로 사용되고 있다. 하지만 녹는점의 문제로 1200 °C 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, Cr 등 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 합금의 내산화성을 향상시키기 위해 Si 코팅을 Pack cementation 방법으로 수행하여 고온에서 산화 저항성 특성을 미세구조적 관점에서 확인하고자 하였으며, 산화 후 단면을 분석하여 코팅층의 예상 수명을 측정하고자 하였다

### [상변태3-1 | 11:30]

**핵생성동역학 연구 기반 급속가열을 통한 Fe-B 연자성 합금의 초미세 BCC-Fe 나노결정화:** 김원(서울대학교, University of Wisconsin-Madison), 박은수\*(서울대학교), John. H. Perepezko\*(University of Wisconsin-Madison)

**Keywords:** 철계 비정질 합금, 급속가열, 연자성특성, 나노결정상,

Fe계 비정질 연자성 합금을 열처리 시켜 교환길이 ( $\approx 30\text{-}40\text{ nm}$ ) 이하의 크기를 가진 BCC-Fe 나노결정상을 석출시키면 우수한 연자성 특성 확보가 가능하나, BCC-Fe 나노결정상의 안정적 제어는 여전히 과제로 남아 있다. 본 연구에서는  $\text{Fe}_{100-x}\text{B}_x$  ( $x = 13, 15$ ) 비정질 합금 리본을 이용하여 최대  $3000\text{ K/s}$ 의 급속가열 조건에서 BCC-Fe 나노결정상의 핵생성 동역학을 규명하고, 이를 기반으로  $20\text{ nm}$  이하의 초미세 BCC-Fe 형상을 유도하는 급속가열 공정 전략법을 제시하고자 한다. 구체적으로 Flash DSC를 이용하여 다양한 가열속도에서 BCC-Fe 나노결정상의 핵생성 지연시간을 측정하였고, TEM 분석으로 BCC-Fe 나노결정상의 평균 크기 및 수밀도를 평가하였다. 이들 실험 데이터를 바탕으로 핵생성 동역학 모델을 구축하고 TTT/CHT 다이어그램을 도출함으로써, 초미세 조직을 가진 연자성 합금 제조를 위한 새로운 공정창을 정의하였다. 그 결과,  $500\text{ K/s}$  이상의 급속가열 시 핵생성 속도 증가와 용질 확산장 중첩 효과로 인해  $12\text{ nm}$  수준의 BCC-Fe 나노결정상이 최대  $2 \times 10^{22}\text{ m}^{-3}$ 의 수밀도로 석출 됨을 확인하였다. 또한 FINEMET 수준의 낮은 보자력 ( $<10\text{ A/m}$ )과 NANOMET이상의 큰 초기 투자율 ( $\approx 2 \times 10^4\text{ H/m}$ )의 확보가 가능함을 실험적으로 검증 하였다.

### [상변태3-2 | 11:45]

**Hidden Liquid-liquid phase separation in Pd-Au-Si MG:** Minkyung Kwak(Seoul National University, ETH Zurich), Robin E. Schaeublin, Juergen E.K. Schawe(ETH Zurich), Eun Soo Park\*(Seoul National University), Joerg F. Loeffler\*(ETH Zurich)

**Keywords:** Liquid-liquid phase separation, Phase transitions, Nucleation and crystallization, Supercooled liquids, Ultrafast calorimetry

Liquid-liquid phase separation (LLPS) has long been proposed as a fundamental source of mesoscale heterogeneity in liquids, yet direct experimental access has remained elusive, as crystallization typically pre-empts it. Here, we show that a deeply supercooled metallic liquid undergoes spontaneous LLPS upon ultrafast heating, forming transient, compositionally distinct liquid domains prior to crystallization. By correlating ultrafast calorimetry with nanoscale real-space and reciprocal-space structural probes, we directly capture the emergence and growth of coexisting liquids on millisecond timescales. We further demonstrate that endothermic thermal features in the supercooled liquid region, widely interpreted as multiple glass transitions or relaxation processes, instead constitute calorimetric signatures of LLPS-induced liquid heterogeneity, which in turn reshapes subsequent nucleation and crystallization pathways. Beyond metallic systems, these findings establish LLPS as a previously hidden kinetic route to metastable liquid states far from equilibrium, providing a general framework for understanding transformation pathways across diverse classes of liquids.

### [상변태3-3 | 12:00]

**Al-Si 공정계를 통한 비정질 실리콘 형성:** 문준현, 박은수\*(서울대학교), 류채우\*(홍익대학교)

**Keywords:** Amorphous Si, Eutectic system, Crystallization, Compositional undercooling

비정질 실리콘(a-Si)은 높은 이론 용량과 우수한 전기적 특성으로 인해 리튬이온 배터리의 음극재를 포함한 에너지 저장 및 전자 소자 응용 분야에서 유망 소재로 주목받고 있다. 그러나 기존 비정질 실리콘 제조 기술은 주로 박막 증착 기반 공정에 의존함에 따라 공정 복잡성 및 고비용 문제로 인해 대형화 및 산업적 적용에 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 Al-Si 공정 조성 영역에서 급속 응고 공정을 활용하여 비정질 실리콘을 형성하는 제조 경로를 제안하고, 조성 변화에 따른 비정질 실리콘 형성 거동을 체계적으로 분석함으로써 비정질 상이 효과적으로 형성되는 조성 범위를 규명하였다. 급속 응고 과정에서 알루미늄이 우선적으로 응고되며, 이로 인해 잔류 용융부 내 실리콘이 국부적으로 농축되고, 공정 온도와 실리콘의 녹는점 차이로 인해 조성적 과냉이 유도된다. 이러한 조건에서 실리콘은 결정화 거동을 거치지 않고 비정질 상으로 전이된다. 구조 분석 및 열분석 결과, 형성된 실리콘 상은 비정질 구조를 나타내며, 가열 시 뚜렷한 결정화 거동을 보임을 확인하였다. 또한 고에너지 X-ray 회절 실험을 통해 조성에 따른 비정질 실리콘 분율을 정량화 하였다. 본 연구는 Al-Si 공정계가 비정질 실리콘 형성에 유리한 열역학 및 동역학적 조건을 제공함을 제시 하며, 합금 기반 제조 공정은 비정질 실리콘 형성에 효과적일 수 있음을 시사한다. 나아가 본 접근법은 다양한 공정계에서의 비정질 상 형성 메커니즘을 확장하여 탐구하는 데 기여할 것으로 기대된다.

### [상변태3-4 | 12:15]

**Grain Size Control of Quasicrystals in Ti-Ni-Zr alloy and Their Impact on Mechanical Properties:** Thiri Shwe Sin, Geunhee Yoo, Wan Kim, Eun Soo Park\*(서울대학교)

**Keywords:** Quasicrystal, Icosahedral Phase, Ti-Zr-Ni alloy, Nanoindentation

The unique quasiperiodic atomic structure of quasicrystals has attracted considerable interest due to their distinct physical and

mechanical properties compared with conventional crystalline and amorphous materials. Among quasicrystal-forming systems, the Ti-Zr-Ni alloy is a promising candidate for high-strength applications due to the formation of quasicrystal. In this study, we investigate the formation behavior of quasicrystals in Ti-Zr-Ni alloys and elucidate their influence on mechanical properties. Refined as-cast precursors were prepared by suction casting, followed by systematic isothermal annealing to induce the precipitation of quasicrystals from the amorphous matrix. Microstructural characterization using scanning electron microscopy and X-ray diffraction confirmed the presence of well-defined quasicrystal grains with micrometer-scale sizes embedded in amorphous matrix. We also performed nanoindentation tests to evaluate the mechanical responses of the quasicrystals including, hardness, elastic modulus, and serration behaviors, relative to the surrounding amorphous matrix. The results demonstrate a direct correlation between processing routes, microstructural control of quasicrystals, and mechanical responses in the Ti-Zr-Ni system. This study provides insights into the design of quasicrystal-reinforced bulk alloys through controlled precipitation engineering.

## 고온재료

Room 4층 402B, 4월 30일

### [고온1-1 | 09:00]

A Unique Deformation Behavior of Novel Cost-Reduced and Crack-free High  $\gamma'$  Superalloy for AM: Kim Tae Gyeong, Lee A Reum, Hong Hyun Uk\*(Changwon National University), Lee Chan Hee(KAIST), Lee Byoung Soo(KITECH)

**Keywords:** Ni-based superalloy, Creep, TEM, Alloy Design, EBM

Additive manufacturing (AM) of Ni-based superalloys with a high volume fraction of the  $\gamma'$  phase is highly demanded for maximizing the cooling efficiency of complex gas turbine components. However, these high- $\gamma'$  alloys traditionally suffer from severe hot cracking during the AM process and require expensive rare elements, such as Ta and Hf, to maintain high-temperature creep strength. In this study, we propose a novel alloy design strategy to develop a cost-reduced and highly weldable high- $\gamma'$  superalloy tailored for the electron beam melting (EBM) process. Using a combination of thermodynamic calculations (Thermo-Calc) and density functional theory (DFT), we systematically modified the composition of a reference CM247LC alloy. To ensure cost-competitiveness without sacrificing solid solution strengthening and  $\gamma'$  shearing resistance, we minimized the use of expensive elements (Co, Ta, Hf) and utilized alternatives (Cr, Mo, W, Nb, Ti) to enhance the planar fault energy. Furthermore, the Scheil solidification range was minimized to improve hot cracking resistance. Among the candidate alloys, the optimized composition demonstrated excellent hot-cracking resistance and superior microstructural stability, showing no formation of detrimental topologically close-packed (TCP) phases even after prolonged thermal exposure at 982°C for 1, 000 hours. Remarkably, the EBM-processed alloy achieved a near-fully dense relative density of 99.89%. Evaluation of the temperature-dependent deformation behavior revealed that stacking fault shearing acts as the dominant deformation mechanism at elevated temperatures (871°C). These findings provide a robust framework for designing high-performance, crack-free, and cost-effective superalloys optimized for additive manufacturing applications.

### [고온1-2 | 09:15]

열처리 조건에 따른 재결정 거동 변화가 L-PBF 공정으로 제조된 IN718 합금의 크리프 특성에 미치는 영향: 심영래(한국재료연구원, 동아대학교), 도정현, 이상원, 최백규, 김인수(한국재료연구원), 전종배\*(동아대학교), 정중은\*(한국재료연구원)

**Keywords:** IN718, L-PBF, recrystallization, Schmid factor, strain incompatibility, creep ductility

본 연구는 열처리 공정 중 재결정 발생 여부가 laser powder bed fusion (L-PBF) 공정으로 제조된 Inconel 718 (IN718) 적층 재료의 크리프 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 재결정, 결정립 크기, 전위 밀도 등 미세조직 변화를 유도하기 위해 용체화 열처리 온도를 1065°C, 1095°C로 구분하여 각각 90분 유지하였고, 이후 동일 조건으로 시효 처리하였다. 그 결과, 1065°C 용체화 조건에서는 재결정이 거의 발생하지 않아 초기 주상정이 유지된 반면, 1095°C 조건에서는 재결정 분율이 87.9%에 달하였으며 이에 따라 초기 주상정이 등축정으로 변화하였다. 또한 재결정이 발생한 1095°C 조건에서는 평균 결정립 크기가 약 350  $\mu\text{m}$ 로 조대화되었고 GND 밀도는  $3.14 \times 10^{12} \text{ m}^{-2}$  수준으로 감소하였다. 이러한 미세조직 차이는 크리프 특성의 차이로 이어졌다. 650°C/689 MPa 조건에서 1065°C 조건의 크리프 수명은 327-441 h, 연신율은  $\geq 12\%$ , 최소 크리프 속도 ( $\epsilon_{ss}$ )는  $4.08\text{-}5.28 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$  였으나, 1095°C 조건에서는 수명이 186-212 h, 연신율은  $\leq 6\%$ , 최소 크리프 속도는  $8.94\text{-}11.1 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ 로 나타나 재결정이 발생한 경우 수명과 연성 모두 저하되는 경향을 확인하였다. 적층 초기 미세조직을 유지하는 1065°C 조건은 열처리 후에도 평균 결정립 크기가  $36.04 \pm 22.46 \mu\text{m}$  수준으로 유지되어, 전위 활주 또는 전위 크리프 기구가 주요하게 작용하는 650°C/689 MPa 크리프 조건에서 상대적으로 높은 크리프 저항성을 기대할 수 있으며, 이에 따라 더 긴 크리프 수명이 나타난 것으로 판단하였다. 반면, 1095°C 조건에서는 열처리 전 [001] 방향으로 정렬되어 있던 주상정이 재결정에 의해 무작위 방위를 갖는 등축정으로 전이되면서 하중 축에 대한 결정립의 Schmid factor 분포 범위가 넓어지고 (1065°C 조건:  $0.47005 \pm 0.0173$ , 1095°C 조건:  $0.45976 \pm 0.0350$ ), 이에 따라 슬립이 유리한 결정립의 수가 감소하는데, 이는 크리프 변형이 진행됨에 따라 Schmid factor 차이가 큰 인접 결정립 간 변형 불일치 (strain incompatibility)가 증가하고 결정립계에 작용하는 응력을 상승시켜 결정립계 cavitation을 조기에 유발한 것으로 판단하였다. 따라서 재결정에 따른 크리프 특성 저하의 주요 요인은 Schmid factor 분포 범위 증가에 있다고 할 수 있으며, 이러한 경향은 적층제에만 국한되지 않고 단련재 등에서도 나타날 수 있는 현상이라고 판단하였다. 이를 확인하기 위해 IN718 압연 판재를 장시간 열처리하여 결정립 크기를 4배 이상 성장시킨 결과, 결정립 조대화에 따라 Schmid factor 분포 범위가 적층제에서와 같이 넓어지는 동일한 경향이 나타났으며, 크리프 변형 중 균열은 대부분 Schmid factor 차이가 큰 인접한 두 결정립 경계에서 발생한 것을 확인하였다. 이러한 과정으로 발생한 결정립 간 변형 불일치는 조기에 결정립계 균열을 생성하고 균일 변형 (homogenous deformation)을 저해하여 크리프 수명을 급감시키는 주요 원인으로 판단된다.

### [고온1-3 | 09:30]

Mo 첨가에 따른 Ni기 초내열합금의  $\gamma'$  형상 변화 및  $\gamma/\gamma'$  격자 불일치 거동 고찰: 김준훈, 백종민, 심예훈(국립창원대학교), 윤대원(한국재료연구원), 최윤석(부산대학교), 홍현욱\*(국립창원대학교)

**Keywords:** Ni-based superalloy, gamma-prime, Mo content,  $\gamma/\gamma'$  lattice misfit, morphological evolution, coarsening behavior

니켈기 초내열합금은 우수한 고온 강도와 크리프 저항성으로 인해 항공 및 발전용 가스터빈의 핵심 구조재로 널리 사용된다. 니켈

기 초내열합금에서  $\gamma'$  상의 석출은 주요 강화 기구로 작용하며, 고온 강도, 크리프 특성, 미세조직 안정성에 영향을 미친다. 특히  $\gamma/\gamma'$  계면의 격자 불일치(lattice misfit)와  $\gamma'$  석출물의 조대화 거동은  $\gamma'$  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  $\gamma'$  석출물의 발현 원인과 진화 거동을 규명하고자 하였다. 본 연구에서는 몰리브덴(Mo) 함량 변화에 따른  $\gamma'$  석출물의 형상 진화를 조사하였다. 미세조직 분석 결과, Mo 무첨가(0 wt%) 합금에서는 전형적인 구형(spherical)  $\gamma'$  석출물이 형성된 반면, Mo 함량이 9 wt%로 증가함에 따라 오목한(concave) 형상의  $\gamma'$  석출물이 관찰되었다. 각 합금에 대하여 고분해능 X선 회절(HR-XRD) 및 고해상도 투과전자현미경(HR-TEM)을 이용해  $\gamma$  기지와  $\gamma'$  석출물 간 격자 불일치( $\delta$ )를 정량적으로 측정하였으며, Mo 첨가에 따른  $\delta$  변화와  $\gamma'$  형상 간의 상관관계를 분석하였다. 또한 시효(aging) 시간 및 열처리 조건 변화에 따른  $\gamma'$  석출물의 크기·형상 변화를 분석하여,  $\gamma'$  석출물의 형상 진화 및 조대화 거동에 대해 고찰하고자 하였다.

#### [고은 1-4 | 09:45]

**Positive misfit 기반 Reverse residual stress 유도 설계 전략: 고온 In-situ HRXRD 측정을 통한 Ni기 초내열합금의  $\gamma/\gamma'$  lattice misfit 거동 분석:** 이아륜, 김태경(국립창원대학교), 김병세(아우라테크), 김경선, 김형섭(한국원자력연구원), 홍현욱\*(국립창원대학교)  
**Keywords:** Ni-based superalloys, Additive Manufacturing, L-PBF process, Positive lattice misfit, High-Resolution X-ray Diffraction, Strain-Aging Cracking

항공우주 및 가스터빈용 고온 부품 소재로서 Ni기 초내열합금은 고온·고압의 환경에서 우수한 내열성과 장기적 안정성을 제공한다.  $\gamma'$  분율이 높은 초내열합금은 적층제조 공정에서 높은 열구배로 균열 민감도가 증가하여 부품 수준의 신뢰성 확보에 제약이 따른다. 대부분  $\gamma/\gamma'$  간 negative misfit으로 적층 중 누적 잔류응력과  $\gamma'$  석출 유발 응력이 중첩되어 적층 및 후열처리 중 Strain-Aging Cracking(SAC) 민감도가 증가한다. 본 연구는  $\gamma$  기지에 압축 잔류응력을 유도하는 positive(=reverse) misfit을 핵심 설계 인자로 도입하여, 기존 잔류응력과 석출 유발 응력을 완화하는 합금 설계 전략을 제시하였다. IN738LC를 기반으로 positive misfit을 갖는 L-PBF 맞춤형 조성을 설계함으로써, 균열 저감 및 AM 공정 신뢰성 향상을 목표로 하였다. 개발합금은 L-PBF 적층 공정에서 near crack-free 수준의 건전성을 확보하였으며, IN738LC와 유사한 bimodal  $\gamma'$  조직과 분율(44.7%)을 유지하였다. 상온에서 HRXRD 기반 lattice misfit 정량 분석에서 개발합금은  $\delta=+0.31\%$ 로 IN738LC( $\delta=+0.02\%$ ) 대비 유의미하게 향상되었으며, 해당 합금을 738P-2로 명명하였다. 고온 작동조건에서 738P-2의 positive misfit 유지 여부를 검증하기 위해 in-situ HRXRD를 수행한 결과, 700°C까지 일정하게 유지되다가 이후 감소하였고, 800~900°C에서도 +0.15% 이상으로 positive misfit이 안정적으로 유지됨을 확인하였다. SAC 균열 저감 효과를 검증하기 위해 as-built 시편에 direct aging 열처리를 수행하였다. IN738LC는 시효 후 GND 밀도가 증가한 반면, 738P-2는 유사한 석출 거동에도 GND 밀도가 감소하였다. 또한 738P-2의 최대 균열 밀도는 IN738LC의 2.87% 대비 0.14%로 감소하여, misfit 제어 기반 reverse 잔류응력 유도가 AM 맞춤형 합금 설계 전략으로서 유효함을 입증하였다.

#### [고은 1-5 | 10:00]

**유연운전 환경에서 운전된 가스터빈 고온부품의 수명평가 및 열화 특성 분석:** 김영대, 송인환, 신동익, 정진성\*(한국전력공사)  
**Keywords:** Gas turbine, High-Temperature Components, Equivalent Starts, Life Assessment, Creep

최근 전력 계통의 운영 환경 변화에 따라 가스터빈은 기존의 기저부하(base load) 운전 방식에서 벗어나, 재생에너지 출력 변동을 보완하기 위한 빈번한 기동-정지(start-stop) 및 부하 추종 운전이 요구되는 운전 조건으로 변화하였다. 이러한 운전 패턴 변화는 가스터빈 부품의 수명 관리 기준에도 영향을 미치며, 특히 기동-정지 횟수를 반영한 Equivalent Starts(ES) 기준의 설계 수명이 상대적으로 빠르게 소진되는 반면, 누적 운전 시간을 기준으로 한 Equivalent Operating Hours(EOH) 기준 수명은 상당 부분 잔존하는 현상이 나타나고 있다. 이와 같은 ES-EOH 수명 소진의 불균형은 가스터빈 고온부품과 같이 고온 및 원심력을 동시에 받는 핵심 회전익 부품의 건전성 평가와 교체 시점 결정에 있어 중요한 기술적 이슈로 인식되고 있다. 설계 단계에서는 ES와 EOH를 각각 피로 및 크리프 손상에 대응하는 개별 수명 지표로 관리하고 있으나, 실제 운전 조건을 거친 사용품의 열화 거동이 이러한 설계 기준에 적절하게 반영되는지에 대해서는 충분한 검증이 이루어지지 않은 실정이다. 특히 최근 가스터빈 운전 형태와 같이 ES 기준 설계 수명에 도달하였음에도 불구하고 EOH 기준으로는 상당한 잔존 수명이 남아 있는 경우, 해당 부품을 단순 설계 기준에 따라 교체하는 것이 기술적으로 타당한지에 대한 검토가 요구된다. 본 연구에서는 기동-정지 반복이 지배적인 운전 이력을 가진 가스터빈 고온부 사용품을 대상으로 미세조직 열화 거동과 크리프 수명을 평가하고, 이를 통해 ES 증가 운전 조건하에서 부품 교체 판단에 기존 설계 기준을 적용할 수 있는지에 대한 실험적 근거를 제시하고자 한다. 본 연구는 한국중부발전(주)의 지원을 받아 수행된 「인천북항 가스터빈 고온부품 잔존수명평가」의 연구 결과임.

#### [고은 1-6 | 10:15]

**용융염 환경에서 순수 니켈의 결정학적 방향 의존적 부식 거동: 미량 철 불순물의 역할:** 이원찬, 김정환\*, 김대한(국립한밭대학교), 윤지현(한국원자력연구원)

**Keywords:** 용융염 원자로, 용융염 부식, 결정방향, 부식, 니켈

용융염 원자로(Molten Salt Reactor, MSR)는 높은 열효율, 고유의 수동적 안전성, 그리고 장주기 연속 운전이 가능하다는 장점으로 차세대 원자력 시스템으로 주목받고 있다. 그러나 염화물 기반 용융염 환경에서는 구조재의 부식 거동이 염 내 불순물과 재료의 결정학적 특성에 매우 민감하게 반응하여, 여전히 핵심적인 기술적 과제로 남아 있다. 특히 인공지능 기술의 급속한 확산으로 전력 수요가 급격히 증가함에 따라, MSR 구조재의 근본적인 부식 메커니즘을 규명하는 중요성은 더욱 부각되고 있다. 본 연구에서는 NaCl-MgCl<sub>2</sub> 공정 조성 용융염 환경에서 순수 니켈(Ni)의 부식 거동을 실험적으로 조사하였으며, 결정학적 방향에 따른 부식 특성

과 염 내 미량 철(Fe) 불순물의 영향을 증점적으로 분석하였다. Fe는 의도적으로 첨가되지 않았으나, 염 정제 이후에도 수십에서 수 백 ppm 수준의 잔존 불순물이 존재하였으며, 이러한 Fe가 부식 과정에 관여하는 것으로 판단되었다. 고온 용융염 침지 실험 후, EBSD 분석을 통해 결정방향을 분류하였고, EPMA를 이용하여 결정면에 따른 Fe의 국부적 축적 및 선택적 용출 거동을 정량적으로 분석하였다. 또한, SEM 관찰을 통해 결정립 규모에서의 표면 열화 거동을 평가하였다. 그 결과, 순수 Ni에서는 뚜렷한 결정방향 의존적 부식 거동이 관찰되었다. 국부적인 Fe 축적이 발생한 결정립에서 선택적 용출과 심각한 표면 열화가 집중적으로 나타났으며, 이러한 현상은 특히 {111} 계열의 특정 결정면에서 두드러졌다. 반면, {100} 계열과 같은 다른 결정방향을 갖는 결정립에서는 Fe 농축이 제한적이었고, 상대적으로 안정적인 표면 상태를 유지하였다. 이러한 결과는 용융염 내 미량 Fe 불순물이 표면 원자 배열 및 화학적 반응성의 차이에 의해 결정방향 의존적인 국부 부식 메커니즘을 유도할 수 있음을 시사하며, MSR 구조재의 장기적인 내부 식성 확보를 위해서는 염 불순물 제어와 결정학적 특성을 동시에 고려하는 접근이 중요함을 강조한다.

#### [고온1-7 | 10:30]

**제조 공정 및 합금 원소에 따른 Ni계 합금의 고온 산화 거동에 미치는 영향:** 김대현, 심재혁, 백건우, 메이리카 르윈, 이지운(국립공주대학교), 류호진(KAIST), 김형섭(포항공과대학교), 홍순직\*(국립공주대학교)

**Keywords:** High-temperature Materials, DED, Gas atomization, Oxidation behavior, Ni-based alloy

고온 및 적층제조용 Ni계 합금에서 표면 산화막의 초기 형성 및 성장 메커니즘은 공정 안정성과 고온 성능을 좌우한다. 본 연구에서는 합금 원소(특히 Fe) 첨가 효과와 제조 공정(Cast / GA / DED)에 따른 표면 산화 거동과 보호성 산화 스케일 형성에 미치는 영향을 규명하였다. 표면 화학상태 및 산화물 분포는 XPS 및 AES로 평가하였다. 분석 결과, Fe가 포함된 Ni-Cr-Al-Fe 분말은 Ni-Cr 풍부 산화물층의 형성을 유도하여 표면  $Al_2O_3$ 의 형성을 억제하였고, 그 결과 산화막 두께가 감소하며 막의 균일성이 향상되는 경향을 나타냈다. 반면 Ni-Cr-Al 분말은 국부적  $Al_2O_3$  미립자( $\approx 2$  nm)와 상대적으로 거친 표면 형태가 관찰되어 초기 산화의 불균일성이 확인되었다. 850–1150 °C에서의 등온 산화 후 두 분말 모두  $Cr_2O_3$  및 스피넬 계열 보호층이 형성되었으나, Ni-Cr-Al 분말에서는  $Al_2O_3$ 의 입계 확산이 더 깊게 진행되어 산화막 성장 및 조성 구배가 보다 뚜렷하였다. 이상의 결과는 Cr-Al 상호작용이 보호성 산화 스케일 형성에 기여함을 재확인하는 동시에, Fe가 표면 열역학 및 산화물 상 안정성을 조절하여 초기 산화 경로를 전환할 수 있음을 시사한다. 본 연구는 Ni 기반 분말의 합금 설계 및 표면 산화 제어 전략 수립에 기초 자료를 제공한다.

#### [고온2-1 | 10:55]

**물리 모델 기반 신경망(PINN)과 XGBoost 스택킹 앙상블을 이용한 니켈기 초합금의 하이브리드 크리프 거동 예측:** 공병욱\*, 전승묵((주)에이스이엔지 1), 현철호(한화에어로스페이스), 안상규((주)에이스이엔지1)

**Keywords:** 물리 모델 기반 신경망(PINN), 크리프 수명 예측, XGBoost 스택킹 앙상블,  $\theta$ -프로젝션 모델, Larson-Miller 파라미터(LMP), 데이터 물리적 정제

[연구 배경 및 목적] 고온 발전 설비 핵심 소재인 니켈기 초합금의 크리프 수명 예측은 설비의 신뢰성 확보를 위해 매우 중요하다. 그러나 실험 데이터의 희소성과 센서 노이즈는 일반적인 인공지능 모델이 물리 법칙을 위반하거나 외삽(Extrapolation) 영역에서 예측 성능이 급격히 저하되는 원인이 된다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 물리 모델을 신경망 학습 과정에 직접 통합한 PINN(Physics-Informed Neural Network)과 XGBoost 스택킹(Stacking) 기법을 결합한 하이브리드 예측 프레임워크를 제안한다. [연구 방법] 본 연구의 핵심은 신경망이 크리프의 열역학적 거동을 준수하도록 설계된 물리 모델 기반 손실 함수(Physics-informed Loss Function)를 적용하는 것이다. 첫째, 크리프의 핵심 물리 법칙인 단조성(Monotonicity,  $de/dt \geq 0$ )을 수치 미분 형태로 손실 함수에 내재화하여, 시간이 흐름에 따라 변형률이 감소하는 비물리적 거동을 원천 차단하였다. 둘째, Larson-Miller 파라미터(LMP)를 물리적 앵커(Anchor)로 활용하여, 특정 온도와 응력 조건에서의 경계 조건( $t=0$ 에서의 탄성 변형 및  $t$ 에서의 파단 조건)을 강제함으로써 모델의 물리적 일관성을 확보하였다. 데이터 측면에서는 센서 정제 구간을 평균 시간으로 압축하는 ‘플래토 압축’과 초기 구간의 비정상 거동을 단조 증가 형태로 재구성하는 전처리 루틴을 통해 PINN 학습을 위한 최적의 기초 데이터([Test\_data])를 구축하였다. 최종적으로, 물리적 통찰을 가진 PINN의 출력과 다양한 비선형 특성을 학습한 XGBoost 모델들을 스택킹(Stacking) 앙상블로 결합하여 예측 정밀도를 극대화하였다. [결과 및 고찰] 시편 기반 데이터 분할(Specimen-based splitting)을 통한 검증 결과, 제안된 모델은 일반 다층 퍼셉트론(MLP) 대비 결정계수( $R^2$ )가 크게 향상되었을 뿐만 아니라, 데이터가 존재하지 않는 미지의 영역에서도 물리 법칙을 준수하며 안정적으로 외삽되는 것을 확인하였다. 이는 PINN이 제공하는 물리적 가이드라인과 XGBoost의 고성능 회귀 능력이 시너지를 낸 결과로 분석된다. [결론] 본 연구는 고전적 물리 모델( $\theta$ -프로젝션, LMP)과 최신 AI 기법을 체계적으로 통합함으로써, 소량의 실험 데이터만으로도 높은 신뢰도를 보장하는 하이브리드 수명 예측 도구를 제시하였다. 해당 프레임워크는 향후 고온 부품의 건전성 관리 및 재료 설계 가속화에 기여할 것으로 기대된다.

#### [고온2-2 | 11:10]

**Effect of carbon content on dynamic recrystallization of modified Nimonic 80A under creep deformation:** Shaik Mahammad Ali\*, Hyungsoo Lee, Dae Won Yun, Young-Soo Yoo, Seong-Moon Seo, Hi Won Jeong(Korea Institute of Materials Science)

**Keywords:** Nimonic 80A, Dynamic recrystallization, Creep, Microstructure, Carbides.

The effect of carbon content on dynamic recrystallization (DRX) in a modified Nimonic 80A nickel-based superalloy was investigated during creep at 750 °C and 356 MPa. The low-carbon alloy (0.060 wt.% C) showed no evidence of DRX, with a creep life of 265 h. The lower carbon content reduces the volume fraction of  $M_{23}C_6$  carbides limiting dislocation pileups and local stress concentrations suppressing DRX nucleation. In contrast, the high-carbon alloy (0.079 wt.% C) exhibited clear DRX, together with an

increased creep life of 291 h and a higher creep strain of 7%. The higher carbon content promotes a greater volume fraction and more continuous chains of  $M_{23}C_6$  carbides along grain boundaries, intensifying dislocation pileups that drive nucleation of new, strain-free fine grains via discontinuous DRX. In addition, the higher carbide volume fraction strengthens the grain boundaries, improving their resistance to grain boundary sliding and thereby contributing to the enhanced creep life.

### [고은2-3 | 11:25]

LPBF 및 Wrought 공정으로 제조된 Inconel 625 합금의 고온 허용응력 설계를 위한 크리프 응력 민감도 비교: 석우영(한국재료연구원, 국립창원대학교), 이형수, 서성문(한국재료연구원), 홍현욱\*(국립창원대학교)

**Keywords:** Inconel 625, LPBF, Creep, Stress Sensitivity, Allowable Stress Design

Inconel 625 합금은 우수한 고온 강도와 내식성을 바탕으로 항공우주 및 발전 산업의 핵심 소재로 활용되고 있다. 기존 Wrought 공정으로 제조된 Inconel 625는 고온 크리프 강도 데이터가 충분히 확보되어 있으나, 적층 제조(LPBF) 소재의 경우 관련 데이터가 부족할 뿐만 아니라 Wrought재 대비 응력 변화에 훨씬 민감하게 반응하는 거동을 보인다. 따라서 안정적인 부품 설계를 위해서는 이러한 응력 민감도 차이를 반영한 새로운 허용 응력 기준 정립이 필요하다. 본 연구에서는 LPBF 및 Wrought 공정으로 제조된 Inconel 625 합금의 649°C 고온 인장 및 크리프 특성을 비교 분석하였다. 인장 실험 결과, LPBF재는 Wrought재 대비 조대한 결정립과 함께 높은 전위밀도로 우수한 고온 항복강도( $\sigma_{ys}$ )를 나타내었다. 크리프 시험은 항복강도에 준하는 높은 응력 조건에서 소재의 민감도를 평가하기 위해, 각 소재의 항복강도 대비 응력 비( $\sigma/\sigma_{ys}$ )를 0.98, 1, 1.1이 되도록 응력 조건을 설정하였다. 각 소재의 항복강도와 동일한 수준의 크리프 응력을 인가하였을 때( $\sigma/\sigma_{ys}=1$ ), 파단 수명은 Wrought재는 약 3, 800시간, LPBF재는 약 280시간이었다. 또한, 크리프 응력을 항복강도 대비 10% 증가(1.1  $\sigma_{ys}$ )시켰을 때 LPBF재의 경우 파단 수명이 80% 이상 급감하는 결과를 보였다. 이는 동일 조건에서 수명이 약 50% 감소한 Wrought재와 비교했을 때, LPBF재가 외부 응력 변화에 훨씬 민감하게 반응함을 의미한다. 결론적으로, 649°C, 고응력 환경에서 LPBF Inconel 625 합금은 Wrought재보다 급격한 크리프 강도 저하와 높은 응력 민감도를 나타내었다. 이는 실제 부품 운용 중 발생할 수 있는 미세한 과하중이 LPBF 부품에는 훨씬 심각한 파단 위험으로 이어질 수 있음을 시사한다. 따라서 향후 적층 제조 부품의 허용 응력 설계 시, 단순히 Wrought재의 데이터를 차용하는 것이 아니라, LPBF재 특유의 높은 응력 민감도를 고려한 훨씬 보수적인 설계 기준이 적용되어야 함을 의미한다.

### [고은2-4 | 11:40] Canceled

### [고은2-5 | 11:55]

Cr-Ni합금 적용 연소실 부품의 응축수 유도 응력부식 균열에 관한 재현평가: 김가연, 김성윤\*(현대차)

**Keywords:** 배기밸브, 응력부식 균열, 응축수, Cr-Ni합금, 복합부식시험, 재현평가

엔진 배기밸브에서 응축수로 인한 응력부식 균열(SCC)에 의한 파손이 발생하였다. 이 문제의 근본적인 원인 규명 및 대안 제시를 위해서는 실제 엔진 내구시험이 필수적이나, 장시간과 막대한 비용이 소요되는 한계가 있어 필드 파손 현상을 모사한 실험실 재현평가 조건 구축의 필요성이 대두되었다. 본 연구에서는 포괄적인 재현평가를 통해 대안 소재로서 Ni계 합금성분이 강화된 소재의 유효성을 검증하고자 수행되었다. 기존 협력사의 황산수용액 침지 평가는 실제 필드 파손 현상을 재현하지 못하였으므로, 응축수 모사용액 분무 + 고온 복합부식시험(CCT-SCC 모드)과 고온 열충격 모드의 두 가지 조건으로 5주간 평가를 진행하였다. 평가 대상 재료는 문제 재질(모재+용접부), 기본 모재(21Cr-4Ni), 강화재질 1(Ni 30%), 강화재질 2(Ni 40%)로 구성하였다. 결과적으로 CCT-SCC 모드에서 문제 재질은 최대 무게감량, 균열 발생 및 입계 파면을 나타내어 필드 파손과 유사한 파단 모드를 성공적으로 재현하였다. 반면 고온 열충격 모드는 전 재질에서 부식감량률 0.5% 이하로 응력부식 균열 재현이 미흡하였다. 본 연구에서 CCT-SCC 재현평가 조건의 유효성이 확인되었으며, 향후 이를 토대로 관련 부문에 공유하고 사전검증 프로세스 수립을 위한 평가법 규격화를 검토할 예정이다.

### [고은2-6 | 12:10] Canceled

변형 경로 분할 및 패스 간 대기시간에 따른 Inconel 718 2-pass 압축 미세조직 분석: 여승현, 안지섭, 허수빈(한국생산기술연구원, 부산대학교), 이상곤, 정명식(한국생산기술연구원), 김종식(KPCM), 황선광\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** Inconel 718, 2-pass, 변형 경로 분할, 미세조직, 다단공정

Inconel 718은 항공용 터빈 디스크 등 고신뢰성 부품에 널리 사용되며, 실제 제조 공정은 다단 단조와 패스 간 대기(interpass)를 포함하는 경로 의존적 소성 변형으로 구성된다. 그러나 기존 연구의 다수는 단일 압축조건에서의 유동거동 및 동적 재결정(dynamic recrystallization, DRX) 분석에 집중되어 있어 동일 총 변형 조건에서 변형 경로 분할이 미세조직 진화에 미치는 영향에 대해서 규명이 필요하다. 본 연구에서는 Gleeble-3800 GTC 장비를 활용하여 2-pass 고온 압축시험과 EBSD 분석을 통해, 동일 총 변형률 0.8 조건에서 변형 분할 및 패스 간 대기시간이 미세조직과 DRX 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 기준 조건으로 1000°C ~ 1100 °C, 0.1 s<sup>-1</sup>에서의 단일 압축과,  $\epsilon_1=0.3$  및  $\epsilon_2=0.5$ 로 분할한 2-pass 압축 조건을 비교하였으며, interpass time을 30초 단위로 120초까지의 시간을 설정하였다. 모든 시험은 최종 변형 직후 급랭하여 변형 중 조직을 보존하였다. EBSD 분석 결과, 동일 총 변형 조건에서도 2-pass 변형은 단일 압축과 비교하여 subgrain 구조의 분포 및 입계 특성에서 차이를 나타냈다. 특히 interpass time이 증가함에 따라 평균 Kernel Average Misorientation(KAM) 값과 저각입계(LAGB) 분율이 감소하는 경향이 확인되었으며, 이는 패스 간 정적 회복에 따른 저장에너지 완화를 반영하는 것으로 해석된다. 또한 2-pass 조건에서는 재결정립의 공간적 분포와



입도 분산이 단일 압축과 상이하게 나타나, 1차 변형에서 형성된 초기 subgrain 구조가 이후 조직 진화에 영향을 미칠 가능성을 시사하였다. 따라서 본 연구는 Inconel 718에서의 미세조직 진화가 단순한 온도-변형률 속도 조건뿐 아니라 변형 경로 분할과 interpass 이력에 의해 영향을 받음을 실험적으로 제시하며, 다단 단조 공정에서 패스 간 대기시간 및 변형 조건 설정에 대한 설계 지침 마련에 기초 자료를 제공한다.

#### [고은2-7 | 12:25]

**시뮬레이션 기반 항공엔진용 PQ IN718 소재 수침 PAUT 결함 분해능 비교 분석:** 유일현, 이승우, 박익근, 강동찬\*(서울과학기술대학교)

**Keywords:** PQ IN718, 수침 위상배열초음파검사, FMC(TFM/PCI), 시뮬레이션, 신뢰도

Ni-based Superalloy인 Premium Quality Inconel 718은 우수한 강도, 내산화성, 장기간의 안정성 등의 이유로 극한의 환경에서 운영되는 첨단 엔진용 항공소재 부품으로 널리 쓰인다. 이러한 항공엔진 소재는 생산단계에서 비파괴검사를 통해 신뢰도를 확보하고 있으며, 특히 수침 초음파검사가 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 수침 위상배열초음파검사(Phased Array Ultrasonic Testing; PAUT) 시스템을 적용하여 5MHz 탐촉자를 통해 PA(Linear, Sectorial) 모드, Full Matrix Capture; FMC(Total Focusing Method; TFM, Phased Coherence Imaging; PCI) 기법간의 결함 분해능의 차이를 비교 분석하였다. 또한, IN718 소재의 특성을 반영하기 위해 실험을 통해 얻어진 감쇠계수, 종파속도 등의 초음파적 특성을 시뮬레이션에 적용하여 Linear, Sectorial, TFM, PCI의 결함 검출 비교분석을 수행하였다. 결함은 크기 0.4 ~ 1.6 mm, 깊이 5 ~ 65 mm의 Flat Bottom Hole을 설계하였다. 결함 분해능은 Root Mean Square Equation; RMSE와 Signal-to-Noise; SNR을 통해 정량적으로 비교분석을 하였고 TFM과 PCI 기법이 우수한 결함 분해능이 나타났다.

## P1 : 학생세션

Room 3층 로비, 4월 28일

### [P1-1]

Atomic-Scale Characterization of Elemental Distribution in Ru Catalyst for OER reaction: DooHyo Jeong, Se-Ho KIM\*(Korea Univ.)

**Keywords:** 수전해, 촉매

Ruthenium-based catalysts are widely used for water splitting reactions, serving as active catalyst for both HER and OER. For the OER, Ru catalysts exhibit superior activity and relative cost advantages compared to Ir; however, long-term operation is limited by degradation associated with oxidation and dissolution. Elucidating the time-dependent oxidation behavior of Ru is therefore directly related to improving the operational reliability of alkaline water electrolysis systems. This study was conducted in 0.1 M KOH to simulate alkaline OER conditions relevant to alkaline water electrolysis systems (AWE/AEM). By revealing the oxidation behavior and changes in elemental distribution of Ru after OER reactions at various times, this study aims to directly address durability issues of Ru catalysts in AWE/AEM systems.

### [P1-2] Canceled

극저온 처리가 AA6061-T6에 미치는 기계적 물성 및 미세조직 변화: 전태민, 강현학, 전태성\*(인천대학교)

**Keywords:** 알루미늄 합금, 극저온 처리, 기계적 물성, 미세조직

본 연구는 극저온 처리가 6061-T6 알루미늄 합금의 기계적 특성 및 미세조직에 미치는 영향을 다중 분석 기법을 통해 체계적으로 규명하였다. 인장시험 결과 극저온 처리 공정을 적용한 시편은 기존 시편 대비 최대 인장강도가 8.89%, 안정적인 변형을 동반한 연신율이 49.59% 향상되었다. 이와 동시에 항복강도 12.09 MPa 감소가 관찰되었다. 이는 강도와 연성이 동시에 개선됨과 동시에 항복강도가 낮아진 결과, 판재 성형 공정을 통한 차량 구조물 제작에 유리한 특성이 유도되었음을 시사한다. XRD 분석 결과, 극저온 처리 후 지배적인 결정 배향이 (200)에서 (220)으로 이동한 것을 확인하였다. 이러한 배향 변화는 EBSD 분석을 통해 보다 구체적으로 검증되었다. 기존 {110} 면에서 최대 강도 7.92를 나타내던 강한 텍스처가 극저온 처리 이후 최대 강도 5.45로 감소하면서 전반적으로 균일한 결정방위 분포를 형성함을 확인하였다. 또한, 극저온 처리 및 후속 공정 과정에서 결정립이 조대화되었다. 이러한 텍스처 약화와 결정립 변화는 DIC 분석을 통한 균일한 변형 분포 및 높은 인장 변형률과 밀접하게 연관되는 결과로 해석된다. 한편, XRD 피크 반가폭 증가를 기반으로 계산한 결과, 극저온 처리 후 미세변형과 전위 밀도가 증가한 것으로 나타났다. 증가된 전위는 인공 시효 과정 중 용질 원자의 편석을 유도하는 핵생성 사이트로 작용하여,  $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si 석출상의 보다 균일한 분포를 촉진한 것으로 판단된다. 결과적으로 기존 시편에서 우세했던 전위 기반 강화 기구는 극저온 공정 이후 전위 강화와 석출 강화가 공존하는 복합 강화 체계로 전환됨. 두 시편에서 전위와 석출을 통한 강화의 총 기여도는 유사한 수준으로 판단된다. 따라서, 항복강도의 감소는 주로 결정립 조대화에 따른 Hall-Petch 효과 감소에 기인한 것으로 해석된다. 종합적으로, 극저온 처리는 결정 배향 약화, 전위 밀도 증가, 균일한 석출 분포 형성을 통해 변형 안정성을 향상시키면서도 판재 성형에 적합한 기계적 특성 조합을 구현하는 효과적인 공정을 제안한다.

### [P1-3]

Al-7Si 합금에서 Mn 첨가에 따른 금속간화합물의 형태학적 변화가 주조 특성에 미치는 영향: 손동환, 한인성\*(경북대학교)

**Keywords:** 알루미늄 합금, 금속간화합물, 방사광가속기

본 연구는 알루미늄 합금 재활용 과정에서 추가로 첨가되는 미량의 Mn이 금속간화합물 및 주조 결함에 미치는 영향을 규명하고자 수행되었다. 자동차 엔진용 구조 재료로 널리 사용되는 Al-Si 합금에 포함되는 불순물 Fe는 응고 과정에서 침상  $\beta$ -AlFeSi 상을 형성하며, 이는 용탕의 유동성을 저하시켜 주조 품질을 악화시키는 주요 요인으로 작용한다. 본 연구에서는 Mn 첨가를 통해 해당 상을 비교적 덜 유해한  $\alpha$ -AlFeSi 상으로 변태시켰으며, 이에 따른 미세조직 및 주조 품질 개선 효과를 정량적으로 검증하였다. 우선, 최종 응고 조직을 대상으로 MATLAB 기반 알고리즘을 활용한 금속간화합물 정량 분석 기법을 적용하였다. Watershed 분할 및 모폴로지 연산을 통해 겹쳐진 금속간화합물 객체를 개별적으로 분리하였으며, 원형도(circularity)와 이심률(eccentricity) 등의 형상 계수를 산출하여 형태학적 변화를 정량화하였다. 또한 방사광가속기 기반 X-선 이미징을 활용하여 금속간화합물의 상 선택 및 성장 거동을 실시간으로 추적하였으며, EDS 분석을 통해 각 상의 조성을 정밀 검증함으로써 분석의 신뢰도를 확보하였다. 본 연구는 ex situ 형상 정량 분석과 in situ 방사광 이미징을 통합함으로써 재활용 알루미늄 합금의 미세조직 제어와 주조 품질 간의 상관관계를 객관적으로 평가할 수 있는 분석 프레임워크를 제시한다.

### [P1-4]

A356 합금에서 용체화 시간에 따른 기공률과 저주기 피로 특성과의 상관관계 분석: 이연진, 윤영준, 정창열\*(동국대학교 WISE캠퍼스)

**Keywords:** A356, Zr, Solution Treatment, Porosity, Low-Cycle Fatigue

중력주조 공법을 이용한 A356 합금은 중량대비 기계적 특성이 우수하여 경량소재로 사용되나, 주조 과정에서 내부 기공과 같은 결함이 발생하기 쉽다. 또한, 열처리 과정에서 발생하는 기공의 성장은 소재의 수명과 기계적 특성을 저하시키는 주요 원인으로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 Cu 및 Zr을 첨가한 A356 합금에 대하여 용체화 시간에 따른 기공률 변화와 저주기 피로 특성을

비교 분석하였다. 미세조직 관찰 결과, A356 및 0.5Cu 첨가 합금은 용체화 시간이 증가함에 따라 기공의 성장 및 병합에 의해 기공률이 증가하였으나, 0.2Zr 및 0.5Cu-0.2Zr 첨가 합금은 장시간의 열처리 후에도 낮은 기공률을 유지하였다. 용체화 시간이 6시간에서 24시간으로 증가함에 따라 A356 및 0.5Cu 첨가 합금은 기공률 증가에 따른 신율 감소 현상을 나타냈으나, Zr 첨가 합금에서는 신율이 유지 또는 증가하는 결과를 나타내었는데, 이는 Zr의 확산 억제 효과로 판단된다. 저주기 피로 결과, Coffin-Manson 관계에서는 24시간 용체화 처리한 A356 합금의 수명이 가장 길었으나, 강도를 같이 고려한 Loop Energy 관계에서는 24시간 용체화 처리한 0.5Cu-0.2Zr 첨가 합금의 수명이 가장 길게 나타났다. Zr이 첨가되지 않은 합금에 대하여 용체화 시간이 증가함에 따라 기공률 증가에 따른 피로 수명 감소 현상이 관찰되었다. 이에 따라 주사전자현미경(SEM)과 EDS를 이용하여 저주기 피로 특성에 영향을 미치는 기공의 생성기구를 분석하였다.

#### [P1-5]

**Cu 함량 및 초음파 처리에 따른 Fe 기반 연자성 합금 리본의 미세조직 및 자성특성:** 강태연, 한선구, 이연주, 최현주\*(국민대학교)

**Keywords:** 철계 연자성 합금, 비정질, 나노결정질, 초음파 처리, 연자성 특성

연자성 합금의 우수한 자성 특성은 낮은 보자력과 높은 포화자화를 통해 자화가 빠르고 효율적으로 이루어지는 것에 기인하며, 이를 위해서는 나노 결정립 구조의 형성이 필수적이다. 일반적으로 나노 결정립은 비정질 리본을 결정화 온도 부근에서 열처리함으로써 얻어지며, 이 과정에서 Cu는  $\alpha$ -Fe의 핵생성 사이트로 작용하는 중요한 원소로 알려져 있다. 그러나 Cu는 상대적으로 고가이며, 과도한 첨가는 조성 설계 및 공정 측면에서 한계를 가진다. 본 연구에서는 Cu 의존적 핵생성 메커니즘을 보완하기 위해 Cu의 함량을 감소시키는 대신, 초음파 처리를 통해 리본 표면에 결함(defect)을 형성하여 새로운 핵생성 사이트를 유도하고, 활성화 에너지를 저감함으로써 표면에는 나노결정립을 형성하고 내부에는 비정질 구조를 유지하는 구조 제어 전략을 제안하였다. 이를 위해 멜트 스피닝 공정을 통해 Cu 함량별 Fe 기반 합금 리본을 제조하였으며, 초음파 처리 시간 변화가 결정화 거동, 미세조직 및 자성 특성에 미치는 영향을 DSC, XRD, SEM 및 VSM을 통해 체계적으로 분석하였다. 이를 통해 Cu 함량과 초음파 처리 조건에 따른 결정 구조 변화와 자성특성 간의 상관관계를 규명하고자 하였다.

#### [P1-6]

**Micro-cone 형상 도금을 통한 HBM용 저온 Cu-Cu 확산 접합:** 김미린, 안성민, 김정한\*(국립한밭대학교)

**Keywords:** 금속, 구리, 도금, 마이크로콘, 접합

AI 기술의 발전과 함께 고성능·고집적 반도체 수요가 급증하고 있으며, 특히 대규모 데이터 처리를 위한 고대역폭 메모리(High Bandwidth Memory, HBM)의 중요성이 크게 부각되고 있다. HBM은 다층 적층 구조를 통해 높은 대역폭과 집적도를 구현하는 기술로, 적층 수 증가에 따라 접합 두께 감소와 계면 신뢰성 확보가 핵심 과제로 대두되고 있다. 이에 따라 초박형·고신뢰성 접합 기술의 확보는 HBM 고적층화 및 대용량화를 위한 필수 요소로 인식된다. 최근에는 기존 솔더 접합을 대체하기 위한 하이브리드 구리 본딩(Hybrid Copper Bonding, HCB) 기반 구리-구리(Cu-Cu) 확산 접합 기술이 유망한 대안으로 주목받고 있다. Cu 직접 접합은 솔더 대비 접합 두께를 감소시킬 수 있으며, 금속간화합물 형성을 최소화하여 전기적 저항 감소 및 electromigration 저항성 향상 측면에서도 유리하다. 그러나 기존의 플랫 구조 기반 접합에서는 저온 조건에서 원자 확산이 충분히 이루어지지 않아 접합 강도가 제한되는 한계가 존재한다. 또한 화학적 기계 연마 공정(Chemical mechanical polishing, CMP)은 공정 복잡도와 비용을 증가시키는 요인으로 작용한다. 본 연구에서는 기계적 결합 효과를 도입하기 위해 전해도금을 활용하여 micro-cone 형상의 Cu 도금층을 제작하였다. 도금 조건에 따라 micro-cone 높이와 밀도가 변화함을 확인하였으며, CMP 공정 없이 간단한 저온 표면처리 후 Cu-Cu 본딩을 수행하였다. 구조적 효과를 비교하기 위해 동일 조건에서 플랫 Cu 도금층 간 접합도 병행하여 진행하였다. 접합 강도 평가 결과, 마이크로콘 구조를 적용한 시편은 플랫 구조 대비 높은 전단 강도를 나타내었다. 이는 micro-cone 형상으로 인한 유효 접합면적 증가와 기계적 앵커링 효과에 기인한 것으로 판단된다. 또한 확산 접합 이후의 후열처리는 계면 원자 확산을 촉진하여 결합 강도를 추가적으로 향상시키는 것으로 확인되었다. 본 연구 결과는 micro-cone 구조가 저온 조건에서도 안정적인 Cu-Cu 접합을 가능하게 함을 보여주며, CMP 공정 생략을 통한 공정 단순화 가능성을 제시한다. 이는 HBM의 고적층화 및 메모리 용량 증대에 기여할 수 있는 구조적·공정적 대안을 제공한다.

#### [P1-7]

**인공지능 조성 설계를 통한 철계 연자성 합금의 보자력-포화자화 특성 최적화:** 한선구, 강태연, 이연주, 박세진, 조기섭, 최현주\*(국민대학교)

**Keywords:** 철계 연자성 합금 설계, 보자력, 포화자화, 인공지능, 준지도학습

철계 연자성 합금은 변압기, 인덕터 및 전력전자 소자 등 다양한 응용 분야에서 사용되며, 낮은 보자력과 높은 포화자화를 동시에 요구받는다. 그러나 일반적으로 보자력과 포화자화는 상충 관계에 있어, 특정 특성을 향상되면 다른 특성이 저하되는 문제가 발생한다. 이로 인해 연자성 합금의 성능 향상을 위해서는 보자력과 포화자화를 동시에 고려할 수 있는 새로운 조성 설계 접근법이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 요구에 대응하기 위해 준지도학습 기반 인공지능을 활용한 철계 연자성 합금 조성 설계를 수행하였다. 보자력 최소화, 포화자화 최대화, 그리고 포화자화 대 보자력의 비를 설계 목표로 설정하여 서로 다른 조성군을 도출하고, 도출된 조성군 합금을 멜트 스피닝 공정을 통해 리본 시편으로 제조하였다. XRD 및 DSC 분석 결과, 인공지능 설계 목표에 따라 초기 미세구조와 결정화 거동이 조성군별로 상이하게 나타났으며, 이러한 차이는 VSM 측정을 통해 확인된 자기적 특성 변화와 밀접하게 연관되는 것으로 확인되었다. 특히 포화자화 대비 보자력을 동시에 고려한 통합 지표 기반 조성군에서 보자력과 포화자화의 균형이 가장 우수한 연자성 특성이 구현되었다. 이는 준지도학습 기반 조성 설계가 상충 자기적 특성을 동시에 최적화하는 고성능 연자성 재료 개발에 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준다.

**[P1-8]**

**인공지능 기반 재료 압출식 프린팅-소결 공정 조건 최적화 시스템 개발:** 오예지, 이민정, 양재우, 김민중, 이선영\*(한양대학교 ERICA)

**Keywords:** 재료 압출식(Material Extrusion, MEX) 3D 프린팅, 공정 최적화, 인공지능, 알루미늄, 알루미늄, 철

재료 압출식(Material Extrusion, MEX) 3D 프린팅은 분말과 바인더를 혼합해 제조한 피드스톡을 성형하는 적층 제조 공정으로, 금속 및 세라믹 소재에 폭넓게 적용 가능하다. 그러나 원료 분말의 특성에 따라 프린팅 조건이 달라지며, 바인더 기반 공정 특성상 디바인딩 및 소결 공정 또한 필수적으로 수반된다. 특히 소결 조건 역시 원료 특성에 크게 의존하여, 소재가 변경될 때마다 프린팅-소결 전 공정 조건을 경험적으로 반복 탐색해야 하므로 공정 개발 시간과 비용이 증가한다. 이러한 문제를 극복하고자, 본 연구에서는 금속 및 세라믹 계열 소재인 Al, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe를 대상으로 MEX 프린팅-소결 전 공정에 대한 인공지능 기반 공정 최적화 시스템을 구축하였다. 프린팅 단계에서는 압출 온도, 적층 속도, 압출량 등을 주요 변수로 설정하고, 상대 밀도와 치수 정밀도를 출력 지표로 정의하였다. 이를 바탕으로 XGBoost 기반 예측 모델을 구축하여 공정 조건과 물성 간의 비선형 관계를 학습하고, 최적 프린팅 조건을 도출하였다. 이후 소결 단계에서는 소결 온도, 유지 시간, 승온 속도 등을 변수로 설정하여 치밀화 거동을 분석하고, Active Learning 기법을 적용하여 제한된 실험 데이터 하에서 소결 공정의 최적 조건을 도출하였다. 본 연구는 프린팅과 소결 단계에 각각 적용된 인공지능 모델을 기반으로 재료 압출식 프린팅-소결 공정 조건 최적화 시스템을 개발하고, MEX 공정에서의 데이터 기반 적층 제조 플랫폼 구축 가능성을 제시하고자 한다.

**[P1-9]**

**머신러닝을 활용한 열처리 공정 변수 제어 기반 CoCrFeMnNi 합금 인장 물성 예측 및 최적화:** 황예민, 이준석, 신필욱, 배재웅\*(부경대학교)

**Keywords:** 머신러닝, 가우시안 프로세스 회귀, 베이지안 최적화, CoCrFeMnNi, 열처리

고엔트로피 합금(high-entropy alloys, HEAs)은 우수한 기계적 특성으로 차세대 구조 재료로 주목받고 있으나, 다성분 조성과 복잡한 열처리 공정 변수로 인해 방대한 공정-물성 파라미터 공간을 탐색해야 한다는 한계를 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 데이터 기반 머신러닝 접근을 도입하여 열처리 공정 변수에 따른 인장 물성을 예측하고 최적 공정 조건을 도출하고자 하였다. 연구 대상 합금으로는 고엔트로피 합금의 대표적 모델 시스템인 등원자비 CoCrFeMnNi 합금을 선정하였다. 문헌 데이터를 수집하여 열처리 온도와 시간 등의 공정 변수를 입력 특성(input features)으로, 항복강도-인장강도-연신율을 목표 변수(target variables)로 하는 예측 모델을 구축하였다. 모델은 가우시안 프로세스 회귀(Gaussian process regression, GPR)를 기반으로 하였으며, 실험 데이터를 통해 예측 정확도를 검증 및 보정하였다. 학습된 GPR 모델을 대리 모델(surrogate model)로 활용하여 베이지안 최적화(Bayesian optimization, BO)를 수행함으로써 목표 물성을 만족하는 공정 조건을 탐색하였다. 도출된 최적 공정 조건에 대해서는 추가 실험을 통해 모델 예측의 신뢰성을 확인하였다.

**[P1-10]**

**머신 러닝을 활용한 고강도 특수강(Armox®500T)의 기계적 물성, 미세조직 및 용접부 특성 간 상관관계 분석:** 진소희\*(국립한밭대학교)

**Keywords:** 가스메탈아크용접(GMAW), 머신러닝, 용접부 미세조직, 기계적 특성

우수한 방탄 성능을 갖는 고강도 특수강의 용접부 특성을 체계적으로 평가하여 장갑차량 제작을 위한 기초 자료를 확보하고자 하였다. 본 연구에서는 두께 38 mm의 Armox 500T 강판을 대상으로, 수입재 상태에서의 미세조직과 경도, 인장 및 샤르피 충격 특성 등 기계적 특성을 분석하였다. 가스메탈아크용접(GMAW) 공정을 이용한 맞대기 용접을 수행하였으며, 용접 전류, 전압, 입열량 및 용접 속도와 같은 주요 공정 변수들이 용접부 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 용접 후 열처리(PWHT) 유무에 따른 미세조직 변화는 주사전자현미경(SEM) 및 전자후방산란회절(EBSD)을 통해 분석하였다. 또한 공정 변수, 미세조직, 그리고 용접부 기계적 특성 간의 복잡한 상관관계를 규명하기 위해 머신러닝 기법을 적용하였다. 제한된 실험 데이터에서도 효과적인 학습이 가능한 가우시안 프로세스 회귀(Gaussian Process Regressor, GPR)를 사용하여 예측 모델을 구축하였으며, 예측 불확실성을 정량적으로 평가하고 반복적 재학습을 통한 모델 성능 향상을 도모하였다. 모델의 예측 성능은 평균제곱오차(MSE), 평균제곱근오차(RMSE), 결정계수(R<sup>2</sup>)를 통해 검증하였다. 본 연구에서 제한한 실험-계산 통합 접근법은 고강도 특수강 용접부의 공정 최적화 및 용접 소모재 설계에 대한 정량적 지침을 제공하며, 방위산업 분야에서 용접부 신뢰성 향상 제조 경쟁력 확보에 기여할 것으로 기대된다.

**[P1-11]**

**WE43 마그네슘 기반 B<sub>4</sub>C 및 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 강화 금속기지복합재의 우주 방사선 차폐 성능에 대한 몬테카를로 시뮬레이션 연구:**

이태규, 정성훈, 이재훈, 이민서\*, 이민제(국립한밭대학교)

**Keywords:** 마그네슘 합금, 시뮬레이션(PHITS)

마그네슘 합금은 기존 알루미늄 합금 계열 대비 높은 비강도를 가져, 낮은 중량에서 우수한 기계적 강도를 확보할 수 있어 우주 항공 기술 분야의 핵심 구조 소재로 주목받고 있다. 특히 WE43 합금은 우수한 열안정성과 내부식성을 동시에 확보한 소재로, 우주 환경에서 전자-반도체 소자를 보호하기 위한 기저 물질로 활용 가능성이 높다. 이러한 기저 재료에 세라믹 강화상인 B<sub>4</sub>C 또는 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 도입한 금속기지복합재(metal matrix composite)는 기존 단일 금속 대비 향상된 기계적 특성과 방사선 차폐 성능을 동시에 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 우주 환경에서는 고에너지 양성자 및 중성자에 의한 방사선 손상이 지속적으로 발생하며, 이는 인공위성 내부 반도체 소자의 신뢰성 저하로 이어질 수 있다. 기존 알루미늄 기반 차폐재는 경량성 측면에서는 유리하나, 고에너지 양성자 및 이로부터 발생하는 2차 중성자에 대한 차폐 성능에는 한계가 존재한다. 특히 B-10과 Gd-157 동위원소는 각각 3837 및 255000 barns의 높은 열중성자 흡수 단면적을 가지며, 이를 활용한 차폐재는 2차 중성자 감쇠에 효과적인 것으로 알려져 있다. 그러나 기존 연구들은 주로 중성자 흡수 성능에 초점을 맞추어 진행되었으며, 고에너지 양성자에 의해 유발되는 하드론 샤워 및 저에

너지 입자 거동에 대한 정량적 분석은 상대적으로 부족한 실정이다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 경량 고강도 소재인 WE43 마그네슘 합금을 기저재로 선정하고,  $B_4C$  및  $Gd_2O_3$ 를 강화상으로 도입한 복합재의 방사선 차폐 성능을 평가하였다. 실제 우주 환경에서의 실험적 검증이 어려운 점을 고려하여 몬테카를로 방사선 수송 시뮬레이션 코드인 PHITS를 활용하였다. 1차 외벽-폴리에틸렌-복합재로 구성된 다층 차폐 구조를 설정하여, 외벽에서의 비탄성 산란을 통한 고에너지 입자 감쇠와 폴리에틸렌의 수소에 의한 탄성 산란 효과를 단계적으로 분석하였다. 또한  $Gd_2O_3$  함량 변화(0-30 vol%) 및 강화상 종류에 따른 양성자와 중성자의 fluence 및 DPA 변화를 비교 분석하였다. 시뮬레이션 결과,  $Gd_2O_3$  함량이 증가할수록 양성자 및 중성자의 fluence와 DPA가 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 가돌리니아의 높은 원자번호와 중성자 흡수 단면적에 기인한 결과로 판단된다. 또한 고에너지 영역에서는  $B_4C$ 와  $Gd_2O_3$  모두 효과적인 감쇠 성능을 보였으나, 저에너지 양성자 영역에서는  $Gd_2O_3$ 가 상대적으로 높은 fluence를 나타냈으며, 이는 질량수가 큰 Gd에 의해 핵 캐스케이드가 발생하여 에너지가 더 낮은 다수의 입자로 분할되었기 때문으로 해석된다. 이러한 결과를 통해 WE43 기반 복합재가 경량 방사선 차폐 소재로서 우주항공 분야에 적용 가능성이 있음을 확인하였다.

#### [P1-12]

**DED 기반 Nb-Si계 초고내열 합금의 합금 원소 첨가에 따른 미세조직 및 산화·기계적 특성 평가:** 이태규\*, 정성훈, 이재훈, 이민제 (국립한밭대학교)

**Keywords:** DED, Nb-Si계 합금, 고온 산화 거동, 기계적 특성

Nb-Si 기반 초고내열 합금은 1, 200°C 이상의 극한 환경에서 적용 가능한 차세대 고온 구조재료로 주목받고 있다. 그러나 낮은 상온 파괴인성과 취성적인 실리사이드 상 거동, 그리고 약 800°C 부근에서 발생하는 페스팅 산화는 실용화를 제한하는 주요 문제로 보고되고 있다. 또한 적층 제조 공정에서는 급속 응고와 열구배에 의해 비평형 미세조직과 방향성 주상정이 형성되며, 이는 기계적 거동과 산화 특성에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 Nb-Si계 합금의 조성 설계와 적층 공정 적용에 따른 미세조직 및 물성 변화를 조사하기 위해 Nb-Si-Ti-B, Nb-Si-Ti-Zr<sub>2</sub>B, Nb-Si-Ti-Zr<sub>2</sub>B-Hf 조성을 설계하였다. 설계된 조성을 바탕으로 SMART 공정을 통해 합금 분말을 제조하였으며, 이를 Directed Energy Deposition(DED) 공정에 적용하여 적층 시편을 제작하였다. Ti는 Nb 고용체 상(Nb<sub>ss</sub>)의 형성과 밀도 조절을 고려하여 첨가하였고, B 및 Zr<sub>2</sub>B는 미세조직 제어 가능성을 검토하기 위해 도입하였다. Hf는 고온 산화 환경에서 형성되는 산화상의 특성 변화를 확인하기 위한 목적으로 첨가하였다. DED 공정으로 제조된 시편의 미세조직은 광학현미경, 주사전자현미경 및 X-선 회절을 통해 분석하였다. 적층 방향에 따른 조직 형성 특성, 상 분포 및 실리사이드 형성 양상을 조성별로 비교하였다. 고온 등온 산화 실험을 통해 조성에 따른 질량 변화 거동을 측정하고, 산화 스케일의 형성과 특성을 관찰하였다. 또한 약 800°C 영역에서의 산화 거동 변화를 함께 분석하였다. 상온 기계적 특성 평가는 3점 굽힘 시험을 통해 수행하였으며, 조성 별 굽힘 거동과 파괴 양상을 비교하고 미세조직 특성과의 상관성을 분석하였다. 본 연구는 DED 기반 Nb-Si계 합금에서 조성 변화가 미세조직 형성, 산화 거동 및 굽힘 특성에 미치는 영향을 체계적으로 비교·분석하였다. 아울러, Nb-Si 기반 초고내열 합금의 적층 제조 가능성을 확장하기 위한 기초 자료로서의 의미를 제시하고, 향후 정밀 미세조직 분석 및 고온 변형 거동 평가를 통해 연구 범위를 심화할 계획이다.

#### [P1-13]

**ZrC 첨가에 따른 DED 기반 니켈계 초합금의 균열 저감 연구:** 이태규\*, 이민제, 정성훈, 이재훈(국립한밭대학교)

**Keywords:** 니켈계 초합금, 직접 에너지 적층, 금속기지복합재, 응고 균열

CM247LC는 가스터빈 블레이드와 같은 고온 핵심 부품에 적용되는 대표적인 니켈 기반 초내열합금으로, 높은  $\gamma'$  석출물 분율을 바탕으로 우수한 고온 강도와 크리프 특성을 가진다. 그러나 해당 합금은 주조 공정을 전제로 설계되어 제조 비용이 높고, 국부 손상이 발생할 경우 전체 부품 교체가 요구되는 한계를 가진다. 이에 따라 부분 수리 및 형상 복원이 가능한 적층제조 공정이 대안으로 제시되고 있으며, 직접 에너지 적층(Directed Energy Deposition, DED) 공정은 기존 부품 위에 직접 적층이 가능하다는 점에서 수리 공정에 적합한 기술로 평가된다. 하지만 CM247LC를 DED 공정에 적용할 경우 높은 균열 민감도가 문제로 나타난다. DED 공정은 비교적 큰 용융풀과 높은 열구배를 형성하며 반복적인 급가열·급냉각 과정에서 비평형 응고가 발생한다. 이 과정에서 응고 말기 저융점 액상 필름이 형성될 수 있으며, 잔류-응고 응력과 결합될 경우 결정립계를 따라 응고 균열이나 액화 균열이 발생할 가능성이 있다. 또한, DED 공정에서 형성되는 주상정 조직은 균열 전파의 연속 경로로 작용할 수 있다. 이러한 특성은 CM247LC의 DED 기반 수리 적용을 제한하는 주요 요인으로 작용한다. 현재 CM247LC의 균열을 완화하기 위한 연구는 크게 화학 조성 수정, 공정 조건 최적화, 후처리, 복합재 개발로 구분된다. 이 중 금속기지복합재 접근법은 기존 합금 조성을 크게 변경하지 않으면서 미세조직을 제어할 수 있다는 점에서 주목받고 있다. 기존 연구에서는 TiC 기반 MMC를 통해 결정립 미세화를 유도한 사례가 보고되었으나, 균열 민감도는 여전히 주요한 한계로 남아 있다. 이에 본 연구에서는 ZrC를 첨가한 CM247LC 기반 MMC를 설계하고, SMART 공정을 통해 제조한 분말을 DED 공정에 적용하였다. 공정 변수의 영향을 배제하기 위해 레이저 출력, 주사 속도 및 분말 공급 조건을 동일하게 유지한 상태에서 ZrC 첨가 여부에 따른 균열 거동을 비교하였다. 광학현미경 및 주사전자현미경 분석 결과, ZrC 첨가 시 균열 밀도가 감소하고 일부 균열 전파 경로가 단절되는 경향이 관찰되었다. 또한, 전자후방산란회절을 통해 결정립 크기 및 조직 형태를 비교하고, 커널 평균 방위차분석을 통해 국부 변형 분포를 평가하였다. 그 결과 ZrC 첨가 시 결정립 미세화와 함께 국부 변형 집중 영역이 감소하는 양상이 확인되었다. 이러한 결과는 ZrC 첨가가 응고 과정에서 결정립계 특성 및 미세조직 형성 거동에 영향을 미쳐 균열 개시 및 전파를 완화했을 가능성을 시사한다. 본 연구는 ZrC 첨가가 DED 기반 CM247LC의 균열 저항성 향상에 기여할 수 있는 하나의 설계 방향이 될 수 있음을 제안한다.

**[P1-14]**

**디퓨전커플을 활용한 Fe-XNi 마르텐사이트강의 하이스루풋 데이터 추출:** 주성환, 장하량, 이태경, 김지훈\*(부산대학교)

**Keywords:** 디퓨전커플, 하이스루풋실험, 기계학습, 마르텐사이트강, 저온인성

최근 합금 개발 분야에서 인공지능(AI)의 활용이 급격히 확대되고 있음. 인공지능을 활용한 합금 설계를 위해서는 대규모의 신뢰성 있는 데이터 확보가 필수적이며, 이를 위해 기존에는 다수의 선행 논문으로부터 데이터를 수집·활용하는 방식이 주로 사용되어 왔음. 그러나 문헌 데이터는 실험 조건, 시편 크기, 열처리 이력, 분석 방법 등이 서로 상이하여 데이터 간 일관성과 신뢰성 확보에 한계가 존재함. 따라서 동일한 실험 프로토콜 하에서 체계적으로 축적된 대용량 데이터베이스 구축이 요구됨. 전통적인 합금 개발 방식에서는 다양한 조성의 합금을 개별적으로 제조한 후 열처리, 미세조직 분석, 기계적 특성 평가를 수행하여 데이터를 축적함. 그러나 인공지능 학습에 필요한 방대한 데이터 양을 이러한 방식으로 확보하는 것은 시간적·경제적 측면에서 현실적인 한계가 큼. 이에 본 연구에서는 디퓨전커플을 활용하여 하나의 시편 내에서 연속적인 조성 구배를 구현하고, 단일 실험을 통해 다수의 조성에 대한 미세조직 및 물성 데이터를 동시에 확보할 수 있는 하이스루풋 실험 방법론을 제시하고자 함. 본 연구의 검증 대상 소재로는 극저온 구조재로 널리 사용되는 Fe-9Ni 마르텐사이트강을 선정함. Ni 함량 증가는 저온 인성 향상에 매우 효과적이나, Ni의 높은 가격과 공급망 불안정성으로 인해 Ni 사용량을 저감하려는 연구가 지속적으로 요구되고 있음. 이에 Fe-5Ni와 Fe-23Ni를 마찰용접(Friction Welding)을 이용하여 집합한 후, 1200 °C에서 7일간 열처리를 수행하여 조성 구배를 형성함. 이후 위치별로 EDS, EBSD, 마이크로 경도, 나노압입 시험을 수행하여 조성-미세조직-기계적 특성에 대한 대량의 데이터셋을 단일 시편으로부터 효율적으로 확보할 수 있음을 확인함. 향후 나노압입 물성과 인장 특성 간의 상관관계를 기계학습 기반으로 모델링하고, 디퓨전커플에서 확보된 대용량 데이터를 활용하여 최적의 Ni 함량 또는 Ni를 대체할 수 있는 합금 원소 조합을 제시함으로써, 고성능 저온용 마르텐사이트강의 합금 설계 지침을 도출하고자 함.

**[P1-15]**

**전기저항용접된 파이프라인강의 In-situ 내수소취성 분석:** 원태호, 이승준\*(한국공학대 학교)

**Keywords:** 수소취성, ERW, 파이프라인강

전기저항용접된 파이프라인강의 In-situ내수소취성 분석 원태호, 이승준 Jae-Wan Seo<sup>1</sup>, Seong-Woong Kim<sup>2</sup>, Seung-Joon Lee<sup>1</sup> <sup>1</sup>신소재공학과, 한국공학대 학교 <sup>2</sup>Department of Advanced Materials Engineering, Tech University of Korea 본 연구에서는 전기저항용접(ERW) 방식을 적용한 X65급 파이프라인 강관을 대상으로, 용접부와 모재부의 내수소취성 특성을 분석하였다. ERW 공정은 별도의 용접재 없이 전기저항열을 이용해 모재를 급속히 가열하고 압접하는 방식이므로, 소재 내 탄소 함량은 용접부의 미세조직 형성에 결정적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 이러한 미세조직을 제어하고 잔류 응력을 완화하기 위해 급랭 후 템퍼링을 수행하는 QTT 조건과 공냉 방식을 적용한 NT 조건을 각각 적용하여 그 효과를 비교하였다. 실험적으로는 상온에서 In-situ 수소취성 인장시험을 수행하여 변형 중 수소 유입에 따른 기계적 거동을 실시간으로 모사하였으며, Silver (Ag) decoration 기법과 주사전자현미경(SEM) 분석을 통해 미세조직 내 수소 트랩의 위치와 확산 경로를 시각화 하였다. 최종적으로 파단면 분석 및 수소 유기 크랙 경로를 추적함으로써, 열처리 조건과 탄소 함량에 따른 미세조직의 변화가 모재와 용접부의 내수소취성 성능 차이에 미치는 상관관계를 명확히 규명하고자 하였다.

**[P1-16]**

**Nano-speckle  $\mu$ -DIC을 이용한 2상 조직 재료의 국부 변형 거동 분석:** 박홍빈, 김태형(부경대학교), 조원희, 양성현, 설재복\*(국민대학교), 배재웅\*(부경대학교)

**Keywords:** 2상 조직 재료, 마이크로 디지털 이미지 상관법, 국부 변형, 마르텐사이트, 미세조직

미세조직 스케일에서의 국부 변형 거동을 정량적으로 분석하기 위해서는 높은 공간 분해능과 안정적인 상 구분이 동시에 확보되어야 한다. 그러나 세립 2상 조직 재료의 경우 상 경계 식별이 어렵고, 기존 DIC 기법으로는 충분한 해상도의 변형률 맵을 획득하는데 한계가 있다. 본 연구에서는 nano speckle patterning 기반 micro digital image correlation ( $\mu$ -DIC) 기법을 구축하여 세립 2상 조직 재료의 국부 변형 거동을 정밀 분석하였다. Ag sputtering을 통해 나노스케일 speckle 패턴을 형성함으로써 고해상도 변형률 맵을 확보하였으며, Mn 편석 분석을 기반으로 마르텐사이트 상을 식별하고 초기 상 분포와 변형률 맵을 정합하였다. 또한 단계별 하중 조건에서의 미세조직 관찰과 변형률 데이터를 연계하여 변형 진행에 따른 국부 변형 분배 거동을 체계적으로 추적하였다. 분석 결과, 상 형상에 따른 변형 집중 특성이 명확히 구분되었으며, 특히 globular-type과 island-type 마르텐사이트 주변 페라이트 영역에서 상이한 변형 분배 거동이 확인되었다. 본 연구는 nano speckle 기반  $\mu$ -DIC와 화학적 상 구분을 결합한 분석 프레임워크를 제시하며, 세립 다상 재료의 미세역학적 거동을 정량적으로 규명할 수 있는 실험적 방법론을 제공한다.

**[P1-17]**

**Cu 및 Ni 첨가에 따른 Al-Sn 합금의 수지상 파편화 및 CET 메커니즘에 대한 in situ X선 관찰:** 윤영아\*, 한인성\*(경북대학교)

**Keywords:** Al-Sn alloy, fragmentation, columnar-to-equiaxed transition, solidification, in situ X-ray imaging

Al-Sn 합금은 Sn이 부여하는 우수한 윤활 성능으로 인해 베어링 부품에 널리 사용되는 대표적인 알루미늄 기반 합금이다. 응고 과정에서 형성되는 수지상 구조와 수지상 간 영역(interdendritic region)에 분포하는 Sn 상의 형태 및 공간적 분포는 기계적 특성과 마찰·마모 거동을 결정하는 핵심 인자로 알려져 있다. 특히 응고 중 발생하는 수지상 파편화(dendrite fragmentation)와 주상정-등축정 전이(columnar-to-equiaxed transition, CET)는 미세조직 진화 및 Sn 윤회성의 재분배에 중요한 영향을 미친다. 그러나 파편화와 CET 간의 상관관계 및 합금 원소 첨가에 따른 동역학적 차이는 실시간 관찰의 어려움으로 인해 충분히 규명되지 못하였다. 이에

본 연구에서는 Al-9Sn을 기준 합금으로 설정하고, 상이한 계면 안정성 및 응고 거동을 유도하는 미량의 Cu 및 Ni를 첨가하여 CET 형상 메커니즘의 차이를 비교하였다. 이를 위해 방사광고속기 기반 고휘도 X선을 이용한 in situ 이미징 기법을 활용하여 응고 과정을 실시간으로 관찰하였다. 또한 응고 방향에 따른 수지상 성장 및 파편화 거동의 변화를 분석하였다. 획득한 in situ 영상 데이터로부터 수지상 성장 속도, 수지상 파편 발생 시점 및 CET 발생 위치 등이 시간 분해적으로 정량 분석되었으며, 이를 기반으로 합금 원소와 응고 조건이 CET 메커니즘에 미치는 영향을 체계적으로 제시하고자 한다.

#### [P1-18]

**석출강화형 중엔트로피 합금의 Mo함량 변화에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화:** 임지혜, 이준석, 소영섭, 배재웅\*(부경대학교)

**Keywords:** 중엔트로피 합금, L1<sub>2</sub> 석출물, 기계적 특성, 변형 기구, 슬립

고엔트로피 합금(high-entropy alloys, HEAs) 및 중엔트로피 합금(medium-entropy alloys, MEAs)은 다원소 조성에 기인한 상 안정성, 격자 왜곡 및 확산 지연 효과를 바탕으로 우수한 강도-연성 조합을 구현하는 차세대 구조재료로 주목받고 있다. 특히 최근에는 기지 내 L1<sub>2</sub> 나노석출물을 도입한 석출강화형 합금이 고용강화형 대비 향상된 기계적 특성을 나타내는 설계 전략으로 부각되고 있다. 이러한 합금계에서는 석출물의 분율, 형상, 분포 및 기지(matrix)와의 계면 특성이 항복강도와 가공경화 거동을 지배한다. Mo는 큰 원자 반경에 따른 강한 고용강화 효과와 함께 전위 거동에 영향을 미치는 원소로 알려져 있으나, 석출강화형 합금에서 Mo 함량 변화에 따른 석출 거동과 전위 슬립 모드의 상관관계를 체계적으로 분석한 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 L1<sub>2</sub> 석출 강화형 Ni 기반 중엔트로피 합금을 설계하고, Ni 함량을 50 at.% 이상으로 유지하여 안정한 FCC 기지를 확보하였다. 이를 통해 전위 슬립이 지배적인 변형 환경에서 Mo 함량 변화에 따른 석출 거동과 슬립 모드(planar slip or wavy slip)의 변화를 비교·분석하였다. 실험 결과, Mo 함량 증가에 따라 L1<sub>2</sub> 석출물의 형상이 변화하였으며, Mo-rich 상과 NiAl-type B2 석출물의 분율 및 크기가 증가하였다. 인장 시험 결과, 저 Mo 합금에서는 국부 변형을 증가에 따라 wavy slip이 우세하게 나타난 반면, 고 Mo 합금에서는 전 변형 구간에서 planar slip이 지배적이었고, highly dense dislocation walls가 형성되었다.

#### [P1-19]

**잠호아크용접 공정을 적용한 API X60강의 마모 거동:** 강민선, 김승검, 한지혜, 이승준\*(한국공학대학교)

**Keywords:** Submerged Arc Welding, API X60 Steel, Adhesive wear, Abrasive wear

본 연구에서는 API X60 강재에 SAW(Submerged Arc Welding) 공정을 적용한 후, 마찰·마모 환경을 모사한 마모 시험을 수행하고, 시험 전후의 미세조직 변화와 마모 거리에 따른 마모 거동 및 내마모 특성을 체계적으로 평가하였다. 시험편의 표면 및 단면 미세조직은 주사전자현미경을 통해 관찰하였으며, 마모 특성 평가는 15N 하중 조건에서 ball-on-disc 방식의 왕복 마찰 시험을 적용하여 50m에서 500m까지 진행하였다. 마모 시험 후 형성된 마모 트랙의 형상, 마모 깊이 및 체적 손실은 3D laser scanning confocal microscope 조도 프로파일러, 비커스 경도시험기를 활용하여 정량적으로 분석하였다. 이를 통해 마모 진행 과정에서의 표면 손상 양상과 주요 마모 메커니즘을 규명하고, API 강재의 내마모 성능과 거동 특성 간의 상관관계를 고찰하고자 하였다.

#### [P1-20]

**원전 배관용 저탄소강의 용접 열영향부 후열처리에 의한 부식거동 비교:** 김대한, 이원찬, 김정환\*(국립한밭대학교), 문성인(한국원자력연구원)

**Keywords:** 원자력 배관, 용접, 저탄소강, 부식, 열처리

원자력 발전소 2차 계통 배관은 장기간 운전이 요구되는 핵심 설비로서, 배관의 높은 신뢰도를 위해 재료의 국부 열화 거동을 정확히 이해하고 관리하는 것이 필수적이다. 특히 엘보, 분기부, 용접부와 같은 형상 및 재료 불균일 구간은 운전 중 국부적인 손상이 집중적으로 발생할 수 있어, 배관 건전성과 수명 예측의 주요 관리 대상이 된다. 이러한 배관 환경에서는 유동가속부식 같은 열화 현상이 수화학 조건과 유동 조건의 복합적인 영향으로 발생하며, 특히 형상 변화 구간에서 국부 감속을 유발하는 것으로 알려져 있다. 이때 배관 제작 과정에서 필연적으로 형성되는 열영향부는 미세조직 불균일성과 전기화학적 이질성으로 인해 부식 감수성이 더욱 증가할 수 있음에도 불구하고, 열처리 유무에 따른 부식 거동 차이에 대한 정량적 평가는 충분히 이루어지지 않았다. 저탄소강(0.04-0.30 wt.% C)은 우수한 용접성, 적절한 강도와 연성, 그리고 높은 경제성으로 인해 원자력 발전소 2차 계통 배관의 주요 구조재로 널리 사용되고 있다. 그러나 저탄소강은 염화물 환경에서 낮은 내식성을 가지고, 특히 용접부 및 열영향부는 갈바닉 부식에 취약점으로 작용한다. 따라서 배관의 장기 신뢰성 확보를 위해 체계적인 부식 평가가 요구된다. 본 연구에서는 용접에 의해 제작된 T형 분기 배관을 대상으로, 열영향부에서의 열처리 유무에 따른 부식 거동을 정량적으로 비교·분석하였다. V홈 가공 후 용접된 배관으로부터 열처리 조건에 따라 구분된 총 6종의 시편을 채취하여 coin 형태로 가공하였으며, 각 시편에 대해 3.5% NaCl 수용액에서 상온 동전위분극실험을 수행하였다. 분극 곡선으로부터 도출된 전기화학적 패러미터를 기반으로 부식률(Mils Per Year, MPY)을 산출한 결과, 열영향부에 용접 후 열처리를 적용한 경우 모재와 유사한 수준의 내식성이 회복됨을 확인하였다.

#### [P1-21]

**Mn/Sr 첨가에 따른 결정립계 석출 거동과 전기적 특성 향상 및 구조-특성 상관관계 분석:** 차명준, 강태경, 오세민(국립부경대학교), 손지희, 김봉서(한국전기연구원), 홍두선(서울시립대학교), 박이호(한국재료연구원), 정찬원\*(국립부경대학교)

**Keywords:** SnSe, 열전소재, 용매열합성, Sr doping, Mn doping

열전 발전은 폐열을 전기에너지로 변환하는 친환경 기술로, 움직이는 부분이 없어 내구성이 우수하고 유지보수가 용이하다. 특히 폐열을 재활용하여 에너지 효율을 극대화하고 탄소 배출을 저감할 수 있어, 고성능 열전소재 개발은 중요한 과제이다. 열전소재의 성능은 무차원 성능지수(ZT)에 의해 평가되며, 성능 향상을 위해서는 높은 제백 계수와 전기전도도, 낮은 열전도도가 요구된다.



SnSe는 낮은 격자 열전도도( $\sim 0.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  @ 300 K)를 가지는 유망한 열전소재이나, 낮은 전기전도도( $\sim 1 \times 10^3 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$  @ 300 K)로 인해 추가 성능 향상이 제한된다. 이에 본 연구에서는 SnSe의 전기전도도 향상을 위해 제일원리 계산을 수행하여 Mn과 Sr을 최적 도펀트로 선정하였다. 이를 바탕으로, 용매열합성법(solvothermal synthesis)을 활용하여 Mn, Sr이 도핑된 SnSe microplates를 합성하고, SPS(spark plasma sintering) 공정으로 소결체를 제작하였으며 도핑 농도는 1, 2.5, 5 at.% 수준으로 조절하였다. SEM 및 EDS 분석 결과 Mn과 Sr이 SnSe 결정립계에 segregation되는 것을 확인하였으며, 이는 도핑 농도에 따라 증가하는 경향을 보였다. 또한, XRD 분석을 통해 orthorhombic 구조를 유지하면서 격자 상수 변화가 나타나, 도펀트가 SnSe 격자 내에 성공적으로 치환되었음을 확인하였다. 전기적 특성 평가 결과, Mn 2.5 at.% 도핑 시료는 371 K에서 순수 SnSe 대비 약 2배 향상된 전기전도도를 나타냈으며, 파워팩터(power factor)는 약 2.5배( $4.81 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-2}$ ) 향상되었다. 본 발표에서는 도핑에 따른 미세구조 변화와 미세구조-전기적 특성 간의 상관관계에 대해 설명하고자 한다.

#### [P1-22]

**유한요소해석을 이용한 탄소성 파괴인성 시험 재현 및 예측:** 이재민, 신선호(국민대학교), 박상은(두산에너지리티), 성효경\*(국민대학교)

**Keywords:** 유한요소해석 (FEM), 탄소성 파괴역학, 파괴인성, J-integral

파괴인성은 재료의 안전 설계에 핵심인 지표이나, 이를 측정하기 위한 ASTM E1820 기반의 파괴인성 시험은 시편 제작, 피로 균열 도입, 균열진전 계측 등으로 인해 시간 및 비용 부담이 크다. 본 연구에서는 고엔트로피 합금의 탄소성 파괴인성 시험을 유한요소해석으로 재현하고, 하중-변위 곡선과 균열 길이 변화량으로부터 균열 진전저항 곡선을 산정하여 예측된 임계 J-integral값(JIC)과 실험값의 일치도를 평가하였다. 균열 성장의 시작은 최대주응력 조건으로, 균열 진전은 에너지 기반 선형 연화와 확장유한요소해석으로 정의하였으며 균열 길이 변화량은 하중감소 없이 연속계측으로 측정하였다. 전 구간을 대상으로 오차 지표를 최소화하도록 계수를 최적화하였고 결과적으로 유한요소해석을 통해 얻은 균열 진전 저항 곡선 및 탄소성 파괴인성값은 실험값과 유사하게 나타났다. 본 연구는 ASTM-E1820 표준 정의에 기반한 탄소성 파괴인성 평가를 유한 요소 해석을 통해 구현함으로써 파괴인성 예측에 영향을 미치는 계수를 특정하였으며, 시편 형상 및 재료가 변하더라도 확장 가능한 파괴인성 예측의 기초자료를 제공한다.

#### [P1-23]

**초 단위 응답 특성을 갖는 솔젤법 기반 WO<sub>3</sub> 투명 세그먼트형 전기변색 헤드업 디스플레이의 개발:** 강정환, 편규민, 최아란, 김지선, 김민석, 이선영\*(한양대학교)

**Keywords:** 전기변색, WO<sub>3</sub>, 솔-젤 공정, 투명 디스플레이

전기변색이란 전압 인가에 따라 물질의 광학적 특성이 가역적으로 변화하는 현상으로, 에너지 절감형 스마트 윈도우 및 차세대 투명 디스플레이 응용 분야에서 주목받고 있다. 특히 헤드업 디스플레이는 주로 레이저 투사 방식으로, 외부 환경에 의해 가독성이 저하되거나, 낮은 광학 대비 및 장시간 사용 시 눈의 피로를 유발할 수 있다는 한계가 있다. 이를 보완하고자 저전압 구동이 가능하고 능동적인 색 변화를 통해 정보를 직접 표시할 수 있는 전기변색 기반 투명 디스플레이에 대한 연구가 요구되고 있다. 그러나 기존 전기변색 소자 연구는 주로 대면적 스마트 윈도우 소자 개발에 집중되어 있으며, 세그먼트 또는 픽셀 구조로 배선하여 실제 디스플레이로 구현한 사례는 상대적으로 부족하다. 본 연구에서는 솔-젤(Sol-gel)법과 스핀 코팅 공정을 이용하여 FTO 투명 전극 위에 WO<sub>3</sub> 전기변색 박막을 제작하고, 이를 패턴 마스크 공정을 통해 0부터 199까지의 숫자 표시가 가능한 투명 세그먼트형 헤드업 디스플레이를 개발하였다. WO<sub>3</sub>는 우수한 화학적·열적 안정성과 높은 광학 대비를 동시에 갖는 대표적인 무기 전기변색 물질이다. 솔-젤법은 저온, 대기 중 공정이 가능하고 공정이 단순하며, 스핀 코팅이나 딥 코팅과의 연계를 통해 박막 두께를 정밀하게 제어할 수 있다. 제작된 소자는 투명성 확보를 위해 Zn 프레임에 상대 전극으로 이용하였으며, 이를 통해 70%에 달하는 높은 초기 투명도를 확보하였다. 광학 특성 분석 결과, 제작된 소자는 55% 이상의 소자의 광학 대비( $\Delta T$ )와 5초 이내의 변/탈색 응답 특성을 보였다. 또한 FTO 투명 전극을 17개의 세그먼트로 분할하고, 각 영역을 개별 배선하여 아두이노 제어를 통해 구동함으로써, 세 자릿수 숫자 정보를 표시할 수 있는 투명 HUD 디스플레이로의 적용 가능성을 확인하였다.

## P2 : 에너지

Room 3층 로비, 4월 28일

### [P2-1]

**펠릿형 알루미늄 공기 전지의 지지체로서의 특성 평가:** 호중웅, 손경호, 김정구\*(성균관대학교)

**Keywords:** 알루미늄-공기 전지, 음극 지지체, 부식 특성 평가, 기생 부식 반응

현재 대부분의 공기 전지, 특히 알루미늄 공기 전지는 방전 후 음극을 물리적으로 교체해야 하는 1차 전지 형태로 개발되었으나 교체 과정에서 전해액 누출이나 셀 손상과 같은 심각한 안전 문제를 내포하고 있다. 이를 극복하기 위해 최근 펠릿 형태의 구(球)형 음극을 화석연료처럼 주입하여 재충전하는 주유식 시스템이 대안으로 떠올랐다. 이전까지 펠릿을 공기 전지의 음극으로써 사용하는 연구들은 펠릿을 사용하는 시스템 자체에 초점을 맞추어왔다. 셀 구조 설계 또는 펠릿의 제조에 집중되었을 뿐, 펠릿을 담아 지지함과 동시에 펠릿으로부터 발생하는 전류를 모으는 집전체 역할까지 동시에 수행하는 지지체에 대한 체계적인 접근은 거의 이루어지지 않았다. 따라서 지지체의 요구 사항 및 소재에 대한 논의가 매우 부족한 실정이다. 그러므로 지지체의 특성 및 설계 방안에 대한 연구가 필요하다. 또한 기존의 판형 음극을 사용한 알루미늄 공기 전지에 비해 펠릿형 알루미늄 공기 전지의 방전 성능이 전반적으로 낮은 것으로 파악되었다. 이것의 원인으로 지목되는 것이 지지체와 알루미늄 펠릿 간 형성되는 갈바닉 쌍으로 인해 발생하는 기생 부식 반응이다. 따라서 본 연구에서는 기생 부식 반응을 줄이기 위한 지지체 설계 방안을 제시하기 위해 지지체로 사용되는 금속 종류와 알루미늄 펠릿 간 갈바닉 쌍 생성으로 인해 미치는 영향을 갈바닉 부식 이론을 기반으로 공기 전지의 성능과 지지체 금속의 부식 특성을 모두 고려하여 평가하고자 하였다. 펠릿형 알루미늄 공기 전지 방전 실험을 위해 음극으로 지름 5 mm의 99.99% 알루미늄 펠릿을 사용하였으며 지지체로는 #100 mesh 규격의 STS316 스테인리스강, 티타늄, 구리, C2700 황동으로 이루어진 네 종류의 메쉬를 사용하였다. 정전류 방전 실험과 HER 침지 실험을 통해 지지체 금속 종류에 따른 전지의 성능을 분석하였다. 또한, 지지체에 사용되는 금속의 부식 특성을 평가하기 위해 동전위 분극 시험을 수행하였으며, 갈바닉 전류를 측정함과 동시에 시간에 따른 EIS를 진행함으로써 시간에 따른 표면의 변화를 분석 및 종합하여 지지체 소재가 갖춰야 할 핵심 조건 및 설계의 방향성을 제시하고자 하였다.

### [P2-2]

**무봉산 i-SMR 수화학 환경에서 pH 및 pH 조절제가 Alloy 690의 균일 부식 거동에 미치는 영향:** 김도연(한국원자력연구원, 고려대학교), 심희상(한국원자력연구원), 손석수(고려대학교), 전순혁\*(한국원자력연구원)

**Keywords:** 무봉산, i-SMR, Alloy 690, 균일 부식, pH

가압경수로(Pressurized Water Reactor, PWR)는 pH 조절제로 수산화리튬(Lithium hydroxide, LiOH)을 사용하고 있다. 이는 원자로 노심의 반응도 조절제인 붕산의 중성자 흡수 시 생성되는 Li-7을 효과적으로 관리하기 위함이다. 그러나, Li-7은 높은 비용과 수급 불안정성을 가지고 있다. 이에 따라 대체 pH 조절제 선정의 필요성이 제기되었다. 여러 pH 조절제 중 수산화칼륨(Potassium hydroxide, KOH)이 적절한 대체제로 여겨진다. KOH는 러시아의 VVER 원전(Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reactor, VVER)에서 pH 조절제로 약 40년간 사용되었기 때문이다. 한편, 국내에서는 기존의 대형 원전 대비 경제성이 높고 안전성이 증진된 소형 모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR)인 혁신형 소형모듈원자로(Innovative Small Modular Reactor, i-SMR)를 개발 중이다. i-SMR은 붕산 사용으로 야기되는 즉각적인 노심 반응도 제어 불가, 축방향 출력 편차 발생, 액체 방사성 폐기물 생성 등의 문제를 해결하기 위해 붕산을 사용하지 않는 무봉산 수화학 환경을 채택했다. 따라서 i-SMR의 무봉산 수화학 환경에서 pH 조절제로 KOH 사용 가능성을 분석해야 한다. VVER 원전은 기존 PWR 원전 및 i-SMR과는 다르게 증기발생기 전열관 재질로 Alloy 600이나 Alloy 690과 같은 니켈기 합금을 사용하지 않는다. 증기발생기 전열관은 냉각수와 접촉면적이 제일 큰 설비이기 때문에 pH 조절제에 대한 내식성 평가는 필수적이다. 선행 연구에서 KOH 붕산 수화학 환경에서 니켈기 합금의 일반 부식 거동에 관한 연구가 진행되었다. 시험 시편의 무게 변화 및 산화막 특성 분석 결과, Alloy 600의 일반 부식 저항성이 KOH 수화학 환경에서 LiOH 수화학 환경보다 더 높았다. 또한, 무봉산 KOH 수화학 환경에서 Alloy 690의 일반 부식 거동에 관한 연구도 진행되었다. 무봉산 KOH 수화학 조건에서 산화막 형성 과정 및 미세구조가 국내 PWR 수화학 조건인 붕산 LiOH 환경에서의 결과와 유사함이 확인되었다. 그러나, 무봉산 수화학 환경에서 니켈기 합금의 일반 부식 거동에 관한 연구는 아직 충분히 이루어지지 않은 실정이다. 또한, 고농도 알칼리 수용액 조건은 저농도에 비해 니켈기 합금의 일반 부식을 촉진시킨다. i-SMR에서는 열교환 및 유량 흐름이 원활하지 않은 틈새 환경에서 국부적으로 양이온이 농축되어 정상운전 조건에 비해 고농도 알칼리 조건이 형성될 수 있다. 제어봉 구동장치(Control Rod Drive Mechanism, CRDM) 관통부, 가압기 가열기 지지대 사이 공간, 용접부 등이 이에 해당된다. Alloy 690은 틈새 발생 가능 환경에 노출되는 금속 재료이다. 따라서, 고농도 pH 조절제에 대한 Alloy 690의 내식성 평가가 필요하다. 본 연구의 목적은 i-SMR의 무봉산 수화학 환경에서 pH 조절제로 KOH 사용 가능성을 평가하는 것이다. 이를 위해, 정상 조건 및 고농도의 틈새 조건에서 LiOH와 KOH가 Alloy 690의 일반 부식 거동에 미치는 영향을 비교 및 분석하였다. 고온 및 고압 환경에서 침지 시험을 수행 후, Alloy 690의 부식 속도를 평가하였다. 또한 다양한 분석방법을 통해 Alloy 690 산화층의 미세구조를 분석하였다. 또한, 무봉산 수화학 조건을 반영한 상온조건에서 전기화학 부식 시험을 통해 Alloy 690의 부식 속도를 추가적으로 평가하였다. 이후, 본 연구에서 적용한 정상 운전 및 틈새 조건에서 pH 조절제의 수용액 특성 중 부식거동에 영향을 미칠 수 있는 인자를 분석하고, 이에 기반하여 부식 기구를 규명하였다.

**[P2-3]**

**휴관 원전 습분분리재열기 배수탱크 인출시료 및 감시시편을 이용한 재료 건전성 평가:** 김도연(한국원자력연구원, 고려대학교), 하성준(한국원자력연구원), 권혁철(한국수력원자력), 손석수(고려대학교), 진순혁\*(한국원자력연구원)

**Keywords:** 휴관 원전, 습분분리재열기 배수탱크, 인출시료, 감시시편, 건전성

최근 원자력 발전소의 계속운전 및 재기동을 위한 재료 건전성 평가의 중요성이 증가함에 따라, 장기 휴관 기간 동안 주요 계통 재료의 열화 거동을 평가하는 것이 필수적이다. 장기 휴관 중 원전 2차계통은 운전 환경과 달리 대기 환경에 노출되며, 이산화황(SO<sub>2</sub>), 이산화질소(NO<sub>2</sub>), 염화물 및 수분 등의 영향으로 금속 표면에서 대기부식이 발생할 수 있다. 이러한 대기부식은 장기적으로 재료의 표면 특성 변화 및 구조적 건전성 저하를 유발할 수 있으므로, 재기동 전 실제 재료 상태에 대한 정밀 평가가 요구된다. 본 연구에서는 장기 휴관 상태에 있는 국내 가압경수로형 원자력 발전소의 습분분리재열기(Moisture Separator Reheater, MSR)를 대상으로 인출시료 및 감시시편을 활용하여 재료 건전성을 평가하였다. 인출시료 및 감시시편 표면에 형성된 부식생성물의 화학적 조성 및 미세구조적 특성을 규명하기 위해 ICP-MS, SEM, XRD, XPS 분석을 수행하였다. 인출시료에 대한 ICP-MS 분석 결과, 부식생성물은 대부분 Fe를 주성분으로 구성하고 있었으며, 계통 건전성에 영향을 미칠 수 있는 Cl, S 및 Pb 등의 유해 불순물은 검출되지 않았다. SEM 분석 결과, 부식생성물은 다면체 및 구형 형태의 산화물 입자로 관찰되었으며, 이는 발전소 가동 중에 형성된 전형적인 산화물 형태로 생각된다. 인출시료 XRD 분석 결과, 부식생성물은 magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)로 구성되어 있음을 확인하였다. 감시시편을 이용하여 평가한 습분분리재열기 배수탱크의 부식률은 약 0.003 MPY로 매우 낮은 수준으로 평가되었다. 이상의 결과로부터 장기 휴관 기간 동안 대기부식에 의해 습분분리재열기 계통 재료의 구조적 건전성에 영향을 미칠 수준의 유의미한 열화는 발생하지 않았음을 확인하였다. 본 연구 결과는 휴관 원전 습분분리재열기의 재료 건전성을 실증적으로 평가한 결과로서, 향후 원전 재기동 시 재료 건전성 확보 및 장기 건전성 평가를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**[P2-4]**

**Impact of Na<sub>3.3</sub>Zr<sub>1.7</sub>La<sub>0.3</sub>Si<sub>2</sub>PO<sub>12</sub> Filler Morphology on Ion Transport and Electrochemical Performance of Composite Solid Electrolytes for Sodium Batteries:** Jeong-Min Kim, Chan-Jin Park\*(전남대학교)

**Keywords:** Sodium-ion battery, Composite solid electrolyte, NZLSP, In-situ polymerization, Solid-state batteries

To realize next-generation high-energy-density and safe energy storage systems, the development of robust composite solid electrolytes (CSEs) is a key requirement. Although sodium-ion batteries (SIBs) are considered a cost-effective alternative owing to the natural abundance of sodium resources, their practical implementation remains limited by insufficient ionic conductivity at room temperature, poor mechanical robustness, and high interfacial resistance between electrodes and the electrolyte. In this study, we propose a synergistic strategy that incorporates high-conductivity La-doped NASICON (Na<sub>3.3</sub>Zr<sub>1.7</sub>La<sub>0.3</sub>Si<sub>2</sub>PO<sub>12</sub>, NZLSP) fillers into a poly(vinylene ethylene carbonate) (PVEC) polymer matrix via in-situ thermal polymerization, enabling intimate interfacial contact between organic and inorganic phases. The primary objective of this work is to clarify the influence of inorganic filler morphology on ion-transport behavior and overall electrochemical performance. By fixing the chemical composition and membrane thickness, we systematically compared a pure solid polymer electrolyte (SPE) with composite electrolytes containing NZLSP fillers of different dimensionalities: 0D nanoparticles, 1D nanorods, and a 3D nanofiber network. The results reveal a clear evolution in sodium-ion transport mechanisms governed by filler connectivity. In the SPE and 0D-filled systems, ionic conduction is dominated by polymer chain segmental motion and salt dissociation, while isolated nanoparticles tend to agglomerate and fail to form continuous percolation pathways. The 1D nanorod architecture partially mitigates this limitation by bridging localized gaps, thereby reducing ion-transport resistance and forming short-range conductive channels. In contrast, the 3D nanofiber network establishes a continuous inorganic framework throughout the membrane. When uniformly infiltrated with the PVEC matrix, this architecture enables uninterrupted and efficient Na<sup>+</sup> transport through both the ceramic backbone and the extended polymer-ceramic interfacial regions. As a result of this optimized 3D architecture, the composite solid electrolyte exhibits a high room temperature ionic conductivity of 0.8299 mS cm<sup>-1</sup> and excellent oxidative stability up to 5.12 V vs. Na/Na<sup>+</sup> at 30°C. These findings demonstrate that systematic control of filler dimensionality and network connectivity is a highly effective strategy for advancing high-performance solid-state sodium battery systems.

**[P2-5]**

**Accelerating Sodium-Ion Transport in Na<sub>3</sub>Zr<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>PO<sub>12</sub> Solid Electrolytes via Compositional Tuning and Grain-Boundary Phase Modification for Solid-State Sodium Metal Batteries:** Hyun Su Kim, Chan Jin Park\*(전남대학교)

**Keywords:** NASICON, Sintering additive, Glass phase, Solid-state battery, Ionic conductivity.

Solid-state sodium metal batteries (SSMBs) have emerged as a compelling candidate for next-generation energy storage, due to high specific energy, inherent safety, and the abundant sodium resources. Among various solid electrolytes, NASICON-type Na<sub>3</sub>Zr<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>PO<sub>12</sub> (NZSP) has received significant attention due to its high ionic conductivity (~10<sup>-4</sup> S cm<sup>-1</sup>), relatively low cost, and electrochemical stability. However, its electrochemical performance is constrained by the volatilization of Na and P components during high-temperature sintering and by high grain-boundary resistance. In this study, Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (NPO) was incorporated as a sintering additive to synthesize NZSP via the solid-state reaction method. The NPO additive acts as a multifunctional agent that simultaneously suppresses the

volatilization of Na and P while inducing the formation of a beneficial glass phase at the grain boundaries. This dual functionality effectively inhibits the formation of the non-conductive ZrO<sub>2</sub> phase and mitigates grain boundary resistance. XRD verified the tailored composition, while HR-TEM confirmed the establishment of a continuous Na<sup>+</sup> conducting network. Owing to these microstructural refinements, the NZSP electrolyte with 2 wt% NPO (NZSP-2NPO) achieved a high total ionic conductivity of 0.91 mS cm<sup>-1</sup> at 30 °C. The all-solid-state full cell (Na|NZSP-2NPO|NVP) exhibited superior rate capability, delivering 111.7 mAh g<sup>-1</sup> at 0.1 C and 92.7 mAh g<sup>-1</sup> at 2 C, outperforming the cell employing the pristine NZSP (53.78 mAh g<sup>-1</sup> at 2 C). Furthermore, the cell exhibited outstanding cycling stability, maintaining 96% capacity retention after 250 cycles at 1 C. These results demonstrate that glass-phase formation at grain boundaries and compositional tuning via Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> additives provide a viable pathway toward the practical realization of high-performance SSSMBs

#### [P2-6]

Facilitating Lithium-Ion Transport via mPEG-Grafted LLZO Composite Solid Polymer Electrolytes for Enhanced All-Solid-State Lithium-Oxygen Battery Performance: Jun-Hyeong Seo, Chan-Jin Park\*(Chonnam National Univ.)

**Keywords:** Li-O<sub>2</sub> battery, Composite solid polymer electrolyte, PEO, LLZO, Surface grafting

Lithium-oxygen batteries (LOBs) have attracted significant attention as next-generation energy storage systems due to their exceptionally high theoretical energy density. However, conventional liquid electrolyte-based LOBs face critical challenges, including leakage, evaporation, and safety hazards associated with lithium dendrite growth. Furthermore, the solution-mediated discharge mechanism in liquid electrolytes facilitates the formation of large, insulating toroidal lithium peroxide (Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). These toroidal products induce high overpotentials during the oxygen evolution reaction (OER), severely limiting the cycling stability. While solid polymer electrolytes (SPEs) offer a safer alternative, their limited room-temperature ionic conductivity necessitates the incorporation of ceramic fillers to form composite polymer electrolytes (CPEs). However, these systems often encounter high interfacial resistance between the fillers and the polymer matrix. In this study, we propose a Composite Solid Polymer Electrolyte (CSPE) incorporating methoxy polyethylene glycol (mPEG)-grafted garnet-type Li<sub>7</sub>La<sub>3</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>12</sub> (LLZO) within a plasticized polyethylene oxide (PEO) matrix to realize high-performance all-solid-state LOBs. By chemically grafting silane-functionalized mPEG onto the LLZO surface, we successfully mitigated interfacial resistance and created efficient ion conduction pathways at the filler-polymer interface, thereby facilitating effective lithium-ion transport to the cathode and demonstrating a significant improvement over simple physical mixing. The synthesized CSPE exhibited an improved ionic conductivity of 0.32 mS cm<sup>-1</sup> at 30 °C and a wide electrochemical stability window of up to 5.15 V vs. Li/Li<sup>+</sup>. Furthermore, the active ceramic filler effectively suppressed lithium dendrite propagation, ensuring the structural integrity of the interface. When applied to all-solid-state LOBs, the CSPE demonstrated reduced charge/discharge overpotentials compared to pristine polymer electrolytes and superior cycling stability compared to liquid electrolytes. These results demonstrate that the interface-optimized CSPE is a promising electrolyte candidate for high-performance all-solid-state Li-O<sub>2</sub> batteries.

#### [P2-7]

Nanostructured ZnP<sub>2</sub>/Carbon Composite Anode for High-Rate Sodium-Ion Batteries Synthesized via Mechanochemistry: Pyochan Kim, Chanjin Park\*(Chonnam National University)

**Keywords:** Sodium-Ion Batteries, High-Energy Ball Milling, Zinc Phosphide, Alloy-Based Anode, Carbon Coating

Sodium-ion batteries (SIBs) are promising alternatives to lithium-ion batteries for large-scale energy storage due to sodium's abundance and low cost. However, the large ionic radius of Na<sup>+</sup> hinders its intercalation into graphite, necessitating high-capacity anode alternatives. Among various candidates, zinc phosphide (ZnP<sub>2</sub>) is attractive for its high theoretical capacity, yet its application is limited by two intrinsic drawbacks: severe structural instability from massive volume expansion during sodiation and low electrical conductivity. To overcome the structural instability and the intrinsic low electrical conductivity, this study introduces a nanostructured ZnP<sub>2</sub>/Carbon composite synthesized via a high-energy ball milling process. This mechanochemical approach creates an intimate contact between the active ZnP<sub>2</sub> nanoparticles and a conductive carbon matrix, which effectively buffers the volume changes and enhances electronic transport. Electrochemical performance was systematically investigated by varying the milling duration from 1 to 15 h. And evaluating two electrolyte systems: a carbonate-based electrolyte (1M NaPF<sub>6</sub> in EC/DMC (3:7) + 5% FEC) and an ether-based electrolyte (1M NaPF<sub>6</sub> in DME + 5% FEC). By optimizing the ZnP<sub>2</sub> synthesis duration (10 h) and carbon structure, the electrode exhibited exceptional stability in an ether-based electrolyte, effectively mitigating volume expansion. At 50 mA g<sup>-1</sup> the anode delivered a stable reversible capacity of 366.83 mAh g<sup>-1</sup>. Furthermore, the electrode demonstrated excellent rate capability, maintaining specific capacities of 332.61, 257.32, 213.74, and 165.18 mAh g<sup>-1</sup> at current densities of 100, 500, 1000, and 2000 mA g<sup>-1</sup>, respectively. Notably, upon returning to 100 mA g<sup>-1</sup>, the capacity recovered to 329.84 mAh g<sup>-1</sup>, corresponding to an excellent capacity retention of 99.2%. This robust electrochemical behavior creates a dual functionality of the nanostructured carbon network, which serves as both a mechanical buffer against volume expansion and a continuous electrical pathway. Consequently, this study highlights the significant potential of the ZnP<sub>2</sub>/C composite as a high-performance anode material for advanced SIBs.

**[P2-8]**

**Li-Mg/Mg-Li Bilayer Foil as an Integrated Anode and Current Collector for Li-metal Batteries with Extended Cycle Life:**

정준오, 정희태, 김우진\*(홍익대학교)

**Keywords:** Anode, Current collector, Microstructure, Grain, Severe plastic deformation

In the present investigation, we fabricated an ultrathin and dual-function bilayer anode that integrates current collection and the active Li reservoir within a 20- $\mu\text{m}$ . An 8- $\mu\text{m}$  Mg-Li alloy foil is fabricated by severe plastic deformation to obtain an ultrafine-grained microstructure and serves as the current-collecting scaffold. Controlled prelithiation converts the surface region into a conformal 12- $\mu\text{m}$  Li-Mg alloy layer, yielding a Li-Mg/Mg-Li bilayer architecture in which the Li-Mg layer functions as the anode while the Mg-Li layer functions as the current collector. In full-cells paired with  $\text{LiFePO}_4$  cathodes, the bilayer anode delivers markedly extended cycle life compared with a Li-preplated Cu control. Cryogenic-ion-milling combined with electron backscatter diffraction (EBSD) reveals that, upon cycling, the Li-Mg layer evolves into a porous morphology while remaining mechanically integrated with the Mg-Li collector without interfacial delamination. Comparative evaluation against representative Li-metal anode indicates that the Li-Mg/Mg-Li bilayer achieves competitive with outstanding specific and volumetric capacities, while maintaining robust cycling stability.

**[P2-9]**

**Fine-grained Li-Sn Composite Foil Anodes for High-rate Li-metal Batteries:** 김준영, 정희태, 김우진\*(홍익대학교)

**Keywords:** Lithium, Composite, Lithium-metal batteries, Grain, Surface

We fabricated a fine-grained Li-Sn composite foil anode by alloying Sn into Li followed by repetitive compression and rolling, which produces a refined Li matrix containing uniformly dispersed  $\text{Li}_{22}\text{Sn}_5$  particles with a characteristic size of  $\sim 10\ \mu\text{m}$ . Rate capability was first assessed in liquid-electrolyte full-cells paired with  $\text{LiFePO}_4$  cathodes over 0.3-30  $\text{mA cm}^{-2}$ . At low current densities, the Li-Sn composite and pure Li anodes deliver comparable capacities, whereas increasing the current density progressively amplifies the performance gap, with the Li-Sn composite exhibiting its most pronounced advantage under high-areal-capacity operation of at least 6  $\text{mAh cm}^{-2}$ . Galvanostatic charge/discharge cycling was then performed at an areal capacity of 3  $\text{mAh cm}^{-2}$  and under higher-loading conditions of 6 and 9  $\text{mAh cm}^{-2}$ . During regular cycling, the Li-Sn composite maintains a reversible areal capacity of 0.8-1.0  $\text{mAh cm}^{-2}$  for 250 cycles and sustains 1.0-1.2  $\text{mAh cm}^{-2}$  up to 350 cycles, whereas pure Li fails within fewer than 10 cycles under identical conditions. Collectively, these results indicate that the fine-grained Li-Sn composite foil anode is well suited for high-rate operation while retaining robust cycling durability.

**[P2-10]**

**Accelerated Formation of Corrosion Oxide Layers on Stainless Steels Using Na-EDTA:** Sang-Hun Lee, Wang-Kyu Choi, Seonbyeong Kim, Byung-Seon Choi, Seung Joo Lim\*(Korea Atomic Energy Research Institute)

**Keywords:** Na-EDTA, Stainless steel, Corrosion

Stainless steels are widely used as structural materials in pressurized water reactors (PWRs). During normal operation, stainless steel surfaces in contact with the primary coolant develop a compact duplex oxide layer with a thickness of approximately 2.5–3.0  $\mu\text{m}$ , mainly composed of iron (Fe), chromium (Cr), and nickel (Ni) oxides. These oxide layers serve as major repositories for radioactive nuclides and activated corrosion products, resulting in increased radiation fields within the system. Consequently, chemical decontamination is required during reactor shutdown to reduce radiation exposure. To develop effective decontamination technologies, it is necessary to fabricate corrosion oxide layers that realistically simulate those formed under actual reactor conditions. However, such oxide films require long formation times under real environments, making accelerated oxide formation essential for laboratory studies. In this study, EDTA-Na ( $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_8\text{Na}_2$ ) was employed to accelerate corrosion and oxide film formation on stainless steels. The surface phases of the corrosion oxides were characterized by X-ray diffraction (XRD), and the compositional depth profiles of the oxide layers were analyzed using glow discharge spectroscopy (GDS). In addition, potentiodynamic polarization measurements were conducted to evaluate the electrochemical behavior of 304, 316L, and 403 stainless steels at 25  $^\circ\text{C}$  in Na-EDTA solutions with varying concentrations. The EDTA-assisted accelerated corrosion process enables efficient fabrication of thick corrosion oxide layers through enhanced metal dissolution. Nevertheless, excessive corrosion during the oxide layer preparation process under aggressive conditions may cause damage to the autoclave reactor vessel. Accordingly, careful control of EDTA concentration and exposure conditions is required to balance oxide layer formation and structural integrity.

**[P2-11]**

**Effect of Powder Filling Conditions on Fuel Meat Homogeneity of Plate-Type Nuclear Fuel:** Kyeongmin Park\*, Hwayoung Song, Myeonglip Heo, Dongjun Park, Yongjin Jeong(Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI))

**Keywords:** Compact,  $\text{U}_3\text{Si}_2$ , Homogeneity, fuel meat, fuel plate

Plate-type nuclear fuel has been widely used in research reactors owing to its excellent heat transfer capability and structural stability. In general, plate-type fuel is fabricated by filling a blended powder—consisting of matrix powder and uranium powder—into a rectangular die, followed by high-pressure compaction to produce a compact. The compact is then assembled and welded with fuel

components, and subsequently rolled to form a thin and elongated fuel plate. One of the critical quality requirements for ensuring the performance and safety of plate-type fuel is the homogeneity of the fuel meat. If uranium is not uniformly distributed within the fuel meat, local variations in uranium density may result in non-uniform power distribution. In this study, the uniformity of uranium distribution in the fuel meat of plate-type nuclear fuel fabricated under different powder filling conditions was comparatively evaluated to investigate the potential for fuel quality improvement.

#### [P2-12]

**방사선 및 방호 응용을 위한 금속 및 카바이드 기반 기능성 재료의 기계적 물성 및 차폐·방탄 성능 평가:** 손영호, 김범규\*, 송근동, 조재선((주)미래와도전)

**Keywords:** 다기능 방호 소재, 방사선 차폐, 중성자 차폐, 구조재료, 방탄

군사, 원자력, 항공우주 및 의료 분야에서는 기계적 신뢰성과 방사선·중성자 차폐 성능을 동시에 만족하는 다기능 구조재료에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다. 특히 방호 시스템에서는 구조적 강도, 관통 저항성, 차폐 성능 및 열적 안정성이 복합적으로 요구되며, 단일 성능 중심 소재로는 이러한 요구를 동시에 충족하기 어렵다. 본 연구의 목적은 금속 및 세라믹 기반 후보 소재의 기계적 물성과 차폐·방호 성능을 종합적으로 비교·분석하여 다기능 방호 소재 설계를 위한 기준을 제시하는 것이다. 본 연구에서는 텅스텐(W), 비스무트(Bi), Corten A 강, Al6061-T6, B<sub>4</sub>C 및 B<sub>4</sub>C-SiC 복합체를 대상으로 인장강도, 항복강도, 굽힘강도, 파단 거동을 평가하였으며, 감마선·중성자 차폐 성능과 관통 저항 특성을 함께 측정하였다. 소재 종류 및 조성에 따른 물성·성능 상관관계를 분석하여 구조적 성능과 차폐 성능 간의 균형을 검토하였다. 그 결과, W는 높은 강도와 우수한 감마선 차폐 효율을 동시에 나타내어 구조적 성능과 차폐 성능을 모두 만족하는 소재임을 확인하였으나, 취성과 높은 비용 및 밀도가 제한 요인으로 작용하였다. Bi는 감마선 차폐 성능은 우수하였으나 기계적 물성이 낮아 구조용 적용에는 제약이 있었다. Corten A 강은 강도와 연성의 균형이 우수하고 중간 수준의 차폐 성능을 보여 구조용 차폐 소재로서의 적용 가능성을 제시하였다. Al6061-T6은 경량 구조재로서 중량 대비 성능 평가를 위한 기준 소재로 활용 가능함을 확인하였다. B<sub>4</sub>C 및 B<sub>4</sub>C-SiC 복합체는 SiC 함량 변화에 따른 평균 강도 차이는 크지 않았으며, 모든 B<sub>4</sub>C 및 B<sub>4</sub>C-SiC 복합체가 7.5 mm 두께에서 99.9% 이상의 중성자 차폐율을 나타내고 15 mm 이상에서 실질적인 방호 성능을 확보하였다. 본 연구는 차폐·방호 소재 설계 시 기계적 강도, 방사선 차폐 성능 및 두께 대비 중량 효율 간의 균형이 핵심 설계 인자임을 제시하며, 금속·세라믹 복합 기반 다기능 방호 소재 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### [P2-13]

**용융 염화물 환경에서 SS316H에 레이저 클래딩 된 Alloy 625의 부식 및 기계적 거동:** 홍민석\*, 이승보, 황성식, 구경희 (한국원자력연구원)

**Keywords:** 용융염, MSR, 스테인리스, A625, 부식

레이저 클래딩(Laser Cladding, LC)은 용융염 원자로 구조 재료의 표면 개질을 위한 유망한 기술이지만, 부식 및 기계적 성능에 미치는 영향에 대해서는 신중한 평가가 필요하다. 본 연구에서는 Alloy 625(A625)를 SS316H 스테인리스강 파이프 위에 레이저 클래딩하고, 용융 NaCl-KCl-MgCl<sub>2</sub> 염 환경에서 미세조직, 기계적 특성 및 부식 거동을 평가하였다. LC 공정은 비균일한 용융과 혼합으로 인해 트랙 의존적인 화학적 불균일성, 클래딩-기판 계면 부근의 잔류 변형, 그리고 산화물 껍질을 가진 개재물을 유도하였다. 이러한 미세조직적 특징은 항복강도와 인장강도를 증가시키는 동시에, 단조(wrought) SS316H 대비 전체 연신율을 유지하거나 소폭 향상시키는 결과를 보였다. 경도 및 EBSD 분석에서는 계면 부근에서 뚜렷한 구배가 관찰되어 국부적인 강화와 잔류 응력의 존재를 시사하였다. 부식 시험 결과, LC A625는 단조 A625와 유사하지만 약간 낮은 수준의 내식성을 보였으며, 갈바니 부식 조건에서는 HIP 클래딩 시편보다 현저히 낮은 내식성을 나타냈다. 이러한 결과는 LC가 기계적 강도 향상에는 효과적이지만, 용융 염화물 환경에서의 부식 성능은 공정에 의해 유도된 불균일성에 크게 영향을 받음을 보여주며, 추가적인 공정 최적화가 필요하며 이를 추가적으로 연구할 예정이다.

#### [P2-14]

**국산 개발 수소 연소기의 고온 노출에 따른 수소 영향 검토 연구:** 이화열\*, 이원빈, 문혜리, 오정석(한국가스안전공사)

**Keywords:** 수소, 연소기, 고온노출, 금속재료

현재 우리 정부는 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」과 국가 탄소중립 전략을 기반으로, 발전·산업·건물 부문에서 수소의 직접 활용을 확대하고 있다. 특히 수소를 연소 방식으로 활용하는 연소기 및 보일러 기술은 수소를 연료전지 형태가 아닌 직접 에너지원으로 사용가능하다는 점에서 탈탄소 수단으로 주목받고 있으며, 이에 따라 고온 환경에서 수소를 직접 취급·연소하는 설비의 개발과 실증이 진행되고 있다. 그러나 수소 연소 기술의 확대와 동시에, 고온 수소 분위기에 장시간 노출되는 구조 재료의 안전성과 신뢰성 확보는 중요한 기술적 과제로 남아 있다. 수소는 크기가 매우 작고, 금속 내 확산계수가 크다는 물리적 특성을 갖는다. 금속 재료가 수소에 노출될 경우, 기계적 물성 측면에서는 연성 감소와 파괴 인성 저하가 발생할 수 있다. 또한 고온 수소 환경에서는 단순한 상온 수소취성과 달리, 고온 크리프 거동 변화, 열피로 수명 감소, 균열 개시 위치의 변화 등이 동시에 나타날 수 있는 것으로 알려져 있다. 특히 연소기와 같이 고온, 반복적인 시동·정지에 따른 열사이클, 그리고 수소와 수증기가 공존하는 연소 분위기에 노출되는 부재의 경우, 이러한 복합 열화 메커니즘은 장기 운전 신뢰성에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 그럼에도 불구하고 국내에서는 수소 연소기 적용을 염두에 둔 체계적인 재료 안전성 데이터는 충분히 축적되지 않은 상황이다. 이에 본 연구는 수소 연소기 구성 재료가 고온 수소 환경에 노출되었을 때 발생하는 물성 변화와 조직 변화를 실험적으로 확인하고, 향후 수소 연소 설비의 재료 선정 및 안전 설계에 기초 자료를 제공하는 것을 목적으로 수행되었다. 본 연구에서는 수소 연소기에 적용 가능한

금속 재료를 선정하여, 실제 연소 환경을 고려한 고온 수소 분위기 조건에서 일정 시간 노출 시험을 수행하였다. 노출 전·후 재료에 대해 인장시험을 실시하여 항복강도, 인장강도 및 연신을 변화를 비교하였으며, 동시에 현미경을 활용한 미세조직 분석을 통해 결정립 구조, 상 분포 및 파단 양상의 변화를 관찰하였다. 이러한 접근을 통해 고온 수소 노출이 재료의 거시적 기계적 거동과 미시적 조직 안정성에 미치는 영향을 종합적으로 평가하였다.

#### [P2-15]

A Case Study on a Methodology for Analyzing the Composition and Identifying Unknown Radioactive Materials Using a Shielded EPMA: Gahyun Choi\*, Yang Hong Jung(Korea atomic energy research institute)

**Keywords:** EPMA, Radioactive materials

The Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA) is a high-precision instrument designed to characterize the elemental composition and chemical properties of micro-scale regions (sub- $\mu\text{m}$ ) in solid specimens. A distinctive advantage of EPMA is its ability to maintain stable operating conditions under relatively high beam currents ( $\sim \mu\text{A}$ ), ensuring high data reproducibility and reliability during prolonged analysis. The Irradiated Materials Examination Facility (IMEF) at the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) utilizes a shielded EPMA (JXA-8230R) for the specialized analysis of irradiated nuclear fuels and materials. In standard protocols for high-radiation specimens, sample preparation—including mounting and polishing—is conducted within a hot cell to minimize occupational radiation exposure. However, to meet urgent field requirements and circumvent the extensive lead times associated with hot-cell logistics, optimized rapid-analysis workflows are often implemented. For metallic foreign materials, ultrasonic cleaning followed by mechanical delamination is employed to remove surface oxide layers and expose the base metal. To ensure electrical conductivity, the specimens are treated with silver paste or, in cases requiring non-metallic verification, a dense carbon coating (C-coating) prior to qualitative and quantitative analysis. This study presents comprehensive methodologies for the identification of unknown foreign materials by integrating these practical analytical techniques, tailored to specific sample characteristics and operational constraints.

#### [P2-16] Canceled

Ultra-Low Pt-Loaded Pt-Ce-Ni Catalyst for High-Performance and Economical AEM Water Electrolyzers and PVEC Devices: Bee lyong Yang\*, Ahmad Shahbaz, Sk Samim Akhter, Mallappa Mahanthapa(Kumoh National Institute of Technology, GHS Co., Ltd), Soon Yong Kweon(GHS Co., Ltd, Korea transportation University)

**Keywords:** HER, OER, PGM Catalyst, AEMWE

Although numerous catalysts have been developed for alkaline and anion exchange membrane (AEM) water electrolysis, achieving long-term operational stability under industrially relevant conditions remains a critical challenge. Herein, we present a cost-effective and durable electrocatalyst strategy based on a low platinum loading ( $0.25 \text{ mg cm}^{-2}$ ) Pt-Ce-Ni catalyst for efficient green hydrogen production. The Pt-Ce-Ni catalyst exhibits superior oxygen evolution reaction (OER) activity compared with commercial  $\text{RuO}_2$ , delivering low overpotentials of 270 mV and 360 mV at 50 and  $100 \text{ mA cm}^{-2}$ , respectively. The influence of catalyst supports was systematically investigated, revealing that nickel mesh (NM) and nickel foam (NF) show comparable initial activity, while NM provides markedly enhanced long-term stability owing to its ordered architecture and improved mechanical robustness. An AEM water electrolyzer incorporating Pt-Ce-Ni/NM achieves a low cell voltage of 1.54 V at  $50 \text{ mA cm}^{-2}$  and sustains stable operation for over 48 h at  $100 \text{ mA cm}^{-2}$ . The enhanced performance is attributed to abundant accessible active sites, favorable charge redistribution, and synergistic electronic interactions among Pt, Ce, and Ni. This work demonstrates that combining low noble-metal loading with structurally ordered electrode supports offers an effective pathway toward durable, high-performance, and economically viable water electrolyzers. Acknowledgments: This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) under project number 202100390004. KIT Project. This research is funded by the Small and Medium Business Technology Information Promotion Agency (project number 202402570002). This research was conducted with the support of the Korean government (Ministry of SMEs and Startups) and the research grant from the Korea Institute for Advancement of Technology and Information Technology (RS-2025-25441326).

#### [P2-17]

가혹 대기부식 조건에서 형성된 SA106 Gr.B 탄소강 부식생성물의 미세구조 분석: 임상엽, 하성준, 전순혁\*(한국원자력연구원)

**Keywords:** SA106 Gr.B 탄소강, 대기부식, 건식 휴관, 주증기 배관, 부식생성물

고리 2·3호기와 같이 설계수명이 만료된 국내 원자력발전소는 계속운전을 위한 인허가 절차 과정에서 수년간 장기 휴관 상태를 유지한다. 이 기간 동안 2차 계통 배관의 주재료인 SA106 Gr.B 탄소강은 운전 조건과는 다르게 건식 휴관 상태로 유지되어 대기 환경에 장시간 노출되며, 탄소강 표면에 대기부식이 진행됨에 따라 철산화물 또는 철수산화물 형태의 부식생성물이 형성된다. 장기 휴관 중 형성된 부식생성물은 재기동 시 유동환경 변화, 수화학 조건 복원 및 유속 증가 등에 의해 박리·유리될 가능성이 있으며, 이는 2차 계통 건전성을 저하시킬 수 있다. 따라서, 휴관 기간 중에 형성된 부식생성물의 상 구성, 두께, 치밀도, 결합 구조 및 기지 금속과의 계면 특성을 정밀하게 분석하는 것은 휴관 원전이 재기동 시 건전성 평가와 열화 예측을 위해 매우 중요하다. 그러나, 실제 발전소의 건식 휴관 조건은 상대습도 약 40% 이하로 엄격히 관리되어 부식률이 매우 낮고, 생성되는 부식생성물의 양 또한



극히 제한적이다. 이에 따라 실제 환경에서 형성되는 부식생성물의 정밀 분석 및 미세구조 평가에 제약이 따른다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위하여 휴관 상태의 대기부식 조건이 아닌 좀 더 가혹한 대기부식 조건에서 시험을 수행하였다. 휴관 상태의 탄소강 표면 상태를 모사하기 위하여 하기 위해 pre-oxidation을 통해 탄소강 표면에 magnetite( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 층을 형성시켜 시험편을 제작하였다. 시험편 준비 후 실제 휴관 조건보다 가혹한 상대습도 및 온도 조건에서 약 1년간 장시간 대기 노출 시험을 수행하여 부식산화층을 형성시켰다. 시험 후 형성된 부식생성물에 대하여 광학현미경 및 SEM/EDS를 이용한 표면·단면 미세조직 분석, XRD를 통한 결정상 규명, XPS를 이용한 산화물의 화학적 상태 분석을 수행하였다. 또한 FIB를 이용하여 치밀 산화층의 라멜라 시편을 제작하고 TEM 분석을 통해 산화층의 미세구조 및 산화층/모재 계면 특성을 평가하였다. magnetite 산화층이 형성되지 않은 SA106 Gr.B 원소재에서는 flower-like 형상의 산화물과 치밀한 산화층이 동시에 형성되며 표면 산화가 활발히 진행됨을 확인하였다. TEM 회절 분석 결과, 대기부식에 의해 형성된 치밀 산화층은 뚜렷한 회절 패턴을 보이지 않는 비정질(amorphous) 특성을 나타내었으며, 이는 저온 대기 환경에서 형성된 산화층의 특성에 기인한 것으로 판단된다. 반면, pre-oxidation을 통해 magnetite 층을 형성한 시험편에서는 유의미한 표면 변화가 관찰되지 않아 기존 magnetite 산화층이 대기부식에 대해 보호 효과를 가지는 것으로 나타났다. 본 연구에서 도출된 대기부식 생성물의 미세구조적 특성 및 상 거동에 대한 결과는 실제 발전소 장기 휴관 조건에서 형성될 수 있는 부식층의 특성을 예측하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있다. 나아가 재기동 시 초기 수화학 조건 설정 및 세정 전략 수립, 장기 건전성 평가 모델의 고도화에 기여함으로써 계속운전 승인 과정에서 요구되는 구조물 부식 안전성 평가의 기술적 근거를 제공할 것으로 기대된다.

#### [P2-18]

**TEM-EELS Plasmon을 활용한 CRUD 부착 지르코늄 피복관 산화막 및 수소화물에 대한 미세구조 분석:** 임상엽\*, 서민교, 심희상, 허도행, 전순혁(한국원자력연구원)

**Keywords:** CRUD, 지르코늄 피복관, 지르코늄 수소화물, EELS Plasmon, 지르코늄 산화물

경수로 핵연료 피복관용 지르코늄(Zr) 합금은 장주기 운전 및 고연소도 조건에서 1차계통 내 CRUD(Chalk River Unidentified Deposit) 침적의 영향을 받는다. CRUD는 열전달 저하를 초래할 뿐 아니라 국부 수화학 환경을 변화시켜 CILC(CRUD Induced Localized Corrosion)를 유발하며, 산화막 성장과 수소 흡수 거동에 복합적인 영향을 미친다. 그러나 CRUD-산화막-금속 계면에서 발생하는 상변태 및 미세구조 변화 거동을 정량적으로 규명한 연구는 아직 제한적이다. 본 연구에서는 1차계통 모사 루프 시험을 통해 CRUD를 형성한 지르코늄 피복관을 대상으로 산화 및 수소화 거동을 미세구조 및 상분석 관점에서 통합 평가하였다. CRUD 침적은 Li/B 2/1000 ppm, Ni/Fe 1500/2000 ppm, 328°C, 130 MPa, 용존산소(DO) < 5 ppb, 용존수소(DH) 35 cc/kg- $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{pH}_T$  7.2 조건에서 250시간 수행하였으며, 이후 320°C, 150 MPa, DO < 5 ppb,  $\text{pH}_T$  6.9 조건에서 500시간의 가속 부식 시험을 진행하였다. 분석을 위해 FIB를 활용하여 CRUD-산화막-금속을 동시에 포함하는 단면 TEM 시편을 제작하였다. HAADF-STEM 및 EDS mapping 결과, CRUD층은 다공성 구조로 산화막 상부에 불균일하게 분포하였고, 그 하부에는 비교적 치밀한 Zr 산화막과 금속 모재가 연속적으로 존재하였다. 산화막 내부, 특히 모재와의 계면 인근에서는 크랙이 관찰되었으며, 이는 Zr이  $\text{ZrO}_2$ 로 산화되는 과정에서 발생하는 부피 팽창에 따른 내부 응력 축적에 기인한 것으로 해석된다. 금속 기지에서는 SAED 패턴과 EELS low-loss 영역의 plasmon 분석을 통해  $\delta\text{-ZrH}_{1.5-1.66}$  수소화물 상을 확인하였다. 수소화물은 모재와 결정학적 관계를 가지는 경향을 보였으나, 피복관 형상에 따른 특정 방향으로 정렬되지 않고 전반적으로 무질서하게 분포하는 경향을 보였다. 또한 산화막 상 특성의 정량적 평가를 위해 EELS plasmon 분석을 수행하였다. TEM ring pattern 분석을 통해 산화막의 주요 상이 단사정(monoclinic)  $\text{ZrO}_2$ 임을 확인하였으며, 모재/산화막 계면과 CRUD 접촉부에서의 plasmon energy 변화를 비교함으로써 산화막 전반의 상 특성 및 상변태 거동을 low-loss EELS 기반으로 분석하였다. 본 연구는 CRUD 침적 조건에서 지르코늄 피복관의 산화막 성장, 계면 응력 형성, 수소 침투 및 수소화물 생성 거동을 TEM 미세구조 분석과 EELS plasmon 상분석을 통해 통합적으로 규명하였다. 특히 plasmon energy 기반 상 식별 기법의 적용 가능성을 제시함으로써, CRUD 환경에서의 피복관 산화 메커니즘을 정량적으로 평가할 수 있는 미세구조 분석 체계를 확립하였다.

#### [P2-19]

**크러드 열전달 모델링 기반 핵연료 피복관 열적 건전성 평가 연구:** 하성준\*, 전순혁, 임상엽, 허도행, 심희상(한국원자력연구원), 김도연(한국원자력연구원, 고려대학교), 안동현(한국원자력연구원)

**Keywords:** 핵연료 피복관, 크러드,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ , 크러드 유기 국부 부식, 열전달 모델링

크러드(Corrosion-Related Unidentified Deposits, CRUD)는 1차계통 구조재료에서 용출된 철(Fe)과 니켈(Ni) 이온 등이 산화 및 침전되어 형성되는 금속산화물 부식생성물 침적층으로, 핵연료 피복관 표면에 다공성 구조로 축적된다. 이러한 크러드는 낮은 유효 열전도도로 인해 추가 열저항을 형성하며, 피복관 외표면의 국부 온도상승과 열적 여유도 감소를 초래할 가능성이 있다. 본 연구에서는 다공구조를 모사한 크러드 시편을 제작하여 열물성 데이터를 확보하고, 이를 입력값으로 적용한 COMSOL Multiphysics 기반 열전달 모델링을 구축하여 크러드 특성이 핵연료 피복관 열적 건전성에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 모사 크러드 시편은  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  분말을 기반으로 소결법을 이용해 다공성 구조로 제조하였으며, scanning electron microscopy(SEM)을 통해 미세구조를 확인하였다. 또한 X-ray diffraction(XRD)를 이용하여 시편의 결정구조를 분석하였다. 열물성은 laser Flash analysis(LFA)와 differential scanning calorimetry(DSC)를 활용하여 열확산도 및 비열 측정을 통해 유효 열전도도를 도출하였다. 구축된 열전달 모델은 핵연료 피복관-크러드-냉각재 계를 대상으로 하였으며, 크러드 특성에 따른 피복관 온도 분포 변화를 평가하였다.

**[P2-20]**

**Size-Dependent Antimicrobial Properties of Copper Sulfide Nanoparticles via Integrated Photothermal and Photodynamic Synergy:** Hee Yeon Jeon, Jeong Hyun Kim(Seoul National University of Science and Technology)

**Keywords:** CuS nanoparticles, antibacterial properties, size-dependent, photodynamic therapy (PDT)/photothermal therapy (PTT)

Microbial infections represent a critical challenge to global public health. While antibiotics have been the primary tool for treatment, their effectiveness is rapidly decreasing due to the emergence of bacterial resistance caused by overuse and misuse. To address the limitations of conventional antibiotic-based strategies, nanomaterial-based antimicrobial approaches have emerged as a sophisticated alternative. These nanomaterials operate through integrated mechanisms, including physical interaction, ion dissolution, and reactive oxygen species generation, which function synergistically to enhance antimicrobial performance. Notably, exposure to light further extends these capabilities to include photodynamic therapy (PDT) and photothermal therapy (PTT). While materials such as  $\text{TiO}_2$  and ZnO have been widely studied, their application is often hindered by wide band gaps and limited photothermal properties. In this context, Copper Sulfide ( $\text{Cu}_{2-x}\text{S}$ ) nanoparticles have gained significant attention for their tunable Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) in the near-infrared (NIR) region. Specifically, covellite (CuS), a copper-deficient p-type semiconductor, exhibits a low bandgap (~2.2 eV) and a high free carrier concentration, resulting in strong NIR absorption and outstanding photothermal conversion efficiency. The high temperatures generated by the photothermal properties can not only induce bacterial death through thermal effects but also promote the diffusion of released copper ions, thereby expanding the range of antibacterial activity. In addition, CuS can generate large amounts of reactive oxygen species (ROS) through photodynamic activity, and it possesses high stability and biocompatibility. Therefore, CuS nanoparticles are considered a promising material capable of maximizing antibacterial performance by inducing direct bacterial destruction through LSPR-mediated photothermal effects while simultaneously promoting ROS generation. As previously mentioned, nanoscale materials are essential for maximizing the antibacterial effects of PTT and PDT. Therefore, in this study, we systematically evaluated the antibacterial performance of CuS nanoparticles with various particle sizes, focusing on elucidating the correlation between particle size and the synergistic effects of PDT and PTT. This study provides insights into the optimization of CuS nanoparticles under both infrared irradiation and dark conditions by modulating their photothermal and photocatalytic properties according to particle size, offering a potential alternative to conventional antibiotics.

**[P2-21]**

**열화상 카메라를 이용한 믹싱 공정 실시간 혼합 거동 평가:** 이주연, 최연지, 이준호\*(고려대학교)

**Keywords:** Thermographic analysis, Slurry mixing, Real-time monitoring, Viscosity convergence, Battery manufacturing process

본 발표에서는 열화상 카메라를 활용한 배터리 슬러리 믹서의 혼합 거동 실시간 평가 기법을 개발하기 위해, 이중 온도의 유체를 이용한 수모델 모사 실험 결과를 보고한다. 기존의 배터리 슬러리 믹싱 공정에서는 혼합의 균일성을 정량적으로 평가하기 위한 지표가 부족하며, 특히 믹서 내부 상태를 실시간으로 관찰하기 어려운 한계가 존재하였다. 한편, 배터리 슬러리 믹싱 공정에서는 교반 중 슬러리 입자의 마찰열 발생에 착안하여 열화상 분석 기법을 통한 믹싱 공정 분석 가능성을 검토했다. 열화상 분석 기법은 비접촉 방식, 고해상도, 비용 효율성 및 실시간 데이터 수집이 가능하다는 점에서 믹서내 슬러리 혼합 거동 분석에 적합한 대안으로 주목된다. 본 연구에서는 실제 배터리 산업용 플래너터리 믹서에 온도가 상이한 두 액체를 투입한 후 교반을 진행하며, 혼합 거동에 따른 상부 표면 온도와 내부 온도 변화 양상을 분석하였다. 실험은 열화상 카메라를 활용하여 액체 상단 표면에 위치한 6개 지점의 실시간 온도를 측정하고, 동시에 믹서 내부에 장착된 접촉식 온도계를 통해 내부 온도 데이터를 수집하였다. 추가로, 차압식 점도계를 활용하여 점도 변화를 실시간으로 측정함으로써 열적 변화와 점성 변화 간의 상관관계를 분석하였다. 실험 결과, 교반 초기에는 각 측정 지점 간 온도 편차가  $\pm 2.0^\circ\text{C}$  이상으로 나타났으나, 교반이 진행됨에 따라 전체 온도가 일정 지점에서 수렴하였으며, 최종적으로  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  이내로 위치 별 편차가 감소하는 양상을 보였다. 아울러 점도 역시 온도 상승 구간에서 급격히 감소하고, 일정 온도에 도달한 이후에는 점도가 안정화되는 특성을 보였다. 온도 수렴 시점, 위치별 온도 편차 최소화 시점, 점도 안정화 시점이 서로 일치함을 확인함으로써, 해당 지표들이 슬러리의 균일 혼합 상태를 의미하게 반영함을 입증하였다. 이러한 결과를 통해 유사한 분석 방법을 통하여 향후 배터리 슬러리 믹싱 공정에 있어 실시간 혼합 안정성 모니터링, 공정 에너지 효율성 향상, 및 대형 믹서 적용 시 균일 혼합 조건 도출을 위한 기반 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**[P2-22]**

**차세대 금속연료 제조방법론에 대한 비교 분석 연구:** 안정수\*, 박상규, 김준환(한국원자력연구원)

**Keywords:** 금속핵연료, U-Zr, 사출주조, 중력주조, 상압소결, 스파크 플라즈마 소결

차세대 원자로의 성능과 안전성 향상을 위해서는 금속연료의 제조기술 고도화가 요구된다. 본 연구에서는 연료-피복관 상호반응을 완화하고 열적 여유도를 확보할 수 있는 환형 U-Zr계 금속연료를 제조하기 위하여, 대표적인 제조 공정들을 적용-비교하여 공정별 특성과 한계를 정성적으로 평가하였다. 비교 대상 공정은 주조 기반 공정(사출주조, 중력주조)과 분말야금 기반 공정(상압소결, 스파크 플라즈마 소결)으로 구성하였으며, 제조 용이성, 형상 재현성, 치밀화 거동, 미세조직 균질성, 공정 안정성 및 확장성 관점에서 종합적으로 분석하였다. 사출주조는 합금화를 용융 단계에서 확보할 수 있어 치밀화와 조직 균질성 측면에서 유리하였으나, 금형 설계와 냉각 조건에 민감하여 수축 결함, 형상 편차, 열응력 기인 균열 등 공정 제어가 핵심 과제로 도출되었다. 중력주조는 공정 구성이 단순하고 형상 구현의 안정성이 비교적 우수하였으나, 응고 과정에서의 수축 결함과 금형 재료 기인 표면 오염 가능성이 관찰되어 금형 코팅 및 후처리 조건 최적화의 필요성이 확인되었다. 상압소결은 원료 분말의 유동성·성형성 및 소결 중 합금화·치밀화

한계로 인해 환형 형상 구현과 고밀도화에 제약이 나타났으며, 기공 잔류와 미세조직 불균질이 주요 문제로 파악되었다. 반면 스파크 플라즈마 소결은 짧은 공정 시간에도 비교적 우수한 치밀화와 미세조직 개선 효과를 보였으나, 단축 가압에 따른 조직 이방성, 환형 금형 분리의 난이도, 장주기 형상 제조 및 대량생산으로의 확장성 등 공정 스케일업 측면에서 해결 과제가 존재하였다. 종합적으로, 주조 기반 공정은 형상 구현과 생산성 관점에서, 고속 소결 기반 공정은 치밀화 및 조직 제어 관점에서 각각 강점을 보였으며, 목표 성능과 생산 시나리오에 따라 공정 선택 및 공정 변수 최적화 전략이 달라져야 함을 확인하였다.

**[P2-23] Canceled**

**[P2-24] Canceled**

Cobalt-Driven Structural Modulation of CrOx Electrocatalysts toward Advanced AEM Water Splitting: Bee lyong Yang\*, Akhter Sk Samim, Mallappa Mahanthapa, Ahmad Shahbaz(Kumoh National Institute of Technology, GHS Co, Ltd), Soon Yong Kweon(GHS Co, Ltd, Korea Transportation University)

**Keywords:** HER, OER, Green Hydrogen, AEM

The oxygen evolution reaction (OER) poses a significant challenge in water electrolysis because of its slow reaction kinetics and the need for high overpotentials. This challenge typically requires the use of expensive precious metal catalysts such as iridium and ruthenium oxides, which limits the commercial viability of large-scale hydrogen production. This study introduces a cost-effective electrodeposition synthesis of chromium-mediated cobalt-chromium oxide (CoCrOx) electrocatalysts specifically engineered for enhanced OER performance, where strategic chromium incorporation creates synergistic electronic effects that optimize adsorption energies of OER intermediates. Thin-film XRD confirms the amorphous nature of CoCrOx, which promotes efficient charge transfer by enhancing electronic interaction between Co and Cr sites during the OER process. The CoCrOx catalyst achieves exceptional OER performance with a remarkably low overpotential of 220 mV at 50 mA cm<sup>-2</sup> in alkaline media, outperforming chromium-based oxide catalysts and benchmark RuO<sub>2</sub>. At the same time, the integrated AEM water electrolyzer delivers an impressive current density of 950 mA cm<sup>-2</sup> at 1.85 V cell voltage. This work establishes CoCrOx as a durable, cost-effective OER electrocatalyst offering a viable commercial pathway to reduce dependence on precious metals in industrial water electrolysis, successfully bridging the gap between laboratory innovation and commercial hydrogen production applications. Acknowledgments: This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) under project number 202100390004. KIT Project. This research is funded by the Small and Medium Business Technology Information Promotion Agency (project number 202402570002). This research was conducted with the support of the Korean government (Ministry of SMEs and Startups) and the research grant from the Korea Institute for Advancement of Technology and Information Technology (RS-2025-25441326).

**P3 : 고엔트로피 합금**

Room 3층 로비, 4월 28일

**[P3-1]****냉각 속도 제어에 따른 철계 L1<sub>2</sub> 석출강화 합금의 연속 석출물 형성과 기계적 물성:** 문광현, 김진경\*(한양대학교)**Keywords:** 다성분계합금, 석출강화, L1<sub>2</sub> 석출상, 연속 석출물, 기계적 물성

L1<sub>2</sub> 석출강화 합금은 FCC 기지와 정합 계면을 이루는 석출물을 형성하며 우수한 강도와 연성을 확보할 수 있는 재료로 알려져 있다. 700 °C 이하의 저온 열처리 시 결정립계에 조대한 불연속 석출물이 형성되는 반면 900 °C 이상의 고온 열처리 시 결정립 내 연속 석출물이 형성된다. 그러나 비용 절감을 위해 합금 내 철 함량을 증가시키면 고온 열처리 조건에서 L1<sub>2</sub> 석출물의 분율이 낮아지는 한계가 있다. 본 연구에서는 냉각속도 제어를 통해 철계 L1<sub>2</sub> 석출강화 합금 내 높은 분율의 연속 석출물을 형성했다. 1000 °C에서 10분동안 열처리 후 650 °C까지 각각 2 °C/min 및 10 °C/min으로 냉각한 뒤 급냉하였다. 두 조건 모두 불연속 석출이 억제되었으며, 냉각속도 증가에 따라 석출물의 크기는 약 50 nm에서 20 nm로 감소했다. 인장시험 결과 냉각속도 증가 시 강도는 유지되면서 연신율이 향상되었으며 이러한 기계적 물성과 미세조직 간의 상관관계를 고찰하였다.

**[P3-2]****고항복강도를 갖는 NiCr(Co, Al) 중엔트로피 합금의 수소취성 거동:** 정휘윤, 윤성민, 이재인\*(부산대학교)**Keywords:** High-entropy alloys, Hydrogen embrittlement, Solid-solution strengthening, Lamellar structure

FCC계 오스테나이트 강은 BCC계에 비해 낮은 수소확산계수와 높은 수소 고용도로 우수한 수소취성 저항성을 보인다. 하지만, 저장용기로 활용함에 있어 150 – 300 MPa 정도의 낮은 항복강도가 문제점으로 대두되고 있다. 본 연구에서는 CrMnFeCoNi 5원계 고엔트로피 합금 대비 항복강도가 높은 CrCoNi 합금의 조성비를 제어하여 고항복강도를 갖는 신합금을 설계하였고,  $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 의 속도로 인장 시험을 진행하여 수소 장입 전 대비 항복강도, 인장강도 및 연신을 변화를 확인하였다. 한편, 열처리 조건에 따라 FCC 단상 또는 FCC/BCC 라멜라 구조를 갖는 고강도 NiCrAl 합금의 수소취성 거동을 평가하였다. 이후 두 합금들에 대하여 전기화학적으로 수소를 장입하여 수소취성 저항성을 확인하였다. 특히 NiCrAl 합금의 경우, 미세조직이 FCC 단상 또는 FCC/BCC 라멜라 구조를 가질 때 수소 장입 전과 후의 파단경로 차이를 확인하였다.

**[P3-3]****고엔트로피 합금 설계를 통한 상용 합금의 고온 특성 강화:** 정주리, 김종태, 석진우, 이미혜, 한슬기, 한준희, 강이승\*(한국생산기술연구원)**Keywords:** 고엔트로피 합금, 기계적 특성, 고온특성

Near-β티타늄 합금의 일종인 Ti-17 합금은 열처리 조건에 따라 α상과 β상의 분율 및 형상 제어가 용이하여 독특한 미세조직을 형성한다. 이러한 미세조직적 특성 덕분에 고온 크리프(Creep) 저항성과 기계적 강도가 우수하여 항공기 엔진 블레이드 등의 핵심 소재로 널리 사용되고 있다. 그러나 기존 Ti 합금 대비, 더 높은 온도 영역에서의 활용에는 여전히 한계가 있다. 한편, 내열 고엔트로피 합금(RHEAs)은 4대 핵심 효과, 특히 심한 격자 왜곡(Severe Lattice Distortion)과 느린 확산(Sluggish Diffusion) 효과에 기인하여, 고온에서도 탁월한 기계적 강도와 열적 안정성을 유지한다. 하지만, 구성 원소의 높은 밀도와 제조 비용으로 인해 상용화에 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 상용 Ti-17 합금에 고엔트로피 합금의 설계 개념을 도입하여, 기존 Ti-17 합금의 제한적인 작동 온도를 극복하고자 하였다. 설계된 합금은 진공 아크 용해 및 석선 주조 공정을 통해 제조되었으며, 이후 균질화 및 시효 열처리를 단계적으로 수행하였다. 합금의 미세조직은 주사전자현미경(SEM-EDS)과 X선 회절 분석기(XRD)를 이용하여 분석하였으며, 만능재료 시험기(UTM)를 통해 상온 및 고온 기계적 특성을 평가하였다. 본 연구는 상용 합금 기반의 고엔트로피 설계 전략을 통해 기존 합금의 한계를 극복하고, 나아가 고엔트로피 합금의 실질적인 상용화 가능성을 제시하는 데 그 목적이 있다.

**[P3-4]****Loading Conditions and Geometric Constraint Effects on the Mechanical Behavior of Complex Concentrated Alloys:****예정원, 민현기, 김동환, 이명규, 박은수\*(서울대학교)****Keywords:** Complex concentrated alloys (CCAs), Transformation-induced plasticity, Formability, Loading condition, Schmid factors

Complex concentrated alloys (CCAs)는 다수의 원소로 이루어진 합금으로 격자 비틀림 효과와 그에 따른 solid solution strengthening 효과로 인해 높은 강도와 인성 등의 우수한 기계적 특성을 보인다. 이러한 특성으로 인해 CCAs는 차세대 구조재료로서 주목을 받고 있지만, CCAs가 구조재료로서 상용화되어 사용되기 위해서는 일축 응력 상태에서의 소성 변형능(plasticity) 뿐만 아니라 이축 응력 상태를 가지는 성형 환경에서의 성형성 평가가 필수적이다. 이때 성형 환경에서는 재료의 변형 기구와 초기 미세 구조 등에 따라 일축 응력 조건과는 다른 소성 변형능이 나타날 수 있다. 따라서 본 연구에서는, 변형 기구에 영향을 미친다고 알려진 적축 결합에너지와 상관 관계가 있는  $\Delta G^{\text{hcp-fcc}}$  값을 제어하여 전위 활주, 쌍정 유기 소성, 변태 유기 소성을 주요 변형 기구로 갖는 CCAs를 선정하였다. 이후, 선정된 CCAs에 대해 Limit Dome Height(LDH) 실험을 실시하여 이축 응력 상태에서의 소성 변형능을 평가하였다. 그 결과, 변태 유기 소성이 주요 변형 기작인 CCAs의 소성 변형능이 일축 응력 조건에서의 소성 변형능에 비해 크게 저하되는 것을 확인하였다. 이러한 원인을 규명하기 위해, 재료의 결정학적 방위에 따라 슬립 시스템의 활성화 가능성을 평가할 수 있는 Schmid factor분석을 수행하였다. 우선, 압연 방향에 따른 일축 인장 실험(RD(0°), TD(90°), DD(45°))을 통해 재

료가 무작위 결정학적 orientation을 갖는 것을 확인하였다. 이후, 일축 응력 상태 및 이축 응력 상태 각각에서 무작위 orientation에 대해 전위 활주시의 최대 Schmid factor와 변태 유기 소성시의 최대 Schmid factor 값을 비교 분석하였다. 그 결과, 일축 응력 상태에서는 변태 유기 소성이 유리한 결정학적 orientation의 분포가 이축 응력 상태보다 많다는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해, LDH 실험(이축 응력 상태)에서 변태 유기소성을 주요 변형 기구로 갖는 CCA의 소성 변형능이 감소하는 원인을 규명할 수 있었다.

### [P3-5]

**Al-Cr-Fe-Ni-Ti 철계 고엔트로피 합금의 석출상의 구조가 아결정립 형성 및 초소성 거동에 미치는 영향:** 박상민, 최순원, 박상민, 최순원, 박강현(공주대학교), 임가람(한국재료연구원), 송기안\*(공주대학교)

**Keywords:** high-entropy alloys, superplastic behavior, dynamic recrystallization, precipitates, sub-grain

$\gamma/\gamma'$  구조를 갖는 Ni기 초합금은 우수한 고온 특성을 가지나, 소재 가격이 매우 높다는 한계가 있다. 반면, 철계 고엔트로피 합금은 낮은 소재 비용과 열팽창계수를 가져 Ni기 초합금의 대체재로 주목받고 있다. 특히, L2<sub>1</sub> 석출상의 영향으로 기존 페라이트 내열 합금 대비 고온 강도가 우수한 Al-Cr-Fe-Ni-Ti 합금이 보고되었다. 그러나 Al-Cr-Fe-Ni-Ti 철계 고엔트로피 합금은 활성화 가능한 슬립 시스템이 제한적이고 상대적으로 낮은 결정립계 결합력으로 인해 연성이 낮다는 한계가 있다. 이는 제품의 성형성에 직접적인 연관이 있기 때문에 개선이 요구된다. 초소성은 수백 퍼센트 이상의 큰 변형률을 나타내는 특성으로 이를 활용하여 철계 합금의 성형성과 연성을 확보할 수 있다. 최근 연구에 따르면 석출상에 의해 형성된 미세 아결정립 구조를 갖는 합금에서, 전위 축적과 결정립 회전에 의한 동적 재결정이 발생하면 초소성이 개선되었다고 보고되었다. 본 연구의 목적은 석출상의 구조적 인자가 아결정립 형성에 미치는 영향에 대해 연구하고, 더욱 미세한 아결정립의 형성을 유도하여 초소성 특성의 개선을 얻고자 함에 있다. 석출상의 구조적 인자를 제어하기 위해, 급냉 및 변형유도 핵생성 압연 공정을 적용하여 석출상의 크기, 분포 등을 제어하고자 하였고, 후속 열간 압연 및 열처리 공정을 통해 아결정립의 구조를 제어하고 초소성에 대한 특성을 평가하였다. 이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 한국산업기술평진원 연구비 지원에 의한 연구임 (P0022331, P0018009)

### [P3-6]

**고변형률 속도 조건에서 내화 고엔트로피 합금의 파괴 거동 및 에너지 방출 특성:** 노시연, 김재권, 박은수\*(서울대학교)

**Keywords:** Refractory high entropy alloy, ballistic impact test, Adiabatic shear band(ASB), Impact energy release

최근 항공우주 분야에서는 우주 잔해(space debris)의 지속적인 증가로 인해 구조물에 대한 고속 충돌 위험이 크게 확대되고 있다. 이러한 입자들은 크기가 매우 작더라도 초고속으로 충돌할 경우 구조물에 치명적인 손상을 유발할 수 있어, 극한 조건에서도 안정적인 기계적 성능을 발휘할 수 있는 구조용 소재에 대한 요구가 증가하고 있다. 이와 같은 환경에서 사용되는 소재는 높은 강도와 연성을 동시에 확보하는 것은 물론, 극한 변형률 조건에서도 급격한 취성 파괴 없이 충분한 소성 변형을 수용할 수 있는 파괴 거동을 만족해야 한다. Refractory High Entropy Alloy(RHEA)는 내열 금속 원소로 구성된 합금 시스템으로, 우수한 고온 안정성과 강도를 기반으로 극한 환경용 구조재료로서의 활용 가능성이 주목받고 있다. 그러나 RHEA의 고변형률 조건에서의 변형 및 파괴 메커니즘에 대한 이해는 아직 충분히 확립되지 않은 상황이다. 이에 본 연구에서는 RHEA를 대상으로 다양한 고변형률 속도 조건에서 실험을 수행하고, 변형률 속도에 따른 미세조직 변화, 파괴 거동 및 에너지 특성을 분석하여 고변형률 속도 조건에서 RHEA의 파괴 메커니즘을 체계적으로 규명하였다. 그 결과, 변형률 속도에 따라 상이한 파괴 거동이 관찰되었다. 특히 탄도 충격 실험에서 충돌 속도 1000 m/s 이하에서는 전위의 활주에 의해 지배되는 파괴 거동이 우세한 반면, 그 이상의 속도 조건에서는 관통면에서 수지상(dendrite) 조직이 형성되는 미세조직 변화가 관찰되었다. 이는 ASB(adiabatic shear band) 형성과 급격한 온도 상승, 국부적 용융(local melting) 및 재응고 과정 등의 열적 기여가 수반된 파괴 메커니즘이 작용했을 가능성을 시사한다. 이러한 결과는 초고속 충격 환경에서의 재료 거동에 대한 이해를 확장함과 동시에, 극한 환경용 구조 소재로서 RHEA의 적용 가능성을 제시한다.

### [P3-7]

**Homogeneous Cantor Nanoparticles Synthesis via Ultrasonic Spray Pyrolysis and Consolidation Maintaining Particle Size by Spark Plasma Sintering:** Seo Sa Rang Kim, Young-In Lee\*, Jeong Hyun Kim, Hee Yeon Jeon, Kyung Shik Yoon, Hyeon Seong Kim, Jae min Park(Seoul National University of Science and Technology)

**Keywords:** High-Entropy Alloy, Ultrasonic Spray Pyrolysis, Spark Plasma Sintering, Cantor alloy

High-entropy alloys (HEAs) have attracted significant attention as a novel alloy design strategy to meet the increasingly demanding property requirements of aerospace and energy systems, where materials are exposed to combined extreme conditions such as high temperature, high stress, radiation, and corrosive environments. Unlike traditional alloy designs centered on a single base metal, HEAs are composed of five or more elements mixed at 5–35 at% each to induce four core effects—high configurational entropy, sluggish diffusion, severe lattice distortion, and the cocktail effect—which collectively suppress the formation of brittle intermetallic compounds and unlock the potential for exceptional mechanical strength. However, conventional synthesis routes for HEAs often suffer from phase decomposition and non-equilibrium phase formation, necessitating additional heat treatments; moreover, limitations in controlling powder particle size hinder the fabrication of fully dense sintered compacts. To overcome these challenges, ultrasonic spray pyrolysis (USP) was employed to establish a high-entropy environment starting from the precursor solution stage, where each atomized droplet acts as an independent micro-reactor, enabling a homogeneous chemical composition. The rapid crystallization inherent to USP effectively suppresses elemental segregation, allowing the direct synthesis of homogeneous spherical HEA nanoparticles without post-synthesis heat treatment. In this study, an equiatomic Cantor alloy (CoCrFeMnNi), a representative HEA, was synthesized via USP to

produce chemically uniform powders. To fully reduce the oxygen-affinitive and difficult-to-reduce elements, chromium (Cr) and manganese (Mn), a stepwise reduction strategy combining hydrogen reduction and calcium reduction–diffusion (Ca RD) processing was applied, successfully yielding a face-centered cubic (FCC) Cantor alloy powder. To enable low-temperature and short-time sintering, spark plasma sintering (SPS) was applied, and a comparison of sintering density showed that a sintered body prepared from USP-derived nanoparticles exhibited higher densities than those fabricated from micro-sized powders synthesized by atomization under identical temperature conditions. In addition, minor phase separation observed after the Ca RD process was gradually eliminated with sufficient diffusion time, resulting in a stable single-phase FCC sintered body. Finally, hardness measurements were performed to assess the mechanical properties and to elucidate the influence of microstructure and interfacial behavior of nanoscale and microscale HEA sintered bodies on mechanical performance.

### [P3-8]

**Shape Memory Effect in CoCrNi System:** Ana Paula Nolasco Aguilera, Jinsurang Lim, Hwi Yun Jeong, Je In Lee\*(Pusan National University)

**Keywords:** High-entropy alloy, shape memory alloy, martensitic transformation.

In the last two decades, a large number of studies have been conducted to report the extraordinary mechanical properties of the Cantor alloys and its subsets, particularly the CoCrNi system. Recent studies revealed the shape memory effect (SME) in the CoCrFeMnNi system, attributed to the reverse transformation of stress-induced HCP martensite. However, despite the extensive mechanical characterization, reports of shape recovery associated with the reversible martensitic transformation between FCC and HCP remain scarce in the CoCrNi system. The present work investigates the shape recovery behavior in the CoCrNi system with varying the chemical compositions. A series of CoCrNi alloys were fabricated and systematically characterized using X-ray diffraction, differential scanning calorimetry and thermo-mechanical analysis. The SME was evaluated after compressive pre-straining, and the shape recovery ratio (SRR) was analyzed. The results revealed a strong composition dependence of phase stability. With Ni contents below 15 at.%, samples exhibited thermally induced HCP phase. However, increasing Ni content above 25 at.%, stabilizes the phase stability of FCC, which suppresses the FCC  $\leftrightarrow$  HCP transformation. Thus, the chemical compositions of the optimum SRR value were found to be near 20 at.% of both Ni and Cr content.

### [P3-9]

**고엔트로피 효과 극대화를 통한 Cu-Si계 고엔트로피 합금의 단순 고용체 형성 및 전기화학적 이산화탄소 환원 촉매가능성 연구:** 이윤진, 이용진, 안병민\*(아주대학교)

**Keywords:** high-entropy alloys, Cu-Si catalyst, solid state synthesis, alloying behavior, surface chemical state

탄소중립과 기후위기 대응을 위한 이산화탄소 활용 기술 수요가 증가함에 따라, 이산화탄소 환원을 기반으로 한 탄화수소화 전환 반응에 적용 가능한 고효성·고선택성 촉매 개발이 중요해지고 있다. 기존 Cu-Si 합금 촉매는 이산화탄소 전환반응의 다탄소 생성에서 Cu가 관여하며, Si는 상안정성과 표면 산화 거동에 영향을 미침으로써 촉매의 수명에 영향을 미친다. 하지만 촉매 합성 공정 중 규화구리(III) 금속간화합물을 포함한 다양한 규화물 및 규산동 상이 형성되어 촉매 활성을 저해하는 요인으로 작용한다. 이에 본 연구에서는 상안정성과 전자구조 제어가 가능한 고엔트로피 합금을 적용하여 Cu-Si 합금에서 나타나는 금속간화합물을 제어하고, 단순 고용체를 형성할 수 있는 조성을 제시하고, 촉매 소재로서의 활용 가능성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 Cu 및 Si 함량을 조절한  $\text{Cu}_x\text{Si}_y\text{V}_{24}\text{Mn}_{18}\text{Co}_6\text{Sn}_6$  고엔트로피 합금 분말을 설계하였으며, 고에너지 볼 밀링을 통해 고상 합성하였다. 조성 변화에 따른 활성상 형성은 X선 회절 분석을 통해 분석하였으며, 주사 전자 현미경을 이용해 촉매 분말의 크기, 형상 및 미세조직을 관찰하였다. 또한 Brunauer–Emmett–Teller method(BET)로 분말의 비표면적과 기공 특성을 분석하였고, X선 광전자분광기(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)를 이용해 표면 산화수 및 화학결합 상태를 분석하였다. 본 연구는 Cu-Si 조성 변화에 따른  $\text{Cu}_x\text{Si}_y\text{V}_{24}\text{Mn}_{18}\text{Co}_6\text{Sn}_6$  촉매의 활성상 및 표면 특성을 분석하여 Cu-Si 기반 고엔트로피 합금 이산화탄소 환원 촉매 합금 연구에 기초 자료로 활용될 수 있다.

### [P3-10]

**헤테로구조와 불연속 나노석출물을 통한 CrCoNi 기반 중엔트로피 합금의 우수한 초저온 기계적 물성 연구:** 이하훈(고려대학교), Wei Zhang(Central South University), 성민영, 남승진, 정두효(고려대학교), 백주현(고려대학교, 한국과학기술연구원), 서진유(한국과학기술연구원), 장태진, 이준호, 김영균, 나영상(한국재료연구원), 김세호(고려대학교), Zhiming Li(Central South University), 손석수\*(고려대학교)

**Keywords:** 초저온, 헤테로구조, 불연속 나노석출물, 적층 결함, 기계적 물성

수소, 우주 등 산업 분야의 발전에 따라 near 0K의 초극저온에서 사용될 수 있는 구조재료에 대한 수요가 증가하고 있다. 초저온 환경에서 활발히 연구되고 있는 FCC계 고엔트로피 합금은 우수한 상안정성을 가지나 낮은 항복 강도를 가져, 보다 높은 기계적 물성을 달성하기 위해 추가적인 강화 전략이 필요하다. 그러나, 고강도의 달성을 위해 단순히 결정립 크기를 줄이거나 조대한 비정형 석출물을 석출시키는 경우 가공경화의 제한 및 전위 축적으로 인한 응력 집중 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 CrCoNi 기반 중엔트로피 합금에 냉간 압연 후 직접 시효 열처리 공정을 적용하여 미세결정립 (fine grain, FG)와 초미세결정립 (ultra-fine grain, UFG)로 구성된 헤테로구조와 모재와 정합인 불연속  $\text{Li}_2$  나노석출물을 동시에 구현하였다. 이러한 미세조직에 의해 높은 결정립 강화와 규칙화 강화가 발생하며, 초저온에서 항복강도 2.2 GPa, 인장강도 2.5 GPa 및 연신율 약 19%의 초고강도

및 순수한 연신을 확보하였다. 온도가 감소함에 따라 적층 결함 에너지(SFE)가 감소하고, 4.2K에서 더 많은 적층 결함과 Lomer-Cottrell (LC) lock이 활성화되어 우수한 가공경화에 기여하였다. 또한, 초저온에서 관찰된 더 큰 hysteresis loop와 높은 KAM은 전위 성질의 변화에 따른 GND 밀도의 증가 및 헤테로구조에 의한 후방 응력 (back stress) 효과가 더 커짐을 시사하며 이는 결과적으로 뛰어난 기계적 물성으로 이어진다. 본 연구는 초저온 환경에서 헤테로구조와 불연속 석출에 기반한 합금의 우수한 물성을 규명하며, 향후 극한 환경용 구조재료 설계를 위한 미세조직 설계 방향성을 제시한다.

### [P3-11]

**탄소 첨가 L12 석출강화 철계 다성분계 합금의 미세조직 및 기계적 물성:** 윤주희, 김진경\*(한양대학교)

**Keywords:** 다성분계 합금, L12 석출물, 탄소 첨가

L12 석출 강화 다성분계 합금은 우수한 강도-연신을 조합으로 큰 주목을 받고 있다. 본 연구는 코발트를 포함하지 않은 철계 L12 석출강화 합금에 탄소를 첨가하여 석출 강화 및 결정립 미세화를 통한 기계적 물성 향상을 검토하였다. 아크멜팅으로 제조한 탄소 첨가 합금은 열간 압연과 균질화, 냉간 압연을 거쳐 재결정화 열처리를 수행하였다. 이후 600도에서 900도까지 24시간 시효 열처리를 수행하여 L12 및 TiC를 포함한 다양한 석출물의 형성과 미세조직 변화를 관찰하였다. 또한 동일한 공정을 적용한 탄소 미첨가 합금과 미세조직 및 기계적 물성을 비교함으로써 탄소 첨가가 석출 거동 및 기계적 물성에 미치는 영향을 분석하였다. 인장 시험 결과, 탄소 첨가 합금은 600도 시효 조건에서 가장 우수한 강도를, 900도 시효 조건에서 우수한 연신율을 나타내었다. 두 시효 조건을 대상으로 TEM 분석을 수행하여 전위 거동과 L12 및 다양한 석출물의 석출거동을 보다 상세히 고찰하였다.

### [P3-12]

**Design and Theoretical Characterization of a Dual-Alloy System Comprising Fe-based MEA Container and Cu-based HEA Filler via Upcycling Nuclear Decommissioning Waste:** dongjun Shin\*, hwanseo park(Korea Atomic Energy Research Institute)

**Keywords:** High/Middle Entropy Alloys, Nuclear Decommissioning Waste, Up-cycling, Radioactive Waste Disposal Container, Low Melting Point Filler

This study proposes a novel dual-alloy system for radioactive waste disposal containers by upcycling metal waste generated during nuclear decommissioning, including carbon steel, stainless steel, copper, and aluminum. To address the mass balance imbalance inherent in waste generation ratios, we designed an Fe-Cr-Ni-Mn-Si-Cu Medium Entropy Alloy (MEA) for the high-melting-point container body and a Cu-Si-Al-Fe-Cr-Ni High Entropy Alloy (HEA) for the low-melting-point filler metal. The MEA container material is designed to stabilize the austenite phase using manganese instead of high-cost nickel, while theoretically enhancing passivation and antibacterial properties through the addition of silicon and copper. The HEA filler metal is engineered to achieve a melting point below 1050°C via silicon content control, while maintaining mechanical strength through solid-solution strengthening of transition metals. The characterization in this study focuses on predicting phase stability using thermodynamic simulations (CALPHAD) and analyzing microstructural evolution under air-cooling conditions. A key design strategy involves electrochemical tuning to ensure the filler metal exhibits a more noble potential than the container material. This theoretical approach aims to mitigate galvanic corrosion at the joint interface and validate the feasibility of using the filler as an internal corrosion-resistant liner. This research presents a sustainable upcycling model that transforms nuclear waste into high-value disposal components through advanced alloy design.

### [P3-13]

**CALPHAD-Guided Design of Eutectic High-Entropy Alloys: Microstructural Evolution and Mechanical Properties:** VIKAS SHIVAM\*, Eun Soo Park(Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Republic of Korea)

**Keywords:** Eutectic high-entropy alloys (EHEAs), Alloy design, Microstructure, Mechanical properties

Eutectic high-entropy alloys (EHEAs), regarded as bioinspired lamellar composites, offer significant potential to simultaneously achieve high strength and good ductility for structural applications through microstructural engineering. However, a pronounced modulus and hardness mismatch between constituent phases often results in premature fracture, thereby limiting plastic deformation and restricting the attainable yield strength at room temperature. Furthermore, identifying optimal eutectic compositions in HEA systems remains a persistent challenge due to the scarcity of higher-order phase diagrams. In this context, the CALPHAD methodology has emerged as a powerful alternative to empirical alloy design approaches, despite certain thermodynamic limitations. In the present work, eutectic compositions in the FeNiCoCrAlTi high-entropy alloy system were designed through systematic compositional variation guided by thermodynamic calculations. The alloys were synthesized by arc melting followed by drop casting to ensure chemical homogeneity. Phase constitution and microstructural evolution were characterized using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The eutectic nature of the designed alloys was confirmed by differential scanning calorimetry (DSC) through analysis of heating and cooling curves. The as-cast alloys exhibited a characteristic two-phase eutectic microstructure consisting of a C14 Laves phase and a BCC phase. Subsequent thermal treatments were employed to tailor defect structures and refine microstructural features. Room-temperature mechanical properties were systematically evaluated to assess the influence of microstructural modulation on strength-ductility behavior.



**[P3-14]**

**B 첨가에 따른 석출강화형 철계 고엔트로피 합금의 크리프 특성 변화:** 최순원, 박상민, 박강현(국립공주대학교), 권현준, 심상훈, 임가람(한국재료연구원), 송기안\*(국립공주대학교)

**Keywords:** high-entropy alloys, precipitation, Creep resistance, Atomprobe tomography(APT)

$\gamma/\gamma'$  구조(무질서 FCC/질서 FCC)를 갖는 Ni 기반 초합금은 973 K 이상의 고온에서 우수한 기계적 특성을 나타내며, 이에 따라 우주항공 및 발전소와 같은 극한 환경에서 널리 활용되고 있다. 그러나 Ni 및 Co의 높은 함량으로 인해 소재 비용이 크게 증가하는 단점이 있으며, 이를 대체할 수 있는 소재의 개발이 지속적으로 요구되고 있다. 철계 고엔트로피 합금은 Ni 기반 초합금에 비해 높은 열전도도, 낮은 열팽창 계수, 낮은 원소 비용 등의 장점을 가지기 때문에 기존 소재를 대체할 수 있는 재료로 주목받고 있다. 특히 L2<sub>1</sub> 석출상으로 강화된 Fe-Cr-Ni-Al-Ti 합금은 기존 페라이트강 대비 우수한 고온 인장 강도를 나타낸 것으로 보고되었다. 그러나 고온에서의 우수한 강도에도 불구하고, 높은 석출상 분율에 기인한 취성 증가로 인해 실제 구조용 재료로의 적용에는 어려움이 있다는 한계가 존재한다. 이에 따라 본 연구에서는 기 보고된 합금의 연성을 확보하기 위해 합금 원소 함량을 조절하여 석출상 부피분율을 낮춘 합금을 설계하였으며 해당 합금의 극한 환경에서의 장기 신뢰성 확보를 위해 고온 크리프 특성을 평가하였다. 추가적으로, B 첨가에 따라 결정립 경계에 편석되어 결정립계를 강화시켜 크리프 저항성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대되며, B첨가 후의 크리프 특성 변화를 추가로 관찰하였다. 구체적으로 새롭게 설계된 철계 고엔트로피 합금에 대해 700 °C에서 다양한 응력 조건 하에서 크리프 특성을 평가하고, B 첨가에 따른 크리프 물성 변화 효과를 분석하고자 하였다. 이를 위해 크리프 시험기, 주사전자현미경(SEM), 투과전자현미경(TEM), 원자탐침분석기술(APT)을 활용하여, B 첨가 전후의 고온 크리프 특성 및 미세조직 변화를 비교·분석하였다. 본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원의 기반구축 사업(P0018009) 및 2022년도 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원 연구비 지원(P0022331)으로 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

**[P3-15]**

**UNSM 처리가 Co-Cr-Fe-Ni-Mo 고엔트로피 합금의 초극저온 미세조직 진화 및 기계적 거동에 미치는 영향:** 임현빈(국립공주대학교), 이재홍, 하수빈(포항공과대학교), 김영균, 나영상(한국재료연구원), 김형섭(포항공과대학교), 문종언\*(국립공주대학교)

**Keywords:** 고엔트로피 합금, UNSM, 초극저온 기계적 물성, 적층결합에너지

극한환경용 구조 소재는 우주항공 및 수소 산업 발전의 핵심 요소이나, 기존 구조용 소재는 77 K 미만의 극저온 조건에서 변형 불안정성 발생 및 강도 저하 등의 한계를 보인다. 본 연구에서는 Co-Cr-Fe-Ni-Mo계 고엔트로피 합금 표면에 초음파 나노 표면개질(UNSM) 기술을 적용하여, 이에 따른 미세조직 변화와 4.2 K 극저온에서의 기계적 거동을 분석하였다. SEM 및 XRD 기반 분석 결과, 표면층으로 갈수록 뚜렷한 압축 잔류응력이 형성되었으나, 본 합금계의 낮은 적층결합에너지로 인해 결정립 미세화는 억제되었다. UNSM 공정에 의해 형성된 잔류응력과 구배형 미세조직은 초극저온 강도 향상에 기여하였으며, 변형 유기 상변태(TRIP)를 통해 우수한 가공경화능과 연성을 동시에 확보하였다. 결정립 미세화의 억제로 항복강도의 향상은 제한적이었지만, 기존의 극저온 변형 기구를 유지하면서도 인장강도의 개선이 이루어짐을 확인하였다. 본 연구 결과는 UNSM 표면개질이 초극저온 기계적 물성 최적화에 유효함을 시사하며, UNSM 적합 합금의 설계에 활용될 예정이다.

[P4-1]

Data-Driven Analysis of Chain Degradation Reaction in Organic Light-Emitting Diodes through Numerical Modeling: GONI HAN, JAE-MIN KIM\*(Chung-Ang University)

*Keywords:* Blue Phosphorescent OLEDs, Degradation, Device Lifetime, Numerical Modeling

Device degradation of organic light-emitting diodes (OLEDs) can be understood by numerical modeling which considers the exciton–exciton (EE) interaction, exciton–polaron (EP) interaction (or annihilation), and polaron dynamics. However, the modeling cannot reproduce the low curvature of experimental results observed in laboratories of industries and universities. In this study, the degradation behaviors of state-of-the-art blue phosphorescent OLEDs in laboratory and industry were investigated by establishing advanced degradation numerical modeling with an introduction of chain degradation reactions. To extend numerical modeling, we analyzed device lifetime data of two devices fabricated in university and industry, which are designed by same architecture. In both devices, the fitting accuracy of conventional fitting was not high, showing different curvature of degradation curve. It means that the modeling could not reproduce underlying physics of degradation phenomena of OLEDs. For enhancing the fitting accuracy and better understanding, we introduced the chain degradation reaction caused by excitonic interaction occurring sequentially, which is integrated into the numerical modeling algorithm. Our modeling showed the high fitting accuracies ( $R^2$ ) of the devices, reaching 0.999 for both university and industry devices. In addition, we could track the resultant degraded products (quencher) densities according to the operational lifetime of devices. Since the excellent fitting quality could not be realized by conventional mechanisms (interactions of excitons and polarons), our work suggested the theoretical evidence of chain degradation reaction inside the devices, which resulted in the low curvature of degradation curve.

[P4-2]

Quantum Dot Multispectral Photodetectors through Optical Cavity Engineering: Seung Won Shin, Ji Hyeon Woo, Seong-Yong Cho\*(Hanyang Univ.)

*Keywords:* Quantum dot, infrared, photodetector

Infrared photodetection plays a critical role in diverse applications including night vision, environmental monitoring, industrial inspection, and biomedical imaging. Because distinct infrared wavelength bands correspond to different functional requirements, integrating wavelength-selective detection within a single device architecture remains highly desirable. Conventional infrared photodiodes based on epitaxial semiconductors such as Indium gallium arsenide (InGaAs) provide high performance but require costly crystal growth and complex hybrid integration processes, limiting scalability and widespread adoption. Colloidal quantum dots offer a scalable alternative due to their solution processability and size-tunable bandgap. In particular, PbS QDs can be engineered to selectively absorb near-infrared (NIR) and short-wave infrared (SWIR) wavelengths via precise size control. Here, we report a vertically stacked dual-band PbS QCD photodiode incorporating ultrathin Atomic Layer Deposition (ALD)-grown oxide interlayers for interfacial stabilization and optical cavity engineering. By optimizing the thickness of the QCD active layers and ALD dielectric spacers, wavelength-selective absorption was enhanced within each sub-layer. This interference-engineered cavity design enables selective photocarrier generation in both the NIR and SWIR regions while maintaining suppressed dark current and structural compatibility with conventional photolithography processes, supporting scalable integration with Si ROIC platforms.

[P4-3]

Monolithic Fabrication of Hierarchical Transmissive Color Routers toward Next-Generation Image Sensors with High-Refractive-Index Inorganic Materials: Sehyeon Park, Samuel Kim, Myungjae Lee\*(Seoul National University)

*Keywords:* Image sensor, Routing color filter, CMOS monolithic fabrication, AI optical design

In modern optical and imaging systems, color filters are essential for achieving well-defined spectral selectivity, thereby enabling wavelength-band separation for precise color reproduction and spectral sensing. Conventional Bayer-type color filter arrays typically rely on organic pigments or dyes that realize RGB separation through selective absorption.[1] As a result, only the target spectral band is transmitted while out-of-band components are dissipated, which inherently limits optical throughput (typically on the order of ~80–90% visible transmittance).[2] In contrast, this study pursues a wavelength-routing paradigm that preserves the incident spectrum and performs color separation by spatially directing light according to wavelength, thereby improving optical efficiency relative to absorptive filters. Moreover, we incorporate a collimator layer above the routing layer to enhance angular tolerance, suppress optical crosstalk, and maintain spectral sensitivity, particularly under low-illumination conditions. Using machine learning and FDTD optical simulations, we designed a  $\text{TiO}_2$ -based hierarchical routing color filter and established a CMOS-compatible monolithic fabrication process enabling stacked functional layers. While single-layer implementations face a fundamental trade-off between maintaining high transmittance and suppressing optical crosstalk, the proposed hierarchical architecture mitigates spectral mixing and enables a high-

transmittance color router with reduced crosstalk. The device is implemented as a wavelength-scale thin film in the visible range to enhance transmittance while maintaining high vertical fabrication fidelity. Fabricated devices were realized on a quartz substrate, followed by the deposition of a  $\text{SiO}_2$  spacer layer. Compared to  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -based designs, which are limited by the low index contrast with  $\text{SiO}_2$  and thus reduced optical confinement,  $\text{TiO}_2$  provides improved routing performance. Moreover, while the baseline design assumes normal incidence ( $\text{NA} = 0$ ), we additionally pursue finite-NA ( $\text{NA} > 0$ ) optimization and sample fabrication to mitigate angle-dependent degradation, thereby improving robustness for practical image-sensor applications. Also we further explore extensions toward next-generation imaging platforms enabled by monolithic integration, such as polarization image sensors. References 1. Q. Chen, X. Nan, M. Chen, D. Pan, S. Yang, and L. Wen, *Advanced Materials* 33.49 (2021): 2103815. 2. X. Zhou, Y. Zhang, R. Lin, G. Gong, S. Wang, S. Zhu, and Z. Wang, *Nature Communications* 13.1 (2022): 3288.

#### [P4-4]

Cation Exchanges in Ag-(In, Ga)-S Nanocrystals for Color-pure and Stable Photon Emission: Jong Ah Chae, Seongbin Im, Sejong Min, Jaeseung Lee, Dongju Jung, Wan Ki Bae\*(Sungkyunkwan University)

**Keywords:** Quantum Dots

The development of high-performance, heavy-metal-free nanocrystals (NCs) is essential for next-generation optoelectronic applications, yet realizing both high color purity and long-term stability in silver-based chalcogenides remains a formidable challenge. This is largely hindered by the cation intermixing inherent in conventional heteroepitaxy with  $\text{ZnE}$  ( $\text{E}=\text{Se}, \text{S}$ ), which often deteriorates spectral purity (ref. 1). Here, we report a core-multishell (C-MS) architecture for  $\text{Ag}(\text{In}, \text{Ga})\text{S}_2$  (AIGS) NCs that yields stable and narrow-band emission through precise potential-landscape engineering. By initiating a surface-selective cation exchange ( $\text{Ag}^+/\text{Ga}^{3+}$  to  $\text{Zn}^{2+}$ ) on a thick, Ag-deficient AGS shell, we construct a  $\text{ZnGa}_2\text{S}_4$  (ZGS) exterior layer that creates a substantial potential barrier ( $\Delta E_g = 0.9$  eV relative to AGS) and a net outward dipole. This structure lowers the electronic energy levels by 0.12 eV and effectively decouples radiative recombination from surface-related trap states. Individual NC spectroscopy reveals a near-unity on-time fraction (97 %) and suppressed photoluminescence (PL) blinking, while macroscopic assays demonstrate superior resistance to oxidative and electrochemical degradation. Incorporating these C-MS NCs into light emitting diodes (LEDs) results in color-pure electroluminescence (EL) identical to the intrinsic PL spectrum, free from the defect-mediated broadening typical of AIGS systems for the first time. Our findings provide a robust strategy for tailoring the electronic structure of multicomponent NCs, paving the way for their practical use in high-definition displays, lasers, and quantum information technologies.

#### [P4-5]

Pure-Blue Colloidal Europium Halide Nanocrystals through Coordination Tailoring: Jaeyeong Ha, Seongkyu Maeng, Jaewon Kim, Jaejun Lee, Young-Hoon Cho, Himchan Cho\*(KAIST)

**Keywords:** perovskite, light-emitting-materials, display, eco-friendly, blue-emitting

Europium halides are emerging as promising lead-free blue emitters due to the efficient 5d-4f spin-allowed transitions of  $\text{Eu}^{2+}$  ions. The  $\text{Eu}^{2+}$  5d level lies below the  $^6\text{P}_{7/2}$  state, effectively suppressing multi-phonon relaxation while providing versatile emission tunability via crystal field effects. However, the intense coordination affinity of  $\text{Eu}^{2+}$  induces structural disorder, restricting previous research to low-covalency Cl/Br-based hosts with emission limited to the deep-blue region. Here, we report a strategic approach to design the emission spectrum of colloidal europium iodide nanocrystals by precisely tailoring their local coordination environment. This strategy breaks through the spectral limitations of low-covalency halides by leveraging covalent-driven coordination control to tailor the crystal field environment. Specifically, we realized two distinct configurations: a highly symmetric  $[\text{EuI}_6]^{4+}$  octahedral coordination exhibiting pure-blue emission at (0.144, 0.043) with a record-high PLQY of 82.6%, and a substitutional phase within the CsI lattice hosting  $\text{Eu}^{2+}$  at  $\text{Cs}^+$  positions, which yields a red-shifted emission at (0.111, 0.145) with a PLQY of 74.2%. Our results demonstrate that local coordination engineering in iodide systems can overcome the fundamental bottlenecks of inorganic blue emitters, specifically regarding  $\text{Eu}^{2+}$  lattice incorporation and spectral limitations. This work provides a robust pathway for achieving both high PLQY and precise wavelength tunability, offering a fundamental framework for designing non-toxic, highly tunable europium nanocrystals for next-generation display technologies.

#### [P4-6]

A  $\text{TiO}_2$  Photonic Crystal Cavity Platform with Tunable Optical Chirality Density for Polarization-Selective Nanophotonic Interactions: Eunsun Kim, Myungjae Lee\*(서울대학교)

**Keywords:** CPL, photonic crystal

Precisely engineered chiral electromagnetic fields are central to understanding and controlling chiral light-matter interactions across nanophotonics, including circular dichroism enhancement, enantioselective spectroscopy, and polarization-encoded pixels / circularly polarized light (CPL) emitters. A persistent limitation in many existing approaches is that optical chirality is largely dictated by fixed material responses or by a single static geometry, making it difficult to systematically tune the strength of chiral near fields at the interaction site. Here we present a photonic crystal (PhC) cavity platform that enables deterministic, geometry-controlled tuning of

optical chirality density (OCD) as a design variable, providing a reproducible and spatially localized chiral environment for coupling to nanoscale chiral matter. The proposed architecture employs a hexagonal  $\text{TiO}_2$  PhC slab resonator incorporating a central defect hole that functions as a defined hosting site for a nanoparticle or other nanoscale object. To achieve strong confinement and reduced radiation leakage, we implement tapered hole parameters ( $a_1$ ,  $r_1$ ) that mitigate out-of-plane scattering and support a high-quality-factor (high-Q) cavity mode. Finite-difference time-domain (FDTD) simulations indicate that the optimized taper design yields Q factors exceeding 2,000. Building on this high-Q foundation, we introduce controlled symmetry-breaking perturbations—parameterized by ( $p$ ,  $d$ ,  $\Delta r$ )—for generating and tuning chiral near fields. These perturbations modify the local amplitude and phase relations of the cavity fields, enabling the formation of sharply localized OCD hotspots and allowing systematic control over both the magnitude and spatial distribution of OCD. We perform a comprehensive FDTD-based mapping of OCD as a function of wavelength and perturbation strength, identifying operating conditions under which the cavity exhibits resonantly enhanced OCD in the superchiral regime over a tunable spectral window. Importantly, the platform can be optimized such that the maximum OCD is concentrated at the cavity center, co-located with the defect hosting site, thereby maximizing the overlap between engineered chirality and the target nanoscale object. This establishes a practical route to positioning-controlled chiral interactions, where not only the handedness but also the intensity and location of the chiral field can be prescribed through geometry. As a representative chiral matter component, we consider coupling to a chiral gold nanoparticle (Au NP) whose circular dichroism (CD) response provides a spectral benchmark for helicity-dependent interaction. In the engineered superchiral environment, the coupled system supports polarization-selective behavior, with the helicity-matched channel exhibiting a stronger interaction than the mismatched channel. Within this framework, OCD acts as a direct tuning parameter that correlates with the effective chiral coupling strength and with the onset and degree of chiral plasmon–polariton formation, enabling controlled studies of chiral hybridization in a cavity-enhanced near field. Overall, this  $\text{TiO}_2$  PhC cavity platform elevates OCD from a descriptive field quantity to a controllable design parameter. By combining high-Q confinement, a deterministic hosting site, and symmetry-breaking tunability, the approach provides a versatile experimental blueprint for systematically investigating chiral strong-coupling. Such helicity-selective lithography-compatible cavities are particularly compatible with array-level integration, suggesting a route to polarization-encoded pixels and CPL-selective micro light sources.

#### [P4-7]

3D Silica Nanostructures Fabricated by Two-Photon Polymerization for Polarization Control in Next-Generation Displays:

Eunyoung Ahn, Youngjun Chung, Myungjae Lee\*(Seoul National Univ.)

**Keywords:** Silica, 3D Lithography, Two-Photon Polymerization

Three-dimensional nanostructures capable of engineering polarization states are emerging as key components in next-generation display technologies, where precise control of light propagation, color purity, and viewing angle is critically required. Conventional thin-film polarizers and planar metasurfaces often suffer from intrinsic limitations such as optical losses, limited bandwidth, and restricted angular tolerance. A promising route to overcome these constraints is the use of structurally graded 3D nanostructures, in which geometric parameters are continuously varied to enable spatially programmable polarization responses within a single device. In this study, we fabricated structurally graded silica ( $\text{SiO}_2$ ) nanostructures using two-photon polymerization (TPP), enabling spatially tunable polarization control across a single substrate. A negative photoresist composite based on acrylic polyoctahedral silsesquioxanes (POSS) was employed for TPP printing and subsequently converted into optically transparent silica through thermal treatment. Successful conversion was verified by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and Raman spectroscopy, confirming carbon removal and Raman signatures consistent with fused silica. Structural fidelity of graded 3D nanostructures was verified using optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). Ongoing work includes Stokes parameter imaging and linear algebra–based analysis to quantitatively correlate geometry with polarization response, toward an inverse-design framework. This approach is expected to enable polarization-controlled components for advanced display optics, including polarization-sensitive color filters, high-resolution photonic devices, and optical modules for augmented and virtual reality (AR/VR) systems. Acknowledgements This research was supported by Korea Basic Science Institute (National research Facilities and Equipment Center) grant funded by the Ministry of Science and ICT (No. 0417-20240148)

#### [P4-8]

Capacitance Path Finder: Design Space Mapping for Capacitance Reduction in Organic Light-Emitting Diodes Using Large Scale Drift Diffusion Impedance Simulations: NaHee Kim, Jae-Min Kim\*(Chung-Ang Univ.)

**Keywords:** Organic light-emitting diode (OLED), Capacitance, C–V characteristics, Image sticking, Space-charge accumulation, Electron blocking layer, Drift-diffusion simulation, Impedance simulation, Design-parameter space

Capacitance is a key electrical property of organic light-emitting diodes (OLEDs) and is closely related to operational stability, power efficiency, and panel image quality. An increase in capacitance within the operating voltage range is widely recognized as a major contributor to device degradation and image sticking in display panels. The capacitance peak observed in C–V characteristics is commonly interpreted as being associated with space-charge accumulation near device interfaces. However, in practical OLED devices, multiple physical parameters, including interfacial energy barriers, carrier mobility, and recombination coefficients, are coupled and act simultaneously, making it difficult to isolate and quantitatively evaluate the contribution of each parameter using experiments alone. As

a result, capacitance reduction has largely depended on repetitive device fabrication and trial-and-error processes. Here, we propose a simulation-based design framework for quantitatively comparing and analyzing OLED capacitance behavior without experimental device fabrication, using large-scale drift-diffusion-based impedance simulations. The framework, termed the Capacitance Path Finder, defines a reference layer and selects tunable physical parameters in the adjacent regions as design variables. Simulations are performed for all combinations across the design-parameter space, and the capacitance response is mapped to examine trends toward lower capacitance. In this work, the electron blocking layer (EBL) is selected as the reference layer. The interfacial energy barriers adjacent to the EBL (E1 and E2) and the hole mobility within the EBL ( $\mu$ ) are defined as design variables. E1 denotes the HOMO energy barrier difference at the HTL/EBL interface, and E2 denotes the HOMO energy barrier difference at the EBL/EML interface. Drift-diffusion-based impedance simulations are carried out for all combinations of these variables to obtain C-V characteristics, from which the maximum capacitance ( $C_{\max}$ ) is extracted. The extracted  $C_{\max}$  values are represented as two-dimensional projections of the three-dimensional design-parameter space. Charge distributions are further compared under the  $C_{\max}$  condition and under low-capacitance conditions. The results show that capacitance increase is closely associated with localized charge accumulation near specific interfaces, indicating that capacitance behavior is governed primarily by the spatial characteristics of interfacial charge distribution rather than by the total carrier density. Overall, this study presents an analysis procedure that enables quantitative comparison of OLED capacitance behavior across a multidimensional design-parameter space and provides a basis for examining capacitance-related behavior at the design stage for device structures in which capacitance plays a critical role.

#### [P4-9]

Predicting Exciton Utilization Efficiency via Kinetic Modeling in Phosphor-Sensitized Fluorescent Organic Light-Emitting Diodes : Jae-Min KIM\*, KYOUNG HWAN KIM(Chung-Ang Univ.)

**Keywords:** PSF, OLED, EUE

Phosphor-sensitized fluorescence (PSF) system has emerged as a next-generation emission mechanism in the evolutionary trajectory of OLED technologies, enabling the simultaneous realization of the excellent operational stability of fluorescent emitters and the high emission efficiency of phosphorescent materials through an energy transfer process. However, PSF systems face several critical challenges, including structural complexity, potential energy losses during multi-step energy transfer, and charge trapping effects. In this study, we systematically investigate the impact of two strategies (excitonic and polaronic approaches) on the exciton utilization efficiency (EUE) using electroluminescence kinetic modeling. Suppressing charge trapping at the sensitizer is more effective in improving exciton utilization efficiency than merely tuning the Dexter energy transfer rate. Our results demonstrate that direct exciton generation via charge-trap-assisted recombination is more dominant in enhancing EUE than conventional strategies based on controlling Dexter and Forster energy transfer rates.

#### [P4-10]

내재적 신축성 소재 기반 탠덤 OLED 구현: 은(Ag) 삽입층을 통한 전하 생성 효율 최적화: 전건후, 김태훈, 박진우\*(연세대학교)

**Keywords:** 내재적 스트레처블 OLED, 탠덤(tandem) 구조, 용액 공정 기반 OLED, 전하 생성층(CGL)

최근 차세대 디스플레이는 기존의 고정된 폼 팩터를 벗어나 자유로운 형태 변형이 가능한 프리 폼(free-form) 디스플레이로 진화하고 있다. 특히 내재적 스트레처블(Intrinsically Stretchable) 디스플레이는 신체 부착이 가능한 컨포멀(conformal) 특성 덕분에 바이오 메디컬 및 웨어러블 분야의 핵심 기술로 주목받고 있다. 그러나 소재의 신축성과 전기적 성능 간의 trade-off 문제로 인해 기존 리지드(rigid) 소자 대비 발광 성능이 현저히 낮다는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 소재의 한계를 극복하기 위해 구조적 개선안으로 탠덤(tandem) 구조를 도입하였다. 탠덤 구조는 단일 구조 대비 높은 휘도와 긴 수명을 보장하지만, 신축성 소재 기반의 전하 생성층(Charge Generation Layer, CGL) 내 낮은 전하 밀도와 높은 에너지 장벽으로 인해 효율적인 전하 생성이 어렵다는 난제가 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 신축성이 확보된 금속 삽입층(Metal Interlayer)을 CGL에 도입하여 전하 생성 효율을 극대화한 용액 공정 기반의 탠덤 OLED를 제작하였다. 특히 n-type 산화아연(Zinc oxide, ZnO)와 p-type TFB(Poly(9, 9-dioctylfluorene-alt-N-(4-sec-butylphenyl)-diphenylamine))로 구성된 CGL 계면에 은(Ag) 삽입층을 도입함으로써, TFB의 낮은 홀 농도와 계면 에너지 장벽 문제를 해결하고 큰 폭의 구동 전압 감소와 효율 향상을 달성하였다. 용액 공정 과정에서 각 층의 공정 안정성을 광학 현미경으로 검증한 결과, 중간 손상이나 디웨팅(dewetting) 없이 균일한 박막이 형성됨을 확인하였다. 은 삽입층의 두께를 최적화한 결과 4 nm에서 가장 우수한 전하 생성 능력을 보였으며, 자외선 광전자 분광법 분석을 통해 은 삽입에 따른 ZnO의 이차전자 컷오프(Secondary electron cutoff, SECO)가 18.45 eV에서 최대 18.8 eV까지 증가하고 일함수가 감소함을 규명하였다. 이러한 일함수의 감소는 TFB의 HOMO(Highest Occupied Molecular Orbital) 레벨 사이의 터널링 폭(tunneling width) 감소로 이어져 전하 분리 및 이동을 용이하게 하는 핵심 요인으로 작용한다. 또한 주사전자현미경 분석을 통해 은 원자들이 ZnO 나노파티클을 따라 섬(island) 형태로 성장하여 표면을 개질함을 확인하였다. CGL의 전하 공급 균형을 정량적으로 평가하기 위해 상부(Green)와 하부(Yellow)에 서로 다른 발광층을 배치한 듀얼 발광 구조를 도입하였다. 분석 결과, 은 삽입층이 도입되었을 때 가장 균형 잡힌 전기 발광(Electroluminescence, EL) 스펙트럼이 관찰되었으며, 이는 상-하부 유닛으로의 균일한 전하 주입을 의미한다. 결과적으로 본 연구에서 제작된 탠덤 OLED는 2,000 cd/m<sup>2</sup>의 휘도에서 24 cd/A의 최대 전류 효율(Current Efficiency, CE)을 달성하였으며, 이는 단일 구조 소자 대비 2배 이상의 휘도 향상 결과이다. 본 연구는 내재적 스트레처블 디스플레이용 소재를 기반으로 고성능 탠덤 구조 구현 가능성을 입증하였으며, 향후 차세대 스트레처블 디스플레이의 상용화를 위한 중요한 기술적 토대를 제공할 것으로 기대된다.

**[P4-11]**

Elucidating the Impact of Metal Halide Treatment on InP Quantum Dots: BOKYEONG SOHN, HIMCHAN CHO\*(KAIST)  
*Keywords:* InP Quantum Dots, Metal Halide Treatment, Surface Chemistry

Colloidal indium phosphide quantum dots (InP QDs) have been developed as an environmentally friendly substitute for cadmium-based quantum dots. However, due to their high covalency and oxophilicity, synthesizing defect-free InP-based core/shell QDs with a uniform shell remains challenging, which is crucial for achieving a high photoluminescence quantum yield (PLQY). To enhance the PLQY of InP-based core/shell QDs, postsynthetic treatments employing X-, L-, and Z-type ligands have been explored to effectively passivate surface traps on InP core QDs. Among these, metal halide treatment has emerged as a promising alternative, avoiding the use of HF while significantly improving PLQY and facilitating uniform shell growth. However, a comprehensive analysis of the chemical interaction between various metal halides and InP QDs is still needed. In this study, we investigate the metal halide treatment effect on InP core QDs by varying the metal halides and controlling several synthetic parameters, including precursors, surface ligands, and temperature. We systematically analyzed the optical and structural properties of the surface-treated InP QDs, as well as the metal halide treatments effect on the subsequent shell growth. Our findings indicate that specific metal halides enable the successful synthesis of high-PLQY InP/ZnSe/ZnS core/shell QDs, achieving a PLQY of 88%, while others cause noticeable broadening of the emission spectrum. These results contribute to a comprehensive understanding of the surface chemistry and synthesis of InP QDs.

**[P4-12]**

Interdielectric Layer Engineering for Reliable Monolithic Integration of ITZO TFT Backplanes and InP QLEDs: 반현승, 정 의석, 김재균\*, 조성용\*(한양대학교)

*Keywords:* ITZO thin-film transistor, quantum dot light-emitting diodes, integration, interdielectric layer

The electrical performance and driving capability of monolithically integrated oxide thin-film transistor (TFT)-quantum dot light-emitting diode (QLED) pixels are strongly influenced by the dielectric environment formed during backplane-emitter integration. In this work, multiple interdielectric configurations were investigated to clarify how dielectric stacking design and interfacial effects impact ITZO TFT stability and QLED driving behavior. While the single-interdielectric device exhibits superior intrinsic TFT characteristics, the stacked interdielectric structure induces interfacial charge modulation, leading to donor-like states in the ITZO channel and a negative threshold-voltage shift. Despite this effect, the stacked configuration provides improved leakage suppression and enhanced compatibility with subsequent solution-processed QLED fabrication, enabling stable pixel operation. The stacked-interdielectric-based TFT achieves a mobility of  $24.82 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , a subthreshold swing of  $0.09 \text{ V dec}^{-1}$ , and an on/off ratio of  $8.78 \times 10^9$ . When driving InP QLEDs, the integrated pixel delivers a peak luminance of  $9,488.8 \text{ cd m}^{-2}$ , a maximum current density of  $285.3 \text{ mA cm}^{-2}$ , and an external quantum efficiency of 7.15%, while maintaining an unchanged electroluminescence spectrum under TFT driving. These results demonstrate that interdielectric layer engineering, balancing interfacial charge effects and process robustness, is essential for achieving reliable monolithic TFT-QLED integration for next-generation active-matrix display applications.

**[P4-13]**

Solution-Sheared Micrometer-Thick Pure Perovskite Nanocrystal Films Enabling High-Efficiency Color Conversion Layer: Jun-Seo Lee, Himchan Cho\*(KAIST)

*Keywords:* Metal halide perovskite, Color conversion layer, Nanocrystal, Solution-shearing

InGaN-based blue micro-LEDs ( $\mu$ LEDs) exhibit high efficiency and operational stability, whereas high-performance green InGaN  $\mu$ LEDs remain difficult to realize due to the challenges in achieving high indium incorporation without degrading crystalline quality, which limits full-color integration. Color-conversion layers (CCLs) based on metal halide perovskites (MHPs) have emerged as promising alternatives owing to their high absorption coefficients, narrow emission linewidths, and high photoluminescence quantum yield (PLQY). For practical CCL displays, low blue-light leakage, high color-conversion efficiency (CCE), high color purity, and high-resolution patternability must be achieved simultaneously. However, effective suppression of blue leakage typically requires micrometer-thick CCLs, and previously reported polymer-embedded perovskite nanocrystal (PeNC) films suffer from an intrinsic trade-off between optical absorption and PeNC packing density. As a result, the high absorption coefficient of perovskites cannot be fully exploited, paradoxically necessitating thicker CCLs. Here, we report a polymer-free strategy to fabricate micrometer-thick pure PeNC CCLs via a simple solution-shearing process. The resulting films enable high-resolution patterning down to  $20 \mu\text{m}$  (1270 PPI) using direct optical lithography while maintaining high optical performance. When integrated onto blue OLED backlights, the optimized PeNC CCLs achieve a color-conversion efficiency of 74.1% with a blue-light uptake of 74.4% at a thickness of only  $1.5 \mu\text{m}$ , demonstrating the feasibility of relatively thin, high-density pure PeNC layers for high-resolution micro-display applications.

**[P4-14]**

Kinetically Controlled Direct in situ Photolithography of Perovskite Color Conversion Layers: Mingyu Hwang, Himchan Cho\*(Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST))

*Keywords:* Perovskite Emitter, High-resolution patterning, Color conversion

Metal halide perovskites (MHPs) are promising materials for color-conversion layers (CCLs) due to their high absorption coefficients and narrow emission bandwidths, but high-resolution patterning of micrometer-thick CCLs remains challenging because of their sensitivity to conventional processing. Direct in situ photolithography allows thick pattern formation without directly exposing MHPs to harsh conditions, yet its resolution has remained limited. Here, we present a kinetically controlled direct in situ photolithography (KC-ISP) strategy for high-resolution MHP CCLs. By controlling thiol-ene crosslinking kinetics and introducing a precursor-redistributing spin-washing step, KC-ISP enables  $\sim 3$   $\mu\text{m}$ -scale patterning while providing color tunability through controlled precursor composition. The in situ crystallized MHPs exhibit enhanced photoluminescence upon air exposure due to phase redistribution and defect passivation. Consequently,  $\sim 4$   $\mu\text{m}$ -thick CCLs achieve blue uptake of  $\sim 80\%$  and  $\sim 98\%$  for green and red emitters, with color-conversion efficiencies of  $\sim 45\%$  and  $\sim 30\%$ .



**P5 : 마그네슘**

Room 3층 로비, 4월 28일

**[P5-1]**

**Mg-Li계 합금 판재의  $\beta$ -Li 상 분율이 집합조직과 기계적 특성에 미치는 영향:** 이준호(한국재료연구원, 고려대학교), 서병찬(한국재료연구원), 손석수\*(고려대학교), 김영민\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 마그네슘-리튬 합금, 이중상(Dual-phase), 고압하중 압연, 집합조직(Texture), 성형성

최근 탄소중립 실현을 위한 수송기기 경량화 수요가 급증함에 따라 초경량 Mg-Li 합금이 주목받고 있다. Mg-Li 합금은 Li 함량에 따라 조밀육방격자(HCP,  $\alpha$ -Mg)와 체심입방격자(BCC,  $\beta$ -Li) 구조가 공존하는 특성을 가지며, 특히 BCC 상의 도입은 마그네슘 합금의 고질적인 상온 성형성 문제를 개선할 수 있는 핵심 기구로 작용한다. 본 연구에서는 Li 함량을 5.7, 8.4, 10.3 wt%로 제어한 세 종류의 합금을 주조한 후, 300°C 예열 조건에서 고압하중 압연을 실시하여 1 mm 두께의 판재를 제조하였다. 제조된 판재를 대상으로 XRD 분석을 통한 집합조직 변화를 고찰하였으며, 압연 방향(RD) 기준 0°, 45°, 90° 방향별 인장 시험 및 에릭슨 컵핑 시험(Erichsen Cupping Test)을 통해 기계적 이방성과 성형성을 평가하였다. 연구 결과, 극한 변형 조건(압하중 97%)에서도 BCC 상이 Strain accommodation mechanism을 가능하게 하여 판재의 가공성 및 연성이 안정적으로 유지되었으며, 이는 기존 마그네슘 합금의 가공 한계를 크게 상회하는 수치이다. 특히, Mg-Li 합금에서 이중(Dual-phase) 영역 내 BCC 상의 분율 제어가 고압하중 압연 시 발생하는 기저면 집합조직(Basal texture)의 발달을 억제하고 성형성을 극대화하는 핵심 요소임을 확인하였다. 본 연구 결과는 향후 고성형성 초경량 판재 제조 공정 확립에 중요한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

**[P5-2]**

**이중 구조 입자를 형성하는 고내식성 마그네슘 합금:** 이동희, 김정기, 민두원, 박성수\*(울산과학기술원)

**Keywords:** 마그네슘, 고내식, 미량합금화, 이중 구조

마그네슘(Mg) 합금은 차량 및 휴대용 기기와 같은 이동체용 경량 구조재로서 가장 유망한 소재 중 하나로 평가받고 있다. 그러나 Mg 기반 제품의 산업적 적용은 여전히 제한적이며, 특히 낮은 내식성이 경량화 부품으로의 확대 적용을 저해하는 핵심 요인으로 지적된다. 기존 연구에 따르면 이러한 낮은 내식성은 Mg 기지와 불순물을 포함한 제2상 입자 간 전기화학적 전위 차이에 의해 유발되는 미소 갈바닉 부식(microgalvanic corrosion)의 활성화 및 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서는 부식 환경에서 미소 갈바닉 부식이 거의 발생하지 않는 초고순도 Mg에 필적하는 내식성을 갖는 AZ계 Mg 합금을 제안한다. 본 합금에서 확보된 우수한 내식성은 희토류 원소의 제어된 미량합금화(microalloying)를 통해 제2상 입자를 이중 구조(duplex structure)로 설계함으로써 달성되었다. 형성된 이중 구조는 입자 내부에 불순물 원소를 효과적으로 포획·격리하는 역할을 하며, 이에 따라 Mg 기지와 직접 접촉하는 제2상 영역의 전기화학적 귀금속성(nobility)이 Mg 기지와 거의 유사한 수준으로 현저히 낮아진다. 그 결과 Mg 기지와 제2상 입자 간 전위 차가 크게 감소하고, 미소 갈바닉 부식의 구동력이 근본적으로 억제된다.

**[P5-3]**

**Influence of Bismuth (Bi) Addition on Phase Fraction Control and Mechanical Properties of Dual-phase Mg-8Li Extruded Alloys:** BYEONGKWON LEE, EunChan Ko(Korea Institute of Industrial Technology, Chonnam National University), YongHo Kim, HyoSang Yoo, HyeonTaek Son\*(Korea Institute of Industrial Technology), TaeHoon Kim(Chonnam National University)

**Keywords:** Magnesium, Lithium, Bismuth, Mechanical properties, Phase fraction

In this study, the effect of bismuth (Bi) addition on the microstructure and mechanical properties of dual-phase Mg-8Li alloys were systematically investigated. Mg-8Li-xBi (x = 0, 2, 4 and 6 wt.%) alloys were fabricated by not extrusion, and the characteristics of the extruded specimens were analyzed using XRD, FE-SEM, EBSD, and tensile tests. XRD and microstructural analysis revealed that all alloys maintained a dual-phase structure of  $\alpha$ -Mg (HCP) and  $\beta$ -Li (BCC), while  $Mg_3Bi_2$  intermetallic compounds were formed with the addition of Bi. Quantitative image analysis showed that as the Bi content increased to 6 wt.%, the  $\alpha$ -Mg fraction decreased from 52.56 to 31.49%, whereas the  $\beta$ -Li fraction significantly increased from 47.44% to 66.01%. This trend is attributed to the preferential reaction of Bi with Mg to form  $Mg_3Bi_2$  compounds, which depletes Mg from the matrix and effectively increases the relative Li concentration, thereby promoting the formation of the Li-rich  $\beta$ -Li phase. EBSD analysis indicated no significant variations in grain size or texture intensity with Bi addition, suggesting that the evolution of mechanical properties is primarily governed by the variation in phase fraction rather than grain refinement or texture hardening. Tensile testing demonstrated that with increasing Bi content, the yield strength decreased moderately, while the elongation was significantly improved, rising from 37.53% to 64.28%. This enhancement in ductility is attributed to the increased fraction of the soft  $\beta$ -Li phase, which promotes uniform plastic deformation and effective strain partitioning. Consequently, this study demonstrates that controlled Bi addition is an effective strategy for tailoring the phase constitution to develop high-ductility ultralight Mg-Li alloys.

**[P5-4]**

**마찰교반가공 중 열-기계적 거동 해석을 기반으로 한 LZ91 Mg 합금의 표면 강화 및 경도 분포 특성 연구:** 고경민, 서위걸, 유태현, 최시훈\*(국립순천대학교)

**Keywords:** LZ91 Mg alloy, Friction Stir Processing (FSP), Finite Element Analysis (FEA), Thermomechanical Behavior, Hardness Mapping

LZ91 Mg 합금은 초경량 구조재료로서 우수한 비강도를 가지지만, 상대적으로 낮은 경도와 내마모 특성으로 인해 표면 손상에 취약한 한계를 갖는다. 본 연구에서는 보강재를 첨가하지 않은 상태에서 LZ91 Mg 합금 판재에 마찰교반가공(Friction Stir Processing, FSP)을 단독 적용하여, 공정조건 변화에 따른 표면 강화 거동 및 경도 분포 특성을 체계적으로 분석하였다. FSP는 회전 속도, 이송 속도 및 공구 침투 깊이를 주요 변수로 설정하여 수행하였다. 가공 후 시편의 미세조직 변화는 광학현미경(OM) 및 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였으며, 교반부 형상과 공정 중 발생 가능한 결함의 형성 여부를 함께 분석하였다. 기계적 특성 평가는 마이크로 비커스 경도 시험을 중심으로 수행하였고, 표면으로부터 깊이 방향 및 TD(횡방향) 방향으로 경도 맵핑을 실시하여 공정조건에 따른 경도 변화와 분포의 균일성을 비교·평가하였다. 또한, 마찰교반 공정 중 교반부에서 발생하는 열-기계적 거동을 이론적으로 규명하기 위하여 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)을 수행하였다. 이를 통해 교반부 내 변형률, 변형속도 및 온도 분포의 시간적·공간적 변화를 모사하였으며, 공정조건에 따른 열입력 및 소성변형 집중 영역의 차이를 분석하였다. 해석 결과는 실험적으로 관찰된 조직 미세화 경향 및 경도 분포와 상호 비교하여, 교반부 표면층에서의 결정립 미세화와 경도 향상이 높은 변형률 및 변형속도와 밀접하게 연관됨을 확인하였다. 그 결과, 적정 공정조건에서는 교반부 표면층의 조직이 현저히 미세화되고 비교적 균일한 경도 분포가 형성되는 반면, 과도하거나 부족한 조건에서는 열집중 및 변형의 불균일성이 증가하여 결함 발생과 경도 편차 확대가 나타나는 경향을 보였다. 본 연구는 LZ91 합금의 표면 특성 향상을 위한 FSP 공정조건 최적화의 이론적·실험적 근거를 제시하며, 향후 입자 보강 복합화 연구 및 표면 개질 공정 설계를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**[P5-5]**

**초기 집합조직이 Mg-3wt%Ag 합금의 고온 변형 시 집합조직 형성에 미치는 영향:** 박정빈, 윤지민, 최상구, 김권후\*(국립부경대학교)

**Keywords:** 마그네슘, 평면변형압축, 집합조직, 미세조직, 은

마그네슘 합금은 경량성과 높은 비강도로 인해 생체재료로서 많은 관심을 받고 있으며, 체내에서 자연적으로 분해되기 때문에 임플란트에 적합하다. 그러나 HCP 결정구조는 상온에서 활성화되는 슬립계의 수가 제한되어 있어 성형성이 낮다는 한계를 가진다. 내식성과 기계적 강도가 향상되어 널리 사용되는 AZ계 합금은 Al의 축적으로 인해 건강 문제를 유발할 수 있으며, 장기적인 생체적합성에 영향을 줄 수 있다는 제한이 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 Mg-Ag 합금이 주목받고 있다. Ag는 항균 특성과 내식성을 향상시키며, 고온 안정성과 강도를 개선하여 생체재료용 임플란트에 더욱 적합하도록 한다. 초기 집합조직은 고온 변형 시 집합조직 형성에 중요한 영향을 미친다. 기저면 집합조직 형성 정도는 초기 집합조직에 따라 달라지며, 이는 변형 거동에 영향을 준다. 이전 연구에서 AZ80 합금의 경우 초기 집합조직이 고온 변형 시 집합조직 형성에 유의한 영향을 미치는 것으로 보고되었다. 그러나 Mg-Ag 합금에서 초기 집합조직의 정확한 영향은 아직 명확하지 않다. 따라서 본 연구에서는 완전 고용체 영역의 Mg-3wt%Ag 합금을 대상으로 고온 평면변형 압축 시 초기 집합조직이 미세조직 및 집합조직 진화에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구에서는 Mg-3wt%Ag 합금을 사용하여 고온 평면변형 압축 시험을 수행하였다. 673 K에서 25% 압하율로 열간 압연을 실시하여 서로 다른 초기 집합조직을 갖는 시편을 제조하였다. 균질한 미세조직을 얻기 위해 773 K에서 1시간 동안 열처리를 수행하였다. 평면변형 압축 시험을 위해 서로 다른 초기 집합조직 방향을 갖는 세 종류의 시편을 가공하였다. 고온 압축 시험은 723 K, 변형속도  $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  조건에서 수행하였으며, 변형 범위는 -0.4에서 -1.0까지였다. 미세조직과 집합조직은 XRD와 FE-SEM/EBSD를 이용하여 분석하였다. Mg-3wt%Ag 합금의 고온 변형 시 진응력-진변형률 곡선은 초기 단계에서 응력이 급격히 증가하는 경향을 보였다. 이후 가공 연화로 인해 응력이 감소하였으며, 약 -0.5 변형률까지 유지되었다. 그 이후 응력은 다시 증가하였다. 미세조직과 집합조직 강도는 초기 집합조직 방향에 따라 달라졌다. ND 압축에서는 기저면 집합조직이 유지되었으나 pole density는 점차 감소하였다. TD 압축에서는 TD 방향으로 집합조직이 발달하고 유지되었다. RD 압축에서는 변형이 증가함에 따라 기저면 집합조직이 점진적으로 강화되었다. 모든 시편에서 변형이 증가함에 따라 조대한 결정립이 점차 미세한 결정립으로 변화하였으며, 이는 변형 중 동적 재결정이 발생하였음을 의미한다. 기저면 집합조직은 ND 및 RD 압축에서 유지되거나 발달하였으며, TD 압축에서는 주로 TD 방향 성분이 나타났다. 집합조직 진화 거동은 초기 집합조직에 따라 달라지며, 그 결과 집합조직 성분과 발달 정도에 차이가 나타났다.

**[P5-6]**

**고온 평면변형 압축 시 마그네슘 합금의 집합조직 발달에 미치는 Pb 첨가의 영향:** 장성모, 염진석, 김권후\*(국립부경대학교)

**Keywords:** 마그네슘, 납, 미세조직, 집합조직

[서론] 마그네슘 합금은 낮은 밀도와 높은 비강도로 인해 경량 구조 재료로서 상당한 관심을 받아왔다. 그러나 상온에서의 성형성은 활성 슬립계의 수가 제한적이기 때문에 제한되며, 고온 변형은 일반적으로 강한 저면 집합조직의 발달을 초래한다. 이러한 한계를 개선하기 위해 희토류 원소(RE)의 첨가가 널리 연구되어 왔는데, 이는 랜덤화된 결정립 방위를 갖는 재결정을 촉진함으로써 저면 집합조직을 효과적으로 약화시킨다. 이러한 긍정적인 효과에도 불구하고, 희토류 원소의 높은 비용은 산업적 적용의 확대를 제한한다. 기존 연구에 따르면 Pb 첨가 역시 특정 공정 조건 하에서 희토류 원소와 유사한 효과를 나타내며, 마그네슘 합금에서 저면 집합조직 약화 및 방위 무작위화를 유도할 수 있다고 보고되었다. 이에 따라 Pb는 잠재적인 대체 합금 원소로서 점차 주목받고 있다. Pb는 마그네슘 합금의 기계적 특성을 직접적으로 향상시키지는 않지만, 결정립계 에너지를 감소시켜 재결정 거동에 영향을 미친다.

는 것으로 알려져 있으며, 이는 회토류 첨가에 의해 유도되는 것과 유사한 집합조직 변화 효과로 이어진다. 이러한 맥락에서, 본 연구는 고온 평면변형 압축을 받은 마그네슘 합금에서 Pb 첨가가 집합조직 발달에 미치는 영향을 조사한다. [실험 방법] 본 연구에서는 Mg-11 wt% Pb 주조 합금을 사용하였다. 초기 미세조직과 집합조직을 제어하기 위하여 673 K에서 총 두께 감소를 25%의 열간 압연을 수행하였다. 압연된 재료는  $10 \times 10 \times 6.7$  mm 크기의 시편으로 가공되었으며, 이후 균일한 단상 미세조직을 얻기 위하여 773 K에서 1시간 동안 어닐링한 뒤 즉시 수냉하였다. 평면변형 압축 시험은 723 K에서  $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 변형 속도로 진변형을 -1.0까지 수행하였다. 변형 중 시편의 방위는 압연 기준 좌표계에 따라 유지하였으며, 압축 방향, 압연 방향 및 폭 방향은 각각 ND, RD, TD로 정의하였다. 변형 후에는 잔열에 의한 추가적인 미세조직 변화를 억제하기 위하여 모든 시편을 즉시 수냉하였다. 미세조직과 집합조직 관찰을 위해 압축된 시편은 중간 단면에서 RD에 평행하게 절단하였다. 미세조직 변화는 전계방출 주사전자현미경(FE-SEM)에 부착된 전자후방산란회절(EBSD)을 이용하여 분석하였으며, 집합조직은 X선 회절(XRD)을 통해 평가하였다. [결과] 모든 변형 조건에서 Mg-11 wt% Pb 합금은 최대 응력에 도달한 이후 가공 연화 거동을 나타내었으며, 이는 고온 변형 중 동적재결정(DRX)이 발생하였음을 의미한다. DRX의 진행 정도는 변형 조건에 따라 차이를 보였으며, 그에 따라 재결정립의 형성과 집합조직 진화 양상에도 뚜렷한 변화가 관찰되었다. 특히 재결정립의 형성은 결정 방위의 무작위화를 유도하여 전체적인 집합조직의 강도를 완하시키는 역할을 하였다. 그러나 이러한 집합조직의 완화 경향에도 불구하고, 모든 시료에서 변형량이 -1.0에 도달할 때까지 저면 집합조직 성분이 지속적으로 발달하는 것이 확인되었다. 이는 평면변형 압축 조건에서 저면 방위가 열역학 및 역학적으로 매우 안정적인 방위임을 시사한다. 이와 같은 저면 집합조직의 발달은 앞서 언급한 정극점도 분석 결과와 부합하며, 연속적인 변형 과정에서 저면 슬립 및 비저면 슬립의 복합적인 활동에 기인한 것으로 판단된다. 다만, 각 슬립계가 집합조직 발달에 미치는 기여도에 대해서는 향후 추가적인 시뮬레이션 연구를 통한 상세한 조사가 필요할 것으로 사료된다. [결론] 고온 변형 동안 Mg-11 wt% Pb 합금의 집합조직 발달은 주로 동적재결정의 진행 정도에 의해 지배된다. DRX 거동의 차이는 서로 다른 변형 조건에서 상이한 집합조직의 발달을 초래한다. 이러한 결과는 Pb 첨가가 고온 변형 중 재결정 거동을 조절함으로써 Mg 합금의 집합조직을 효과적으로 제어할 수 있음을 보여준다.

#### [P5-7]

**평면 변형 압축 중 Mg-Ag 합금의 집합조직 발달 거동의 Ag 첨가가 미치는 영향:** 최상구, 윤지민, 박정빈, 김권후\*(국립부경대학교)

**Keywords:** 마그네슘, 은, 미세조직, 집합조직

[서론] 마그네슘 및 그 합금은 우수한 비강도, 진동 감쇠능, 생체 적합성을 가진 경량 재료로써 오랜 시간 많은 연구에 주목을 받아왔다. 그러나 HCP 결정구조에서 활성화 가능한 슬립계의 수가 제한적이기 때문에 상온에서의 성형성이 낮다는 한계가 있다. 고온 가공을 통해 추가적인 슬립 시스템을 활성화할 수 있으나, 결정구조의 낮은 대칭성으로 인해 강한 저면 집합조직이 발달하여 소성 이방성이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 가공 중 미세조직 및 집합조직의 변형 메커니즘을 이해하고 이를 제어하는 것이 매우 중요하다. 지금까지 회토류 원소 첨가는 Mg 합금의 미세조직을 제어하기 위한 효과적인 방법으로 널리 연구되어 왔으나, 높은 비용과 공급 불안정성으로 인해 실제 적용에는 한계가 있다. 이러한 이유로 Ag와 같은 대체 합금 원소가 점차 주목받고 있다. 이전 연구에 따르면, AZ계열 마그네슘 합금의 변형 중 미세조직 및 집합조직 변화는 변형 속도에 의존하는 것으로 보고되었다. 빠른 변형 속도 조건에서는 저면 집합조직이 발달한 반면, 느린 변형 속도 조건에서는 기저면으로부터 약  $15-20^\circ$  기울어진 분리된 저면 집합조직이 형성되었다. 또 다른 선행 연구에서는 Mg-9wt%Ag 합금의  $5.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  변형속도 조건에서 고온 평면변형 압축한 결과, Ag 첨가에 따른 SFE 증가가 Cross slip을 용이하게 하며, 이로 인해 전위 고착화와 재결정 핵생성이 촉진되어 결과적으로 미세조직 및 집합조직 발달에 영향을 미칠 것으로 판단되는 연구결과가 있다. 하지만 Mg-Ag 합금에서 느린 변형속도 조건에서 고온 평면 변형 압축 시 집합조직 발달 메커니즘에 대한 연구는 아직 충분히 이루어지지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 Mg-(3, 6, 9 wt%)Ag 합금을 제작하여 비교적 느린 변형속도인  $5.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  조건에서 고온 평면 변형 압축 중 집합조직 발달 메커니즘을 분석하였다. [실험방법] Mg-(3, 6, 9 wt%)Ag 합금은 초기 집합조직을 형성하기 위해 673 K에서 열간 압연한 후, 고온 평면 변형 압축 시험용 시편을 제작하기 위해  $10 \times 10 \times 6.7$  mm의 크기로 가공한 후, 773 K에서 1h 동안 균질화 열처리를 실시하였다. 이후 723 K에서 변형속도  $5.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  조건에서 변형을 -0.4, -0.7, -1.0까지 고온 평면 변형 압축 시험을 실시하였으며, FE-SEM과 EBSD를 이용하여 미세조직 및 집합조직 발달 메커니즘을 분석하였다. [실험결과] 고온 평면변형 압축 중 진응력-진변형을 곡선을 측정한 결과 변형 초기에 항복응력이 발생하였으며, 이후 가공 연화에 따른 유동응력의 감소가 관찰되었고 변형량이 증가함에 따라 연속 동적 재결정을 통해 결정립 미세화가 나타났다. [결론] Ag 함량에 따른 재결정 거동 속도의 차이가 발생하였으며, 이전 연구 대비 변형속도에 따른 집합조직 발달 메커니즘이 변화하였음을 확인하였다.

#### [P5-8]

**마그네슘 전해제련 공정에서 LiF-MgF<sub>2</sub>계 전해질과 산화물 도가니 소재 간 반응 거동 연구:** 김가민, 이세영, 박선영, 김완규\*(주)케이에스애포테크놀로지)

**Keywords:** 용융염 전해제련, 내구성 평가, MgO, EDS 분석

본 연구는 LiF-MgF<sub>2</sub>계 용융염을 이용한 마그네슘 전해제련 공정에서 전해질 조성 및 도가니 소재의 화학적 안정성을 평가하고, 공정 적용 가능성을 검토하는 것을 목적으로 한다. 전해질 조성은 LiF-MgF<sub>2</sub> 상태도를 기준으로 공정 조성인 67 mol% LiF-33 mol% MgF<sub>2</sub>(46 mass% LiF-54 mass% MgF<sub>2</sub>)로 설정하였다. 전해제련 용해 온도는 공정 중 용탕 상태의 안정적인 유지를 고려하여 공정 온도인 741 °C(1, 014 K)보다 높은 830 °C(1, 103 K)로 설정하였다. 용융염 전해질과의 반응성 및 침투 저항성을 고려한 도가니 소재 선정에 위해 MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> 등 4종 소재에 대해 HSC Chemistry를 활용한 열역학적 반응성 평가를 수행하였다. 평가 결과를 바탕으로 상대적으로 안정성이 우수한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 MgO 도가니를 최종 후보 소재로 선정하였다. 선정된 도

가니의 내구성을 검증하기 위해 LiF-MgF<sub>2</sub> 용융염과 MgO를 혼합하여 불활성 분위기에서 10시간 동안 용해 실험을 수행하였다. 실험 후 도가니 단면에 대한 EDS 분석을 통해 fluorine 침투 및 반응 여부를 평가하였다. 분석 결과, 도가니 소재별로 내화학적 안정성 및 내식성에 차이가 나타났으며, 일부 소재는 용융염과의 반응으로 인한 열화 가능성이 확인되었다.

#### [P5-9]

**초경량 Mg-Li 합금의 열처리에 따른 상 변화를 통한 미세조직 및 기계적 특성 연구:** 김용호\*, 유효상, 이병권, 고은찬, 손현택(한국생산기술연구원)

**Keywords:** Magnesium, Lithium, Heat-treatment

최근 전자 및 모빌리티 산업뿐만 아니라 우주항공 및 국방 분야에서도 경량 고강도 소재에 대한 수요가 급증하고 있다. 특히 마그네슘-리튬계 합금은 1.4 g/cm<sup>3</sup> 이하의 낮은 밀도와 우수한 기계적 특성으로하여 차세대 초경량 구조용 소재로 주목받고 있다. 본 연구에서는 Mg-15Li-xAl(x = 3, 6, 9 wt.%) 합금을 대상으로 고용열처리에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화를 분석하였다. Al 첨가는 Mg-Li 기지 내에서 고용 및 석출 강화를 유도하여 합금의 강도 및 열적 안정성을 향상시키는 원인으로 알려져 있다. 합금 시편은 SF<sub>6</sub>+CO<sub>2</sub> 보호가스 분위기에서 중력 주조하여 주조재를 제조하였고, 300 및 400°C-2hr 가열 후 수냉하여 고용 열처리를 하였다. 미세조직 및 상 분석을 위해 FESEM을 사용하였고 상분석에는 XRD 분석을 수행하였다. 기계적 특성은 상온 마이크로 비커스 경도 시험을 통해 평가하였으며, 고용 열처리에 따른 β-Li 기지 영역의 강화 거동과 결정립 안정화 효과를 중점적으로 고찰하였다. 본 연구 결과는 Mg-Li계 합금의 열처리 기반 고강도화 설계와 지속가능한 경량 합금 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

#### [P5-10]

**폐내화물로부터 제조한 MgO를 사용하여 용융염 전해제련 공정으로 1 kg/batch CuMg 합금 제조:** 이병건, Ri Vladislav, 우화영, 구광모, 김현우\*((주)케이에스엠테크놀로지)

**Keywords:** 용융염 전해제련, CuMg 합금, Pilot scale, 폐내화물, MgO

Mg(마그네슘)은 구조용 금속 중 가장 가벼운 금속으로, 수송 및 전자 분야 등에서 널리 활용되고 있으며, 부품 경량화를 위한 Mg 합금의 수요는 2023년 약 19억 7, 140만 달러 규모로, 연평균 성장률(CAGR) 13.2%의 성장이 전망되고 있다. 그러나 제련 기술 및 원료 확보가 미비한 상황에서 중국 의존도가 99.8%에 달해 공급 안정성 및 가격 변동성 대응에 한계가 있으며, 이에 따라 국내 발생 폐내화물을 시작 원료로 활용하여 금속 Mg까지 생산 가능한 기술 개발이 시급한 실정이다. 이를 위해 폐내화물로부터 고순도 MgO를 제조하는 기술, 액체금속 음극 기반의 MgO 용융염 전해제련 기술, 그리고 진공증류를 통한 고순도 Mg 금속 제조 기술로 구성된 3단계 공정이 개발 중이며, 본 연구는 이 중 용융염 전해제련을 통한 CuMg 합금 제조 공정에 해당한다. 기존 연구는 최대 300 g/batch 수준의 lab-scale 실험에 국한되어 있었으며, pilot-scale 수준의 확장이 필요한 상황이다. 본 연구에서는 1 kg/batch 규모의 실험 장비를 구성하고, 폐내화물로부터 제조한 개발 MgO와 상용 시약 MgO의 비교 분석 및 평가를 통해 개발 원료의 적합성을 확인하였다. 용융염 전해제련은 Cu 액체금속음극과 Graphite 양극을 적용한 Ar 분위기 내 반응기에서 1173 K의 MgF<sub>2</sub>-LiF 2원계 용융염을 이용해 4.5 V의 전압을 인가하여 전해를 수행하여, 그 결과 전류 효율 84.79%로 Mg 함량이 16.0 wt%인 CuMg 합금을 제조하였다.

#### [P5-11]

**합금원소 및 열처리에 따른 Mg 합금의 비강도-열전도도 특성 변화와 상관관계 연구:** 오태운, 김재연\*, 임창동\*(한국재료연구원 경량재료연구본부)

**Keywords:** 마그네슘 합금, 비강도, 열전도도, 상반특성

최근 저지구궤(LEO) 통신위성 개발이 활발해지면서 위성체의 소형·경량화 요구가 커지고 있다. 이에 따라 고비강도, 낮은 열변형(열 치수 안정성), 높은 방열(고열전도) 등 서로 상충하는 특성을 동시에 만족하는 경량 소재의 개발이 필수적이다. 이러한 요구 특성은 강화상을 도입한 복합소재로 효과적으로 개선될 수 있으나, 복합화에 앞서 기지 합금의 조성 및 열처리를 최적화하는 것이 특성의 균형과 극대화에 핵심적이다. 일반적으로 비강도는 합금원소 첨가와 시효 열처리를 통해 향상되지만, 순수 마그네슘의 우수한 열전도도(약 156 W/m·K)는 합금화에 따라 최대 약 50%까지 저하되는 것으로 보고되어 있다. 본 발표에서는 이러한 상반특성을 확보하기 위해, 다양한 합금원소와 열처리 공정을 적용해 제조한 이원계(Mg-Zn, Mg-Sn, Mg-Gd) 및 삼원계(Mg-Zn-Ca) 합금의 비강도와 열전도도 변화를 비교·평가하고, 두 특성 간 상관관계를 규명하였다.

## P6 : 알루미늄

Room 3층 로비, 4월 28일

### [P6-1]

**6XXX계 알루미늄 압출재의 미세조직에 미치는 Fe 함량의 영향:** 김형준(한국재료연구원, 부산대학교), 이윤수, 손현우, 윤연희, 안지영, 김규낙(한국재료연구원), 이제인\*(부산대학교), 안지혁\*(한국재료연구원)

**Keywords:** Al-Mg-Si 합금, Fe 첨가, 압출, PCG(Peripheral Coarse Grain), EBSD(Electron Backscatter Diffraction), 집합조직

수송기기 분야에서 경량화를 목적으로 수요가 증가하고 있는 6XXX계 알루미늄 합금은 탄소 규제로 인해 스크랩 알루미늄을 활용한 소재제도가 요구되고 있다. 하지만, 스크랩 알루미늄은 Fe 불순물을 다량 포함하기 때문에 2차상의 크기 및 분율을 증가시키고, 이는 압출 과정에서 표면 품질에 악영향을 주는 PCG(Peripheral Coarse Grain) 성장을 촉진시킨다. 따라서, 본 연구에서는 Fe 불순물이 6XXX계 알루미늄 압출재의 미세조직에 미치는 영향을 연구하였다. Al-0.7Mg-0.9Si (wt.%) 에 Fe 함량을 0.2, 0.4, 0.6 wt.% 첨가하여 스크랩 알루미늄 합금을 모사하였으며, 550°C에서 24시간 균질화 처리 후 500°C, 520°C에서 4:1, 16:1 압출비로 압출 하였다. 미세조직 분석 결과 모든 조건에서 압출재 표면에 PCG가 생성되고, PCG layer는 압출비가 클수록, 압출온도가 높을수록 시편 표면에 두껍게 생성되었다. 이는 압출비와 온도가 클수록 압출 과정에서 시편 표면의 마찰온도가 커졌기 때문인 것으로 분석되었다. 520°C 압출 조건에서 Fe 함량이 0.2, 0.4, 0.6 wt.%로 증가함에 따라 PCG layer의 두께는 25  $\mu\text{m}$ 에서 36  $\mu\text{m}$ 로 증가한 후 14  $\mu\text{m}$ 로 감소하였다. 이는 Fe 함량 증가에 따라 조대한 AlFeSi 입자의 분율이 증가하여 PSN(Particle Stimulated Nucleation) 효과로 PCG의 생성이 가속화되지만, 과도한 Fe 첨가는 PCG 성장을 억제한 것으로 판단된다. 압축 시험 결과, PCG layer 두께 차이는 강도에 큰 영향을 미치지 않았으나, 압축 변형 이후 PCG layer가 두꺼울수록 표면 거칠기가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 조대한 PCG와 내부 미세 결정립간 변형 거동 차이에 기인한 것으로 분석되었다

### [P6-2]

**Al-0.6%Mg-0.6%Si 합금에서 예비시효가 나노클러스터 형성과 이단시효 거동에 미치는 영향:** 송태현(한국생산기술연구원, 전북대학교), 박지욱, 이미영(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교), 조상현(한국생산기술연구원), 류대성(한국생산기술연구원, 경북대학교), 이창민(한국생산기술연구원, 전북대학교), 김재황\*(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교, 한국과학기술연구원)

**Keywords:** Al-Mg-Si alloy, nanocluster, pre-aging, age-hardening

Al-Mg-Si계 합금은 시효경화 특성이 우수하여 자동차 외관재로 널리 사용되고 있다. 판재는 운송 과정 중 필연적으로 상온에 노출되면서 Cluster(1)이 형성된다. 형성된 Cluster(1)은 이어지는 도장 공정에서 강도 저하를 유발하는 negative effect of two-step aging의 원인이 된다. 이 현상은 100°C에서 예비시효를 통해 Cluster(2)를 형성함으로써 억제할 수 있다. 저온에서 경쟁적으로 생성되는 클러스터가 이단시효에 미치는 영향에 대한 이해가 부족하다. 본 연구에서는 예비시효가 나노클러스터 형성과 시효경화 거동에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

### [P6-3]

**지속가능한 알루미늄-공기 전지 음극에 적용할 전기차 부품의 업사이클링:** 의원도, 박은하, 박준엽, 김정구\*(성균관대학교)

**Keywords:** 알루미늄-공기 전지, 알루미늄 음극, 전기차 부품, 업사이클링, 지속가능성

현재 지구온난화 및 대기오염 문제의 심화로 내연기관에서 전기차로의 전환이 가속화되고 있다. 전기차는 에너지 효율과 주행거리 확보를 위해 경량화가 중요하며, 이를 위해 알루미늄 부품이 폭넓게 활용된다. 이러한 전기차 보급 확대에 따라 점진적으로 알루미늄 부품 폐기량이 증가할 것으로 예상되지만, 이에 대한 활용 방안은 미미한 실정이다. 기존 재활용 공정은 높은 에너지 소모와 회수된 알루미늄이 고순도 합금으로 재가공되기 어려운 다운사이클링의 한계가 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 업사이클링 전략으로써, 폐전기차 알루미늄 부품을 알루미늄-공기 전지(aluminum-air battery, AAB) 음극으로 적용하는 가능성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 프론트 사이드 멤버 inner (front side member inner, FSMI)를 포함하는 전기차 부품 3종, 기존 재활용 음극 소재로 연구된 폐알루미늄 캔(can body, CB) 및 고순도 알루미늄(99.99 wt.%, 4N)을 음극 비교군으로 선정하여 야금학적 및 전기화학적 관점에서 각 음극의 성능을 분석하였다. 야금학적 분석 결과 FSMI는 재활용 음극 비교군 가운데 알루미늄 기지보다 높은 전위를 가지는 석출상 면적분율이 가장 적은 것으로 나타났으며, 자가부식을 유발할 수 있는 고각 결정립계 길이 역시 가장 짧게 나타났다. 이에 따라 전기화학적 분석 결과, FSMI는 재활용 음극 비교군 가운데 AAB 전해질 환경에서 가장 우수한 내식성을 보였다. 알루미늄 음극의 자가부식은 AAB의 성능 저하에 큰 영향을 미치기 때문에 결과적으로 내식성이 가장 우수한 FSMI가 2, 515 Wh/kg으로 재활용 음극 비교군 가운데 가장 높은 에너지 밀도를 보였으며, 이는 고순도인 4N보다 약 15% 높은 성능이다. 이러한 결과는 폐전기차 알루미늄 부품이 AAB 음극 소재로 전환될 수 있는 업사이클링 가능성을 강력히 보여준다.

### [P6-4]

**Mn 첨가 및 냉각 속도가 비열처리형 Al-7Si-Mg 주조용 합금의 미세조직 및 전기전도도에 미치는 영향:** 강주원(한국재료연구원, 한양대학교), 강청아(한국재료연구원), 이윤호(한국재료연구원, 한양대학교), 장재일\*(한양대학교), 조영희\*(한국재료연구원)

**Keywords:** Al-Si-Mg 합금, 냉각속도, 망간(Mn), 미세조직, 전기전도도

Al-Si-Mg(A356) 합금은 대표적인 알루미늄 주조용 합금으로서, 높은 주조성과 우수한 물성으로 다양한 분야에서 각광을 받고 있

다. 특히 철강을 대체하기 위한 경량화 수요에 따라 기계적 특성 향상을 중심으로 연구가 활발히 진행 되어왔다. 그러나 요구되는 기계적 특성, 특히 인장강도에 맞춘 합금 설계는 그 특성과 상관관계인 전기전도도를 감소시킨다. 또한, Al-Si계 합금 내 불순물 Fe는 임계 허용 범위(통상적으로 0.1 wt.% 이하)를 초과시 조대한 침상의  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi 금속간화합물을 형성하여 취성을 유발하고 기계적 특성(특히, 연신율)을 저하시킬 뿐만 아니라 전도도 특성에도 영향을 준다고 알려져 있다. 따라서, 이러한 Fe계 금속간화합물의 제어는 필수적이다. Mn은 침상  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi 금속간화합물을 개량화시켜 Chinese script 형태의  $\alpha$ -AlMnFe 금속간화합물 형성을 유도하여 기계적특성을 향상시킨다고 알려져 있다. 그러나,  $\alpha$ -Fe 금속간화합물은 복잡한 결정구조로 인해 전자 산란을 증가시킴으로써 전기전도도를 감소시킨다. 또한, 응고 시 냉각속도에 따라 Al-matrix에 Mn 고용도가 달라 동일 합금의 전기적 특성이 다르게 나타날 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 Al-7Si-Mg 기반 비열처리형 주조용 합금 조성을 기본으로 하여 Mn 함량을 단계적으로 변화시키고(0-0.60 wt%), 스텝몰드를 이용해 냉각속도 2-50 K/s 조건에서 중력 주조를 수행하였다. 이후 주조한 샘플에 대해 Mn 첨가와 냉각속도의 복합 영향이 주조 직후(as-cast) 합금의 미세조직과 전기전도도에 미치는 효과를 체계적으로 평가하였다. 각 조성 및 냉각 조건에서 미세조직 분석을 통해 알루미늄 수지상크기(SDAS) 및 Fe계 금속간화합물 등 이차상 Fe의 형상-분율 분포 변화를 정량 분석하였고, 와전류(eddy current) 방식으로 전기전도도를 평가하였다. 이를 바탕으로 냉각조건별 Mn 함량 변화에 따른 미세조직 변화와 전기전도도와와의 연계를 통해 전도도에 영향을 미치는 지배 인자를 규명하고자 한다. 이러한 기초적인 데이터를 바탕으로 개발 실험금에 대한 비열처리형 고열전도도 다이캐스팅 합금으로의 적용 가능성을 평가하고자 한다.

#### [P6-5]

**알루미늄 클래드재의 브레이징 조건 및 희토류 첨가에 따른 미세조직 변화 연구:** 고은찬\*, 이병권(전남대학교, 한국생산기술연구원), 유효상, 김용호, 손현택\*(한국생산기술연구원), 김태훈(전남대학교)

**Keywords:** 금속, 비철금속, 알루미늄, 클래드, 브레이징

알루미늄 클래드재는 높은 열전도도와 비강도를 바탕으로 자동차 열관리 시스템의 핵심 소재로 널리 활용되고 있다. 특히 라디에이터, 응축기, 증발기, 오일 쿨러 등 브레이징(Brazing) 부품에 주로 적용되며, 자동차의 경량화 추세에 따라 보다 높은 강도와 성능을 지닌 클래드재 개발이 필수적이다. 첫 번째 연구에서는 3000계 Al 합금(심재)과 4000계 Al 합금(클래드재)으로 구성된 이중재료를 대상으로, 최적의 브레이징 공정 조건을 탐색하였다. 브레이징 온도(570-630°C)와 유지 시간(10분)을 변수로 설정하였으며, KAlF<sub>4</sub> 플럭스를 적용하였다. 분석 결과, 570°C에서 접합이 이루어지지 않은 반면 590-610°C 범위에서 안정적인 접합이 확인되었다. 특히 FE-SEM 관찰 결과, 590°C와 610°C에서는 Al-Si-Mn-Fe 상이 균일하게 형성되었으나 630°C에서는 조대화가 발생하여, 최적 브레이징 온도는 590-610°C 범위로 제시되었다. 두 번째 연구에서는 3102계 Al 합금에 희토류(Rare Earth, RE) 원소를 0-1 wt.% 첨가하여 클래드용 합금을 개발하였다. 브레이징 조건(590-630°C, 10분, KAlF<sub>4</sub> 플럭스)을 동일하게 적용했으며, X-ray CT, FE-SEM, EBSD 분석을 통해 미세조직 변화를 평가하였다. 590°C에서는 심재-클래드 경계가 뚜렷이 구분되었지만, 610°C에서 안정적인 접합이 이루어졌다. 또한 RE 첨가량 증가에 따라 입자 크기(grain size)가 약 303.67  $\mu$ m  $\rightarrow$  71.98  $\mu$ m로 미세화되었으며, 재결정화가 촉진되는 현상이 확인되었다. 두 연구는 모두 알루미늄 클래드재의 브레이징 온도 최적화를 목표로 하나, 전자는 온도 조건의 영향에 집중하여 공정 효율을 규명하였고, 후자는 RE 첨가에 따른 미세조직 제어 및 기계적 특성 개선을 중점적으로 다루었다. 두 접근법 모두 브레이징 성능 향상과 경량-고기능 알루미늄 클래드재 개발에 중요한 기초 데이터를 제공한다.

#### [P6-6]

**Si, Cu 함량 변화에 따른 Al-Si-Cu계 알루미늄 합금의 유동성 및 기계적 특성 평가:** 방현식, 최승규, 김진평\*(한국자동차연구원)

**Keywords:** Aluminum alloy, Fluidity, Spiral test, Solidification, Mechanical properties

알루미늄 합금은 우수한 강도와 주조성을 바탕으로 자동차 및 미래 모빌리티 부품을 포함하여 다양한 산업 분야에서 주조 소재로 활용되고 있다. 차체 부품에 적용되는 알루미늄 합금은 강성 확보와 동시에 경량화 전략에 따른 합금 설계가 필수적이며 동시에 대형 부품 주조가 가능한 합금의 유동도 확보가 필수적이다. 주조공정에서 용탕의 유동성은 합금 조성에 따라 크게 달라지며 이는 주조 결함 방지 및 미충진 발생의 직접적인 영향을 미친다. 또한 복잡한 형상 및 대형 차체 부품의 주조품은 주조성이 가장 중요한 인자로 충분한 유동도가 확보되지 않으면 미성형 결함이 발생할 수 있다. 이처럼 주조결함을 방지하려면 다양한 변수와 관련된 용탕의 유동도와 관련된 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 Si 및 Cu 함량을 조절한 Al-Si-Cu계 합금을 대상으로 합금 조성에 따른 용탕 유동도와 기계적 특성에 관련된 기초연구를 수행하였다. 유동성 실험방법은 Spiral mold test 방식을 활용하였으며 Al-Si-Cu계 알루미늄 합금 약 20kg을 용해하여 유동도 평가 장비 래들에 용탕을 직접 주입하여 유동성을 평가하였다. 실험적 변수를 최소화 하고자 용탕의 주입속도와 온도를 일정하게 제어하여 실험을 수행하였다. 동시에 Step mold에 중력주조 공정으로 얻은 시험편을 활용하여 기계적 특성을 평가하였다. 이처럼 각 합금별 데이터를 비교 및 평가하여 조성별 알루미늄 합금의 용탕 유동특성과 기계적 특성에 대해 고찰하였다.

#### [P6-7]

**Zn 함량 제어에 따른 Al-Zn-Mg-Cu 계 합금의 고온 거동 분석:** 임채원, 민병현, 박현순\*(인하대학교)

**Keywords:** Al-Zn-Mg-Cu alloy, Hot workability, Hot torsion test, EBSD, XRD, STEM

Al-Zn-Mg 계열(7000계) 알루미늄 합금은 석출 강화 메커니즘을 통해 높은 강도와 우수한 기계적 특성, 뛰어난 응력부식균열 저항성을 보여 자동차, 항공우주 및 항공 산업에서 핵심 구조용 소재로 활용된다. 그러나 Zn 함량 증가에 따른 성형성 저하와 변형 중 미세조직 불안정성은 여전히 공정 설계의 주요 제약 요소로 작용한다. 특히 고온 변형 시 조성 변화가 유동 거동, 재결정 및 동적 석출 거동에 미치는 영향에 대한 체계적인 이해는 아직 부족하다. 이에 본 연구에서는 고강도 Al-Zn-Mg계 합금에서 Zn 함량

변화가 고온 변형 거동 및 미세조직 진화에 미치는 영향을 규명하고, 조성 기반 성형성 제어 가능성을 평가하였다. Zn 함량이 5.6, 6.2, 7.3 wt.%인 합금은 DC 연속주조 후 DSC 분석을 기반으로 460°C 및 475°C에서 2단계 균질화 처리하였으며, 400°C에서 0.05~5 s<sup>-1</sup>의 변형률 속도로 열간 비틀림 시험을 실시하여 유동 곡선을 도출하였다. Zn 함량 및 변형 조건에 따른 미세조직 변화를 분석하기 위해 EBSD를 활용하여 동적 재결정 거동과 결정립 특성을 평가하였으며, XRD를 통해 변형 전·후 상 구성 변화를 분석하였다. 또한 STEM 및 STEM-EDS 분석을 통해 석출상의 분포와 형상을 관찰하여, 고온 변형 중 석출 거동이 재결정 및 유동 특성에 미치는 영향을 종합적으로 고찰하였다.

#### [P6-8]

**다이캐스팅용 알루미늄 합금계의 후속 열처리 제어를 위한 L<sub>12</sub> 결정구조상 형성 유발 미량합금원소 첨가의 영향:** 김용윤\*, 이락규, 윤국태((재)대구기계부품연구원), 이수안((주)유립테크)

**Keywords:** 알루미늄, 열처리, 석출물

다이캐스팅용 알루미늄 합금계는 복잡한 제품의 형상을 구현하기 위해 용탕 유동성을 향상시키는 Si를 다량 함유하며, 후속 시효 열처리없이 as-cast 상태로 많이 활용되어왔다. 그러나 최근 완성차 업체에서 요구하는 부품의 기계적 물성이 향상되어, 추가적인 물성 확보를 위해 다이캐스팅 제품에 후속 시효 열처리를 도입하는 연구가 진행되고 있다. 알루미늄 합금은 후속 열처리를 통해 미세한 석출물을 형성시켜 석출 강화되며, 미량합금원소를 첨가하면 시효 석출을 효과적으로 제어할 수 있다. 특히, 미량합금원소 첨가로 준안정 L<sub>12</sub>-Al<sub>3</sub>M상을 형성하면 기존 합금계에 존재하는 주요 이차상/석출물과 무관하게 독립적으로 분산 강화 및 고온 특성 향상에 기여할 수 있다. 본 연구에서는 기계적 물성을 향상시키는 L<sub>12</sub>상을 효과적으로 형성한다고 보고된 미량합금원소 Zr-Er-Y 조합을 다이캐스팅 주조재에 복합첨가하기 위해, Zr-Er-Y를 함유한 알루미늄 합금을 제조하여 후속 시효 열처리에 대한 예비시험을 수행하였다. Zr-Er-Y 첨가로 형성된 L<sub>12</sub>상은 다이캐스팅 주조재에 지배적으로 분포하는 공정-Si 조직과의 상호작용을 최소화하여 독립적인 분산 강화에 기여할 수 있을 것으로 기대한다. 알루미늄 합금에 Zr-Er-Y 원소를 복합첨가하면, D0<sub>22</sub>상 우선 형성으로 알려진 Y원소가 L<sub>12</sub>상 안정으로 알려진 Er 원소와의 상호작용으로 인해 L<sub>12</sub>-Al<sub>3</sub>(Er, Y)상으로서 고르게 분포한다. 이후 후속 열처리가 진행되면 알루미늄 기지에 고용되어 있던 Zr이 확산되어 L<sub>12</sub>-Al<sub>3</sub>(Er, Y)상 주위에 L<sub>12</sub>-Al<sub>3</sub>Zr 구조로 분포하여 core-shell L<sub>12</sub> 결정구조를 형성한다. 형성된 core-shell 구조는 anti-phase boundary (APB) energy의 증가에 의해 APB의 이동이 억제되어 장시간 시효가 진행되는 동안 core-shell 구조를 유지하기 때문에 석출물의 조대화 속도를 억제하여 분산 강화 효과를 유지하게된다. 본 연구결과는 L<sub>12</sub>상의 안정화 및 조대화 억제에 대한 원인을 해석하여, L<sub>12</sub> 강화 다이캐스팅용 주조재의 합금설계에 대한 단서를 제공한다. (사사) 본 연구는 2023년도 정부(중소벤처기업부)의 재원으로 중소기업기술정보진흥원의 중소기업기술혁신개발 (RS-2023-00278457)의 지원을 받아 수행 된 연구임

#### [P6-9]

**Mn 최소화 및 고온 열처리를 통한 EOL 스크랩 기반 6000계 합금의 물성 향상:** 손은지, 손현우\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 금속, 알루미늄

EOL(End Of Life) 스크랩은 사용 수명이 다한 알루미늄을 의미하며, 1차 알루미늄 대비 약95% 에너지 절감 효과를 통해 지속가능성과 가격 경쟁력 확보 측면에서 자동차와 건축 및 건설재료로 활용되고 있다. 그러나, 스크랩 재활용 시 Fe 불순물로 인해 침상의 β-Fe상이 형성되어 취성 증가 및 기계적 특성 저하를 초래한다. 스크랩 사용량이 증가함에 따라 기존의 Mn 첨가를 통해 β-Fe상을 α-Fe상으로 개량화 하는 것도 한계가 있다. Fe 함량 증가에 맞춰 Mn을 함께 증가시킬 경우 α-Fe상의 부피 분율이 증가하고, 이 과정에서 Si이 금속간 화합물 형성에 소모되어 기지 내 용질 Si 농도가 감소하고 이로 인해 β" 석출량이 줄어들어 강도가 저하된다. 본 연구에서는 Fe와 Mn의 조성 상한선을 설정하고, 고온 열처리를 통해 β-Fe상의 형성을 억제할 수 있는 방안을 모색하였다. 6000계 합금의 주요 강화상이 Si-rich 석출물임을 고려하여 Si 함량 또한 조정하였다. 비교적 낮은 Si 함량을 갖는 Al-Mg-Si-Cu계 합금 기반에서 석출 거동을 제어함으로써, 강도 향상과 연신을 확보를 동시에 달성하고자 하였다. 합금은 주조 후 550°C에서 균질화 처리하였고, 이후 압출 공정을 거쳤다. 압출재는 570°C에서 30분간 용체화 처리 후 수냉하였으며, 175°C에서 8시간 시효처리를 실시하였다. 또한 As-cast, As-homogenized, As-extruded 상태에 따른 기계적 특성을 비교·평가하였다. 실험 결과, Mn 함량이 증가함에 따라 Si 함량을 고정한 합금에서는 강도가 감소하였으나, Si 함량을 함께 보완한 합금에서는 유사한 수준의 강도를 유지하였다. 연신율의 경우 두 합금 모두 기존 6000계 합금보다 우수한 값을 보였다. 따라서 Mn 첨가를 최소화한 합금 설계와 고온 열처리가 기계적 특성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

#### [P6-10]

**용체화 처리 후 지연퀵칭시킨 Al-7Si-0.4Mg 합금에서 예비시효가 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 영향:** 박보현(한국재료연구원, 아주대학교), 조영희, 손현우, 이정무\*(한국재료연구원)

**Keywords:** Al-Si-Mg alloy, T6 heat-treatment, delayed quenching, pre-aging, microstructure, mechanical property

Al-Si-Mg계 주조용 합금은 우수한 주조성과 내식성, 높은 비강도를 바탕으로 자동차 및 항공기 등의 수송기기 및 기계 부품 등에 널리 사용되고 있다. Al-Si-Mg계 합금은 T6 열처리를 통해 강도를 향상시키는 시효경화형 합금이다. T6 열처리는 용체화 처리 후 물에 퀵칭을 하고, 이를 인공 시효 처리를 진행하는 방식인데, 물에 급냉 시 용질원소를 과포화시키고 기지 내부에 공공을 발생시킬 수 있어, 이후 인공시효 시에 공공을 통한 용질 확산이 촉진되어 강도가 이루어진다. 하지만, 퀵칭을 빠른 속도로 진행할 경우 강도 향상을 유도할 수 있으나, 높은 내부 응력(internal stress)으로 인하여 대형 및 복잡 형상의 부품에 적용시 치수정밀도를 저해하는 뒤틀림(distortion) 발생의 원인이 된다. T6 열처리의 문제점을 보완하기 위하여, 용체화 처리를 생략하고 인공시효 처리를 실시하는



T5 열처리, 용체화 처리 후 물이 아닌 oil이나 공기 등으로 냉각하여 퀀칭 속도를 감소시키는 방법, 그리고 용체화 처리 후 서냉시키며 일정 온도 이하에서 퀀칭을 실시하는 방법 (delayed quench) 등 다양한 열처리 방법이 연구되어 왔다. 하지만, 상기의 방법으로 열처리를 실시한 경우, 기계적 특성, 특히, 연신율은 T6 열처리에 비하여 현저히 저하되는 것으로 알려져 있다. 한편, Al-Mg-Si 계 6xxx계 가공용 합금에서는 용체화 처리 직후 저온에서 예비시효 처리를 실시하여 시효 초기에 생성되는 클러스터의 종류/형태를 제어하여 인공시효 후의 특성을 향상시키는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 Al-7Si-0.4Mg 합금을 대상으로 용체화 처리 후 지연 퀀칭을 실시하였으며, 이후, 예비시효 처리가 인공시효 후의 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위하여 인공시효 처리 시간에 따라 인장 시험을 실시하고 나노인덴테이션을 통해 기계적 특성 변화를 평가하고, 미세조직적 특성을 분석하였다.

#### [P6-11]

**Mg 첨가량 변화에 따른 고강도 Al-Li계 합금의 미세조직 및 기계적 특성 평가:** 유효삼\*, 김용호, 김철우, 이병권, 고은찬, 손현택(한국생산기술연구원)

**Keywords:** Aluminum, Extrusion, Mechanical properties, Microstructure

Al-Li 합금은 기존 알루미늄 합금 대비 현저히 낮은 밀도와 높은 탄성계수를 동시에 구현할 수 있어 우수한 비강도와 구조 강성을 제공하며, 항공우주 구조재를 비롯한 경량화 핵심 응용 분야에서 지속적으로 연구가 이루어지고 있다. 특히 Li 원소의 첨가는 합금의 밀도를 감소시키는 동시에 탄성계수를 증가시키는 대표적인 경량 강화 메커니즘으로 보고되며, 이를 통해 구조 효율 향상이 가능하다. Cu의 첨가는 석출상을 형성하여 강도 향상에 핵심적인 역할을 수행하는 것으로 알려져 있으며, Zr은 분산상을 통해 재결정 거동을 억제하고 결정립 미세화를 유도하여 열적 안정성과 조직 균일성을 향상시키는 효과가 보고되어 있다. 이러한 합금 설계에도 불구하고 기존 Al-Li 합금은 높은 균열 민감성으로 인해 성형 공정 안정성과 구조 신뢰성 측면에서 제약이 존재한다. 최근 연구에서는 Mg 첨가가 석출 거동 변화와 전위 상호작용 조절을 통해 강도 및 연성 균형을 개선하고 균열 성장 저항성을 향상시킬 수 있음이 제시되고 있다. 또한 Mg는 고온 변형 안정성 및 미세조직 균일성 확보에도 긍정적인 영향을 미치는 것으로 보고되어, 차세대 Al-Li 합금 설계에서 중요한 합금 원소로 주목 받고 있다. 본 연구에서는 Mg 첨가가 Al-Li 합금의 미세조직 형성과 기계적 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 합금은 고주파 유도 용해 후 중력 주조로 제조하였으며, 이후 열간 압출 공정을 통해 가공하였다. 주조재와 압출재의 조직 특성은 주사전자현미경 관찰 및 X-선 회절 분석을 통해 평가하였고, 인장시험을 수행하여 기계적 거동 변화를 비교 분석하였다.

#### [P6-12]

**7xxx계 Al합금의 데이터 연구를 위한 석출물 고속분석방법 연구:** 이우영, 전서연, 이경환, 최현주\*(국민대학교)

**Keywords:** 7000계 Al합금, 시차주사열량계, 투과전자현미경, 선형회귀분석

최근 환경 규제 강화 및 미래 모빌리티 산업의 확대에 의해 차체 경량화 소재인 고강도 7000계 알루미늄 합금의 중요성이 대두되고 있다. 데이터 기반의 신합금 개발을 위해서는 방대한 물성 데이터가 필수적이나, 합금의 핵심 인자인 석출물 미세조직 정보는 투과전자현미경(TEM) 분석의 시간적 제약으로 인해 충분한 데이터 확보에 어려움이 있다. 이에 본 연구는 고속 분석이 가능한 시차 주사 열량계(DSC) 데이터와 정밀 분석인 TEM 데이터 간의 정량적 상관관계를 규명하여, 미세조직 정보 취득을 가속화할 수 있는 예측 방법론을 제시하고자 한다. 실험에는 7075, 7050, 7068 등 3종의 7000계 알루미늄 합금 압연재를 사용하였다. T6 열처리 공정 중 시효 온도(100~140 °C)와 시간(0~48 h)을 변수로 하여 다양한 석출 거동을 유도하였으며, 경도 분석을 통해 도출된 최대 경도(Peak-aging) 및 과시효(Over-aging) 조건의 시편을 선별하였다. 선별된 시편에 대해 TEM 분석으로 석출물의 크기 및 분율을 측정하였고, DSC 분석을 통해 얻은 발열 피크를 Kissinger method와 정규화(Normalizing) 기법으로 해석하여  $\eta'$  및  $\eta$  상의 변태 거동을 정량화하였다. 분석 결과, 시효 조건 변화에 따른 DSC의 정규화된 피크 데이터(Normalized value) 변화 추이는 TEM으로 관찰한 석출물 부피분율의 변화 경향과 일치함을 확인하였다. 이를 바탕으로 선형 회귀(Linear Regression) 분석을 수행하여 열분석 데이터(Input)와 미세조직 인자(Output) 간의 상관관계를 분석하였다. 본 연구를 통해 상대적으로 빠른 DSC 분석만으로도 복잡한 미세조직 정보를 예측할 수 있는 가능성을 제시하며, 향후 데이터 부족 문제를 해소하고 7000계 신합금 개발 기간을 단축하는데 기여할 것으로 기대된다.

## P7 : 철강A-제선, 제강, 환경, 에너지

Room 3층 로비, 4월 28일

### [P7-1]

**CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 분위기에서의 코크스 가스화 거동:** 온도, 가스 조성 및 코크스 강도의 영향: 정현주, 정성모\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 코크스 가스화 반응, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O

본 연구에서는 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 혼합 가스 분위기에서 코크스의 가스화 반응 거동을 온도, 가스 조성 및 코크스 강도에 따라 체계적으로 분석하였다. 실험은 1000, 1100 및 1200 °C 조건에서 수행하였으며, 가스 조성은 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 비율 20-0, 10-10, 0-20 vol%로 설정하였다. 또한 고 CSR 및 저 CSR 코크스를 사용하여 강도에 따른 반응 특성 차이를 비교하였다. 시간에 따른 전환율 데이터를 기반으로 Volumetric Model, Shrinking Core Model 및 Random Pore Model(RPM)을 적용한 결과, 코크스 내부 기공 구조 변화에 따른 반응 거동을 가장 잘 설명하는 RPM을 모델로 선정하였다. 이를 바탕으로 온도별 반응속도상수 k와 Arrhenius 해석을 통해 활성화에너지를 산출하였다. 본 연구는 CO<sub>2</sub> 및 H<sub>2</sub>O 가스화 조건에서 코크스 반응성 차이를 정량적으로 제시하며, 고로 공정 내 코크스 열화 및 저탄소 제철 공정 설계를 위한 기초 자료를 제공한다.

### [P7-2]

**유동로 수소환원로로 제조한 환원철 성형체의 열전도도 특성 분석:** 하윤철, 김리주, 서인국, 이준호\*(고려대학교)

**Keywords:** 수소환원제철, 유동환원로, 열전도도, H<sub>2</sub>-HCl

2050년 철강 산업의 탄소 중립을 달성하기 위해, 유동환원로를 이용한 분철광석의 수소환원과 전기로(Electric Arc Furnace, EAF) 또는 전기용융로(Electric Smelting Furnace, ESF)에서의 용융을 결합한 새로운 제철 공정이 개발되고 있다. 이 공정에서는 유동환원로에서 직접 환원된 환원철을 곧바로 H<sub>2</sub>-HCl(Hot Compacted Iron)의 형태로 성형하여 공급할 수 있다. H<sub>2</sub>-HCl은 성형 조건에 따른 내부 기공과 잔류 산화물 상의 존재로 인해 열전도도가 변화하며, 이는 용융 과정에서 에너지 소비에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서, H<sub>2</sub>-HCl의 열전달 특성을 명확히 이해하기 위해서는 기공률, 잔류 산화물의 영향을 정량적으로 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 유동로 수소환원로로 제조된 환원철을 성형온도, 성형압력 및 환원율을 달리하여 제조한 H<sub>2</sub>-HCl 시편의 열전도도를 LFA를 이용하여 측정하였으며, 이전 연구에서 도출한 금속-산화물 복합체의 열전도도 계산 모델값과 비교하였다. 본 실험 결과는 이전 모델식과 잘 일치하였으며, 이를 통해 기공률과 산화물 분율이 열전도도에 중요한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

### [P7-3]

**바이오매스 환원제 활용 스테인리스강 더스트의 Ni 및 Cr 환원 거동:** 박종현, 김선중\*(조선대학교)

**Keywords:** Kenaf biomass, Stainless steel dust, Carbothermal reduction

스테인리스강 생산 과정에서 발생하는 더스트는 Fe, Ni, Cr 등 유가금속을 다량 함유하고 있어 전략적인 재자원화 기술 개발이 시급하다. 기존 부산물 상용 공정 적용을 위해서는 더스트 내 금속산화물을 환원 및 회수하는 기술 개발이 필요하다. 한편, 화석연료 기반 코크스를 환원제로 사용 시 CO<sub>2</sub> 배출 저감에 한계를 가진다. 본 연구에서는 바이오매스 중 케나프를 환원제로 활용하여 더스트 내 Ni 및 Cr의 환원 거동을 조사하였다. 스테인리스강 더스트의 환원 실험에서 분코크스와 반탄화 케나프를 환원제로 사용하며, 반응 온도를 1523~1573K로 변화하여 환원 거동 및 금속 회수 특성을 비교하였다. 환원 반응 후 시료는 파쇄 및 자성분리를 통해 금속상과 슬래그상으로 분리하고, 각 상의 Fe, Ni, Cr 함량은 습식분석으로 평가하며 XRD 및 EPMA로 상분석을 수행하였다.

### [P7-4]

**부산물 재활용 Flux가 탈황에 미치는 영향 및 반응기구 제시:** 차은환, 김기원, 정용석\*(한국공학대학교)

**Keywords:** Ladle Flux, 액상분을 개선, 탈황, 율속, 반응기구

지난 연구에서 2050 탄소중립을 목표로 RCP (재활용 콘크리트 페이스트, CaO) 및 폐 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계 내화물(SiO<sub>2</sub> 0.7~23.6 wt%) 기반 금속산화물을 혼합하여 플럭스를 제조하였다. 실험은 1550 °C 조건에서 수행하였고, 슬래그에 첨가한 플럭스 조성 및 함량 변화(10, 20, 30 wt%)를 주어 용강 내 시간에 따른 황 농도를 측정하였다. 플럭스의 첨가로 상승한 슬래그의 액상분율이 탈황능에 영향을 준 것으로 보이나 첨가량에 따른 액상분율의 증가가 탈황능 향상으로 이어지지 않았다. 본 연구의 목적은 실제 제강 공정에서 사용되는 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-MgO-MnO 슬래그에 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(SiO<sub>2</sub> 혼입) 부산물 재활용 플럭스를 첨가함으로써 슬래그의 상의 거동을 제어하고, 이에 따른 탈황 반응의 지배 기구를 규명하는 데 있다. 본 연구에서는 고체-액체 공존 상태의 슬래그에서 탈황 반응이 어떠한 요소에 의해 제한되는지를 속도론적 관점에서 해석하고자 한다. 특히 플럭스 첨가에 따른 액상분율 증가가 탈황능을 향상시키는 메커니즘을 슬래그 상의 물질전달계수 관점에서 분석한다.

### [P7-5]

**산소분압 및 조성에 따른 액상 구리 합금의 표면장력 평가:** 조민서, 이준호\*(고려대학교)

**Keywords:** 스크랩, 트랩프 원소, 표면장력, constrained drop법

철강 산업은 기존의 철광석 중심 생산 방식에서 전기로를 활용한 스크랩 기반 제철로의 구조적 전환을 겪고 있다. 전기로는 철

스크랩을 주원료로 사용하여 온실가스 배출량을 감축할 수 있으나, 철강의 재활용 과정 중에 산화 저항성이 비교적 높은 트랩프 원소가 스크랩 내에 축적된다. 특히 구리는 상대적으로 고농도로 존재하며, 열처리 공정에서 산화물이 아닌 형태로 강재와 산화 스케일의 계면에서 구리 농축상을 형성한다. 이 액상이 결정립계를 따라 침투하면 표면 적열 취성이라는 결함을 유발하며, 스크랩 기반의 강판재 생산에 제약이 된다. 기존 연구는 주로 액상의 농화 위치와 계면 근처 미세조직 관찰과 같은 구조적 해석에 집중하였으나, 구리 농축상이 어떠한 조건에서 퍼지거나 침투하는지에 대한 물성 기반의 해석은 부족하다. 특히 표면장력은 고온 산화 조건에서 민감하게 변화하는 물성으로, 본 연구에서는 계면에서 구리 농축상의 젖음 및 침투 거동을 정량적으로 이해하기 위하여 산소분압에 따른 표면장력을 분석하고자 하였다. 우선 강과 스케일의 계면이 형성되는 산소분압과 액상 구리 합금의 조성을 열역학적으로 계산하였다. 이를 바탕으로 조성별 액상 구리 합금의 표면장력을 산소분압을 제어한 조건에서 constrained drop법으로 측정하였다. 본 연구 결과는 구리 농축상에서 산소분압과 합금 조성이 표면장력에 미치는 영향을 규명함으로써 표면 적열 취성 발생 메커니즘에 대한 이해와 스크랩 기반 강재 생산 공정을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### [P7-6]

**개방형 재순환 냉각 시스템에서의 노즐 막힘 유발 이물질 형성 메커니즘 규명:** 조하영, 김용원(성균관대학교), 김우철(한국지역난방공사), 김진구\*(성균관대학교)

**Keywords:** 개방형 재순환 냉각 시스템, 탄소강, 배관 부식, 철 산화물

개방형 재순환 냉각 시스템(Open-Recirculating Cooling Water System)은 에너지 효율이 높고 수자원 절약 측면에서 유리하여 대규모 지역 냉방 설비에 널리 적용되고 있다. 그러나 배관 소재로 주로 사용되는 저탄소강이 부식될 경우, 부식 생성물의 침전에 의해 운송상의 장애가 발생할 수 있다. 최근, 시스템 휴지기 이후 재가동 시 다량의 이물질이 냉각탑 상부 노즐을 막아 냉각수 역류 및 냉각 효율 저하를 유발하는 문제가 보고되고 있다. 기존 연구들은 수질, 유속 등 가동 중 조건에 따른 부식 거동 및 부식 생성물 형성에 주로 초점을 맞추어 왔으며, 휴지기 이후 부식 생성물의 양이 급격히 증가하는 현상에 대한 보고는 제한적이다. 또한 가동-휴지 반복 주기에 따른 부식 및 부식 생성물 형성 메커니즘을 체계적으로 규명한 연구 역시 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 실제 냉각수 시스템의 운용 주기를 반영하여, 가동기와 휴지기를 각각 모사한 2단계 모사 실험을 설계하고 수행하였다. 정전류 가속화 실험을 통해 가동기의 냉각수 용액 환경 조건을 모사하였고, 습윤-건조 반복 실험을 통해 휴지기의 배관 내 대기 환경 조건을 모사하였다. 모사 실험 결과 생성된 이물질은 실제 냉각탑 노즐에서 채취한 이물질과 비교 분석하였다. 광학현미경(Optical microscopy), 주사전자현미경(Scanning electron microscopy) 분석을 통해 층상 구조의 유사한 단면 형태를 확인하였다. X선 회절 분석(X-ray Diffraction)을 통해 lepidocrocite, goethite, magnetite 등 철 산화물 및 철 수산화물로 구성된 유사한 상 조성을 확인하였다. 이를 통해, 냉각탑 노즐 이물질의 발생을 모사 실험으로 재현 가능성을 입증하였다. 또한 COMSOL 시뮬레이션을 통해 가동기 동안의 냉각수 환경 조건에서 용출되는 철의 부피와 휴지기 동안의 배관 내 대기 환경 조건에서 증폭되는 부식 생성물의 부피를 정량적으로 비교하여, 철 용출에 비해 현저히 큰 부피의 부식 생성물이 형성됨을 확인하였다. 결과적으로, 가동기 동안 형성된 부식 생성물이 휴지기 동안 반복적인 습윤-건조 환경에 노출되며 형태 및 상이 변화하여 부피가 증폭되는 메커니즘을 규명하였다.

#### [P7-7]

**Ni-Ca/Ni-Mg계 탈황제를 이용한 용융 FeNi의 탈황 거동 및 극저 탈황제에 관한 연구:** 김두연, 금창훈, 전상혁, 강영조\*(동아대학교)

**Keywords:** 탈황제, 탈황 거동, Ni-Ca, Ni-Mg

현대 산업에서 Ni의 우수한 물성을 활용한 비철금속 소재의 수요가 지속적으로 증가함에 따라, 관련 제조 공정 내 S농도를 안정적으로 낮게 제어하기 위한 정련 기술의 중요성이 대두되고 있다. 특히 용융 FeNi 제조 프로세스에서는 생성회와 형성 기반의 탈황제를 사용해 왔으나, 최근에는 더 높은 품질의 소재를 제조하기 위해 극저 탈황 제어 공정 운영이 요구되는 상황이다. 본 연구에서는 이러한 기존 탈황제의 정련 성능을 고려하여, 기존 탈황 공정 이후 Ni-Ca 및 Ni-Mg계 합금철을 추가 투입함으로써 기존 방식의 탈황 성능을 보완하고 극저황 제어를 위한 극저 탈황제로의 가능성을 검토하고자 하였다. Ni-Ca 및 Ni-Mg의 투입 방식과 슬래그의 유무에 따른 탈황 거동을 비교 분석함으로써, 용융 FeNi 제조시 최적의 극저 탈황 조건을 구축하기 위한 기초 데이터를 확보하고자 하였다.

#### [P7-8]

**복합산화방지제 첨가에 따른 MgO-C 내화물의 압축강도 특성 평가:** 이지현, 박찬근, 정용석\*(한국공학대학교)

**Keywords:** MgO-C 내화물, 압축강도, TiO<sub>2</sub>, 온도

MgO-C 내화물은 MgO의 우수한 내열성과 Carbon의 높은 열전도도와 낮은 열팽창 계수로 인한 뛰어난 열충격 저항성 및 슬래그 저항성으로 철강 제조공정에서 내벽 소재로 널리 사용된다. 현재 이런 내화물이 사용되는 전로공정에서는 이산화탄소의 발생량을 줄이기 위해 스크랩을 사용하는 공정이 연구중이다. 그러나 스크랩 장입시 전로 내벽에 부딪히며 열충격이 가해지는 문제가 발생하며 이에 따른 압축강도의 향상이 요구된다. 이전 연구에서 TiO<sub>2</sub>는 고온에서 반응성을 가지며 미세조직 변화를 유도할 수 있는 첨가제로 주목되고 있으며 Al, Si는 산화방지제로써 사용되고 있다. 본 연구에서는 Al, TiO<sub>2</sub>, Si 복합산화방지제 첨가가 압축강도에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. MgO-C 내화물에 TiO<sub>2</sub>의 함량을 늘리며 첨가하여 시편을 제작하였으며, 소성 후 압축강도를 중심으로 기계적 물성을 비교 분석하였다. 또한 TiO<sub>2</sub> 함량에 따른 MgO-C 내화물의 압축강도 향상에 미치는 영향을 규명하고, 기계적 성능 개선을 위한 첨가제 설계의 기초 자료를 제시하고자 한다.

**[P7-9]**

**산업부산물 기반 복합 산화물 Flux의 조성 설계 및 철강 정련 특성 평가:** 김인아, 정은진\*(포항산업과학연구원)

**Keywords:** 금속, 제련, 부산물, 플럭스, 정련

탄소중립과 자원 순환이 철강 산업의 핵심 과제로 부상함에 따라, 산업부산물의 재활용은 환경적 부담을 완화함과 동시에 경제적 가치를 창출할 수 있는 핵심 기술로 인식되고 있다. 현재 유럽의 경우 약 60% 수준의 재자원화를 달성하는 반면, 국내의 재활용률은 23% 수준에 그치며 연간 약 11만 톤 이상의 산업 부산물이 매립 처리되고 있다. 이러한 현실은 철강 산업 내에서의 폐자원 고부가가치 활용 기술의 국산화 필요성을 강하게 시사한다. 한편, 국내 철강 공정에서 사용되는 정련용 첨가제 및 Flux 원료의 높은 수입 의존도는 원가 상승과 공급 불안정성의 원인으로 지속적으로 제기되고 있다. 이에 본 연구는 국내에서 발생하는 산업부산물 원료를 활용하여 수입 첨가제를 대체할 수 있는 복합 산화물계 Flux를 설계하고, 이의 정련 성능을 학술적으로 평가하고자 하였다. 본 연구의 주요 목적은 복합 고상산화물계 Flux의 설계를 통해 철강 내 비금속 개재물, 특히  $Al_2O_3$  성분의 정련 가능성을 향상시키는 것이다. 이를 위해 복수의 폐자원 조합을 기반으로 중심 조성을 설정하고, 주요 산화물 간 상호작용에 따른 개재물 포집 능력을 정량적으로 평가하였다. 또한, 개재물 제거 메커니즘에 대한 이론적 근거 확보를 위해 상평형 다이어그램 기반의 조성 최적화 및 고온 반응 거동 분석을 병행하였다. 본 연구는 폐자원의 단순 재활용을 넘어 정련 공정의 친환경적 전환과 핵심 소재 국산화를 동시에 달성할 수 있는 가능성을 시사한다. 특히, 철강 내 개재물 정제 기술을 향한 학술적 접근으로서, 정련제 구성 성분의 조성 및 물리화학적 특성이 실제 불순물 제거 효율에 미치는 영향을 계량적으로 해석하고자 하였다. 향후 본 연구의 결과는 실증 공정에서의 적용 가능성을 바탕으로 기술적 유효성과 산업적 확장성을 단계적으로 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

**[P7-10]**

**전기용융로의 아크 거동 예측 가속화를 위한 차수 축소 모델 개발:** 김재식, 심승현, 서승원, 양현진\*(인하대학교)

**Keywords:** 플라즈마젯, 특이값분해, 기계학

전기용융로내 아크 거동은 용융 효율 및 조업 안정성에 있어 중요한 인자이다. 그러나 극고온 초고속의 플라즈마젯을 수반하는 아크의 거동은 복잡한 다중물리현상으로 인해 높은 계산 비용을 요구한다. 아크 모사의 계산시간을 단축하면서도 적절한 수준의 정합성을 유지하기 위해서 데이터 기반의 차수축소모델을 개발하였다. 사전에 자기유체역학기반으로 계산된 아크의 속도장 및 온도장의 데이터를 특이값 분해를 통해 주요한 특성의 기저함수들로 추출한 후, 신경망 학습, 또는 방사 기저함수 방법 등으로 모델을 학습하였다. 이후 이론 및 실험 데이터와 예측된 결과를 분석하여, 정합성 확인 및 아크 계산의 가속화가 가능함을 확인하였다. 학습된 차수 축소 모델의 계산 속도는 자기유체역학을 활용한 물리기반 모델 대비 600배 이상 빠른 것으로 확인되었다.

**[P7-11]**

**$FePO_4$  탄소환원에 의한 수소발생 음극재용  $Fe_3P$  회수 가능성 평가:** 명재욱, 김선중\*(조선대학교 신소재공학과)

**Keywords:** HER, Cathode,  $Fe_3P$ , Carbothermic

철강 산업은 공정 중  $CO_2$  배출 저감을 위해 코크스에서 수소 환원로의 전환이 이루어지고 있다. 수소 자원 중 그린 수소가스는  $CO_2$  배출 없이 생산되어 철강 산업에서 주목받고 있으나 생산 비용이 높다. 수소 발생 반응(HER)의 음극재료는 Pt가 사용되나 가격 상승이 문제가 되고 있다. Pt 대체재를 위한 연구가 진행되고 있으며,  $Fe_3P$ 가 Pt와 가장 유사한 촉매 특성을 가진다는 보고가 있다.  $Fe_3P$ 는  $FePO_4$ 를 통해 제조 가능하며, 2차전지 부산물인 폐 LFP를 통해 회수 가능하다. 이를 활용해  $Fe_3P$  제조에 필요한 원료 절감이 가능하다. 본연구에서는  $Fe_3P$  회수 가능성을 평가하기 위해  $FePO_4$ 를 1473~1673K에서 탄소 열환원하였다. 회수한 샘플의 습식 분석을 통해 P 함유량을 파악하여  $Fe_3P$  상의 생성 조건을 평가하였다. 또한 XRD 및 SEM 분석을 통해 샘플의 상 및 미세구조를 관찰하였다.

**[P7-12]**

**전기화학 실험과 수치해석 모델링 병행을 통한 매설 열수송관 용접부 갈바닉 부식 속도 평가:** 임정민, 김용원, 김정구\*(성균관대학교 신소재공학과)

**Keywords:** 열수송관, 용접부 갈바닉 부식, 부식 시뮬레이션

지역난방 열수송관은 대규모 에너지를 수송하는 핵심 기반시설이다. 그러나 장기 운용 과정에서 외력으로 인하여 외관 및 케이싱의 손상이 선행되고, 이후 내부 보온재의 열화가 발생할 경우 침투한 수분에 의해 배관 본체의 외부 부식 문제가 발생할 수 있다. 특히 배관의 용접부는 급격한 열이력으로 모재와 다른 미세 조직 및 전기화학적 특징을 가지며, 이로 인한 전위차는 갈바닉 부식을 유발하여 열수송관의 주요 파손 원인이 된다. 이에 기존 연구들을 통해 용접부의 부식 현상이 다수 보고된 바 있으나, 도양 내 물질전달 제한 특성을 반영하여 갈바닉 전위·전류 분포 및 부식 속도를 정량적으로 예측하는 수치해석 연구는 제한적이다. 특히 시뮬레이션 결과와 실험 데이터를 연계하여 모델의 신뢰성을 검증한 사례는 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 도양 매설 환경 변수를 반영한 시뮬레이션 모델을 구축하고, 이를 실제 전기화학 실험 결과와 비교·검증함으로써 용접부와 모재 간의 갈바닉 부식 거동을 규명하였다. 우선, 광학현미경 관찰을 통해 용접부와 모재 간 미세조직의 차이를 확인하였다. 이어 동전위 분극 실험을 수행하여 각 부위의 전기화학적 특성을 파악하고, 해석에 필요한 핵심 파라미터를 도출하였다. 또한, ZRA(Zero Resistance Ammeter) 실험을 통해 두 부위 간 갈바닉 전류를 측정하여 부식 구동력을 정량화하였으며, 정전류 가속 시험을 통해 용접부의 부식 거동을 모사하였다. 최종적으로 도출된 전기화학적 파라미터와 실제 도양 환경의 유효 확산계수 및 비저항을 경계 조건으로 대입하여 COMSOL Multiphysics 기반의 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 시뮬레이션 해석 결과, 도양 내 물질전

달 저항 효과로 인해 용접부의 부식 속도가 수용액 조건 대비 현저히 감소함을 정량적으로 입증하였다. 결론적으로 본 연구는 실험과 시뮬레이션의 상호 보완적 접근을 통해 매설 환경에서 용접부와 모재부 간의 갈바닉 부식 속도를 정량적으로 해석하였으며, 이러한 분석 체계는 향후 열수송관의 수명 예측 및 장기 신뢰성 검증을 위한 핵심적인 공학적 토대를 제공한다. 본 연구는 한국지역난방공사의 지원으로 수행되었습니다.

**P8 : 비철금속**

Room 3층 로비, 4월 28일

**[P8-1]**

An Experimental Investigation of Oxygen Dissolution and Interfacial Reactivity between Molten Nickel Alloy and Refractories under Reduced Pressure for Developing Aerospace Nickel-Based Superalloy Refining Process: Seung Ho Lee, Hyun-Jae Kim, Youn-Bae Kang\*(포항공과대학교), Yoon Seok Ko(국방과학연구소)

**Keywords:** Nickel-based superalloy, Refractory, Vacuum, Levitation melting, Interfacial reaction

Nickel-based superalloys are indispensable for aerospace applications, required to withstand extreme environments characterized by high temperatures and severe mechanical stresses. However, acquiring manufacturing technologies for these alloys is challenging due to process complexity and strict security regulations on technology transfer. Moreover, as the importance of the aerospace and defense industries continues to increase worldwide, the domestic supply of aerospace materials is likely to become uncertain in the future. Consequently, fundamental research is essential to establish domestic capabilities for developing key aerospace materials. In the manufacturing process of nickel-based superalloys, controlling melt cleanliness is an important factor for ensuring alloy performance. Specifically, interfacial reactions between refractory materials and the molten metal significantly influence oxygen pickup, non metallic inclusion formation, and compositional changes. Despite this importance, fundamental data on the reaction behavior between molten nickel alloy and refractory materials remains scarce. In the present study, the reactivity between molten nickel alloy and representative refractory materials such as  $Al_2O_3$ ,  $MgO$  and  $ZrO_2$  was investigated. Semi-levitation contact experiments were carried out using electromagnetic levitation melting furnace equipped with a rapid-evacuation chamber, and the interfacial reaction behavior between the molten nickel alloy and refractories depending on refractory type, was thermodynamically predicted using the FactSage software calculation and compared with the experimental results. At 1500 °C, the melt was held isothermally, and the change in oxygen content in the molten nickel alloy with reaction time was measured. In addition, the interfacial reaction layers were analyzed under different vacuum levels to compare the reaction characteristics of each refractory material. This study provides fundamental data for understanding oxygen control and interfacial reaction behavior depending on refractory selection in nickel-based superalloy refining processes and is expected to be applied to the design of high-cleanliness nickel-based superalloy refining processes.

**[P8-2]**

통전처리에 따른 Cu-6Ni-1.26Si 합금의 석출 거동 가속화: 김가은, 정이화(경상국립대학교), 김규낙(경상국립대학교, 한국재료연구원), 최동인(서울대학교), 안지혁(한국재료연구원), 한홍남(서울대학교), 강성규\*(경상국립대학교)

**Keywords:** Cu-Ni-Si 합금, 연속 석출(Continuous Precipitation, CP), 불연속 석출(Discontinuous Precipitation, DP), 통전 처리(Electrical Current Treatment, ECT)

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. CP는 강도 향상에 유리하며, DP는 전기전도도를 향상시키므로 석출 거동 제어가 중요하다. 그러나 기존 열처리 공정은 이를 위해 약 10시간의 장시간 시효가 필요하다는 한계가 있다. 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 기계적 물성 변화를 분석하였다. Cu-6Ni-1.26Si 합금을 대상으로 열처리 및 통전처리 전후 미세조직을 관찰하고, 이를 바탕으로 비커스 경도와 전기전도도 변화를 해석하였다. 또한, 인장시험을 통해 인장 거동에 미치는 통전처리 하 석출거동의 영향을 분석하였다. 그 결과, 통전처리 시편은 동일한 온도 및 시간 조건에서도 열처리 시편보다 DP의 성장 속도와 면적 분율이 현저히 증가하였으며, Cu 기지 영역의 경도는 약 2배 이상 높게 나타났다. 또한 전기전도도는 ECT60 시편에서 34.54 %IACS로 향상되었다. 이러한 결과를 통해 통전처리가 Cu-Ni-Si 합금의 석출 거동을 효과적으로 가속시키는 공정임을 확인하였다.

**[P8-3]**

NCM계 Black Mass의 CO<sub>2</sub>에 의한 탄산화 배소 거동: 소지영, 손호상\*(경북대학교)

**Keywords:** NCM, 블랙매스, 탄산화 배소, 부도아 반응

리튬이온배터리(lithium-ion batteries, LIBs)의 수요 증가에 따라 폐LIBs 중 유가금속을 회수하기 위한 효율적인 리사이클링 공정 개발이 필수적이다. 본 연구에 사용한 시료는 NCM계 폐LIBs의 전처리 공정에서 회수하여 유가금속이 농축된 NCM계 블랙매스(Black mass, B/M) 분말로, 양극재 산화물 및 음극재(C), 그리고 소량의 불순물(Al) 등이 혼합되어 있다. 본 연구는 B/M 중의 Li를 선택적으로 분리 및 회수하기 위한 기초 연구로서, CO<sub>2</sub> 분위기에서의 등온 배소 온도(500-1,000 °C) 및 CO<sub>2</sub> 분압(0.1-0.5 atm)에 따른 열중량 분석 및 배가스 농도 분석을 통해 양극재의 환원 거동과 Li 회수 특성을 조사하였다. 실험 결과, 전 온도 및

분압 범위에서 양극재 분해로 생성된  $\text{Li}_2\text{O}$ 의 탄산화로  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 가 형성되었으며, 이를 수침출 및 고액 분리를 통해 회수하였다. 약 730 °C,  $p\text{CO}_2=0.5 \text{ atm}$  조건에서 최대 99.4 %의 높은 회수율을 보였으나, 약 800 °C 이상에서는 불순물인 Al과 일부  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 의 반응으로 불용성  $\text{LiAlO}_2$ 가 형성되어 회수율이 점차 감소하였다. 약 860 °C 이상에서는 부도아 반응(Boudouard reaction,  $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$ )에 의한 C solution loss로 CO 가스가 급격히 발생하였고, 동시에 Ni, Co 산화물이 CO 및 잔류 C에 의해 환원되어 시료의 무게가 급격히 감소하는 거동을 확인하였다. 또한,  $\text{CO}_2$  분압의 증가는 부도아 반응의 속도를 가속화 하였으나, 최종적인 환원 정도에는 큰 영향을 미치지 못하였다. 결과적으로, 본 연구는 Li 회수 효율 극대화를 위해 정밀한 배소 온도 제어 및 Al 불순물을 제거하는 전처리 공정의 필요성을 시사한다.

#### [P8-4]

**Ni-Cr 함유 스크랩 재활용 부산물 내 니켈 화합물로부터 건식 환원공정을 활용한 금속 니켈 회수 공정 연구:** 김호병, 소윤지, 최상훈\*(고등기술연구원)

**Keywords:** 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 Ni를 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-Cr 이 함유된 스크랩을 재활용하여 그 부산물인 Ni 화합물로부터 Ni 금속을 건식공정을 활용하여 회수하고자 한다. 이를 위해 Ni-Cr 이 함유된 스크랩 재활용 부산물인 Ni 화합물을 원료로 하여 하소(Ni 산화물 상변화)-수소 환원공정-자성분리 등 건식 공정을 활용하여 금속 Ni를 회수하고자 하며, Ni 화합물로부터 Ni 산화물로의 상변화를 위한 하소공정에 대하여 온도 및 시간에 대하여 설계하였으며, 조건에 따른 상변화 후 시료에 대한 분석과 상변화 후 시료의 수소환원 조건에 따른 변화를 연구하였다. 수소환원 공정을 통해 회수 된 금속 Ni를 분석하기 위하여 SEM 및 XRD를 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.

#### [P8-5]

**Effect of Bi Content Control on Zn Flake Refinement and Elongation Improvement in Sn-Bi-Zn Low-temperature Solders:** Eunho Ma, Chanyang Lee, Minchul Oh, Geonhong Kim\*(Institute for Advanced Engineering)

**Keywords:** Lead-free solders, Low-temperature solders, Sn-Bi solders, Elongation, Tensile strength

Sn-Bi low-temperature solders are considered as promising candidates for electronic packaging applications due to their low melting temperature and relatively decent mechanical properties. However, their utilization is limited due to the brittleness of Bi-rich phases. In this study, the Bi fraction was varied at a fixed Zn content to refine the microstructure of Zn-rich flakes and improve elongation. With decreasing Bi content, the continuity of the Sn-Bi eutectic phase was reduced, leading to a noticeable refinement and more uniform distribution of Zn-rich flakes. This led to a maximum elongation improvement of 102.1%. These results indicate that Bi fraction control enables indirect regulation of Zn-rich phase morphology and crack paths, providing an effective design strategy for improving the brittleness of Sn-Bi-Zn low-temperature solders.

#### [P8-6]

**팔라듐 합금 스크랩 재활용을 위한 전처리 공정 개발:** 소윤지, 이지은, 김호병, 최상훈\*(고등기술연구원)

**Keywords:** Palladium alloy, Pogo pin, Pretreatment, High-purity

팔라듐(Pd)은 백금족 금속 중 비교적 낮은 녹는점과 밀도를 가지며, 촉매 및 고기능 합금 소재로 폭넓게 활용되고 있다. 특히 우수한 내마모성, 높은 탄성 및 낮은 전기저항 특성으로 인해 반도체 직접회로(IC) 검사용 소모품에 적용되고 있다. 그러나 해당 소모품의 제조 및 가공 과정에서 다량의 팔라듐 합금 스크랩이 발생하며, 이들 대부분은 저가로 해외에 수출된 후 정제 과정을 거쳐 재수입되고 있는 실정이다. 현재 팔라듐 재활용 기술은 자동차 폐촉매를 중심으로 연구되어 왔으나, 반도체 공정에서 발생하는 팔라듐 합금 스크랩을 대상으로 한 체계적인 전처리 공정 연구는 미흡한 상황이다. 본 연구에서는 국내에서 발생하는 팔라듐 합금 스크랩을 활용하여 고순도 팔라듐 합금 제조를 위한 전처리 공정을 구축하고자 하였다. 가공 과정에서 혼입되는 유기물과 금속성 불순물 제거를 위해 건식 및 습식 공정을 단계적으로 적용하였다. 건식 공정에서는 FactSage 열역학 계산을 통해 산소 분압 및 온도에 따른 산화 거동을 예측하고, 이를 기반으로 불순물 선택적 제거 가능성을 검토하였다. 또한 열중량분석(TGA)을 통해 잔류 유기물의 열분해 특성을 확인하고, CS 및 ONH 분석을 통해 전처리 과정 중 탄소·산소·수소 함량 변화를 평가하였다. 습식 공정에서는 용매 조성에 따른 불순물 제거 거동을 비교하여 공정 조건별 효율을 검토하였으며, 최종적으로 유·무기 불순물 함량 변화를 정량 분석하여 전처리 공정의 적용 가능성을 확인하였다.

#### [P8-7]

**분할형 구조 사형 몰드를 이용한 알루미늄 청동 프로펠러의 주조결함 제어에 관한 연구:** 김연찬\*, 최세원, 김철우, 강창석(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 알루미늄 청동, 사형주조, 알루미늄 청동, 주조결함, 응고해석

효율적 에너지 사용 및 탄소 중립 실현을 목적으로 한 하이브리드 추진체가 적용된 해양용 선박의 경우 내식성 및 내마모성이



우수한 프로펠러 부품이 요구되고 있으며, 선박 추진 시 정밀제어를 위해 프로펠러 형상도 다양해지고 복잡해지고 있다. 특히 알루미늄 청동 합금의 경우 우수한 기계적 특성을 가짐과 동시에 내식성 및 내마모성이 우수하므로, 해양로봇, 선박용 부품 등 다양한 해양 분야에 사용되고 있다. 선박 추진체 부품 중 해수에 잠겨서 작동하는 프로펠러는 사형주조 방식으로 제작되는 부품으로 사형 주형에 주입되는 합금 용탕의 온도가 1150도 이상이므로 주조과정 중 프로펠러 내/외부에 크랙, 수축결함, 기포 결함 등 많은 주조 결함이 발생할 수 있다. 이러한 주조 결함은 추진체인 프로펠러의 사용 과정에서 파손과 파괴 등의 문제를 유발할 수 있다. 본 연구에서는 알루미늄 청동 합금 소재의 프로펠러 사형주조 제작과정 중 발생할 수 있는 주조결함을 제어하기 위해 런너 형상, 길이, 직경 및 주입 중량의 변화에 따른 유동 및 응고 거동을 분석하였다. 실험계획법을 이용하여 사형 몰드 성형 조건이 온도, 용탕 주입 속도, 수축 및 기포 결함에 미치는 영향을 분석하였고, 각 변수에 따른 주조 결함 제어 정도를 평가하였다.

#### [P8-8]

**Al-Mg-Si 합금에서 실리콘 함량 및 열처리가 석출 거동과 열전도도에 미치는 영향:** 최세원\*, 김영찬, 김철우(한국생산기술연구원)

**Keywords:** Al-Mg-Si 합금, 실리콘 함량, 석출 거동, 열전도도, 시효 열처리

본 연구에서는 잉곳 야금법으로 제조된 Al-Mg-Si 합금에서 실리콘 첨가와 열처리가 열적 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 과잉 Si의 영향을 평가하기 위해 두 가지 합금계—AMSi0.2(0.2 wt% Si)와 AMSi6.5(6.5 wt% Si)—를 선정하여 열확산도, 열전도도, 비열, 열팽창 특성을 분석하였다. 열적 특성은 용체화 처리 후 서로 다른 온도에서 인공 시효한 상태에서 측정하였다. 시차주사열량분석(DSC) 결과,  $\beta''$ ,  $\beta'$ ,  $\beta$  상의 석출과 함께 독립적인 Si 석출을 포함하는 뚜렷한 석출 순서가 확인되었다. Si가 풍부한 합금(AMSi6.5)은 보다 복잡한 열적 응답을 보였으며, 시효 온도 범위에서  $\beta''$ ,  $\beta'$  및 Si 상의 중첩 석출로 인해 열확산도와 열전도도가 향상되었다. Si 석출 및 재용해 거동은  $\beta$  상 석출보다 열확산도와 열팽창 거동에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 과잉 Si는 전체적인 열팽창을 감소시키는 반면, Si 석출 구간에서는 국부적인 열팽창 증가를 유발하였다. 시효 처리는 용질 석출을 촉진하여 열전도도를 향상시켰다. 이러한 결과는 방열판 및 전자 패키징과 같이 열전달 특성의 정밀한 제어가 요구되는 응용 분야에서 Al-Si-Mg 합금의 열적 성능을 최적화하는 데 있어 Si 함량과 시효 조건이 핵심적인 역할을 함을 보여준다.

#### [P8-9]

**대기 및 진공 주조 공정으로 제조된 Cu-Ti 합금의 시효 열처리에 따른 기계적 특성과 전기전도도:** 최광수, 양현석, 정향철, 공만식\*(고등기술연구원)

**Keywords:** Cu-Ti합금, 진공/대기주조, 시효 경화, 전기전도도

Cu-Ti 합금은 고강도와 우수한 도전율을 동시에 요구되는 동합금 소재로서 주목받고 있으나, 티타늄(Ti) 원소의 높은 반응성으로 인해 일반적으로 진공 유도 용해(VIM) 공정이 필수적인 것으로 알려져 왔다. 본 연구에서는 대기 용해 환경에서도 성분 제어 및 청정도를 확보할 수 있는 'Ti 과보상 및 산화물과 슬래그형성에 따른 정제 공정'을 제안하고, 이를 통해 제조된 Cu-Ti 합금의 물성을 진공 용해재와 비교 분석하였다. 실험 결과, 대기 주조 공정에서 Ti의 산화 손실을 고려한 과보상 설계를 통해 Cu-Ti 합금을 제조했다. 특히, 용탕의 산화 및 슬래그의 형성 효과로 대기 주조임에도 불구하고 산소 및 질소 유입을 산업적으로 수용 가능한 수준으로 억제하여 진공재에 근접하는 청정도를 확인하였다. 특히 대기 주조를 통해 확보된 고농도 용질 원자가 시효 단계에서 균일한 석출 경화 기구로 작용하도록 유도함으로써, 최종적으로 진공 용해재와 대등한 수준의 기계적 특성 및 전기전도도를 확보하였다. 본 연구는 대기 주조 공정을 통한 고성능 Cu-Ti 합금 제조의 공학적 타당성을 입증하였으며, 향후 각 공정 인자가 물성 규격화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 대기 주조재의 산업적 상용화 가능성을 제시하고자 한다.

#### [P8-10]

**Evaluation of Microstructural Evolution in Friction Stir Welded Thick Oxygen-Free Copper for the Korean Reference Disposal System:** Jae-Deuk Kim\*, Young-Ho Lee, To Kang, Jeong-Mok Oh, Jin-Seop Kim(Korea Atomic Energy Research Institute)

**Keywords:** Oxygen-free copper (OFC), Friction stir welding (FSW), Microstructural evolution, Dynamic recrystallization (DRX), Thick-section welding

This study evaluates the applicability of friction stir welding (FSW) for oxygen-free copper (OFC) plates, a candidate material for the Korean spent nuclear fuel disposal canister. Using 35 mm thick plates and a welding tool with a 16 mm pin length, an evaluation was conducted on the weld zone at the maximum achievable penetration depth. Recognizing the limited research on microstructural evolution under varying heat inputs for thick-section OFC (>10 mm), this study investigates the correlation between heat input, microstructural changes, and mechanical properties. Non-destructive testing of the FSW samples confirmed sound butt-joints without volumetric defects across all welding conditions. Furthermore, EBSD analysis revealed that the microstructural evolution within the stir zone (SZ) was governed by the competition between dynamic recrystallization (DRX) and thermal restoration. Based on these findings, a Three-Zone Classification model is proposed to categorize the SZ into three distinct regions according to the dominant microstructural evolution mechanism: (1) Fine-grained DRXed zone, (2) Thermally restored zone, and (3) Structurally unstable zone. These results provide critical baseline data for optimizing the FSW process and ensuring microstructural stability for sealing thick-walled OFC spent nuclear fuel disposal canisters. Acknowledgement: This research was supported by the Institute for Korea Spent Nuclear Fuel (iKSNF) and National Research Foundation of Korea (NRF) grant (RS-2021-NR056198)

**[P8-11]**

**연속 진공증류 공정을 이용한 고순도 마그네슘 잉곳 회수 기술 개발:** 소유진, 김호병, 최상훈\*(고등기술연구원)

**Keywords:** Magnesium, Continuous Vacuum Distillation, High-purity, Magnesium Ingot

최근 전자, 의료 및 재생에너지 산업의 고도화에 따라 4N(99.99%) 이상의 고순도 마그네슘(Mg)에 대한 수요가 증가하고 있다. Mg는 ppm 수준의 금속 불순물에도 부식 거동이 민감하게 변화하여 장기 신뢰성에 직접적인 영향을 받는다. 그러나 상업적으로 생산되는 Mg는 전해법 및 열환원법을 통해 제조되며, 일반적으로 99.8-99.97% 수준의 순도에 머무른다. 이를 보완하기 위해 존멜팅, 전해 정련, 첨가제 정제 등 다양한 후처리 기술이 적용되고 있으나, 공정 비용과 처리 시간 증가, 재용융 과정에서의 오염 가능성 등의 한계가 존재한다. 특히 기존 진공증류 공정에서는 Mg이 크라운 형태로 응축 및 회수되어 추가 가공이 요구되며, 이는 회수율 저하 및 2차 오염 가능성을 유발하는 요인으로 작용한다. 이에 본 연구에서는 크라운 형성 문제를 개선하고 공정 효율을 향상시키기 위해 새로운 연속 진공증류 공정을 적용하였다. Mg 및 주요 불순물 원소 간의 증기압 차이와 기-액 평형 거동을 검토하여 분리 가능성을 평가하고, 이를 기반으로 증발-응축 구간의 온도 조건과 유지 시간을 설계하였다. 설계된 조건에서 연속 진공증류 실험을 수행하여 Mg를 재용융 없이 잉곳 형태로 직접 회수하였으며, 회수율과 순도 분석을 통해 공정의 정제 성능을 검증하였다. 이를 통해 기존 공정의 한계를 보완할 수 있는 고순도 Mg 제조 가능성을 제시하였다. 최종적으로 회수된 마그네슘 잉곳은 ICP 분석을 통해 순도를 검증하였다.

**P9 : 철 강B-압연, 강 중 개발, 후처리**

Room 3층 로비, 4월 28일

**[P9-1]**

**초고강도강에서의 트랩트 원소 입계편석이 수소취성 거동에 미치는 영향:** 이정민(한국재료연구원, 동아대학교), 이진중, 박형권(한국재료연구원), 정승필(현대제철), 전종배\*(동아대학교), 유지성\*(한국재료연구원)

**Keywords:** Electric arc furnace, Tramp elements, Sn, Sb, Hydrogen embrittlement

최근 전기로 공정에서 스크랩 사용 비율이 증가함에 따라, 제강 공정 중 제거가 어려운 트랩트 원소(Tramp elements)의 축적 문제가 대두되고 있다. 대표적인 트랩트 원소로는 Ni, Cu, Sn, Sb 등이 있으며, 특히 Sn과 Sb는 입계편석 경향이 강한 원소로 알려져 있다. 이에 따라 트랩트 원소가 미치는 기계적 물성 및 수소취성 특성에 대한 체계적인 분석이 요구된다. 본 연구에서는 1.8 GPa급 초고강도강에서 Sn과 Sb가 기계적 물성과 수소취성 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 미세조직 측면에서는 Sn, Sb 첨가에 따른 변화(Martensite 구조 및 Prior austenite grain boundary(PAGB) 크기, 입계 편석 여부)를 분석하였고, 비커스 경도 시험과 준정적 인장 시험을 통해 기계적 특성을 평가하였다. 수소취성 저항성을 평가하기 위해 전기화학적 수소 주입 전 후 Slow strain rate tensile test(SSRT)를 수행하였으며, 열탈착분석(Thermal desorption spectroscopy, TDS)을 통해 수소의 트래핑 및 방출 거동을 분석하였다. 그 결과 Sn, Sb가 전체적인 미세조직 형상이나 기계적 물성, 수소함량 측면에는 유의미한 변화를 나타내지 않은 반면, SSRT 시험 시 연신율의 현저한 감소와 함께 취성파괴 거동이 나타났다. 파면분석 결과 Sn, Sb 첨가 시 수소 주입 조건에서 입계 파괴 양상이 더욱 증가하는 경향을 보였다. 이는 Sn, Sb가 PAGB에 편석되어 PAGB의 결합력을 약화시키고, 결과적으로 수소취성 민감도를 증가시킨다는 것을 의미한다. 본 연구는 스크랩 사용이 확대되는 전기로 강재에서 잔존 트랩트 원소의 제어가 구조적 신뢰성 향상 및 수소취성 저항성 확보를 위해 중요함을 보여준다.

**[P9-2]**

**보론강의 기계적 특성에 미치는 Ti 함량 및 템퍼링 처리의 영향:** 황예나, 정민섭, 황병철\*(서울과학기술대학교)

**Keywords:** Tempered martensitic steel, Titanium, Boron Nitride, Impact toughness

대형 구조물 및 방탄재 등에 사용되는 후판재 제조 시 두께 방향 전반에 걸쳐 균일한 미세조직을 확보하기 위해서 우수한 경화능이 요구된다. 보론은 효과적인 경화능 원소로 알려져 있으며, 용질 원자 형태로 오스테나이트 결정립계에 편석되어 결정립계에 에너지를 낮추고 페라이트 핵생성을 억제함으로써 경화능을 향상시킨다. 그러나 보론은 제조 공정 중 질소와 강하게 반응하여 붕질화물을 형성해 용질 보론 함량이 감소되어 제조 공정 중 경화능이 저하될 수 있다. 붕질화물의 석출을 억제하기 위해서 보론보다 질소와 결합성이 강한 합금원소를 첨가할 수 있으며, 일반적으로 Ti를 첨가하면 질소와 우선적으로 결합하여 TiN을 형성함으로써 붕질화물의 석출을 억제할 수 있다. 그러나 Ti를 다량 첨가하거나 열처리로 인한 TiN 조대화 시 충격인성이 저하되어 기계적 성능이 떨어진다. 따라서 경화능과 기계적 성능을 동시 확보하기 위해서는 Ti 함량과 열처리 조건에 따른 석출 거동에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 Ti 함량과 템퍼링 열처리 조건을 달리한 템퍼드 마르텐사이트강을 제조하였으며, Thermo-Calc를 통한 열역학 계산 결과와 미세조직 분석을 종합하여 석출물의 형상 거동을 분석하였다. 또한 경도 및 충격인성을 평가하여 석출물 등의 미세조직이 기계적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다.

**[P9-3]**

**Fe-Mn-C 고망간강의 잔존 주조조직이 어닐링 후 불균일 미세조직 형성 및 기계적 특성에 미치는 영향:** 문태열, 문광현, 김진경\*(한양대학교)

**Keywords:** 고망간강, deformation twin, 불균일 미세조

고망간강은 FCC 기지를 기반으로 낮은 적층결합에너지를 가지며, deformation twinning에 의한 변형을 통해 우수한 강도와 연신율의 조합을 나타낸다. 일반적으로 고망간강은 균질화 열처리, 압연 및 어닐링 공정을 통해 균일한 미세조직을 형성한다. 본 연구에서는 Fe-Mn-C 고망간강에서 완전히 균질화되지 않은 잔존 주조조직이 어닐링 후 불균일 미세조직의 형성에 미치는 영향 및 이에 따른 기계적 특성을 조사하였다. 아크 멜팅을 통해 합금을 제조한 후, 1000 °C에서 60분간 균질화 열처리를 수행하였으며, 이후 열간 압연과 냉간 압연을 거쳐 900 °C에서 최종 어닐링을 진행하였다. 그 결과, 어닐링 후에도 불균일한 결정립 분포와 cementite가 형성됨을 확인하였다. 인장 시험을 통해 기계적 특성을 평가하였으며, XRD, SEM, EBSD 분석을 이용하여 미세조직과 기계적 거동 간의 상관관계를 고찰하였다.

**[P9-4]**

**빅데이터 기반 고성능 내화강 설계 및 고온 기계적 물성 메커니즘 규명:** 이영주, Salmi Salsabila Syifa, Zargaran Alireza(포항공과대학교), 김지훈\*(부산대학교), 김경덕\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 내화강, 저합금강, 탄화물, 석출강화, 빅데이터 분석

기후변화로 인한 건조 기간의 장기화와 국내 산악 지형 특성으로 대형 산불 위험이 증가함에 따라, 화재 상황에서 구조 안전성을 확보할 수 있는 내화강 수요가 확대되고 있다. 그러나 기존 내화강 개발은 특정 원소를 중심으로 제한적으로 조성을 변형하는 방식에 머물러 탐색 가능한 조성 공간이 협소하고 개발 속도가 저하되는 한계를 가진다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해, 열역학 시뮬레이션 기반 고속-대량 스크리닝을 수행하여 방대한 합금 조합에 대한 고온 (600 °C, 180 min) 기계적 물성을 예측하

고 빅데이터 베이스를 구축하였다. 또한 고온 기계적 물성 발현 메커니즘을 규명하기 위해 특정 원소를 변화시키는 방식으로 데이터 베이스를 세분화하였으며, 각 세분화 데이터로부터 대표 내화강 조성 6종을 도출하였다. 도출된 조성에 대해 고온 인장 시험과 미세 조직 분석을 수행한 결과, 6종 중 3종은 내화강 규격(상온 대비 고온 항복강도 2/3 이상)을 만족할 수 있음을 확인하였다. 실험 결과를 통해 V는 단독 효과보다 다른 원소와의 상호작용을 통해 고온 물성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. Mo, V, Ti는 석출 강화에 기여하는 핵심 원소로 규명되었으며, 특히 Mo를 배제한 Ti-Nb-V-W 합금계에서도 원소 간 상호작용에 의해 강화 효과가 크게 증대됨을 확인하였다. 본 연구는 고가 전략 원소인 Mo를 대체할 수 있는 유망 조성 설계안을 제시하는 동시에, 다성분계 합금에서 고용 원소 조합에 따른 고온 물성 변화 메커니즘을 규명함으로써 차세대 내화강 설계를 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

#### [P9-5]

**바나듐 첨가 열간압연 고망간강의 열처리 온도에 따른 미세조직 및 기계적 물성 변화:** 양승우, 송호정(동아대학교), 박시욱, 김용진(국방과학연구소), 박진우(울산과학기술원), 소태일(포스코), 장재훈, 전종배\*(동아대학교)

**Keywords:** 고망간강, 바나듐, 열처리 효과, 미세조직 변화, 재결정

고망간강(High-Mn Steel)은 20~30 wt.% 수준의 망간(Mn)을 함유한 오스테나이트계 강으로, 높은 인장강도와 내마모성, 우수한 극저온 인성을 바탕으로 건설, 조선 및 자동차 산업 등 다양한 산업에서 활용되고 있다. 또한 고망간강의 기계적 물성을 향상시켜 더 많은 산업 분야에 적용하려는 많은 연구들이 진행되고 있고, 특히 후물체 및 열연재의 기계적 성질 개선에 대한 연구가 최근 주목받고 있다. 고망간강의 기계적 성질은 미량 합금 원소 첨가와 공정 열처리 이력에 의해 향상될 수 있으며 이에 따른 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 본 연구에서는 열간압연 고망간강의 바나듐 함량(0.4, 0.5 wt.%)과 열처리 조건(500-1000°C, 100°C 간격)에 따른 미세조직 및 기계적 물성 간의 상관관계를 규명하였다. 인장 시험 결과, 바나듐 함량에 관계없이 as-rolled(680 MPa)대비 500°C 열처리 시 항복강도는 650 MPa 이하로 하락하였다. 이후 열처리 온도가 증가함에 따라 항복강도는 800°C 조건까지 선형적으로 상승하여 최댓값을 보였으나, 900°C 및 1000°C 조건에서는 항복강도가 크게 하락하는 경향을 보였다. 충격시험은 -84°C에서 수행하였으며, as-rolled와 500°C 조건에서 충격인성은 유사하였으나, 열처리 온도가 증가함에 따라 800°C까지 선형적으로 하락하였고, 900°C 및 1000°C 조건에서는 충격인성이 크게 상승하였다. 기계적 물성 변화를 분석하기 위해, XRD를 이용하여 안정상 분석을 진행하였으며, 미세조직 분석은 EBSD를 이용하여 결정립의 형태, 크기 및 재결정 분율을 분석하였다. 또한 열처리에 따른 석출 거동의 영향을 고려하기 위해 열역학 석출상 시뮬레이션을 통해 주요 석출상의 형성 가능성 및 형성 온도를 예측하였으며, SEM-EDS를 이용하여 석출물의 형상, 분포, 위치 및 석출상을 분석하였다. 분석 결과 열처리 온도가 증가함에 따라 800°C 조건까지의 항복강도 상승 및 충격인성 하락은 입내 및 입계의 추가 석출물 형성으로 인한 것으로 판단된다. 반면 900°C와 1000°C 조건에서의 항복강도 하락 및 충격인성 상승은 석출물 형성 대비 재결정 발생에 기인한 것으로 판단된다. 본 연구는 바나듐 첨가 열간압연 고망간강에서 열처리 온도에 따른 미세조직 변화와 기계적 물성 변화 간의 상관관계를 제시한다.

#### [P9-6]

**고망간강 주조재와 단조재의 인장 중 파괴 거동 및 국부 변형 특성 분석:** 박주현, 이승희, 강신곤\*(동아대학교)

**Keywords:** 고망간강, 열간 단조, 파괴거동, 디지털 영상 상관법(DIC), 국부 변형

고망간강(high manganese steel)은 면심입방구조(face-centered cubic, FCC)의 오스테나이트(austenite) 조직을 안정적으로 유지하며 우수한 연성을 나타내는 합금강이다. 그러나 주조 공정에서 형성되는 수지상(dendritic) 조직과 합금 원소 편석(segregation)은 미세조직적 불균일성을 초래하며, 이는 인장 변형 과정에서 국부 변형(strain localization)과 조기 파단(premature fracture)을 유발할 가능성이 있다. 따라서 이러한 미세조직적 차이가 인장 중 변형 거동과 파괴 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 체계적인 분석이 필요하다. 이에 본 연구에서는 동일 조성의 고망간강 주조재와 열간 단조재를 대상으로 인장 중 파괴 거동에 초점을 두어 비교 분석하였다. 이를 위해 인장 시험과 파단면(fracture surface) 관찰을 통해 파괴 양상을 분석하였으며, 인장 변형 과정에서의 국부 변형 거동을 정량적으로 평가하기 위하여 디지털 영상 상관법(Digital Image Correlation, DIC)을 적용하였다. DIC 분석 결과, 주조재의 경우 인장 변형이 진행됨에 따라 특정 영역에 변형이 집중되며 불균일한 변형 분포가 형성된 반면, 단조재에서는 변형이 시편 전반에 걸쳐 비교적 균일하게 분산되는 경향을 보였다. 이러한 변형 분포 특성의 차이를 바탕으로 인장 중 국부 변형 거동과 파괴 특성의 관계를 분석하였다.

#### [P9-7]

**316L 스테인리스강 환봉의 위치별 물성 편차 저감을 위한 Two-Step 열처리 공정 최적화:** 이승현, 서호성, 김가언, 심예훈, 권인영, 문준오\*, 홍현욱(국립창원대학교), 강덕수(세아창원특수강)

**Keywords:** 스테인리스강, Two-Step 열처리, 대형 환봉

316L 스테인리스강은 우수한 고온 물성 및 내식성을 가지며, 이에 따라 유력한 핵융합로 구조용 후보소재로 검토되고 있다. 향후 핵융합로 건설을 위해서는 단조 및 압연 등을 통한 대형 소재 제작이 필요하며, 316L과 같은 오스테나이트계 스테인리스강의 경우에는 추가적인 균질화 열처리 공정 등을 거치게 된다. 그러나 대형의 소재를 고온에서 열처리 하는 경우, 제품 위치별 온도 편차로 인해 기계적 물성의 불균질성이 초래되며, 이는 소재 신뢰성 저하의 주요 원인이 된다. 이에 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 열처리 실험을 통해 Two-Step 열처리 공정을 최적화하고, 이를 대형 환봉 양산 열처리에 적용하여 그 효과를 확인하였다. 이를 위해 총 25개의 Two-Step 열처리를 실시하였으며, 열처리 후 결정립 크기 및 경도 편차를 비교 분석하여 최적의 Two-Step 열처리 조건을 도출하였다. 또한 도출된 조건을 실제 대형 환봉 열처리 공정에 적용하고, 이에 따른 기계적 물성 평가를 위해

인장 시험 및 충격시험을 수행하였다. 각 시험편은 대형 환봉 소재의 중심부, D/4 및 표면부에서 채취하였으며, 위치별 미세조직 및 기계적 물성 편차 분석을 통해 최종 도출된 열처리 조건의 실제 적용성을 검토하였다.

#### [P9-8]

**Batch annealing 공정이 3Mn Q&P강의 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향:** 김규현, 임용수, 김진경\*(한양대학교)

**Keywords:** 중망간강, Batch annealing, Q&P, TRIP

중망간강(Medium Mn steel)은 3세대 고강도강으로서 우수한 강도-연성 조합을 확보할 수 있어 주목받고 있다. 본 연구에서는 Batch annealing 유무가 Q&P 공정을 적용한 중망간강에서 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 열간 압연 후 Batch annealing의 유무에 따라 두 가지 공정 경로로 시편을 제조하였다. Q&P 공정은 900°C와 910°C에서 오스테나이트화 열처리 후, 여러 온도에서 퀴칭 및 파티셔닝을 수행하였다. 미세조직 분석 결과, 두 시편 모두 잔류 오스테나이트, 마르텐사이트, 베이나이트 및 페라이트로 구성된 복합조직을 나타냈으며, Batch annealing을 적용한 시편에서는 잔류 오스테나이트의 분율이 증가하는 경향이 관찰되었다. 이러한 변화는 잔류 오스테나이트의 안정도 변화에 따른 TRIP 효과와 결과적으로 기계적 물성에 직접적인 영향을 일으켰다. 이를 통해 Batch annealing-Q&P 열처리 공정을 활용한 강도-연성 균형의 최적화 방안을 제시하였다.

#### [P9-9]

**3Mn TRIP steel의 냉간 압연 이전 batch annealing이 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향:** 임용수, 김진경\*(한양대학교)

**Keywords:** 중망간강, TRIP effect, 이상영역 열처리, Batch annealing

3~12 wt.% 망간이 첨가된 중망간강은 우수한 기계적 물성으로 차세대 고강도 자동차용 강판 소재로 활발히 연구되고 있다. 중망간강의 기계적 성질은 C와 Mn 등의 원소에 의한 오스테나이트 안정도에 크게 의존하며, 우수한 기계적 특성을 확보하기 위해 오스테나이트 안정도를 조절하는 공정이 필수적이다. 본 연구에서는 Fe-3Mn-0.2C-1Al (wt.%) 조성의 중망간강을 열간압연한 후, 조직적으로 균일하도록 900 °C에서 10분간 열처리를 진행하였다. 680 °C에서 10시간 동안 batch annealing을 수행하여 오스테나이트에 Mn을 농축시킨 뒤 냉간압연을 진행한 시편과 batch annealing 없이 냉간압연을 진행한 시편을 비교 분석하였다. 이후 680~740 °C 범위에서 5분간의 이상영역 열처리를 수행하였다. 720 °C에서 5분간 열처리한 시편을 XRD로 측정한 결과 각각 15.1%, 17.3%로 가장 높은 오스테나이트 분율을 나타내었다. 열처리 후 미세조직은 페라이트와 오스테나이트 결정립으로 구성되었으며, batch annealing 공정을 통해 인장강도는 거의 유지된 반면 연신율은 크게 향상되었다. 이후 미세조직과 기계적 특성 간의 상관관계를 체계적으로 고찰하였다.

#### [P9-10]

**초고경도 마르텐사이트 강의 냉각 조건에 따른 미세조직 및 충격인성 변화:** 박건우(울산과학기술원 신소재공학과), 김용우, 장우길, 고성웅(포스코 기술연구원), 박성수\*(울산과학기술원 신소재공학과), 전종배\*(동아대학교 신소재공학과)

**Keywords:** Ultra-high hardness martensitic steel, Heat treatment, Charpy impact test, Low-temperature impact toughness, high angle grain boundary

초고경도 마르텐사이트강은 높은 경도와 함께 극저온 및 저온 환경에서 우수한 인성을 동시에 확보하기 위한 고부가가치 내마모 강재로 개발되고 있다. 저온 조건에서는 취성 파괴가 더욱 우세해지기 때문에, 마르텐사이트의 구조적 특성을 제어하여 균열의 개시와 전파를 효과적으로 억제하는 것이 중요하다. 이를 위해 마르텐사이트 packet 및 block 크기를 감소시켜 균열의 연속적인 전파를 제한하고, 결정학적 방위 차이가 큰 고각입계 (high-angle boundary) 분율을 증가시켜 균열 전파 경로의 굴절을 유도함으로써 균열 저항성을 향상시킬 수 있다. 이러한 구조적 특성은 합금의 열처리 조건과 화학 조성에 따라 달라지는데, 특히 열처리 공정의 냉각 속도는 마르텐사이트 변태 거동과 결정립 크기에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 그러나 각 조건이 block 및 packet 크기, 고각입계 분율, misorientation 분포에 미치는 영향을 정량적으로 비교한 연구는 제한적이다. 따라서 열처리 조건과 합금 설계가 미세조직학적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고, 이러한 미세조직 변화와 저온 인성 거동 간의 상관관계를 규명할 필요가 있다. 본 연구에서는 세 가지 열처리 공정을 적용한 초고경도 마르텐사이트강을 제조하고, 냉각조건과 Ni 함량 변화에 따른 미세조직 발현 거동 및 저온 충격인성의 상관관계를 규명하고자 한다. EBSD 분석을 통해 마르텐사이트 packet 및 block 크기, 입계 특성, misorientation 분포 등을 정량화하고, 냉각조건과 합금 조성에 따른 packet 및 block 크기 변화와 결정립계 특성의 차이를 비교하였다. 또한 계장화 샤르피 충격시험을 수행하여 균열 개시 에너지와 균열 전진 에너지를 분석하고, 시험 온도에 따른 충격에너지 변화 및 연성-취성 전이 거동을 평가하였다. 이를 통해 냉각조건-합금 설계-미세조직-저온 인성 간의 상관관계를 정량적으로 규명하고, 저온 인성을 지배하는 주요 인자를 도출하고자 한다.

#### [P9-11]

**Influence of Titanium Content on Recrystallization and Precipitation Behavior in Ti-Nb Alloyed Cold-Rolled Ultra-High Strength Low Alloy Steels:** Sang Hun Shin, Jong Myeong Kim, Changgeun Lee(Hyundai Steel R&D Center), Asmaa Albeltagy, Alexander Gramlich(Steel Institute, RWTH Aachen University), Kyu Tae Kim(Hyundai Steel R&D Center)

**Keywords:** Recrystallization kinetics, Precipitation behavior, Ti-Nb alloying, Strengthening mechanism

This study investigates the effect of titanium content (1000, 1500, and 2000 ppm) within a Ti-Nb alloying system on the

recrystallization and precipitation behaviors of ultra-high strength low alloy (UHSLA) steels. The influence of heat treatment variables—specifically soaking temperature and holding time—on microstructural evolution is systemically evaluated. Recrystallization kinetics were characterized using Vickers hardness measurements and Electron Backscatter Diffraction (EBSD), including grain orientation analysis via Orientation Distribution Functions (ODFs). Transmission Electron Microscopy (TEM) and in-situ high energy X-ray diffraction were employed to quantify precipitate size, morphology, and volume fraction, providing insights into the evolution of nanoscale carbides. Additionally, the contributions of various strengthening mechanisms—dislocation density evolution, precipitation strengthening, and grain refinement—were analyzed in relation to titanium concentration and thermal processing conditions. The results demonstrate a strong interdependence between alloy composition and annealing parameters, governing both the recrystallization rate and precipitate state. These findings offer guidance for optimizing alloy design and heat treatment strategies to achieve enhanced mechanical performance in UHSLA steels.

**P10 : 이차전지 원료소재**

Room 3층 로비, 4월 28일

**[P10-1]]**

**건식 재활용 공정 슬래그의 보조 시멘트계 결합재(Supplementary Cementitious Materials)로서의 2차 자원화 가능성 평가:** 남세현, 박성환(한양대학교), Anton Andersson(Lulea University of Technology), 박주현\*(한양대학교)

**Keywords:** 건식 제련, 슬래그 자원화, SCM, Rietveld refinement

팔라듐, 은, 그리고 구리와 같은 귀금속의 건식 재활용 공정에서는 귀금속의 회수 효율을 향상시키기 위해 다양한 플럭스가 사용된다. 그러나 이 과정에서 다량의 부산물 슬래그가 발생하므로, 지속 가능한 공정을 달성하기 위해서는 슬래그의 재활용이 필수적이다. 특히 슬래그를 보조 시멘트 재료(SCM)로 활용할 경우, 시멘트 생산 공정에서 소성 및 클링커 제조 단계를 부분적으로 대체할 수 있어 이산화탄소 배출 저감에 기여할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 건식 재활용 공정에서 발생한  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}$ 계 슬래그의 보조 시멘트 재료로서의 활용 가능성을 평가하고자 하였다.  $\text{CaO}$  첨가량(0~33 wt%)에 상 변화 및 슬래그의 물리화학적 특성에 미치는 영향을 조사하였으며, 냉각 과정에서 석출되는 상을 분석하였다. FactSage<sup>TM</sup> 8.2를 이용한 열역학 계산과 ICP-AES, SEM-EDS, XRD 분석을 진행하고, XRD 패턴에 대한 리트벨트 정량 분석(Rietveld refinement)을 통해 각 상의 분율을 정량화하였다. 분석 결과,  $\text{CaO}$  함량이 증가함에 따라 1차 석출상은 grossite( $\text{CaAl}_4\text{O}_7$ )에서 monoxide( $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}$ )로 변화하였다.  $\text{CaO}$  함량이 낮을 경우 ( $\text{CaO}$  0 wt%) spinel( $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Al}_2\text{O}_3$ )과 gehlenite( $\text{Ca}_2\text{Al}[\text{AlSiO}_7]$ ) 상이 주로 관찰되었으며  $\text{CaO}$  함량이 증가함에 따라 ( $\text{CaO}$  23~33 wt%)  $\text{C}_2\text{A}(\text{Ca}_2\text{AlO}_5)$ ,  $\text{C}_3\text{A}(\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6)$ , brownmillerite( $\text{Ca}_2(\text{Fe}_x, \text{Al}_{1-x})_2\text{O}_5$ ) 상의 형성이 촉진되었다.  $\text{CaO}$  첨가에 따라 gehlenite, grossite, spinel과 같은  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -rich 상의 분율은 감소하고,  $\text{C}_3\text{A}$  및 mayenite( $\text{C}_{12}\text{A}_7$ )와 같은  $\text{CaO}$ -rich 상의 분율은 증가하는 경향을 보였으며 초기 형성된 spinel 상은  $\text{Al}_2\text{O}_3$  함량 감소에 따라 일부가 monoxide 또는 periclase 상으로 전환되었다. 이를 통해 냉각 과정에서 결정상이 형성되더라도 조성 제어를 통해  $\text{CaO}$ -rich aluminate 상의 형성을 촉진할 경우 슬래그의 보조 시멘트 재료로서의 적용 가능성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

**[P10-2]**

**니켈 선철(NPI) 분말의 산화 거동에 미치는 Si 영향:** 차은빈(한국생산기술연구원, 고려대학교), 서보성(한국생산기술연구원), 김동희(고려대학교), 박광석\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** NPI(Nickel Pig Iron, NPI), 수분사, 산화 거동, Si, 분말

리튬 이온 배터리 산업의 성장과 함께 양극(Cathode) 소재의 핵심 금속인 니켈(Ni)에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 고순도 Ni 생산을 위해 주로 사용되었던 황화광의 자원 고갈로 인해 페로니켈(ferronickel) 생산에 주로 사용되고 있던 산화광인 라테라이트광(nickeliferous laterite ore) 활용의 중요성이 증대되고 있다. 특히, 리모나이트광(limonite)의 Ni 품위를 증가시키기 위한 방안으로 페로니켈 중 니켈 선철(Nickel Pig Iron, NPI)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 한편, 규산염 광물을 원료로 하여 NPI를 제조하는 경우 Si가 함유될 가능성이 있다. 따라서 NPI로부터 고순도 Ni를 회수하기 위해서는 산화 공정을 통한 상(Phase) 제어가 필요하며, 이과정에서 Si의 존재는 NPI 산화 거동에 영향을 미치는 주요 인자로 작용할 가능성이 있다. 본 연구에서는 수분사를 통해 Fe-13Ni-2.5C-(0, 1.5)Si 조성의 NPI 분말(D50 50 $\mu\text{m}$ )을 제조한 후, 침출 효율을 증대시키기 위해  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  및  $\text{FeNi}_3$ 와 같은 상을 형성하기 위한 산화 공정을 수행하였다. Si의 경우 산화 거동력이 높기 때문에 산화 초기에 분말 표면에서 Fe 산화물 성장 속도가 상대적으로 지연되는 경향이 관찰되었다. 또한 분말 내부에서는 Si 산화물이 국부적으로 생성되었으며, 산화가 진행됨에 따라 내부에 형성된 Si 산화물이 분말 전반으로 분포하는 양상을 나타내었다. 이러한 산화 과정에서 분말 표면에 Fe 산화물의 성장 거동과 함께, 내부 Fe-Ni 금속상에서 Fe 및 Ni의 조성 변화가 어떠한 방식으로 동반되는지에 대하여 산화 거동을 중심으로 검토하였다. 따라서 Si 첨가에 따른 NPI 분말의 산화 거동과 산화물 성장 특성을 분석함으로써, 향후 Ni 회수 공정을 위한 정보를 제공하고자 한다.

**[P10-3]**

**EO-L LIB 황산 침출액 중 유가금속의 전해 회수 및 증착 거동 연구:** 하륜, 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 (EO-L) 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 사용할 필요가 있고 공정 단계도 복잡하다. 이에 본 연구는 황산 침출액 내 유가금속을 전해환원 방식으로 회수하고자 하였으며, 특히 전해환원 과정에서 형성되는 금속 증착물이 조건에 따라 변화할 수 있다는 점에 주목하였다. 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 연구는 전류 밀도, pH 등 공정 조건에 따라 증착물의 구조적 특성과 물리적 형태를 제어하고, 이를 통해 합금 회수와 재용해 효율 향상을 동시에 달성할 수 있는 가능성을 평가하였다.



**[P10-4]**

**스포듀민으로부터 친환경 리튬 침출에 관한 연구:** 이종락, 신선명, 신동주\*(한국지질자원연구원 자원활용연구본부, 과학기술연합대학원대학교 자원공학과)

**Keywords:** 리튬, 스포듀민, 습식제련, 친환경 침출, 망초

리튬은 이차전지의 핵심 원료로서 안정적인 공급망 확보와 친환경 제련 공정 개발의 중요성이 증가하고 있다. 광석 기반 리튬 생산은 일반적으로 황산 배소-침출 공정을 적용하나, 다량의 황산나트륨(망초) 부산물 발생 및 높은 에너지 소비 등의 환경적 한계를 가진다. 본 연구에서는 스포듀민(spodumene)으로부터 망초 발생이 없는 친환경 수침출 기반 리튬 회수 공정을 제안하였다. 스포듀민 시료를 800–1200°C 범위에서 소성하여 상전이를 유도한 후, 소성 시료와 CaO를 질량비 1:4로 혼합하였다. 이후 고액비 10%, 85°C 조건에서 수침출을 수행하였다. 침출 잔사는 950°C에서 재소성 후 동일 조건에서 재수침출을 반복하였다. 재소성-재수침출 공정을 총 4회 반복한 결과, 1100°C에서 소성한 스포듀민 시료에 대해 최대 72.7%의 누적 리튬 침출률을 달성하였다. 본 공정은 황산을 사용하지 않으며, 황산나트륨 부산물이 발생하지 않는다는 점에서 환경친화적 대안 공정으로서의 가능성을 확인하였다. 향후 연구에서는 소성 조건 및 CaO 반응 메커니즘 최적화를 통해 침출 효율을 향상시키고, 반복 공정 횟수 저감 및 침출액 내 리튬 농도 증대를 목표로 공정을 고도화할 예정이다.

**[P10-5]**

**공간분해능 중성자 회절법을 이용한 원통형 2차전지 LiC<sub>6</sub>/LiC<sub>12</sub> 공간분포 정량화 기술 개발:** 채호병\*, 우완측(한국원자력연구원)

**Keywords:** 하나로, 공간분해능 중성자 회절법, 2차전지, Li-staging, SOC

리튬이온 2차전지의 성능 저하와 안전이슈는 전극 내 리튬 삽입/탈리의 공간적 비균질성과 밀접하게 연관되며, 이를 비파괴적으로 정량화할 수 있는 분석 기술이 요구된다. 본 연구에서는 한국원자력연구원의 연구용 원자로인 하나로에서 운용되는 공간분해능 중성자 회절 장치 RSI(중성자 잔류응력장치)를 활용하여, 상용 원통형 18650 전지 음극의 Li-staging 상(LiC<sub>6</sub>, LiC<sub>12</sub>, C) 분포를 공간적으로 분해하여 정량화하는 방법을 확립하였다. 중성자 회절에서 관찰되는 흑연 C(0008), LiC<sub>12</sub>(0002), LiC<sub>6</sub>(0001) 반사의 적분강도 변화는 충·방전에 따른 상 전이 및 국소 리튬화도 변화를 직접 반영한다. RSI( $\lambda=1.46$  Å)에서 해당 반사들이 유사한 2 $\theta$  조건(약 23.5°)에서 관찰되는 점을 활용하여, 원통 좌표계( $\gamma$ ,  $\phi$ ) 기반 격자에서 위치별 회절 패턴을 획득하고 동일한 프로파일 피팅으로 적분강도를 산출하였다. 또한 구조인자/단위격자체적/몰부피(M/p) 등 상수 보정을 통해 적분강도를 상 몰 수에 비례하는 양으로 변환한 뒤, LiC<sub>6</sub>-LiC<sub>12</sub> 이원계 근사에 따라 몰분율과 국소 SOC 지표  $x(\text{LiC}_6 \text{의 } x)$ 를 계산하여 분포 맵으로 재구성하였다. 완전 충전 상태 시료에서 재구성된 결과는 반경 방향에 따라 LiC<sub>6</sub> 몰분율이 증가하는 영역과 LiC<sub>12</sub>가 잔존하는 외곽 영역이 공존하는 등, 전지 단면 내 리튬화도의 유의미한 공간 구배를 확인하였다. 또한 단순 normalized intensity만으로는 권취 구조에 따른 유효 경로 길이 등 영향이 혼재될 수 있어, 상분율 및 x로의 환산이 국소 충전 상태 정의에 더 직접적임을 확인하였다. 본 기술은 향후 극한환경(온도/과충전/고출력) 조건에서의 비균질 반응 진단 및 열화 메커니즘 규명으로 확장 가능한 중성자 회절 기반 공간 정량 분석 플랫폼을 제공한다.

**[P10-6]**

**건식 및 습식 혼합공정을 통한 리튬의 선택적 회수:** 박연우\*, 정은진(포항산업과학연구원), 조용민, 한상우, 김완이(포스코홀딩스)

**Keywords:** 이차전지, 리튬철인산염 배터리, 리사이클링

리튬 이온 배터리는 컴퓨터, 전자기동차 및 대규모 에너지 저장 시스템 등 다양한 분야에 사용 중이다. 특히 전기 자동차 산업의 발전에 따라 NCM 배터리, LFP 배터리의 사용량의 사용량도 증가 추세를 보이고 있다. 그 중 LFP 배터리는 올리빈 구조를 갖추고 있어 우수한 안전성, 저렴한 비용 및 긴 수명 주기 등 고유한 장점들을 바탕으로 중국 및 다수의 국가에서 주목받고 있다. LFP 배터리의 확대 적용에 따라 향후 10년 내 폐기되는 LFP 배터리의 총량 또한 크게 증가할 것으로 예상되며, 이에 폐기되는 LFP 배터리로부터 자원회수를 위한 노력이 필요한 상황이다. LFP 배터리는 NCM 배터리에 비해 유가금속의 비중이 낮지만, 경제성을 확보하면서 효율적으로 회수하기 위한 다수의 연구가 수행 중이다. 현재 사용 후 LFP 배터리를 재활용하기 위한 주요 방법들은 건식 야금과 습식 야금으로 정리할 수 있으며, 습식의 경우 무기산 용액을 사용하여 유가금속 침출 이후 침전 등의 방법으로 용액을 정제하여 리튬을 회수할 수 있다. 이러한 습식 공정은 높은 금속 회수율과 순도를 확보할 수 있는 장점이 있고, 건식 방법으로는 공정 구성했을 때보다 투자 비용 및 에너지 소비가 적다는 이점이 있다. 그러나 황산, 산화제, 침전제 등 시약 소모량에 따른 비용과 폐수 발생량 증가 등의 문제점 역시 존재한다. 따라서 건식과 습식 공정의 장점들을 기반으로 공정을 구성하는 연구를 통해 LFP 배터리 리사이클링의 효율성을 향상시키고자 한다. 본 연구는 LFP 블랙파우더에서 리튬을 선택적으로 회수하기 위한 방법으로써 황산과 카본을 활용한 배소 방법을 검토하고, 배소 후 수침출 방법을 통해 용액 내 리튬 침출 효율을 평가하고자 한다.

**[P10-7]**

**Supercritical CO<sub>2</sub>-Assisted PVDF Binder Extraction and Cathode Delamination for Sustainable Lithium-Ion Battery Recycling:** won-wook SEO\*(RIST), Joon-Hyuk Yim(Sogang Univ), Jae won Lee(Dankook Univ), Jong sung Lim(Sogang Univ)

**Keywords:** Lithium-ion battery recycling, Supercritical CO<sub>2</sub>, PVDF, Binder extraction, Cathode delamination

his study proposes a supercritical carbon dioxide (scCO<sub>2</sub>)-based process for environmentally benign removal of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) binder and efficient delamination of cathode active materials in lithium-ion battery (LIB) recycling. Conventional pretreatment methods relying on pyrolysis or toxic organic solvents suffer from high energy consumption, hazardous emissions, and solvent recovery burdens. In contrast, the present approach employs scCO<sub>2</sub> with a small amount of polar co-solvent (e.g., DMSO or

DMF) to selectively dissolve and recover PVDF under moderate operating conditions. Phase behavior of the PVDF-CO<sub>2</sub>-co-solvent system was investigated to determine optimal extraction conditions. At 353 K and 10 MPa, the use of DMF enabled up to 98.8% binder removal within 20 min. Structural analyses (FT-IR, DSC, and SEM) confirmed that the recovered PVDF retained its original chemical integrity, and electrochemical testing demonstrated its reusability in reassembled cells. Building on these results, a continuous scCO<sub>2</sub>-co-solvent process was applied to NCM622 and NCA cathodes. Under optimized conditions (353 K, 10 MPa), more than 95% delamination was achieved within 15–30 min, with complete detachment approaching 100%. Continuous operation significantly outperformed batch mode by preventing solvent saturation and maintaining a strong concentration gradient for binder dissolution. The enhanced performance is attributed to the plasticization and swelling of PVDF under supercritical conditions, which facilitate co-solvent penetration and accelerate mass transfer. The proposed process operates at relatively low temperatures and moderate pressures, minimizes the use of toxic organic solvents, and suppresses hazardous emissions. It offers a scalable and cathode-agnostic pretreatment strategy for sustainable LIB recycling.

#### [P10-8]

**리튬이온 배터리셀 케이스용 스테인리스 적용 연구: 정양진\*(포스코 기술연구원)**

**Keywords:** 2차전지, 리튬이온, 배터리, 케이스, 스테인리스

리튬이온 배터리 셀의 외장 구조부재인 셀케이스용으로 스테인리스강의 적용을 위한 연구 결과와 개발 동향을 요약하였다. 기존 배터리 셀 케이스 소재인 1000, 3000, 8000계 알루미늄과 니켈 전기도금 후 합금화 열처리를 거친 항복강도 250~350 MPa급의 탄소강 냉연강판 도금재 대비 스테인리스강은 상온강도, 고온강도가 우수하여 배터리 발화 시 안전성 향상에 도움이 될 수 있으며 국내 배터리사 열폭주 실험 결과 우수성을 인정받았다. 스테인리스강은 원통형 1차전지, 각형 2차전지 셀에 양산 적용되었으나, 기존 소재 대비 고강도로 인한 프레스 다단 성형의 어려움과 연성 부족으로 인한 비딩 공정 시 크랙 발생 문제 등과, 준 안정 오스테나이트 조직의 변형유기 마르텐사이트 변태의 소재적 난점을 개선해야 할 여지가 있다. 과우치형 배터리에는 알루미늄 극박재가 40 μm 수준으로 적용되고 있는데, 스테인리스 극박 압연재를 적용하기에는 비용적인 부분이 가장 큰 걸림돌이며 성형성도 열위하여 양산 적용에 어려움이 있으나 최근 전고체 전지의 정수압 압착 공정의 필요에 의해 기존 알루미늄 대비 고강도인 스테인리스 소재의 적용이 검토되고 있다. 모바일용 각형 셀의 케이스에는 '27년부터 시행되는 규제에 의해 배터리 탈착의 용이함을 위해 스테인리스가 일부 양산되었고 추가 검토되고 있다. 성형 이후에도 비자성 유지 특성이 우수한 모바일용으로 신규 개발된 316HN1 소재 특성을 소개한다.

#### [P10-9]

**조건별 농도비에 따른 회수 수산화니켈 전구체로부터의 니켈화합물 분말 제조 거동 연구: 주소영, 임병용, 김대근\*(고등기술연구원)**

**Keywords:** LIBs waste, Ni, Nickel hydroxide, Nickel acetate, precipitation

연료전지의 촉매, 수소화 반응에서의 촉매 또는 여러 화학 반응에서의 촉매와 같이 다양한 분야에 응용 가능한 금속인 니켈(Ni, Nickel)은 전극 재료로서 적층 세라믹 콘덴서 내부 전극 재료 또는 충전물 향상을 위한 물질로 여러 분야에서 사용되고 있다. 또한, 니켈은 연료전지 및 유기 합성의 촉매로 사용되고 있으며 최근에는 백금과 같은 귀금속 물질의 대체 재료로 니켈 합성 물질에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 니켈에서 가장 대표적으로 사용되는 니켈 촉매는 탄소-탄소 결합 형성 반응에서 다양한 합성 변형에서의 중심 역할을 하며, 특히 다공성 촉매로 많이 이용되어지고 있다. 본 연구에서는 지속적인 리튬이차전지 분야의 성장세에 따라 끈임없이 발생하는 폐자원의 재활용을 통해 니켈 합성 물질인 니켈 아세테이트 분말 합성 거동을 확인하고자 한다. 안정적인 원료 수급을 위해 폐자원으로부터의 회수되는 유기금속 자원을 이용한 고순도 금속 분말 확보 및 소재화가 필수적임으로 리튬이차전지 폐자원으로부터 회수된 황산니켈 폐용액을 사용하여 중간산물인 수산화니켈 분말을 획득한 후, 최종적으로 니켈 아세테이트 분말을 제조하는 연구를 진행하였다. 니켈 아세테이트 분말은 아세트산 투입 농도비에 따라 연구를 진행하였으며, 중간산물인 수산화니켈의 비율은 고정하여 진행하였다. 최종적으로 불순물이 포함된 니켈 아세테이트 분말을 수득함에 따라 추후 불순물 제거 연구 진행을 통해 높은 결정성을 갖는 분말 합성 연구를 진행할 예정이다.

#### [P10-10]

**탄소 중립을 위한 사프로라이트 제련 공정의 수소환원 연구: 김민희\*, 이병필, 서민석, 우장주(포항산업과학연구원)**

**Keywords:** 수소환원, 탄소중립, 니켈 산화광, 전기로

현재 니켈 산화광 중 사프로라이트는 주로 탄소 기반 환원 공정을 통해 이루어지고 있으며, 대표적인 상용 공정으로는 Rotary kiln-Electric Furnace(RK-EF) 공정이 적용되고 있다. 그러나 해당 공정은 다량의 이산화탄소를 배출하는 구조적 한계를 지니고 있어, 강화되고 있는 탄소 중립 정책에 대한 장기적인 공정 지속성 확보에 한계를 가진다. 이에 따라 니켈 산화광 공정에 대해서도 탄소 사용을 최소화하거나 이를 대체할 수 있는 저탄소 환원 공정에 대한 기술적 요구가 점차 증대되고 있다. 니켈 산화광에 수소 환원 공정을 적용하기 위해서는 용융 이전 단계에서 높은 환원도를 확보함으로써, 용융 이후 또는 추가 환원 단계에서의 환원 부담을 최소화하는 공정 전략이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 전기로(Electric Arc Furnace) 기반 탄소 환원 공정과 Rotary kiln 기반 수소 환원 공정을 수행하여, 니켈 산화광의 환원 거동을 비교 분석을 진행하였고, 환원 후 회수된 페로니켈의 생성 거동 및 화학적 특성을 분석하였다.

**[P10-11]**

Flotation-Inspired Black Powder Purification and Selective Recovery of Cathode Active Material: Cheol Kang, Min-ho Kim, Hyun-seok Lee\*(Korea Battery Industry Association)

*Keywords:* Battery recycling, LIB, Cathode materials, Binder remove, Green solvent, Direct recycling

Recycling of spent lithium-ion batteries generally involves shredding, recovering black mass/black powder, and then retrieving valuable metals via pyrometallurgical or hydrometallurgical processes. However, conventional routes rely on high-temperature equipment and are associated with CO<sub>2</sub> emissions and large amounts of industrial waste, posing limitations from the perspectives of low-carbon energy transition and waste reduction. As hydrometallurgical recycling has recently become a mainstream approach for end-of-life (EOL) batteries, separating and removing interfering components—such as conductive additives (carbon black), binders, and electrode foils—is recognized as an essential step for efficient metal recovery and stable process operation. In this study, we evaluated the feasibility of improving black powder purity to enable both hydrometallurgical extraction and direct recycling applications. Black powder samples were obtained from real spent battery materials with state of health (SoH) values of 90% and 66% using triethyl phosphate (TEP), a solvent commonly regarded as a green solvent. To remove binder-related impurities, centrifugation and TEP washing were performed, and binder removal was verified by thermogravimetric analysis (TGA). In addition, a flotation-inspired approach—commonly used in mineral processing to separate valuable fractions from gangue—was introduced. Using differences in density and hydrophilicity between distilled water and the constituent materials, the flotation behavior of carbon black was confirmed and leveraged to attempt selective removal of conductive impurities. As a result, high-purity cathode active material could be recovered from the purified black powder. These findings suggest that, with further optimization of process conditions, selective recovery of pure cathode material is achievable, and they confirm the potential applicability of direct recycling, which can be considered the final stage of spent-battery recycling.

[P11-1]

ZrO<sub>2</sub> – Based Antiferroelectric Tunnel Junction Neuron for Energy-efficient Physical Reservoir Computing: Taegyu Kwon, Moonseek Jeong, Joonyong Kim, Hyojun Choi, Hyeong Seok Choi, Geun Hyeong Park, Min Hyuk Park\*(Seoul National Univ.)  
Keywords: Antiferroelectric, Reservoir Computing, Self-relaxation

The growing demand for real-time, energy-efficient data processing in intelligent systems has exposed the inherent limits of traditional computing architectures, where memory and computation are physically separated. This bottleneck, often called the von Neumann bottleneck, results in high latency and excessive power consumption, particularly in edge devices. To address this challenge, unconventional computing paradigms have gained increasing attention for their ability to process complex, time-dependent data in an adaptive and parallel manner. Reservoir computing is particularly well suited for temporal signal analysis, as it transforms input signals into rich, high-dimensional state dynamics. However, most implementations still rely on software or nonvolatile hardware, which are constrained by energy inefficiency and slow response. This study presents a physical reservoir computing approach based on volatile antiferroelectric tunnel junctions utilizing hafnium–zirconium oxide thin films. By compositional control toward zirconium-rich and pure zirconium oxide phases, we induce a stable tetragonal structure that enhances volatility through spontaneous depolarization-driven charge relaxation. This intrinsic fading-memory behavior is essential for temporal information processing and enables efficient short-term memory functions. Devices fabricated with pure zirconium oxide exhibit pronounced antiferroelectric switching, fast charge back-relaxation, and strong paired-pulse facilitation, indicating effective temporal integration at the device level. To optimize signal modulation and electrical performance, amorphous indium–gallium–zinc oxide channels were integrated with carefully tuned composition ratios, achieving high on–off current contrast while minimizing leakage. This balance between conductivity and control stability allows the system to scale efficiently for large array implementations. System-level analysis demonstrates that key material and device parameters—such as paired-pulse facilitation, on–off ratio, and bit capacity—directly correlate with prediction accuracy in temporal data tasks. Devices with higher switching contrast and four-bit discretization show significantly improved nonlinear prediction results in benchmark time-series tests. The proposed volatile antiferroelectric reservoir consumes less energy per spike and responds faster than conventional ferroelectric-based systems, demonstrating strong potential for ultra-low-power computation. The findings highlight a clear linkage between atomic-level phase stability, device dynamics, and system-level computational capability. This integrated framework provides a new route for designing material systems that combine volatility, nonlinearity, and transient memory—key elements for real-time neuromorphic signal processing. The demonstrated platform opens opportunities for intelligent edge hardware capable of adaptive control, pattern recognition, and autonomous sensory processing across a range of emerging technologies.

[P11-2]

Field-Induced Crystallization of Amorphous Hf<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.5</sub>O<sub>2</sub> Thin Films Incorporating a MoO<sub>3</sub> Interlayer: Moonseek Jeong, Hyun Woo Jeong, Taegyu Kwon, Jaewook Lee, Min Hyuk Park\*(Seoul National Univ.)  
Keywords: 강유전체, 전기장, 결정화, MoO<sub>3</sub>, BEOL 공정

The compatibility of ferroelectric Hf<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.5</sub>O<sub>2</sub> (HZO) ultra-thin films (<10 nm) with CMOS technology has made them a subject of intense research. Nevertheless, integrating these films into the Back-End-of-Line (BEOL) process is challenging because obtaining ferroelectricity typically requires crystallization temperatures above 500°C, exceeding the BEOL limit of 400°C. In this work, we propose a solution to this limitation by inserting a molybdenum trioxide (MoO<sub>3</sub>) interlayer under the amorphous HZO and applying electric field cycling to drive crystallization in the absence of thermal annealing. We hypothesize that the electric field induces oxygen migration and changes in the oxidation state of MoO<sub>3</sub>, which in turn generates oxygen vacancies in the HZO layer, thereby promoting phase transition and crystallization. To validate this, TiN/MoO<sub>3</sub>/HZO/TiN capacitors were prepared. Prior to electrical cycling, structural characterization via grazing-incidence X-ray diffraction (GIXRD) and wide-angle X-ray scattering (GIWAXS) indicated that the MoO<sub>3</sub> was in the crystalline alpha-phase, whereas the HZO remained amorphous without any ferroelectric orthorhombic phase (o-HZO). Consequently, initial polarization-electric field (P-E) and current density-electric field (J-E) curves showed no evidence of ferroelectricity. However, in-situ field-cycling GIWAXS experiments revealed the formation of o-HZO during electrical cycling. When subjected to electric fields of 3.5, 4.0, and 4.5 MV/cm, the devices began to exhibit clear ferroelectric hysteresis and switching current peaks after surpassing 10<sup>5</sup> cycles. This was accompanied by the development of a prominent o-HZO diffraction peak. At the optimal field of 4.0 MV/cm with 2 x 10<sup>5</sup> cycles, we observed a remanent polarization (2P<sub>r</sub>) of 30 uC/cm<sup>2</sup> and a coercive field (2E<sub>c</sub>) of ~3.0 MV/cm. Notably, the GIWAXS data showed that the (111) o-HZO and (002) o-HZO peak was strongest at an azimuthal angle of 54° and 90°, respectively, suggesting that the crystal orientation is aligned out-of-plane with the electric field. Consistent with these findings, transmission electron microscopy (TEM) images of samples cycled at 4.0 MV/

cm confirmed that crystallization proceeds progressively with the number of field cycles. Our findings prove that incorporating a  $\text{MoO}_3$  interlayer allows for the electric-field-induced crystallization of HZO films without thermal annealing, resulting in ferroelectricity with a preferred orientation. This strategy opens a promising route for implementing HZO processing that is fully compatible with BEOL integration requirements.

#### [P11-3]

**TGV 적용을 위한 대기 중 산화 없는 Cu-Cu 다이렉트 본딩의 압력에 따른 미세구조 및 기계적 특성 평가:** 안가람, 유하영, 김동진\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** Cu-to-Cu direct bonding, Thermo-compression bonding, TGV (Through-Glass Via), Interface microstructure, Bonding pressure

이 연구는 TGV (Through-Glass Via) 응용 micro-bump 대체 기술로 주목받고 있는 구리 (Cu) 다이렉트 본딩을 대기 분위기에 산화 없이 구현하고, 이 과정에서 인가될 수 있는 압력 수준이 시스템의 스트레스, 접합 계면의 미세구조 및 기계적 특성에 미치는 영향을 규명하고자 수행되었다. Cu-Cu 다이렉트 본딩은 무도금된 가공경화형 구리 (C11000) 기판 ( $10 \times 10 \times 2$  mm) 및 다이 ( $3 \times 3 \times 1$  mm) 를 특수 제작된 지그를 활용하여 250 °C 에서 30 분간 7, 15, 30 MPa 압력을 가해 별도의 가스 분위기나 진공 환경 없이 대기중에서 이루어졌다. 접합 계면의 미세구조는 주사전자현미경 (SEM) 분석과 전자후방산란회절 (EBSD) 분석을 통해 정량적으로 미세구조 전개 양상이 분석되었으며, 압력 조건에 따른 접합 강도 및 경도, 탄성계수 등 기계적 특성 변화는 전단강도 시험과 나노인덴터를 활용하여 각각 비교, 분석되었다. 그 결과, 7 MPa 압력 조건에서는 접합이 충분히 형성되지 않아 계면 분석이 제한적이었으나, 15 MPa 이상에서는 산화를 없는 연속적인 접합 계면이 형성되었으며, 평균 26 MPa 수준의 전단강도가 확보되었다. 또한, 초기 상태 구리의 평균 결정립 크기 ( $21.4 \mu\text{m}$ ) 대비 계면에서는  $1.2 \sim 1.4 \mu\text{m}$  수준의 결정립 미세화가 관찰되었다. 경도는 초기 및 접합 후 큰 차이를 보이지 않았으나, 탄성계수는 초기 상태 (114 GPa) 대비 접합 후 123~128 GPa 로 증가되는 경향이 관찰되었다. 이 연구는 TGV 어플리케이션에 적절한 저온/저압력 대기 중 산화 없는 Cu-Cu 다이렉트 본딩 공정 구현 가능성을 제시하고, 압력에 따른 계면 특성 변화를 정량적으로 비교함으로써 micro-bump 대체 접합 공정의 설계에 필요한 가능성을 보여준다.

#### [P11-4]

**열처리 온도에 따른 Cu-SiO<sub>2</sub> Wafer-to-Wafer Hybrid Bonding 계면 미세구조 분석:** 문수현, 차호일\*(나노종합기술원), 김종훈(충남대학교), 박경진, 박윤창, 정태성, 하승연, 김희연(나노종합기술원)

**Keywords:** Hybrid-Bonding, Wafer-to-Wafer, Packaging, Cu-Cu, TEM, EBSD

최근 반도체 산업은 공정 미세화 한계에 따른 집적도 향상을 위해 인터커넥션 길이를 수 마이크로미터 이하로 줄이는 Wafer-to-Wafer(W2W) Hybrid Bonding 기반 칩단 패키징 기술에 주목하고 있다. Hybrid Bonding은 금속과 유전체를 동시에 접합하는 공정으로, 재료 간 열팽창계수 차이로 인해 열처리 온도에 따른 계면 거동이 접합 신뢰성에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 Cu-SiO<sub>2</sub> W2W Hybrid Bonding 공정에서 100°C 및 400°C 열처리 온도에 따른 Cu-Cu, Cu-SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 계면 미세구조 변화를 분석하였다. 분석을 위해 FIB를 사용하여 TEM lamella 시료를 제작했으며, TEM 및 t-EBSD 분석을 통해 계면의 미세구조 변화를 관찰하였다. TEM 및 t-EBSD 분석 결과, 400°C 열처리 시료에서 고온 확산에 의한 Cu-Cu 접합이 이루어졌음을 확인하였으며, 100°C 열처리 시료 대비 균질한 미세 조직이 형성됨을 입증하였다. 본 연구 결과는 W2W Hybrid Bonding 계면 분석에 관한 중요한 기초 자료로 활용될 수 있으며, W2W Hybrid Bonding 인터커넥션 길이 최소화에 기여할 것으로 기대한다. **사사:** 이 성과는 과학기술정보통신부 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(PG2025-039-02), **주요내용:** “국가연구지원시설 고도화사업, 반도체/디스플레이 측정평가 분석 분야, 연구시설 공동활용 원스톱 서비스 네트워크 구축 및 지원”

#### [P11-5]

**XRD Rocking curve 및 TEM 분석을 통한 Epitaxial 박막 구조 정밀 평가:** 오윤주, 권다미(나노종합기술원), 천은아(아이브이웍스), 김영현(충남대학교), 김경태, 유정호, 김태진, 서윤경, 박윤창\*(나노종합기술원)

**Keywords:** Epitaxial, XRD, TEM, Microstructural analysis

XRD Rocking curve 분석은 재료의 결정 정렬도와 전위 기반 결함 특성을 평가할 수 있는 비파괴 분석법으로, 반도체 산업에서 Epitaxial 박막의 결정 품질을 신속하게 평가하는 핵심 기술로 활용되고 있다. 본 연구에서는 나노종합기술원에서 수행 가능한 XRD Rocking curve 분석을 기반으로 SiGe, GaN, AlN 박막의 결정성 및 구조적 특성 평가 사례를 소개한다. SiGe 박막의 경우 Round Robin Test(RRT)를 통해 Rocking curve 측정의 재현성을 검증하였으며, TEM 분석을 통해 Epitaxial 박막의 구조적 특성을 교차 검증하였다. GaN 박막에서는 Rocking curve 분석을 통해 Screw 및 Edge 전위 밀도를 산출하여 박막 품질을 정량적으로 평가하였다. 더 나아가, AlN 박막에 대해서는 공정 조건에 따른 Rocking curve FWHM 변화를 분석함으로써 Sputtering 공정으로 성장된 다결정 박막에서의 응용 가능성을 검토하였다. 본 결과는 나노종합기술원이 XRD와 TEM 분석을 통해 다양한 Epitaxial 박막의 신뢰성 있는 구조 평가 및 분석 서비스를 제공할 수 있음을 제시한다. **사사:** 이 성과는 과학기술정보통신부 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(PG2025-039-02)

**[P11-6]**

**고전력 파워 모듈용 다이어태치 구리 소결 접합부의 고온 안정성:** 추성권(한국생산기술연구원), 김병찬(한국생산기술연구원, 고려대학교), 김동진\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 파워 모듈, 구리 소결 접합, EBSD, 고온 신뢰성 평가

이 연구는 구리 소결 방식을 적용한 고전력 파워 모듈의 상용화를 위해, 작동 환경에서 구리 소결 접합부 고온 신뢰성을 검증하기 위해 수행되었다. 구리 소결 접합부는 구형 구리 페이스트(paste)를 사용하여 제작되었으며, 접합 공정은 250 °C에서 10 MPa 압력으로 10분간 이루어졌다. 구리 소결 접합부의 접합부 고온 환경 두께 일관성과 장기 신뢰성 검증을 위해 250 °C의 온도에서 최대 500 시간까지 고온 신뢰성 평가가 진행되었으며, 시간의 흐름마다 실시간으로 구리 소결 접합부의 미세구조 거동이 동일 관찰 영역에서 주사전자현미경(SEM) 분석과 전자 후방산란 회절(EBSD) 분석을 통해 체계적으로 분석되었다. 500 h 이후 구리 소결 접합부의 두께는 약 48.99  $\mu\text{m}$ 로 나타났으며, 초기 소결 접합부의 두께는 약 49.22  $\mu\text{m}$ 로 유의미한 두께 변화는 관찰되지 않았다. 거기에 더해, 고온 신뢰성 평가 이후 초기상태 대비 구리 소결 접합부의 기공률(porosity) 약 8%의 변화폭이 관찰되었으며, 소결층의 미세구조 형상 변화는 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 구리 소결 접합부가 낮은 열 민감성을 가지며, 고온 작동 환경에서 안정적으로 작동할 수 있음을 시사한다. 이 연구는 고온 신뢰성 평가를 통해 구리 소결 접합부의 고온 신뢰성과 열에 대한 미세구조 민감도의 상관관계를 결정학적 관점에서 체계적인 고찰이 이루어졌으며, 이 결과는 구리 소결 접합 기술을 적용한 고전력 파워 모듈의 설계 및 공정 가이드라인을 제공할 수 있다.

**[P11-7]**

**Catalytically Engineered Silicon Nanomembranes for High-Performance Flexible NO<sub>2</sub> Sensing:** Choi yoonhyeong, jongwoon Shin, Doohyun Lee, Kijun Yu, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Au nanoparticle, SiNM, NO<sub>2</sub>, Well-type structure

Nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) is a hazardous air pollutant requiring sensitive and mechanically robust detection platforms for wearable environmental monitoring. Here, we report a flexible NO<sub>2</sub> gas sensor based on a silicon nanomembrane (SiNM), combining mechanical compliance with device miniaturization. Sensing performance was enhanced through controlled formation of Au nanoparticles on the SiNM surface. Au thin films with varying initial thicknesses were thermally annealed (200–1000 °C), enabling precise tuning of nanoparticle size and distribution. The device annealed at 1000 °C exhibited the highest response, indicating optimized catalytic activation and surface morphology. At 80 °C under 50 ppm NO<sub>2</sub>, the pristine SiNM showed a response ( $\Delta R/R_0$ ) of ~2.3, while Au nanoparticle decoration increased the response to ~10. Further incorporation of a floating well-type structure significantly enlarged the effective surface area and adsorption site density, boosting the response to ~30. The sensor maintained stable operation under bending, demonstrating mechanical reliability under applied strain. The synergistic combination of catalytic nanoparticle engineering and structural surface modification provides an effective strategy for high-performance, mechanically compliant NO<sub>2</sub> sensing. This platform also offers extensibility toward selectivity enhancement via integration of alternative catalytic metals, underscoring its potential for next-generation wearable gas sensors.

**[P11-8]**

**Leakage Current Reduction via Trap Level Modulation in ZrO<sub>2</sub>:** Gyumin Hwang, Doohyun Lee, Jisu Park(Hanyang University), Hansol Oh, Yongjoo Park(SK trichem), Changhwan Choi\*(Hanyang University)

**Keywords:** Leakage Current, Trap Level Modulation, Oxygen Vacancy defect, Poole-Frenkel Emission, High-k film,

High-k dielectric thin films are promising charge-trapping layer (CTL) materials for next-generation non-volatile memory devices. However, their relatively small bandgap and high intrinsic defect density often result in increased leakage current through trap-assisted tunneling and Fowler–Nordheim tunneling mechanisms. In ALD-ZrO<sub>2</sub>, the low crystallization temperature (~400 °C) further promotes grain boundary formation, generating leakage pathways that degrade retention performance. [1] In this study, we investigated the effect of trap level modulation in La-doped and Gd-doped ZrO<sub>2</sub> charge-trapping layers, with particular emphasis on leakage current and retention behavior. For a circular capacitor with a diameter of 50  $\mu\text{m}$  (area  $\approx 1.96 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ ), the undoped ZrO<sub>2</sub> device exhibited a current density of  $5.1 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ . In contrast, La- and Gd-doped ZrO<sub>2</sub> devices showed a reduced current density of  $5.0 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ , corresponding to an approximately 90.2% reduction in leakage current. Under high electric fields where Poole–Frenkel conduction is dominant, trap energy levels were extracted from P–F slope analysis. The extracted trap depth increased in the La- and Gd-doped ZrO<sub>2</sub> films compared to the undoped sample. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed that La and Gd incorporation suppressed crystallization. The inhibition of crystallization is considered to facilitate the formation of energetically deeper oxygen-vacancy-related trap states, thereby reducing field-assisted charge emission. Consequently, La and Gd incorporation simultaneously suppress crystallization and deepen oxygen vacancy trap levels, leading to significant leakage current reduction and improved retention characteristics. Acknowledgments This work was supported by Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korea Government (MOTIE) (RS-2024-00410066, RS-2024-00407767, HRD Program for Industrial Innovation) References [1] ZHAO, Chun, et al. Review on non-volatile memory with high-k dielectrics: Flash for generation beyond 32 nm. Materials, 2014, 7, 7: 5117-5145.

**[P11-9]**

**Ag hillock 형성에 대한 기판 사이즈 의존성과 barrier 층의 역할:** 김민수(한국생산기술연구원), 김예리(한국생산기술연구원, 고려대학교), 김동진\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** Ag hillock growth, Ni barrier layer, Thermomechanical stress analysis

이 연구는 기판 사이즈와 도금 중간층이 Ag 도금 표면의 hillock 형성에 어떠한 영향을 주는지 밝히기 위해 수행되었다. Hillock 형성에 대한 기판 사이즈의 의존성을 규명하기 위해 서로 다른 네 가지 크기의 Cu 기판이 사용되었다. Ni 층은 Cu 기판에 도금되었으며, 도금된 Ni 층 위에 Ag 도금층이 최종적으로 표면처리 되었다. Ni/Ag로 전해 도금된 기판은 175 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C의 온도에서 hillock이 형성되도록 실험이 수행되었다. 각 온도 조건에서 hillock 성장 거동은 표면 및 단면 관찰을 통한 주사전자현미경(SEM) 분석과 전자후방산란회절(EBSD) 분석으로 체계적으로 분석되었으며, 기판 사이즈에 대한 Ag hillock 형성 의존성이 유한요소해석을 통해 정량적으로 고찰되었다. Ni barrier 층은 Ag-Cu 간 확산을 억제할 수 있으므로 열에 노출되어도 Cu가 Ag 도금 표면에 확산될 수 있는 경로를 차단하는 효과를 보였다. 이 연구는 Ag hillock 형성에 대한 기판 사이즈 의존성을 미세구조 관점과 수치해석적 방법을 통해 체계적으로 분석하였으며, Ni barrier 층의 계면 확산 억제 메커니즘이 심층적으로 고찰되었다.



[P12-1]

Mechanically Induced Nanogap Engineering in Transparent Ag/PDMS Films for Backside-Excited SERS Platforms: Seung Hyun Lee(Yonsei University), Min Ki Kim(Korea University), Joon Ho Lee, Yeon Hong Kim(Yonsei University), Jun Seong Ahn\*(Korea University), Woo Young Lee\*(Yonsei University)

**Keywords:** Surface-enhanced Raman Scattering(SERS), Nanogap, Flexible sensor, Backside excitation

Flexible surface-enhanced Raman scattering (SERS) substrates have attracted considerable attention for on-site chemical analysis; however, fabricating large-area platforms with high hot-spot density and signal uniformity remains challenging, often requiring complex and costly processes. In this study, we present a facile mechanical strain-induced strategy to fabricate transparent Ag/polydimethylsiloxane (PDMS) SERS substrates. The applied strain generates a dense network of nanogaps on the Ag surface, enabling strong localized surface plasmon resonance (LSPR) and efficient electromagnetic enhancement. The substrate thickness was systematically optimized to balance optical transparency and mechanical stability, allowing a backside-excitation geometry for direct Raman detection through the transparent PDMS layer. Finite-Difference Time-Domain (FDTD) simulations were conducted to elucidate the electromagnetic enhancement mechanism, revealing a maximum enhancement factor (EF) of  $6.4 \times 10^5$  within the nanogaps. The sensing performance was evaluated using Rhodamine 6G as a probe molecule, showing excellent signal reproducibility with a relative standard deviation (RSD) of 9.16%, indicating highly uniform hot-spot distribution. This work demonstrates that a simple mechanically engineered fabrication approach can produce transparent and reliable SERS platforms, offering strong potential for practical in-situ chemical sensing applications.

[P12-2]

Magnetic Stimuli Responsive Soft Robotic Display System Enabled by Quantum Dot Light Emitting Diode: Jioh Yoo, Minji Kwon, Suhan Kim, Jonggun Jung, Kyumin Huh, Shengyou Li, Cheolmin Park\*(Yonsei University)

**Keywords:** Silver Nanowire, Magnetic Stimuli, Soft Robotic, Display, QLED

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.

### [P12-3]

Liquid Metal-enabled Energy Generators for Self-powered Soft Bioelectronics: Shengyou Li, Cheolmin Park\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Liquid metals, Soft bioelectronics, Flexible electronics, Energy harvesting, Self-powered sensing

Liquid metal-enabled energy generators (LMEGs) have recently attracted significant attention as versatile power solutions for self-powered soft bioelectronics. Their intrinsic fluidity, high electrical conductivity, and mechanical compliance enable seamless integration into deformable electronic platforms, addressing critical challenges associated with energy supply in wearable and implantable systems. This review systematically summarizes the physicochemical properties and processing strategies of liquid metals (LMs), with particular emphasis on their functional roles in soft bioelectronic architectures. We categorize LMEGs into six representative modalities—triboelectric, piezoelectric, electromagnetic, hydrovoltaic, thermoelectric, and photovoltaic generators—and critically analyze recent advances in device design, material engineering, and performance optimization. Beyond energy harvesting, the unique electromechanical characteristics of LM-based systems facilitate multifunctional integration, including self-powered sensing and adaptive biointerfaces. We further highlight emerging applications in wearable power sources, smart sensing platforms, and biomedical devices. Finally, we discuss key challenges and future perspectives, focusing on active LM participation in charge generation mechanisms, low-temperature operation, self-healing functionality, functionalized LM-polymer composites, and system-level integration toward practical deployment. This overview aims to provide a unified framework for understanding LMEGs and to guide the development of next-generation self-sustaining bioelectronic systems.

### [P12-4]

Block Copolymer-Mediated Liquid Metal Dispersions in Elastomeric Matrices for Resilient Joule Heating Electrodes: Seongwook Moon, Beomjin Jeong\*(Pusan National Univ.)

**Keywords:** liquid metals(LMs), liquid metal microparticles(LMPs), joule heating electrode, stretchable electrode, block copolymer, polymer composite, solvent compatibility, liquid crystal elastomer(LCE), actuator, soft electronics

Soft robotics and medical technologies increasingly demand resilient, stretchable heating composites. While liquid metals (LMs) offer excellent conductivity and flexibility, their integration with elastomers is often hindered by chemical incompatibility. Specifically, LM microparticles (LMPs) necessitate polar environments, contrasting with non-polar-soluble elastomers like SBS. In this study, we bridge this gap by introducing an amphiphilic block copolymer (BCP), PS-b-PEO, as an effective dispersant. This strategy enables stable LMP suspension in non-polar solvents via a dual-action mechanism. The resulting LMP/SBS/BCP (LSB) composite achieves high stretchability (~665%) and conductivity of  $37.9 \pm 7.94 \text{ S cm}^{-1}$ . Furthermore, these electrodes demonstrate efficient Joule heating (121 °C at 10 V) and successfully drive liquid crystal elastomer (LCE) actuators. This approach provides a versatile route for integrating LMs with various non-polar polymers for advanced soft electronics.

### [P12-5]

Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene-Polymer Composites for Thermal Management: Electrothermal Heating & Heat Dissipation: Jihwan Ju, Beomjin Jeong\*(Pusan National Univ.)

**Keywords:** Thermal management, MXene, PEDOT:PSS, Polymer, TFA, BNNT, Percolation network

MXenes are two-dimensional transition-metal carbides and/or nitrides that exhibit metal-like electrical conductivity and intrinsically high thermal conductivity. However, their flake-based percolation networks pose competing design requirements: electrothermal heaters demand continuous electrical pathways, whereas heat-dissipation materials require efficient thermal transport while maintaining electrical insulation. In this presentation, we describe two MXene/polymer composite strategies addressing these contrasting functions. First, we present a completed study on flexible MXene heaters, in which the polymer matrix stabilizes interflake junctions and mechanically fixes the conductive network, enabling reliable and repeatable Joule heating performance. Second, we introduce ongoing work on thermally conductive yet electrically insulating composites based on an alternative polymer matrix, emphasizing heat-spreading pathway engineering through controlled flake alignment and mitigation of interfacial thermal resistance.

### [P12-6]

High-Performance and Environmentally Robust MXene Aerogel-Based Moisture-Driven Energy Generators: 권민지, Kaiying Zhao, Shengyou Li, 정종건, 김수환, 유지오, 허규민, 박철민\*(연세대학교)

**Keywords:** Moisture-driven energy generator, MXene, aerogel, Organohydrogel

Moisture-driven energy generators (MEGs), particularly free-standing and film-type configurations, have emerged as promising power sources owing to their lightweight, wearable, and reservoir-free operation. Nevertheless, the performance of most previously reported MEGs is strongly dependent on steep moisture gradients, limiting their effective operation to restricted humidity conditions. In

this study, we develop a MXene aerogel-based MEG that delivers stable electrical output across diverse environmental conditions. The device adopts a bilayer architecture composed of a negatively surface-charged, hydrophilic MXene ( $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ ) aerogel integrated with a polyacrylamide (PAM) ionic hydrogel. First-principles calculations suggest that cations originating from the hydrogel are preferentially adsorbed and transported toward the MXene aerogel, establishing an internal electric field that supports efficient electricity generation over a broad relative humidity range of 20–95%. To further enhance environmental durability, the ionic hydrogel is replaced with a PAM-based organohydrogel possessing improved water retention and mechanical stability. The resulting device maintains continuous power generation for more than 15 days within a wide temperature window from  $-20$  to  $80^\circ\text{C}$ . When assembled in series, the MEGs produce sufficient output to power commercial electronic devices under outdoor conditions. Additionally, the generator operates as a self-powered sensing platform capable of monitoring finger motion and facial expression, demonstrating its applicability in wearable systems and human-machine interaction technologies. These findings provide a robust and adaptable design strategy for next-generation moisture-driven energy harvesting systems.

#### [P12-7]

Decontamination of Radioactively Contaminated Surfaces Using Polyvinyl Alcohol-Borax Hydrogel: Sung-Wook Kim\*, Hee-Man Yang, Hyung-Ju Kim(Korea Atomic Energy Research Institute)

**Keywords:** Radioactivity, Surface decontamination, Hydrogel, Polyvinyl alcohol-borax

The use of nuclear power can generate airborne radioactive species, which are eventually deposited on various surfaces. These contaminated surfaces must be properly remediated to minimize radioactive hazards. To address this, hydrogel complexes with tailored viscoelasticity have been developed to sequester radioactive contaminants. In this study, the surface decontamination performance of a polyvinyl alcohol-borax (PAB) hydrogel was investigated. The PAB hydrogel exhibited excellent removal efficiency for ionic species, driven by the electrostatic attraction between cationic radionuclides and the electron-rich oxygen sites in the crosslinked PAB network. Furthermore, simulated nuclear fallout particles were successfully removed. The hydrogel's superior viscoelasticity allows it to conform to microscale surface irregularities, effectively encapsulating and lifting off particulate matter through strong interfacial adhesion. These results demonstrate that the PAB hydrogel is a promising candidate for purifying surfaces affected by both ionic and particulate contaminants.

#### [P12-8]

MXene-Encapsulated Magnetic Liquid Metal for Shape-Morphing and Locomotive 3D Neuromorphic Synapses: Kyumin Huh, Hyeon Kim, Jioh Yoo, Jonggun Jung, Minji Kwon, Shengyou Li, Suhan Kim, Cheolmin Park\*(Yonsei University)

**Keywords:** Magnetic Liquid Metal, Mxene, Synapse

Gallium-based liquid metals (LMs) possess distinctive surface chemistry, fluidic behavior near ambient temperature, and metallic-level conductivity, rendering them attractive for multifunctional electronic systems. To introduce controllable deformation and autonomous flow into LMs, magnetic fillers are commonly integrated, enabling external magnetic-field regulation of droplet motion and morphological reconfiguration. Nevertheless, the intrinsic surface stickiness and chemical reactivity of LMs limit their direct implementation in sophisticated circuits, as undesired alloy formation and environmental contamination may occur upon contact with surrounding materials. Here, we present a highly conductive  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  (MXene)-encapsulated magnetic liquid metal (MX-MLM) realized through a scalable and straightforward fabrication strategy. In this architecture, magnetic microparticles are dispersed within the liquid metal core, while MXene nanosheets spontaneously assemble at the interface to form a conductive and nonwetting shell. This hybrid configuration preserves the electrical performance of the liquid droplet while suppressing adhesion and corrosive interactions. The MX-MLM demonstrates enhanced magnetic responsiveness and chemical stability, allowing nonstick, magnetically driven locomotion and programmable shape transformation across diverse substrates, including metallic, oxide, and polymeric surfaces. In addition, the composite droplet exhibits recyclability and magnetically triggered self-healing behavior. As a proof of concept, the MX-MLM is employed as a magnetically interactive, reconfigurable, and mobile top-gate electrode in a ferroelectric polymer-gated transistor. The resulting device displays robust magnetically coupled synaptic characteristics, enabling the detection and learning of three-dimensional motion trajectories.

#### [P12-9]

Orthogonal Control of Fluorescence and Structural Color for Interference-Free Multimodal Sensing: 김수환(연세대학교), 이선주(한국과학기술연구원), 정종진, 권민지, 유지오, 허규민, 박철민\*(연세대학교)

**Keywords:** 블록 공중합체, 광결정, 응집 유도 발광, 구조색, 광학 암호화, 자기 조립, 자극 반응성 고분자, 형광

Achieving interference-free signal modulation is a critical challenge in the advancement of multimodal sensing systems. Here, we present a self-assembled photonic material composed of block copolymer (BCP) photonic crystals doped with aggregation-induced emission luminogens (AIEgens), designed to exhibit orthogonal optical responses. The system demonstrates a distinct decoupling of optical signals based on the swelling state: in the dry state, the collapsed polymer chains induce intense fluorescence (FL) without structural color (SC). Conversely, solvent-induced swelling expands the photonic bandgap, activating vivid SC while simultaneously

quenching the FL via the AIE mechanism. This mutually exclusive switching eliminates signal crosstalk, enabling reliable selective detection where FL acts as a sensor for temperature and nitroaromatic compounds, and SC serves as a pH monitor. Furthermore, leveraging the independent manipulability of these optical channels, we demonstrate a three-level encryption platform. By encoding quaternary information through combinations of FL, SC, and pH-responsive SC, this system offers a robust write-once-read-many strategy for high-security data storage and anti-counterfeiting applications.

#### [P12-10]

Stimuli-Responsive Janus Display Based on Block Copolymer Photonic Crystals Partially Infiltrated with Room-Temperature Phosphorescent Hydrogel for Dual-Mode Optical Synaptic Encryption: Jonggun Jung, Jioh Yoo, Minji Kwon, Suhan Kim, Shengyou Li, Kyumin Huh, Cheolmin Park\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** block copolymer, photonic crystal, room temperature phosphorescence, optical encryption, optical synapse, sensing display, stimuli-responsive

Stimuli-responsive optical systems capable of integrating multi-modal signal transduction with programmable information processing remain highly desirable for secure photonic technologies. Here, we report a stimuli-responsive Janus display based on block copolymer (BCP) photonic crystals partially infiltrated with a room-temperature phosphorescent (RTP) hydrogel, enabling dual-mode optical functionality and optical synaptic encryption. The Janus architecture is formed by partial infiltration of the RTP hydrogel into the BCP photonic crystal matrix, where the remaining hydrogel layer resides atop the structured photonic domain, creating interfacially integrated yet functionally decoupled channels. The BCP photonic crystal layer exhibits humidity-dependent structural color modulation, while the RTP hydrogel demonstrates temperature-responsive phosphorescence. Importantly, the phosphorescent channel displays optical synaptic behavior, including pulse-width-dependent intensity enhancement, paired-pulse facilitation, and cumulative temporal integration under ultraviolet stimulation. Leveraging this synaptic programmability, time-gated encryption is achieved through duration-encoded phosphorescent signals, where correct information is decoded only within a specific ultraviolet pulse window. Both insufficient and excessive irradiation lead to decoding failure due to duration collapse or trap activation, establishing a window-limited optical cryptosystem. This partially infiltrated Janus photonic platform integrates stimuli responsiveness, optical memory, and programmable encryption within a single soft-material system, offering a versatile strategy for secure optical displays and adaptive information encoding.

## P13 : 집합조직

Room 3층 로비, 4월 28일

### [P13-1]

**CVD 공정 조건에 따른 2차원 PtSe<sub>2</sub>의 합성 및 구조적 특성 분석:** 위신혜(동아대학교), 송유진(한국기초과학지원연구원), 김여진, 신한균(동아대학교), 한상섭\*(한국기초과학지원연구원), 김정환\*(동아대학교)

**Keywords:** CVD, PtSe<sub>2</sub>, TMD, 반도체

인공지능(AI), 자율주행, 빅데이터 및 사물인터넷(IoT) 등 반도체 기술 중심 산업이 성장하면서 고성능, 저전력 반도체 소자의 수요가 증가하고 있다. 기존 실리콘(Si) 기반 반도체는 집적도 향상 과정에서의 발열과 전력 효율 등의 물리적 제약으로 인해 성능 향상의 어려움에 있다. 이러한 실리콘 반도체의 한계를 극복하기 위해 2차원 층상구조를 가지는 반도체 전이금속 칼코겐 화합물(Transition Metal Dichalcogenides, TMD)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 2차원 TMD는 원자 수준의 두께와 우수한 물리적, 전기적 특성으로 인해 유연 트랜지스터, 웨어러블 센서 등 차세대 소자 분야에서 각광받고 있다. 그중 PtSe<sub>2</sub>는 층수에 따른 반도체-금속 전이 특성과 화학적 안정성을 갖추고 있어 차세대 소자 구현을 위한 물질로 주목받고 있다. 본 연구에서는 화학 기상 증착법(Chemical Vapor Deposition, CVD)을 이용하여 2차원 PtSe<sub>2</sub>를 합성하였으며, 합성 조건변화에 따른 Pt와 Se 화합물의 형성과 특성을 관찰하였다. 에너지 분산형 X선 분광(EDS)으로 화학적 조성 및 원소 분포를 확인하였으며, X선 회절(XRD) 및 투과전 자현미경(TEM)을 활용하여 미세구조와 결정학적 특성을 분석하였다. Raman 분광 분석을 추가적으로 수행하여 층수 및 결합 상태 변화를 확인하고, 구조적 특성과의 상관관계를 고찰하였다. 공정 조건에 따라 PtSe<sub>2</sub>의 상 형성과 결정 성장 양상이 달라지며, 이에 따른 구조적 안정성과 결정성 차이가 나타남을 확인하였다. 이러한 결과는 CVD 기반 2차원 PtSe<sub>2</sub>의 성장 메커니즘 이해와 안정적인 박막 형성을 위한 공정 최적화에 중요한 기초 자료를 제공한다

### [P13-2]

**2.1D 반도체 패키징용 기판의 결함 없는 구리 비아 형성을 위한 상용 유기첨가제 기반 전해도금 공정 최적화:** 김도현, 오은기, 신한균, 박 현, 김정환\*(동아대학교)

**Keywords:** Semiconductor Package Substrate, Cu Electrodeposition, Organic Additives, Via Filling, Microstructure

2.1D 패키징 기술은 고가의 실리콘 인터포저를 유기절연체 기반의 재배선층(re-distribution layer, RDL) 기판으로 대체하는 저비용, 고성능을 함께 추구하는 차세대 반도체 패키징 기술이다. 이를 구현하기 위해서는 유기 기판의 마이크로 비아(via)에 결함 없이 구리를 충전하는 전해도금 공정의 확보가 필수적이다. 본 연구에서는 약 20  $\mu\text{m}$  크기의 비아 내 상향식 충진을 구현하여 구리 내부에 공동(void) 형성을 방지하기 위한 유기첨가제 조합의 전기화학적 거동과 도금 형상 변화를 평가하였다. 먼저 산업계에서 사용 중인 상용 유기첨가제인 가속제(accelerator), 억제제(suppressor), 그리고 평활제(leveler)의 전기화학적 특성을 평가하기 위해 회전 디스크 전극(rotating disk electrode, RDE) 기반 정전류 실험(galvanostatic measurement)을 수행하였다. 이를 바탕으로 도금 공정에 적용할 유기첨가제 조건을 선정하였다. 그 후, 비아 패던 기판에 대한 도금 공정을 진행하여 광학현미경을 통해 상향식 충전 거동 여부를 확인하였다. 집속이온빔(focused ion beam, FIB)을 이용한 단면 분석을 통해 마이크로 비아 내부의 결함 유무를 파악하고, 전자후방산란회절(electron backscatter diffraction, EBSD) 분석법을 이용하여 미세조직과 첨가제 조건 간의 관계를 고찰하였다. 이를 통해 내부 결함이 없는 균일한 도금층 형성을 위한 최적화된 유기첨가제의 조합을 선정하였다.

### [P13-3]

**Temperature-dependent Cold Creep mechanism and behaviour in near- $\alpha$  Ti-6242:** HaSeong Baek(Incheon National University), Yong-Taek Hyun(Korea Institute of Materials Science), Tea-Sung Jun\*(Incheon National University)

**Keywords:** Creep mechanism, Cold creep, Near- $\alpha$  titanium

Titanium and its alloys are widely adopted in automotive and aerospace applications because they combine high specific strength with excellent corrosion resistance [1-2]. Despite these advantages, a pronounced dwell-fatigue debit has been reported in  $\alpha$ , near- $\alpha$ , and  $\alpha+\beta$  titanium alloys, leading to a substantial reduction in fatigue life. This phenomenon is most severe at intermediate temperatures (approximately 90–120 °C) and becomes less prominent at temperatures above ~230 °C [3]. Such dwell sensitivity is strongly associated with cold creep, i.e., the time-dependent plastic strain accumulated during hold periods under load [4]. In this work, the short-term cold creep response of the near- $\alpha$  alloy Ti-6242 was investigated at 20 °C, 120 °C, and 240 °C. Strain evolution was quantified using digital image correlation (DIC), enabling a direct comparison of deformation behaviour across temperatures. The results indicate that creep resistance improved as the test temperature increased. To interpret the governing creep mechanism, the apparent stress exponent ( $n$ ) was evaluated, yielding values of 30.6, 12.7, and 9.4 at 20 °C, 120 °C, and 240 °C, respectively. Because such high exponents can reflect the influence of a threshold stress, the data were further analysed using an effective-stress formulation of the strain-rate relation that incorporates a critical (threshold) stress. Assuming a dislocation-controlled creep process with an effective stress exponent of  $p = 5$ , the effective exponents were obtained as 4.1, 5.0, and 5.1 for 20 °C, 120 °C, and 240 °C, respectively, while the corresponding threshold stresses were estimated to be 740 MPa, 446 MPa, and 333 MPa. In addition, the activation volume was evaluated using an activation-volume approach and found to lie on the order of  $\sim 1\text{--}10\text{ b}^3$ , suggesting that the observed cold creep is

mainly governed by dislocation glide and/or dislocation nucleation processes. Furthermore, ex-situ EBSD will be employed to track texture evolution and lattice rotation changes, such as those quantified by kernel average misorientation (KAM).

**[P13-4]**

Role of Final Band Thickness in Texture Development and Anisotropic Behavior of Hot-Rolled Aluminum 8011 Alloy:

Kyung Il Kim\*(Korea Institute of Industrial Technology)

*Keywords:* Aluminum alloy, hot rolling, texture development, recrystallization, mechanical anisotropy, earing behavior

Final band thickness is a key parameter controlling texture evolution and anisotropic behavior during hot rolling. This study examines the effect of final thickness on the microstructure, crystallographic texture, and mechanical properties of hot-rolled Aluminum 8011 alloy. Reducing the thickness from 6 mm to 3.25 mm produced a more homogeneous grain structure but significantly decreased the fraction of random texture components (64% → 42%) and recrystallized grains (83% → 55%). Tensile testing revealed pronounced directional differences in elongation only in the 3.25 mm band. Consistently, the thinner band exhibited more than 1.5% higher earing compared to the 6 mm band. These results demonstrate that thickness reduction improves grain uniformity while promoting texture-induced mechanical anisotropy.

**P14 : 가공-소성 가공**

Room 3층 로비, 4월 28일

**[P14-1]**

**냉간 신선 펄라이트 강선의 저온 시효 경화 거동과 시멘타이트 결정성 변화:** 이승희, 박형준, 이진우(동아대학교), 정진영(고려제강), 강신곤\*(동아대학교)

**Keywords:** 펄라이트 강선, 냉간 신선, 저온 어닐링, 시멘타이트 나노결정화, 층상간격 미세화

고강도 펄라이트 강선은 타이어 코드, 현수교 케이블 등 극한 하중 환경에서 사용되며, 약 4 GPa 수준의 인장강도가 요구되는 핵심 구조 소재이다. 신선 공정 중 층상 간격의 미세화, 전위 밀도 증가, 페라이트 내 탄소 원자의 고용 강화가 복합적으로 작용하여 강도가 증가하며, 이후 후속 열처리를 통해 변형 유래 결합과 내부 응력을 제어함으로써 강도-연성 균형을 조절하고 물성을 최적화한다. 이러한 후속 열처리 과정에서는 열처리 온도에 따라 상이한 미세조직 변화가 나타나는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 150 °C 이하에서는 과포화된 탄소가 페라이트 전위에 고착되며, 150–250 °C 범위에서는 고용 탄소의 확산이 촉진되고, 400 °C 이상에서는 회복 및 재결정에 의해 강도 저하가 발생한다. 특히, 200 °C 이하의 저온 열처리 영역은 거시적인 미세조직 변화가 제한적인 것으로 인식되어 왔으나, 최근 연구에서는 시멘타이트의 추가 분해 및 나노 결정화 등 다양한 미시적 구조 변화로 인한 시효 경화 거동이 보고되고 있다. 그러나 저온 열처리 시 페라이트 미세조직 변화는 제한적이라는 점에 대해 공통된 견해를 보이는 반면, 시멘타이트의 결정성 변화에 대해서는 상반된 결과가 제시되고 있다. 이는 대부분의 분석이 TEM 또는 APT 기반의 국부 영역 관찰에 집중되었기 때문으로 판단된다. 본 연구에서는 보다 넓은 영역의 평균적 정보를 제공할 수 있는 X선 회절(XRD) 분석을 투과전자현미경(TEM) 분석과 병행하여, 고강도 펄라이트 강선의 층상 구조 변화, 시멘타이트 결정성, 페라이트 내 탄소 농도 및 전위 밀도 변화를 종합적으로 분석하고자 하였다. Fe–0.92C–0.5Si–0.3Mn–0.2Cr(wt.%) 조성의 신선 전 초기 선재(WR), 신선 강선(DR), 그리고 신선 후 150 °C 30분간 어닐링 처리한 강선(AN)을 비교 대상으로 선정하였다. 광학현미경(OM) 및 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 펄라이트 콜로니의 전반적인 미세조직 변화를 관찰하였으며, TEM 및 XRD 분석을 통해 시멘타이트 결정성과 페라이트 내 탄소 농도 변화를 평가하였다. 기계적 물성 평가는 인장 및 비틀림 시험을 통해 수행하였다.

**[P14-2]**

**Effect of High-Frequency Induction Heating Temperature on the Oxidation Behavior of Uncoated Boron Steel Tubes:** SEUNG MIN SONG(Korea Institute of Industrial Technology, Jeonbuk National University), EUI PYO KWON\*(Korea Institute of Industrial Technology)

**Keywords:** Hot bending, Induction heating, Oxidation

Hot Bending–Quenching technology, which applies the fundamental principle of hot stamping, is a process for manufacturing ultra-high-strength tubular components exceeding 1470 MPa by rapidly heating tube materials through high-frequency induction heating, performing bending at elevated temperatures, and subsequently quenching to form a martensitic microstructure. Recently, the application of hot-stamping boron steel tubes has expanded in response to increasing demands for automotive lightweighting and improved crash safety. However, oxide scale formed during high-temperature heating degrades surface quality and reduces mechanical properties. Although Al–Si coated steels are currently used to suppress oxidation, the coating process has limitations, including increased cost and process complexity. In this study, uncoated hot-stamping boron steel tubes were employed to establish high-frequency induction heating conditions that minimize oxide scale growth while maintaining economic feasibility. The target heating temperature was set at 950°C, and appropriate induction heating conditions were selected by comparing the time required to reach the target temperature under different power inputs. Furthermore, the oxide scale thickness, hardness, and ultimate tensile strength were evaluated as functions of heating temperature. The hardness difference between the surface and the core was analyzed to assess the effect of decarburization during high-temperature heating. In addition, oxide scale thicknesses at the outer and inner curvature regions of the tube were quantitatively compared to systematically investigate location-dependent oxide scale growth behavior.

**[P14-3]**

**냉간압연공정으로 제조된 AA5052/AA6061 층상판재의 초기 압하율 변화에 따른 미세조직 및 기계적 특성:** 임기현, 허현준, 권주찬, 이성희\*(국립목포대학교)

**Keywords:** 냉간압연접합, 시뮬레이션, Al합금, 기계적 특성

알루미늄 합금은 높은 비강도와 우수한 내식성, 안정적인 성형·가공성으로 인해 자동차·철도·항공 등 다양한 운송기기 분야의 구조용 소재로 널리 활용되어 왔다. 그러나 최근 경량화 요구가 더욱 강화되면서, 단순한 고강도화뿐 아니라 연성 및 충격 저항을 함께 확보할 수 있는 재료 설계와 공정 기술의 필요성이 커지고 있다. 이러한 관점에서 냉간압연 접합(cold roll-bonding, CRB)은 서로 다른 알루미늄 합금을 적층한 뒤 압연 변형을 동시에 부여함으로써, 계면 접합과 가공경화(변형강화)를 통해 기계적 성능 향상을 유도할 수 있는 공정으로 주목받고 있다. 본 연구는 냉간압연공정으로 제조한 AA5052/AA6061 층상판재를 대상으로, 초기 압하율 변화가 미세조직 진화와 계면 상태, 그리고 기계적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하는 것을 목표로 한다. 특히, 초기 변형 상



태가 상이한 AA5052 및 AA6061 판재를 이용하여 CRB 적층판을 제조하고, 접합 및 열처리 조건에 따른 미세조직 변화와 기계적 특성을 분석하였다. 시편은 두께 1 mm, 폭 40 mm, 길이 30 mm로 준비하였으며, 두 장 중 한 장에는 사전 압연(감소를 50%, 등가 변형률 약 0.8)을 부여하고 다른 한 장은 어닐링 상태로 유지하였다. 이후 두 합금을 적층한 뒤 탈지 및 표면 전처리를 수행하고, 최종적으로 50% 압연 조건에서 냉간압연 접합을 진행하였다. 압연은 상온에서 직경 370 mm 작업 톨을 갖는 4단 압연기를 사용하여 5 RPM으로 수행하였다. 접합 후 시편은 200~400 °C 범위에서 1시간 어닐링하여 열처리 효과를 비교하였다. 제조된 AA5052/AA6061 적층판의 미세조직 및 기계적 특성은 단일 상용 AA5052 및 AA6061 소재와 비교·평가하여 냉간압연 접합 기반 적층화의 유효성을 검토하였다.

#### [P14-4]

**피어싱 및 인발 공정을 적용한 니켈-크롬-몰리브덴강 심리스튜브 제조기술:** 권진구, 이준표, 홍성모\*((주)세창스틸), 권기봉, 조의열, 민명호(한국산업기술시험원)

**Keywords:** 피어싱 공정, 인발 공정, 심리스 강관, 기계적 특성, 락드릴 로드

전 세계적인 탄소중립 정책과 이차전지 산업의 급성장에 따라 핵심 광물 자원의 수요가 급증하고 있으며, 이에 따라 원자재 채굴을 위한 굴착용 락드릴(Rock Drill) 장비 시장은 연평균 5.4% 이상의 높은 성장세를 보이고 있다. 락드릴 로드는 드리프터(Drifter)에서 발생하는 고주파 충격력과 강력한 회전 운동을 비트에 직접 전달하는 핵심부품으로, 천공 과정에서 파손을 방지하기 위해 극심한 피로 환경에서도 견딜 수 있는 높은 인장강도와 우수한 충격 인성이 필수적으로 요구된다. 특히 니켈(Ni), 크롬(Cr), 몰리브덴(Mo) 등의 합금 원소를 함유한 SNCM625 강은 이러한 물리적 조건을 충족하는 최적의 소재로 평가받고 있으나, 소구경 후속 심리스(Seamless) 강관 형태의 제조 난이도가 매우 높아 국내 수요의 대부분을 독일, 일본 등 해외 수입에 의존하는 실정이다. 본 연구에서는 900 MPa급 고강도 SNCM625 소재를 활용한 락드릴 로드용 심리스 강관의 국산화를 목표로, 열간 피어싱(Piercing)부터 냉간 인발(Drawing)에 이르는 전주기 제조 공정 기술을 설계 및 최적화하였다. 열간 가공 단계에서는 난가공성 합금강 특성을 고려한 유도 가열 및 보온 가열 조건을 최적화하고 피어싱 세팅 기술을 확보함으로써, 외경 공차와 편육이 저감된 정밀 모관 제조 기술을 확보하였다. 냉간 공정에서는 인발 가공성을 향상시키기 위한 열처리(Annealing)를 통해 최종 경도를 HRC 27이하로 제어하였으며, 정밀 인발 및 산세 공정의 최적화를 통해 표면 결함과 내측 흠을 최소화하였다. 그 결과, 최종 시제품에서 (외경) 76\*13.5t\*5, 000 mm의 심리스 강관으로 제조한 후 기계적 특성, 미세조직, 진직도 및 치수 정밀도 등의 품질 분석을 통해 락드릴 로드용 심리스 강관으로서의 적용가능성을 고찰하였다. 본 연구는 중소벤처기업부 중소기업기술혁신개발(RS-2023-00269183)과제의 지원을 통해 수행되었습니다.

#### [P14-5]

**7075 알루미늄 압출판재의 자연시효에 따른 굽힘 균열 개시 거동 분석:** 양현석, 정우철, 최광수(고등기술연구원), 서창환(알루스(주)), 공만식\*(고등기술연구원)

**Keywords:** 7075 알루미늄 압출재, 자연 시효, 굽힘 시험, 균열 개시 변위, 성형성

본 연구는 7075 알루미늄 합금 압출판재에서 용체화-급냉 후 자연시효 시간이 경도와 굽힘성형 거동에 미치는 영향을 정량적으로 규명하고, 성형 공정의 대기시간 관리 필요성을 제시하는 것을 목적으로 하였다. 두께 4.4 mm의 상용 7075 압출판재를 470 °C에서 30 min 용체화 처리 후 수냉하였으며, 상온에서 0-312 h(0, 3, 6, 24, 48, 72, 144, 312 h) 자연시효하였다. 기계적 특성은 비커스 경도(200 g, 10 s) 및 90° V-굽힘 시험(R=2.25 mm, 10 mm/min)으로 평가하였고, 성형성이 불리한 TD(압출방향 수직) 조건을 기준으로 굽힘 거동을 비교하였다. 자연시효 시간이 증가함에 따라 경도는 0 h에서 95.38 HV로 가장 낮았으나, 24 h에서 131.81 HV까지 급상승하고 이후 상승률이 둔화되면서 312 h에서 153.22 HV에 도달하였다. 반면 굽힘성은 강화 거동과 역상관을 보였으며, 0-3 h 조건에서는 균열 개시 변위가 크고(0 h: 11.11 mm) 균열이 비교적 연성적으로 전파되며 90° 굽힘까지 안정적 거동을 나타냈다. 그러나 6 h 이후에는 균열 개시 변위가 감소(6 h: 9.37 mm)하고, 24 h 이상에서는 약 9 mm 부근에서 즉각적인 취성 파단이 지배적으로 발생하였다. 또한 균열 형상은 단기 시효에서 비직선형 확산(연성 전파 특성)을 보인 반면, 장기 시효에서는 직선형 전파 및 소성변형 흔적 감소로 취성 전이가 확인되었다. 따라서 7075 압출판재의 T4 상태에서 자연시효 초기가 굽힘성 저하에 가장 민감한 시간영역이며, 성형 공정에서는 열처리 직후 3 h 이내 가공이 굽힘 균열 억제 및 품질 안정성 확보에 유리하다.

[Acknowledgment] 본 연구는 산업통산자원부/한국산업기술기술평가원의 지원으로 수행되었습니다. (과제번호 RS-2024-00405428)

#### [P14-6]

**핫-피어싱 공정기술을 이용한 고압수소용 스테인리스 심리스배관 제조 연구:** 이준표, 홍성모\*, 권진구, 이흥선((주)세창스틸)

**Keywords:** 수소, 심리스 수소배관, 열간 피어싱, 냉간 필거, 냉간 인발

탄소중립 실현과 에너지 전환 가속화에 따라 수소는 차세대 핵심 에너지원으로 주목받고 있으며, 이에 대응하기 위한 생산·저장·운송·활용 전주기 인프라 구축이 본격적으로 추진되고 있다. 우리나라는 수소경제 활성화 로드맵을 기반으로 대규모 수소 공급 체계와 배관망 확충을 단계적으로 확대하고 있다. 수소경제의 안정적 확대를 위해서는 고압수소 환경에서 안전하게 운용가능한 오스테나이트계 스테인리스 심리스배관의 적용이 필수적이다. 그러나 현재 관련 제조 기술의 한계로 인해 대부분을 해외 주요국으로부터 수입에 의존하고 있는 실정이다. 국산화를 위해서는 수소취성에 대한 대응 기술 확보가 선행되어야 하며, 특히 고압 수소 조건에서는 내측 표면 제어를 통한 수소취성 저항성 확보가 장기 신뢰성 확보의 핵심 요소로 작용한다. 또한 고강도와 고인성을 동시에 만족하기 위해 표면특성과 기계적 성능을 고려한 제조공정 기술이 요구된다. 본 연구에서는 스테인리스 환봉소재를 활용하여 열간 피어싱(hot piercing)과 냉간 필거(cold pilger) 및 인발(cold drawing) 공정 기술을 적용함으로써 외경 33.4 mm(1인치) 심리스배관을 제조하였다.

열간 및 냉간 공정 설계와 핵심 요소기술을 최적화하였으며, 제조된 심리스배관에 대해 치수정밀도, 표면조도 및 기계적특성을 분석하여 고압수소 배관으로서의 적용 가능성을 고찰하였다. 본 연구는 과학기술정보통신부 나노 및 소재기술개발사업(RS-2024-00445038)과제의 지원을 통해 수행되었습니다.

[P14-7]

**냉간압연공정으로 제조된 AA1050/AA5052 이중 적층 판재의 미세조직 및 기계적 특성 분석:** 허현준, 임기현, 권주찬, 이성희\*(국립목포대학교)

**Keywords:** 알루미늄 합금, 냉간압연접합, 기계적 특성, 미세조직, 불균일 혼합조직

본 연구에서는 비열처리형 알루미늄 합금인 AA1050(순 알루미늄)과 AA5052(Al-Mg 합금)를 이용하여, 냉간압연접합(Clad Roll Bonding, CRB) 및 이주속압연접합(Differential Speed Roll Bonding, DSRB) 공정을 통해 이중 층상판재를 제조하고 그 특성을 비교 분석하였다. 두 소재의 장점을 결합한 기능성 적층소재 제조를 위해 1mm 두께의 시편을 2패스 압연하여 최종 0.5 mm 두께로 제작하였으며, 이후 200~400°C 범위에서 1시간 동안 열처리를 수행하였다. 공정 분석 결과, DSRB 공정은 상·하 롤의 속도 차이에 의한 강한 전단변형을 유도하여 접합 계면의 산화피막 파쇄와 금속 간 접촉을 활성화하였으며, 이는 결정립 미세화 및 재결정 촉진으로 이어졌다. 특히 EBSD 분석을 통해 DSRB 시편이 CRB 대비 상대적으로 조밀하고 균일한 미세조직을 형성함을 확인하였다. 하지만 인장 시험 결과, 예상과 달리 CRB 시편이 DSRB 시편보다 인장강도, 항복강도 및 연신을 전반에서 우수한 기계적 특성을 나타내었다. 이는 DSRB 공정에서 발생하는 강한 전단 변형이 미세조직의 미세화에는 기여하였으나, 소성 변형의 불안정성을 증대시키고 국부적인 변형 집중을 초래하여 최종적인 인장 성질을 저하시키는 요인이 된 것으로 사료된다.

## P15 : 수소재료

Room 3층 로비, 4월 29일

### [P15-1]

**Role of Crystallographic Defects in Governing Hydrogen Sorption Kinetics of Pd-Sn Alloy Nanowires:** Byungmoon Yoo, Jinseok Koh, Eun Seon Cho\*(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

**Keywords:** Hydrogen storage, Palladium-Tin solid solution, Hydrogen sorption kinetics, Wavy nanowires, Crystallographic defect

Metal hydrides have been widely regarded as promising hydrogen storage media due to their high volumetric density and intrinsic operational safety. The hydrogen sorption behavior of metal hydrides is governed by both thermodynamic stability and reaction kinetics, which can be systematically tuned through materials design. Among various structural parameters, local atomic configurations have emerged as a critical factor regulating hydrogen-metal interactions, particularly at the nanoscale. As a result, increasing attention has been directed toward understanding how structural heterogeneities influence hydrogen sorption processes at the atomic level. In this context, crystallographic defects—such as grain boundaries, twin boundaries, and associated lattice distortions—can locally modulate hydrogen adsorption and dissociation at the surface as well as diffusion pathways into the bulk by inducing variations in the electronic environment. However, clarifying the specific contribution of crystallographic defects to hydrogen sorption behavior remains a key challenge in the rational design of hydrogen storage materials. To address this challenge, it requires suitable model systems that enable systematic examination of the relationship between defect structures and hydrogen sorption behavior. In this study, Pd<sub>4</sub>Sn wavy nanowires are employed as a model system to elucidate the influence of twin and grain boundaries on hydrogen sorption behavior. Owing to their wavy morphology, these nanowires intrinsically incorporate a high density of twin and grain boundaries along the wire axis while maintaining a uniform Pd-Sn solid solution composition. Hydrogen sorption kinetics measurements reveal that the boundary-rich Pd<sub>4</sub>Sn nanowires exhibit significantly modified hydrogen absorption behavior compared to straight nanowires with an equivalent composition, which is attributed to facilitated interaction with hydrogen and transport in the vicinity of twin and grain boundary regions. These findings highlight the critical role of crystallographic defects in governing hydrogen sorption kinetics in Pd-based alloy nanostructures and provide a fundamental insight into defect-mediated hydrogen sorption processes. More broadly, this work offers a conceptual framework for comprehending and tailoring hydrogen storage behavior across a range of metal hydride systems.

### [P15-2]

**AA5083 알루미늄 합금의 수소취성에 미치는 어닐링 온도의 영향:** 김종현, 정민섭, 황병철\*(서울과학기술대학교)

**Keywords:** Al-Mg aluminum alloy, Hydrogen embrittlement, Recrystallization, Relative reduction of area

최근 기후변화 문제의 심각성이 국제사회에 널리 인식됨에 따라 산업계에서 연료 효율 증대, 에너지 소비 및 배출가스의 저감을 위한 경량 소재의 필요성이 증가하고 있다. Al-Mg계 알루미늄 합금은 우수한 비강도와 내식성을 바탕으로 자동차, 해양 및 수송용 구조재로 폭넓게 활용되고 있으나, 높은 Mg 함량으로 인해 응력 부식 균열이 발생하기 쉬운 것으로 알려져 있다. Al-Mg 합금의 응력 부식 균열은 주로 수소취성(hydrogen embrittlement)에 의해 발생하며, 수소취성은 수소가 금속재료의 표면으로부터 내부로 침투하여 전위, 결정립계, 석출물 등 다양한 결함들과 상호작용하여 발생한다. 한편 Al-Mg 합금은 용체화 처리 후 느린 냉각 시 결정립계에 β상(Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>)이 석출되어 기계적 특성이 저하되는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 Al-Mg 합금은 주로 용체화 처리 후 급랭하여 β상의 석출을 억제하고 압연 및 단조 등의 공정을 통해 가공경화를 진행하여 우수한 강도를 확보한다. 이러한 가공 경화형 Al-Mg 합금은 내부에 높은 전위밀도를 가져 고온에 노출될 경우 알루미늄의 재결정이 발생하여 전위밀도 및 결정립 크기 등이 달라진다. 본 연구에서는 가공경화형 AA5083 알루미늄 합금에 대하여 재결정 온도에 따른 어닐링 온도 제어를 통해 전위밀도 및 결정립 크기를 달리한 시편을 제조한 후 수소취성을 평가하여 미세조직과의 상관관계를 고찰하였다.

### [P15-3]

**2.0 GPa 마르텐사이트강의 Sn 첨가에 따른 수소취성 저항성 분석:** 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,

최근 차체 부품의 경량화와 충돌 안전성 강화를 위해 초고강도 마르텐사이트강의 활용이 확대되고 있다. 그러나 이러한 강종은 높은 전위 밀도와 미세한 마르텐사이트 조직으로 인해 수소취성에 본질적으로 취약한 한계를 지닌다. 한편, 철강 생산 공정에서 스크랩 재활용 비율이 증가함에 따라 Cu, Ni, Sn과 같은 tramp element의 배경 함량이 지속적으로 증가하고 있으며, 이로 인한 기계적 물성 저하 가능성이 중요한 문제로 대두되고 있다. Sn은 기계적 특성 및 취성 거동에 부정적인 영향을 미치는 원소로 알려져 있으나, 마르텐사이트강에서 수소취성 민감도에 미치는 영향과 그 기구에 대해서는 아직 충분히 규명되지 않았다. 본 연구에서는 인장강도 2.0 GPa급 마르텐사이트강을 대상으로 Sn 첨가가 수소취성 민감도에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 수소 주입 후 인장시험을 통해 수소취성 민감도를 평가하였다. 또한 Thermal Desorption Analysis(TDA) 및 수소 투과 실험을 통해 두 강종의 수

소 고용 및 확산 거동을 분석하였으며, 파단면 SEM 분석과 EBSD 기반 균열 전파 거동 분석을 통해 수소취성에 따른 파괴 메커니즘을 고찰하였다. 본 연구를 통해 Sn과 같은 tramp element의 첨가가 초고강도 마르텐사이트강의 수소 고용 및 파괴 거동에 미치는 영향을 분석하였으며, Sn 수소취성 민감도에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

#### [P15-4]

**가중치 기법을 적용한 TDS 기반 수소 트랩 사이트 정량 분석에 관한 연구:** 신희철(한국재료연구원, 영남대학교), 이종석, 김두원, 이시환(한국재료연구원), 박노근(영남대학교), 이승건\*(한국재료연구원)

**Keywords:** Austenitic stainless steel, High-pressure gaseous H charging, Thermal desorption spectroscopy (TDS), Cold rolled

수소 환경에 금속이 노출될 경우 기계적 물성 저하를 유발하는 수소취성이 발생하므로, 이에대한 정량적 평가와 신뢰성 있는 검증이 요구된다. 수소취성 거동은 소재 내 장입된 수소 상태에 따라 달라지므로, Thermal desorption spectroscopy (TDS)를 통한 정량적 수소 함량 분석이 필수적이다. 일반적으로 TDS 분석에서는 문헌에 보고된 피크 온도를 기준으로 수소 트랩 사이트를 구분하고 있으나, 승온 속도 등 시험 조건에 따라 피크 특성이 변동될 수 있어 해석의 신뢰성에 한계가 존재한다. 이에 본 연구에서는 문헌 의존적 해석을 지양하고, 실측 TDS의 물리적 데이터에 가중치 기법을 적용하여 트랩 사이트를 분리 및 해석하였다. 냉간 압연된 STS 316L 소재를 고압 수소 환경에 장입하였으며, TDS 분석을 통해 탈착 거동을 분석하였다. 또한 XRD 및 EBSD 분석을 통해 미세조직 변화와 전위 밀도를 정량화하여 TDS 피크 특성과 상호 검증하였고, 이를 통해 분석 방법의 타당성을 검증하였다.

#### [P15-5]

**수소 플라스마 환원을 통한 페리튬배터리 업사이클링 연구:** 노이준, 김세호, 이창기\*, 이원형, 정두효, 홍석우, 김세호(고려대학교)

**Keywords:** 폐배터리 소재, 수소 플라스마 환원, 친환경 합금 설계

전 세계적으로 탄소중립 달성을 위한 노력이 강화됨에 따라 친환경 에너지에 대한 관심이 지속적으로 확대되고 있다. 이에 따라 이차전지 수요가 급격히 증가하고 있으며, 사용 후 폐배터리의 발생량 또한 빠른 속도로 늘어나고 있는 실정이다. 차세대 폐배터리 재활용 기술은 환경 부담과 원자재 공급 불안정 문제를 동시에 완화할 수 있으며, 특정 국가에 편중되어 매장된 양극재 핵심 원자재에 대한 해외 수입 의존도를 낮출 수 있다는 점에서 그 중요성이 더욱 강조되고 있다. 본 연구는 페리튬이온배터리 양극재를 수소 분위기에서 아크 플라스마를 활용하여 환원함으로써 합금을 제조하는 공정에 관한 것이다. 수소 분위기에서 형성되는 고온의 아크 플라스마를 이용하여 양극재에 포함된 유가금속을 효과적으로 회수할 수 있을 뿐만 아니라, 다양한 합금을 단일 공정으로 설계할 수 있는 가능성을 제시한다.

#### [P15-6]

**고압수소 및 액화수소 환경에서 SP(Small Punch)시험을 통한 오스테나이트계 스테인리스강의 수소취성 평가:** 박준호, 신희철(한국재료연구원, 영남대학교), 이종석, 이시환, 이승건\*(한국재료연구원), 강시현(영남대학교)

**Keywords:** 수소취성, 스테인리스강, 고압수소, 액화수소, Small Punch 시험

탄소 중립을 위한 수소 경제 확대와 인프라 구축에 있어 수소 저장 및 운송 장비의 안전성 확보가 중요해지고 있다. STS 304L과 316L은 기계적 물성이 우수하고 수소확산계수가 낮아 수소 저장 및 운송 장비에 사용되지만, 수소 환경에 노출됨에 따라 강도, 연성 등의 기계적 물성이 저하되는 수소취성(Hydrogen Embrittlement) 현상이 발생하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 고압수소 및 액화수소 환경에서 오스테나이트계 스테인리스강의 수소취성 여부를 평가하기 위하여 SP시험을 수행하였다. SP 시험은 직경 8 mm, 두께 0.5 mm 크기의 시편을 사용하기 때문에 시험편 수량 확보가 수월하고 국부적 물성 평가에도 적합하며, ASTM E3205에 관련 표준이 제정된 신뢰성 높은 시험평가 방법이다. 본 연구에서는 고압수소 및 액화수소 환경에서 SP시험이 가능하도록 장비를 설계·제작하여 수소장입 정도에 따른 수소취성 평가를 수행하였다. 또한 SP시험 전후의 미세조직 관찰과 파면 분석을 통해 수소취성에 의한 기계적 거동 변화를 분석하였으며, SP시험과 표준인장시험 결과를 상호비교하여 SP시험이 오스테나이트계 스테인리스강의 수소취화 거동을 정량적으로 평가, 분석할 수 있는 효과적인 방법임을 검증하였다.

#### [P15-7]

**수소 흡장에 따른 수소저장합금 입자 팽윤과 용기 내부 거동 시뮬레이션:** 배상환(한국생산기술연구원, 서울과학기술대학교), 선현덕(한국생산기술연구원, 고려대학교), 변종민\*(서울과학기술대학교), 하태준\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** HESS, 수소저장합금, Pressure-Composition-Isotherm (PCI), Python Simulation

금속수소화물(MH) 저장배트는 수소 흡장 과정에서 입자 및 격자 수준의 체적 팽윤이 누적되며, 제한된 용기 내부에서 자기 잠금(self-locking), 공극률 변화 및 용기 벽면 응력 집중을 유발할 수 있다. 이는 대형 MH 저장 시스템의 안전성과 성능(열·물질전달, 반복 안정성)을 좌우하나, 실제 용기 내부에서 입자 충전 구조의 시간(또는 단계)별 변화를 직접 관찰하기 어렵다는 한계가 있다. 본 연구에서는 AB<sub>2</sub>계 저장합금의 PCT(pressure-composition-temperature) 거동을 기반으로, 수소 주입에 따른 평형 상태(압력-조성)를 단계적으로 계산하고 이를 입자 팽윤-충전 구조 변화로 연결하는 파이썬 시뮬레이션 프레임워크를 개발하였다. PCT로부터 조성에 따른 평형압(lnP-x)을 모델링하고,  $\alpha/\beta$  상 공존 구간에서는 \*\*레버룰을 이용해 상분율( $\alpha_{frac}$ ,  $\beta_{frac}$ )\*\*을 산출하였다. 또한 조성과 상분율에 따라 체적 팽윤(dv)을 계산하고 \*\*유효 입자 반경( $r_{eff}$ )\*\*에 반영하여, 원통형 용기 내 입자군의 겹침을 완화(relaxation)하면서 단계별 중심좌표(centers)와 최 근접거리 분포를 저장·가시화하였다. PCT 기반 설계·해석은 저장합금의 평형 거동을 체계적으로 정량화 하는 표준 방법으로, 본 시뮬레이션의 열역학 입력으로 사용될 수 있다.

**[P15-8]**

**Fabrication of Durable Nanoframe-Structured Porous Mg-Based Alloys via Vapor-Phase Dealloying for Hydrogen Storage:**  
 HyeonJi Kim(KAIST), Byeong-Chan Suh(KIMS), Eun Seon Cho\*(KAIST)

**Keywords:** Hydrogen storage, Mg-based alloy, Porous structure, Vapor-phase dealloying

Efficient hydrogen storage is essential for implementing stable hydrogen energy systems. Mg is a promising candidate due to its high  $H_2$  capacity (7.6 wt%), reversibility, and natural abundance. However, Mg suffers from intrinsic limitations including sluggish hydrogen sorption kinetics and high thermodynamic stability of  $MgH_2$ . To address these issues, alloying and structural engineering have been explored as effective strategies. In alloying approaches, multiphase Mg-based alloys enhance hydrogen sorption properties by providing nucleation sites, diffusion pathways, and thermodynamic tuning that destabilizes  $MgH_2$ . Structural engineering offers an additional route to improve hydrogen storage performance. Among various structural designs, porous architecture allows efficient hydrogen transport, large reactive surface area, and high thermal conductivity through interconnected networks. Furthermore, nanosized metal struts provide nanoscaling effects without using scaffolds, which avoids capacity loss from dead mass and facilitates sorption kinetics through reduced diffusion lengths. Despite these advantages, conventional dealloying methods such as electrochemical, chemical, and liquid metal dealloying rely on corrosive agents that induce oxidation, resulting in degradation of hydrogen storage performance. In addition, even when porous structures are successfully generated, repeated high-temperature hydrogen cycling can induce structural collapse, indicating limited durability. Here, we present a new approach to fabricate stable nanoframe-structured porous Mg alloys via vapor-phase dealloying. This method exploits differences in vapor pressure among alloy components to selectively remove sacrificial elements, generating porous structures without using liquid media. The solvent-free vacuum environment provides reductive conditions that effectively prevent surface oxidation. Moreover, relatively high processing temperatures (300-500 °C) lead to thermodynamically stable frameworks, which are expected to maintain structural integrity during repeated hydrogen cycling. Ni was introduced to provide both alloying and catalytic effects to improve hydrogen sorption properties, and strengthen interactions with Mg to suppress Mg vaporization. Zn, possessing a higher vapor pressure than Mg, was employed as a sacrificial element to ensure sufficient Mg retention after dealloying. By adjusting the composition of parent alloy and dealloying conditions, the morphology and phase of the resulting porous Mg-based alloys can be tuned. This study offers insights into the design of durable porous metals and the relationship between structure, phase, and hydrogen storage performance.

**[P15-9]**

**SSRT 및 TDS 분석을 이용한 QP980강과 DP980강의 수소취성 거동 및 파단 메커니즘 비교:** 박규원, 김혜진\*(한국공학대 학교)

**Keywords:** 첨단고강도강(AHSS), QP강(Quenching and Partitioning), DP강(Dual Phase Steel), 수소취성(Hydrogen Embrittlement), 변형률(Strain Rate)

자동차 산업에서 충돌 안전성과 경량화를 동시에 만족시키기 위해 DP강(Dual Phase steel) QP강(Quenching and Partitioning)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. 따라서 미세조직적 특성과 수소 거동의 상관관계를 이해하고, HE 저항성 평가를 통해 강종 특성에 맞는 미세조직 전략을 수립하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 강도 1.0 GPa급 DP강과 QP강의 수소 취성 저항성을 비교 평가하였다. 두 강종에 대해 서로 다른 세 가지 수소 차징 시간 조건으로 전기화학적 수소 주입을 수행하였다. 시편 내 수소 함량 제어 후 SSRT(Slow Strain Rate Tensile) 시험을 통해 유입 수소에 따른 기계적 특성 저하를 평가하고, TDS(Thermal Desorption Spectroscopy) 분석을 통해 검출 수소량 및 수소 트랩 특성을 정량적으로 분석하였다. 또한 SEM(Scanning Electron Microscopy) 및 EBSD(Electron Backscatter Diffraction) 분석을 통해 두 강종의 미세조직 특성을 비교하고, 파면 관찰을 통해 연성 및 취성 파괴 양상과 수소 보조 파괴 거동을 규명하였다. 특히 DP강의 페라이트-마르텐사이트 이중상 조직 및 QP강의 잔류 오스테나이트가 수소 트래핑, 균열 개시 및 전파 거동에 미치는 영향을 중점적으로 분석하였다. 기계적 시험, 수소 정량 분석 및 미세조직 분석 결과를 종합하여, 본 연구는 DP강과 QP강의 미세조직 차이에 따른 수소취성 감수성의 차이를 규명하고, 자동차용 AHSS의 수소취성 저항성 향상을 위해 최적화된 미세조직 구성을 규명하고자 한다.

**[P15-10]**

**템퍼드 마르텐사이트강의 수소취성에 미치는 Nb와 Ti 첨가의 영향:** 최수환, 정민섭, 김상규, 황병철\*(서울과학기술대학교)

**Keywords:** Tempered martensitic steel, Hydrogen embrittlement, MC carbide, Thermal desorption analysis (TDA)

수소 에너지 인프라가 구축됨에 따라 수소 저장 및 운송에 적합한 구조 재료의 수요가 증가하고 있다. 템퍼드 마르텐사이트강은 우수한 강도와 연성을 가져 수소 인프라용 구조재로서 널리 사용되고 있으나 수소 환경에 노출 시 전위, 결정립계와 같은 가역적 수소 트랩 사이트를 따라 수소가 확산하면서 수소취성이 발생할 수 있다. 수소 인프라에서 강재의 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 고강도와 함께 내수소취성이 우수한 미세조직을 구현하는 것이 중요하다. 이를 위해 비가역적 수소 트랩 사이트로 작용하는 MC 탄화물을 석출시켜 수소의 확산을 지연시키거나 템퍼링 열처리를 통해 가역적 수소 트랩 사이트로 작용하는 전위의 밀도를 감소시키는 등 수소취성을 저감하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 기존 연구들은 대부분 미량 합금 원소의 개별적인 첨가 또는 열처리 조건이 수소취성에 미치는 영향을 개별적으로 연구하였으나, 본 연구에서는 이들의 복합적인 영향을 체계적으로 분석하고자 하였다. 본 연구에서는 Nb 및 Ti 첨가와 템퍼링 온도를 달리한 다양한 템퍼드 마르텐사이트강을 제조하였으며, 각 강재에 대해

전기화학적 수소주입 환경 하에서 수소주입과 동시에 저속변형률시험을 수행하였다. 이를 통해 수소취성 저항성을 평가하였으며, 열탈착 분석(Thermal desorption analysis, TDA)을 수행하여 MC 탄화물과 수소 트랩 간의 상호작용을 규명함으로써 Nb와 Ti 복합 첨가의 효과를 체계적으로 분석하고자 하였다.

#### [P15-11]

**TiFe계 수소저장합금의 초기수소화 개선을 위한 바나듐 및 란타넘 복합 첨가의 시너지 메커니즘 연구:** 이재윤(한국과학기술연구원, 성균관대학교), 김윤석(성균관대학교), 심재혁\*(한국과학기술연구원)

**Keywords:** 수소재료, TiFe, 희토류

수소 에너지의 상용화를 뒷받침할 안전하고 효율적인 저장 매체 개발은 수소경제 체제로의 전환을 위한 선결 과제이다. TiFe 합금은 높은 체적 저장 용량과 작동 압력의 적절성, 원소의 풍부한 매장량 덕분에 차세대 수소 저장 소재로 주목받고 있으나, 표면의 강한 산화층으로 인해 발생하는 가혹한 초기수소화 조건이 실제 산업 응용의 주요 장애물로 작용하고 있다. 본 연구에서는 이러한 활성화 장벽을 근본적으로 낮추기 위해 금속 원소인 바나듐(V)과 란타넘(La)을 전략적으로 첨가하여 그 특성 변화를 관찰한다. 란타넘은 희토류 금속 중에서도 우수한 가격 경쟁력을 보유하여 합금의 경제성을 유지하면서도, 기질 내에서 미세한 제2상을 형성해 수소 확산을 돕는 촉매 역할을 수행함으로써 표면 활성화 거동을 효과적으로 개선한다. 이와 동시에 바나듐은 TiFe 결정 구조 내 Fe 사이트를 치환함으로써 격자 상수를 미세하게 조정하고, 수소 원자가 격자 내부로 확산할 때 발생하는 에너지 장벽을 낮추어 초기수소화 속도를 극대화한다. 실험적 검증을 위해 압력-조성-온도(Pressure-Composition-Temperature, PCT) 등은 곡선을 측정하고 수소화 속도를 분석한 결과, 바나듐과 란타넘의 복합 첨가는 단일 원소 첨가 시보다 훨씬 온화한 온도 및 압력 조건에서 즉각적인 초기수소화 반응을 유도함을 확인하였다. 이는 란타넘에 의한 표면 반응 경로 확보와 바나듐에 의한 내부 격자 제어가 결합된 강력한 시너지 효과에 기인한다. 본 연구는 란타넘과 바나듐의 복합 첨가로 형성된 미세조직 및 격자 변형이 TiFe 합금의 표면 활성화와 내부 확산에 기여하여, 초기수소화 속도와 온도를 획기적으로 개선하는 데 핵심적인 역할을 함을 제시하고자 한다.

#### [P15-12]

**열처리에 따른 이중상 V-Cu-Ni-Al 합금의 미세조직 제어 및 수소 투과 특성 분석:** 한정훈, 송상윤(고려대학교), 백주현(고려대학교, 한국과학기술연구원), 남정훈, 이건직(고려대학교), 서진유(한국과학기술연구원), 손석수\*(고려대학교)

**Keywords:** 바나듐 합금, 수소 투과도, 전위 회복, Cu 석출물

바나듐 합금은 높은 수소 투과도와 경제성 덕분에 수소 분리막의 유망한 후보로 주목받고 있으나, 수소 취성 및 제한된 가공성으로 인해 실제 응용에는 제약 요소가 되고 있다. 다양한 바나듐 기반 합금 중 dual-phase V-Cu 합금은 연성과 취성 저항성을 개선할 수 있는 유망한 대안으로 떠오르고 있다. 그러나 조성 설계에 대해서는 광범위하게 조사된 것과 달리, 열처리에 의해 유도된 미세조직 변화가 수소 거동에 미치는 영향은 여전히 충분히 이해되지 않은 상태이다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위해  $V_{76}Cu_{15}Ni_2Al_7$  합금으로, 600–800 °C 범위의 소둔 처리가 미세조직 변화 및 수소 거동에 미치는 영향을 체계적으로 규명하였다. 소둔 온도가 상승함에 따라 전위의 점진적 회복과 부분 재결정이 유도되어 전위 밀도가 현저히 감소하였으며, Cu 석출물의 구상화 및 재분포가 동반되었다. 이러한 미세조직적 변화는 수소 트랩 밀도를 낮춤으로써 수소 확산 계수를 약 10배  $0.23 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 에서  $2.45 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  (400 °C)까지 증가시켰으며, 수소 투과도를 크게 향상시켰다. 또한, V상과 Cu상 간의 경도 불일치 완화는 계면 응력 집중을 억제하여 수소 취성 저항성을 향상시켰다. 특히 800 °C 소둔 시편은 125 °C의 저온 환경에서도 파손 없이 안정적인 투과 성능을 유지하며 우수한 기계적 신뢰성을 입증하였다. 본 연구는 회복, 재결정 및 석출물 제어가 바나듐 기반 수소 분리막의 수송 효율과 내구성을 동시에 확보할 수 있는 핵심 설계 전략임을 시사한다.

#### [P15-13]

**Hydrogen Diffusion and Trapping Behavior in Bainite Microstructure of Ferritic steel:** JinHo Park\*(KAERI)

**Keywords:** Hydrogen diffusion, Hydrogen trapping, Bainite

In recent years, more advanced steels with higher strength and heavier wall thickness have been required for various industries. With conventional and simple approach, however, the development cannot be easily achieved since the increase in yield strength (YS) of the steel is no longer avoid forming the low temperature transformation microstructure such as bainite including martensite-austenite (M/A) constituents. Although it is known that the steels with microstructure of bainite or martensite are more susceptible to the HAC failure, there has been limited information with systematic approach for the trapping phenomenon of hydrogen atom. Hydrogen assisted cracking attack has been one of the intriguing problems of high-strength ferritic steel. This attack is primarily associated with hydrogen uptake and transport in the steels, and a substantial body of literature has been devoted to clarify the relationship between the hydrogen diffusion behavior and cracking failure of the steels. Therefore, in this investigation, the hydrogen diffusion and trapping behaviors of several steels with different fraction of bainite in the microstructure are studied by utilizing the electrochemical permeation technique

#### [P15-14]

**Impurity-Resistant Metal Hydride Enabled by Uniform Amorphous Carbon Coatings via Solid-Vapor Synthesis:** Daeun Jung(KAIST), Kouji Sakaki(AIST), Eun Seon Cho\*(KAIST)

**Keywords:** Hydrogen storage, Metal hydride, Surface coating, Amorphous carbon, Impurity resistance

The rapid growth in global energy demand and increasing concerns over climate change necessitate a transition toward sustainable,

low-carbon energy systems. Hydrogen has emerged as a promising energy carrier due to its high gravimetric energy density and environmental benignity. However, the practical realization of a hydrogen-based economy is limited by the lack of safe, efficient, and cost-effective storage technologies. Conventional physical storage systems such as compressed and cryogenic hydrogen storage suffer from low volumetric density, significant energy-consuming process, safety risks, and boil-off gas losses. In contrast, solid-state hydrogen storage materials, particularly metal hydrides, have gained significant attention for next-generation hydrogen infrastructures because hydrogen is stored in the form of chemical compounds, offering high volumetric density, enhanced safety, and long-term stability. Nevertheless, during hydrogen sorption processes, the surface of metal hydrides is readily deactivated by low-purity hydrogen containing impurity gases such as  $O_2$ ,  $CO_2$ , and  $H_2O$ . These impurities strongly adsorb onto the surface, hinder hydrogen dissociation and diffusion, and consequently degrade the initial performance. To mitigate impurity poisoning in metal hydrides, recent studies have focused on composition modification and the introduction of surface coating layers. While atomic substitution is challenging to optimize due to the strong interdependence between hydrogen storage performance and impurity resistance, surface coating strategies offer broader flexibility in terms of material selection and processing. The formation of surface protective layers can be categorized into chemical and physical process based on the nature of interactions between coating layer and metal hydrides. Even though chemical methods can form robust interfacial bonding with enhanced chemical and mechanical stability, their complex procedures limit large-scale implementation. In contrast, physical methods, such as encapsulation by polymers or 2D materials via mechanical mixing, thermal treatment, and ball milling, offer simple, universal, and scalable processes. However, these approaches generally suffer from limited coating uniformity, poor thickness control, and excessive coating coverage. In this research, we present an amorphous-carbon layer-coated metal hydride—adopting  $LaNi_5$  as a model platform—prepared via solid-vapor synthesis strategy that enables the formation of a uniform nanometer-scale protective layer.  $LaNi_5$  particles mixed with a polyaromatic hydrocarbon (PAH) precursor are heated at the elevated temperature under vacuum, resulting in the deposition of amorphous carbon layer. The vaporized PAH precursor maintain a uniform concentration around the alloy particles, leading to homogeneous coating coverage. The resulting microporous amorphous carbon layer enables preferential permeation of hydrogen over impurity, achieving enhanced impurity resistance and cycling stability. Owing to its scalability, process simplicity, and facile control of coating thickness, this approach offers a cost-effective and versatile surface modification. Furthermore, this study presents a vision for an integrated purification-storage system, in which low-purity hydrogen can be directly introduced in metal hydrides immediately after production.

#### [P15-15]

**Zn 도금된 자동차용 초고강도 마르텐사이트강의 부식 거동:** 최호준(한국공학대 학교), 광태양(RUAN co., Ltd.), 김혜진\*(한국공학대 학교)

**Keywords:** 초고강도 마르텐사이트, 합금화 용융아연도금강(GA), 용융아연도금강(GI), 부식

본 연구에서는 자동차용 초고강도 마르텐사이트 기반 미세조직을 갖는 강재를 대상으로, 합금화 용융아연도금강(Galvannealed Steel, GA), 용융아연도금강(Galvanized Steel, GI) 및 비도금재 조건에 따른 특성 차이를 체계적으로 비교·평가하였다. 초고강도강은 차체 경량화와 충돌 안전성 확보를 위해 적용 범위가 확대되고 있으나, 도금층의 미세조직 및 합금상 특성에 따른 장기 침지 환경에서의 부식 거동 차이에 대한 정량적 분석은 여전히 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 염화물 환경에서 침지 시간에 따른 부식 거동 변화를 규명하기 위하여 개방회로전위(OCV), 동전위 분극시험(PD), 전기화학 임피던스 분광법(EIS)을 시간 경과에 따라 수행하였다. 또한 침지 후 시편의 표면 및 단면을 주사전자현미경 (SEM-EDS)으로 관찰하여 도금층의 상조성, 상분포, 계면 특성 및 부식 생성물의 형성과 성장 거동을 분석하였다. 특히 도금층의 치밀도와 상분율, 계면 결합이 국부부식 개시 및 진행에 미치는 영향을 전기화학적 인자와 연계하여 고찰하였다. 이를 통해 GA, GI 및 비도금재 간의 부식 전위, 부식 전류밀도, 분극저항 및 임피던스 특성의 차이를 정량적으로 비교하고, 침지 시간 증가에 따른 내식성 열화 메커니즘을 종합적으로 규명하였다.

#### [P15-16]

**수소 투과 실험과 TDS를 통해 DP강과 QP강의 수소 확산 및 트랩 메커니즘 비교:** 김혜진\*, 김유리(한국공학대 학교)

**Keywords:** QP Steel, DP Steel, Electrochemical hydrogen charging, Hydrogen Diffusivity, Hydrogen Solubility

최근 자동차 산업의 경량화 및 충돌 안전성 향상을 위해 1GPa급 초고강도강인 DP (Dual Phase) 및 QP (Quenching & Partitioning) 강이 수요가 증가하고 있다. 하지만 이러한 강재는 미세 조직의 복잡성이 높고 강도가 증가함에 따라 수소 취성 민감도가 급격히 상승하는 문제를 지닌다. 특히, DP강의 Ferrite+Martensite 구조와 QP강의 잔류 오스테나이트를 포함한 다상 구조는 수소의 확산 및 트랩 거동에서 큰 차이를 보일 것으로 예상되나, 이에 대한 정량적 비교 연구는 부족하다. 본 연구에서는 두 강종의 미세조직 차이에 따른 수소의 확산 및 트랩 메커니즘을 규명하고자 한다. SEM 및 EBSD를 활용하여 각 강종의 상 분율, 결정립 크기, 특히 QP강 내 잔류 오스테나이트의 분포를 분석하였다. Devanathan-Stachurski 셀을 이용하여 수소 투과 곡선을 도출하였다. 이를 통해 Steady-state에 도달하는 포화 시간을 측정하고, 시편 내부의 수소 확산 평형 조건을 확인하였다. 투과 시험에서 도출된 포화 시간과 동일한 시간 동안 각 시편을 Electrochemical hydrogen charging 하였다. 이후 TDS(Thermal Desorption Spectroscopy) 분석하여 수소 방출 피크를 확인하고, 소재 내 불가역적/가역적 수소 트랩 농도를 정량화하였다. 확보된 데이터를 바탕으로 각 강종의 수소 확산 계수(D), 수소 용해도(S), 그리고 수소 투과도( $\Phi$ )를 계산하였다. 특히 QP강의 잔류 오스테나이트가 수소 트랩 사이트로서 확산 지연 및 용해도 증가에 미치는 영향을 예강과 대비하여 고찰하였다. 본 연구 결과는 미세 조직 제어를 통한 수소 취성 저항성 강화 강종 설계의 핵심적인 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.



**[P15-17]**

**수소 환경 모사 방식에 따른 SA372 강의 J<sub>1C</sub> 파괴 거동 평가:** 정수진, 배동화, 강태훈, 이창희, 이정훈\*(포항산업과학연구원)

**Keywords:** 고압 수소 압력 용기 소재, 파괴인성, J<sub>1C</sub>, 전기화학적 수소 주입

최근 탄소 중립 실현을 위해 화석 연료에서 수소 에너지 체계로의 전환이 지속적으로 시도 되고 있는 실정이다. 수소의 안정적인 공급을 위해서는 고압 수소의 저장 및 운송 설비 확충이 필수적으로 요구된다. 이에 따라 압력용기용 강재의 수소 환경 하 안정성 및 신뢰성 확보를 위해 많은 실험들이 진행되어져 왔으며 지속적으로 데이터베이스를 확보할 필요성이 있다. 고압 수소 저장 용기의 안전성 확보를 위해서 소재의 수소취성 저항성 평가는 필수적이며 추가적으로 노치인장, 피로, 충격, 파괴인성 등의 정적, 동적 물성이 모두 요구된다. 본 연구에서는 고압 수소 압력 용기 소재인 SA372 강재를 이용하여 수소 환경 모사 방식에 따른 J<sub>1C</sub>, 탄소소성 파괴인성 특성 변화를 예측하고 그 유효성을 검토하고자 한다. 본 연구의 실험은 ASTM E1820 규격에 따라 CT(Compact Tension) 시편을 이용하여 수행되었으며, 전기화학적 수소 주입법을 활용하여 수소에 의한 물성 저하를 평가하였다. 먼저, 수소 충전 전의 파괴인성 시험 결과를 바탕으로 수소 예비 주입 후 시험(ex situ) 및 수소 주입과 동시에 시험(in situ) 환경에서의 파괴인성 변화를 관찰하였다.

**[P15-18]**

**배관용 탄소강관 재료의 수소 환경에서 물성 변화 확인을 위한 스크리닝 평가:** 이민경\*, 김부승, 강승규(한국가스안전공사)

**Keywords:** 수소배관, API 5L X, 탄소강관, 스크리닝

앞으로 수소 사회에서 배관을 통한 수소 공급, 운송, 활용은 현재의 천연가스의 배관망 공급과 같이 사회 전반에 중요한 인프라 중 하나가 될 것이다. 정부는 수소경제이행계획을 통해 수소 배관을 통한 수소 공급만 구축에 대해 계획한 바 있으며, 최근 몇 년 간 국가 R&D사업에서 또한 수소배관은 중요한 연구 주제 중 하나가 되어 왔다. 수소가 갖는 물리 화학적 특성은 대표적으로 빠른 연소 속도, 넓은 폭발 범위, 금속 재료의 수소 취성 등의 특징이 있어 안전한 활용을 위해서는 이에 대한 체계적인 안전관리가 필요한 것이 사실이다. 최근 한국가스안전공사의 법정 검사 코드인 KGS 코드에서는 26년 2월 수소 배관의 최소 두께 설계에 수소취성에 대한 고려가 등장 하기도 하였다. 이에 따라, 본 연구에서는 수소 배관의 수소 취성평가의 방법 중 하나인 수소환경에서 배관 재료의 인장시험에 따른 재료의 인장강도 변화를 확인하고자 하였다. 수소 배관의 운전 압력 조건이 80~100 기압 환경에서 시험을 수행하였으며, 그 결과 재료의 물성 변화를 확인할 수 있었다. 이를 통해 배관 재료의 수소 환경에서 1차 적합성을 확인할 수 있었으며, 향후 다양한 데이터 베이스 구축을 통해 수소 배관의 안전한 활용을 위한 근거로 사용될 수 있을 것이라 기대한다. \*본 연구는 2022년도 산업통상자원부의 제원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(NO.20223030040090)

**[P15-19]**

**AB2 Laves 상 합금의 기계적 특성과 히스테리시스 및 초기 수소화 속도의 상관관계:** 이도성, 이영수\*(한국과학기술연구원)

**Keywords:** 금속 수소화물 수소 압축기, AB2 Laves 상 합금, 히스테리시스, 초기 수소화 속도, 기계적 특성, 경도

수소 경제를 실현하기 위해서는 안정적이고 효율적인 수소 공급 인프라가 필수적이다. 예를 들어, 자동차와 산업 장비로의 수소를 공급을 위해 350 - 900 bar까지의 압축이 요구된다. 큰 유지보수 비용 및 수소 오염의 한계를 가지는 기존 기계식 압축기의 대안으로서 금속 수소화물 수소 압축기가 주목받고 있다. 적용 가능한 금속 수소화물 중 원소 치환을 통해 조성 제어가 용이하여 광범위한 평형압을 구현할 수 있는 AB2계 Laves 상 합금이 주로 연구되고 있다. 목표 평형압을 충족하는 조성을 선별하기 위해, 전통적으로 시행착오 기반의 실험적 접근이 사용되어 왔으며, 최근에는 머신러닝, 전산 열역학, 밀도범함수 이론 같은 첨단 기법이 평형압 예측을 위해 활용된다. 그러나 평형압 조건을 충족하더라도, 실제 압축기 효율과 성능을 결정하는 열역학적 비이상성(히스테리시스, 평탄부 경사)과 비평형 거동(수소화 속도)으로 인해 실용화에 실패하는 조성이 상당수이다. 비이상-비평형 거동을 예측할 수 있는 도구가 부재하여 실험적 시행착오에 여전히 의존하게 된다. 이러한 거동들은 재료의 기계적 특성에 의해 영향 받는다. 히스테리시스는 격자 전단 및 결함 생성으로 인해 비가역적으로 소모된 소성일이 원인 중 하나로 알려져 있다. 한편, 초기 수소화 과정에서 수소화물이 형성되면서 급격한 체적 팽창으로 인해 분말화가 발생한다. 이때 재료의 기계적 특성에 따라 분말화 정도가 결정되며, 증가된 표면적은 수소화 속도를 향상시킨다. 재료의 기계적 특성 중 경도는 소성 변형 저항을 반영하는 대표적 지표이다. 따라서, 본 연구는 AB2 Laves 상 합금을 대상으로 비이상-비평형 거동 예측을 위한 기초 데이터를 확보하기 위해서, 경도와 히스테리시스 및 초기 수소화 속도의 관계를 실험적으로 규명하는 것을 목표로 한다.

**[P15-20]**

**유도 가열 방식을 적용한 금속수소화물 반응기의 수소화 거동 특성 연구:** 김희상, 지성화\*((주)펄스터)

**Keywords:** 수소 저장, 금속수소화물, 유도 가열, 구조 해석

본 연구에서는 금속수소화물 저장 시스템의 고질적인 열전달 한계를 극복하기 위해 유도 가열 공정을 적용한 반응기를 설계하고 성능을 평가하였다. 열효율 극대화를 위해 내부에는 강자성체인 페라이트 코어를, 외부 용기는 상자성체인 SUS316L을 적용한 이중 소재 설계를 채택하였다. 구조 해석을 통해 60 bar 내압 조건에서 고온 안전을 1.6 이상을 확보하여 구조적 건전성을 검증하였다. Mg-20Ni 계열 합금 2.7 kg을 장입하여 실험한 결과, 초기 활성화 공정을 통해 최대 4.55 wt.%H<sub>2</sub>의 수소 저장 용량을 확인하였다. 또한, 방출 온도를 425°C로 최적화하여 잔존 수소 문제를 해결함으로써 평균 4.16 wt.%H<sub>2</sub> 이상의 가역 저장 성능을 달성하였다. 본 결과는 유도 가열 기술이 대용량 수소 저장 시스템의 열관리 문제를 해결할 수 있는 효과적인 대안임을 시사한다.

**[P15-21]**

**SUS304 오스테나이트계 강의 수소에 의한 취성 거동 및 EPT를 통한 물성 회복:** 윤재원, 이진규, 이태경\*(부산대학교)

**Keywords:** SUS304, EPT, 수소취성

SUS304 오스테나이트계 스테인리스강은 우수한 내식성과 기계적 성질을 바탕으로 최근 친환경 선박 및 해양 구조물의 핵심 소재로 주목받고 있으나, 극저온 환경이나 장시간 수소 노출 조건에서 수소 취성에 의한 갑작스러운 파손 위험이 제기되고 있다. 이러한 문제는 소재의 신뢰성을 저해하기에, 해결해야 할 요소로 꼽힌다. 본 연구는 음극 전해 장입 방식을 이용하여 가공된 SUS304 강재의 인장시편에 수소를 침투시켜 그 깊이와 그에 따른 미세조직 변화를 정밀 분석하였다. 0.1N NaOH + 3g/L Ammonium thiocyanate 수용액 내에서 전류밀도  $-50\text{A/m}^2$ 의 조건에서 수소장입을 진행하였으며, 높은 수소 확산 계수를 확보하기 위해 온도  $80^\circ\text{C}$ 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 연성을 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. 이는 내부 트랩 수소의 이탈과 미세조직 안정화의 효과로, EPT 처리를 통해 기존의 열처리 방식 대비 단시간 내에 소재 물성 회복 가능성을 제시하였다.

**[P15-22]**

**수소 배관용 탄소 강관 재료의 1차 스크리닝 분석을 통한 기준 마련 기초 연구:** 김부순, 이민경\*(한국가스안전공사)

**Keywords:** 내수소취성 평가, 고압 수소환경, 탄소강관, 노치 인장시험, 평가기준 개발

수소에너지 인프라 확대와 함께 수소의 대규모 생산 및 활용이 증가함에 따라 장거리 수소 운송 방식에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 수소 수요 증가에 대응하기 위한 운송 수단으로 배관을 활용한 수소 이송은 경제성과 연속 운전 측면에서 효율적인 방법으로 평가되고 있으며, 이에 따라 수소 배관용 재료의 고압 수소환경에서의 영향성 평가와 기초 데이터 확보의 중요성이 증가하고 있다. 고압 기체수소 환경에서는 수소취성에 따른 기계적 성능 저하 가능성이 존재하므로, 배관 재료의 수소 환경 거동에 대한 사전 검토가 요구된다. 본 연구에서는 API 5L 계열 탄소강 배관 재료를 대상으로 고압 수소환경에서의 거동을 분석하고, 1차 스크리닝 분석을 통해 재료 평가 접근방안 검토를 위한 기초 연구를 수행하였다. 1차 스크리닝 평가는 KGS CODE AC 111을 기반으로 수행되었으며, 노치 인장시험 및 RRA 평가 등 내수소취성 특성 분석 시험을 적용하여 재료의 수소 환경 민감도를 비교·분석하였다. 이를 통해 재료별 기계적 거동 특성을 정량적으로 검토하고, 향후 평가 항목 설정을 위한 기초 참고자료 수준의 결과를 도출하였다. 본 연구는 수소 배관용 탄소강 재료의 고압 수소환경 영향성에 대한 초기 분석 사례를 제시하는 것으로, 향후 추가적인 연구 및 검증에 위한 기초 데이터로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구는 2023년도 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원(KAIA)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(RS-2023-00245737)

**[P15-23] Canceled**

Surface-Engineered CoNiFe Integrated with Stabilized  $\text{Ti}_3\text{C}_2$  MXene for High-Performance and Cost-Efficient AEM Water Electrolysis: Bee lyong Yang\*, Mallappa Mahanthapa, Sk Samim Akhter, Ahmad Shahbaz(Kumoh National Institute of Technology, GHS Co., Ltd), Soon Yong Kweon(GHS Co., Ltd, Korea Transportation University)

**Keywords:** HER, OER, Catalysis, AEMWE, Green Hydrogen

The replacement of precious-metal catalysts with efficient, durable, and earth-abundant alternatives is essential for cost-effective green hydrogen production in anion exchange membrane water electrolyzers (AEMWEs). However, sluggish oxygen evolution reaction (OER) kinetics remain a major bottleneck limiting device performance. Herein, we report an electrochemically deposited CoNiFe/ $\text{Ti}_3\text{C}_2$  MXene composite catalyst featuring engineered interfacial electronic interactions that modulate water-splitting pathways and accelerate reaction kinetics. The optimized CoNiFe/ $\text{Ti}_3\text{C}_2$  MXene electrode achieves a low OER overpotential of 200 mV at  $50\text{ mA cm}^{-2}$  and an ultralow activation energy of  $9.7\text{ kJ mol}^{-1}$  in 1.0 M KOH, indicating rapid intrinsic kinetics. Mechanistic analysis reveals that interfacial charge redistribution lowers the energy barrier for  $\text{OOH}^*$  intermediate formation, thereby facilitating faster OER turnover. To demonstrate practical viability, a six-cell AEMWE stack was assembled and evaluated under realistic operating conditions, confirming the catalyst's scalability and suitability for high-performance, large-area hydrogen production. Acknowledgments: This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) under project number 202100390004. KIT Project. This research is funded by the Small and Medium Business Technology Information Promotion Agency (project number 202402570002). This research was conducted with the support of the Korean government (Ministry of SMEs and Startups) and the research grant from the Korea Institute for Advancement of Technology and Information Technology (RS-2025-25441326).

**[P15-24]**

**Improved Poisoning Tolerance of Metal Hydrides via Facile Surface Nitriding Modification for Practical Hydrogen Storage:**

Yujin Moon, Hyun Cho(KAIST), Kouji Sakaki(AIST), Eun Seon Cho\*(KAIST)

**Keywords:** Hydrogen storage, Metal hydrides, Surface nitriding, Impurity gases, Poisoning tolerance

Hydrogen is emerging as a promising energy carrier due to its high gravimetric energy density and its potential role in renewable energy systems. Metal hydrides enable hydrogen storage under milder pressures and temperatures than conventional compressed or

cryogenic tanks owing to strong metal-hydrogen bonding, offering superior safety and high volumetric density. However, hydrogen uptake in metal hydrides is significantly impeded by surface deactivation in the presence of impurity gases such as  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ , and  $H_2O$ . These contaminants preferentially adsorb onto the metallic surface, forming stable oxide or carbonate layers that block active sites for hydrogen adsorption and dissociation. As a result, hydrogen absorption kinetics and usable storage capacity deteriorate during repeated cycles. Introducing a surface protection layer that is tolerant to impurities while selectively permeable to hydrogen is a promising strategy to mitigate surface deactivation. However, conventional Pd-based and polymer coatings suffer from strain-induced cracking and thermal decomposition, respectively, limiting their long-term durability and practical applicability. In this study, we developed a surface-modified hydrogen storage system—using ZrNi and HfNi as a model metal hydride—by forming a thin nitride layer via a simple gas-phase nitriding process. A dense and uniform nitride layer was successfully generated on the alloy surface through a controlled thermal nitriding process. The resulting  $ZrN_x$  and  $HfN_x$  layers effectively suppress deceleration of hydrogen absorption kinetics in an impurity-containing gas environment during repeated cycling, in contrast to the unmodified counterparts. These findings indicate that the surface nitride layer significantly improves poisoning resistance while preserving the intrinsic hydrogen storage properties of the underlying ZrNi and HfNi matrices by allowing selective hydrogen permeation. This work suggests that a simple nitrogen-based surface modification represents a robust and scalable strategy for improving the long-term durability of Zr- or Hf-containing hydrogen storage materials under chemically demanding impurity conditions.

## P16 : 전산재료과학

Room 3층 로비, 4월 29일

### [P16-1]

Unraveling the Synergistic Stability and Activity of  $\text{MnMoO}_4$  via Vacancy-Mediated Anion Engineering: A Density Functional Theory Study: Chaeun Lim, Byung Hyun Kim\*(Hanyang University ERICA)

**Keywords:** DFT (Density Functional Theory), Hydrogen Production, HER, catalyst

Developing efficient and acid-stable electrocatalysts from earth-abundant transition metal oxides is a critical challenge for sustainable hydrogen production. While manganese molybdate ( $\text{MnMoO}_4$ ) is a promising candidate due to its redox capabilities and structural tunability, its practical application in acidic media is often hindered by poor intrinsic conductivity and limited chemical stability. To overcome these challenges, a dual-step phosphorization and sulfurization strategy has been proposed experimentally to engineer the surface active sites. Although this approach yields significant performance gains, the fundamental atomic-scale mechanisms driving these improvements have remained elusive. In this work, we employ density functional theory (DFT) to elucidate the theoretical origins of the superior performance observed in P/S-co-doped  $\text{MnMoO}_4$ . Our calculations reveal that this vacancy-mediated anion engineering induces a synergistic effect that enhances both structural stability and catalytic activity. We find that phosphorus incorporation thermodynamically promotes the formation of oxygen vacancies, which are subsequently stabilized by highly exothermic sulfur occupation. This cooperative mechanism creates a robust heteroatom-enriched framework that is resistant to degradation in harsh acidic environments. Furthermore, electronic structure analysis demonstrates that the coexistence of P and S optimizes the orbital hybridization of the active sites, resulting in a near-ideal hydrogen adsorption free energy ( $\Delta G_{\text{H}^*}$ ). These results confirm that P/S co-doping not only stabilizes the crystal structure but also significantly lowers the thermodynamic barrier for the hydrogen evolution reaction, offering clear theoretical guidance for the design of durable oxide-based electrocatalysts.

### [P16-2]

Structural Evolution for Porous Zeolite-templated Carbon (ZTC): ALISHER FATKHULLOEVI(IBS, UNIST), Daniel Hedman\*(IBS), Madi Arsakay, Rodney S. Ruoff\*(IBS, UNIST)

**Keywords:** zeolite-templated carbon, atomic structure, surface curvature, zeolite pore accessibility degree, zeolite pore size

As synthesized Zeolite-templated carbon (ZTC) never yields entirely templated trivalently-bonded carbon throughout all pores of the zeolite used, and this has been said to be due to restricted pore accessibility and transport limitations during carbon deposition. Although modeling of ZTC has been studied, to the best of our knowledge, the causes for not achieving a “complete ideal structure” have not been reported. For FAU zeolite we propose one cause to be the deficiency of carbon atoms in one of its narrower pore regions: the “pore neck” region. We performed curvature-guided, statistically sampled carbon deletion in a ZTC structure of 800 atoms by targeting neck (negative local Gaussian curvature) versus supercage (positive curvature) regions, generating five independent realizations per reduction level for each region. We found that DFTB+-relaxed structures with the carbon deficient neck regions consistently yield lower per-atom formation energies (referenced to graphite) than missing C atoms in the supercage. Our model compares very well with parameters obtained from gas adsorption data, such as interior and exterior volumes and surface areas of the ZTC [Ref. 1]. We also conducted a separate modeling of the growth of templated porous carbons on various zeolites with the quantitative control over the “zeolite pore accessibility degree” (“ZPAD”). We define a ZPAD and impose it in simulations by varying the minimum-distance acceptance threshold for carbon insertion/ deposition. This provides a steric, probe-like control of how much pore space is effectively accessible for growth. We used hybrid interactions (MLFF for C-C, Tersoff for Si-O, and Lennard-Jones for C-Si/C-O), and it is the first time to utilize the state-of-the-art MLFF specifically GAP-20[Ref. 2] for C-C in ZTC growth that enabled us to accurately grow ZTC structures of 10, 000 atoms for hundreds nanosecond timescales. We model ZTC growth within EMT, BEA\*, FAU, ZEO-1 (JZO), ZEO-3 (JZT), and IRY (ITQ-40) across multiple deposition rates and temperatures. ZPAD is a dominant control parameter in the smaller-pore zeolites (EMT/BEA\*/FAU), while in extra-large pore zeolites (ZEO-1/ZEO-3/IRY) its effect becomes topology-dependent. These findings connect zeolite accessibility and topology to templation outcomes, and they guide selection of hosts and growth conditions to target complete or more complete templation. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1). [Ref. 1] Arsakay, M.; Shen, B.; Chen, X.; Xiong, H.; Duisenova, K.; Fatkhulloev, A.; Vomdran, C.; Yang, G.; Annageldyyev, B.; Lee, S. H.; Seong, W. K.; Thommes, M.; Wei, F.; Ruoff, R. S. Study of evolution of three-dimensional porous structure in zeolite-templated carbons. Carbon 2025, 242, 120431. [Ref. 2] I. P. Rowe, V. L. Deringer, P. Gasparotto et al., J Chem Phys 153 (2020) 034702.

### [P16-3]

Gelation Kinetics of Block Copolymer Systems Tracked by Self-Diffusivity in DPD Simulations: JIN HOON KIM, 서범준\*(서울과학기술대학교)

**Keywords:** MD simulation, 전산화학, 고분자, Block copolymer, DPD

In block copolymer systems, the self-diffusion coefficient  $D$  serves as a direct kinetic indicator of phase transitions and gelation. As

an initially mixed state evolves into a structured state, domains form and grow, causing molecular mobility to shift; D can exhibit a pronounced variation near the phase-separation boundary and typically decreases as chain motion becomes increasingly constrained during domain development. Tracking D along this pathway therefore enables a quantitative assessment of gelation progress. Here, we employ dissipative particle dynamics (DPD) to capture these kinetics within a coarse-grained framework. Because DPD conserves momentum, it preserves hydrodynamic interactions and offers stable time integration over mesoscopic scales, making it well-suited for simulating self-assembly, phase separation, and network formation in solution. This approach allows us to measure time-resolved changes in D during the transition from a mixed state to a percolated structure, and to interpret mobility reduction as an emergent consequence of connectivity buildup. We construct coarse-grained models of triblock copolymers in aqueous solution, where gelation is induced by temperature and concentration changes, and compare systems with distinct molecular architectures to determine how design choices alter the self-assembly pathway and the rate of network formation. Beyond D tracking, we quantify cluster growth and connectivity descriptors to link transport signatures to evolving morphology. By correlating the temporal evolution of D with measures of aggregation and connectivity, this work identifies molecular factors that govern gelation kinetics in triblock copolymer solutions.

#### [P16-4]

Two-Dimensional Electrides as Promising Anode Materials for Sodium-Ion Batteries: A First-Principles Study: SEULBI KIM, Bo Gyu Jang\*(Kyung hee Univ.)

**Keywords:** DFT, 나트륨 이온 배터리, 음극 재료, Nudged Elastic Band, 이차원 물질

In this study, we investigate the potential of two-dimensional (2D) electrides, specifically  $\text{Ca}_2\text{N}$ ,  $\text{Sr}_2\text{N}$ ,  $\text{Ba}_2\text{N}$ , and  $\text{BaCu}$ , as high-performance anode materials for next-generation sodium-ion batteries (SIBs) using density functional theory (DFT) and nudged elastic band (NEB) methods. While graphite is the conventional anode for lithium-ion batteries, it is fundamentally unsuitable for sodium storage due to significant volume expansion (exceeding 10%) and thermodynamic instability during Na intercalation. In contrast, our calculations reveal that these electrides exhibit remarkably superior structural stability with minimal volume change upon sodium insertion, significantly lower than that of graphite. Furthermore, NEB analysis demonstrates that these materials possess exceptionally low diffusion barriers for Na-ion migration, indicating fast charge-discharge kinetics. Our findings suggest that electrides are highly promising candidates for overcoming the current limitations of sodium-ion battery technology, offering a robust and kinetically efficient alternative to carbon-based anodes for SIBs.

#### [P16-5]

딥러닝(U-Net) 기반 초내열합금 석출 미세조직 분석 및 FEM 연동 기계적 물성 예측 연구: 이지혁, 백재영, 진훈, 김수환, 김은아, 이학성\*(동아대학교)

**Keywords:** 초내열합금, U-net, 석출물

초내열합금(Superalloy)의 고온 기계적 특성은 기지 조직 내에 석출되는 강화상인 Gamma prime 석출물의 크기, 형태, 분포 및 체적 분율에 의해 크게 좌우된다. 기존의 미세조직 평가는 연구자의 수동적인 이미지 분석에 의존하여 다량의 데이터를 처리하는 데 한계가 있으며, 미세조직적 특성을 거시적인 기계적 물성으로 직결시키는 정량적 연계가 부족하다. 이에 본 발표에서는 합성곱 신경망 기반의 이미지 분할 모델인 U-Net을 활용하여 미세조직을 정량적으로 해석하고, 이를 유한요소법(FEM)과 연동하여 응력-변형률 곡선(Stress-Strain Curve)을 도출하는 통합 예측 모델을 구성하였다. 본 발표에서는 초내열합금의 전자현미경 이미지를 학습 데이터로 구축하고, U-Net 아키텍처를 적용하여 복잡한 기지조직으로부터 마이크로 스케일의 석출물을 자동으로 분할(Segmentation)하는 과정을 거쳤다. 이를 통해 석출물상의 크기 분포, 체적 분율, 입자 간 거리 등 미세조직의 핵심 기하학적 인자들을 높은 정확도로 추출하였다. 나아가 도출된 미세조직 정량 데이터를 바탕으로 실제 미세조직을 반영한 대표 체적 요소를 생성하고, FEM 기반의 미세역학(Micromechanics) 시뮬레이션을 수행하였다. 결과적으로 석출물의 크기 및 분율 변화가 소재의 국부적 응력 집중, 항복 강도, 그리고 가공 경화 거동에 미치는 영향을 반영하여 신뢰도 높은 응력-변형률 곡선을 성공적으로 예측하였다. 본 발표에서 제시한 방법론은 비전 인공지능 기술과 전산재료과학을 융합함으로써, 초내열합금의 복잡한 미세조직-물성 상관관계를 객관적으로 규명하고 향후 신소재 설계 및 성능 평가 프로세스를 크게 단축할 수 있는 기반을 제공한다.

#### [P16-6]

머신러닝 포텐셜을 이용한  $\text{CsPbI}_3$  페로브스카이트의 상안정성 및 상전이에 관한 열역학적 분석: 최성호, 홍기하\*(국립한밭대학교)

**Keywords:** 머신러닝 포텐셜,  $\text{CsPbI}_3$ , 할라이드 페로브스카이트, 상 안정성

$\text{CsPbI}_3$ 는 우수한 광흡수 특성과 무기 양이온(Cs) 기반의 열적 안정성으로 차세대 태양전지용 halide perovskite로 주목받고 있다. 상온에서  $\gamma$ 상은 열역학적으로 불안정하여 안정한  $\delta$ 상으로 쉽게 전이되는 한계를 가진다.  $\delta$ 상(yellow phase)은 열역학적으로 안정적이지만 광전 효율이 낮아 실제 태양전지 활용에는 적합하지 않다. 반면  $\gamma$ 상은 높은 광전 효율을 보이나  $\delta$ 상으로의 전이가 쉽게 일어나 문제가 된다. 따라서, 상온에서  $\gamma$ 상의 상 안정화 및  $\delta$ 상으로의 전이 억제가 핵심 과제로 남아있다. 상전이 예측을 위해 활용한 LJ-Coul 기반 MD는  $\text{CsPbI}_3$  ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ )에서 상 안정성 순서와  $\gamma \rightarrow \delta$  전이 경향을 일관되게 재현하는 데 한계가 있어, 고전 포텐셜 단독 결과에 기반한 열역학적 상안정성 해석의 신뢰성이 제한될 수 있다. 이는 고전 포텐셜의 단순화된 원자간 거리 기반 상호작용 형태로는 상마다 달라지는 구조적 왜곡 및 차이를 충분히 반영하기 어렵기 때문이다. 최근에는 이러한 한계를 보완하기 위해 DFT 정보를 반영한 머신러닝 포텐셜(MLP)을 열역학적 상안정성 평가 관점에서 적용하는 접근이 보고되고 있으며, 본 연구에서도

SevenNet MLP를 도입해 고전 포텐셜 기반 결과를 비교·분석하였다. 그 결과, 동일 온도 구간에서 LJ\_Coul에서 나타나던 안정성 순서 및 상전이 예측의 불일치가 MLP 적용 시 일부 완화될 가능성을 확인하였으며, 이를 통해 DFT-기반 MLP의 적용이 CsPbI<sub>3</sub> 열역학적 상전이 안정성 평가에서 고전 포텐셜의 한계를 보완할 수 있으며, 예측 정확도 개선을 위한 접근 방향을 제시한다

#### [P16-7]

**밀도범함수 이론을 이용한 Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>의 p형 도핑 후보 물질 탐색:** 김민준, 홍기하\*(국립한밭대학교)

**Keywords:** Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, Defect formation energy, Density functional theory, doping, solar cells Eco-friendly

안티모니 셀레나이드(Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)는 자원 풍부성, 무독성, 우수한 광전 특성으로 박막 태양전지의 유망한 흡수체로 주목받고 있다. 높은 개방 전압과 효율을 위해서는 p-type 도핑으로 Fermi 준위를 원자가띠 인근으로 이동시켜야 하지만, 전하 보상 메커니즘, Fermi 준위 핀닝, 재결합 중심 형성 등 여러 제약으로 인해 안정적 도핑이 어렵다. 본 연구는 제1원리 계산을 통해 Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>의 잠재적 도핑 후보군을 체계적으로 평가하였다. 다양한 도펀트 후보 금속물질에 대해 Sb 치환 및 Interstitial 자리를 대상으로 결합 형성 에너지와 전하 전이 준위를 계산하였다. 또한 고대칭 초기 구조에 대칭 교란을 가한 뒤 완화하여 더 낮은 에너지를 가지는 기저 상태 구조를 탐색하고, 그 중 가장 낮은 에너지 구조를 참조로 사용하였다. 이를 통해, 기존 고대칭 구조에서는 shallow level로 보이던 전하 전이 준위가 대칭 교란이 적용된 기저 상태 구조에서는 deep level로 전이되는 현상을 포착하였으며, 이를 바탕으로 원자 위 및 격자 이완을 정량화하고, Configuration Coordinate 다이어그램을 분석을 통해 결합 중심에서의 비복사 재결합 속도를 산출하였다. 또한 성장 조건에 따른 도핑 가능성을 제시함으로써 Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>의 안정적 p형 도핑을 위한 실험 설계와 공정 조건 선택에 활용 가능한 정량적 기준선을 제시하였다. 본 연구 결과는 Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>의 안정적 p-type 도핑 전략 수립과 고효율 친환경 태양전지 개발에 기여할 것으로 기대한다.

#### [P16-8]

**Role of Boron at Austenite/Ferrite Interface in Mitigating Hydrogen Embrittlement Using First-Principles Study:** Seungyoun Jo, Changhun Kim, Shin hyun Kim, Seon-gyu Kim, Donghwa Lee\*(POSTECH)

**Keywords:** Hydrogen Embrittlement, High-Strength Steel, First-Principles Calculation, DFT, Interface Engineering

Recently, multi-phase microstructures in next-generation Advanced High-Strength Steels (AHSS) have been engineered to achieve an exceptional balance of strength and ductility. Despite these superior properties, these steels remain highly susceptible to Hydrogen Embrittlement (HE), driven by localized hydrogen segregation at Austenite (FCC)/Ferrite (BCC) interfaces. Common HE mitigation strategies in high-strength steels include precipitate trapping, grain refinement, grain boundary engineering and solute segregation engineering. Among these methods, solute segregation engineering has been developed to optimize the intrinsic properties of interfaces, aiming to suppress hydrogen-induced interface fracture. While the beneficial role of boron (B) in suppressing grain boundary embrittlement in single-phase alloys is well reported, its specific behavior at Austenite/Ferrite interface remains poorly understood. In this study, first-principles calculations were used to analyze the interaction of boron with hydrogen at the Austenite/Ferrite interface. Our results identify that boron segregates toward the interface and exhibits repulsive interaction with hydrogen, suggesting that boron can effectively prevent hydrogen segregation at the interface. These findings provide insight into exploring other interstitial elements (e.g., P, C, S, N) beyond boron for mitigating hydrogen embrittlement.

#### [P16-9]

**Machine Learning-Assisted Crystal Structure Prediction of Solid-State Electrolytes Reveals Superior Ionic Conductivity in Metastable Edge-Sharing Phases:** Kim Ji Hoon, Jun Ho Seok, Jae Hun Seol, Sang Uck Lee\*(성균관대학교)

**Keywords:** 고체전해질, 기계학습 포텐셜, 결정구조 탐색

Significant attention has been devoted to developing novel solid-state electrolytes (SSEs) with high ionic conductivity for all-solid-state batteries (ASSBs). However, most studies have primarily focused on compositional substitutions, often overlooking the fundamental role of inherent crystal structures on ion transport. To address this, we introduce a theoretical crystal structure prediction (CSP) approach based on the machine-learning moment tensor potential (MTP). The proposed approach successfully identifies novel SSE structures and reproduces 12 experimental crystal structures. Using a phase-diagram-guided strategy, CSP is applied to four promising SSE candidates, Li<sub>2</sub>SiS<sub>3</sub>, Li<sub>2</sub>GeS<sub>3</sub>, Li<sub>4</sub>SiGeS<sub>6</sub>, and Li<sub>4</sub>SiSnS<sub>6</sub>, to assess their polyhedral connectivity, relative stability, and Li-ion transport properties. The results reveal that metastable edge-sharing phases exhibit superior Li-ion mobility compared with their stable corner-sharing counterparts. This superior conductivity is attributed to the Li-ion accessible volume, quantified by the packing ratio (fraction of the unit cell volume occupied by nonconductive volume) and by the dynamic distortion of the Li-S<sub>4</sub> sublattice, which represents the local environment encountered by migrating Li-ions. The metastable phases feature higher packing efficiency, larger Li-S<sub>4</sub> sublattice volume, and greater distortion, all of which contribute to improved Li-ion transport. This study highlights the potential of CSP to design novel SSEs and high-performance ASSBs.

#### [P16-10]

**니켈 도금 알루미늄-구리 레이저 용접부의 인공지능망 기반 접합 거동 모델링:** 송기욱(성균관대학교), 성현민(현대자동차), 정경재\*(성균관대학교)

**Keywords:** 레이저 용접, 접합 거동, 유한요소해석, 응집영역모델, 인공지능망

알루미늄-구리 레이저 용접은 경량화와 전기적 특성이 동시에 요구되는 전기·전자 및 배터리 접합 구조에서 널리 적용되며, 접합부

의 기계적 신뢰성 확보가 중요한 설계 요소로 작용한다. 알루미늄-구리 레이저 용접부의 기계적 거동은 용접 계면에서 형성되는 금속간 화합물층과 계면 반응 특성에 의해 크게 영향을 받으며, 이러한 계면 특성은 접합부의 강도 및 파단 거동을 지배하는 주요 인자로 알려져 있다. 그러나 실제 용접부에서는 금속간 화합물층의 두께와 분포가 국부적으로 변화하고 계면 물성의 직접적인 정량화가 어렵기 때문에, 실험적으로 관찰되는 접합부의 거시적 기계적 응답을 기반으로 계면 거동을 효과적으로 모사할 수 있는 해석 기반 모델링 접근이 요구된다. 본 연구에서는 니켈 도금이 적용된 알루미늄-구리 이중재 레이저 용접부의 접합 거동 예측을 위하여 응집영역모델 (Cohesive zone model, CZM)을 적용한 유한요소해석 기반 모델링 방법을 제안한다. Lap-shear 시험을 통해 획득한 하중-변위 곡선을 기준으로 용접 계면을 다중 응집영역으로 이상화하고, 다양한 CZM 파라미터 조건에 대한 해석을 수행하여 계면 파라미터와 거시적 기계적 응답 간의 관계를 정리하였다. 또한 인공신경망을 활용하여 하중-변위 응답과 CZM 파라미터 간의 관계를 학습함으로써, 실험적으로 관찰되는 접합 거동을 재현할 수 있는 파라미터를 효율적으로 역 추정하였다. 니켈 도금 조건이 서로 다른 알루미늄-구리 레이저 용접부에 대해서도 동일한 절차를 적용하여 CZM 파라미터를 식별하고, 레이저 전력 조건 변화에 따른 파라미터의 적용 가능성을 함께 평가하였다. 그 결과, 용접부의 단위 면적당 접합 강도는 용접부 내 니켈 분포의 영향을 받으며, 용접 조건 변화에 따라 거시적 접합 거동이 달라짐을 확인하였다. 또한 이러한 거동을 모사하기 위한 CZM 파라미터 역시 레이저 전력 조건에 따라 변화함을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 접근법은 계면 물성의 직접적인 측정이 어려운 레이저 용접 접합부에 대해, 실험 기반의 기계적 응답을 이용하여 접합 거동을 해석 모델에 반영할 수 있는 실용적인 모델링 방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### [P16-11]

Computational Analysis of Bond Dissociation and Radical Stabilization in Recyclable Polymers: ByeongJun Jeon, Bumjoon

Seo\*(서울과학기술대학교)

Keywords: DFT, POLYMER

Designing recyclable polymers with controllable depolymerization behavior remains a central challenge in sustainable materials science. In our previous work, density functional theory (DFT) calculations revealed that topochemically synthesized polymers featuring elongated C-C bonds possess significantly reduced bond dissociation energies (BDEs) compared to conventional polymers, thereby rationalizing their enhanced depolymerization propensity. Building upon this framework, the present study employs polymer dimer models with a common backbone and systematically varied substituents to elucidate the relationships among BDE, radical stabilization energy (RSE), and spin population. A clear correlation is identified between bond weakening and radical stabilization, indicating that thermodynamically stabilized radical intermediates play a decisive role in facilitating depolymerization. Spin population analyses further support this trend, highlighting the importance of electronic structure effects in governing polymer reversibility. These findings provide mechanistic insight into substituent-controlled bond activation and offer design principles for next-generation recyclable polymer systems.

#### [P16-12]

Unraveling the Enhanced Alkaline Hydrogen Evolution of Co<sub>4</sub>N via Al-Mediated Vacancy Healing: A Density Functional Theory Study: Minhyeok Choi(Hanyang University ERICA), Myeongjin Kim\*(Kyungpook National University), Byung-Hyun Kim\*(Hanyang University ERICA)

Keywords: density functional theory, hydrogen evolution reaction, Transition-metal nitride, hydrogen spillover

Developing high-performance electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction (HER) in alkaline media is essential for scalable hydrogen production. However, unlike in acidic conditions, alkaline HER kinetics are often severely restricted by the additional energy barrier required for water dissociation prior to hydrogen formation. Transition-metal nitride antiperovskites, such as Co<sub>4</sub>N, are promising candidates, but their intrinsic nitrogen instability and vacancy defects often limit their catalytic efficiency. While Aluminum (Al) substitution has been observed to improve performance, the atomic-scale mechanisms governing this enhancement, specifically regarding water activation and defect chemistry, remain to be fully elucidated. In this work, we employ density functional theory (DFT) to uncover the mechanistic role of Al substitution in promoting the alkaline HER activity of Co<sub>4</sub>N. Our calculations reveal that Al incorporation acts as a critical structural stabilizer, effectively healing intrinsic nitrogen vacancies to form a robust, defect-free surface. Electronic structure analysis demonstrates that this Al-modified surface significantly strengthens interfacial water adsorption. Furthermore, climbing-image nudged elastic band calculations confirm that Al substitution dramatically lowers the kinetic barrier for water dissociation, compared to that on the nitrogen-deficient surface. We also identify a facile hydrogen spillover pathway with a low activation barrier, which facilitates the redistribution of hydrogen intermediates to thermodynamically optimal sites ( $\Delta G_{H^*} \sim -0.06$  eV). These findings provide clear theoretical evidence that Al substitution simultaneously heals surface defects and accelerates the rate-limiting water dissociation step, driving superior alkaline HER kinetics.

#### [P16-13]

Designing Pt/Ag Bilayer Collectors for Zero-Excess Lithium Metal Batteries: Seojin Jeon, Woosun Jang\*(Yonsei University)

Keywords: Lithiophilic current collector, Lithium adsorption, Pt/Ag bilayer, Interfacial stability

Lithiophilic current collectors play a key role in enabling reversible lithium (Li) plating and stripping in zero-excess Li metal batteries; however, the atomistic mechanisms governing their interfacial stability remain unclear. In this study, density functional theory



(DFT) calculations are employed to investigate the functional roles of Pt/Ag bilayer current collectors. The Ag and Pt layers serve distinct, spatially separated roles. The Ag layer exhibits a low Li diffusion barrier and strong anion adsorption, promoting homogeneous Li nucleation and favorable interfacial chemistry. In contrast, the Pt layer ensures intrinsic lithophilicity and structural stability, supporting long-term Li affinity. A Pt-inner/Ag-outer configuration is found to be energetically more favorable for uniform Li deposition than the reversed stacking order. Analysis of Li adsorption energies and diffusion pathways demonstrates that layer-dependent functional roles are critical for interfacial stability. These findings provide computational design principles for multilayer lithophilic current collectors with improved structural stability and electrochemical performance.

#### [P16-14]

First-principles Investigation of  $\text{Ti}_2\text{CT}_x$ /Black Phosphorus Heterostructures as Anodes for Lithium-ion Batteries: Chaehyun Kim, Woosun Jang\*(Yonsei University)

**Keywords:** Lithium-Ion Batteries, Black Phosphorus (BP),  $\text{Ti}_2\text{CT}_x$  MXene, First-principles Calculations (DFT)

$\text{Ti}_2\text{CT}_x$  MXene, a  $\text{Ti}_2\text{C}$ -based MXene featuring halogen terminations, exhibits high electrical conductivity, favorable stability, and superior mechanical strength, positioning it as a robust electrode material. Meanwhile, black phosphorus (BP) has emerged as an attractive anode candidate for lithium-ion batteries (LIBs) due to its earth-abundance, high theoretical capacity, and exceptional hole mobility. However, the practical application of BP is significantly hindered by substantial volume changes upon lithiation/delithiation and limited oxidative stability, which can accelerate structural degradation during cycling. To mitigate these issues, we propose a  $\text{Ti}_2\text{CT}_x$ /BP heterostructure anode that is designed to synergize the mechanical robustness and conductivity of  $\text{Ti}_2\text{CT}_x$  with the high-capacity potential of BP. First-principles calculations (DFT) were employed to evaluate the structural stability, electronic properties, Li-ion adsorption energetics, and interfacial diffusion kinetics of the heterostructure. In particular, our results demonstrate that the heterostructure possesses enhanced electronic characteristics compared to pristine BP. These findings suggest that the  $\text{Ti}_2\text{CT}_x$ /BP heterostructure is a promising anode material for the development of high-performance lithium-ion batteries.

#### [P16-15]

Integrating CALPHAD/PFM Based Data Augmentation for Al Casting Alloys Property Prediction: Changhyeon Han, Hyunguk Jang, Donguk Kim, Pilryung Cha\*(국민대학교)

**Keywords:** Aluminum Alloy, Data Interpolation, PFM Simulation, CALPHAD, Scheil Calculation, Machine Learning

Modern metallurgy is undergoing a paradigm shift from traditional trial-and-error methods toward data-driven Integrated Computational Materials Engineering (ICME). In particular, the microstructure of aluminum alloys exhibits a hierarchical one-to-many relationship with alloy composition and processing. This complex topology poses significant challenges for conventional tabular data analysis models in capturing the full spectrum of materials behavior. To preserve these topological characteristics and overcome the limitations of sparse experimental datasets, this study proposes a property prediction framework for Al-Fe-Mn-Si quaternary casting alloys by integrating CALPHAD and Phase-Field Method (PFM) based data augmentation. First, Scheil solidification calculations via Thermo-Calc were employed for data interpolation, effectively filling numerical gaps in non-equilibrium phase fraction data within the literature-derived database. Second, microstructure evolution data generated through PFM simulations based on the KKS (Kim-Kim-Suzuki) model were utilized to augment the dataset with morphological and spatial information, while also providing a physical basis for model validation. To effectively process the resulting hierarchical data structure, a deep learning model based on the Set Transformer architecture was implemented to ensure permutation invariance. By leveraging attention mechanisms, the model learns the non-linear interactions between diverse microstructural constituents—refined by CALPHAD-based interpolation and enriched by PFM-based augmentation. The results demonstrate that the integration of multi-scale simulation-driven data augmentation significantly enhances both the predictive accuracy and the physical consistency of the model. This research provides a systematic methodology for leveraging physics-based simulations to overcome data scarcity in machine learning, offering a reliable tool for the precision design of next-generation aluminum alloys.

#### [P16-16]

Mechanistic Insights into Interfacial Li-ion Dynamics on Oxygen-Functionalized Nanodiamonds: A Density Functional Theory Study: Dongkyung Kim, Byung-Hyun KIM\*(Hanyang University ERICA)

**Keywords:** LMBs (Lithium metal batteries), NDs (Nanodiamonds), DFT (Density Functional theory)

Lithium metal batteries (LMBs) offer high theoretical capacity but are plagued by safety risks associated with uncontrolled dendrite growth. To mitigate this, incorporating nanodiamonds (NDs) into artificial solid electrolyte interphases (SEI) has emerged as a promising strategy; however, the precise atomistic influence of ND surface chemistry on Li-ion behavior remains poorly understood. In this work, we employ density functional theory (DFT) calculations to elucidate the role of oxygen functionalities in modulating interfacial Li-ion dynamics by systematically comparing oxygen-functionalized and reduced nanodiamonds. Our calculations indicate that increasing oxygen coverage substantially enhances the binding affinity for lithium ions. This enhanced lithophilicity effectively reduces the nucleation overpotential, promoting uniform lithium deposition during the initial stages of plating. Furthermore, we investigated Li-ion migration pathways using the climbing-image nudged elastic band method. The results reveal that oxygen-rich

surfaces provide a thermodynamically favorable energy landscape with reduced diffusion barriers compared to oxygen-deficient regions. This facilitated surface transport ensures a homogeneous ion flux, preventing the localized accumulation that triggers dendritic growth. These findings provide a clear mechanistic understanding of the enhanced stability observed in ND-based ASEIs, offering theoretical guidance for interface engineering in LMBs.

#### [P16-17]

Atomic-Scale Understanding of Lithium-ion Migration Mechanisms in Crystalline and Amorphous LiTaCl<sub>6</sub> for ASSLBs: Hyomin Hong(POSTECH), Matthew Bergschneider (The University of Texas at Dallas), Hyo Gyeong Shin, Suyun Chae(POSTECH), Kyeongjae Cho\*(The University of Texas at Dallas), Donghwa Lee\*(POSTECH)

**Keywords:** ASSLB, Solid Electrolyte, Halide Electrolyte, DFT

Halide-based solid electrolytes have emerged as promising candidates for next-generation all solid state lithium batteries (ASSLB), owing to high ionic conductivity. Recent studies have demonstrated that amorphous LiTaCl<sub>6</sub> achieves high room-temperature ionic conductivity (~11 mS cm<sup>-1</sup>), whereas crystalline LiTaCl<sub>6</sub> shows conductivity approximately 6 orders of magnitude lower, despite its two-dimensional layered structure. However, the structural origin of this significant conductivity difference remains unclear. To fundamentally understand this difference, lithium-ion migration pathways and the associated energy landscape in crystalline LiTaCl<sub>6</sub> were analyzed using density functional theory (DFT). Among the structurally accessible migration pathways, entry from the metal layer into the vdW interlayer was identified as the highest activation barrier. Although relatively low activation barriers are observed after entry into the interlayer, the pitfall sites prevent the formation of a continuous percolation network, thereby limiting overall ionic conductivity. These findings indicate that the importance of the local structural environment in defining the migration energy landscape, motivating exploration of controlled modification in the crystalline phase as a strategy to achieve amorphous-like transport behavior. These insights provide guidance for the design of halide-based solid electrolytes, ultimately contributing to the development of more efficient all-solid-state lithium batteries.

#### [P16-18]

Designing Coke-Resistant Ni/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts for DRM and DRE with DFT Evaluation of the Best Motif under Mixed-Feed Conditions: Chaehyeon Moon(Hanyang University ERICA), Heeyeon Kim\*(Korea Institute of Energy Research), Byung-Hyun Kim\*(Hanyang University ERICA)

**Keywords:** Density Functional Theory, DFT, Dry reforming, Coke formation, Mixed-feed

The process of dry reforming of methane (DRM) and dry reforming of ethane (DRE) have been identified as promising routes for converting carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) into syngas (H<sub>2</sub>/CO) using light alkanes (CH<sub>4</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>). However, their performance is often constrained by coke formation, which results in catalyst deactivation. For Ni-based catalysts, carbon deposition remains a significant challenge despite the widespread use of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-supported Ni catalysts for DRM. In this study, density functional theory (DFT) calculations were performed to compare Ni(111) with  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-supported Ni active motifs, including single atoms and small Ni<sub>n</sub> clusters, for DRM and DRE. Among the examined structures, Ni<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> exhibited the best overall performance, showing enhanced coke suppression and comparatively lower CO desorption energy. These results suggest that tuning the Ni configuration on  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> can improve catalyst performance. To more accurately reflect industrial mixed-feed conditions, we also carried out co-adsorption calculations on the Ni<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> model. In this approach, both C1- and C2-derived species were systematically introduced as co-adsorbed species on pre-adsorbed C1 and pre-adsorbed C2 configurations. All adsorption sequences (C1-on-C1, C2-on-C1, C1-on-C2, and C2-on-C2) were considered to probe competitive adsorption under mixed feeds. By explicitly evaluating these competitive co-adsorption scenarios, we elucidate the influence of mixed-feed co-adsorption on the catalytic activity of Ni<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. In summary, the mixed-gas framework provides a mechanistic understanding of the behavior of catalysts under conditions that are relevant to industry. The study provides a framework for the design of Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts that can achieve high syngas productivity while effectively suppressing coke formation.

#### [P16-19]

Alloy-State-Dependent Interfacial Evolution at Li<sub>x</sub>Si/Argyrodite Interfaces from Machine-Learned Molecular Dynamics: Ji Seon Kim, Sang Uck Lee\*(Sungkyunkwan University)

**Keywords:** Solid-state electrolyte, Argyrodite, Si anode, Li-Si alloy, Machine-Learned Interatomic Potential, Interface reaction

Silicon is a high-capacity anode material that undergoes extensive alloying during lithiation, forming distinct Li<sub>x</sub>Si phases. In sulfide-based all-solid-state batteries (ASSBs), these evolving alloy states directly interface with chemically reactive solid electrolytes. However, their dynamic interfacial reactions remain insufficiently characterized at realistic spatial and temporal scales. Here, we employ a chemically transferable machine-learning-based Moment Tensor Potential (MTP) to perform large-scale reactive molecular dynamics simulations of representative Li<sub>x</sub>Si | Li<sub>6</sub>PS<sub>5</sub>Cl interfaces. Our simulations reveal that interphase evolution depends strongly on alloy composition. Alloys with low lithium content exhibit interfacial silicon agglomeration, which limits lithium into the electrolyte and suppresses extensive sulfide reduction. In contrast, lithium-rich alloys drive pronounced electrolyte decomposition, leading to Li<sub>2</sub>S-dominated solid electrolyte interphase (SEI) formation and substantial interfacial restructuring. By resolving the spatial propagation of reaction products and morphological evolution at the atomic scale, this work provides a state-resolved description of Si-argyrodite

interfacial dynamics. These findings clarify how alloy chemistry shapes SEI formation in Si-based ASSBs and highlight the importance of evaluating silicon anodes in their lithiation-dependent states when assessing interfacial stability.

#### [P16-20]

**Al-Si-Fe-Mn계 합금 응고 시뮬레이션 데이터의 형태학적 정량화를 적용한 미세조직 이미지 분석 연구:** 장형욱, 조희재, 김동욱, 차필령\*(국민대학교)

**Keywords:** 상장모델, 알루미늄

[연구 배경] 알루미늄 합금계에서 철 및 망간의 첨가로 형성되는 금속간화합물은 합금의 최종 기계적 성질을 결정짓는 핵심 요소이다. 특히 이러한 상들은 응고 과정에서 결정학적 비등방성에 따른 비등축 성장을 보이며, 냉각 조건과 조성 변화에 따라 침상 또는 분지형의 복잡한 구조를 형성한다. 이러한 형태적 복잡성은 기존의 구형 입자 기반 분석으로는 정량화에 한계가 있어, 공정 변수에 따른 조직 진화 거동을 객관적으로 추적할 수 있는 새로운 정량적 기술 기법이 필수적이다. [연구 방법] 본 연구에서는 상장 모델 응고 시뮬레이션을 활용하여 다양한 냉각 속도 및 조성 조건에서의 미세조직 이미지 데이터셋을 확보하였다. 비등축 조직의 기하학적 특성을 다각도에서 분석하기 위해 파이썬 기반의 이미지 처리 파이프라인을 구축하였으며, 입자 크기 분포뿐만 아니라 비등축성을 대변하는 종횡비, 원형도, 그리고 상간 공간 분포 등 핵심 형태학적 파라미터를 자동 추출하는 정량 분석 공정을 설계하였다. [결과 및 고찰] 이미지 분석 결과, 냉각 조건의 변화에 따라 미세조직의 분절 및 미세화 양상이 변화함을 확인하였다. 특히 철/망간 조성비 변화에 따라 주된 금속간화합물의 모폴로지가 비등축성이 강한 침상 구조에서 상대적으로 등축화된 구상/다각형 구조로 전이되는 거동을 정량적 지표를 통해 규명하였다. 본 연구에서 제안된 정량화 기법은 시뮬레이션 모델의 물리적 타당성을 검증하는 지표로 활용될 수 있으며, 향후 미세조직-물성 상관관계 규명을 위한 고차원 학습 데이터 구축에 기여할 것으로 기대된다.

#### [P16-21]

**Phase-Field Model을 활용한 Q&P강의 탄소 분배 거동 및 미세조직 변화 예측:** 조희재, 장형욱, 김동욱, 김성균, 차필령\*(국민대학교)

**Keywords:** Q&P, 미세조직, Phase-Field Model

Quenching & Partitioning(Q&P) 공정은 강재의 강도와 연성을 동시에 향상시킬 수 있는 핵심 열처리 기술로, 최근 고성능 차세대 강판 개발 분야에서 많은 관심을 받고 있다. 본 연구에서는 1차원 Phase-Field Model(PFM)을 활용하여 Quenching & Partitioning(Q&P) 공정 중 발생하는 상변태와 원소 재분배 거동을 모사하고, 이를 다양한 합금계의 실험 결과와 비교 분석하였다. 기존의 확산 기반 시뮬레이션은 분배 과정 중 발생하는 탄화물 형성과 같은 탄소 소실을 완전히 반영하지 못해, 실험치와 계산치 간의 오차가 발생하는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 수치적으로 보정할 수 있는 변수를 모델에 도입하여 예측 정밀도를 향상시켰다. 이를 통해 분배 중 마르텐사이트에서 오스테나이트로의 탄소 이동 및 계면 이동 특성을 실제 공정 환경에 가깝게 구현하였으며, 다양한 선행 연구의 실험 데이터와 비교하여 잔류 오스테나이트의 분율 및 탄소 농도 예측값의 정합성을 검증하였다. 본 연구의 결과는 탄화물 형성 등 복합적인 상변태가 수반되는 실제 강재 설계 시, 시뮬레이션의 물리적 신뢰성을 확보할 수 있는 유연한 방법론을 제시할 것으로 기대된다.

#### [P16-22]

**Mg-Ca-Zn 합금의 Phase-field 모델링을 위한 Laves 상의 열역학적 단순화 기법:** 박용욱, 김근우, 김동욱, 장형욱, 차필령\*(국민대학교)

**Keywords:** Mg-Ca-Zn alloy, Laves phase, Phase-field Modeling, simplification, CALPHAD

차세대 마그네슘 합금(Mg-Ca-Zn)의 기계적 특성과 내식성은 응고 및 열처리 과정에서 형성되는 Laves 상의 분율과 분포에 의해 지배된다. 따라서 합금 설계 및 공정 최적화를 위해서는 Phase-field Modeling(PFM)을 통해 미세조직 발달 거동을 예측하는 것이 필수적이다. 그러나 기존 CALPHAD 데이터베이스에서 Laves 상은  $(\text{Mg}, \text{Ca}, \text{Zn})_2(\text{Mg}, \text{Ca}, \text{Zn})_1$  형태의 다중 부격자 모델로 기술된다. 이러한 모델은 하나의 mole fraction에 대해 이를 만족하는 site fraction의 해가 유일하지 않는 비유일성 문제를 내포한다. 이는 PFM 시뮬레이션 시 모든 매 timestep마다 모든 격자점에서 Laves 상의 Gibbs Energy의 Global Minimization을 통해 site fraction을 결정해야 한다. 이는 막대한 계산 비용과 minimization과정에서의 수치 불안정성을 동반한다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 물리적 정합성을 유지하면서도 연산 효율을 극대화할 수 있는 Laves 상의 열역학적 단순화 기법을 제안한다. Matcalc 데이터베이스를 이용한 부격자 점유 거동 분석 결과, 첫 번째 부격자는 Mg 원자가 거의 독점적으로 점유하는 반면, 두 번째 부격자는 Ca와 Zn 원자가 혼합되어 점유함을 확인하였다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 두 번째 부격자에서만 성분 치환을 허용하는  $\text{Mg}_2(\text{Ca}, \text{Zn})$  형태의 단순화 모델을 설계하여, 조성 및 점유율 간의 1:1 대응 관계를 확립하였다. 제안된 모델은 원본 모델과 비교하여 평형 상분율 및 Scheil 응고 경로에서 높은 열역학적 일치성을 보였으며, 실제 PFM 시뮬레이션 적용 시 막대한 계산 비용 없이도 실제 합금의 수지상 간 Laves 상 분포 및 용질 편석 거동을 성공적으로 모사하였다. 본 연구에서 개발된 단순화 모델은 향후 다성분계 마그네슘 합금의 미세조직 제어를 위한 고효율 전산모사 플랫폼의 핵심 기술로 활용될 것으로 기대된다.

#### [P16-23]

**Graph Neural Network-Based Surrogate Model for Accelerated Phase-Field-Modeling of Ferroelectric HZO Thin Films:**

**방진현, 슈가탄 산디프, 차필령\*(국민대학교)**

**Keywords:** Graph Neural Network, Phase field modeling, Surrogate model, Ferroelectric, Thin film

하프늄-지르코늄 산화물(HZO)은 차세대 비휘발성 메모리 소자의 핵심 소재로 주목받고 있다. 다결정 HZO 박막의 미세구조와 강

유전 특성 간의 상관관계를 규명하기 위해 Phase-Field Modeling (PFM)이 널리 사용되지만, 복잡한 다결정 구조 해석에 요구되는 높은 연산 비용은 거대 스케일 시뮬레이션 및 소재 최적화의 주된 제약 요인이 되어왔다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 PFM의 연산 결과를 초고속으로 예측할 수 있는 Graph neural network (GNN) 기반의 대리 모델(Surrogate Model)을 제안한다. 다결정 HZO의 미세구조를 Voronoi 테셀레이션을 통해 그래프 형태로 변환하여, 결정립(Grain)과 결정립계(Grain Boundary)의 기하학적 정보 및 결정학적 배향을 노드와 엣지 특성으로 정의하였다. 인코더-프로세서-디코더 구조의 GAT(Graph Attention Network) 아키텍처를 도입하여 국부적인 미세구조 상호작용이 거시적인 분극 거동(P-E hysteresis)에 미치는 영향을 학습시켰다. 개발된 GNN 대리 모델은 기존 CUDA 기반 PFM 시뮬레이션 대비 약 150만 배의 가속 효과(40분, 1.55 ms)를 달성하였다. 동시에 실험값 및 PFM 결과와 비교하여 결정계수(R<sup>2</sup>) 0.994의 높은 정확도로 히스테리시스 곡선을 재현하였다. 또한, 구축된 대리 모델을 역설계(Inverse Design) 프레임워크에 적용하여 실험 데이터와 일치하는 최적의 Landau 계수를 성공적으로 도출함으로써, 본 모델이 강유전 소재의 공정 최적화 및 물성 예측에 효과적으로 활용될 수 있음을 입증하였다.

#### [P16-24]

**결정소성유한요소법(CPFEM)을 활용한 조사된 원자로 내부 구조물 재료의 다중 규모 파괴 거동 예측 모델링:** 안동현\*, 김지수, 김종민(한국원자력연구원)

**Keywords:** 결정소성유한요소해석, 원자로, 중성자 조사, 파괴 특성, 304SS

원자로 노심 지지 구조물인 코어 슈라우드(Core Shroud)는 고온 및 고중성자 조사 환경에 노출되어 열화에 따른 구조적 손상 가능성이 높다. 국내 발전소와 동일한 용접식 슈라우드를 사용하는 해외 CE형 원전에서 균열 사례(2018년)가 보고됨에 따라, 가동 연수가 증가하는 국내 원전의 건전성 확보를 위한 선제적 대응 기술 개발이 시급하다. 현재 내부구조물에 대한 규정된 손상 평가 체계는 부재 하중, 열화 평가 시 데이터 기반 모델이나 보수적 하한값에 의존하고 있는 실정이다. 따라서, 과도한 보수성을 완화하고 예측 정확도를 향상시킨 개선된 모델 개발이 요구된다. 중성자 조사 취화는 미세조직 내 전위 루프(Dislocation loop) 생성과 국부 연화에 따른 변형 집중을 유발하므로, 이를 모사하기 위한 결정립 규모의 예측 모델이 필수적이다. 본 연구에서는 결정소성유한요소법(CPFEM)을 활용하여 3.0 dpa까지 조사된 304SS 재료의 기계적 거동 예측 모델을 개발하였다. 특히 삼축 응력과 유효 변형률 기반의 손상 모델을 결합하여 미세조직 규모와 부품 규모(인장 및 CT 시험) 간의 연계성을 분석하였다. 해석 결과, 인장 시험 기반 모델이 추가적인 매개변수 조정 없이도 CT 시험의 파괴 거동을 합리적으로 재현함을 확인하였다. 본 연구는 규모 및 시험 형상 간의 해석적 연계성을 검증하였으며, 향후 손상 기구의 변화와 실험적 오차를 고려한 건전성 평가 체계 고도화의 기반 모델로 활용될 것으로 기대된다.

#### [P16-25]

**DFT 기반 우라닐-리간드 착물의 결합 상수 계산:** 석현우\*, 신영호, 김성욱, 전민구, 박찬우, 손성준(한국원자력연구원)

**Keywords:** 우라늄, 리간드, DFT, 결합상수

해수 중 우라늄은 주로 탄산 착물( $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$  및 Ca/Mg 혼합종)로 존재하며, 이를 유기 리간드로 탄산을 치환해 우라늄을 선택적으로 포집하는 기술은 재생형 자원화 관점에서 큰 관심을 받고 있다. 본 연구는 우라닐-리간드 착물의 결합 상수( $\log\beta$ ) 확보 및 리간드 설계 지표 도출을 위해 DFT 계산을 수행하였다. B3LYP-D3(BJ)/def2-TZVP 조건에서 수화 우라닐-리간드 치환 반응( $\text{UO}_2(\text{H}_2\text{O})_5^{2+} + \text{L} \rightarrow \text{UO}_2(\text{H}_2\text{O})_3\text{L} + 2\text{H}_2\text{O}$ )의 자유에너지 변화( $\Delta G$ )를 산출하고  $\log\beta$ 로 환산하였다. 계산된  $\log\beta$ 는 문헌 및 실험 측정값과의 매칭을 통해 상대적 경향성을 비교·검증하였다. 본 접근은 향후 해수 우라늄 흡착제 후보 리간드의 선별 및 고도화를 위한 계산-실험 통합 평가 프레임워크로 활용될 수 있다.

#### [P16-26]

**A Methodology for Calculating the Thermal Conductivity of Molten Salt Using Molecular Dynamics Simulations:** LEE SANGHEON, SEO BUMJOON\*(서울과학기술대학교)

**Keywords:** Molecular Dynamics Simulation, Molten Salt, Small molecular Reactor, thermal conductivity

Molten salts are being actively considered as alternative coolants for small modular reactors, where conventional water-based cooling can suffer from rapid phase change and associated safety and efficiency penalties at elevated temperatures. Reliable prediction of molten-salt thermal conductivity is therefore essential for screening candidate compositions and supporting thermo-hydraulic design. In this work, we present a molecular-dynamics methodology for calculating the thermal conductivity of molten salts with improved microscopic fidelity. Initial simulations were conducted using the Joung-Cheatham force field, which effectively captured the qualitative trends in thermal transport. However, noticeable quantitative discrepancies remained, likely due to the limited description of complex many-body effects in dense ionic environments. To address this, we developed a refined heat-flux formulation capable of incorporating many-body potential terms. This framework not only improves current calculation accuracy but also provides the necessary extensibility to adopt more advanced potential energy surfaces in the future.

#### [P16-27]

**Electronic Delocalization Governs Carbon Bonding in Liquid Metals:** Yongchul Kim(CMCM), IBS), Rodney S. Ruoff\*(CMCM, IBS, UNIST)

**Keywords:** Liquid Metals, Molten Carbon

Carbon atoms or small clusters ( $\text{C}$ ,  $\text{C}_2$ , and  $\text{C}_3$ ) dissolved in liquid metals exhibit unique electronic characteristics that fundamentally

differ from those C, C<sub>2</sub>, and C<sub>3</sub> in conventional bonding environments. Through strong interactions with the metallic environment, C, C<sub>2</sub>, and C<sub>3</sub> no longer retain a typical localized p-orbital configuration. Instead, they adopt a highly ‘metallized’ and delocalized electronic state. The extent to which these p-orbital electrons undergo changes in their degree of localization plays a decisive role in determining the conditions under which carbon-based materials nucleate and grow. The degree of electron delocalization in the C, C<sub>2</sub>, and C<sub>3</sub> is strongly influenced by parameters such as pressure and temperature, as well as by the composition of the liquid metal. Understanding how these parameters influence bonding stability is essential for discovering synthetic pathways for nucleating and growing carbon materials (such as diamond, graphite, and others) in liquid metals. We used first-principles theoretical calculations to systematically investigate how temperature, pressure, and modest compositional variations alter the stability of carbon–carbon bonding in liquid-metal environments. Even small changes in pressure and temperature can shift the balance between delocalized metallic states and chemically localized bonding. We can ‘peer into’ the thermodynamic window favoring carbon clustering, nucleating, and growing further. This modeling provides fundamental insights into the electronic origin of the formation and stabilization of carbon-carbon bonds in liquid metals and offers guiding principles for designing liquid-metal systems for the synthesis of carbon allotropes. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

#### [P16-28]

Density Functional Theory Study on the Stability and Magnetic Properties of i-MAX Phases Depending on Composition and Atomic Ordering: Ji Soo Byun, Si Hyung Lee, Sang Uck Lee\*(Sungkyunkwan Univ.)

*Keywords:* i-MAX phase, Mxene, DFT

i-MAX phases exhibit structural complexity arising from in-plane ordering, yet the relationship between atomic arrangement, stability, and magnetism remains unclear. Here, we systematically investigate the (Mn<sub>2/3</sub>Mo<sub>1/3</sub>)<sub>2</sub>AlC i-MAX system using density functional theory. By constructing multiple atomic ordering models, we evaluate relative stability based on total energies and identify distinct metastable configurations. We reveal that Kagomé-like ordering within the Al layer significantly alters both structural stability and magnetic behavior. Structures exhibiting Kagomé ordering show strongly reduced Mn magnetic moments, whereas configurations without Kagomé ordering retain a ferromagnetic ground state. These contrasting magnetic responses originate from ordering-dependent electronic structure modification and changes in d-orbital hybridization. Furthermore, for experimentally synthesized i-MAX phases, formation enthalpy and temperature-dependent Gibbs free energy were evaluated to assess thermodynamic stability and synthesizability. Our results demonstrate that atomic ordering serves as a key parameter for tuning structural and magnetic properties in i-MAX phases, highlighting the decisive role of Kagomé ordering in governing structure–magnetism correlation.

## P17 : 적층제조 및 분말

Room 3층 로비, 4월 29일

### [P17-1]

**DED 기반 P21-ST316L 경사기능재료의 조성 구배에 따른 미세조직 발달 및 기계적 거동 분석:** 강수성(한국생산기술연구원, 국립부경대학교), 김중훈(한국생산기술연구원, 울산과학기술원), 김형찬, 김병준(한국생산기술연구원), 노상훈\*(국립부경대학교), 김병구\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 경사기능재료, DED, 가공경화, 미세구조 진화, 기계적 특성

경사기능재료(FGM)는 위치별 조성 및 조직의 점진적 구배를 통해 극한 환경에 최적화된 복합 물성을 연속적으로 구현하는 소재이다. 최근 다중 호퍼를 장착한 직접용융증착(DED) 기술의 발전으로 실시간 정밀 조성 제어가 가능해짐에 따라 페라이트강과 오스테나이트강의 접합부에서 발생하는 열팽창 계수 및 기계적 특성 차이를 완화하려는 연구가 중요해지고 있다. 본 연구에서는 P21 페라이트강과 ST316L 오스테나이트강의 조성을 1% 단위로 제어한 DED 기반 FGM을 제작하여 응고 거동 및 미세조직의 변화가 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 조성 분석 결과, 연속적인 조성 구배 설계에도 불구하고 특정 혼합 구간에서 단순 혼합 법칙을 벗어나는 비선형적 경도 상승이 관찰되었다. 이러한 물성 특이점의 원인을 규명하기 위해 조성 변화에 따른 미세조직의 발달 양상과 응고 야금학적 특성을 심층적으로 고찰하였다. 특히 적층 공정 중 발생하는 원소 편석과 상분율의 변화가 국부적인 조직 불합성에 미치는 영향을 검토하였으며 이를 통해 경도 상승의 구조적 원인을 규명하였다. 이러한 조직적 특징이 실제 하중 부하 조건에서의 변형 기구에 미치는 영향을 확인하기 위해 주요 조성 구간별 인장 시험을 수행하고 가공경화 특성을 분석하였다. 이를 통해 조성 구배부의 미세구조가 인장 변형 시 전위의 이동 및 축적 거동을 제어하여 재료의 강도와 연성 조합에 기여하는 메커니즘을 확인하였다. 결과적으로 본 연구는 조성 구배에 따른 조직 제어의 유효성을 확인하고 고성능 경사기능재료 구현을 위한 야금학적 설계 기초를 제시한다.

### [P17-2]

**재료 압출(MEX) 적층 제조 공정을 이용한 Fe-36Ni 인바 합금의 제조 및 그 미세조직, 열팽창 계수와 기계적 특성:** 조용훈, 박소연(인하대학교), 김주용(리프토텍), 김정환, 윤중열(한국재료연구원), 서동우(포항공과대학교), 이기안\*(인하대학교)

**Keywords:** Material extrusion additive manufacturing, Invar alloy, Microstructure, Mechanical properties, Thermal expansion coefficient

Fe-36Ni (Invar 36) 합금은 Curie 온도 (약 280°C) 미만의 온도에서 열팽창 계수(CTE, coefficient of thermal expansion)가 0에 근접하는 합금으로, 온도 변화가 극심한 환경에서도 치수가 매우 정밀하게 유지되어야 하는 위성체와 각종 초정밀 기기의 부품의 구조용 소재로 활용되고 있다. 그러나, Fe-36Ni 합금은 높은 밀도와 무른 성질 때문에 정교한 가공과 경량화가 어렵다는 단점이 있다. 적층 제조는 재료를 층층이 쌓아서 완성품에 가까운 조형물을 제조하는 기술로, 기존 Fe-36Ni 합금의 난가공성 문제를 해결하고, 형상 최적화를 통한 부품 성능 개선 및 경량화를 실현할 수 있는 기술로 많은 주목을 받고 있다. 본 연구에서는 적층 제조 공정 중 하나로써 non-fusion 방식인, 재료 압출 (MEX, metal-material extrusion) 적층 제조 공정을 이용하여 성형체를 제조하고 탈지 및 소결 과정을 거친 MEX Fe-36Ni 합금의 미세조직과 열팽창계수, 그리고 기계적 특성을 조사하였다. 제조된 MEX Fe-36Ni 소결체는 상대 밀도 약 92%로 치밀하게 제조된 것으로 파악되었다. 한편, MEX Fe-36Ni 소결체는 초기 분말보다 탄소 함량이 약 0.2 wt% 높게 검출되는 경향을 보였으며, XRD 상에서 매우 미세한 격자 팽창이 존재하는 것으로 파악되었다. 미세조직은 평균 지름이 약 156  $\mu\text{m}$ 인 equiaxed austenite grain으로 구성되어 있었다. -130°C ~ 100 °C 구간에서 Fe-36Ni 소결체의 평균 CTE는 약 2.4 ppm/°C로 탄소 함량의 증가로 인해 상용 wrought Fe-36Ni 합금 (약 1.8 ppm/°C) 보다 약 33% 높은 CTE 특성을 보였으나, 여전히 3 ppm/°C 미만의 적절한 low CTE 특성을 유지하는 것으로 드러났다. MEX Fe-36Ni 합금의 상온 기계적 특성은 인장 강도: 560 MPa, 항복 강도: 336 MPa, 연신율: 26%로 Wrought Fe-36Ni 보다 11% 향상된 인장 강도와 3% 향상된 항복 강도를 보였으며, 결과적으로 비강도가 wrought Fe-36Ni 보다 약 21% 향상된 것으로 나타났다. 상기 결과를 토대로 MEX Fe-36Ni 합금의 상온 인장 특성과 열팽창 특성을 미세조직학적 관점에서 고찰하였다.

### [P17-3]

**선택적 레이저 용융으로 제조된 IN718 합금의 저온 응력 완화 열처리리에 따른 Laves network 기반  $\delta$ 상 석출 거동 및 미세조직 기계적 특성 변화 효과:** 한승준, 강경록(한국생산기술연구원, 성균관대학교), 이택우, 김건희, 김원래(한국생산기술연구원), 안성철(한화에어로스페이스), 정재기(성균관대학교), 한현수(한양대학교), 강현수\*(한국생산기술연구원, 한양대학교), 김형균\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 적층 제조, 선택적 레이저 용융, 인코넬 718, 열처리 공정

적층 제조 공정 중 하나인 선택적 레이저 용융 공정(Selective Laser Melting, SLM)은 금속 분말을 용융 및 적층 과정을 통해 3차원 형상을 제조하는 기술로, 기존의 제조 공정 대비 재료 손실이 적고 높은 형상 자유도를 제공하여 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다. 니켈 기반 IN718합금 소재는 고온 강도, 크리프 및 피로 특성이 우수하여 항공 우주 및 가스 터빈용 고온 구조재 등 다양한 산업 분야에서 고온 소재로 널리 사용되고 있다. 하지만, SLM 공정 특유의 급냉으로 인한 높은 열 구배는 열 잔류응력을 유발하여 균열 및 변형과 같은 결함을 초래하고 이에 따라 IN718합금 적층품의 특성 저하를 야기시킬 수 있다. 이러한 문제를 완화하기 위해 열적 후처리 공정이 필수적으로 요구되지만, 주조와 같은 기존 제조 공정으로 제조된 IN718 합금에 적용되는 표준 열처리는 성능 저하의 원인이 될 수 있는 Laves 상을 제거하고  $\gamma'$ ,  $\gamma''$  석출을 극대화를 목표로 규격화되어 있어 장시간 가공, 내화성

원소의 편석 등 여러 측면에서 한계를 가진다. 또한, SLM으로 제조된 IN718 합금에 대한 열처리 온도 최적화 및 미세조직 제어에 따른 석출 거동 변화에 대한 체계적인 연구는 충분히 보고되지 않았다. 본 연구에서는 SLM공정으로 제조된 IN718합금 적층품에 대해 응력완화를 위한 저온 열처리 공정(550 °C)을 적용하고, 고온 열처리 공정(1065 °C)과 비교하여 열처리 온도에 따른 미세조직 변화와 기계적 특성 간의 상관관계를 규명하였다. 특히 저온에서의 열에너지기반의 분위기 제어 공정 조건에서 SLM 공정 중 형성되는 Laves network 미세구조를 활용하여 이후 solution heat treatment 및 aging 공정을 통해 균일하게 형성된 δ상 석출물의 거동을 체계적으로 분석되었으며, 이러한 결과는 SLM으로 제조된 IN718 합금에 대해 기존 고온 표준 열처리를 대체할 수 있는 저온 기반 열처리 전략의 가능성을 제시한다.

#### [P17-4]

**L-DED로 제작된 Fe-24Mn-4Cr-0.4C 고망간강의 수소취성 거동 분석:** 김찬, 김민기, 박민수, 이육진\*(부산대학교)

**Keywords:** 적층제조, 고망간강, 수소취성, L-DED

탄소중립 및 온실가스 감축을 위한 에너지 전환 과정에서, 수소는 산업 및 장거리 운송 등 전기화가 어려운 분야의 저탄소 에너지 캐리어로 활용 가능성이 논의되고 있다. 수소 인프라의 확산을 위해서는 저장 및 운송용 구조재의 저온 기계적 안정성과 수소취성 저항성 확보가 필수적이다. 극저온 저장탱크에는 탄소강의 체심입방 결정구조의 저온취성 문제로 인해 알루미늄 합금, 스테인리스강, 9% Ni강 등의 면심입방구조를 가지는 합금이 주로 사용된다. 한편 면심입방구조의 스테인리스강 및 9% Ni강은 Ni의 높은 원소재 비용으로 인해 대체 소재 개발이 지속되고 있다. 이와 관련하여 값비싼 Ni 합금원소가 배제된 면심입방구조 합금인 고망간강은 높은 극저온 충격인성, 낮은 열팽창계수, 그리고 비용 측면의 장점으로 LNG 탱크용 소재 등의 극저온용 소재로 활용되고 있다. 하지만 고망간강은 저온취성에는 둔감하나 수소 환경에서 연성 저하가 종종 보고되어 수소환경에서 사용할 시 수소 취성에 대한 평가가 필요하다. 한편, 레이저 직접 에너지 적층(Laser Directed Energy Deposition, L-DED)은 분말을 레이저와 동시에 공급하여 적층하는 공정으로, 국부적인 용융과 급냉이 반복되는 금속 적층제조 방식이다. 이때 레이저 적층제조에 의해 형성되는 용융풀 경계 및 셀 구조는 용융풀 경계가 수소를 포획하여 수소취성 거동에 영향을 줄 수 있음이 보고되고 있었으나, L-DED로 제조한 고망간강의 수소취성 거동을 분석한 사례는 전무하여 향후 수소환경에서 복잡한 형태의 고망간강 부품을 적층제조로 제작하여 적용하기 위해서는 많은 연구가 필요하다. 본 연구에서는 L-DED로 제작한 Fe-24Mn-4Cr-0.4C (wt.%) 고망간강의 열처리 전·후 수소취성 거동을 비교 및 분석하였다. 시편은 적층 직후 및 750 °C, 1 h 어닐링 조건으로 시행하였고, 전기화학적 수소 장입 전·후의 미세조직과 기계적 특성을 비교하여 수소취성 민감도를 평가하였다.

#### [P17-5]

**High-Strength Bimetallic Bonding for Aluminum alloy and Stainless Steels using Cold-Spray Deposition Technology:** Minjune Park, Jinwook Choi, Doowon Jung, Ganghyeon Bae, Hwasung Yeom\*(POSTECH)

**Keywords:** Stainless Steel, Aluminum, IMC, Cold-Spray, metalizing, interfacial strength

Joining dissimilar materials such as stainless steel (SS) and aluminum (Al) alloy has received a great attention in the weight reduction of automotive, aerospace, and energy-related components. The conventional fusion-based welding often suffers from the formation of brittle intermetallic compounds (IMC) and severe thermal distortion due to the mismatch of thermal expansion coefficients between SS and Al. Cold-spray technology (CS), a solid-state deposition process in which powder particles are accelerated at supersonic speed, has been considered a new metalizing technique to prevent the generation of brittle IMC between dissimilar materials at lower temperatures than the melting point. In this study, SS particles were deposited onto an Al substrate using the CS process, and a parametric study was conducted to enhance the interfacial bonding strength by controlling particle size, spray velocity, and spray temperature. In addition, the interfacial microstructure, thickness and porosity of the SS coating, and mechanical properties of SS–Al interface were investigated. It is expected that a dense and well-adhered SS coating can be formed on the Al substrate without the formation of brittle IMC. The high velocity impact of SS particles induced plastic deformation at the SS–Al interface, promoting effective mechanical interlocking and localized metallurgical bonding. The results will suggest that the CS process is an effective technology for achieving high-strength SS coatings on Al substrates.

#### [P17-6]

**Ti-6Al-4V 합금의 열처리 기반 TiO<sub>2</sub> 결정상 분율 제어에 따른 표면 친수성 및 경도 특성 연구:** 강민욱, 윤교식, 이유진, 이용건, 안병민\*(아주대학교)

**Keywords:** anatase, rutile, heat treatment, hydrophilic, Ti-6Al-4V

Ti-6Al-4V 합금은 표면 개질을 통해 생체 적합성을 향상할 수 있어, 의료용 임플란트로 널리 활용되고 있다. 일반적으로 TiO<sub>2</sub> 산화막은 anatase/rutile 상이 혼재하고 있으며, 결정상에 따라 상이한 특성을 나타낸다. anatase상은 수산화 작용기가 많아 친수성 확보에 유리하여 친혈성을 향상할 수 있으며, rutile상은 화학적·구조적으로 안정하여 안정성을 확보할 수 있다. 이러한 TiO<sub>2</sub>의 결정상 특성 차이로 인해 친혈성과 구조적 안정성의 균형을 위한 제어가 요구된다. 이에 본 연구에서는 열처리를 설계하여 이를 제어하고자 하였으며, 열처리 온도에 따른 TiO<sub>2</sub>의 anatase-rutile 결정상 비율 변화를 관찰하고, 산화막의 구조적 안정성과 친혈성을 동시에 만족하는 공정을 설계하고자 하였다. 이를 위해 선택적 레이저 용융 공정으로 제조된 Ti-6Al-4V 다공성 격자 구조체의 열처리 공정을 설계하였으며, 열처리 온도에 따른 TiO<sub>2</sub> 상분율을 정량화 하였다. TiO<sub>2</sub> 결정상 분율을 확인하기 위해 X선 회절 분석하였으며, 산화층 관찰을 위해 주사 전자 현미경을 사용하였다. 결정상 분율에 따른 친혈성을 확인하기 위해 표면 친수성 변화를 접촉각 시험으로



평가하였으며, 표면 강성을 비커스경도계로 측정하였다. 본 연구는 기계적 물성 및 친수성의 균형점을 확보하기 위한 anatase-rutile 비율을 제시하고자 하였으며, 이는 의료용 Ti-6Al-4V의 표면 개질 최적화에 기여할 수 있을 것이다.

#### [P17-7]

**L-PBF로 제조된 Ti-6Al-4V 벌크 및 격자 구조의 미세조직-기계적 특성 상관관계 연구:** 김준현, 한재연(국립창원대학교), 권영삼(CetaTech), 박정효, 김규식, 김대웅(국방과학연구소), 홍현욱\*(국립창원대학교)

**Keywords:** Ti-6Al-4V, Selective Laser Melting (SLM), Lattice structure, Heat treatment, Compressive properties

선택적 레이저 용융(Selective Laser Melting, SLM)과 같은 적층 제조 기술은 차세대 제조 공정으로 각광받으며, 복잡한 형상을 구현할 수 있는 설계 자유도를 바탕으로 격자 구조 설계에 적극적으로 적용되고 있다. 특히 Ti-6Al-4V 합금은 항공, 방산, 바이오 등 다양한 산업 분야에서 활용도가 높으나, 적층 제조 공정에서 얻어진 성형체의 미세조직 제어 및 기계적 특성 향상을 위한 체계적인 열처리 조건은 아직 확립되지 않았다. 또한 격자 구조체의 형상 및 상대 밀도 변화가 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향에 대한 심층적인 연구도 부족한 상황이다. 이에 본 연구에서는 L-PBF 공정으로 제조된 Ti-6Al-4V 합금을 대상으로 후열처리 조건에 따른 미세조직 변화를 체계적으로 분석하고, 격자 구조체의 미세조직 및 압축 특성에 대해 고찰하였다. 성형체에는 잔류응력 해소를 위한 Stress Relief (SR) 열처리와  $\alpha'$  마르텐사이트 분해를 위한 Annealing (AN) 열처리를 수행하였다. 격자 구조체는 FCC, BCC, RDH, Gyroid, Truss의 다섯 가지 형상과 0.3, 0.45, 0.6의 상대 밀도를 적용하여 제작하고, 미세조직과 압축 거동을 비교·분석하였다. As-built 합금은 building direction을 따라 성장한 columnar  $\beta$  결정립과 내부  $\alpha'$  마르텐사이트로 인해 높은 경도(377 Hv)를 보였다. SR 처리 시 미세조직은 as-built와 유사하였으나 lath  $\alpha'$  폭의 증가( $0.67 \rightarrow 0.93 \mu\text{m}$ )와 초미세  $\beta$ 상의 형상으로 경도가 소폭 상승하였다(380 Hv). 반면, AN 처리 후에는  $\alpha'$ 가 완전히 분해되고 조대한 lath 구조( $1.01 \mu\text{m}$ )가 관찰되었으며, 이로 인해 경도가 감소하였다(353 Hv). 격자 구조체는 형상 및 상대 밀도에 관계없이 유사한 미세조직과 경도(약 380 Hv)를 나타냈으며, 압축 시험에서는 FCC 구조가 가장 우수한 에너지 흡수율, 탄성 계수, 압축 항복 강도를 보였다. 본 연구 결과는 L-PBF Ti-6Al-4V 합금의 후열처리 조건 확립과 격자 구조체의 기계적 성능 향상을 위한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 향후 lattice 구조의 설계와 열처리 조건을 최적화하여 고성능 적층 제조 부품 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

#### [P17-8]

**다성분계 합금 스크리닝을 위한 DED 방식 금속 3D프린터의 bead 적층 조건 최적화:** 윤영철(한국과학기술연구원, 서울대학교), 김태엽(한국과학기술연구원), 박은수\*(서울대학교), 김진우\*(한국과학기술연구원)

**Keywords:** DED, metal additive manufacturing, alloy screening, microstructure

금속 적층제조(Additive Manufacturing, AM)는 공정 변수 제어를 통해 형상 자유도뿐 아니라 미세조직과 물성을 동시에 설계할 수 있는 공정 기술로, 차세대 구조·기능성 소재 개발 플랫폼으로 주목받고 있다. 특히 Directed Energy Deposition(DED) 방식은 레이저를 열원으로 분말을 실시간 용융·적층하는 공정으로서, 조성 가변성이 높고 공정 조건의 독립적 제어가 가능하여 다성분계 합금의 신속한 조성 스크리닝에 적합하다. 그러나 DED 공정의 레이저 출력, 분말 공급 속도, 적층 시간 등의 공정 조건은 미세조직 형상 및 최종 물성에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 다성분계 합금의 체계적 스크리닝을 위해서는 공정-미세조직 간 상관관계에 대한 정량적 이해와 bead 적층 조건의 최적화가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 다성분계 합금 screening 플랫폼 구축을 위한 기초 단계로, DED 방식 금속 3D 프린터를 활용하여 다중 원소를 포함하는 bead 적층 조건을 체계적으로 분석하였다. 레이저 출력은 150–250 W 범위에서 제어하였으며, 분말 공급 속도(g/min) 및 적층 시간을 주요 변수로 설정하였다. 또한, 적층 후 레이저 후처리 공정의 적용 여부에 따른 bead 형상 안정성 및 미세조직 변화를 비교하였다. 각 조건에서 형성된 bead에 대해 단면 관찰을 수행하여 폭, 높이, 용입 깊이 및 합금화 정도를 확인하고, 결정립 형태 및 상 분포 특성을 평가하였다. 레이저 출력 증가에 따라 용융풀 체적과 bead 폭이 증가하는 경향을 보였으며, 높은 열입력 조건에서는 기관과의 혼합 영역 확대 및 합금화 정도 증가가 관찰되었다. 레이저 후처리는 부분 재용융 및 재응고를 유도하여 합금화 정도, 결정립 크기 변화 및 표면 거칠기에 영향을 미쳤으며, 이는 다원소 합금 bead의 안정적인 상 조성 제어를 위한 중요한 변수로 작용할 수 있음을 보여준다. 도출된 최적 bead 적층 조건은 향후 2원계 이상 다성분계 합금 bead 제조에 적용될 예정이다. 이를 통해 화학 조성 변화에 따른 상 형성 거동, 미세조직 변화, 기계적 물성 또는 수소 저장 특성 변화를 신속하게 평가할 수 있는 고효율 스크리닝 체계를 구축하고자 한다. 본 연구는 DED 기반 적층 제조 공정을 활용하여 조성-공정-미세조직-물성 간 상관관계를 체계적으로 규명하고, 다성분계 합금 설계를 위한 실험적 플랫폼을 제시한다.

#### [P17-9]

**Structure Characterization of the Oxide Layer and Non-metallic Inclusions in Steel Powder with Various Particle Sizes:** Su Yao, Park Sunghwan(Hanyang university), Kim Dongsoo(Doosan Enerbility), Park Joohyun\*(Hanyang university)

**Keywords:** Electrode induction gas atomization (EIGA), Powder size, Oxide layer, Non-metallic inclusions (NMIs), PM-HIP; Additive manufacturing (AM)

The structure of surface oxide layers and non-metallic inclusions (NMIs) affects the mechanical and corrosion properties of steel powders. In the present study, low-alloy high-strength steel powders produced by the electrode induction gas atomization (EIGA) process with different particle sizes were investigated using X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and transmission electron microscopy (TEM) to characterize the thickness and structure of surface oxide layers. The results indicate that the specific surface area and surface oxide layer significantly influence the total oxygen content of the powders. The oxide layer exhibits a laminated structure

mainly composed of Fe, Mn and O. In addition, the types and size distributions of NMIs in both electrodes and atomized powders were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) combined with thermodynamic calculations using FactSage™ thermochemical computing software. Electrolytic extraction method was further employed to confirm NMIs morphology and chemical composition. These findings provide guidance for optimizing powder materials for PM-HIP or additive manufacturing (AM) processes.

#### [P17-10]

**WAAM 공정을 이용한 Hastelloy C276 합금의 제조 및 그 미세조직과 기계적 특성:** 이의준, 박소연(인하대학교), 박형우((주)비에이티 파트너스), 이기안\*(인하대학교)

**Keywords:** Wire arc additive manufacturing, Hastelloy C276, Microstructure, Tensile properties, Deformation mechanism

Hastelloy C276은 우수한 고온 강도와 뛰어난 내부식성을 동시에 가지는 Ni 기반 초내열 합금으로, 항공우주, 화학 플랜트, 원자력 및 에너지 산업 등 다양한 분야에서 극한 환경용 구조 부품 소재로 사용되고 있다. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)은 arc를 열원으로 사용하여 wire 형태의 금속 feedstock을 용융-적층하는 금속 적층제조 기술로, 높은 적층 속도와 소재 활용 효율을 기반으로 대형 금속 구조 부품 제조에 유망한 공정으로 주목받고 있다. 적층 제조 부품은 부품 규모 증가에 따라 열이력이 변화하며, 이에 따라 미세조직 및 기계적 특성이 달라질 수 있음이 보고되고 있다. 그러나 Hastelloy C276의 WAAM 연구는 대부분 10 mm 이하 두께의 thin wall 시편에 집중되어 있어, 두꺼운 부품 조건에서의 특성 변화에 대한 연구는 제한적인 실정이다. 본 연구에서는 WAAM Hastelloy C276 벌크 소재를 제작하고 그 미세조직 및 기계적 특성을 조사하였다. 제조된 시편은 적층 방향(BD, building direction)으로 성장한 수직상 구조가 발달하였으며, 일부 nano 석출상이 수직상간 영역에 존재했다. 방향에 따른 인장 시험 결과, 항복 강도는 BD 방향 평균 356.6 MPa, TD 방향 (BD에 수직 방향) 평균 374.6 MPa로 나타났으며, 인장 강도는 각각 평균 649.2 MPa와 699.4 MPa를 보였다. 연신율은 BD 방향에서 63%, TD 방향에서 65%로 측정되었다. 이러한 WAAM 소재의 물성은 기존 공정으로 제조된 Hastelloy C276 소재의 물성 범위에 준하는 강도-연성 조합을 나타내는 것으로 확인되었다. 파단면 분석 결과, 방향과 무관하게 전반적으로 연성 파괴 특성을 나타냈으며, 수직상 내부에서 slip을 통해 변형을 수용하였다. 상기 결과들을 바탕으로 WAAM Hastelloy C276 합금의 변형 거동을 규명하고 그 응용 가능성에 대해서도 토의하고자 하였다.

#### [P17-11]

**셀 구조 조절을 통한 초고강도-고연성 적층제조 마레이징 중엔트로피 합금 개발:** 김은찬, 이재홍(포항공과대학교), 권현석\*(케임브리지대학교), 구본우(포항공과대학교), 정상국(한화에너지로스페이스), 왕재민(경북대학교), 안성열, 이정아(포항공과대학교), 조성재(공주대학교), Stefanus Harjo, Wu gong(J-PARC), 이성보(서울대학교), 홍순직(공주대학교), 홍순익(충남대학교), 김형섭\*(포항공과대학교)

**Keywords:** 마레이징 중엔트로피 합금, 적층제조, 셀구조, 기계적 물성, 변형 거동

마레이징강은 초고강도 강종으로 항공우주, 자동차, 방위 산업 분야에서 널리 사용되며, 최근 적층 제조의 발전으로 복잡한 형상의 부품에도 적용 가능성이 열리고 있다. 그러나 마레이징강의 제한된 변형 경화능은 적층 제조 시에도 동일하게 나타나며, 이로 인하여 광범위한 활용이 제약된다. 본 연구에서는 뛰어난 기계적 성능을 보이는 새로운 LPBF 제조 Fe60Co25Ni10Mo5 (at%) 마레이징 중엔트로피 합금을 제시한다. 공정 최적화를 통해 기공률이 0.2% 미만인 완전 치밀 구조의 LPBF 시편을 제작하였으며, 제작된 시편은 셀 경계에 Mo 편석이 나타나는 셀 구조를 보였다 (PBFAB). 650도에서 시효 처리 시 (PBFA650), 셀 경계가 Mo-rich 나노 레이어와 FCC 나노 결정립으로 변하며, 셀 내부에  $\mu$ 상 석출물이 형성되었다. 이는 강도를 향상시키지만, Mo-rich 나노 레이어의 악영향으로 연성이 저하되었다. 반면 700도에서 시효 처리하면 (PBFA700), 유해한 Mo-rich 나노 레이어가 크게 감소하고, FCC 역변태를 촉진하여 준안정 나노 FCC 결정립이 균일하게 분포된 미세조직을 형성하였다. 이러한 미세조직은 stress-shielding 효과를 불러일으켜, 강도의 큰 하락 없이 변형 경화능과 연성이 크게 향상되었다. 그 결과, 항복강도  $1484.4 \pm 13.1$  MPa, 인장강도  $1749.5 \pm 0.7$  MPa, 균일 연신율  $10.0 \pm 0.9\%$ 라는 LPBF 제조 초고강도 철계 합금 중 기록적인 인장 물성을 달성하였다. 초고강도, 뛰어난 변형 경화 거동, 그리고 우수한 형상 구현 능력의 시너지는 본 LPBF 제조 마레이징 중엔트로피 합금이 첨단 구조 재료로서 광범위하게 활용될 수 있음을 보여준다.

#### [P17-12]

**LPBF로 제조한 Fe-6.5Si 연자성 Axial 코어의 구조 설계 및 전자기 성능:** 박규현, 윤지상, 김연우(한국재료연구원), 이상현((주)삼현), 김육진(현대자동차), 정재원(한국재료연구원), 박정민\*(한국재료연구원, 고려대학교)

**Keywords:** Fe-6.5Si, Axial flux motor, 연자성 소재, 적층제조, LPBF, 자기적 특성

전동화 기술 확산과 함께 고출력·고효율 구동 모터에 대한 수요가 증가됨에 따라 모터 코어 소재 및 구조 최적화에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 전기차 구동계의 성능은 모터의 자기적 특성에 크게 의존하며, 특히 고토크 밀도와 소형·경량 설계가 가능한 axial flux 모터는 차세대 구동 시스템으로 주목받고 있다. Axial flux 모터는 넓은 유효 반경에서 자속이 작용하는 축방향 자속 경로를 이용하여 높은 토크 밀도를 확보할 수 있으나, 3차원 복잡형상 및 내부 구조 구현이 요구되어 기존 적층강판 공정으로는 설계 자유도와 실제 제작에 한계가 있다. 또한 모터용 연자성 소재로 사용되는 Fe-Si 합금은 Si 함량 증가에 따라 전기저항이 증가하여 와전류 손실 저감에 유리하지만, 높은 Si조성은 취성을 유발하여 절삭 및 성형 가공을 통한 복잡 형상 제조에는 제약이 따른다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 레이저 분말 베드 용융(Laser powder bed fusion, LPBF) 공정을 적용하여 Fe-6.5 wt%Si 기반 axial 형상의 연자성 코어를 설계 및 제조하였다. 슬릿 구조를 도입하여 경량화와 와전류 손실 저감을 동시에 도모하였으며, air gap 및 슬릿 두께를 주요 설계 인자로 설정하여 형상 변화에 따른 자기적 특성과 모터 성능 변화를 비교·분석하였다. 본 연구 결과는 적층제조 기반 고Si 연자성 소재의 구조 설계 가능성을 제시하며, axial flux 모터 적용을 위한 적층제조 기반 Fe-6.5Si 코어 설계의 적용 가능성을 고찰한다.

**[P17-13]**

Ni-W2C 분말을 이용한 DED 공정 기반 내마모 코팅의 미세조직분석 정량화 및 TC-PRISMA 연계 공정 최적화 연구: 이은세, Rohit Raj, Khushahal Thool, 서위걸, Aman Gupta, 최시훈\*(국립순천대학교 첨단부품소재공학과)

**Keywords:** Directed Energy Deposition, Ni-W2C, Wear-Resistant Coating, W2C Particle Distribution, Microstructure, TC-PRISMA

본 연구에서는 Ni-W2C 복합분말을 이용한 Directed Energy Deposition 공정으로 고내마모 표면층을 형성하고 공정 조건에 따른 강화상(W2C) 거동과 물성 변화를 체계적으로 평가하는 것을 목적으로 연구하였다. 스캔 속도를 고정한 상태에서 레이저 출력 및 분말 공급량을 변화시키고, 단위 분말 질량당 에너지 개념의 입열량 지수를 도입하여 조건별 시편을 제작하여 DED 공정의 공정변수에 따른 W2C 거동을 비교하였다. 우선 코팅층은 OM 및 FE-SEM을 이용하여 미세조직을 분석하였으며 기계적 특성을 관찰하기 위해 비커스 경도 맵을 통해 두께 방향 편차까지 함께 분석하였고, 나노인덴테이션 테스트를 활용해 초기 강화상과 석출된 강화상의 경도를 비교하여 미세조직 지표와의 상관성을 고찰하였다. 이후 코팅층 단면은 FE-SEM 관찰 후 이미지 이진화/세그멘테이션으로 Ni 매트릭스와 W2C 입자를 분리하여 입자 크기 및 분포 특성을 정량화하였고 강화상의 분산 평가는 최근접 이웃 거리(NND)를 3 번째 이웃까지 확장하여 계산하고, 동일 기준의 탐색 반경을 적용하여 층별 균일성을 비교하였다. 또한 미세조직 기반 복수 지표를 통합 점수화하여 공정 조건을 랭킹화하고 최적 조건을 도출하였다. 추가적으로 유한요소 기반 열이력과 TC-PRISMA를 연계하여 강화상의 용해와 석출을 해석하고, 실험에서 관찰된 입자 손상 및 경도 경향의 원인을 논의하였다.

**[P17-14]**

Investigation of Hot Cracking Behavior in Additively Manufactured Maraging Steel: jongtae kim(Korea Institute of Industrial Technology), Philip Grimm(Leibniz Institute for Solid State and Materials Research Dresden), Seul-Ki. Han, MI HYE. LEE, Junhee. Han, Leeseung. Kang\*(Korea Institute of Industrial Technology)

**Keywords:** Additive manufacturing, Maraging steel, Hot cracking

This study investigates the hot cracking phenomena occurring during the additive manufacturing of maraging steel modified with metallic yttrium (Y). Y-modified powders were synthesized by incorporating metallic Y during the melting process to evaluate its potential as a strengthening agent. However, the initial laser powder bed fusion (LPBF) results exhibited a high sensitivity to hot cracking, primarily initiated along the grain boundaries of the elongated columnar grains. To address this challenge, a comprehensive study was conducted to understand the solidification behavior and the underlying mechanisms of crack formation. Using a thermodynamic approach, the research focuses on characterizing the entire solidification process and identifying the factors that aggravate crack sensitivity in the presence of Y. Furthermore, this work explores the microstructural evolution and the resulting changes in mechanical properties, aiming to establish a correlation between processing parameters and alloy integrity. The findings provide critical insights into the thermodynamic stability of Y-modified maraging steels and suggest potential pathways for fabricating high-performance, crack-free components through additive manufacturing.

**[P17-15]**

알루미늄-세라믹 복합재료의 DED 적층 특성 평가 및 강화 메커니즘 분석: 김재형, 최윤석\*, 김수민(부산대학교)

**Keywords:** 알루미늄 복합재료, Direct Energy Deposition, Finite Element Analysis, 항복강도, 잔류응력

최근 항공·우주 분야의 확대로 높은 비강성과 경량화를 동시에 만족하는 구조재의 수요가 증가함에 따라 알루미늄-세라믹 복합재료에 대한 관심이 커지고 있다. 이러한 알루미늄-세라믹 복합재를 제조하기 위한 공정 중 하나인 DED (Directed Energy Deposition)는 분말을 연속적으로 공급하면서 고에너지 밀도 열원(레이저, 전자빔, 전기아크 등)을 이용해 재료를 국부적으로 용융·응고시켜 적층하는 방식으로, 복잡한 3차원 형상의 신속한 제조와 국부 보수에 유리하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 적층제조용 알루미늄 합금(AlSi10Mg)에 BN 분말을 교반주조로 분산시킨 뒤 Gas Atomization을 통해 복합 분말을 제조하고, DED 공정으로 적층하여 미세조직 및 기계적 물성을 분석하였다. 기계적 물성 분석 결과, 기존 AlSi10Mg 대비 인장강도와 연신율은 개선된 반면 항복강도는 유사한 수준으로 유지되는 거동이 관찰되었다. 본 연구는 이러한 거동이 DED 특유의 급속 응고 조건에서 기지-강화재 계면에 형성되는 잔류응력 및 국부 응력장과 연관될 수 있다고 보았다. 따라서 측정값과 이론 예측값 간 차이를 정량적으로 해석하기 위해 FEA (Finite Element Analysis)를 활용하여 계면 및 주변 영역의 잔류응력 분포와 응력 집중 메커니즘을 분석하였다.

**[P17-16]**

EIGA 공정 변수가 적층제조 및 전자부품용 미세 구리 분말의 입도 분포와 산소 함량에 미치는 영향: 전창우\*, 김충수, 이주호, 박은수(주식회사 이엠엘), 박상하(대구기계부품연구원), 김가희, 허은진(한국나노기술원)

**Keywords:** 금속 분말, EIGA, 구리, 적층제조

고집적 전자부품 및 정밀 적층제조(Additive Manufacturing) 분야에서 구리(Cu) 분말의 활용도가 높아짐에 따라, 20 $\mu$ m 이하의 미세 입도 제어와 산화 억제 기술이 핵심 과제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 고정형 구리 분말 제조를 위해 EIGA(Electrode Induction Melting Gas Atomization) 공정을 적용하고, 주요 공정 변수가 분말의 입도 분포 및 산소 농도에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 가스 분사 압력(Gas Atomization Pressure), 유도 가열 출력(Induction Power), 전극 하강 속도(Feeding Rate) 등을 핵심 제어 변수로 설정하여 분말화 거동을 고찰하였다. 연구 결과, 가스 압력 증가와 용탕 유속의 정밀한 제어가 액적(Droplet)의 미세화 효율을 결정짓는 주요 인자임을 확인하였다. 특히, 최적화된 공정 조건 하에서 비행 중인 액적의 표면적 증가에 따른 산화 반응을 최소화할 수 있는 임계 조건을 도출하였다. 도출된 최적 공정 조건을 적용한 결과, 20  $\mu$ m 이하 입도 구간의 수율을 70%

까지 획기적으로 향상시켰으며, 동시에 분말 내 산소 함량을 100 ppm 이하로 제어하는데 성공하였다. 본 연구는 EIGA 공정 변수와 구리 분말 특성 간의 상관관계를 규명함으로써, 고품질 전자 재료용 미세 분말의 양산화 가능성을 제시하였다.

#### [P17-17]

**Wear resistance and microstructure of laser cladding layer on directly nitrided Ti alloy substrate:** Sang-Ha Park\*(Daegu Mechatronics and Materials Institute), Woo-seok Jung(TESTCOR), Seung-ik Lee(KPC)

**Keywords:** Wear resistance, Corrosion resistance, Metal matrix composite, Nitrogen interaction, Laser cladding

In this study, Surface modification is an attractive method to enhance the surface hardness and wear resistance of titanium. The nitrogen interaction, a nitrided layer was formed that consists of titanium nitrides, followed by an interstitial solution of nitrogen in the hcp  $\alpha$  titanium phase. The microstructural changes of these alloys in relation to the alloy composition and processing parameters were studied. It was found that the microstructure of alloys nitrided at temperatures below their  $\beta$  transition temperatures for various periods of time is uniform and homogeneous. With the increase of the temperature above their  $\beta$  transition temperatures the microstructure changes to irregular. Micro-indentation hardness testing using a Knoop indenter was conducted on the nitrided titanium alloys to analyse their hardness evolution in relation to the nitriding processing parameters and alloy composition. It was found that the microhardness increases with the increase of the temperature and time of nitriding. The surface morphology of the Ti-2Mo-0.3Ni alloy in relation to the nitriding processing parameters was analysed. Additionally, to improve wear and corrosion resistance a continuous wave 1.8kW diode laser was used to synthesize Ti/TiN metal matrix composite coating on the surface of commercial pure titanium. The microstructure and the wear resistance of the synthesized metal matrix composite coating were investigated. The synthesized surface Ti/TiN metal matrix composite coating had a pronounced gradient microstructure through the melt depth. Good metallurgical bonding between the reinforcing phase of the metal matrix composite and the titanium matrix was observed. The synthesized Ti/TiN metal-matrix composite coating layer exhibited significantly improved wear resistance under high-temperature (up to 250°C) dry sliding wear conditions. Acknowledgment This research was supported by the Materials and Components Technology Development (RS-2024-00448196) project of the Ministry of Trade, Industry and Energy.

#### [P17-18]

**DED로 제조된 316L 스테인리스강의 극저온 변형거동 분석:** 박정현, Muhammad Ishtiaq, 강성규\*(경상국립대학교), 김영균(한국재료연구원)

**Keywords:** 316L 스테인리스강, DED, 극저온

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. 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 미세조직 효과를 고려하여 시편을 제작하고, 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 유지됨을 확인하였다. 또한 4.2 K에서는 뚜렷한 세레이션 거동(serrated flow)이 관찰되었으며, 이는 초극저온 조건에서 불연속적인 전위 운동이 변형 거동을 지배함을 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.

#### [P17-19]

**고상대밀도(0.4~0.6) 적층 제조 Ti-6Al-4V 격자 구조체의 변형 및 에너지 흡수 거동 연구:** 김규식\*(국방과학연구소), 김준혁(국립창원대학교), 김대웅, 박정효(국방과학연구소), 정성택, 권영삼((주)썬타텍), 홍현욱(국립창원대학교)

**Keywords:** 경량 구조, 금속 격자 구조체, 적층 제조, 기계적 특성, 상대밀도

무기체계의 성능 향상을 위한 방안 중 하나는 구조체를 경량화하는 것으로, 구조용 금속 소재의 강도를 강화하거나 경량 소재(저밀도, 격자 구조체)를 적용하는 방안들이 제시되고 있다. 최근 3차원 적층 제조(3D Additive Manufacturing) 공정의 발전으로 복잡한 형상의 정밀 부품을 제작할 수 있게 되었으며 이는 다양한 형상의 격자 구조체를 제작함에 있어서 큰 이점을 나타내고 있다. 이에 본 연구에서는 무기체계 경량구조 구현을 위한 금속 격자 구조체를 경량 금속인 Ti-6Al-4V 합금과 LPBF(Laser Powder Bed Fusion) 공정을 활용하여 제작하였다. 또한 격자 구조체의 상대밀도(relative density)에 따른 기계적 특성을 평가하여 구조체로서의 적용성을 검토하고 변형 및 에너지 흡수 거동에 대하여 미세조직 및 경자의 구조적 특징을 활용하여 해석하고자 하였다.

#### [P17-20]

**항공용 부품 제조를 위한 레이저 DED 기반 Ti-6Al-4V 적층재의 미세조직 및 고온 변형 거동 연구:** 장경현\*, 김성욱, 이현석, 천창근(포항공업과학연구원)

**Keywords:** 타이타늄, 항공소재, 적층제조, 고온변형

최근 항공 산업의 회복세와 함께 고강도·경량 특성을 지닌 티타늄 합금 수요가 급증하고 있으나, 기존의 전신재 기반 단조 공

정은 다단계의 자유 단조와 형단조를 거치며 발생하는 대형 설비 투자비 및 높은 소재 손실률(Buy-to-Fly ratio)로 인해 경제성 확보가 어려운 실정이다. 이러한 한계를 극복하기 위해 Laser DED(Directed Energy Deposition) 기술을 활용하여 최종 부품과 유사한 형상의 프리폼(Preform)을 빠르게 적층한 후, 최소한의 단조 공정으로 최종 물성을 확보하는 적층제조-단조 하이브리드 공정이 차세대 제조 기술로 주목받고 있다. 본 연구는 항공기 엔진의 핵심 부품인 소형 블레이드 제작을 목표로 하며, 전통적인 제조 방식 대비 소재 효율성을 극대화하고 공정 단계를 단순화하여 고신뢰성 항공 부품을 경제적으로 생산하기 위한 공정 설계의 기초 연구를 목적으로 한다. 실험을 위해 항공용 Ti-6Al-4V 분말을 원료로 Laser DED 공정 최적화를 통해 고밀도 프리폼 시편을 제작하였으며, 적층 상태(As-built)에서의 기공 및 결함 분포를 확인하기 위해 미세조직 관찰과 인장 특성 평가를 선행적으로 수행하였다. 이후 하이브리드 공정의 핵심 단계인 형단조 공정의 수치 해석 및 최적 조건 도출을 위해, Gleeble 시험기를 활용하여 다양한 온도 및 변형률 속도 범위에서 고온 압축 시험을 실시하고 유동 응력 데이터를 확보하였다. 본 연구를 통해 도출된 적층재의 기초 물성 및 열간 변형 데이터는 향후 수치 해석 및 금형 설계의 정밀도를 높이는 핵심 입력 자료로 활용될 예정이며, 이를 바탕으로 실제 항공용 블레이드 금형을 이용한 형단조 실증을 진행하여 하이브리드 공정의 유효성을 최종 검증하고자 한다.

#### [P17-21]

**순수구리 소재 기반의 PBF 공정으로 제조된 부품의 표면 조도 개선을 위한 Post-Polishing 공정 연구:** 유성호\*, 김수현, 김예림(파트너스랩 주식회사)

**Keywords:** 적층제조, LPBF, 순수구리, 표면 조도 개선

최근 전기·전자 및 반도체 장비, 자동차 부품 산업에서는 고전도성 및 열전도성이 우수한 순수구리(CuCP, Copper of Commercial Purity) 소재의 적용이 증가하고 있다. 그러나 레이저 파우더 베드 융합(LPBF, Laser Powder Bed Fusion) 공정을 통한 CuCP 소재 부품 제조 시, 높은 반사율과 열전도도로 인해 용융풀 제어가 어렵고, 이로 인한 표면 조도(Surface Roughness) 열화가 주요한 문제로 지적되고 있다. 본 연구에서는 LPBF로 제조된 CuCP 소재 부품의 표면 품질을 개선하기 위해 다양한 후처리(Post-Polishing) 공정을 적용으며, 주요 연구 범위는 As Built, 기계적 연마(샌드블라스팅), 화학적 연마 등으로 설정하였으며, 각 공정별 표면 거칠기(Ra) 변화, 전기전도도 변화를 비교 및 분석하였다. 실험 결과, 기계적 연마 방법에서도 적용하는 소재에 따라서 표면 거칠기의 차이점을 확인할 수 있었으며, 기계적 연마 및 화학 연마 공정을 복합 적용할 경우 평균 조도가 기존 대비 약 % 30이상 개선되는 효과를 확인하였다. 또한, 표면 산화층 제거와 미세기공 폐쇄 효과로 인해 전기전도도 역시 유의미하게 향상되는 경향을 보였다. 따라서 본 연구는 LPBF 기반 CuCP 부품의 실용화를 저해하는 표면 품질 문제를 해결할 수 있는 효과적인 후처리 접근법을 제시하였으며, 향후 모빌리티 모터용 권선형 코일, 반도체 장비용 냉각채널, 전력전자용 고전도 코일 등 산업적 응용에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

#### [P17-22]

**Strategic Application of Metal Additive Manufacturing for Defense Materials and Process Innovation:** Jeesoo Sim\*(Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement)

**Keywords:** Additive manufacturing, Defense Technology

Metal additive manufacturing (AM), including Powder Bed Fusion (PBF) and Directed Energy Deposition (DED), has emerged as a key enabling technology for fabricating complex geometries, near-net-shape components, and lightweight structures with refined microstructures. The localized melting-solidification mechanism provides enhanced mechanical performance and design flexibility compared to conventional casting and machining. In defense systems, long service lifetimes and obsolescence of imported spare parts create critical challenges in maintenance, repair, and overhaul (MRO). Metal AM offers on-demand production, reverse engineering, and remanufacturing capabilities, significantly reducing lead time and logistics burden. PBF enables high-precision structural components, while DED is advantageous for large-scale part repair and functional surface enhancement. This study reviews recent technological trends in metal AM and examines its applicability to defense platforms from a materials engineering perspective, focusing on microstructure control, process optimization, and supply chain resilience. Strategic integration of AM is expected to enhance operational readiness and strengthen domestic manufacturing capability for next-generation defense systems.

#### [P17-23]

**Effect of Sintering Temperature on the Tribological Behavior of Binder Jet Printed STS316L and Cu-Infiltrated Composites:** Han Jung Kim, Na Young Kim (Korea Institute of Industrial Technology), Kee-Ahn Lee(Inha University), Hyuksoo Han(Hanyang University), Kyung Il Kim\*(Korea Institute of Industrial Technology)

**Keywords:** Binder Jetting, STS316L, Cu Infiltration, Tribological Behavior, Wear Mechanism, Metal Matrix Composite

Binder jetting (BJT) is an additive manufacturing process known for its high material flexibility and capability to fabricate complex geometries. In addition, the process enables the production of porous structures and metal matrix composites through conventional powder metallurgy routes such as sintering and impregnation. STS316L stainless steel powder, one of the most commonly used materials in BJT, exhibits excellent corrosion resistance, weldability, and mechanical stability. However, investigations focusing on its tribological performance remain relatively scarce. In this study, the tribological behavior of BJT-fabricated STS316L sintered bodies and Cu-infiltrated STS316L composites was systematically evaluated. Sintering treatments were performed at three different temperatures

(1100, 1200, and 1300 °C). Tribological characteristics were examined using a pin-on-disc test configuration. Friction coefficients and wear track morphologies were analyzed through scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). The results revealed that, for STS316L sintered specimens, both the friction coefficient and wear track dimensions increased with rising sintering temperature. In contrast, the Cu/STS316L composites demonstrated relatively stable friction behavior and smoother wear surfaces across all sintering conditions. The dominant tribological mechanisms were further interpreted based on detailed microstructural observations of the wear tracks.

#### [P17-24]

**기계학습 기반 적층제조용 알루미늄 합금의 강도-전도도 상반 관계 분석:** 김도원, 전서연, 안성빈, 박수원, 송용욱, 최현주\*(국민대학교)

**Keywords:** 적층제조, 알루미늄 합금, 인공지능, 기계적 특성, 전기전도도

알루미늄 합금은 경량성과 우수한 기계적 특성으로 금속 적층제조(AM)의 핵심 소재로 꼽히지만, 기존 문헌 데이터는 공정 변수의 불일치와 조성 편향성으로 인해 AI 기반 합금 설계에 적용하기에는 신뢰성의 한계가 있다. 본 연구는 이러한 데이터의 파편화 문제를 해결하고 고신뢰성 합금 설계를 실현하기 위해, 통제된 공정 조건에서 수집된 In-house 데이터 중심의 예측 및 역설계 프레임워크를 제안한다. 이를 위해 DED(Directed Energy Deposition) 공정으로 Al6061 기반의 30여 종 시편을 제작하여, 공정 변수와 미세조직, 기계적 특성 간의 상관관계를 일관성 있게 확보하였다. 특히 주요 합금 원소 변화에 따른 경도와 전기전도도의 Trade-off 관계를 명확히 규명하였으며, 이를 기반으로 경도 예측에는 VAE 와 ANN 모델을, 전기전도도 예측에는 GBR 을 적용하여 예측 정확성을 극대화하였다. 최종적으로 t-SNE 및 K-NN 기반의 탐색을 통해 목표 물성을 만족하는 최적 조성을 도출함으로써, 고품질 In-house 데이터와 머신러닝의 융합이 적층제조용 신합금 개발의 효율적인 솔루션임을 입증하였다.

#### [P17-25]

**Microstructural, Mechanical, and Corrosion Characteristics of L-PBF Processed 304L Stainless Steel for SMR Applications:** Jiyun Oh, Junhyuk Ham, Ji Hyun Kim\*(Ulsan National Institute of Science and Technology)

**Keywords:** Laser powder bed fusion (L-PBF), 304L Stainless Steel, Nuclear Structural Materials, Small Modular Reactors (SMRs), Nuclear Qualification, Additive manufacturing (AM), 3D Printing, Mechanical Properties, Intergranular Corrosion (Huey Test)

Laser powder bed fusion (L-PBF) has been actively investigated as an additive manufacturing technology for nuclear structural materials. In particular, austenitic stainless steel 304L is a well-established alloy in nuclear systems owing to its favorable mechanical properties and corrosion resistance. With increasing interest in the application of additive manufacturing technologies to small modular reactors (SMRs), the accumulation of reliable experimental data for additively manufactured nuclear materials has become an important research topic. In this study, the microstructural, mechanical, and corrosion characteristics of L-PBF processed 304L stainless steel were examined as an initial step toward establishing a screening-level materials data package relevant to nuclear qualification. Microstructural characterization was conducted using optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) to identify features associated with the L-PBF process, including melt pool morphology and cellular solidification microstructure. These microstructural features are known to influence strengthening mechanisms and corrosion behavior in additively manufactured austenitic stainless steels. Tensile testing was performed to obtain fundamental mechanical properties, including yield strength, ultimate tensile strength, and elongation. These properties provide baseline information relevant to the assessment of structural integrity. In addition, Huey corrosion testing in accordance with ASTM A262 Practice C was conducted to evaluate susceptibility to intergranular corrosion. The Huey test was employed as a screening method to examine the sensitivity of process-induced microstructural features to intergranular corrosion. To provide a comparative perspective, the results obtained for L-PBF processed 304L stainless steel were analyzed in relation to conventionally wrought 304L, which is widely used in current nuclear components. Since conventionally wrought 304L serves as the currently qualified reference material in nuclear codes and standards, comparison with conventional wrought 304L is essential for qualification considerations. Differences in grain morphology, cellular solidification microstructure, and melt pool-related features were systematically compared with those of conventionally wrought 304L, as these microstructural characteristics are known to influence mechanical strength and corrosion behavior. Based on prior studies on additively manufactured austenitic stainless steels, L-PBF 304L exhibits higher yield strength due to solidification-induced cellular microstructure and high dislocation density, while maintaining comparable or slightly reduced ductility relative to conventional wrought. In terms of corrosion response, process-induced heterogeneities and residual stresses may affect susceptibility to intergranular corrosion, although the low carbon content of 304L is anticipated to mitigate classical sensitization-related degradation. Through this comparison, the present work provides preliminary data relevant to performance equivalency considerations and identifies microstructure-dependent deviations pertinent to nuclear qualification. Overall, this study contributes to the systematic accumulation of fundamental data on L-PBF processed 304L stainless steel by integrating microstructural, mechanical, and corrosion characteristics within a single framework. The results presented here represent an initial step toward a more comprehensive understanding of additively manufactured stainless steels for nuclear applications, including those envisioned in SMR systems.

**[P17-26]**

Wire-based laser additive manufacturing 방식으로 제조된 Ti-6Al-4V 합금의 CREEP 저항성 및 변형거동: 송노건, 박정현(인하대학교), 김대중((주) 에이엠솔루션즈), 이기안\*(인하대학교)

**Keywords:** Wire laser additive manufacturing, Ti-6Al-4V, Microstructure, Creep properties, Deformation behavior

DED (direct energy deposition) 적층 제조 방식은 조대한 형상 및 복잡한 구조물의 제조와 수리가 가능하며, powder 또는 wire를 feedstock으로 사용한다. 그 중 와이어를 feedstock으로 사용하는 WLAM (wire laser additive manufacturing)은 높은 적층 속도와 비용 절감의 장점을 가지고 있다. 또한, arc에 비해 레이저를 에너지원으로 적용함으로써 보다 정밀한 공정 제어가 가능하여 우수한 형상 정밀도와 표면 품질을 구현할 수 있다. Ti-6Al-4V는 대표적인 티타늄 합금으로, 우수한 비강도와 기계적 특성을 가진다. 최근 항공우주 및 해양 플랜트 산업에서 다품종·대형 부품 수요가 증가함에 따라, 복잡한 형상의 대형 부품을 효율적으로 제조할 수 있는 WLAM 공정이 주목받고 있다. 본 연구에서는 WLAM 공정을 통해 제조된 Ti-6Al-4V 합금의 초기 미세조직, creep 특성 및 변형 메커니즘을 조사하였으며, 그 결과를 기존 공정으로 제조된 Wrought Ti-6Al-4V소재와 비교 분석했다. Creep 시험은 Ti-6Al-4V 합금 고온 사용 온도 영역인 500°C에서 압축 항복 강도의 20~30% 영역에서 수행되었다. WLAM 공정으로 제조된 시편은  $\alpha'$  마르텐사이트가 일부 존재하였으며, 다수의 영역이  $\alpha/\beta$  phase의 라멜라 구조로 구성되어 있다. 반면 Wrought 소재는 polygonal 형태의 조대한 grain이 관찰되었으며 WLAM Ti-6Al-4V소재에 비해 더 높은  $\beta$  phase fraction을 보였다. Creep 시험 결과, WLAM 합금은 대부분의 응력 조건에서 Wrought 합금에 비해 낮은 최종 Creep 변형률과 정상상태 creep 속도를 나타내어 우수한 creep 저항성을 보였다. 응력 지수( $n$ )를 기반으로 변형 조직을 분석해본 결과, WLAM 합금의 크리프 변형은 grain boundary sliding (GBS)과 확산 거동이 병행되는 혼합 메커니즘에 의해 지배되는 것으로 나타났으며, Wrought 합금은 저응력 영역에서 dislocation creep, 고응력 영역에서 GBS가 기여하는 mechanism transformation이 관찰되었다. 상기 관찰 결과를 기반으로 WLAM 공정으로 제조된 Ti-6Al-4V소재의 고온 creep 변형 기구 및 물성 향상 방안을 함께 토의하고자 하였다.

**[P17-27]**

Direct energy deposition 적층 공정으로 제조한 중탄소 공구강의 조성 설계에 따른 미세조직 및 충격·마모 특성: 박정현, 전민수, 강민재(인하대학교), 김대중((주)에이엠솔루션즈), 전종배(동아대학교), 구용모((주)창성), 이기안\*(인하대학교)

**Keywords:** Direct energy deposition, Medium carbon tool steel, Microstructure, Mechanical property

고강도 공구강 소재의 경우 기존 절삭 공정을 통한 부품 성형에 어려움이 있어, 금속 적층 제조방식을 적용하여 부품을 제조하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 direct energy deposition (DED) 방식은 고에너지 열원을 이용하여 재료를 국부적으로 용융, 적층하는 대표적인 적층 제조 공정 중 하나로 알려져 있다. DED 공정은 대형 부품 제조 가능성, 빠른 적층 속도, 이중 소재 적층, 국부적인 파손 영역의 보수가 가능하다는 다양한 공정적 장점을 바탕으로, 금형/공구 산업에서의 적용 가능성이 검토되고 있다. 그러나 탄소 함량이 높은 공구강의 경우 적층 과정에서 균열 발생으로 인해 건전한 샘플 제조에 어려움이 있다. 본 연구에서는 용접봉 소재로 알려진 Gridur 6 (G6) 중탄소강 소재를 기준으로 적층 안정성과, 기계적 성능을 향상시키기 위해 modified 조성을 설계하였다. 균열 형성에 영향을 미치는 탄화물 억제제를 위해 C 함량을 감소시켰으며, 석출 및 고용 강화 효과 증대를 위해 각각 Cr 함량과 (#1) W 함량 (#2)을 증가시켜 조성을 설계하였다. 또한 제조한 #1, #2 샘플들의 미세조직을 분석하고 인장, 충격인성 및 내마모 특성을 조사/비교하였다. #1과 #2 샘플들은 모두 균열과 결함이 거의 없는 건전한 벌크 형태로 제조되었다. #1은 #2보다 상대적으로 높은 austenite 분율을 나타내었으며, austenite 영역을 따라 Cr-rich의 미세한 carbide들이 관찰되었다. 인장 강도의 경우 #1과 #2에서 각각 1770.9 MPa, 2333.3 MPa로 #2에서 더 높은 값을 보였다. 반면 충격 시험 결과에서는 #1과 #2에서 각각 2.75 J/cm<sup>2</sup>, 1.75 J/cm<sup>2</sup>의 값을 나타내어 #1에서 상대적으로 우수한 특성을 보였다. 또한 마모 시험 결과, wear rate가 10N 하중에서는 각각 1.60, 1.65 (10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup> /Nm), 그리고 20N 하중에서는 각각 2.51, 3.46 (10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup> /Nm)의 값을 나타내어 #1 소재의 우수한 내마모성을 확인하였다. 상기 결과들을 바탕으로 DED modified G6 합금들의 파괴 및 마모 기구를 규명하고 그 적용 가능성을 함께 토의하고자 하였다.



## P18 : 재료강도

### Room 3층 로비, 4월 29일

#### [P18-1]

고압수소 수송용 API X65강의 수소취화거동연구: 이아영, 김정우, 김동규, 박나현, 정세인, 박시형(울산대학교), 조성규, 주형건(현대제철 기술연구소), 신상용\*(울산대학교)

**Keywords:** API X65, 수소취성, SSRT, 파괴인성

탄소중립 및 친환경 에너지 전환이 가속화되면서, 고압 기체 수소 수송용 배관강으로 사용되는 API 5L X65 강 of 수소취화거동에 대한 관심이 높아지고 있다. 라인파이프 강은 용접 공정에서의 열 이력으로 인해 모재부(BM), 열영향부(HAZ), 용접부(WM)의 미세조직이 서로 달라지며, 이에 따라 수소의 확산-트랩 거동과 국부 변형 및 파괴 양상 또한 부위별로 상이하게 나타날 수 있다. 특히 상대적으로 페라이트-펄라이트 기반 조직이 관찰되는 모재와 비교해, 침상형 페라이트 및 베이나이트 계열 조직이 발달할 수 있는 용접부에서는 수소취화 민감도와 파면 특성이 달라질 가능성이 크지만, 이러한 미세조직학적 인자와 다양한 수소 파괴 시험 결과를 정량적으로 연결한 상관관계 연구는 여전히 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 API X65 강 of BM/HAZ/WM 미세조직을 분석하고, 질소 및 고압 수소 분위기에서 slow strain rate tensile test(SSRT)와 파괴 인성 시험을 수행하여 기계적 거동을 평가하였다. 시험 후 파단면을 SEM으로 관찰하여 연성/취성 파면을 및 균열 형상을 정량화 하였으며, EBSD 분석을 통해 균열 개시부와 전파 경로를 확인하였다. 최종적으로 미세조직 인자와 물성 지표(RA,  $K_{IH}$  등), 정량화 값 간의 상관관계를 도출하여 고압 수소 수송용 API X65 강 of 수소취화거동을 규명하고자 하였다.

#### [P18-2]

고출력 DED 공정으로 제작된 후열처리 미적용 Ti-6242 합금의 미세조직과 변형 거동 고찰 : 한재연, 김준혁(국립창원대학교), 권영삼((주)세타텍), 박정효, 김규식, 김대웅(국방과학연구소), 홍현욱\*(국립창원대학교)

**Keywords:** Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo, Direct energy deposition (DED),  $\alpha+\beta$  lamellae, Tensile properties, Slip transfer

Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti-6242) 합금은 Ti-6Al-4V 대비 우수한 고온 기계적 특성을 갖는 near- $\alpha$  Ti 합금으로 항공우주 분야에 활용되고 있으며, 최근에는 복잡 형상 제조 및 공정 비용 절감을 위해 선택적 레이저 용융(Selective Laser Melting, SLM)과 직접 용착 방식(Directed Energy Deposition, DED) 등 적층제조 공정의 적용이 확대되고 있다. 일반적으로 적층제조된 Ti 합금은 급속 냉각으로 인해  $\alpha'$  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  $\alpha'$  마르텐사이트가 지배적이지 않았으며, basket-weave 형태의  $\alpha+\beta$  라멜라 조직이 주를 이루고, 국부적으로 grain boundary  $\alpha$  및 구상화된  $\alpha$ 상이 관찰되었다. 응력 완화를 목적으로 적용된 stress-relief 열처리 이후에도  $\alpha+\beta$  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  $\alpha$  lath 내부의 높은 전위 밀도와  $\beta$ 상 내 다수의 slip line이 관찰되었으며, 특히 as-DED 시편에서  $\beta$ 상의 변형 정도가 더 크게 나타났다. 이는  $\alpha/\beta$  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.

#### [P18-3]

해양구조물용 H형강 FCAW 용접부의 저주기 피로 특성과 국부 변형 집중에 따른 손상 거동 고찰: 한재연, 박정현(국립창원대학교), 김재성(조선선재), 박형권, 이창훈(한국재료연구원), 정준호(현대제철), 홍현욱\*(국립창원대학교)

**Keywords:** H-section steel, Flux cored arc welding, Low-cycle fatigue, Microstructure characteristics

최근 국제적 에너지 수요 증가에 따라 해양플랜트 산업이 확대되면서 극한 환경에서 사용 가능한 구조용 강재에 대한 관심이 증가하고 있다. 이러한 환경에서 요구되는 구조용 강재는 고강도와 고인성을 동시에 만족해야 하며, 주요 부재 중 하나인 H형강과 그 용접부 또한 이러한 요구에 맞춰 발전해 왔다. 그러나 이러한 기계적 성능 확보만으로는 실제 사용 환경을 충분히 반영하기에는 한계가 있다. 실제 해양 구조물은 파랑 및 풍하중과 같은 반복 하중에 지속적으로 노출되므로, 구조물의 신뢰성 확보를 위해 피로 특성에 대한 고려가 필수적이다. 그러나 아직까지 해양용 소재 및 용접부 관련 연구는 주로 저온 충격 인성 확보에 집중되어 있으며, 피로 특성에 대한 체계적인 연구는 상대적으로 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 460 MPa급 해양용 H형강과 FCAW 용접부를 대상으로 저주기 피로 거동을 평가하고, 피로 시험 전·후 미세조직 분석을 통해 미세조직 기반 피로 strain partitioning 및 손상 진전 거동을 고찰하였다. 모재는 페라이트-펄라이트 기지에 미세한 MC 탄화물이 분포한 미세조직을 보였으며, 용접부는 acicular 페라이트 및 lath bainite와 granular bainite 등 베이나이트계 조직으로 구성된 미세조직적 이질성을 나타냈다. 경도 및 인장 시험 결과, 용접부는 전형적인 overmatching 거동을 나타냈고, 인장 및 저주기 피로 시험에서 모든 시편은 모재에서 파단되었다. 그럼에도 불구하고 용접부 시편은 모재 시편에 비해 다소 감소된 피로 수명을 나타냈다. 저주기 피로 거동 측면에서는, 모재는 초기 cyclic

softening 이후 포화(saturation) 거동을 보인 반면, 용접부는 포화 단계 없이 지속적인 cyclic softening을 나타냈다. EBSD 분석 결과, 피로 수명이 낮은 용접부에서는 국부적인 strain localization이 뚜렷하게 관찰되었으며, TEM 분석을 통해 PSB-like 형태의 slip band 및 전위 집적이 확인되었다. 이러한 국부 변형 집중은 조기 균열 개시를 유발하여 용접부의 피로 성능 저하로 이어지는 것으로 판단된다.

#### [P18-4]

**고강도 원자로압력용기강 후판 전자빔용접부의 Pre-tempering 조건에 따른 미세조직 분석:** 배소영(고려대학교, 한국원자력연구원), 현세미, 김민철\*, 홍석민, 김홍덕(한국원자력연구원), 손석수(고려대학교)

**Keywords:** SA508 Gr.3 저합금강, 전자빔 용접, Pre-tempering, 잔류 오스테나이트

최근 소형모듈원자로(SMR, Small Modular Reactor)에 적용되는 대형 부품 제작기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 원자로압력용기와 같은 대형 구조물은 SAW(Submerged Arc Welding) 공정으로 제작되고 있으나, SAW 공정은 다중 패스 방식으로 많은 제작 시간이 소요된다. 반면 전자빔용접(EBW, Electron Beam Welding)은 고에너지 밀도의 전자빔을 조사하는 단일 패스 용접 공정으로, 기존 공정 대비 약 80% 이상 제작 시간을 단축할 수 있다. 일반적으로 용접부에는 높은 잔류응력이 형성되며, 이를 완화하기 위해 후열처리 공정을 적용한다. 특히, EBW 공정은 높은 냉각 속도로 인해 저온변태상 및 M/A constituent가 형성될 수 있으며, 이는 기계적 특성 저하의 원인이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 후열처리 이전 단계에 Pre-tempering 공정을 추가하여 전자빔 용접부의 미세조직 특성을 제어하였다. 실제 압력용기용 저합금강인 SA508 Gr.3 저합금강에 전자빔용접을 적용하여 두께가 약 250 mm의 대형 시편을 제작하였다. Pre-tempering 공정은 350~450°C 범위에서 수행하고 광학현미경과 SEM을 통해 공정 전후의 용접부 미세조직과 탄화물 형상을 분석하였다. 또한 상온 및 288°C에서 인장시험을 수행하고 샤르피 충격시험을 통해 용접부의 충격 인성을 평가하였다. 이를 통해 Pre-tempering 조건 변화에 따른 미세조직 변화와 기계적 특성 간의 상관관계를 고찰하였다.

#### [P18-5]

**유한요소해석을 활용한 최소침습 능동전개형 생분해성 전자소자의 기계적 설계:** 조지현, 김수민(UNIST), 황경석(Harvard University), 배재영, 강승균(서울대학교), 김주영\*(UNIST)

**Keywords:** 최소침습, 능동전개, 생분해성, 유한요소해석, 뇌전증

뇌전증은 뇌졸중·치매에 이어 세 번째로 흔한 신경계 질환으로, 전 세계 평생 유병률이 약 7.6명/1,000명에 이른다. 과도한 신경 흥분은 이상 신경 활성 영역에 따라 의식 변화 및 경련을 유발하며, 이러한 발작 기원 영역을 정밀하게 분석·모니터링하기 위해서는 광범위 면적을 고해상도로 인터페이스할 수 있는 장치가 필요하다. 그러나 기존 전극 삽입술은 넓은 개두를 요하므로 미세 손상만으로도 기능 저하 및 합병증을 초래할 수 있다. 본 연구에서는 최소침습 삽입 후 체내에서 능동전개되어 넓은 피질 면적을 커버하는 생체분해성 전자 텐트 설계를 제안한다. 제안 소자는 모든 구성 재료를 생체적합·생체분해성으로 선정하여 별도의 제거 수술 없이 분해되도록 설계함으로써 장기 합병증 위험을 저감한다. 또한 주사기 내 패키징된 구조가 체온 및 구조적 유도에 의해 복원되도록 형상기억고분자 기반의 구조적 요소를 적용하여, 삽입 직경 대비 넓은 면적으로의 안정적 전개를 구현하였다. 기계적 신뢰성 확보를 위해 3차원 유한요소해석을 통해 패키징·전개 과정에서의 국부 변형률을 정량화하였고, 이를 바탕으로 금속 전극·박막 반도체 소자에 가해지는 응력을 완화하는 설계 규칙을 도출하였다. 제안 플랫폼은 두께·탄성을 매칭, 박막 전극 패터닝 및 분해 거동 제어를 통해 최소침습·일시적 신경 인터페이스와 치료적 모니터링을 위한 실용적 재료·공정 기반 해법을 제공한다.

#### [P18-6]

**Heat Transfer Analysis of System-on-Chip: Finite Element Modeling and Neural Network-based Temperature Prediction:** 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 neural network

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 neural network (PINN). 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 PINN training dataset. The PINN 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 weighted sampling strategy that focuses on heat source regions is incorporated to further improve the prediction accuracy of the PINN model. A comparison between the computed and predicted data is performed across the SoC, which indicates that the applied PINN model is robust and adequately captures the transient thermal behavior. These results demonstrate that the PINN 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.

**[P18-7]**

**보론강의 경도와 충격인성에 미치는 제조 공정의 영향:** 오재석, 정민섭, 황병철\*(서울과학기술대학교)

**Keywords:** Boron-added steel, Solidification, Precipitation behavior

보론강은 소량의 보론 첨가만으로도 높은 경화능을 확보할 수 있어 다양한 구조용 강재에 적용되고 있다. 이러한 보론의 경화능 향상 효과는 보론이 오스테나이트 결정립계에 편석된 상태로 존재할 때에만 유효하며 보론 함유 석출물 형성은 그 효과를 크게 저하시킬 수 있다. 따라서 보론의 경화능 향상 효과를 확보하기 위해서는 제조 공정 중 보론의 고용 및 석출 거동을 제어하는 것이 매우 중요하다. 특히 열처리 단계 이전 응고 및 열간 압연, 냉각 등의 초기 제조 이력에 따라 보론의 고용 상태와 석출 거동이 변화할 수 있으며, 이는 이후 열처리 과정에서의 상변태 거동과 최종 기계적 특성에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 제조 공정에 따른 응고 및 석출 거동 변화가 보론강의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 조성 및 열처리 조건은 동일하나 열처리 이전 제조 이력이 다른 두 보론강을 대상으로 기계적 특성을 평가하였으며, EBSD, EDS 및 TEM 분석을 통해 미세조직을 분석하였다. 또한 Thermo-Calc를 활용하여 두 강재의 응고 및 석출물의 석출 거동을 모사하여 제조 공정 차이가 기계적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 고찰하였다.

**[P18-8]**

**L-PBF로 제조된 316L 스테인리스강의 적층 방향에 따른 미세조직 및 이방성 특성 평가:** 허재혁, 최인철\*(국립금오공과대학교)

**Keywords:** 레이저 적층 제조, 316L 스테인리스강, 이방성, 나노 압입 시험, 결정학적 층상 미세구조

본 연구에서는 Laser Powder Bed Fusion(L-PBF) 공정으로 제조된 316L 스테인리스강 시편을 대상으로 적층 방향 및 결정 배향에 따른 미세조직과 물성 변화를 분석하였습니다. 적층 제조(AM) 시편의 이방성 규명을 위해 XY, XZ, YZ의 세 직교 평면에서 미세조직 관찰을 수행하였습니다. 광학 현미경(OM) 및 SEM 분석을 통해 용융 풀(Melt pool)의 기하학적 형상과 에피택셜 성장(Epitaxial Grain Growth) 거동을 조사하였으며, EBSD 분석을 통해 결정립 미세화 및 방위 분포를 검증하였습니다. 특히, 적층 방향에 따라 다른 결정학적 구조가 물성에 미치는 영향을 집중적으로 고찰하였습니다. 나노 압입 시험(Nano-indentation) 분석 결과, 각 평면과 적층 조건에 따라 소성 저항성 및 전단 응력의 차이를 확인하여 적층 제조된 시편의 이방적인 기계적 특성을 확인하였습니다. 또한, 부식 시험을 통해 이방성 조직이 재부동태화 및 내식 성능에 미치는 영향을 평가하여 적층 전략과 최종 물성 간의 상관관계를 고찰하였습니다. 해당 연구를 기반으로 향후 수소 장입에 따른 적층 제조된 316L 스테인리스강의 수소 취성 연구를 진행할 것입니다.

**[P18-9]**

**해수 분위기에서 Mn-Cu 합금의 응력부식균열 거동 연구:** 목송민, 박준영, 이준민(경상국립대학교), 김대경(한화오션), 김상식, 강성규\*(경상국립대학교)

**Keywords:** Mn-Cu alloy, SCC, Fracture

최근 해양 환경에서 발생하는 소음 공해에 대한 사회적·산업적 관심이 증가함에 따라, 선박 운항 중 주요 소음원인 프로펠러 소음 저감을 위한 소재 개발의 중요성이 부각되고 있다. 기존의 프로펠러 소재로 널리 사용되어 온 니켈-알루미늄 청동(NAB) 합금은 진동 및 소음 저감 성능 측면에서 한계를 보이고 있으며, 이를 대체할 수 있는 후보 소재로 우수한 감쇠 및 기계적 특성을 갖는 Mn-Cu 합금이 주목받고 있다. Mn-Cu 합금은 진동 감쇠, 충격 흡수 및 소음 저감 측면에서 유리한 특성을 나타낸다. 하지만, 해양 환경에서 선박 프로펠러는 운항 중 반복 하중과 부식 환경에 동시에 노출되기 때문에 SCC 발생 위험이 높으며, SCC는 전기화학적 반응과 기계적 응력이 복합적으로 작용하여 예측이 어렵고 치명적인 파손으로 이어질 수 있다. 따라서 Mn-Cu 합금의 해수 환경에서의 부식 및 SCC 거동을 체계적으로 규명하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 3.5 wt.% NaCl 용액을 해수 모사 환경으로 설정하고, Mn-Cu 합금의 응력 부식 균열(SCC) 거동을 저속 변형률 인장(Slow Strain Rate Test, SSRT) 시험을 통해 조사하였다. 다양한 인가 전위 및 변형률 속도 조건 하에서 SSRT 시험을 수행하여 Mn-Cu 합금의 SCC 민감도를 평가하였으며, 전기화학적 조건과 기계적 하중이 결합된 환경에서의 SCC 발생 메커니즘을 규명하였다.

**[P18-10]**

**후열처리 조건 제어에 따른 SLM 적층 Ti-6Al-4V 합금의  $\alpha'$  martensite 분해 거동과 강도-연성 균형 최적화:** 이아름, 한재연(국립창원대학교), 김치원(한국재료연구원), 이지원, 최용혁(두산에너지빌리티), 홍현욱\*(국립창원대학교)

**Keywords:** Ti-6Al-4V, Selective Laser Melting (SLM), Post heat treatment,  $\alpha'$  martensite,  $\alpha+\beta$  lamellar decomposition, elongation

지속 가능한 성장을 위한 탄소중립 기조가 강화됨에 따라 에너지효율 향상 및 부품 경량화에 대한 요구가 증가하며, 이에 고성능 경량소재의 중요성이 부각된다. Ti-6Al-4V는 우수한 비강도와 인성으로 다양한 산업에서 활용 가치가 높은 전략소재로 평가된다. HCP- $\alpha$  및 BCC- $\beta$  이중상 조직은 후열처리에 따른 기계적 특성 제어가 가능하며, 최근 제조원이 절감과 높은 설계 자유도를 위한 Selective Laser Melting, SLM을 활용한 Ti64 적층제조에 필요성이 강조된다. 극심한 온도 구배를 동반하는 AM 공정 특성상, as-built 상태에서  $\beta$  안정화 원소가 과포화된 lath  $\alpha'$  martensite가 형성된다. 이는 높은 경도와 함께 연성 저하 및 인성 취화의 주요 원인으로, 산업적 요구 성능 충족을 위해서 후열처리를 통한 연성 회복이 수반되어야 한다. 본 연구에서는 열처리 온도와 유지 시간, 냉각속도를 달리하여 미세조직 변화와 기계적 특성을 분석함으로써, 연성 회복에 따른 강도 저하를 최소화하면서 연성을 향상에 최적의 조건을 규명하고자 하였다. 800-950°C 열처리 중  $\beta$  안정화 원소 확산에 의해 기존  $\alpha'$  조직이  $\alpha+\beta$  lamellar 구조로 분해되었으며 완전한  $\alpha+\beta$  decomposition 또한 확인되었다. 해당 조건에서 경도 하락과 함께 우수한 기계적 특성을 확보하였으며, 이는 공정 시간 단축과 동시에 강도-연성 균형을 효과적으로 달성할 수 있음을 시사한다.

**[P18-11]**

**나노인덴테이션을 이용한 Cu 실리콘 관통 전극(TSV) 응력 영향 영역의 표면 잔류응력 평가:** 김동현, 김한글, 김주영\*(UNIST)

**Keywords:** 나노인덴테이션, 실리콘 관통 전극(TSV), 잔류 응력, Cu

최근 AI 기술 발전으로 반도체 성능 향상을 위한 전공정 미세화가 한계에 도달함에 따라, 후공정인 패키징 기술이 새로운 성능 향상 방안으로 주목받고 있다. 특히 첨단 패키징 기술은 여러 칩을 수직으로 집적하여 성능을 개선하며, 이 과정에서 TSV를 통해 전기적으로 연결한다. Cu TSV는 우수한 전기 전도성으로 저항 및 정전용량 지연을 감소시키는 장점이 있지만 소자 제작 공정 및 작동 중 발생하는 열기계적 하중으로 인해 균열 전파 및 계면 박리와 같은 신뢰성 문제가 여전히 존재한다. 이러한 문제를 완화하기 위해서는 단일 TSV로부터 소자의 안전거리를 의미하는 keep-out zone(KOZ)의 정확한 위치를 규명하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 나노 스케일에서 비파괴적으로 열에 의한 잔류응력을 평가할 수 있는 나노인덴테이션을 이용하여 잔류응력 분포 및 TSV 주변의 KOZ 위치를 정량적으로 분석하였다. 시편은 PECVD 공정을 이용하여 Si 웨이퍼 상에 1.5  $\mu\text{m}$  두께의  $\text{SiO}_2$  절연막을 증착한 후, 에칭 공정으로 TSV 구조를 형성하고 전기도금을 통해 Cu를 채웠다. 전기도금 전류밀도 및 열처리 조건이 TSV 근처 잔류응력에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 나노인덴테이션은 TSV 중심으로부터 거리 증가에 따른 잔류응력 변화를 분석하기 위해 일정한 간격으로 수행하였으며, 기판 효과를 배제하기 위해 절연막 두께의 1/10에 해당하는 깊이에서의 경도 및 탄성계수를 비교하였다. 그 결과 TSV로부터 일정 거리 떨어진 위치에서 KOZ가 형성됨을 확인할 수 있었다. 또한 전기도금 전류밀도에 따른 미세조직 차이와 열처리 과정에서 발생하는 Cu와  $\text{SiO}_2$  간 열팽창 계수 차이로 인해 잔류응력이 증가함을 확인하였다. 본 연구에서 나노인덴테이션을 이용한 TSV 주변 잔류응력 평가를 통해 KOZ의 위치를 규명할 수 있었고, 전기도금 조건에 따른 미세조직 차이가 잔류응력 거동에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있었다.

**[P18-12]**

**비정상 결정립 성장을 통한 (111) 단결정 구리 박막 형성:** 김수정, 박지윤, 심영주, 김동현, 김주영\*(UNIST)

**Keywords:** (111) 구리, 단결정 구리 박막, 비정상 결정립 성장, 열처리

단결정 구리는 다결정 구리와 달리 결정립계가 존재하지 않으므로 전기 저항이 낮고 우수한 물리적 특성을 가지며, 특히 구리 (111) 결정면의 경우 그래핀과의 격자 불일치(lattice mismatch)가 극히 낮아 그래핀의 에피택시 성장(epitaxial growth)을 위한 기판으로 적합하다. 따라서 (111) 단결정 구리 기판의 제조에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 현재는 주로 벌크 크리스탈 성장 방식이나 고온 재결정화와 같은 방법으로 단결정 구리 기판이 제조되고 있다. 그러나 이러한 공정들은 기판 크기 제한, 공정의 복잡성, 높은 제조 비용 등의 한계를 지니며, 동시에 균일한 단결정을 얻기 어렵다는 문제가 있다. 이러한 점에서 대면적 초평탄 단결정 구리 박막을 보다 효율적이고 경제적으로 제조할 수 있는 새로운 공정 기술이 요구되고 있다. 이에 따라 스퍼터링을 이용해 수백 나노미터 ~ 수 마이크로미터 두께로 증착한 구리 박막에 온도 및 환경 조건을 제어한 열처리를 적용함으로써 비정상 결정 성장(abnormal grain growth)을 유도하고, 이를 통해 (111) 단결정 구리 박막을 형성하는 연구를 수행하고 있으며, 본 연구에서는 이러한 결정 성장 메커니즘을 분석하고자 하였다.

**[P18-13]**

**Cr, Mo, V 함량 변화에 따른 AISI D2 Steel의 미세조직 및 경도 변화 상관관계:** 김점우, 이아영, 김동규, 박나현, 정세인, 박시형, 김진천, 신상용\*(울산대학교)

**Keywords:** D2 Steel, 합금 조성, 경도

탄소·연비 규제 강화와 친환경 모빌리티 확산으로 자동차 산업 전반에 걸쳐 배출 저감과 에너지 효율 향상이 핵심 과제로 부상하고 있다. 이를 달성하기 위해 부품 경량화와 고강도 소재 적용이 확대되고 있으며, 복잡한 형상과 다양한 소재가 요구되는 자동차 부품의 특성상 적층 제조를 통한 모듈화 부품 개발도 활발히 진행되고 있다. 적층 제조 소재는 합금 조성 및 열처리 조건에 따라 미세조직(탄화물/석출물 분포, 결정립 크기 등) 및 경도 변화에 큰 영향을 받는다. 따라서 고성능 자동차용 부품 개발을 위해서는 합금 조성 및 열처리 조건에 따른 미세조직 변화 메커니즘을 이해하고 공정 조건을 최적화하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 2% 탄소를 함유한 AISI D2 Steel의 합금 조성 변화에 따른 미세조직 및 경도 간의 상관관계에 대해 분석하였다. VPM(Vacuum Plasma Melting) 공정을 이용하여 Cr, Mo, V의 함량을 다르게 설정한 5종의 합금을 제작하였다. 이후 900  $^{\circ}\text{C}$ 에서 1시간 동안 열처리 진행 후 22  $^{\circ}\text{C}/\text{h}$  냉각속도로 노냉 및 공랭하여 미세조직을 분석하였다. 또한 1 kgf 하중 조건으로 비커스 경도를 측정하여 미세조직과의 상관관계에 대한 분석을 진행하였다. 추가로 XRD 및 EBSD 분석을 통해 합금 조성에 따른 미세조직 변화에 대하여 심층 규명할 예정이다. 본 연구는 2026년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.20024344, '인장강도 1.0GPa 이상급 차세대 모빌리티 동력전달부품의 고속생산을 위한 AI기반 고탄소강 합금설계 및 7.0 L/hr 급 소결기반적층 제조기술개발')

**[P18-14]**

**오스테나이트계 경량철강의 저주기 피로에서 온도에 따른 전위 거동과 피로수명 간의 상관 관계 고찰:** 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°C/6시간 시효 처리하여 경량 철강의 주요 강화 인자인  $\kappa$ -carbide의 석출을 유도하였다. 그 결과 미세조직은 오스테나이트 기지에 약 10 nm 수준의 미세하게 석출된  $\kappa$ -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°C 저주기 실험 결과 (total strain range,  $\Delta\epsilon = 0.8\sim 2.0\%$ ), 상온에서는 Cyclic softening이 지배적으로 발생하고, 200°C에서는 Cyclic hardening이 발생하였다. 또한 상온과 달리 200°C에서는 Hysteresis loop에 serrated flow가 관측되었다. DSA의 따른 Cyclic hardening을 규명하기 위해 추가적으로 여러 온도에서 (RT~400°C) 저주기 피로 시험을 진행하였고, Cyclic softening을 규명하기 위해 상온에서 저주기 피로 수명이 5, 000 Cycles인 total strain range,  $\Delta\epsilon = 1.4\%$  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.

#### [P18-15]

**아연 분말의 입도에 따른 고온 산화 거동 연구:** 정세인, 김동규, 박나현(울산대학교), 고광우(울산소방본부), 신상용\*(울산대학교)

**Keywords:** 아연분말, 열분석, 고온 산화 거동

본 연구에서는 아연 분말의 입도 변화가 고온 산화 거동 및 열적 반응 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 평균 입도가 5, 50, 150, 250  $\mu\text{m}$ 인 아연 분말을 대상으로 열중량분석(TGA)과 시차주사열량분석(DSC)을 수행하여 산화 개시 온도, 질량 증가 거동 및 발열 특성을 비교하였다. TGA 결과, 미세 입도 분말일수록 산화 반응이 더 낮은 온도에서 개시되었으며, 동일 온도 구간에서 질량 증가율이 크게 나타나 입도 감소에 따른 산화 반응 속도 증가가 확인되었다. DSC 분석에서는 미세 분말에서 발열 피크가 상대적으로 저온 영역으로 이동하고 피크 강도가 증가하는 경향을 보였으며, 이는 단위 질량당 에너지 방출 속도가 증가함을 의미한다. 또한 산화 전·후 분말에 대한 주사전자현미경(SEM) 및 에너지분산분석(EDS)을 통해 입도에 따른 산화 진행 양상과 산소 분포 특성을 분석하였다. 본 연구는 아연 분말의 입도에 따른 고온 산화 메커니즘을 열적 거동 관점에서 규명함으로써, 고온 공정 및 분말 취급 공정에서의 반응성 평가를 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다. 본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 울산광역시 재원으로 울산 RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)사업의 결과입니다. (2025-RISE-07-001)

#### [P18-16]

**A356 알루미늄 합금의 열처리에 따른 미세조직과 기계적 성질 간 상관관계:** 김동규, 이아영, 김정우, 정세인, 박나현, 한채은, 박시형, 신상용\*(울산대학교), 정영복, 이장근, 신병철(태원금속)

**Keywords:** 모터 하우징, 주조, 알루미늄 합금, 열처리

전기 자동차에 사용되는 모터 하우징(motor housing)은 전기차의 핵심 부품인 구동 모터를 보호하는 구조체로서 경량성, 고강도 및 충분한 연성을 동시에 요구한다. 이러한 요구 특성으로 인해 알루미늄 주조 합금이 널리 적용되고 있으며, 그중 Al-Si-Mg계 주조 합금인 A356 합금은 우수한 주조성과 기계적 특성으로 대표적인 소재로 활용되고 있다. A356 합금은 주조 상태(as-cast)에서 거친 판상 형태의 공정 Si 입자와 제한적인 고용 강화 효과로 인해 기계적 특성이 상대적으로 낮은 한계를 가지므로, 미세 석출물 형성을 통해 물성 증가를 유도하는 T6 열처리가 일반적으로 적용된다. A356 알루미늄 합금의 미세조직은 초정  $\alpha$ -Al 수지상(Dendrite), 공정 Si 입자 및 시효 석출물로 구성되며, 특히 2차 수지상 가지 간격(secondary dendrite arm spacing, SDAS)과 석출물의 분포는 기계적 물성에 중요한 영향을 미치는 요소로 작용한다. 이론적으로 주조 시 냉각 속도의 증가는 고/액 계면에서의 과냉도를 증가시켜 2차 수지상 가지의 조대화를 억제하며, 이에 따른 SDAS의 감소는 주조 조직의 미세화를 통해 합금의 경도 향상에 기여한다. 또한, 후속 T6 열처리의 인공 시효 조건은 Mg<sub>2</sub>Si 등의 강화상의 분포와 크기를 제어함으로써 최종 기계적 물성을 결정짓는 핵심 인자로 작용한다. 이에 본 연구에서는 금형 및 사형 주조를 통해 냉각 속도에 차이를 부여하고, 시효 열처리 조건을 다변화함으로써 다양한 미세조직을 갖는 A356 시편을 제조하였으며, 냉각 속도 및 시효 조건에 따른 SDAS와 경도 값 간의 상관관계를 고찰하였다. 또한 SEM/EDS 분석을 통해 미세조직 내 석출상의 분포와 거동을 정밀하게 관찰하였으며, 개재물의 존재 여부를 함께 분석하였다. 본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 울산광역시의 재원으로 울산RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)사업의 결과입니다. (2025-RISE-07-001)

#### [P18-17]

**미케노 발광형 디지털 이미지 상관 기법을 이용한 2 차 전지 소재 균열 가시화 연구:** 윤지윤(경북대학교), 좌래오, 티밀시나 수만, 김지식\*(경북대학교)

기계 발광(ML)과 디지털 이미지 상관(DIC)은 변형장을 시각화하고 측정하는 유망한 광학적 방법으로써, 본 연구는 차량 운행시 충격 등에 의한 2차 전지 내부의 균열 발생시 불안정 발화 메커니즘 가시화 및 안전성 진단 등에 적용 가능한 멀티스케일 미케노 발광형 디지털 이미지 상관 기술을 개발하고자 하였다. 해당 기술은 시각 데이터 기반의 인공지능 진단기술 확보를 위한 핵심 요소 기술으로써, 응력 및 변형률을 각기 시각화할 수 있는 미케노 발광 현상 및 디지털 영상 상관법을 진단소재에 동시 적용함으로써, 표준화된 응력-변형률 가시화 영상을 멀티 스케일로 획득하고, 이를 실시간으로 인공지능 영상 학습용 데이터로 전환 가능케 하고자 한다. 이를 위해 4 종류의 ML-DIC 스킨이 SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu, Dy(SAO) 및 아크릴 수지로 구성된 복합 분말을 사용하여 탄소 나노튜브(CNT)를 포함하거나 포함하지 않고 제작되었으며, CNT 밀링 시간은 네 개의 스킨 중 세 개에 대해 각각 48시간, 72시간, 96시간이었습니다. 실험결과 단축 인장 시험은 CNT를 포함하는 ML-DIC 스킨이 미처리 SAO 스킨보다 우수한 성능을 보였으며, 48시간 동안 CNT를 분산시킨 스킨이 최적의 성능을 나타냈습니다. 추가 연구는 배터리 소재에서의 충격으로 인해 발생한 정적 균열 및

전과 균열의 균열 선단 부근과 표면에서의 ML 방출 및 DIC 측정에 중점을 두고 있다. ML과 DIC 기법의 통합은 다양한 환경에 적용 가능한 포괄적인 변형 분석을 위한 다재다능한 접근법을 제공하며, 이는 재료 과학, 공학 및 구조 건전성 모니터링 분야에 잠재력을 제공할 것으로 예측된다.

#### [P18-18]

**표면막에 의해 생성된 잔류응력과 Fe-Si계 합금의 철손간의 상관관계:** 전지현, 이소현(UNIST), 유성현, 안용근, 강춘구(현대제철), 김주영\*(UNIST)

**Keywords:** Fe-Si계 합금, 표면막, 잔류응력, 곡률 반경, 철손

전기모터의 성능 향상을 위해서 Fe-Si계 합금의 철손을 저감하는 것이 핵심적인 과제로 지적되고 있다. 철손은 재료의 미세구조에 크게 의존하며, 결정립 크기와 집합조직과 같은 특징들이 주요 영향 인자로 밝혀져 왔다. 따라서 공정의 최종 단계에서 고온의 열처리를 통한 재결정을 유도하여 자화가 용이한 미세구조를 설계하는 것이 필수적이다. 그러나 최종 열처리 단계에서 재료의 표면에 자연 산화막이 쉽게 발생할 수 있는데, 이러한 산화막이 상온으로 냉각될 때 막과 모재의 열팽창 계수 차이에 의해 막 내부의 잔류응력이 형성되며, 이는 재료의 곡률을 유도한다. 따라서 재료의 상부에는 인장 잔류응력이, 하부에는 압축 잔류응력이 동시에 분포하여 균형을 이루게 된다. 선행 연구에 따르면, 탄성 한도 내의 인장 또는 압축 응력은 자화 과정을 촉진하거나 방해함으로써 철손에 영향을 미칠 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 곡률에 의해 인장 및 압축 잔류응력이 동시에 공존하는 조건에서의 자화 거동은 아직 명확히 규명되지 않았다. 본 연구에서는 화학적 에칭을 통해 표면막을 제거함으로써 잔류응력을 완화하고, 이에 따른 철손 변화를 체계적으로 분석하였다. 60 × 60 mm 정사각형 시편을 이용한 Single Sheet Test를 통해 철손을 정량적으로 평가하였으며, SEM 및 EDS 분석을 통해 표면막의 형상과 화학적 조성을 조사하였다. 또한 레이저 현미경을 이용하여 곡률 반경의 변화를 측정함으로써 잔류응력의 해소를 평가하였고, 실험적으로 직접 관찰이 어려운 자구 구조와 자화 거동을 분석하기 위해 마이크로자기 시뮬레이션을 수행하여 인장 및 압축 응력이 자화 거동에 미치는 영향을 해석하였다.

#### [P18-19]

**원자로압력용기용 SA508 Gr.3 및 Gr.4N 저합금강 전자빔용접부 특성 비교:** 현세미, 권준엽, 김민철\*, 홍석민, 김종민(한국원자력연구원)

**Keywords:** SA508 저합금강, 원자로압력용기, 전자빔용접, 냉각속도

소형모듈형원자로(Small Modular Reactor, SMR)는 주요 기기를 공장에서 제작하여 부지로 운송 및 설치하는 방식으로 건설된다. 원자로압력용기(Reactor Pressure Vessel, RPV)와 같은 대형 기기를 운송하기 위해서는 고강도 소재를 적용하여 제품의 경량화가 필요하다. 현재 상용 RPV에는 SA508 Gr.3 저합금강이 사용되고 있으나, SA508 Gr.4N 강은 Gr.3 대비 우수한 강도 및 인성을 확보할 수 있어 RPV의 제작 소재로 고려될 수 있다. 또한 SMR은 제작기간 단축을 위해 기존 서브머지드 아크 용접(Submerged Arc Welding, SAW)공정 대신 전자빔용접(Electron Beam Welding, EBW)공정의 적용이 고려되고 있다. EBW는 낮은 입열량으로 인해 냉각속도가 증가하여 SAW보다 저온변태상으로의 변태가 증가한다. SA508 Gr.3 저합금강은 Mn-Mo-Ni계 조성으로 템퍼드 베이나이트 조직이 형성되며, Ni-Cr-Mo계 Gr.4N 강은 높은 Ni, Cr 함량으로 인하여 템퍼드 마르텐사이트 조직이 형성된다. 이처럼 합금 성분계의 차이에 따라 형성되는 용접부의 미세조직이 달라지기 때문에 EBW 적용시 형성되는 미세조직과 그에 따른 기계적특성 평가가 필요하다. 따라서 SA508 Gr.3 및 Gr.4N 저합금강에 EBW를 적용한 후 동일한 PWHT를 수행하여 전자빔용접부의 미세조직 및 기계적특성을 비교하였다. 또한 입열량 차이에 따른 냉각속도 변화를 확인하기 위해 용접 전류를 조절하였으며, 이에 따른 미세조직과 기계적특성 변화를 분석하였다. OM, SEM을 활용하여 미세조직 및 석출물 변화를 정량화하였으며, 상온에서의 용접부 인장특성과 충격전이특성을 평가하였다. 이를 통해 SA508 Gr.3 저합금강과 Gr.4N 저합금강의 합금원소와 입열량 차이에 따른 전자빔용접부의 미세조직 및 기계적특성과의 상관관계를 체계적으로 고찰하였다.

#### [P18-20]

**잠수함용 초고강도강 용접부의 기계적 물성, 파괴 특성 및 폭파변형 특성:** 김우섭\*, 양성호, 함진희, 김용진, 송정규, 박시욱(국방과학연구소)

**Keywords:** 잠수함, 초고강도강, 기계적 물성, 파괴 특성, 폭파변형특성

잠수함은 수중에서 작전 수행이 가능한 함정으로 은닉성이 가장 높은 무기체계 중 하나이며, 생존성 및 운용능력 증대를 위해 압력선체에 적용되는 강재에 대한 고강도화 기술 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 개발된 강재를 잠수함용 압력선체 구조물로 활용하기 위해서는 판재의 기계적 물성, 파괴 특성 및 폭파에 대한 저항성 평가가 필수적으로 요구된다. 특히, 압력선체에 적용되는 철강 소재 용접부의 성능 및 신뢰성을 확인하기 위하여 미해군연구소는 대기중에서 폭파균열생성시험 및 폭파변형시험을 통한 물성 평가를 지속적으로 수행해왔다. 본 연구에서는 잠수함용 초고강도강을 대상으로 서브머지드아크용접 및 가스메탈아크용접을 수행하여 각 용접부의 기계적 물성 평가, 파괴 특성 평가 및 폭파변형 특성 평가를 실시하였다. 용접부의 강도, 연성, 충격, 파괴 및 폭파변형 저항성 특성에 대해 비교평가 하였으며, 용접부의 기계적 물성 및 파괴 특성과 폭파변형 저항성 사이의 상관관계에 대해 고찰하였다.

#### [P18-21]

**원자로압력용기용 Mn-Mo-Ni계 저합금강 전자빔용접부의 용접후열처리 시간에 따른 천이특성 평가:** 김민철\*, 현세미, 권준엽, 홍석민, 이봉상, 김종민(한국원자력연구원)

**Keywords:** SA508 Gr.3 저합금강, 원자로압력용기, 전자빔용접, 용접후열처리

Mn-Mo-Ni계 SA508 Gr.3 저합금강은 국내 원자로압력용기(Reactor Pressure Vessel, RPV) 제작에 사용되고 있으며, 현재 RPV

제작에는 서브머지드 아크 용접(Submerged Arc Welding, SAW)공정이 적용되고 있다. 최근 소형모듈형원자로(Small Modular Reactor, SMR) 개발에 따라 제작기간 단축을 통한 경제성 향상을 위해 전자빔용접(Electron Beam Welding, EBW)공정 적용이 고려되고 있다. EBW는 기존 용접공정 대비 제작 기간을 80% 이상 단축할 수 있지만, 높은 잔류응력으로 인해 용접후열처리(Post-Weld Heat Treatment, PWHT)가 필수적이다. 현재 원자로압력용기 제작 관련 규정에서는 EBW공정에 대한 별도의 기준이 없으므로 기존 SAW 공정에 적용되는 PWHT 공정이 동일하게 적용되어야 한다. 그러나 EBW는 단일패스 용접으로 SAW와 미세조직 형성 기준이 다르기 때문에 기존 PWHT 공정에 따른 영향 검증이 필요하다. 기존 연구에서는 EBW 용접부에 기존 PWHT 조건인 610°C와 630°C를 비교하여 온도 영향에 따른 미세조직 및 기계적특성을 평가하였다. 그 결과, PWHT 온도가 증가함에 따라 조대한 석출물 형성으로 인해 파괴인성이 저하되는 경향이 나타났다. 본 연구에서는 PWHT 온도를 610°C로 고정하고 후열처리 시간을 2시간 및 100시간으로 조절하여 PWHT 온도 변화가 미세조직 및 파괴인성에 미치는 영향을 분석하였다. OM 및 SEM을 활용하여 미세조직을 관찰하고 후열처리 시간에 따른 석출물 크기를 정량화하였다. 상온에서 용접부의 인장특성을 평가하고, Charpy 충격시험 및 ASTM E1921에 따른 파괴인성 시험을 통하여 충격전이특성 및 천이영역 파괴인성을 평가하였다. 이를 통해 후열처리 시간의 변화에 따른 미세조직 변화가 EBW 용접부의 파괴인성에 미치는 영향을 고찰하였다.



## P19 : 역학측정

Room 3층 로비, 4월 29일

### [P19-1]

CrCoNi 기반 3원계 중엔트로피 합금의 조성 기반 SFE에 따른 기계적 특성 평가: 김지현(국립경국대학교), 박태연, 최인철(국립금오공과대학교), 김영천\*(국립경국대학교)

**Keywords:** Medium Entropy Alloy, Stacking Fault Energy, Mechanical Property, TRIP, TWIP

CrCoNi 기반 중엔트로피 합금은 상온부터 극저온까지 우수한 기계적 성능으로 주목받고 있으며, 구조재료의 응용뿐 아니라 공정 및 표면기술 관점의 확장 연구도 병행되고 있다. 단상 FCC 합금에서 적층결함에너지(Stacking Fault Energy, SFE)는 전위 활동, 쌍정(Twinning-Induced Plasticity, TWIP) 및 변태유기소성(Transformation-Induced Plasticity, TRIP)과 같은 변형기구에 영향을 미치는 핵심 인자 중 하나로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 Cr 함량을 34 at%로 고정하고 Co/Ni 조성 변화를 설계 변수로 설정하여 SFE 제어에 따른 변형기구 및 기계적 특성 변화를 체계적으로 분석하였다. 설계된 조성군의 상 안정성과 미세조직은 XRD(X-ray Diffraction) 상분석과 EBSD(Electron Backscatter Diffraction) 기반 결정립 크기, 결정방향성 및 상 분포 분석을 통해 검증하였다. SFE는 사전 변형률을 부여한 시편에서 TEM(Transmission Electron Microscope)으로 Shockley 부분전위 간 분리 폭을 측정하여 탄성론 기반 평형식으로 추정하였으며, SFE 값에 따라 활성화되는 변형기구의 차이를 식별하였다. 기계적 특성을 평가하기 위해 인장시험으로 조성 별 기계적 거동을 확인하였으며, 압입시험을 통해 조성 변화에 따른 고유 물성을 평가하였다. 이는 Co/Ni 조성 설계로 조절되는 SFE에 기반해 변형기구 및 기계적 거동의 변화 경향을 정량화 함으로써, CrCoNi 계열 합금의 조성 설계에 필요한 기계적 관점의 정량적 근거를 제공할 것으로 기대된다. 본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00409639, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

### [P19-2]

Al-Si-Mg계 합금의 조성 및 열처리 조건에 따른 미세조직 변화 및 상별 국부기계적 물성 측정: 한준희, 한성희, 김대현, 김보규, 강민성, 신중호\*(강원대학교)

**Keywords:** 알루미늄, 미세조직 분석(SEM, EDS), 나노인덴테이션

전기차 차체 및 배터리 하우징의 경량화를 위해 다이캐스팅에 적용 가능한 알루미늄 합금 개발이 필수적이다. 이에 따른 Al-Si-Mg 알루미늄 합금에 대해 분석을 실시하였으며, 또한 탄소 저감을 위해 기존의 다이캐스팅 공정, Virgin 알루미늄과 기존의 Al-Si-Mg 합금과 현재 상용 Scrap을 99.28% 활용한 Al-7.2Si-0.6Cu-0.2Mg합금에 대해 비교하였고, 조성만 다른 같은 재료에 대한 열처리 조건을 다르게 하여 물성을 측정하였다. 합금 원소(Si, Fe, Cu 등) 함량을 저감하였음에도 불구하고, 강도와 경도가 하락하지 않고 유지되거나 향상되는 특이 현상의 원인을 재료과학적 측면에서 분석하기 위해 미세 영역에서의 미세적 상별경도 분포를 확인하기 위한 나노인덴터(Nano-indenter)를 활용하여 다차원 구조-물성 분석을 수행하였으며, 또한 주사전자현미경(SEM)과 EDS Mapping을 활용하여 미세조직 내 상의 변화를 관찰하였다. 본 연구에서는 합금원소의 함량이 줄었음에도 불구하고 열처리 공정 조건의 차이에 따른 미세조직의 변화를 분석하여 미세조직-기계적 특성 상관성을 심층적으로 고찰하고, 강도-연성의 균형을 고려한 공정 설계 방향에 대한 기초자료로 제시하고자 한다.

### [P19-3]

AA6061 합금 마이크로필라의 나노 및 마이크로 단위 변형거동에 대한 크기효과 및 변형속도 효과: 백인섭(경상국립대학교), 이근호(국방과학연구소), 강성규\*(경상국립대학교)

**Keywords:** AA6061-T6, 마이크로필라 압축시험, 크기 효과, 변형속도 효과

항공-우주 산업에서 경량화와 내구성 향상을 동시에 요구하는 환경 속에서 Al-Mg-Si 계열 석출경화형 합금인 AA6061은 대표적인 구조재료로 사용되고 있다. 이러한 응용 환경에서는 변형속도가  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 에서  $10^9 \text{ s}^{-1}$  까지 광범위하게 변화하므로 변형속도에 따른 기계적 물성 변화를 정량적으로 이해하는 것이 중요하다. 그러나 고변형속도 영역에서의 벌크 시험은 장비적 제약으로 인해 반복성과 재현성 확보가 어렵다. 이에 대한 대안으로 마이크로 스케일 압축시험이 활용되고 있으나 석출경화형 상용 합금을 대상으로 한 연구는 여전히 부족하다. 본 연구에서는 AA6061-T6 합금 마이크로필라(직경 1-10  $\mu\text{m}$ )에 대해 다양한 변형속도 조건에서 압축시험을 수행하여 크기 효과와 변형속도 효과를 조사하였다. SEM, EPMA를 통하여  $\text{Mg}_2\text{Si}$  석출물을 확인하고 EBSD 분석을 통해 시험 방향을 선정하였으며 TEM 분석을 통해  $\beta''$  석출물의 분포와 평균 간격을 정량적으로 분석하였다. 그 결과, 필라 직경 감소에 따라 항복강도가 단조적으로 증가하는 전형적인 크기 효과가 기존 문헌 대비 약해짐을 확인하였다. 이는 필라 직경과 석출물 간격의 상호작용으로 전위의 평균자유행로가 변화하기 때문으로 해석된다. 또한 변형속도가 증가할수록 강도가 함께 증가하는 변형속도 의존성이 확인되었다. 이러한 결과는 극한 변형속도 환경에서의 구조재료 설계에 유의미한 기초 자료를 제공한다.

### [P19-4]

Fabrication of Fe and Zr based bulk metallic glass blades and evaluation of sharpness via BSI Model: Sejin Jang, Seong Hoon Yi\*(Kyungpook National University)

**Keywords:** Metallic glass, Casting, Mechanical testing

Bulk metallic glasses (BMGs), unlike crystalline materials, possess a homogeneous microstructure without grain boundaries and can

simultaneously achieve high hardness. These characteristics suppress micro-wear and edge blunting, enabling the realization of extremely sharp cutting-edge geometries, and thus BMGs are drawing attention as promising candidates for blade materials. In this study, Fe-based and Zr-based BMG blades were fabricated to leverage these material advantages, and the Blade Sharpness Index (BSI) model was employed to objectively evaluate cutting performance. BSI is defined as a dimensionless metric given by the ratio of the measured energy performed as the blade penetrates the workpiece to the theoretical minimum energy required to achieve cutting to the same depth. During cutting, the workpiece locally exhibits compressive and deformation resistance against blade penetration. A sharper blade initiates cutting within a lower compressive (lower  $\delta_i$ ) deformation regime while minimizing material resistance, thereby performing efficient cutting with lower energy consumption. Accordingly, under identical conditions, a lower BSI indicates a sharper blade and serves as a comparative index of sharpness. To verify practical service life and durability, repeated cutting tests were conducted. The commercial stainless-steel blade (SUS420J2) exhibited a rapid increase in BSI with increasing cut counts due to the accumulation of edge wear and damage. In contrast, the fabricated Fe-based and Zr-based BMG blades maintained a smaller increase in BSI even after multiple cuts, thereby sustaining high sharpness. In conclusion, BMG blades were shown to effectively replace the structural limitations of crystalline materials through wear-suppressing behavior arising from their homogeneous microstructure. In particular, the ability to stably maintain a low BSI under repeated cutting conditions supports the superior performance of BMG blades and their potential for commercialization as precision cutting-tool materials.

#### [P19-5]

Quantifying local deformation and strength in L-PBF processed multi-layered medium-entropy alloy via nanoindentation and micro-DIC: Zhe Gao(Hanyang University), Dong-Hyun Lee(Chungnam National University), Yakai Zhao(A\*STAR), Hyoung Seop Kim(POSTECH), Upadrasta Ramamurty(Nanyang Technological University), Jae-il Jang\*(Hanyang University)

**Keywords:** Additive manufacturing, Medium-entropy alloy, Nanoindentation

This study investigates the micromechanical behavior of additively manufactured multilayer samples comprising alternating layers of hard CoCrNi and soft CoCrNi<sub>2</sub> medium-entropy alloys (MEAs), fabricated by laser-powder bed fusion (L-PBF). Systematic analysis using macro- and micro-scale digital image correlation (DIC), based on high-resolution camera and scanning electron microscopy, respectively, reveal coupled global-local deformation and a complex strain interplay within individual layers and interfacial regions. Then, we developed a new quantitative method that combines nanoindentation and micro-DIC to simultaneously probe the local variations in strength and deformation., providing new insights into how the local regions can interact each other and thus influence the mechanical performance of the multi-layered MEA systems.

#### [P19-6]

나노압입시험 기반 머신러닝을 활용한 듀플렉스 스테인리스강 미세조직 분류: 임준환, 김영천\*(국립경국대학교)

**Keywords:** 듀플렉스 스테인리스강, 나노인덴테이션, 머신러닝, 미세조직 분류, 전자후방산란회절

듀플렉스 스테인리스강(DSS)의 미세조직적 건전성은 기계적 특성을 결정짓는 핵심 요소이며, 이를 분석하기 위해 주로 전자후방산란회절(EBSD)이 활용된다. 최근 나노인덴테이션과 머신러닝을 결합하여 재료의 미세구조를 해석하는 연구가 활발히 진행되고 있으나, 기계적 응답 데이터만을 활용하여 공정별 미세조직 상태(Phase fraction, grain size 등)를 직접 분류 및 예측하려는 시도는 여전히 부족하다. 본 연구에서는 DSS 2205강을 대상으로 950~1050 °C 범위의 열처리를 통해 서로 다른 상 분율(Phase fraction)을 갖는 세 가지 미세조직 상태를 유도하였으며, 이를 머신러닝 모델 학습을 위한 정답 데이터(Label)로 정의하였다. 미세조직 예측을 위한 입력 변수로는 나노인덴테이션 하중-변위 곡선에서 추출된 경도, 탄성계수, 최대 압입 깊이, 탄성 회복률 등 다각적인 기계적 특성 인자를 활용하였다. 각 특성 인자의 분포를 Violin plot으로 분석한 결과, 미세조직 상태에 따른 통계적 유의성이 확인되었으며, Scatter plot 기반의 특성 공간(Feature space) 시각화를 통해 기계적 응답의 조합이 미세조직 상태별로 군집 구조를 형성함을 입증하였다. 최종적으로 지도학습 모델을 구축하여 성능을 평가한 결과, 혼동 행렬(Confusion Matrix) 분석을 통해 모델이 실제 미세조직 상태를 유의미한 정확도로 예측함을 확인하였다. 본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구일(RS-2024-00409639, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

#### [P19-7]

수소 장입 중 STS304 용접부 위치별 첨가제 양에 따른 전기화학적 거동 및 기계적 특성 변화: 서세덕, 최승헌, 함주빈, 이상엽, 박상민, 김영천\*(국립경국대학교)

**Keywords:** 나노압입, 양극분극실험, STS304, 수소장입, EIS, 전기화학적 특성, 기계적 특성성

최근 수소 경제 확산으로 수소 저장·이송 설비의 안전성이 중요해지면서, 이에 사용되는 금속 소재에서의 수소 유입이 기계적 성능 저하에 미치는 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 특히 STS304 용접 구조물은 모재(BM), 용접부(WM), 열영향부(HAZ)로 구성된 영역을 가지며, 각 부위는 미세조직 및 조성 편차 및 잔류응력 상태가 달라 전기화학적 특성과 기계적 특성이 부위별로 상이하게 나타난다. 또한 용접부는 모재부와 달리 의도하지 않은 기계적 및 전기화학적 특성 변화가 나타나 취약부로 평가되어 왔다. 본 연구에서는 수소 장입 조건에서 BM/WM/HAZ를 구분하여 양극분극시험으로 부식전위, 부식전류밀도, 부동태 및 국부부식 관련 거동을 비교하고, EIS(a-c impedance)를 통해 계면 반응 및 부동태막/전하이동 저항 변화 등 전기화학적 특성 변화를 정량화하였다. 또한 나노압입시험을 통해 각 부위의 국부 기계적 특성(탄성계수, 경도 등) 변화를 평가하여, 수소 장입에 따른 부위별 전기화학적

거동 변화와 기계적 특성 변화의 상관관계를 규명하였다. 본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00409639, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

#### [P19-8]

**변형유기 마르텐사이트를 포함한 STS304의 해수 환경 내 수소취화 및 부식 거동 분석:** 이상엽, 박상민, 김영천\*(국립경국대학교)

**Keywords:** 수소취화, 나노압입시험, 스테인리스강, 공식 부식

오스테나이트계 스테인리스강(STS304)은 저온 및 변형 조건에서 오스테나이트가 마르텐사이트로 전이되는 변형유기 상변태가 발생하며, 이는 수소 확산 및 트랩 거동을 변화시켜 수소취화 민감도에 결정적인 영향을 미친다. 특히 해수와 같은 염화물 환경에서는 수소 유입과 공식(Pitting)이 동시에 발생하는 복합 열화가 구조 건전성을 위협한다. 본 연구에서는 STS304의 마르텐사이트 분율 변화에 따른 수소취화 및 부식 거동을 나노/메크로 스케일에서 통합적으로 평가하였다. 마르텐사이트 분율이 제어된 시편을 대상으로 3.5 wt.% NaCl + 3 g/L  $\text{NH}_4\text{SCN}$  전해질에서 전기화학적 수소 장입을 수행하였다. 나노압입시험을 통해 수소 유입에 따른 국부 소성 변형 저항을 정량화하였으며, 인장시험을 병행하여 거시적 기계적 물성(강도, 연신율)의 저하율을 분석하였다. 또한 동전위 분극 시험을 통해 염화물 환경에서의 공식 저항성 변화를 관찰하였다. 실험 결과, 마르텐사이트 분율이 증가함에 따라 수소 트랩 사이트의 밀도 변화로 인해 경도는 상승하나 연신율 및 공식 저항성은 유의미하게 감소하는 상관관계를 확인하였다. 본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00409639, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

#### [P19-9]

**수소장입 시 전해질에 따른 STS304의 나노압입특성 평가:** 박상민, 이상엽, 김영천\*(국립경국대학교)

**Keywords:** 수소취화, 나노압입시험, 스테인리스강, 전해질

오스테나이트계 스테인리스강인 STS304는 우수한 내식성과 기계적 성질을 바탕으로 해양 구조물, 화학 플랜트 및 수소 에너지 산업 등 다양한 극한 환경에서 널리 사용되고 있다. 그러나 실제 운용 환경에서 발생하는 부식 전기화학 반응이나 방식을 위한 음극 과전압 인가 시, 소재 내부로 수소가 침투하여 기계적 물성을 저하시키는 수소취화(Hydrogen Embrittlement) 현상이 발생할 수 있다. 특히 수소의 유입 및 확산 거동은 노출된 전해질의 화학적 조성 및 pH 조건에 따라 전기화학적 반응 메커니즘이 달라지므로, 전해질 환경에 따른 소재의 민감도 변화를 면밀히 규명하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는  $\text{HSO}_4$  용액과 NaCl 용액을 전해질로 사용하여 전기화학적 수소장입을 수행한 후, 나노압입시험(Nanoindentation)기반의 국부 기계적 변화를 통해 전해질에 따른 스테인리스강의 수소취화 민감도를 정량 비교하였다. 시편은 동일한 표면 상태로 연마한 뒤, 전해질 조건별로 수소장입을 실시하였다. 이후 하중-변위 곡선을 통해 전해질에 따라 변화하는 국부 소성변형 저항 및 변형 차이를 평가하였다. 최종적으로 전해질별 지표율 정의 하에 304의 수소취화 특성의 상대적 경향을 제시하고, 산성/염화물 전해질에서의 수소 유입 조건 차이가 국부적인 기계적 거동에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00409639, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

#### [P19-10]

**압입 하중-변위 곡선의 하부면적 평가를 통한  $\text{SiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  하이브리드 본딩 계면 접착특성 평가:** 남서우, 장현식, 김영천\*(국립경국대학교)

**Keywords:** 나노압입시험, 하이브리드 본딩, 계면 접착에너지

하이브리드 본딩은 유전체-유전체 결합과 금속-금속 결합을 동일 인터페이스에서 동시에 형성하는 접합 기술로 차세대 3D 집적회로 및 고집적 패키징에서 핵심 공정으로 주목받고 있다. 이러한 기술은 반도체 패키징의 소형화 및 고집적화를 가능하게 하며 계면 접착에너지는 기계적 안정성과 신뢰성을 결정하는 핵심요소이다. 접착에너지가 충분하지 않을 경우, 계면 박리가 발생하여 신뢰성이 감소할 수 있으며 이를 정량적으로 평가하고 최적화하는 과정이 필요하다. 일반적으로 DCB(Double Cantilever Beam)시험과 같은 기계적 실험을 이용하여 하이브리드 본딩의 접착력을 평가해 왔다. 기존 방법의 경우 웨이퍼 가장자리에서만 수행되기 때문에, 전체 영역에서의 접착에너지를 균일하게 평가하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 나노압입시험을 통해  $\text{SiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  하이브리드 본딩 계면에서 발생하는 박리현상을 분석하고, 하중-변위 곡선을 기반으로 박리 과정에서 소산되는 에너지  $W_d$ (Work of delamination)를 통해 하이브리드 본딩 계면의 접착에너지를 평가하였다. FIB를 이용한 압흔 단면을 측정하여 압입 깊이에 따른 박리 여부를 관찰하였고, 압입 하중-변위 곡선의 하부면적을 압입 일(indentation work)로 환산하여 소성변형, 박리, 표면파손 등에 소요되는 일로 분해하였다. 박리에 소요되는 압입 일을 따로 분류하여 제시하였고, 기존 논문에서의 분석결과와 유사한 결과를 얻었다. 본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00409639, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

#### [P19-11]

**음의 포아송비 구조를 이용한 이축 변형 제어 신축 기판 제조:** 판지윤(UNIST), 전은채(울산대학교), 김주영\*(UNIST)

**Keywords:** 이축 변형 제어, 리엔트르트 허니컴 구조, 음의 포아송비, 스트레처블 기판

스트레처블 태양전지 및 디스플레이와 같은 차세대 웨어러블-대면적 전자소자는 소자 면적이 광흡수량 및 발광 효율과 직접적으로 비례하는 특성을 가지므로, 최소한의 소재 사용으로 최대 유효 면적을 확보하는 것이 핵심 기술 과제로 요구된다. 그러나 대부분의 재료는 인장 시 인장 방향과 수직인 방향으로 수축하는 양의 포아송비 특성을 나타내며, 특히 스트레처블 소자에 널리 사용되는 폴리머 기반 기판에서는 이러한 횡방향 수축으로 인해 유효 면적 감소, 소자 성능 저하 및 기계적 신뢰성 악화 문제가 발생한다. 이

를 해결하기 위해 본 연구에서는 인장 시 횡방향 수축을 억제하거나 팽창을 유도할 수 있는 음의 포아송비(negative Poisson's ratio)를 갖는 구조 기반 접근법을 적용하여 '이축 변형 제어 신축 기판(biaxial strain-controlled stretchable substrate)'을 제안하였다. 특히 리엔트런트 허니콤(re-entrant honeycomb) 구조를 설계하여 기계적 변형 거동을 구조적으로 제어하고 인장 하에서도 면적 감소를 최소화할 수 있도록 하였다.

#### [P19-12]

**국부 트랜치 기반 접합 구조를 적용한 자가 전개형 전자소자의 구조 설계:** 김수민(UNIST), 황경석(Harvard University), 조지현(UNIST), 배재영, 강승균\*(서울대학교), 김주영\*(UNIST)

**Keywords:** 유한요소해석, 생체 침습형 전자소자, 능동 전개

생체 내에서 발생하는 정보를 실시간으로 수집하여 질병의 진단과 치료를 보조하는 생체 침습형 전자소자에 대한 연구가 주목받고 있다. 특히, 소자의 작동이 종료된 이후 체내에 잔존하지 않고 자연스럽게 분해·흡수될 수 있도록 생분해성 재료를 적용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 대면적에서 발생하는 신호를 측정하기 위해 기존 소자를 적용할 경우, 소자의 크기 증가로 인해 절개 범위가 확대되어 조직 손상이 커지고 회복 기간 또한 길어지는 문제가 발생한다. 더 나아가, 크고 단단한 기존 소자의 구조적 특성은 연부 조직과의 기계적 불일치를 유발하여 조직의 자연스러운 동적 움직임을 제한하고, 환자에게 불편감을 초래할 수 있다는 한계가 있다. 장기간 체내에서 안정적으로 구동되기 위해서는 조직과 유사한 기계적 물성을 가지며, 생체적합성과 생분해성이 우수한 재료를 적용한 전자소자에 대한 연구가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 생분해성 형상기억고분자를 활용하여 소자의 능동적인 전개 특성을 구현함으로써, 효율적인 체내 삽입이 가능하고 기존 접근이 어려웠던 부위까지 도달하여 생체 신호를 정밀하게 측정할 수 있는 전자소자의 구조를 설계하고자 한다. 기판 표면에 국부적인 트랜치를 형성한 접합 구조를 도입함으로써 소자의 전체 부피를 최소화하여 최소침습적 삽입이 가능하도록 하고, 이후 체내에 의해 유도되는 자가 전개 특성을 통해 넓은 영역에 걸친 생체 신호 측정을 가능하게 하고자 한다. 또한 유한요소해석을 활용하여 소자의 삽입 과정 및 삽입 이후의 거동 변화를 분석함으로써, 전자소자에 가해지는 변형률이 최소화되는 구조를 설계하고자 한다.

#### [P19-13]

**고수명 생체분해성 전극 활용을 위한 폴리브데늄 박막 증착 공정:** 이찬영, 조지현, 김주영\*(UNIST)

**Keywords:** 폴리브데늄, 생체분해성, 스퍼터링, 잔류 용력, 전기 저항

최근 체내에서 일정 기간 안정적으로 작동한 뒤 자연적으로 분해되는 생체분해성 전자소자에 대한 관심이 증가하고 있다. 이 소자에서 금속 박막 배선은 기계적·전기적 성능뿐 아니라 체액 환경에서의 신뢰성을 좌우하는 핵심 구성요소이다. 특히 금속 박막 배선에 형성되는 잔류용력은 균열 및 박리를 유발하여 전기적 특성 저하로 이어지며, 결과적으로 소자의 기능적 수명을 단축시킬 수 있다. 따라서 생체분해성 전자소자의 장기 안정성 확보를 위해서는 잔류용력을 체계적으로 제어할 수 있는 공정 조건 최적화가 필수적이다. 본 연구에서는 장기 기능 수명 확보가 가능한 생체분해성 금속인 폴리브데늄을 활용하였다. 폴리브데늄은 대표적인 생체 분해성 금속인 마그네슘 및 아연 대비 체내 용해 속도가 상대적으로 느려 장기간 안정적인 기능 제공이 가능한 재료로 평가된다. 또한 DC 스퍼터링 기반 폴리브데늄 박막은 상온 증착이 가능하여 유연 기판 적용 및 전사 공정에 유리하며, 두께 및 전기적 특성의 정밀 제어가 가능하다는 장점이 있다. 이에 작동 압력과 증착 파워를 주요 공정 변수로 설정하여 폴리브데늄 박막을 제작하고, 공정 조건에 따른 미세구조 및 기계적·전기적 특성 변화를 정량적으로 분석하였다. SEM과 AFM을 통해 증착 속도 및 표면 거칠기를 정량화하였고, 4-point probe로 전기 저항을 측정하였다. 또한 기판 곡률 기반 해석을 통해 잔류용력을 산출하였다. 이를 바탕으로 공정 변수에 따른 잔류용력-전기 저항 상관관계를 분석하여 기계적·전기적으로 최적화된 폴리브데늄 박막 증착 조건을 도출하고자 한다.

#### [P19-14]

**상온 조건에서의 기계적 보조 냉간용접에 의한 나노다공성 금의 자가치유 거동과 기계적 물성 회복:** 홍석원, 김영훈(UNIST), 박은지(한국기계연구원), 김주영\*(UNIST)

**Keywords:** 기계적 물성 회복(mechanical recovery), 나노다공성 금(nanoporous gold), 냉간용접(cold welding), 연결성(connectivity), 인장 파단(tensile fracture), 자가치유(self-healing), 표면 확산(surface diffusion)

나노다공성 금(nanoporous gold, np-Au)은 나노스케일의 리가먼트(ligament)와 기공(pore)이 3차원적으로 연결된 복연속성(bicontinuous)의 개방형(open-cell) 구조를 가지며, 높은 비표면적과 우수한 화학적 안정성으로 인해 촉매, 센서, 에너지 소자 등 다양한 분야에서 활용 가능성이 보고되어 왔다. 그러나 나노다공성 금은 인장 하중 조건에서 취성적 파단(brittle-like catastrophic failure)이 쉽게 발생하는 경향이 있어, 구조 안정성과 장기 신뢰성 확보를 위한 기계적 성능 향상이 중요한 과제로 인식되고 있다. 본 연구에서는 인장 파단된 나노다공성 금에서 상온(ambient conditions) 조건에서도 파단면 재결합(rejoining)이 관찰될 수 있다는 점에 주목하여, 자가치유(self-healing) 거동의 발생 조건과 기계적 성능 변화 양상을 체계적으로 분석하고자 하였다. 이를 위해 인장 시험을 통해 파단된 시편의 파단면을 일정 기간 접촉 상태로 유지한 뒤 재시험을 수행하는 방식으로, 자가치유 전후의 인장 용력-변형률 거동 변화를 비교하고, 기계적 회복 특성을 정량적으로 평가하고자 하였다. 또한 파단부 인근 미세구조를 기반으로 연결성(connectivity) 및 결함 형태 변화와의 상관관계를 함께 고찰함으로써, 자가치유 과정에서의 하중 지지 능력 변화와 이를 지배하는 구조적·기공적 요인을 연결성 관점에서 해석하고자 하였다.

#### [P19-15]

**준안정 베타 Ti-Fe-Cr 합금의 조성 변화에 따른 오메가상 형성과 역학적 거동 분석:** 박선영\*, 천영범(한국원자력연구원)

**Keywords:** 베타 타이타늄 합금, 오메가상, 경도, 상변태거동

준안정  $\beta$ -타이타늄 합금은 낮은 탄성계수, 높은 비강도, 우수한 내식성 및 생체적합성을 동시에 만족하여 항공우주 구조재와 의료용 임플란트 분야에서 활용성이 크게 증가하고 있다. 특히  $\beta$ 상 안정화 원소의 종류와 함량에 따라 상분율, 상변태 거동 및 나노 스케일 석출상의 형성이 달라지며, 이는 기계적 특성에 직접적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 비교적 경제적이면서  $\beta$ 상 안정화 효과가 우수한 Fe와 Cr을 활용하여 준안정  $\beta$ -타이타늄 합금을 설계하였다. 진공아크용해로 잉곳을 제조한 후 단조, 열간압연 및 용체화 처리를 거쳐 판재를 제작하였으며, 이후 열처리 시간과 조성 변화를 변수로 설정하였다. 열처리 조건에 따른 오메가상의 생성 및 성장 거동과  $\beta$ 상 분해 과정을 투과전자현미경과 X선 회절 분석을 통해 규명하고, 비커스 경도 측정을 통해 미세조직 변화에 따른 기계적 특성 변화를 정량적으로 평가하였다. 또한 Fe와 Cr 함량 차이에 따른 석출상 형성 경향과 경도 변화의 상관성을 비교 분석함으로써, 미세조직 제어를 통한 역학 특성 최적화 가능성을 고찰하였다.

#### [P19-16]

**단일구조 사용후핵연료 처분용기 신소재 개발:** 우정현\*, 박선영, 김가영, 장준혁(한국원자력연구원)

**Keywords:** 사용후핵연료, 처분용기, 심지층처분, 단일구조

원자력 발전의 지속가능성은 사용후핵연료 영구 처분 문제와 직결되어 있다. 여러 나라에서 사용후핵연료 처분 방법으로 심지층 처분을 택하고 있으며, 이는 처분용기와 완충재로 구성되는 공학적 방벽과 암반으로 이루어진 자연 방벽으로 구분된다. 일반적으로 처분용기는 기계적 건전성을 담당하는 주철 혹은 탄소강 내부 용기와 내부 용기의 부식을 방지하는 구리 외부 용기로 이루어진다. 이러한 이중 구조 처분용기를 제작하기 위해서는 다양한 공정이 필요하며, 이에 따라 생산성 저하 및 제작비 증가와 같은 문제들이 발생한다. 본 연구에서는 높은 기계적 물성과 내부식성을 동시에 달성하는 신소재를 개발하여 단일구조 처분용기 제작을 통해 재료 감소 및 제작성을 향상시키고자 한다. Alloy22, Inconel과 같은 Ni 기반 합금은 초기 처분용기 후보 재료로 제안되었던 재료들로 높은 강도와 내부식성을 갖지만, 특정 환경에서 국부부식 (pitting corrosion)이 발생하기 때문에 사용되지 않았다. 합금의 경우 원소 간 전위차에 의해 갈바닉 부식이 발생할 확률이 높아지지만, 전위차가 작은 원소들로 구성할 경우 균일 부식 거동 및 내부식성과 높은 기계적 건전성을 갖는 신소재를 제작할 수 있다. 때문에 본 연구에서는 Ni을 기반으로 합금 설계를 진행하여 처분환경에 최적화된 신소재를 개발하고자 한다. 부식 거동 및 부식 특성을 평가하기 위해 전기화학실험을 수행하였으며, 실제 처분 환경 모사를 위해 지하연구터널 KURT (KAERI Underground Research Tunnel)에서 지하수를 채수하여 다양한 이온의 영향을 분석하였다. 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단·나노 및 소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-25441247).

**P20 : 가공-용접 및 접합**

Room 3층 로비, 4월 29일

**[P20-1]**

**무가압 은 소결을 이용한 일방향 다공성 구리와 벌크 구리 기판 간의 접합 계면 특성:** 백정연(인하대학교), 김근수(호서대학교), 현승균\*(인하대학교)

**Keywords:** 무가압 은 소결, 일방향 다공성 구리, 가스 배출 경로, 접합 계면, UPM

최근 파워 모듈의 고성능화 및 소형화에 따라 구동 온도가 상승하면서 접합부의 고온 신뢰성을 확보할 수 있는 공정 기술 개발이 요구되고 있다. 특히 무가압 은 소결 접합은 공정의 간소화와 소자 손상 억제 측면에서 유리한 대안으로 주목받고 있으나, 소결 과정에서 발생하는 유기 성분의 배출이 원활하지 않을 경우 계면 내 보이드(Void) 형성 및 접합 강도 저하가 발생할 수 있다는 한계가 있다. 본 연구에서는 일방향 다공성 구리(Uni-directional Porous Metal, UPM) 기판을 적용하여 소결 시 발생하는 유기물 가스의 배출 특성을 고찰하였다. UPM은 일방향으로 형성된 기공 구조를 통해 가스의 수직 배출 경로(Venting path)를 제공함으로써 계면 건전성을 향상시킬 것으로 기대된다. 본 연구는 시편의 열적 특성과 장비 오프셋(Offset)을 반영한 최적의 단계별 승온 프로파일을 수립하였으며, UPM과 벌크 구리 기판 간의 접합부 특성을 비교 분석하였다. 접합 이후 계면 미세구조 분석을 통해 기판의 기공 유무가 가스 배출 거동과 소결 치밀도에 미치는 영향을 확인하였으며, 전단 시험을 수행하여 기판 구조와 접합 강도 간의 상관관계를 분석하였다. 본 연구 결과는 다공성 구조를 활용한 가스 배출 메커니즘을 규명하고, 차세대 고전력 반도체 패키징을 위한 무가압 접합 공정 최적화의 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

**[P20-2]**

**17-4PH 스테인리스강 단조-적층제조 이중 용접부의 열영향부 연화 제어 및 강도 회복에 미치는 나노 석출물의 영향:** 심예훈, 주하연, 김종훈(국립창원대학교), 이지원(두산에너지빌리티), 최용혁(두산에너지빌리티), 홍현욱\*(국립창원대학교)

**Keywords:** 17-4PH Stainless steel, Dissimilar Welded Joints, Heat treatment optimization, Mechanical properties

17-4 PH (Precipitation Hardening) 스테인리스강은 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-PBF 방식으로 제작된 17-4PH 스테인리스강과 단조된 17-4 PH 스테인리스강 간의 이중 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 incompatibility에 의해 가장 낮은 경도값을 나타내는 영역에서 파단이 발생함을 확인하였다. 이 결과를 바탕으로, 본 연구에서는 AM 및 단조 17-4PH 스테인리스강의 이중 용접 시의 석출 거동 평가와 이로 인한 strain incompatibility를 제어하는 후열처리 방법을 제안하고자 한다.

**[P20-3]**

**해양 환경 노출에 의한 표면 부식 H 형강 용접부의 저주기 피로 수명에 미치는 영향:** 이상현, 한재연, 박정현(국립창원대학교), 이창훈(한국재료연구원), 정준호(현대제철), 김재성(조선선재), 홍현욱\*(국립창원대학교)

**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 측정할 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 이

후 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.

#### [P20-4]

**EBW 용접 듀플렉스 스테인리스강의 FSP 적용에 따른 용접부 CISCC 저항성 개선:** 이재훈, 백종민, 이아름(국립창원대학교), 하중문(두산에너지리미티드), 홍현욱\*(국립창원대학교)

**Keywords:** Duplex stainless steel, Electron Beam Welding, Friction Stir Processing, U-bend, CISCC

듀플렉스 스테인리스강(duplex stainless steel)은 페라이트계 및 오스테나이트계 스테인리스강보다 우수한 기계적 특성 및 내식성의 조합으로 인해 해양 구조물에 널리 사용된다. 이러한 해양 구조물들은 보통 해안가에 위치하기 때문에 염분으로 인한 염화물 응력 부식 균열(Chloride Induced Stress Corrosion Cracking, CISCC)이 발생할 가능성이 있다. 따라서 CISCC에 대한 저항성이 매우 중요한데 CISCC는 보통 용접부의 열영향부(Heat-affected-zone)에서 탄화물(carbide)이나 시그마( $\sigma$ ) 상이 생겨 Cr이 고갈되어 발생하게 된다. 본 연구에서는 canister의 전자빔 용접부(EBW) 표면이 마찰교반가공(FSP)에 의해 미세조직이 어떻게 개선되는지, 그리고 CISCC에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다. 모재의 미세조직은 페라이트와 오스테나이트의 상분율이 동일하게 확인되었고, 전자빔 용접부의 미세조직은 페라이트, grain boundary austenite(GBA), intra-granular austenite(IGA), Widmanstätten austenite(WA)로 구성되었다. 용접부의 상분율은 페라이트 58.4 %, 오스테나이트 41.6 %로 확인되었다. 이에 대해 FSP 처리 후, 상분율은 오스테나이트 70.0 %, 페라이트 29.9 %, 시그마상 0.1 %로 확인되었다. 그리고 표면부의 미세조직은 동적재결정에 의해 결정립이 미세화(base metal=17.3  $\mu\text{m}$ , weld metal=51.9  $\mu\text{m}$ , FSP 영역=2.6  $\mu\text{m}$ ) 되고 높은 strain이 분포함을 확인할 수 있었다. 미세화로 인해 Cr이 입내에서 입계로 확산되는 거리가 짧아져 입계를 따라 표면으로 확산되기 쉬워 표면에 보다 두꺼운 passive film을 형성해 CISCC 저항성을 향상시켜줄 것이라 판단된다. 또한, FSP tool의 마모에 의해 FSP 영역에서 텅스텐에 의한 강화효과도 확인되었다. 이후, FSP 처리를 통한 결정립 미세화가 실제로 CISCC 저항성을 향상시키는지를 평가하기 위해 U-bend 염수 분무 시험을 수행하였다. EBW WM의 표면에서는 다수의 pitting corrossions과 EDS 분석 결과(Cr 증가 & Fe 감소) 미세 CISCC도 확인되었다. 하지만 FSP 처리된 표면에서는 부식으로 인한 pitting이나 CISCC가 관찰되지 않았다. 이러한 결과를 바탕으로, FSP 처리를 통해 미세조직을 제어하여 CISCC 저항성을 향상시킬 수 있음을 검증하였다.

#### [P20-5]

**Autocatalytic 베이나이트 변태 기반 900 MPa급 carbide-free 용접금속의 강도-인성 발현 메커니즘 고찰:** 백종민, 김중훈(국립창원대학교), 손명락(고려용접부), 한규태(포스코), 김용진, 박시욱(국방과학연구소), 홍현욱\*(국립창원대학교)

**Keywords:** Weld metal, Composition, Bainite, Microstructure, Strength-toughness balance

고강도 용접금속에서 강도-인성의 동시 확보는 여전히 중요한 기술적 과제로 남아 있다. 본 연구에서는 coalesced bainite (Bc) 억제와 multi-variant bainitic 미세조직이 유도된 항복강도 900 MPa급 용접금속을 대상으로 미세조직 인자와 강도/인성과의 상관성을 고찰하고자 한다. 열역학·확산 계산을 통해 제안된 0.09C-3.0Ni-0.9(Cr+Mo+V) (wt.%) 성분계에 대해, dilatometer 시험과 JmatPro로 계산된 CCT curve를 통해 450-460 °C 에서 carbide-free bainite의 autocatalytic 변태가 유도됨을 확인하였다. Multi-pass 용접부의 최종 미세조직은 late bainite >90%, Bc+마르텐사이트 <4%로 제어되었다. TEM 분석 결과, lath 경계의 탄화물 석출 및 잔류 오스테나이트가 관찰되지 않았고, APT 분석에서는 lath 경계의 탄소 편석과 Cr-Mo-V rich한 나노 클러스터의 균일한 분포가 확인되었다. 방위 분석 결과, Kurdjumov-Sachs(KS) 방위관계에 대응하는 24개 variant가 균등하게 분포하여 40°를 초과하는 고각입계 기반의 interlocking한 미세조직이 형성되었으며, 이는 균열 경로의 굴절과 변형 분산에 기여하는 것으로 해석된다. 이러한 합금 조성과 최적의 미세조직 조합을 통해 항복강도 950 MPa와 -51 °C에서의 Charpy 충격치 대략 50 J를 동시에 달성하였다. 본 결과는 베이나이트 variant 다양화, 원소의 편석 및 나노 클러스터를 고려한 고강도 용접금속이 강도-인성 trade-off 완화에 효과적임을 제시한다.

#### [P20-6]

**비정질 삽입재 및 다층 중간재가 Ti/SUS 브레이징 접합부의 계면 반응 거동 및 기계적 특성에 미치는 영향:** 노주원, 김동우, 이운서, 이진규\*(국립공주대학교)

**Keywords:** 이종 접합, 브레이징, 비정질, 확산, 중간재

이종 재료의 접합은 서로 다른 소재의 장점을 동시에 활용하여 우수한 성능을 확보할 수 있는 핵심 기술로 주목받고 있다. 그러나 티타늄 합금과 스테인리스강은 열적·화학적 물성 차이로 인해 직접 접합이 어렵고, 특히 고온 공정에서는 원소 확산이 촉진되어 계면 반응이 가속화됨에 따라 취성 금속간화합물 형성이 유발될 수 있다. 이러한 반응층의 형성은 접합부 신뢰성을 저하시키는 주요 요인으로 작용한다. 브레이징(brazing)은 삽입 금속을 이용하여 모재의 용융 없이 접합이 가능한 공정으로, 저융점 비정질 삽입재 및 중간재(interlayer) 설계를 통해 원소 확산 경로와 계면 반응 거동을 제어하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 비정질 Zr-Ti계 합금을 삽입재로 활용한 Ti/STS304 브레이징에서 다층 중간재 구조가 계면 반응 거동과 기계적 특성에 미치는 영향을



분석하고, 접합 온도에 변화에 따른 미세조직의 변화를 체계적으로 고찰하였다. CP-Ti(Grade 2)와 STS304를 모재로 사용하였으며, 브레이징 후 일정 온도에서 유지하여 확산에 의한 등온응고(isothermal solidification)를 유도하였다. 삽입재의 열적 특성은 시차열분석(DTA)으로 평가하였고, X선 회절분석(XRD)을 통해 삽입 금속의 비정질 구조를 확인하였다. 접합부의 미세조직과 상 분포는 주사 전자현미경(SEM) 및 에너지분산 X선 분광법(EDS)로 분석하였으며, 최적 조건에서는 계면 반응층의 조성 구배를 정밀하게 파악하기 위해 전자탐침미세분석기(EPMA)를 추가 수행하였다. 또한, 비커스 미세경도 시험과 인장 시험을 통해 중간재 구조 및 접합 온도가 접합부의 기계적 특성에 미치는 영향을 종합적으로 평가하였다.

#### [P20-7]

**열-기계적 응력 완화를 위한 UPM Cu/Mo 복합 스페이서 설계 및 접합 특성 연구:** 조아섭(인하대학교), 김근수(호서대학교), 현승균\*(인하대학교)

**Keywords:** 양면냉각 모듈, 일방향 다공성 구리(UPM), Cu/Mo 스페이서, 확산접합, Ag 소결, 전력반도체 패키징, 열응력 완화

양면냉각(Double-Sided Cooling, DSC) 전력반도체 모듈은 고출력 구동 시 높은 열발생 밀도로 인해 우수한 방열 특성과 함께 열팽창계수(CTE) 불일치로 인한 열-기계적 응력을 완화할 수 있는 스페이서 소재가 요구된다. 기존 Cu/Mo 복합 스페이서는 높은 열전도도를 제공하나, 세라믹 기판 및 칩 계면에서 발생하는 응력 집중으로 인해 장기 신뢰성 저하 문제가 보고되고 있다. 본 연구에서는 응력 완화 능력 향상을 위해 다공성 구조를 갖는 일방향 다공성 구리(UPM)를 적용한 UPM Cu/Mo 복합 스페이서를 제안하였다. UPM Cu/Mo 계면은 Direct Diffusion Bonding 공정을 통해 접합하였으며, 이후 Ag 소결 공정을 이용하여 반도체 칩 접합 구조를 모사하였다. 계면 분석 및 접합 특성은 미세조직 분석과 기계적 평가를 통해 검증하고 있다. 다공성 구리 구조는 열전도 경로를 유지하면서도 기계적 순응성을 제공하여 열충격 조건에서 계면 응력을 효과적으로 완화할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 소결 조건 최적화 및 열충격 신뢰성 평가를 통해 DSC 전력 모듈용 차세대 스페이서 소재로서의 적용 가능성을 검증할 예정이다.

#### [P20-8]

**고망간강 다층 SAW 용접부 및 열영향부에서의 균열 발생 거동 분석:** 양희평, 송호정(동아대학교), 박건우(울산과학기술원), 한일옥(포항특수용접부), 전종배\*(동아대학교)

**Keywords:** High-Mn steel, Submerged arc welding, Cracking mechanism

전 세계적인 환경 규제 강화로 인해 LNG (Liquefied Natural Gas) 관련 극저온 산업의 수요가 급증하고 있으며, 이에 따라 LNG의 안정적인 운송 및 저장을 위한 극저온용 소재 확보가 필수적이다. 기존 극저온 소재로는 STS304 및 STS316과 같은 오스테나이트계 스테인리스강이 주로 활용되어 왔으나, 높은 원가 부담으로 인해 산업계에서는 이를 대체할 경제적인 강종에 대한 요구가 지속되어 왔다. 최근 고망간강 (High-Mn steel)은 우수한 극저온 인성과 가격 경쟁력을 동시에 갖춘 차세대 극저온 소재로 주목받고 있다. 이러한 고망간강을 LNG 운송 및 저장 설비와 같은 대형 구조물에 적용하기 위해서는 용접 공정이 필수적이며, 특히 후물재 접합 시 높은 생산성과 깊은 용입을 제공하는 SAW (Submerged Arc Welding)가 핵심 공정으로 활용된다. 그러나 고망간강은 용접 과정에서 망간의 높은 증기압에 따른 용접부 조성 변화, 응고 중 미세편석 및 국부 조성 불균일, 그리고 열영향부 (HAZ)의 결정립 조대화 및 잔류응력 축적 등으로 용접부 건전성 저하와 균열 발생 위험이 보고되어 왔다. 본 연구에서는 고망간강 다층 SAW 용접부 및 열영향부에서의 균열 발생 거동을 규명하기 위해 거시적 균열 분포 관찰과 미세조직 분석을 연계하여 수행하였다. 먼저 OM 및 SEM 분석을 통해 용접 금속의 응고조직 및 HAZ의 열이력에 따른 조직 변화를 관찰하고, 균열의 위치-형상-전파 경로를 체계적으로 파악하였다. 특히 파면 분석을 통해 균열의 형태적 특징을 정의함으로써 고온 균열 (Hot cracking)과 저온 균열 (Cold cracking)을 구분하였다. 또한 SEM/EDS 기반의 국부 조성 분석을 통해 용접부 내 응고 편석 및 조성 불균일을 확인하였으며, 석출물 종류와 분포가 균열 개시 및 전파에 미치는 영향을 고찰하였다.

#### [P20-9]

**고강도 저합금강 다층 용접금속 열영향부의 미세조직 및 기계적 특성:** 배민혁(한국재료연구원, 부산대학교), 강용준\*, 송상우(한국재료연구원), 강남현(부산대학교)

**Keywords:** Multi-pass welding, Weld metal, Heat-affected zone, Impact toughness

조선·해양, 파이프라인 및 플랜트 등 다양한 산업 분야에서 구조용 강재의 고강도화가 지속적으로 이루어지고 있다. 이에 따라 용접 금속에도 모재와 동등 이상의 강도와 우수한 인성이 요구되며, 이를 확보하기 위한 용접재료 및 공정기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 용접금속의 기계적 특성은 미세조직에 의해 크게 좌우되는데, 구조물 제작을 위한 다층(multi-pass) 용접 과정에서 형성되는 용접금속 열영향부(heat-affected zone, HAZ)의 미세조직 특성에 관한 연구는 상대적으로 부족하며, 선행 연구들 사이에서도 상반된 결과가 보고되고 있다. 본 연구에서는 용접금속 HAZ의 체계적인 분석을 위해 단층(single-pass) 용접금속을 대상으로 Gleeble simulator를 이용하여 용접 열사이클을 재현하였다. 최고온도(peak temperature)를 달리하여 용접금속의 coarse-grained HAZ (CGHAZ), fine-grained HAZ (FGHAZ), intercritical HAZ (ICHAZ)를 재현하였으며, 각 영역의 기계적 특성을 평가하고 미세조직 분석을 통해 이들 간의 상관관계를 규명하고자 하였다. 또한 후속 패스에 의한 템퍼링 효과가 각 영역에서 어떻게 나타나는지를 관찰하였다.

#### [P20-10]

**BA 처리 스테인리스 스틸 316L 전해연마 심리스 튜브의 용접 접합부 인장 파단 특성 및 개재물 분석:** 이수연, 이종혁, 장병록\*(인하대학교), 박은혜(인하대학교, 한국폴리텍대학)

**Keywords:** Bright Annealing(BA), Stainless steel 316L, Electropolishing, TIG welding, Tensile fracture, Oxide inclusions

BA(Bright Annealing) 처리된 스테인리스 스틸 316L 심리스 튜브는 반도체 및 바이오산업에서 고정정 배관재로 널리 사용되며,

용접 접합부의 기계적 신뢰성은 실제 적용 환경에서 중요한 요소이다. 본 연구에서는 외경(1/2 inch)의 BA 처리된 316L 심리스 튜브 원소재를 대상으로 모재 및 내부 표면에 존재하는  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , CaO 계 산화물로 구성된 비금속 개재물의 특성과 분포를 관찰하였다. 이후 동일한 튜브 두 개를 TIG 용접으로 접합한 후 인장시험을 수행하여 파단을 유도하였으며, 파단면에 노출된 개재물의 형태와 분포를 분석하였다. 광학현미경과 주사전자현미경(SEM) 분석을 통해 파단 위치와 파괴 양상을 확인하였고, SEM-EDS를 이용하여 파단면에 존재하는 비금속 개재물의 화학 조성을 규명하였다. 인장시험 결과, 용접 접합 시편의 평균 최대 인장강도와 파단 연신율은 각각 약 473MPa와 36.7%로 나타났다. 이를 원소재 단계에서 확인된 개재물과 비교하여 파단면에 노출된 개재물의 형상과 분포를 분석한 결과, 특정 산화물 개재물이 파단 또는 균열 전파 경로와 연관되어 관찰되었으며, 이는 원소재에 존재하던 개재물이 용접부 및 파단 특성과 밀접한 관련성을 가질 수 있음을 보여준다. 이를 종합하여 원소재, 용접 접합부, 그리고 파단면 관찰을 통해 개재물의 존재 양상과 파단 특성 간의 관계를 체계적으로 비교·분석하였다.

#### [P20-11] Canceled

#### [P20-12]

**경량 Mg 합금 압출재의 용접 공정별 용접부 특성:** 윤병현\*(충남대학교)

**Keywords:** Mobility, IT, Magnesium alloy, GTAW, FSW, LBW

이동성과 편리성을 추구하는 도심 운송수단의 증가 추세에 의해 미래형 모빌리티 시장이 급성장하고 있으며 이에 따라 경량화 및 고성능화를 통한 주행거리 증가 및 배터리 수명 연장을 위해 초경량 금속인 마그네슘 합금의 적용 확대 요구가 증가하고 있으나, 높은 발화성과 부식성은 마그네슘 합금의 상용화를 제한하는 원인으로 알려져 있으나 한국재료연구원에서 개발한 난연·고내식 마그네슘 합금은 발화 특성을 제어하고 화재 안정성을 확보하며 부식 저항성이 개선되어 경량화가 요구되는 분야에서 구조 부품으로 적용성 확대가 기대되고 있다. 본 연구에서는 한국재료연구원에서 개발된 고강도 마그네슘 합금인 SEN합금을 대상으로 아크용접(GTAW), 마찰교반용접(FSW), 레이저 용접(LBW) 공정별로 용접부 특성을 비교하고자 하였다. 각 용접 공정을 적용한 용접 시편을 제작후 용접부 형상, 용접부 강도 및 용접부 미세조직 비교를 통하여 GTAW, FSW, Laser 용접에 마그네슘 합금 용접에 미치는 영향을 분석하였다.

#### [P20-13]

**그라플 헤드 용접 공정 조건 검증 및 최적화:** 김중환\*, 도정민, 소원재, 신진건, 정용진(한국원자력연구원)

**Keywords:** 용접, GTAW, TIG용접기, 하나로핵연료집합체

한국원자력연구원(KAERI)에서는 성형, 가공, 조립 공정을 거쳐 연구용 원자로인 하나로(High-flux Advanced Neutron Application Reactor)에 사용되는 핵연료 집합체를 생산한다. 핵연료봉과 조립부품을 사용하여 집합체의 형태로 조립 후, 그라플 헤드 용접 공정에서 그라플 헤드락과 그라플 헤드를 TIG용접기로 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding) 용접한다. TIG용접기의 3-Jaw 타입 회전지그 도입 및 장비 디지털화 개선 이후, 최적의 용접조건을 선정하였으며 침투탐상검사 및 용입 깊이 검사를 통해 적절한 용접이 수행되었음을 검증하였다. 이를 통해 하나로 핵연료 집합체의 품질 향상 및 공정 안정화를 도모하였다.

#### [P20-14]

**Ag-Cu계 브레이징 필러 조성 변화에 따른 Cr-Mo-Cu계 접점 접합부의 미세조직 및 확산 거동:** 신현정, 이영민, 유가영, 김동배\*(대구기계부품연구원), 이주현, 우수열(효성중공업)

**Keywords:** Brazing, Electrical Contact Materials, Ag-Cu Brazing Filler, Interfacial Reaction, Thermal Behavior

고전류 차단기용 접점 시스템에서 브레이징 접합부는 반복적인 열·전기적 하중에 노출되며, 접합부의 안정성은 접점 신뢰성과 수명에 직접적인 영향을 미친다. 그러나 접점 브레이징 공정에서는 필러 조성에 따른 열거동 및 계면 반응 특성이 체계적으로 정리된 설계 기준이 부족한 실정이다. 본 연구는 Cr-Mo-Cu계 접점소재와 무산소동 간 브레이징 접합에서 Ag-Cu계 필러 조성 차이가 접합 안정성에 미치는 영향을 판단하기 위한 기초 자료를 확보하는 것을 목적으로 수행되었다. 이를 위해 AgCu50 및 AgCu28Ge2Co0.3 필러를 대상으로 열적 거동(TG/DTA, DSC)과 접합부 미세조직 및 성분 확산 거동(SEM-EDS)을 비교 분석하였다. 그 결과, 필러 조성에 따라 용융 거동과 계면 반응 특성에 차이가 나타났으며, 이러한 특성 차이는 브레이징 온도 및 공정 조건 선정 시 고려되어야 할 요소임을 확인하였다. 본 연구 결과는 고전류용 접점 브레이징 공정에서 필러 소재 선별과 공정 설계 방향 설정을 위한 기초 판단 기준으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### [P20-15]

**전류 인가를 통한 304 스테인리스 용접부의 미세조직 및 기계적 물성 제어:** 방종원\*, 오연준, 정현도, 문중식(한국화학융합시험연구원), 배장현, 김문조(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 304 Stainless steel, Weldment, Direct Current, Recrystallization, Hardness, Heat Affected Zone (HAZ)

본 연구에서는 직류 전류를 인가하여 304 스테인리스 용접부의 미세조직과 기계적 물성의 변화를 분석하였다. 용접이 완료된 시편에 100~600A의 전류를 5초간 인가하였으며 각 인가 조건에 따른 용접부와 열영향부(Heat Affected Zone)의 미세조직 변화를 광학현미경(OM) 및 주사전자현미경(SEM) 통해 분석하였으며 비커스 경도를 측정해 기계적 물성 변화를 확인하였다. 실험 결과, 전류 인가 후 용접부의 수지 상(Dendrite)이 미세화 되었으며 용접부와 열영향부(Heat Affected Zone)의 경도가 전반적으로 상승하는 경

향을 보였다. 또한, 모재부와의 경도 편차 역시 감소하여 물성이 균일화되는 경향을 확인하였다. 이는 전류 인가를 통해 조직이 미세화 됨과 동시에 재결정화가 이루어지면서 내부의 결함들이 완화되고 기계적 물성이 강화된 것으로 보인다.

#### [P20-16]

**사용후핵연료 처분용기 밀봉을 위한 전자빔 용접의 디포커싱 효과 적용성 평가:** 이영호\*, 김재득, 김진섭(한국원자력연구원)

**Keywords:** 전자빔용접, 디포커싱, 처분용기, 무산소동, 사용후핵연료

사용후핵연료 처분용기를 인간생활권과 완전히 격리시키기 위해서는 심층처분환경조건에서 장기간 우수한 부식저항성을 가져야한다. 사용후핵연료를 장입한 후 검증된 밀봉공정으로 용접이 반드시 수행되므로 용접부의 건전성은 처분용기의 핵심이다. 본 연구에서는 외부 구리용기의 용접을 모사하기 위해 고열전도성인 35 mm 두께의 무산소동 소재를 확보한 후, 전자빔 용접 공정변수 중 defocusing(초점이탈) 효과를 실험 및 해석적으로 평가하였다. 본 연구에서는 기존의 일정한 흡수계수 모델을 개선하여 깊이 의존형 단계적 감쇄모델을 제안하였고, 역해석을 통해 Defocusing 조건에서 에너지 전달효율이 약 36% 향상됨을 입증하였다. 결과적으로 적용된 Defocusing 효과는 단순한 출력상승 효과와 비교할 때 더 깊은 용입이 이루어졌으며, 이는 벤팅(Venting) 효과를 유도하여 터널링 모드 형성의 영향으로 판단하였다. 이를 검증하기 위해 용접부에 대한 EBSD 분석을 수행하였고 해석된 열 이력과 결정립 조대화 거동과의 상관관계를 분석하였다. 처분용기와 같이 두꺼운 무산소동을 전자빔으로 용접할 경우 단순히 출력을 높이는 것보다 초점 위치 최적화를 통해 터널링 모드를 유도하는 것이 용입 깊이 증가와 부식 저항성 향상을 위한 표면 건전성 확보에 더 효과적임을 확인하였다.

#### [P20-17]

**M2 분말을 이용한 기판 예열 레이저 클래딩 기반 고압 다이캐스팅 금형 표면 강화 기술:** 김철우\*, 최세원, 김영찬, 유효상(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 고압 다이캐스팅, 레이저 클래딩, DED 적층, M2 고속도강, 열피로 저항성

고압 다이캐스팅 금형은 용탕과의 반복 접촉에 따른 급격한 열사이클로 인해 높은 열응력을 받으며, 이는 표면 열피로 균열과 금형 수명 저하의 주요 원인이 된다. 직접 에너지 적층(Direct Energy Deposition, DED) 기반 레이저 클래딩은 금형 표면의 내마모성 및 내열피로 특성을 향상시키는 유효한 보강 기술로 보고되고 있다. 선행 연구에서는 SKD61 금형 기판에 예열 없이 M2 고속도강 분말을 적용하여 표면 경도 및 내마모 특성 향상을 확인하였다. 본 연구에서는 기판 예열이 M2 분말 레이저 클래딩층의 품질 및 내열피로 특성에 미치는 영향을 분석하였다. SKD61 기판(100 × 100 × 25 mm)을 제어된 온도 범위로 예열한 후 고출력 다이오드 레이저를 이용하여 클래딩을 수행하였다. 광학계 및 분말 공급 시스템은 비예열 조건과 동일하게 유지하였으며, 레이저 출력, 주사 속도, 분말 공급 속도 등의 공정 변수는 예열 조건에 적합하도록 최적화하였다. 제작된 시편은 미세조직 분석, 경도 분포 측정, 접합 계면 관찰 및 열사이클 시험을 통해 비예열 시편과 비교하였다. 그 결과, 기판 예열은 열구배 및 잔류응력을 감소시켜 균열 발생을 억제하였으며, 클래딩층의 균일성과 계면 접합 건전성을 향상시키는 것으로 나타났다. 또한 열사이클 시험에서 향상된 균열 저항성을 확인하였다. 이러한 결과는 기판 예열이 고압 다이캐스팅 금형의 수명 연장을 위한 핵심 공정 변수임을 알수있다.

[P21-1]

Pr, Nd-Fe-B계 영구자석의 초기 REE 함량이 입계 확산 공정 후 미세조직 및 자기적 특성에 미치는 영향 : 김현중, Madavali Babu, 홍순직\*(국립공주대학교)

Keywords: 입계 확산, Nd-Fe-B, 자성

Nd-Fe-B계 소결자석은 현재까지 개발된 영구자석 중 가장 우수한 자기적 특성을 지니고 있으며, 높은 최대 에너지 적산치와 우수한 잔류 자속밀도로 인해 다양한 산업 분야에 널리 활용되고 있다. 특히 전자동차 구동 모터, 고성능 전자기기, 풍력 발전 시스템과 같은 첨단 응용 분야에서 필수적인 핵심 소재로 주목받고 있다. 그러나 이러한 Nd-Fe-B계 자석은 고온 환경에서 보자력이 급격히 감소하는 한계를 가지고 있으며, 이로 인해 고온 조건이 요구되는 응용 분야에서의 활용이 제한되는 문제가 제기되고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 방법으로, 경희토류와 중희토류 원소를 자석의 결정립계(grain boundary)에 선택적으로 확산시켜 보자력을 향상시키는 입계확산공정 (Grain Boundary Diffusion Process)이 적극적으로 연구되고 있다. 본 연구에서는 초기 희토류 함량이 서로 다른 Pr, Nd-Fe-B계 소결자석에 대하여 PrCuGa 및 DyH<sub>3</sub>를 사용하여 입계확산공정을 수행하였다. 이후 확산 처리된 시편에 대하여 자기적 특성(잔류자속밀도, 보자력, 최대 에너지적산치)의 변화를 정량적으로 분석하였다. 또한, 초기 REE 함량 차이가 확산 깊이, 확산층의 두께 및 형상 양상, 그리고 Core-shell 구조의 발달 여부에 어떠한 영향을 미치는지를 미세조직 관찰을 통해 분석하였다. 이를 통해 초기 REE 함량이 입계확산 거동 및 미세조직 진화에 미치는 영향을 명확히 분석함으로써, 고성능 Nd-Fe-B계 영구자석의 특성 제어 및 희토류 자원 절감 전략 수립에 기여할 수 있는 기초적 연구 결과를 제공하고자 한다.

[P21-2]

3D 프린팅 기반 고규소 Fe-Si 연자성 AFM stator 코어의 금속-절연-금속 구조 설계 및 시뮬레이션을 통한 공정 변수와 전자기 특성의 상관관계 규명: 이강현(한양대학교), 임태협(한양대학교, Nanyang Technological University), 김민중, Bai Nelson M, 이선영\*(한양대학교)

Keywords: 축방향 자속 모터, Fe-6.5%Si 합금, 재료 압출식 3D 프린팅, 금속-절연체-금속 구조, 계면 거칠기, 전자기 시뮬레이션, 코어 손실  
최근 축방향 자속 모터 (Axial-flux motor, AFM)는 큰 공극 반경에 따른 높은 토크 밀도와 디스크형 구조의 공간 효율성 등 형상학적 이점으로 고효율 달성에 유리해 적용이 확대되고 있다. 이에 따라 연자성 코어 설계의 중요성이 커지고 있다. 특히, 고규소 Fe-6.5%Si 합금은 높은 전기저항에 의한 와전류 손실 저감과 낮은 자왜, 자기이방성 등 우수한 연자기 특성을 갖지만, 높은 취성을 가져 기존의 냉간 가공 기반 공정으로는 제조가 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 본 연구에서는 재료 압출식 (Material Extrusion, MEX) 3D 프린팅 공정을 활용하여 Fe-6.5%Si 기반 금속-절연체-금속 (MIM) 구조의 그린 파트를 제조하고 SPS (Spark Plasma Sintering) 공정을 통해 AFM stator 코어를 제작하였다. 제작된 AFM stator의 자성 특성은 BH 특성을 기반으로 한 전자기 유한요소 시뮬레이션을 통해 성능을 평가하였다. 특히, MEX 공정변수에 따른 금속-절연 계면 거칠기의 영향을 정량적으로 비교하기 위해, 계면의 거칠기에 따른 두 가지 구조 모델을 구축하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과, 계면 거칠기가 커질수록 자속 분포가 국소적으로 집중되어, 유효 투자율은 감소하고 코어 손실은 증가했다. 본 연구는 Fe-6.5Si 기반 MIM 구조의 AFM stator 코어를 구현하고, 시뮬레이션을 통해 3D 프린팅 변수와 이에 따른 계면 특성이 전자기 특성에 미치는 영향을 규명함으로써, 3D 프린팅 공정으로 제작된 AFM stator 코어 설계에서 공정 변수와 이에 따른 자기 특성의 상관관계를 규명하였다.

[P21-3]

Fabrication of High-Density Fe-based Nanocrystalline Cores with Enhanced Soft Magnetic Properties via Controlled Crystallization: Seongjun Kim, Juhyeok Lee, Seonghoon Yi\*(Kyungpook National University)

Keywords: Fe-based amorphous alloys, Nanocrystallization, Soft magnetic properties

In this study, we investigated the effect of Cu addition on the crystallization behavior and soft magnetic properties of Fe-based amorphous alloys. The primary objective was to fabricate bulk nanocrystalline cores with high density and excellent magnetic performance by controlling the sintering process based on the crystallization peaks (Tx). Fe-based amorphous ribbons were initially produced via a Rapid Solidification Process (RSP) and subsequently pulverized into powders using ball milling. The core samples were consolidated using Spark Plasma Sintering (SPS). Differential Scanning Calorimetry (DSC) analysis confirmed the appearance of a glass transition temperature (Tg) and the separation of crystallization peaks into primary (Tx1) and secondary (Tx2) stages due to Cu addition. Based on this thermal analysis, sintering was performed at a temperature above Tg under a pressure of 80 MPa. This specific condition effectively utilized the superplastic characteristics of the supercooled liquid to achieve high densification. Simultaneously, it induced the controlled precipitation of  $\alpha$ -Fe nanocrystals. The structural evolution and phase identification were analyzed using X-ray Diffraction (XRD). The magnetic properties, including coercivity and saturation magnetization, were evaluated using VSM and AC/DC magnetic property measurement systems.

**[P21-4]**

Heat Treatment Optimization of Cu-Added Fe-Based Amorphous Soft Magnetic Ribbon: Jongil Lee, Seonghoon Yi\*(Kyungpook National University)

**Keywords:** 연자성, 비정질, 열처리, 상변태

Soft magnetic materials are characterized by high magnetic permeability, low coercivity, and minimal hysteresis loss under external magnetic fields and they are widely utilized as key functional materials across modern industries including power conversion devices, electrical and electronic components, communication equipment, automotive systems and renewable energy technologies. In particular as improving energy efficiency and achieving carbon neutrality have emerged as critical industrial and technological challenges worldwide, the demand for high-performance soft magnetic materials capable of minimizing power loss while maintaining stable performance under high-frequency and high-power operating conditions has continuously increased. From an academic perspective, precise control and comprehensive understanding of the correlations among grain size, crystallographic texture, internal stress, compositional variations and heat treatment conditions which govern the soft magnetic properties are recognized as major research challenges. In this study, amorphous soft magnetic ribbons with a small addition of Cu were fabricated and subjected to various heat treatment processes. Investigate their magnetic, thermal, and crystallographic properties. Through this approach, the optimal heat treatment conditions for inducing nanocrystallization in amorphous ribbons are identified and discussed. In this study, high-Fe-content alloys ( $\text{Fe} > 80 \text{ at}\%$ ) were designed to achieve a magnetic flux density of 1.6 T and Cu was added to improve magnetic properties by optimizing crystal grain size. The Cu-added ribbons were annealed under various heat treatment conditions. Their microstructural and magnetic properties at each temperature were systematically analyzed using X-ray Diffraction (XRD), Differential Scanning Calorimetry (DSC), Vibrating Sample Magnetometry (VSM), and DC loop tracer measurements. Through this study, the potential role of soft magnetic materials in high-efficiency, high-frequency, and environmentally sustainable industrial systems is elucidated, thereby providing fundamental insights for future research and industrial applications.

**[P21-5]**

Single-Phase  $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$  by De-nitridation: A Scalable Precursor for Iron Nitride Phase Control: Ho-Jeong Kim, Hyojin Choi, 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:** De-nitridation, Iron Nitride, Microscale, Powder Synthesis

As the nitrogen concentration and temperature increase, a variety of iron nitride phases form in the Fe-N system. When nitrogen atoms diffuse into the iron lattice, iron nitride compounds such as  $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}$ ,  $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ , and  $\gamma\text{-FeN}$  ( $\text{N} = 0\text{--}10.3 \text{ at}\%$ ) are produced. The  $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$  phase, containing approximately 20 at% nitrogen in pure iron, exhibits a cubic structure in which Fe atoms form a face-centered cubic (FCC) lattice, and nitrogen atoms occupy body-centered interstitial sites at a ratio of one nitrogen atom per four iron atoms. Although the synthesis of  $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$  has been investigated, most conventional synthesis methods rely on the nitridation of iron using ammonia ( $\text{NH}_3$ ). This process demands precise control of  $\text{NH}_3$ , leading to low reproducibility, and the requirement for uniform nitridation requires smaller particle sizes, making single-phase synthesis difficult for microscale powders. In this study, we successfully synthesized microscale single-phase  $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$  via a simple and scalable de-nitriding process by annealing commercially available mixed-phase  $\text{Fe}_x\text{N}$  ( $x = 2\text{--}4$ ) powders in a mixed atmosphere of inert gas and hydrogen. This process not only eliminates the use of hazardous ammonia gas but also enables precise control of the nitrogen content. This study demonstrates that the de-nitriding method offers a safer, more reproducible, and scalable alternative for synthesizing Fe-N compounds, thereby opening new opportunities for the controlled fabrication of various iron nitride phases.

**[P21-6]**

Enhancing Coercivity of Nd-Fe-B Magnets via Zn-Assisted two-step  $\text{Pr}_{70}\text{Cu}_{20}\text{Al}_{10}$  Grain Boundary Diffusion: Jaehyuk Kim, Seong Min Kim, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Nd-Fe-B, Grain Boundary Diffusion Process, Light Rare Earth

A two-step grain boundary diffusion (GBD) process incorporating a Zn pre-diffusion step prior to Tr-based GBD was employed to enhance intrinsic coercivity ( $H_{cj}$ ) while minimizing the remanence ( $B_r$ ) degradation typically observed in HRE-free Pr-GBD magnets. Commercial 45H-grade Nd-Fe-B sintered magnets were first pre-diffused with Zn nanopowder at  $700^\circ\text{C}$  for 3 h, followed by diffusion of  $\text{Pr}_{70}\text{Cu}_{20}\text{Al}_{10}$  (at.%) (PCA) alloy ribbons at  $800^\circ\text{C}$  for 10 h and subsequent annealing at  $500^\circ\text{C}$  for 3 h. For comparison, PCA-GBD and  $\text{Pr}_{70}\text{Cu}_{15}\text{Al}_{10}\text{Zn}_5$  (at.%) (PCAZ)-GBD magnets were prepared under identical diffusion conditions. The Zn/PCA-GBD magnet exhibited the highest intrinsic coercivity of 27.54 kOe ( $\Delta H_{cj} = 10.71 \text{ kOe}$  compared with the original magnet) and demonstrated the least negative temperature coefficient of coercivity ( $\beta = -0.586 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ ), indicating improved thermal stability. Cross-sectional BSE-SEM and EPMA analyses revealed that Zn pre-diffusion significantly enhanced the Pr diffusion depth, enabling the retention of a Pr-rich shell and a continuous Nd-rich grain boundary (GB) phase even at a depth of  $800 \mu\text{m}$  from the surface. EDS line-scan analyses further confirmed that the diffused Zn was exclusively localized within the Nd-rich GB phase without penetrating the  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  main phase, suggesting that Zn pre-diffusion primarily modifies the grain boundary environment prior to Pr diffusion. These findings demonstrate that Zn-assisted two-step GBD effectively promotes deep Pr penetration and maximizes coercivity enhancement while preserving remanence, providing a cost-effective and HRE-free GBDP route toward high-performance Nd-Fe-B magnets.

**[P21-7]**

Low-Temperature Hydrogenation Pre-Treatment for Enhanced Diffusion Efficiency in Pr-Based HRE-Free Grain Boundary Diffusion Process: Seong Min Choi, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Nd-Fe-B sintered magnet, Grain boundary diffusion, Hydrogenation, Pr-based alloy

Nd-Fe-B sintered magnets are widely employed in traction motors for electric and hybrid vehicles as well as in wind power generators due to their superior magnetic performance. With the rapid expansion of magnet-based applications, the demand for higher-coercivity magnets has increased substantially. Grain boundary diffusion process (GBDP) has emerged as an effective approach to enhance coercivity by introducing diffusion sources with high magnetic anisotropy, typically heavy rare earth (HRE) elements such as Dy and Tb. Conventionally, high coercivity has been achieved using HRE-containing diffusion sources. However, dependence on HRE elements results in supply instability and increased production costs. Consequently, HRE-free diffusion sources have attracted considerable attention. Despite their potential advantages, further improvements in coercivity enhancement and process efficiency are required to match the performance of HRE-based processes. Nevertheless, HRE-free GBDP remains a promising alternative for reducing reliance on Dy and Tb while improving cost-effectiveness and supply chain stability. In this context, achieving uniform diffusion and establishing efficient diffusion pathways are critical factors for enhancing process performance. In this study, we propose a strategy to secure effective grain boundary diffusion pathways through low-temperature hydrogenation pre-treatment, integrated with a Pr-based HRE-free diffusion process. The low-temperature hydrogenation step expands Nd-rich grain boundary phases and induces microcracks along grain boundaries, thereby forming continuous diffusion channels. This structural modification facilitates more uniform and deeper penetration of the diffusion source during the subsequent diffusion step. Our results demonstrate that low-temperature hydrogenation serves as an effective pre-treatment to enhance diffusion efficiency in Pr-based HRE-free GBDP. Further optimization of hydrogenation parameters is expected to promote more homogeneous diffusion behavior and achieve additional improvements in coercivity.

**[P21-8]**

Effect of Heat Treatment on Soft Magnetic Properties of High-C Amorphous Alloys: Mingyo Jeong, Seonghoon Yi\*(Kyungpook National Univ.)

**Keywords:** Hot metal, Soft magnetic, Fe-based amorphous alloys, Heat Treatment

In steelmaking processes, molten iron is produced in a high-carbon state prior to subsequent refining steps that adjust chemical composition to meet steel-grade requirements. This pre-refining material, commonly referred to as hot metal, is characterized by elevated carbon content and represents the compositional state before extensive impurity removal. From a materials design perspective, referencing such high-carbon, pre-refining compositions may provide an alternative framework for exploring functional materials based on composition spaces that differ from those of conventional steel products. In this study, Fe-based amorphous alloys were compositionally designed with reference to high-carbon hot-metal chemistry, and their soft magnetic properties and crystallization-related behaviors were preliminarily examined. The carbon content was varied from hot-metal-level compositions to lower concentrations in order to qualitatively examine the influence of carbon content on amorphous formation and magnetic behavior. Alloy ingots were prepared by arc-melting and subsequently processed into amorphous ribbons by melt-spinning. The as-spun ribbons were subjected to heat treatments over selected temperature ranges to explore annealing-induced structural changes. The crystallization behavior was examined using X-ray diffraction (XRD), supported by differential scanning calorimetry (DSC) while soft magnetic properties were evaluated using vibrating sample magnetometry (VSM) and DC loop tracer measurements. This work provides an initial assessment of the relationship between high-carbon hot-metal-inspired alloy design and the soft magnetic behavior of Fe-based amorphous alloys, and discusses the potential of high-carbon, pre-refining compositional concepts as a basis for developing Fe-based soft magnetic materials.

**[P21-9]**

Grain Boundary Engineering via La-Assisted Diffusion Channel Design in Nd-Lean Ce-Fe-B Hot-deformed Magnets:

Kyungmi Lee, Ye Ryeong Jang, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Hot-deformed, Ce-Fe-B

Ce-Fe-B magnets have emerged as promising Nd-lean alternatives for sustainable permanent magnet technologies. However, their practical application remains limited by poor grain boundary wettability, restricted diffusion pathways, and the formation of soft-magnetic REFe<sub>2</sub> phases, which collectively result in insufficient coercivity. In this study, we demonstrate a synergistic strategy that combines partial La substitution with a double grain boundary diffusion process to tailor the grain boundary structure of hot-deformed Ce-Fe-B magnets. The incorporation of La facilitates the formation of continuous, low-melting-point RE-rich grain boundary phases, thereby enhancing Nd-Al-Cu diffusion and promoting the development of a uniform core-shell microstructure extending into the platelet interior. Detailed microstructural analyses reveal that La substitution effectively suppresses the detrimental REFe<sub>2</sub> phase and ensures a homogeneous Nd distribution along grain boundaries, even with a reduced diffusion source content of only 10 wt.%. As a result, the La-substituted, double-diffused magnets achieve a coercivity enhancement of up to 5.6 kOe and a maximum energy product

of 13 MGOe, surpassing the performance of high-grade ferrite magnets as well as previously reported Nd-lean Ce-Fe-B bulk magnets. These findings highlight grain boundary engineering through La-assisted diffusion channel design as an effective and scalable approach toward high-performance permanent magnets with minimized dependence on critical rare-earth elements.

#### [P21-10]

**레이저 3D 프린팅 Fe-Si 합금의 열처리가 미세조직 및 자기특성에 미치는 영향:** 이한솔, 안종혁, 이귀영, 김종렬\*(한양대학교)

**Keywords:** 3D 프린팅, 규소강, 자기특성

레이저 3D 프린팅으로 제조된 Fe-Si 합금은 공정 변수 제어를 통해 집합조직을 설계할 수 있다는 점에서 큰 장점을 가진다. 특히 모터 코어에 요구되는 <001> fiber texture의 구현이 가능하다는 점에서 유망하다. 그러나 적층 제조 직후의 소재는 높은 잔류 응력과 전위 밀도를 내포하고 있으며, 이로 인해 자구 이동이 저해되어 자기특성이 크게 열화된다. 또한 레이저 3D 프린팅 공정의 빠른 냉각속도는 미세한 결정립 크기를 유도할 수 있기 때문에 자기특성 향상을 위해서는 결정립 크기 최적화가 요구된다. 따라서 레이저 3D프린팅으로 제조된 Fe-Si 합금의 자기특성 향상을 위해서는 열처리가 필수적이다. 본 연구에서는 레이저 3D 프린팅으로 제조된 집합조직 최적화 Fe-4.5 wt.% Si 코어를 900–1200 °C에서 열처리하고, 이에 따른 미세조직 및 집합조직 변화와 자기특성 변화를 분석하였다. 열처리 결과, 균일한 재결정이나 정상 입성장 대신 1100°C 이상에서 2차 재결정이 유도되었으며, 그 결과 비정상적으로 조대한 결정립이 형성되었다. 이에 따라 열처리 온도가 증가함에 따라 hysteresis loss는 현저히 감소하였으나, 결정립 조대화로 인해 eddy current loss는 증가하는 경향을 보였다. 결과적으로 열처리 온도에 따라 손실 거동이 상이하게 나타났으며, 주파수 조건별로 최적의 자기특성을 나타내는 열처리 조건을 도출할 수 있었다.

#### [P21-11]

**표면 거칠기 변화에 따른 Fe-6.5%Si 전기강판 자기특성 분석:** 김태영, 박언병, 진현욱, 권기혁\*(포항산업과학연구원)

**Keywords:** 구동 모터, 전기강판, 표면조도

전기 산업의 비약적인 발전으로 고성능 구동 모터의 중요성이 증대됨에 따라, 핵심 부품인 스테이터 코어 소재의 특성 개선이 요구되고 있습니다. 연자성 분말은 경제성과 형상 자유도가 높으나 성능 확장에 한계가 있어, 고출력 모터 구현을 위해 고주파 저철손 특성이 우수한 Fe-6.5%Si 전기강판의 활용이 필수적입니다. 본 연구에서는 열처리 및 자구 미세화 등 기존의 자기 특성 향상 기법 외에 표면 거칠기 변화가 자성에 미치는 영향을 집중적으로 분석하였습니다. 6.5%Si 전기강판을 대상으로 표면 거칠기와 자기적 특성 간의 상관관계를 정량화하였으며, 이를 통해 철손 저감 및 성능 향상을 위한 핵심 제어 인자를 도출하고 최적의 공정 제어 방안을 제시하였습니다.

#### [P21-12]

**Low-Temperature High-Density Sintering of  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$  Powders with Low-Melting Metals:** HyeSu Kim, Jaehyuk Kim, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Sm-Fe-N powders, Low-melting-point metal, Magnetic anisotropy, Magnetic field pressing

$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ -based Sm-Fe-N powders have attracted considerable attention as next-generation rare-earth permanent magnet materials owing to their high saturation magnetization ( $M_s$ ), large magnetocrystalline anisotropy constant ( $K_1$ ), and superior intrinsic magnetic properties. However,  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$  undergoes nitrogen desorption and decomposes into  $\alpha$ -Fe and SmN phases at temperatures above approximately 500 °C, resulting in severe degradation of magnetic performance. This intrinsic thermal instability restricts the application of conventional high-temperature sintering processes. Consequently, Sm-Fe-N powders have primarily been utilized in bonded magnet forms containing non-magnetic organic binders, which inevitably reduce the magnetic phase fraction and deteriorate overall magnetic properties. Therefore, the development of an alternative densification process that minimizes thermal degradation while enabling bulk fabrication is required. In this study, low-melting-point metal powders (Zn, Sn, and In) were introduced as sintering additives to promote densification under low-temperature processing conditions, with additive contents of 5, 10, and 15 wt%. The forming process consisted of magnetic field pressing (MFP) followed by electromagnetic shock compression (EMSC). The densification behavior of the compacts was evaluated by density measurements and microstructural analysis, while magnetic properties, including coercivity ( $H_c$ ), remanence ( $M_r$ ), and maximum energy product ( $BH$ )<sub>max</sub> were characterized using a B-H tracer. This study aims to investigate the densification behavior of the compacts induced by low-melting-point metal additives and to elucidate the origins of coercivity variation in relation to microstructural evolution. In addition, the temperature-dependent behavior will be systematically examined.



**[P22-1]**

**NaOCl 환경에서의 마찰이 304 스테인리스강 표면 특성 및 내식성에 미치는 영향:** 이현수, 최윤석\*(부산대학교), 이정훈\*, 조현빈(부경대학교), 강승주(부산대학교)

**Keywords:** 스테인리스, 표면, 내식성

AISI 304 스테인리스강은 우수한 내식성으로 인해 주방 및 욕실 등 다양한 생활환경에서 널리 사용되고 있다. 이러한 환경에서는 차아염소산나트륨(NaOCl) 용액을 이용한 세정 과정이 빈번하게 이루어지며, 이 과정에서 반복적인 마찰 하중이 동반된다. NaOCl 용액은 알칼리성 조건과 차아염소산 이온(OCl<sup>-</sup>)을 동시에 포함하는 환경으로, 표면 산화막의 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 마찰은 표면 거칠기의 변화뿐 아니라 국부적인 소성 변형과 변형 유기 마르텐사이트 형성을 유발할 수 있으며, 이는 표면의 형상적·기계적 특성 변화를 통해 내식 거동에 영향을 미칠 가능성이 있다. 본 연구에서는 마찰에 의해 유도된 표면 거칠기 변화와 마르텐사이트 상분율의 변화를 분석하고, NaOCl 용액에서의 전기화학적 분극 거동을 통해 이러한 미세구조적 변화가 내식 특성에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

**[P22-2]**

**Electrochemical Behavior of Organic Additives in TSV Cu Filling:** Nayoung Kim, 신지윤, 손인준\*(Kyungpook National Univ.)  
**Keywords:** Cu electroplating, Cu filling, Electrochemical behavior, LSV, Organic additives, TSV

In next-generation 3D integrated packaging technology, defect-free copper filling of Through-Silicon Vias (TSVs) is a key factor determining electrical reliability and process yield. The filling behavior within TSVs is complexly governed by current distribution, mass transfer, and the adsorption/desorption and reaction rates of organic additives. Consequently, optimizing additive composition and analyzing electrochemical behavior are essential. This study compared the electrochemical response characteristics of TSV copper electroplating processes under varying organic additive compositions using Linear Sweep Voltammetry (LSV). The potential-current response changes for each additive were observed from LSV measurements, aiming to derive favorable additive conditions for TSV filling based on differences in suppression and acceleration behavior. Furthermore, by linking electrochemical trends with actual TSV plating results, the filling stability and potential defect occurrence under varying process conditions were evaluated. The results of this study can serve as fundamental data for additive composition design and establishing the process window in TSV copper electroplating.

**[P22-3]**

**유기첨가제를 이용하여 TSV Ni 전해도금 거동 분석 및 무결함 충전 구현에 관한 연구:** 신지윤, 김나영, 손인준\*(경북대학교)  
**Keywords:** 전해도금, TSV, TSV Ni filling, 유기 첨가제

Ni은 우수한 기계적 강도, 내열성 및 내식성을 동시에 갖는 금속으로, 반도체 패키징 공정에서 구조적 신뢰성 확보를 위한 도금 소재로 주목받고 있다. 특히 전기적·열적 안정성이 뛰어나고 고온 환경에서의 신뢰성 문제가 상대적으로 적어 TSV(Through-Silicon Via) 충전 소재로서의 적용 가능성이 제시되고 있다. 이에 본 연구에서는 유기첨가제를 활용한 TSV Ni filling 실험을 설계하고, via 내부의 균일한 무결함 충전 특성 확보를 목표로 하였다. Ni 도금은 50mA 정전류 조건에서 20 min간 수행되었으며, 교반 속도는 500 rpm으로 유지하였다. 도금 거동 제어를 위해 유기첨가제인 polyethyleneimine(PEI)를 농도별로 첨가하여 그 영향을 비교 분석하였다. 도금 후 Cross Section Polisher(CP)를 이용하여 TSV 단면을 가공하였으며, 주사전자현미경(SEM)을 통해 via 내부 공극 형성 여부를 평가하였다. 또한 Linear Sweep Voltammetry(LSV) 및 Cyclic Voltammetry(CV)를 수행하여 PEI 농도에 따른 전기화학적 거동 변화를 분석하였다. 그 결과, 최적 농도의 PEI 조건에서 via 내부의 무결함 Ni 충전이 성공적으로 구현되었다. 본 연구는 Ni의 물성에 기반한 TSV 충전 가능성을 실험적으로 제시하며, 유기첨가제 농도 제어를 통한 도금 거동 조절이 TSV 기반 3D 집적 소자의 구조적·전기적 신뢰성 향상에 효과적인 전략이 될 수 있음을 기대한다.

**[P22-4]**

**스퍼터링 공정을 이용한 Cr-Al-N/SiOx 나노복합구조 코팅의 기계적, 구조적 특성 분석에 관한 연구:** 최성보\*, 이범무, 박인욱, 김왕렬(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 내산화, 절삭공구, 열적안정성, 스퍼터링, PVD

본 연구에서는 마그네트론 스퍼터링(Magnetron Sputtering) 공정을 이용하여 합성된 Cr-Al-N/SiOx 나노복합구조 코팅의 미세 구조적 특징과 고온 환경에서의 열적 안정성 및 내산화 특성을 고찰하였다. 스퍼터링 공정 기술은 고밀도 플라즈마를 활용한 우수한 밀착력과 고경도 박막 제조가 가능하여 절삭공구 및 내마모 부품 산업의 제조 기술로 자리 잡았다. 특히, 코팅막의 수명 연장을 위한 핵심 과제인 열적 안정성과 내산화성을 확보하기 위해 결정립계(Grain boundary) 내 비정질상의 형성을 도모하고 상부 산화물 코팅을 형성하여 그 영향을 분석하였다. 내산화성 측면에서, 스퍼터링으로 제조된 치밀한 Cr-Al-N/SiOx 코팅은 산화 초기 단계에서 표면에 연속적이고 견고한 Cr2O3 및 Al2O3 보호층을 형성한다. 특히, 결정립계를 구성하는 비정질 SiOx 상은 고온 노출 시 원자의 이동을 억제하는 확산 장벽(Diffusion barrier)으로 작용하여, 나노 결정립의 성장을 차단하고 미세구조를

안정화하는 효과를 나타낸다. 실험 결과, Cr-Al-N/SiO<sub>x</sub> 시스템은 실리콘 산화물에 의한 추가적인 산소 확산 억제층을 형성함으로써 1,000도 이상의 고온에서도 우수한 내산화 특성을 유지하였다. 이는 기존 Cr-Al-N 시스템의 고경도 특성을 유지하고, 더불어 실리콘계 비정질상의 확산 방지 효과가 복합적으로 작용하여 코팅의 열적 수명을 향상시킨 결과로 해석된다. 결론적으로, 본 연구에서 제안하는 Cr-Al-N/SiO<sub>x</sub> 코팅 기술은 차세대 고속 가공 및 가혹한 산화 환경에 노출되는 절삭공구 응용에 효과적일 것으로 볼 수 있다.

#### [P22-5]

**Ni-Cr-Mo계 합금 전해연마에서 전해액 조성 최적화와 표면 품질 지배 인자 분석:** 양현석, 정우철, 최광수, 공만식\*(고등기술연구원)

**Keywords:** 전해연마, Ni-Cr-Mo계 합금, 전해액 조성, 표면조도(Ra), 전해액 오염(Fe, Cu)

Ni-Cr-Mo계 합금은 반도체 공정용 초고순도 가스 유로 부품에 적용이 확대되고 있으나, 공정 신뢰성을 위해 극정정·초평탄 표면 확보가 필수적이다. 본 연구는 Ni-Cr-Mo계 합금의 전해연마에서 전해액 조성이 표면조도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 인산-황산-물(H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O) 혼합 전해액을 6:3:1에서 8:1:1까지 5수준으로 변화시키고, 50 °C에서 3.5 V 정전위로 20 분 전해연마를 수행하였다. 공초점 현미경으로 표면조도(Ra)를 측정하고, 전해연마 후 전해액의 전도도·pH를 측정했으며, ICP-OES로 Ni, Cr, Mo, Fe, Cu 용출 거동을 분석하였다. 그 결과, 모든 조성에서 반도체용 표면 기준(Ra ≤ 0.15 μm)을 만족하였고, 7:2:1 조성에서 최저 Ra(0.069 μm)와 우수한 재현성이 확보되었다. 표면 관찰에서는 7:2:1에서 기포 흔적이 최소화되고 균일 용해가 확인된 반면, 황산 비율이 높은 6:3:1에서는 비균일 용해 및 얼룩이, 황산이 낮은 8:1:1에서는 미세 요철과 불균일 용해 흔적이 증가하였다. 무게감량은 0.266~0.327 g 범위였으며, 표면조도는 단순 용해량보다 용해의 균일성에 의해 좌우되었다. 전해액 전도도(205~219 mS/cm)는 표면조도와 강한 음의 상관관계(r = -0.88)를 보였고, pH(약 -1.7~-1.1)는 표면 품질과 직접적 연관성이 제한적이었다. ICP 분석에서는 Ni와 Cr이 주요 용출 원소로 표면 평탄화에 기여했으며, Fe 및 Cu 검출은 각각 지그 및 상대전극(구리판)에서 기인한 오염 가능성을 확인하여 공정 안정성 관점에서 전해 시스템(지그/전극) 재질 선정과 전해액 오염 관리가 중요하다. 종합적으로 7:2:1 조성은 인산의 점성막 형성과 황산의 전도도 제공이 균형을 이루어 결함 없는 표면을 구현하는 최적 조건으로 판단된다. [Acknowledgment] 본 연구는 2024년도 산업통산자원부 및 한국산업기술기술평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00431424)

#### [P22-6]

**V 및 Si 첨가가 Ti-Al/Cr-Al 기반 다층 나노 복합 코팅막의 미세조직과 자가윤활 특성에 미치는 영향:** 허성보\*, 박인욱(한국생산기술연구원), 이학철(화신볼트산업), 김왕렬(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 내마모, 자가윤활, 미세구조, 금형, 표면처리

가혹한 절삭 및 성형 환경에서 금형의 수명을 결정짓는 핵심 요소는 고온 경도와 저마찰 특성의 동시 확보이다. 기존 연구에서는 Si 첨가를 통해 결정립 미세화 및 고경도화를 달성하였으나, 고온 환경에서의 마찰 제어에는 한계가 있었다. 본 연구에서는 Magnéli phase 형성을 유도하는 바나듐(V)을 Ti-Al 및 Cr-Al 기반 코팅 시스템에 도입하여, 층상 구조 제어에 따른 기계적 물성 변화와 자가윤활(Self-lubricating) 메커니즘을 규명하고자 한다. PVD(Physical Vapor Deposition) 공정을 이용하여 Ti-Al-V-N 및 Cr-Al-V-N 코팅막을 증착하였다. 특히 단일층(Monolayer) 코팅의 취성을 극복하고 응력 집중을 완화하기 위해 기저층과 중간층이 포함된 멀티레이어(Multi-layer) 구조를 설계하였다. V 첨가량에 따른 코팅막의 결정 구조와 미세조직을 XRD 및 TEM으로 분석하였으며, 나노 인덴테이션 및 고온 마찰 시험(High-temperature Ball-on-disk)을 통해 기계적 특성과 윤활 거동의 상관관계를 고찰하였다. 연구결과, V의 첨가는 코팅막 내에서 고온 산화 시 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 및 V<sub>x</sub>O<sub>x</sub> 형태의 Magnéli phase 형성을 촉진하였다. 해당 상은 결정학적 전단면(Crystallographic shear planes)을 따라 낮은 전단 응력에서도 슬라이딩이 용이한 반데르발스 결합 특성을 나타내어 마찰 계수를 획기적으로 낮추는 효과를 보였다. Ti-Al 기반 코팅은 고경도 확보를 통해 내마모성을 유지한 반면, Cr-Al 기반 코팅은 V 산화물과의 시너지 효과를 통해 극대화된 고온윤활성을 나타내었다. 또한, 멀티레이어 계면은 균열의 수직 성장을 억제하고 응력을 분산시킴으로써 단일층 대비 우수한 파괴 인성과 금형 내구성을 확보할 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 통해 V 첨가에 의한 자가윤활 메커니즘과 멀티레이어 설계가 코팅막의 기계적 신뢰성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였으며 고부하 환경용 차세대 고기능성 코팅 응용 분야에 효과적일 것으로 판단된다.

#### [P22-7]

**A Study on the Development of Zinc Flake Pigments for Fe-based Corrosion Protection Via Wet Ball Milling Method:**

Seong ho Hwang, Sang Soo Shin\*(오성테크), Sang yong Shin(울산대학교)

**Keywords:** Zn-flake, wet ball milling, corrosion resistance, average particle size

In this examines, the study on manufacturing zinc flakes by a wet method using a horizontal ball mill was conducted. As the milling time and milling speed increased, flake formation was clearly progressed. The variations in the thickness and shape of the zinc flakes were observed by SEM, and the average particle size was observed using a particle size analyzer. As the milling speed and time increased, the average thickness decreased significantly, and the average particle size increased remarkably, showing the sizes of 0.5 under and 18 μm, respectively. In the case of the corrosion test, it was also confirmed that the salt spray test and the immersion test showed high corrosion resistance as flake formation progressed. Therefore, from these experimental results, the optimal conditions for zinc flake development via the wet method using a horizontal ball mill were considered.

**[P22-8]**

Residual Stress Evolution in CFRP–Zn Bond Coat–Ceramic Top Coat Thermal Spray Coatings: Eui Pyo Kwon\*, Seungmin Song(Korea Institute of Industrial Technology), Jongkweon Lee(Sewon Hardfacing CO., Ltd)

**Keywords:** thermal spray coating, CFRP, residual stress

To improve the wear resistance of CFRP components, various metallic and ceramic thermal spray coatings have been extensively investigated. In this study, a multilayer metal/ceramic coating system (CFRP–Zn bond coat–ceramic top coat) was developed using arc spray and plasma spray processes to enhance the interfacial bonding strength between the substrate and the coating layers. During the thermal spray process, high-temperature molten particles are deposited onto the substrate surface. The subsequent heating and cooling cycles induce differential expansion and contraction between the substrate and coating layers due to mismatches in their coefficients of thermal expansion, leading to the formation of residual stresses. These residual stresses significantly influence the interfacial bonding strength and overall reliability of the coating system. Therefore, a quantitative evaluation of residual stress evolution under different coating conditions is essential. In this study, thermomechanical simulations based on the finite element method (FEM) were performed to analyze thermal stress development. In addition, residual stresses were experimentally measured using X-ray diffraction (XRD) to investigate the magnitude of residual stresses in the top coating layer.

**[P22-9]**

Inhibition of Galvanic Corrosion between Copper and Gold on PCB Substrate Using a Cathodic Inhibitor: YeWon Han(KITECH, Hanyang Univ.), CheaHyun Jeong, SeKwon Oh\*(KITECH)

**Keywords:** PCB, Cu, galvanic corrosion, cathodic reaction, inhibitor

A printed circuit board (PCB) is an electronic board on which components are interconnected via copper wiring, and gold (Au) is plated on the copper (Cu) pads of the board to prevent metal oxidation and increase adhesion. However, during the surface treatment etching process, galvanic corrosion occurs due to the electrode potential difference between copper and gold ( $E^\circ(\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}) = +0.34 \text{ V}$ ,  $E^\circ(\text{Au}^+/\text{Au}) = +1.7 \text{ V}$ ), which can cause copper to be overused, which can lead to problems with the reliability of the component. To inhibit galvanic corrosion, this study aims to determine the optimal concentration to prevent excessive corrosion of copper by utilizing cathodic reaction inhibitors. The corrosion behavior of gold and copper in PCB etching solution was analyzed by polarization test, and the galvanic corrosion current between the two metals was verified by Zero Resistance Ammeter (ZRA) experiment. In addition, the corrosion inhibition effect was evaluated by the same experiment after adding a cathodic reaction inhibitor under different conditions. As a result, the condition with the best corrosion inhibition effect was derived, and a polarization test was conducted for single gold and copper under that condition. In the etching solution containing a 0.1M concentration of cathodic reaction inhibitor, the corrosion potential ( $E_{\text{corr}}$ ) of gold (Au) decreased from 100mV to 63mV, a nearly 0.63-fold decrease. The corrosion current density ( $i_{\text{corr}}$ ) decreased from  $1.45 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$  to  $0.50 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ , a nearly 0.34-fold decrease. For copper (Cu), the corrosion potential ( $E_{\text{corr}}$ ) reduced from -0.5 mV to -44 mV, an approximate 88-times reduction. The corrosion current density ( $i_{\text{corr}}$ ) dropped from  $4.21 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$  to  $0.19 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ , an approximate 0.04-times reduction. In addition, SEM and AFM images were used to visually confirm the corrosion inhibition in the galvanic coupled state, and XRD analysis was conducted to observe the interaction with copper as the cathodic reaction inhibitor concentration varied.

**[P22-10]**

Study on the Influence of  $\text{Cl}^-$  and Acetic Acid Concentrations on the Corrosion Behavior of Al1070 in SWAAT Environments: OnYu Ha(Korea Institute of Industrial Technology, Sungkyunkwan University), Myeongjin Kim(Korea Institute of Industrial Technology, Hanyang University), Sekwon Oh\*(Korea Institute of Industrial Technology)

**Keywords:** Pitting Corrosion, Al1070, SWAAT, chloride ion, Acetic acid

This study evaluated the effects of chloride ion ( $\text{Cl}^-$ ) and acetic acid concentration on the pitting corrosion behavior of Al1070 under Sea Water Acetic Acid Test (SWAAT) conditions. Polarization test results showed that as the  $\text{Cl}^-$  concentration increased from 0 to 10 wt%, the corrosion potential ( $E_{\text{corr}}$ ) decreased from -0.65 V to -0.94 V, and the corrosion current density ( $i_{\text{corr}}$ ) increased from  $11.32 \mu\text{A/cm}^2$  to  $43.16 \mu\text{A/cm}^2$ . For acetic acid, it was confirmed that the pH decrease accompanying concentration increase (0-2000  $\mu\text{L/L}$ ) was a factor increasing  $i_{\text{corr}}$  from  $4.64 \mu\text{A/cm}^2$  to  $26.66 \mu\text{A/cm}^2$ . SEM and XCT analysis demonstrated that higher acetic acid concentrations quantitatively increased individual pitting growth, pitting density, and volume loss rate. In conclusion,  $\text{Cl}^-$  was identified as causing pitting corrosion by destroying the oxide film, while acetic acid accelerates localized corrosion by promoting the dissolution of Al1070 through the hydrogen evolution reaction (HER).

**[P22-11]**

저전류 G-EIS로 LSV 과전압을 추정하는 Zn 용융도금 기반 Raney Ni 전극의 임피던스-성능 상관관계: 김현안, 왕은찬, 최윤일\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 알칼라인 수전해, 레이니 니켈, 용융도금, 산소발생반응

최근 기후 위기 대응과 탄소중립 실현을 위해 수소 에너지로의 전환이 가속화되면서 전 세계 수전해 설비 용량은 MW 단위를

넘어 GW급으로 확대되고 있다. 이에 따라 핵심 부품인 촉매 전극의 대면적화가 필수적으로 요구된다. 그러나 대면적 전극은 공정의 미세 편차에 의해 위치별 성능 편차가 발생할 수 있어 일부 샘플링 기반 평가는 대표성 및 신뢰성 확보가 어렵다. 또한 실질 성능 지표인 LSV 기반 과전압은 전극 면적 증가에 따라 요구 전류가 급격히 커져 실험적 제약이 크다. 따라서 대면적 상태의 성능을 저부하 조건에서 예측할 수 있는 평가 기술이 필요하며, 특히 EIS로 과전압을 예측할 수 있다면 상용화 이후 품질관리 관점에서 강력한 도구가 될 수 있다. 본 연구에서는 공정이 단순하고 원가 절감에 유리하며 대면적 확장에 적합한 Zn 용융도금 기반 Raney Ni 촉매 전극을 개발하고, OCP 근처 저전류 조건에서의 임피던스 지표를 이용해 과전압을 예측하는 상관관계를 수립하였다. 40 mesh Ni 기판을 지지체로 사용하여 Zn-0.3Al(wt%) 합금 용융도금을 수행한 후 700 °C에서 열처리 시간(6, 10, 14, 20 min)을 변수로 하여 Zn-rich/Ni-rich 이상 미세구조를 형성하였다. 이후 10M KOH 용액에 24h 침지하여 Zn을 선택적으로 용출함으로써 다공성 Raney Ni 골격을 확보하였다. 제조된 촉매의 전기화학 특성은 30 wt% KOH 전해질에서 3-전극 셀로 평가하였다. G-EIS를 OCP 근처의 50 mA cm<sup>-2</sup> 조건에서 수행하고, 등가회로모델 Rs-(R1Q)-(R1Q)로 피팅하여 임피던스 파라미터를 도출하였다. 또한 LSV-OER 및 CV를 수행했으며, LSV 데이터는 50 mA cm<sup>-2</sup>에서의 R<sub>s</sub>를 이용해 iR 보정을 적용하였다. 열처리 시간에 따른 과전압 분석 결과 10 min 열처리 조건에서 100-800 mA cm<sup>-2</sup> 전 구간에 걸쳐 가장 낮은 과전압을 나타내 최적 활성을 보였다. 조직 분석 결과 10 min 조건에서 수직 기공이 발달하여 높은 비표면적을 확보한 것이 주요 원인으로 해석된다. 열처리 시간 변화에 따른 과전압은 V자 형태의 경향성을 보였으며, 이는 분극 저항 및 0.1 Hz에서의 임피던스 경향과 일치하였다. 임피던스 지표와 과전압 간 회귀 분석 결과 분극 저항과 과전압은 피어슨 상관계수의 절대값(|r|)이 0.85-0.91로 매우 강한 상관을 나타냈다. 이는 OCP 근처의 EIS 측정만으로도 과전압 성능을 유의미하게 예측할 수 있음을 시사하며, 향후 대면적 촉매 전극의 성능 평가 및 상용화 이후 QC 적용 가능성을 제시한다.

#### [P22-12]

**용사 클래딩된 용융염 원자로 재료의 부식 저항성 평가:** 윤지현\*, 김채원(한국원자력연구원), 이원찬, 김정환(국립한밭대학교)  
**Keywords:** 용융염 원자로, 구조재료, Type 316H 스테인리스강, 용사, Ni, 인코넬 625

용융염 원자로 (Molten Salt Reactor, MSR) 는 고온에서 높은 열효율과 우수한 안전성을 발휘하는 차세대 원자력 시스템으로, 그 주요 구조재는 약 650°C의 부식성 용융염 환경에서 장기간 운전되어야 하므로 용융염에 대한 내식성 확보가 핵심 기술 과제이다. 현재 MSR 구조재 후보로 유력한 Type 316H 오스테나이트계 스테인리스강은 고온 기계적 특성은 우수하나, 용융염 환경에서 합금 성분인 크롬 (Cr) 등의 선택적 용출로 인해 부식이 진행되는 문제가 확인되었다. 본 연구에서는 내식성이 우수한 순수 니켈 (Ni-200/201) 및 인코넬 (Inconel) 625 클래딩을 Type 316H 스테인리스강 표면에 고속 화염 용사 (High Velocity Oxygen Fuel, HVOF) 방식으로 적용하고, 고온 용융염 환경에서의 내식 성능을 정량적 및 미세조직적으로 평가함으로써 MSR 구조재의 장기 안정성 확보를 위한 기초 자료를 마련하는 것을 목적으로 하였다. 실험은 Type 316H 스테인리스강 시험편에 Ni-201 및 Inconel 625 분말을 약 300 μm 두께로 HVOF 클래딩하여 진행되었으며, 클래딩된 시험편과 무클래딩 시험편을 650°C의 염화물계 혼합 용융염 (57 mol% NaCl - 43 mol% MgCl<sub>2</sub>) 에 100시간 및 700시간 동안 침지하는 부식 시험을 실시하였다. 단기 시험인 100시간 침지 결과, 무클래딩 Type 316H의 부식 속도가 약 1 mm/yr였던 데 반해, 인코넬 625 클래딩은 약 0.18 mm/yr, 순 Ni 클래딩은 거의 무게 변화가 없어 단기적으로 클래딩이 부식 저항성 측면에서 매우 우수함을 확인했다. 그러나 700시간 장기 침지 시험에서는 순 Ni 클래딩 시험편의 부식 속도가 약 0.68 mm/yr로, 무클래딩 시험편 (약 1.2 mm/yr) 대비 느리지만 상당한 부식이 진행되었음을 발견했다. 미세분석 결과, 무클래딩 Type 316H에서 심각한 입계부식이 관찰되었으며, Ni 클래딩층 자체는 우수한 내식성을 보였으나, HVOF 용사 공정의 특성상 클래딩층 내부에 형성된 다수의 공극 (void) 및 클래딩층과 모재 계면의 불완전한 밀착성이 용융염의 침투 경로를 제공하여 모재인 Type 316H에 국부적인 부식을 유발했음이 확인되었다.

**[P23-1]**

**인공지능 기반 7xxx계 알루미늄 합금 탐색 기법 설계:** 석왕록, 안영조, 이해인, 최윤석\*(부산대학교), 김수현, 천현석(한국재료연구원)  
*Keywords:* 7xxx 알루미늄 합금, 원자단위 물성, 머신러닝, UTS 예측, 순방향 모델, SHAP Analysis

알루미늄은 경량성과 우수한 내부식성을 갖는 금속으로, 무게 절감이 요구되는 항공우주 분야와 부식환경에 노출되는 해양 산업에서 널리 사용된다. 알루미늄 합금은 용도에 따라서 2000계열부터 7000계열까지 구분되며, 이 중 7000계열은 가장 높은 강도를 내어 항공우주 구조재로 널리 활용된다. 최근 드론 및 무인기 산업등의 확대에 의해 항공우주용 고강도 경량 합금 설계에 대한 요구가 증가하고 있다. 본 연구에서는 조성 기반 데이터를 원자 단위 물성으로 변환하여 7xxx계열 알루미늄 합금을 UTS(MPa)를 예측하는 머신러닝 모델을 구축하였다. 이를 통해 단순 조성 기반 접근을 넘어, 원자 단위 측면에서 알루미늄 합금을 예측을 수행함으로써 해석 영역을 확장을 시도하였다. 연구는 다음과 같이 진행되었다. 문헌 조사를 통해 데이터를 수집한 후, 수집된 데이터에 대해 군집 분석을 수행하여, 조성 특성이 유사한 그룹을 분류하고, 학습 데이터에 대한 대표성을 확보하였다. 이후 조성을 원자 단위 물성으로 변환하여 7xxx계열 알루미늄 합금을 예측하는 모델을 설계하였다. 해당 모델을 이용하여, 학습에 노출되지 않은 실험 데이터를 이용하여 검증을 수행하였다. SHAP value 분석을 통해 모델 예측에 주요하게 기여하는 원자 단위 물성을 도출하였으며, 이는 기존의 단순 조성 기반 해석을 넘어 원자 단위 측면에서 7xxx계열 알루미늄 합금이 경량성을 확인할 수 있었다.

**[P23-2]**

**A Comparative Study of Machine Learning Approaches for Predicting MAX Phase Exfoliation Energy:** JANGHWAN CHOI, EUGENE JANG, CHANGWOOK JEONG\*(UNIST)

*Keywords:* MXene, MAX phases, Exfoliation energy, Machine Learning, CGCNN

Two-dimensional MXenes are synthesized by selectively etching the 'A' layer from parent MAX phases ( $M_{n+1}AX_n$ ), a process fundamentally governed by the chemical exfoliation energy. While Density Functional Theory (DFT) is standard for calculating this energy, its computational cost limits high-throughput screening. To accelerate materials discovery, we developed a machine learning framework to rapidly and accurately predict the chemical exfoliation energy of MAX phases. Using a comprehensive dataset of 3,018 ternary and quaternary MAX phases calculated via DFT, we trained a Crystal Graph Convolutional Neural Network (CGCNN). By representing atoms as nodes and bonds as edges, CGCNN learns directly from the crystal structure, bypassing manual feature engineering. The CGCNN model demonstrated superior predictive accuracy (MAE of 0.0064 eV/Å<sup>2</sup>, R<sup>2</sup> of 0.9383), significantly outperforming the best feature-based Ensemble Trees model. Furthermore, CGCNN exhibited exceptional extrapolation capabilities, maintaining high accuracy (MAE 0.0080 eV/Å<sup>2</sup>, R<sup>2</sup> 0.8811) when predicting unseen quaternary systems after training exclusively on ternary phases. These findings highlight the CGCNN as a robust, cost-effective screening tool to explore the vast chemical space of MAX phases, accelerating the discovery of novel MXenes.

**[P23-3]**

**인공지능을 이용한 파단면 분류 및 자동 보고서 생성 모델에 관한 연구:** 진훈, 이지혁(동아대학교), 김수환(동아대학교, 한국재료연구원), 김은아, 백재영, 장재훈(동아대학교), 박이호, 양원준(한국재료연구원), 이학성\*(동아대학교)

*Keywords:* 파단면 분석, 파괴기구, CNN, LLM

기존의 파단면 분석은 연구원의 경험과 현미경 관찰에 전적으로 의존하기 때문에 장시간이 소요되며, 평가자 및 장비에 따른 결과 편차가 발생한다. 손상 원인 규명 가속화를 위해 인공지능(AI)을 활용한 미세 형상의 정밀 구분 및 객관적 데이터 표준화 모델을 요구하고 있다. 본 발표에서는 인공지능(CNN)과 대형 언어 모델(LLM)을 융합한 파단면 분석 및 자동 보고서 생성 모델을 구현하고자 한다. 본 발표에서는 4대 파괴 기구인 벽개 파괴(Cleavage), 연성 파괴(Ductile), 피로 파괴(Fatigue), 입계 파괴(Intergranular)를 정의하고, 데이터 증강 기법을 통해 총 40,000장 이상의 이미지를 확보하였다. 특히, CNN 모델 학습 시 패치(Patch) 사이즈에 따라 분석 성능이 크게 변화하는 것을 확인하였다. 32x32 px와 64x64 px 해상도에서는 각각 57%, 62%의 성능을 보인 반면, 파단면 분석의 핵심인 미세 형상(Micro-feature)이 보존되는 128x128 px 패치 기반 학습에서는 90%의 가장 높은 분류 성능을 나타냈다. 해당 모델은 연성 파괴 98.7%, 입계 파괴 95.3%, 피로 파괴 88.6%, 벽개 파괴 80.3%의 정확도를 달성하였다. 단순한 시각 정보 판독(Vision AI)을 넘어, 실제 현장 데이터에서 4개의 파괴 기구가 혼합 및 공존할 수 있는 모호성에 대해 도메인 지식 기반의 추론을 수행하는 과정을 살펴보고자 한다. 생성형 AI(Local LLM)를 결합한 종합 추론 시스템은 사용자가 합금명과 공정 조건 등의 텍스트 데이터와 파단면 이미지를 입력하면, 시각적 분할 결과와 LLM의 지식 경로를 융합하여 파단 발생 원인을 종합적으로 규명한다. 현재 개발 모델은 Flask 서버 기반의 웹 실시간 시각화 시스템으로 구축 완료되었으며, 향후 데이터베이스 연동을 통한 자동 라벨링 및 장비와의 실시간 API 연동 파이프라인으로 확장할 계획이다.

**[P23-4]**

**온프레미스 환경에서의 LLM 기반 표 데이터 추출 자동화 및 프롬프트 자기개선 연구:** 원예지, 박세진(국민대학교), 송영범, 김대웅(국방과학연구소), 조기섭\*(국민대학교)

**Keywords:** On-premises LLM, Data Extraction, Prompt Refinement Loop, Automated Evaluation

최근 LLM(Large Language Model) 기술의 발전으로 문서 정보를 구조화하여 데이터로 활용하려는 수요가 증가하고 있다. 그러나 표 데이터는 셀 경계 인식, 병합 셀 처리 등 복잡한 레이아웃 요소에 매우 민감하여, 행·열의 혼동이나 데이터 누락과 같은 구조적 오류가 빈번하게 발생한다. 특히 프롬프트에 따라 출력이 달라지는 비결정성 문제는 전체 데이터 파이프라인의 신뢰도를 저하시키는 핵심 요인이다. 클라우드 기반 API 방식은 적용이 빠르지만, 높은 호출 비용과 사용 제약으로 인해 최적의 성능을 도출하기 위한 반복 최적화가 어렵다. 또한 보안과 데이터 거버넌스가 엄격한 환경에서는 내부 데이터를 외부망으로 전송해야 하는 클라우드 방식의 도입 자체가 불가능한 경우가 많아 기술적 대안이 절실한 실정이다. 본 연구는 이러한 제약을 해결하기 위해 보안성이 확보된 온프레미스 환경에서 LLM을 운용하며, 정답지 기반 자동 평가로 프롬프트를 스스로 정교화하는 자기 개선 루프형 최적화 체계를 제안하고자 한다. 이러한 방식은 기존 클라우드 기반 LLM 사용의 단점을 극복하며, 별도의 추가 비용 없이도 반복 추출과 프롬프트 고도화를 가능하게 한다. 특히 제안된 기술은 지속적인 피드백 과정을 통해 실무 운영이 가능한 수준의 높은 정확도와 데이터 안정성을 달성할 수 있다는 점에서 실용성이 높을 것으로 기대된다.

**[P23-5]**

**대규모 언어 모델을 활용한 페로브스카이트 태양전지 물성 파라미터 추출 및 데이터 분석:** 신은하, 홍기하\*(국립한밭대학교)

**Keywords:**

페로브스카이트 태양전지는 높은 광전 변환 효율을 바탕으로 차세대 태양전지로 주목받고 있다. 고효율 태양전지 소자를 구현하기 위해서는 최적의 모듈 구조 및 소자 설계가 요구되며, 이를 위해 태양전지 소자 시뮬레이션은 실험 대비 시간과 비용을 절감할 수 있는 효과적인 방법으로 활용되고 있다. 태양전지 소자 시뮬레이션은 물질별 물성 파라미터가 필요하며, 이는 시뮬레이션 결과에 직접적인 영향을 미친다. 그러나 표준화된 물성 파라미터 데이터 베이스가 부재하여 연구자들은 기존 문헌에 의존해 수작업으로 데이터를 수집해야 한다. 이 과정은 많은 시간이 소요될 뿐 아니라, 연구 간 보고 편차로 인해 신뢰성이 충분히 확보되지 않은 파라미터가 활용될 가능성이 존재한다. 대규모 언어 모델(LLM)은 방대한 양의 문헌으로부터 필요한 정보를 신속하게 추출할 수 있지만 문헌마다 사용하는 파라미터 명, 단위, 표의 형식이 달라 LLM만으로 추출하는 데 어려움이 있다. 본 연구에서는 OCR과 레이아웃 분석을 활용하여 문헌 내 표 데이터를 상대적으로 LLM이 처리하기 용이한 구조화된 마크업 형태로 변형하고 이를 LLM을 통해 구조화된 데이터로 변환하는 문헌 처리 파이프라인 기반 프레임워크를 구축하였다. 제안된 프레임워크는 비정형 표 데이터를 정규화된 형식으로 변환하고, 물성 파라미터를 일관된 기준에 따라 추출한다. 또한, Z-score 기반 이상치 제거 과정을 통해 연구 간 보고 편차를 줄인 신뢰성 있는 데이터셋을 구축하였다. 정제된 데이터셋을 기반으로 UI를 만들어 선택된 전자수송층, 흡수층, 정공수송층 물질의 band alignment와 물성 파라미터를 시각화하여 제공한다. 제안된 프레임워크는 파라미터 탐색과 소자 구조 설계에 소요되는 시간을 단축하고, 페로브스카이트 태양전지 소자 시뮬레이션의 신뢰성과 설계 효율성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

**[P23-6]**

**고특성  $\alpha+\beta$  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 날이 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.

**[P23-7]**

**KAN-QEq: An Interpretable and Parameter-Efficient Charge Equilibration Model for Long-Range Electrostatic Interactions in MLIPs:** Junsoo Lee, Hyungjun Kim\*(Korea Institute of Science and Technology)

**Keywords:** Machine Learning Interatomic Potentials (MLIPs), Charge Equilibration (QEq), Electrostatic Interactions, Interpretability

Machine learning interatomic potentials (MLIPs) have revolutionized atomistic simulations by offering ab initio accuracy at a fraction of the computational cost. However, conventional MLIPs often fail to capture long-range electrostatic interactions due to their reliance on local cutoff environments. While charge equilibration (QEq) schemes have been introduced to address this, existing machine learning approaches frequently suffer from a lack of physical interpretability (black-box nature) or high computational overhead. To overcome

these challenges, we present KAN-QEq, a novel charge prediction architecture that integrates Kolmogorov-Arnold Networks (KANs) into the QEq formalism. Unlike traditional Multi-Layer Perceptrons (MLPs), our model utilizes KANs to dynamically predict atomic electronegativity and atomic hardness based on local chemical environments. This architecture provides a physically interpretable functional form, mitigating the opacity of standard neural networks. A distinct advantage of our approach is the ability to learn electrostatic interactions and charge redistribution end-to-end using only potential energy and force data, without requiring charge labels often from quantum mechanics calculations. Furthermore, KAN-QEq achieves high accuracy with significantly fewer parameters compared to the baseline MLIP. We demonstrate that integrating KAN-QEq with baseline MLIPs significantly improves prediction accuracy across various datasets, offering a robust and transparent solution for modeling complex materials systems.

#### [P23-8]

Dataset strategies for transfer learning based machine learning potentials: Structural optimization of high entropy Na<sub>3</sub>V<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> cathodes: Wonjun Choi, Sanghyeon Park(KAIST), Chan-Woo Lee\*(Dongguk University), Jong Min Yuk\*(KAIST)

**Keywords:** 인공지능, 이차전지, 양극재, NASICON, 소듐이온배터리

Na<sub>3</sub>V<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (NVP) is a promising cathode material for next-generation sodium-ion batteries (SIBs) due to its excellent structural stability and fast sodium ion diffusion. To precisely understand its structural stability and electrochemical behavior, it is essential to accurately evaluate thermodynamic energy changes as a function of sodiation state. Density Functional Theory (DFT) is a well-established method for reliably calculating total energies and atomic forces. However, its high computational cost imposes practical limitations on large-scale explorations of diverse compositions and structures. Recently, machine learning potentials (MLPs) have emerged as a powerful alternative to conventional DFT calculations, achieving near-DFT accuracy while significantly reducing computational cost by learning the potential energy surface (PES) from DFT-generated data. In particular, transfer learning has proven to be an effective strategy for attaining high predictive performance even with limited datasets for a specific material system. Previous MLP studies have primarily focused on molecular dynamics (MD) simulations. Consequently, transfer learning datasets are often constructed from dynamic structural configurations obtained through ab initio molecular dynamics (AIMD) simulations. Such AIMD-derived data naturally span a broad energy landscape, including thermally perturbed structures. However, because machine learning potentials excel at interpolation rather than extrapolation, accurately reproducing the local energy landscape near optimized structures is particularly important for reliable structure optimization. Therefore, this study systematically compared two distinct data generation strategies while strictly controlling other variables. First, we constructed an AIMD-based dynamic dataset and a dataset derived from geometry optimization calculations. Both datasets were generated from well-converged calculations performed on the same initial high-entropy NVP configuration, ensuring that differences arise solely from the data generation strategy. Each dataset consisted of 5,000 structures and their corresponding energies. Subsequently, independent MLP models were trained via transfer learning using each dataset. Finally, a comprehensive comparative evaluation was conducted across multiple metrics, including energy prediction accuracy and structure optimization performance, enabling a systematic investigation of how data generation strategies influence the reliability of MLP-driven structure optimization. This study aims to identify data generation strategies better suited for structural optimization using MLPs through a systematic comparison of MD-based and relaxation-based datasets. The results provide practical guidance for dataset design tailored to specific computational objectives when applying MLPs to battery electrode materials, thereby enabling efficient structural exploration and thermodynamic stability assessment.

#### [P23-9]

기계학습을 활용한 경량철강의 기계적 성질에 대한 데이터 기반 예측: 홍영오(한국재료연구원, 부산대학교), 박성준\*, 박형권, 유지성(한국재료연구원), 최윤석\*(부산대학교)

**Keywords:** 경량철강, 머신러닝, Random Forest

최근 탄소 배출 저감이 전 산업의 핵심 과제로 부상함에 따라, 수송 기기 측면에서는 연비 향상을 통한 에너지 효율 극대화를 위해 소재의 경량화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 철강 재료에서는 알루미늄(Al), 망간(Mn) 등을 첨가하여 밀도를 낮춘 경량 철강(Lightweight steel)에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 또한, 재료공학 연구 분야에서 기존에는 시행착오(Trial and error) 방식에 의존하였지만, 기술의 발전에 따라 기계학습을 활용하여 시간과 비용을 절감하는 연구 방법이 도입되고 있다. 본 연구의 목적은 데이터 기반의 기계학습을 경량 철강 연구에 적용하여 합금 조성 설계와 열처리 공정 최적화 과정의 가속화를 위한 기초를 다짐에 있다. 본 연구를 위해서 다양한 합금 조성과 열처리 조건 및 특성 데이터를 기계 학습 모델로 학습함으로써, 다양한 합금 원소와 열처리 공정 변수가 최종 물성에 미치는 비선형적인 영향을 예측할 수 있는 모델의 구축을 시도하였다. 데이터셋에서 주요 합금 원소(C, Mn, Al 등)의 함량과 열처리 공정 변수(시효 온도, 시간, 열간 압연 온도 등)를 입력 변수로 구성하고, 항복 강도, 인장 강도, 연신율 등의 기계적 물성을 출력 변수로 구성하였다. 이러한 데이터를 학습하기 위해 모델 선정, 변수 제거, 학습 등의 과정을 거쳐 과적합을 방지하고 예측의 신뢰성을 확보하기 위해 노력하였다. 결과적으로 랜덤 포레스트(Random Forest)를 주요 모델로 사용하였고 0.7~0.8 이상의 결정 계수(R<sup>2</sup>)를 달성하였다. 본 연구를 바탕으로 향후 경량 철강 소재 설계의 효율을 높여 탄소 중립에 기여할 것을 기대한다.



**[P23-10]**

Hierarchical Partitioning and Stratified Sampling of PubChem-Scale Chemical Space for Bias-Controlled Training Data in Molecular Design: Youngho Sihm\*, Hyunwoo Seong, Min Ku Jeon, Sung-Wook Kim, Sungjune Sohn, Chan Woo Park(Korea Atomic Energy Research Institute)

**Keywords:** Hierarchical Partitioning, Stratified Sampling, PubChem-scale Chemical Space, Bias-controlled Training Data, Molecular Design

Designing molecules with machine learning (ML) is frequently limited not by model architecture but by how labeled training data are constructed. When labels are expensive (e.g., high-fidelity experiments or quantum calculations), naive random labeling tends to over-sample “head” regions of chemical space (popular scaffolds and synthetically convenient chemotypes) while under-representing rare but potentially high-impact structures. This induces hidden sampling bias, degrades out-of-distribution (OOD) generalization, and makes model-driven molecular design less reliable. Here, we present a PubChem-scale strategy to make chemical-space bias measurable and controllable during dataset construction for ML toward molecular design. We define PubChem (~130 million registered compounds) as an unlabeled chemical space (the population) and construct a multi-stage, reproducible partitioning scheme that separates “boundary-making” classification from “within-bucket governance.” Partition boundaries are created by a four-level hierarchy: (1) ring vs. acyclic, (2) a genericized framework-level scaffold (rule-fixed coarse core), (3) Bemis–Murcko scaffold, and (4) ECFP-based subclustering within scaffold families. This hierarchy yields interpretable buckets that capture both long-range structural diversity (scaffold-level) and intra-scaffold substituent variability (fingerprint-level). Importantly, 2D descriptors are not used to create additional class boundaries. Instead, RDKit and Mordred 2D descriptors constitute a governance layer applied within each bucket to (i) define stratification axes (e.g., MW, TPSA, HBD/HBA, rotatable bonds, formal charge class), (ii) improve representative selection to cover physicochemical subregions, and (iii) audit sampling bias quantitatively. To allocate a limited labeling budget, we employ a two-track sampling policy: a distribution-preserving track assigns quotas proportional to bucket frequency to maintain population realism, while a coverage-maximizing track enforces minimum quotas for rare scaffolds and low-density regions. Within each bucket, stratified quotas are further distributed across descriptor-derived strata, and candidates are selected using diversity-aware criteria in fingerprint space (e.g., greedy farthest-point or k-center-like selection) with descriptor-based corrections to avoid physicochemical collapse. Bias is monitored by comparing population vs. labeled-set distributions and scaffold frequency shifts, supplemented by OOD evaluations using scaffold-level holdouts. This framework provides a practical, scalable route from unlabeled PubChem chemical space to labeled datasets with explicit bias control, enabling more reliable ML models and more defensible downstream molecular design campaigns under severe labeling constraints.

**[P24-1]**

Dissolution of Diamond in Molten La, and Ce flux: SUDIPTA BAG(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), GUPTA Vijay, LEE Sun Hwa(Institute for Basic Science (IBS)), SULTANGAZIYEV Alisher, JEON Dongho(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), KIM Sunghwan, KUNDU Anirban, SEONG Won Kyung(Institute for Basic Science (IBS)), RUOFF Rodney S. \*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST)

**Keywords:** Rare earth metals, Carbon solubility

We are studying the dissolution (or partial dissolution) of single crystal polyhedral diamond particles (SCDP), and of single crystal diamond (SCD) flats in molten flux (pure La or pure Ce). Ce melts at 798 °C and La at 918 °C and each dissolves 25 at% C at 920 °C<sup>1,2</sup>. We are exploring the dissolution rates of different crystal facets of SCDPs and SCD flats as a function of temperature and particle placement in the liquid metal system. Following rapid cooling of the molten La-C system, we use scanning electron and optical microscopy (SEM and OM), AFM, and Raman spectroscopy, among others, to analyze the dissolution phenomenon. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1). References: 1. Massalski, T. B., Ed. Binary Alloy Phase Diagrams, 2nd ed.; ASM International: Metals Park, Ohio, 1990; p 834. 2. Massalski, T. B.; Okamoto, H.; Subramanian, P. R.; Kacprzak, L., Eds. Binary Alloy Phase Diagrams, 2nd ed.; ASM International: Metals Park, Ohio, 1990; p 856.

**[P24-2]**

Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Polymer 복합 분말 정전 코팅기술 개발을 통한 건식 캐스크 저장 시스템에서의 중성자 차폐율 향상: 김수현, 박준호(옵니코트), 양유진, 염화성\*(포항공과대학교), 전영도\*, 박순홍\*(옵니코트)

**Keywords:** Neutron Cross Section, Dry Cask Storage System, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Polymer Coating, MCNP

원자로 노심(Nuclear reactor)에서 제거된 사용후 핵연료를 상용 저장하는 방법에는 크게 사용후 핵연료 저장고(Spent fuel pool) 및 건식 캐스크 저장 방법(Dry cask storage)이 있다. 본 연구는 사용 후 핵연료 건식 저장 시스템인 건식 캐스크 저장 방법의 중성자 차폐 성능을 향상시키기 위하여, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Polymer 복합 코팅을 개발하고 AISI 304 강판에 정전 코팅하였으며, 중성자 차폐 특성을 MCNP(Monte Carlo N-Particle) 시뮬레이션 및 실험적으로 평가하였다. 시뮬레이션 Cask의 형상은 KORAD-21 Design 형상으로 계산하였으며, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-polymer 코팅에서 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량을 50 wt.%, 70 wt.%, 90 wt.%, 90 wt.% 이상에서, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 따른 단면적 중성자 흡수율을 계산하였다. 그 결과, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 농도가 증가함에 따라 거시적 중성자 단면적이 크게 증가하였으며, 85 wt.% 이상에서는 기존 B<sub>4</sub>C/Al 복합 흡수재 대비 약 70배 높은 값을 나타내어 동일 차폐 성능을 훨씬 얇은 두께로 구현할 수 있음을 확인하였다. 실험적으로는 AISI304 강판 위에 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Polyester 분말을, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량에 따라 혼합하여 정전도장 방식으로 코팅하였으며, OM 및 SEM을 통하여 전체적인 코팅의 형상 및 단면에서 코팅층의 두께, 미세조직을 관측하였다. 또한 XRD 분석을 통해 상분석을 진행하였다. Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 높을수록 코팅의 기공률이 감소하고 박리(Delamination) 현상이 줄어들어 구조적 안정성이 향상되는 경향을 보였다. 특히 90wt.% 이상의 조건에서 코팅의 건전성이 가장 우수하게 나타났음을 확인하였다.

**[P24-3]**

Enhancement of wear resistance in AlCrN-coated SKH55 punches via nitrogen-ion hot implantation for automobile brake hydraulic piston manufacturing: CHAN YOUNG LEE\*, Jun Mok Ha, Sunmog Yeo(KAERI)

**Keywords:** AlCrN coating, Nitrogen-ion hot implantation, Angle-controlled beam, Wear resistance, SKH55 high-speed steel, Hydraulic piston punch

Complex-shaped tooling components fabricated from high-speed steels are widely used in metal-forming industries, yet they frequently suffer from premature wear at stress-concentrated regions such as edges and corners. Conventional surface treatments process the entire tool surface uniformly, which can be inefficient and may introduce thermal distortion in precision geometries. An area-selective reinforcement strategy that targets only the most vulnerable regions is therefore highly desirable for extending tool life without compromising dimensional integrity. This study proposes an angle-controlled composite nitrogen-ion hot implantation approach to enhance the wear resistance of AlCrN-coated SKH55 high-speed steel punches used in hydraulic piston manufacturing. A mixed-ion beam with an N<sub>2</sub><sup>+</sup>/N<sup>+</sup> ratio of 8:2 was employed at an energy of 120 keV and a fluence of 5 × 10<sup>17</sup> ions/cm<sup>2</sup>. Hot implantation at a substrate temperature of 300 °C activates radiation-enhanced nitrogen diffusion, producing a continuous hardened subsurface layer beneath the coating. Beam-angle control over a range of 45°–90° enables selective modification of targeted regions on complex three-dimensional punch geometries. The optimized implantation conditions increased surface hardness from 12.8 GPa to 27.2 GPa and reduced wear rates by up to 26 times compared to pristine AlCrN/SKH55. Structural analyses using X-ray diffraction confirmed the suppression of the brittle hexagonal Cr<sub>2</sub>N phase and the stabilization of face-centered cubic AlN/CrN solid-solution phases within the coating. These phase-structural modifications provide a mechanistic explanation for the improved tribological performance, as the elimination of the brittle phase mitigates crack initiation and propagation under repeated contact loading. Industrial field testing under

actual hydraulic piston manufacturing conditions validated the laboratory results. Optimally treated punches exhibited a 21% increase in service lifetime while maintaining defect-free production throughout the extended operation period. The results demonstrate that this scalable ion-implantation approach offers an effective and industrially viable route for selectively reinforcing vulnerable regions of complex-shaped tooling, bridging fundamental insights into nitrogen-ion-coating interactions with practical manufacturing applications.

#### [P24-4]

Effects of Al-Si Coating Quantity on Tribological Behavior of 22MnB5 in Hot Stamping: Hee Geon Lee(Incheon Univ.), Min-Ki Ji(Korea Institute of Industrial Technology), Hyun-Hak Kang(Incheon Univ.), Hyun-sung Son(POSCO), Tea-Sung Jun\*(Incheon Univ.)

**Keywords:** Hot stamping, Wear, Al-Si coating, Oxidation, Diffusion

This study investigates the tribological behavior and oxidation characteristics of Al-Si coated 22MnB5 steel with varying coating quantities during hot stamping. A strip-drawing tribometer was employed to simulate the process using specimens heat-treated at 900 °C for 5 min. The results showed that higher coating quantities led to lower friction coefficients and increased material transfer to the tool, whereas lower quantities resulted in higher friction coefficients and intense oxidation reaction. The residual Al content was identified as a critical factor that determined whether diffused Fe reacted to form intermetallic compounds or oxides. These findings demonstrate that coating quantities significantly divided the reaction path, determining the overall behavior of friction, tool wear, and surface chemical reactions in hot stamping applications.

#### [P24-5]

Effects of Organic Additives on Initial Stages of Zn Electrodeposition Process: JooYul LEE\*, Bung-Uk Yoo, Da-jung Park, Ju-yeong Lee, Kyu-hwan Lee(한국재료연구원)

**Keywords:** Zn electrodeposition, additives, efficiency

Effects of organic additives such as benzoic acid ~BA! and poly~ethylene glycols!~PEGs! on the initial stages of zinc electroplating were investigated at an iron electrode using cyclic voltammetry, energy-dispersive spectroscopy, soft X-ray absorption spectroscopy, and electrochemical impedance spectroscopy in an acidic zinc chloride solution. BA mainly contributed to the roughness control of the zinc layer with a relatively weak interaction with zinc ions. However, PEG molecules raise the overpotential for reduction of both zinc ions and protons by effectively blocking the electrode surface. Soft X-ray absorption spectroscopic results confirmed that the iron oxide layer was reduced to metallic iron by electrodeposited zinc prior to zinc bulk deposition. Impedance measurements helped reveal the roles of BA and PEG molecules during the zinc deposition on the surface and also in determining the corrosion behavior of zinc plated iron

## P25 : 가공-주조 및 용고

Room 3층 로비, 4월 29일

### [P25-1]

냉각속도가 GCD700 구상흑연주철의 미세조직 형성 및 기계적 특성에 미치는 영향: 홍지우, 김지옥, 최창영, 장진석, 정유현, 조용재\* (한국생산기술연구원)

**Keywords:** 냉각조건, 미세조직, 구상흑연주철

구상흑연주철은 구상 흑연과 기지조직으로 구성된 복합 미세구조를 기반으로 우수한 강도와 인성을 동시에 확보할 수 있는 대표적인 구조용 합금재료이다. 특히 GCD700과 같은 고강도급 구상흑연주철은 기지조직의 상분율과 흑연 형태 인자의 정밀한 제어를 통해 목표 물성을 구현하는 것이 핵심적인 재료 설계 요소이다. 고강도·고인성 특성의 확보를 위해서는 펄라이트 및 페라이트 분율, 흑연의 구상화율, 개수밀도(Nodule count), 입자 크기 등의 미세조직 인자가 적절히 제어되어야 하며, 이러한 조직 인자는 응고 과정에서 냉각 조건에 크게 의존한다. 특히 응고 과정 중 냉각 속도는 흑연의 핵생성 및 성장 거동과 오스테나이트의 상변태 거동을 지배하는 주요 변수로 작용하며, 이는 최종 기지조직의 상분율과 분포를 결정함으로써 기계적 특성에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 냉각 조건과 미세조직 형성 간의 정량적 상관관계를 규명하는 것은 고강도 구상흑연주철의 물성 예측 및 조직 설계 측면에서 중요한 의미를 갖는다. 본 연구는 냉각 조건 변화가 GCD700 구상흑연주철의 응고 거동과 상변태에 미치는 영향을 분석하고, 이에 따른 미세조직 인자와 기계적 특성 간의 상관관계를 재료학적 관점에서 고찰하였다. 본 연구 결과는 ‘냉각 조건-미세조직-기계적 특성’ 간의 유기적 연계성을 제시함으로써, 향후 고성능 주철 소재의 물성 예측 및 조직 제어 기반 공정 설계에 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

### [P25-2]

감압 응고 시험법을 이용한 버진 잉곳과 100% 스크랩의 용탕 품질 평가 연구: 장호성, 강호정, 윤필환, 이규훈, 박진영, 신선미\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 알루미늄, 스크랩, 재활용, 용탕품질평가, 감압응고시험

모빌리티 산업의 경량화 요구로 알루미늄 수요가 급증하고 있으나, 1차 알루미늄(Primary Aluminum, 신지금) 생산 공정의 높은 에너지 소비와 탄소 집약도는 해결해야 할 과제이다. 이를 극복하기 위해 신지금 대비 약 95%의 에너지 절감이 가능한 2차 알루미늄 재활용으로의 전환이 가속화되고 있다. 그러나 스크랩 사용량 증가에 따라 개재물, 산화물 같은 불순물과 Fe, Si, Cu, Zn 등의 잔류 원소의 축적 가능성이 동반된다. 이는 재용해 공정 이후 용탕 청정도의 저하와 결합 민감도 증가로 직결될 수 있다. 따라서 재활용 비중 확대 환경에 적합한 용탕 청정도를 정량적으로 평가하고 관리하는 체계의 정립이 필요하다. 본 연구의 목적은 버진 잉곳 (Virgin ingot)과 100% 스크랩을 각각 동일 조건에서 재용해하여, 감압응고 시험법을 이용하여 용탕 유지시간과 몰드 온도가 용탕 품질 변화에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 주요 공정 변수로 주조 순서 (유지 시간), 몰드 예열 온도, 그리고 두 단계의 감압 조건 (80 mbar, 30 mbar)을 설정하여 감압 응고 시험을 수행하였다. 실험 결과, 용탕 유지 시간에 따른 시편 밀도는 점진적으로 증가 후 안정화되었으며, 잉곳 (10회차)이 스크랩 (15회차)보다 빠르게 최대 밀도에 도달하여 용탕 청정도에 따른 가스 자연 제거 속도의 차이를 확인하였다. 몰드 예열 온도가 상승함에 따라 DI (Density Index)는 전반적으로 감소하는 경향을 보였으나, 감압 조건이 80 mbar에서 30 mbar로 강화될 경우 온도 변화에 따른 DI의 감소 폭이 더욱 현저해짐을 확인하였다. 이는 몰드 온도에 의한 응고 지연 시간이 응고 전 가스 부상 (가스 배출)을 촉진하는 한편, 고 감압 환경에서 잔류 가스와 산화막의 팽창 구동력이 증폭되어, 기공 성장에 결정적인 영향을 미친 결과로 판단된다. 본 연구 결과는 스크랩 용탕의 품질 특성을 분석함으로써, 재활용 비중 확대 환경에서 신뢰성 있는 용탕 품질 관리 체계 정립에 기여할 것으로 기대된다.

## P26 : 상변태

### Room 3층 로비, 4월 30일

#### [P26-1]

**알루미늄 첨가에 따른 AISI 4340 강 상변태 거동 및 마르텐사이트 조직 특성 분석:** 김상순 (동아대학교), 김은아 (현대제철), 이승희, 강신곤\* (동아대학교)

**Keywords:** AISI 4340 강, 담금질 상태 (As-Quenched), 마르텐사이트 조직, 상변태 거동

AISI 4340 강은 높은 경화능을 기반으로 담금질 시 내부까지 균일한 마르텐사이트 조직을 형성하는 대표적인 단조용 합금강이다. 본 연구에서는 Al 첨가에 따른 조성 변화가 AISI 4340 강 상변태 거동 및 마르텐사이트 조직 특성에 미치는 영향을 분석하였다. Al 첨가는 합금 조성을 변화시켜 오스테나이트 안정성과 Ms 온도에 영향을 미치며, 이에 따라 상변태 거동의 차이가 나타났다. 또한 마르텐사이트 형성 특성과 잔류 오스테나이트의 분율 및 분포에서도 차이가 확인되었다. As-Quenched 시편의 미세조직을 관찰하여 마르텐사이트 조직의 형상을 평가하였으며, EBSD 기반 상 분석을 통해 마르텐사이트와 잔류 오스테나이트를 구분하였다. X선 회절(XRD) 분석을 수행하여 격자상수(lattice parameter)와 잔류 오스테나이트 분율을 측정하고, 조성 변화에 따른 결정구조 특성의 차이를 검토하였다. 조성 기반 열역학 계산을 통해 Ms 온도 변화를 예측하였으며, 이를 바탕으로 Al 첨가에 따른 상변태 특성의 변화를 해석하였다.

#### [P26-2]

**열처리 분위기에 따른 바나듐 첨가 열간압연 고망간강의 표면 산화 및 표면-심부 미세조직 변화 분석:** 송호정, 양승우 (동아대학교), 박시욱, 김용진 (국방과학기술연구소), 박건우 (울산과학기술원), 소태일 (포스코), 장재훈, 전종배\* (동아대학교)

**Keywords:** 고망간강, 열처리, 바나듐 첨가,  $\epsilon$ -마르텐사이트 상변태

고망간강 (High-Mn Steel)은 우수한 연신율과 극저온인성 및 상자성 발현 특성으로 자동차 차체용 강판, 극저온 액체 저장탱크 등 다양한 분야에서 이용 가능성이 높다. 고망간강의 산업적 활용도를 높이기 위해서는 다양한 형상으로의 제조가 가능하여야 하며, 이를 위해 일반적으로 압연 혹은 단조 공정을 거친 후 필요에 따라 후속 열처리를 통해 최종 형상을 갖춘다. 그러나 이러한 제조공정은 고온 및 대기 분위기에서 수행되는 경우가 많아, 표면에서 망간의 증발 및 산화에 따른 국부적인 조성 변화가 발생할 수 있다. 망간은 대표적인 오스테나이트 안정화 원소이므로, 열처리 중 망간 소실은 오스테나이트 안정성을 저하시켜  $\epsilon$ -마르텐사이트 상변태를 유발할 가능성이 있다. 이에 본 연구에서는 0.4 및 0.5 wt.% 바나듐이 첨가된 열간압연 고망간강을 대기 분위기 및 아르곤 분위기 하에서 1000°C, 30분 열처리 후 수냉하여 열처리 분위기에 따른 표면 및 심부 미세조직 변화를 분석하였다. 바나듐이 망간 증발 및 산화 거동에 미치는 영향을 규명하기 위해 시편을 표면과 심부로 구분하여 EBSD (electron backscattered diffraction)로 안정상, 재결정 거동, 결정립 형상 및 크기를 분석하였고, EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy)로 표면 산화물 형성 및 기지 내 망간 함량 변화를 분석하였다. 대기 분위기 열처리 시 표면에서는  $\epsilon$ -마르텐사이트와 오스테나이트가 혼재된 미세조직이 관찰되었으며, 심부에서는 오스테나이트 단상이 발현되었다. 바나듐 함량이 0.4 wt.%에서 0.5 wt.%로 증가함에 따라 표면부  $\epsilon$ -마르텐사이트 분율이 감소하는 경향을 보였고, EDS 분석을 통해 표면에서 바나듐계 산화물 형성을 확인하였다. 이는 바나듐 첨가가 대기 열처리 조건에서 망간 증발 또는 표면 산화 거동에 영향을 주어 열처리에 따른 오스테나이트 안정성 저하가 완화되었을 가능성을 시사한다. 이에 산화가 억제되는 아르곤 분위기 열처리 조건에서 동일한 분석을 수행하여, 대기 분위기 대비 표면-심부 미세조직 차이의 변화와 바나듐이 망간 소실 완화에 미치는 영향을 검증할 예정이다.

#### [P26-3]

**냉각 속도 구배에 따른 심리스 수소 강관의 위치별 미세조직 분석 및 수소취성 거동:** 임성진, 정윤중, 권민철, 신윤지, 송기안\* (국립공주대학교)

**Keywords:** Hydrogen Pipeline, Hydrogen Embrittlement Resistance, Microstructure, Mechanical properties, Slow Strain Rate Test

탄소중립 실현을 위한 주요 에너지원으로 수소 에너지가 주목받으면서, 이를 안전하고 경제적으로 운송하기 위한 수소 배관망 구축의 중요성이 증대되고 있다. 특히 고압 수소 운송 환경에서는 심리스(Seamless)강관은 용접부가 존재하지 않아 국부적인 응력 집중의 위험이 낮고, 우수한 내구성을 가지는 장점이 있다. 그러나, 심리스 강관은 제조 공정 중 외부 분사식 수냉 방식을 거치며, 이로 인해 두께 방향으로 불가피한 냉각 속도 구배가 발생한다. 이러한 냉각 속도의 차이는 강관의 내·외부 위치별로 상이한 미세조직 형성을 유발하며, 결과적으로 기계적 물성 및 수소 원자의 확산에 영향을 미쳐 위치별 수소취성 민감도의 편차를 야기할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 심리스 수소 강관의 두께 방향에 따른 미세조직적 불균일성이 수소 취성 저항성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 구체적으로, QT(Quenching & Tempering) 열처리를 진행한 API 5L X65 수소 배관용 심리스 강관에서 외부, 내부 두 영역으로 나누어 주사전자현미경(SEM), 후방산란전자 회절 패턴 분석기(EBSD)를 통해 두께 방향에 따른 합금의 미세조직적 차이를 분석하였으며, In-situ Slow Strain Rate Testing (SSRT)를 통해 강재의 수소 취성 저항성을 평가하였다. This work was supported by Korea Planning & Evaluation of Industrial Technology (KEIT) funded by Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE, Korea) (RS-2024-00444672). This work was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT), and Ministry of Trade, Industry and Energy ((P0018009).

#### [P26-4]

나노 VC 석출 기반 다차원 결합 제어를 통한 Fe-Mn-Si계 형상기억합금의 회복특성 최적화: 윤제인, 김지영, 박은수\*(서울대학교)  
Keywords: Shape Memory Alloys, Precipitation, Reversible Martensitic Transformation, Shape Memory Effect (SME)

최근 토목 인프라 구조물의 내진 감쇠 및 프리스트레싱 적용을 위한 Fe 기반 형상기억합금(Fe-based SMA)에 대한 관심이 증가함에 따라, 콘크리트 기둥의 효과적인 긴장력 부여를 위해 크고 안정적인 회복응력(recovery stress)의 확보가 핵심 과제로 부각되고 있다. 기존 연구에서는 나노 석출상 또는 결정립계 제어를 통해 회복특성을 개선하는 등개별 결합 구조의 독립적 제어를 기반으로 한 물성 향상 사례가 주로 보고되어 왔다. 반면 본 연구는 결정립계(2차원 결합)와 석출상(3차원 결합) 등 서로 다른 차원의 결합 요소를 연계하여 제어하는 다차원 결합 설계 전략을 기반으로, 오스테나이트의 항복강도 향상을 통해 궁극적인 회복응력 증대를 달성하고자 한다. 특히 VC 석출상의 크기 분포와 생성 위치와 같은 나노 석출 구조가 다른 결합들과 결합될 때 형상기억합금의 가역 변태 거동 및 회복특성에 어떠한 영향을 미치는지를 규명함으로써, 미세조직 최적화를 위한 정량적 설계 기반을 제시하고자 한다. 본 연구에서 핵심적으로 다루는 VC 석출 거동은 SEM 및 STEM 관찰과 고에너지 싱크로트론 X선 회절(synchrotron X-ray diffraction)을 통해 체계적으로 분석하였다. SEM 분석 결과, 시효 온도 및 시간 조건에 따라 수십에서 수백 nm 크기의 나노 석출물이 원형 형태로 결정립계와 오스테나이트 기지 내에 형성됨을 확인하였다. 이어서 싱크로트론 X선 회절 분석을 통해 시효 조건에 따른 석출상의 종류와 모재 상의 안정성, 그리고 변태 거동을 정량적으로 평가하였다. 그 결과, 시효 조건에 따라 M23C6 및 M7C3와 같은 상이 서로 다르게 석출되며, 이들 석출상이 크기 및 형성 거동에 따라 회복특성에 상이한 영향을 미침을 확인하였다. M7C3 석출상은 수백 nm 수준의 비교적 조대한 크기 범주로 형성되는 반면, M23C6 석출상은 수십 nm 수준의 미세 석출물로 형성되어 보다 효과적으로 석출강화에 기여할 수 있다는 특징을 갖는다. 특히 저온·장시간 시효 조건에서 형성된 M23C6 석출상 주변에서는 적층결함(stacking fault)이 함께 발달함을 확인하였으며, 이는 석출상과 기지 간 격자 불일치로 인해 Shockley 부분 전위가 석출물 인근에 축적되면서 적층결함 형성이 촉진된 결과로 해석된다. 이러한 적층결함은 가역 마르텐사이트 변태의 핵생성 기점으로 작용하여, 석출상이 석출강화뿐 아니라 변태 거동 촉진에도 중요한 역할을 함을 시사한다. 결과적으로 본 연구에서는 미세하고 균일한 결정립 조직에 따른 결정립계 강화와 나노 석출상 기반의 석출강화를 동시에 구현함으로써 오스테나이트 기지의 항복강도를 효과적으로 향상시켰으며, 이에 따라 회복응력 또한 유의미하게 증가함을 확인하였다. 특히, 석출상 주변에 형성된 적층결함(stacking fault)이 마르텐사이트 가역 변태 거동을 촉진함으로써, 회복응력 향상 뿐 아니라 회복변형률도 개선되었다는 점에서 그 의의가 있다. 이러한 결과는 다차원 결합 제어가 회복특성을 동시에 최적화할 수 있는 유효한 미세조직 설계 전략임을 보여준다. 더불어 Fe 기반 형상기억합금이 Ni-Ti계 합금 대비 비용 경쟁력을 갖춘 구조용 대체 소재로 활용될 가능성을 제시한다.

#### [P26-5]

Invar 합금에서 미량 불순물의 미세구조 및 열-기계적 특성에 대한 영향: 이희상, 장준호, 류채우\*(홍익대학교)

Keywords: Invar 합금, 열팽창계수(CTE), 기계적 물성

Invar 합금은 Fe-36wt.%Ni 조성에서 매우 낮은 열팽창계수(Coefficient of Thermal Expansion, CTE)를 나타내어 파인 메탈 마스크(Fine Metal Mask, FMM) 및 항공우주용 고정밀 부품 등 다양한 첨단 산업 분야에서 활용되고 있다. 그러나 높은 연성과 낮은 경도로 인해 가공성이 제한되며, 특히 박판 적용 시 Waviness 발생 등 형상 안정성 저하 문제가 보고되고 있다. 이에 본 연구에서는 Fe-36wt.%Ni 이원계 조성을 갖는 Invar 합금과 비교하여, 미량 불순물이 존재하는 Invar 합금에서의 미세구조 변화가 기계적 물성과 열팽창 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 합금은 진공 아크 용해(Arc melting) 공정을 통해 제조한 후 고온 균질화 열처리를 수행하였으며, 이후 냉간 압연 및 다양한 온도 조건에서의 열처리를 통해 시편을 준비하였다. 이원계 Invar 합금과 불순물이 포함된 Invar 합금 간의 물성 차이를 비교하기 위해, 인장 시험을 통해 기계적 물성을 평가하였고, X-Ray Diffraction(XRD) 분석을 통해 불순물 존재에 따른 결정 구조 변화를 분석하였다. 또한 Electron Backscatter Diffraction(EBSD) 및 Scanning Electron Microscopy(SEM)를 활용하여 불순물에 의해 발현된 미세구조 변화와 석출물 형성 가능성을 관찰하였다. 열팽창 특성은 Dilatometer(DIL)를 이용하여 측정하였으며, 동일한 열처리 조건에서 두 합금의 CTE 거동을 비교·분석하였다. 본 연구는 미량 불순물이 Invar 합금의 미세구조와 기계적 물성 및 열팽창 특성에 미치는 영향을 규명하고, 낮은 CTE 특성을 유지하면서도 향상된 성형성과 기계적 신뢰성을 확보하기 위한 공정 및 조성 제어 연구 방향을 제시하고자 한다.

#### [P26-6]

Ni-38Cr-3.8Al 합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 V 첨가의 영향: 윤성민, 김가영, 유채은, 이제인\*(부산대학교)

Keywords: Exhaust valve spindle, lamellar structure, Solution heat treatment

배기밸브 스피들은 선박 엔진의 연소실 내에서 고온, 고압의 배기가스를 배출하는 부품으로써, 고온에서의 우수한 내부식성과 높은 인장강도를 갖는 NiCrAl 합금이 스피들용 소재로 각광받고 있다. 해당 합금의 높은 인장강도는 fcc의  $\gamma$  상과 bcc의  $\alpha$  상으로 구성된 라멜라 구조에 기인한다. 일반적으로 Ni 합금에서 V는 첨가는 고용강화, 석출강화, 결정립 미세화에 의한 강화 효과가 있다고 알려져 있다. 본 연구에서는 아크 용해를 통해 Ni-38Cr-3.8Al, Ni-38Cr-3.8Al-0.3V, Ni-38Cr-3.8Al-1V (wt.%) 합금을 주조하였고, 1200 °C에서 8 시간 균질화 열처리 후에 냉간 압연을 수행하여 판재로 제조하였다. 1200 °C에서 용체화된 판재 시편의  $\gamma$ -Ni 상의 결정립 크기 및  $\alpha$ -Cr 입자의 크기와 분율을 분석하였다. V 첨가량이 증가함에 따라 용체화된 판재에서 결정립 크기가 감소했으며, 고용되지 않은  $\alpha$ -Cr 분율이 증가하였다. 그 결과 1V를 첨가한 합금에서 가장 높은 비커스 경도값이 나타났다. 인장 시험 결과, 0.3V를 첨가한 합금의 항복강도와 인장강도는 기본 합금과 유사하였으나, 1V를 첨가한 합금에서는 강화 효과가 뚜렷하게 관찰되었다.

**[P26-7]**

**AB<sub>2</sub>계 수소저장합금의 라베스상 형성 거동 및 미세구조 분석:** 이소영, 박은수\*(서울대학교)

**Keywords:** AB<sub>2</sub>계 수소저장합금, 라베스상, 상형성 거동

수소저장합금은 높은 수소 저장 용량과 우수한 열역학적 특성으로 인해 차세대 에너지 저장 소재로 주목받고 있다. 특히 상용화를 위해서는 수소 흡·방출 과정에서 안정적인 평탄압을 유지하는 것이 중요하며, 이를 위해 합금의 단상 제어가 필수적이다. 다상 구조가 형성될 경우 상 간 수소 용해도 차이로 인해 평탄압 특성이 저하될 수 있다. 본 연구에서는 AB<sub>2</sub>계 수소저장합금에서 라베스상의 형성 거동을 체계적으로 규명하고, 합금 조성에 따른 상 안정성과 미세구조 변화를 분석하였다. 주사전자현미경 및 X선 회절 분석을 통해 라베스 상의 결정구조를 확인하였으며 각 합금 원소가 상 형성에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구에서 확보한 조성-상 안정성-미세구조 간의 상관관계는 다원계 AB<sub>2</sub>계 합금 설계를 위한 기초 데이터로 활용될 수 있으며, 안정적인 단상 라베스 상을 기반으로 한 고성능 수소저장합금 개발을 위한 설계 지침을 제공할 것으로 기대된다.

**[P26-8]**

**Scalable Production of Fe<sub>4</sub>N by a Controlled De-Nitridation Route:** Hyojin Choi, Hyunwoo Seo, Ho-jeong Kim, Wooyoung Lee(Yonsei University), Seung Yong Lee(Kongju National University), Kyu Hyoung Lee\*(Yonsei University)

**Keywords:** Iron nitride, Fe<sub>4</sub>N, De-nitridation, Nitrogen Stoichiometry Control

Among the various iron nitride phases, Fe<sub>4</sub>N has attracted significant attention due to its potential applications in lithium-ion battery anodes, electrocatalysis, and magnetic materials. Conventional synthesis methods for Fe<sub>4</sub>N typically require high concentrations and pressures of ammonia, raising safety and handling concerns. In this work, we present a simplified and safer approach for synthesizing single-phase Fe<sub>4</sub>N via a de-nitriding strategy using commercially available iron nitride precursors under a mixed hydrogen-inert gas atmosphere. Phase evolution and the formation of Fe<sub>4</sub>N were confirmed through structural and microstructural characterization. The results demonstrate controlled nitrogen composition and stable phase formation without the use of hazardous ammonia environments. Overall, this study establishes a safe, controllable, and reproducible pathway for the preparation of Fe<sub>4</sub>N, offering a practical alternative for synthesizing iron nitride phases for advanced functional applications.

**[P26-9]**

**Superheating Above the Liquidus Does Not Restore Chemical Homogeneity in an Oxidation-Sensitive Metallic Glass:** Minkyung Kwak(Seoul National University), Chae Woo Ryu(Hongik University), Eun Soo Park\*(Seoul National University)

**Keywords:** Metallic glass, Heterogeneous nucleation, Liquid-state oxidation, Critical cooling rate, Superheating

Superheating above the liquidus temperature is generally assumed to restore chemical homogeneity in metallic glasses. Here we demonstrate that this assumption breaks down in an oxidation-sensitive bulk metallic glass. Even sub-second liquid-state exposure induces rapid surface and internal oxidation, reducing the incubation time for crystallization by more than one order of magnitude at identical temperature. The critical cooling rate correspondingly increases by over two orders of magnitude relative to the no-hold condition and exceeds the homogeneous-nucleation baseline predicted by classical nucleation theory by more than four orders of magnitude. Cross-sectional TEM reveals the formation of a continuous surface oxide layer together with dispersed internal oxides. These results show that liquid-state oxidation promotes heterogeneous nucleation and fundamentally alters the attainable glass-forming ability.

**[P26-10]**

**Design and Characterization of High-Density Fe-Based Amorphous Sintered Alloys Containing High Boron and Gadolinium:** CHOI HYESEONG, JEONGKYU KIM, SEONGHOON YI\*(Kyungpook National Univ.)

**Keywords:** Fe-based amorphous alloy, Thermal neutron shielding, Thermal stability

The development of structurally reliable neutron shielding materials is essential for the safe management of radioactive waste. In this study, B- and Gd-rich Fe-based amorphous alloys were designed by utilizing the exceptionally high thermal neutron capture cross-section of <sup>157</sup>Gd (254, 000 barns, approximately 66 times higher than that of <sup>10</sup>B). Among the investigated compositions, the alloy exhibiting the maximum supercooled liquid region ( $\Delta T_x$ ) of 71°C at a heating rate of 40°C/min was selected and subsequently densified via sintering within the supercooled liquid region. This wide processing window enables thermoplastic forming in the amorphous state at temperatures significantly lower than the typical hot-working temperatures of conventional steels. The fully amorphous sintered body achieved a relative density of approximately 98% of the theoretical density and exhibited improved mechanical properties and corrosion resistance compared with partially or fully crystallized counterparts. Thermal neutron shielding performance of the fully amorphous specimen was evaluated in the energy range below 0.6eV. A shielding efficiency of 92.3% was achieved at a thickness of 0.4mm, demonstrating superior attenuation efficiency per unit thickness relative to commercially available neutron absorbers. These results indicate that B- and Gd-rich Fe-based amorphous alloys have strong potential as lightweight and space-efficient next-generation neutron shielding structural materials.



### [P26-11]

Effect of Phosphorus Content on HER Activity and Stability of Fe-based Amorphous Ribbons in Acidic Seawater: JuneYoung Lee, Moosung Kim, Seonghoon Yi\*(Kyungpook National University)

**Keywords:** green hydrogen, catalyst, amorphous

Water electrolysis has gained significant attention as a sustainable method for green hydrogen production. In particular, the direct electrolysis of seawater, rather than purified water, offers a significant economic advantage by eliminating the costs associated with water desalination and purification. Currently, platinum (Pt) is widely used as an electrocatalyst; however, its high cost and scarcity present major challenges for large-scale applications. To address this issue, we fabricated Fe-based amorphous ribbons and investigated their electrochemical properties. Our results show that Fe-based amorphous ribbons are promising candidates due to their high structural homogeneity and inherent resistance to chloride-induced corrosion. The fabrication process involved designing Fe-based multicomponent alloy compositions based on glass-forming ability (GFA), which were synthesized using arc melting followed by a melt-spinning process to obtain amorphous ribbons with varied phosphorus (P) concentrations. The structural and thermal properties were characterized using X-ray diffraction and simultaneous differential thermal analysis. To evaluate their potential as catalysts, the electrochemical properties of the ribbons were analyzed in a simulated acidic seawater electrolyte, focusing on the effect of P composition on hydrogen evolution reaction (HER) activity and stability. SEM/EDS analysis conducted after the HER tests confirmed that increasing the P content enhances the corrosion resistance and maintains structural integrity.

### [P26-12]

공정 합금계에서의 급속 응고에 따른 공유결합 원소의 비정질 상 형성: 문준현, 박은수\*(서울대학교), 류채우\*(홍익대학교)  
**Keywords:** Amorphous phase, Eutectic system, Rapid solidification

공정 합금계를 활용한 비정질 반도체 형성은 스퍼터링이나 화학기상증착(CVD)과 같은 기존 박막 증착 기반 공정이 지니는 공정 복잡성, 높은 제조 비용, 그리고 대량 생산의 한계를 극복할 수 있는 대안적 접근법으로 주목받고 있다. 특히 박막 공정에 의존하지 않고 벌크 형태의 비정질 상을 직접 형성할 수 있다는 점에서 제조 공정의 범용성을 확보할 수 있다. 본 연구에서는 Al-Si, Al-Ge, Ag-Si, Ag-Ge 공정 합금계를 대상으로 급속 응고 과정에서 공유결합 원소의 비정질 상 형성 거동을 조사하였다. 급속 응고 과정에서 급속 상이 우선적 응고되면서 공유결합 원소가 잔류 용융부에 국부적으로 농축되고, 이로 인해 형성된 과냉 상태의 상은 결정화 없이 비정질 상으로 전이된다. 실리콘과 저마늄은 벌크 비정질화가 어려운 원소로 알려져 있음에도 불구하고, 본 공정 합금계에서는 안정적인 비정질 상 형성이 가능함을 확인하였다. 구조 분석 및 열분석 결과, 형성된 상은 비정질 구조를 나타내었으며, 가열 시 결정화 거동을 보임을 확인하였다. 이러한 결과는 공정 합금계를 활용한 급속 응고 공정이 공유결합 원소의 비정질 상 형성을 효과적으로 유도할 수 있음을 보여준다.

### [P26-13]

달 레골리스 모사 Lunar Glass의 물성 평가 및 위치 기반 물성지도 구축: 송원택, 이명준, 박은수\*(서울대학교)  
**Keywords:** Lunar glass, Lunar regolith, ISRU

우주기술의 고도화로 탐사는 점차 더 먼 천체와 더 장기적인 임무로 확장되고 있다. 이에 따라 지구 보급 의존도를 낮추는 달에서의 ISRU(in-situ resource utilization)가 주목받고 있다. ISRU의 원료로서 달 표면의 주 구성 물질인 레골리스(regolith)에서 형성·제조되는 lunar glass는 공정성 및 최종 부품 성능을 좌우하는 핵심 상으로 작동한다. 그러나 현재는 보고된 레골리스 혼합비가 lunar glass의 물성 변화로 어떻게 이어지는지에 대한 정량적 연결이 부족하다. 본 연구에서는 달 탐사선 채집 시료에서 보고된 레골리스 비율을 반영해 레골리스 모사체를 제작하고, 이를 기반으로 제조한 lunar glass의 기계적 물성과 열적 특성을 측정하고, 해당 물성을 채집 위치에 매핑하여 contour map으로 제시한다. 제작된 모사체 혼합비에 따라 lunar glass의 핵심 물성이 체계적으로 변화함을 확인했으며, 이 변화를 위치 정보와 결합해 지역별 예상 물성을 시각화하였다. 제시된 물성 지형도는 향후 달 표면에서의 재료 선별, 공정 조건 설정, 그리고 구조재/차폐재 등 응용 시나리오에서 요구 성능을 만족하는 후보 지역을 추정하는 데 직접 활용될 수 있다. 본 접근은 레골리스의 지역적 이질성을 정량 물성 지도로 변환하는 방법론으로서, 후속 탐사에서 확보될 추가 시료·원격탐사 데이터와 결합할 때 예측 정확도를 지속적으로 향상시킬 수 있다.

### [P26-14]

나노 다공성 은 분말의 제조 및 미세조직 제어: 김영균, 성재욱\*, 현승균\*(인하대학교)  
**Keywords:** 합금설계, 다공성, 나노은, 리가먼트 구조

전자 소자의 고집적화에 따라, 낮은 공정 온도에서도 접합 강도와 신뢰성을 동시에 확보할 수 있는 접합 소재에 대한 요구가 증가하고 있다. 기존 접합 소재인 은 나노입자(Ag nanoparticles)는 높은 비표면적으로 인한 우수한 저온 소결 특성에도 불구하고, 미세 입자로 인한 취급성 문제와 높은 재료 비용으로 한계를 가진다. 이러한 문제를 완화할 수 있는 대안으로 나노 다공성 은(nanoporous Ag)을 제시할 수 있다. 본 연구에서는 합금 설계를 기반으로 기계적 분쇄가 가능한 Ag-Al-Si계 합금을 개발하였다. 급속 응고 공정(RSP, Rapid Solidification Process)을 활용해 나노 복합구조 합금을 제조한 뒤, Paint shaker를 이용하여 습식 분쇄를 진행하였다. 그 후, NaOH 수용액에서 합금분말의 Al, Si를 선택적으로 제거하였으며, 반응 온도 및 시간이 리가먼트 구조에 미치는 영향을 분석하였다. FE-SEM 및 XRD 분석 결과, 알칼리 환경에서 반응 제어를 통해 수십 나노미터 수준으로 미세화된 리가먼트 구조를 확보하였다. 특히, 반응 온도가 낮을수록 표면확산이 억제되며 리가먼트 조대화가 지연됨을 확인하였다. 이를 통해 미세조직의 제어가 가능하고 높은 비표면적에 기인한 저온 접합 소재로의 적용 가능성을 제시하였다.

**[P26-15]**

**Orientation-Dependent Mechanical Properties of Al-Cu-Fe Quasicrystals:** Go Eun Kim, Wan Kim, Eun Soo Park\*(Seoul National University)

**Keywords:** Quasicrystal, EBSD, Grain growth, Micropillar compression

Quasicrystals are characterized by long-range order with non-conventional rotational symmetry, which requires crystallographic orientation to be defined based on symmetry axes rather than lattice periodicity. A clear understanding of orientation in quasicrystals is therefore essential for interpreting their deformation behavior and mechanical anisotropy. In this study, we investigate the orientation-dependent mechanical properties of the icosahedral phase in the Al<sub>63</sub>Cu<sub>25</sub>Fe<sub>12</sub> system. The microstructure was systematically tailored through annealing to control grain size and morphology, enabling orientation-resolved mechanical characterization. Electron Backscatter Diffraction analysis was employed to identify the crystallographic orientations of the quasicrystal grains. Subsequently, uniaxial micropillar compression tests were conducted on these site-specific grains to probe the intrinsic mechanical anisotropy. This work is expected to establish a clear correlation between crystallographic orientation and mechanical anisotropy providing insights into the deformation behavior of quasicrystals.

**[P26-16]**

**Cu-X 컬러합금의 첨가 원소 제어를 통한 미세조직 변화 및 기계적·광학적 특성 연구:** 장성문, 조가은, 황의정, 강결찬, SHINDE KIRAN PRAKASH, 박혜진, 홍성환, 김기범\*(세종대학교)

**Keywords:** 컬러 합금, 압연공정

Cu 기반 합금은 전이에너지 조절을 통해 다양한 색상을 구현할 수 있어 심미적 응용 가능성이 높다. 하지만 이러한 심미적 우수성에도 불구하고, 구리 기반 합금은 FCC 구조를 가지고 이는 본질적으로 연성이 매우 높고 항복 강도가 낮아, 높은 내구성과 강성이 요구되는 구조재나 전자기기 외장재로 활용하기에는 한계가 존재한다. 따라서 합금 설계를 통한 색채 제어와 동시에, 소재의 기계적 특성을 개선하기 위한 공정학적 처리가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 배경 하에 구리의 색채 특성을 제어하면서도 기계적 특성을 개선하기 위해 Ge, Al, Ni의 3가지 원소를 첨가 원소로 선택한 후 기초적인 소성변형 공정인 압연을 재료에 적용하였다. 이들 원소는 구리 기지 내에서 상대적으로 높은 고용도를 나타내어 넓은 조성 범위에서 안정적인 단상 영역을 유지할 수 있으며, 이는 강도 향상을 위한 압연 공정 시 취성 파괴를 억제하고 안정적으로 높은 수준의 소성 변형을 가능하게 한다. 특히 원소별로 상이한 색채 특성과 첨가량( $x=3, 5 \text{ at}\%$ )에 따른 미세조직의 진화, 기계적 강도의 변화, 그리고 광학적 특성을 체계적으로 분석했다. 균질화 열처리 과정을 통해 주조상을 제거하고, 무작위 분포를 가지는 grain을 만들기 위해 900°C 24h 열처리를 진행하였다. 이후 약 2°C 얼음물에 급랭한 후 75% 압하율로 압연을 진행하였다. 결론적으로 균질화 열처리 group과 압연 group의 2가지 비교군을 형성하였다. XRD 분석 결과 전 합금군, 또한 압연 전후로 a-Cu FCC와 동일한 단상 peak만이 관찰되어 열처리, 압연 전후로 상 변화가 없음을 확인했다. 미세조직 분석 결과 균질화 열처리 group의 경우 Ge, Al, Ni 순서로 grain size가 커지는 경향성을 보였다. Ge 이 Ni 대비 약 2배 이상 더 작은 grain size를 가지는 것으로 나타났다. 압연 후 미세조직 분석 결과 모든 합금군에서 결정립 미세화가 일어난 모습을 확인했다. Vickers hardness 측정 결과 균질화 열처리 합금군에서는 Ge, Al, Ni 순서대로 선형적인 경도 감소 경향성을 보였으며, 이는 grain size 증가 경향성과 일치하는 결과를 보였다. 하지만 압연 합금군의 경우 Ge 이 전 조성에 걸쳐 타 합금 대비 약 30% 이상 경도 값이 증가하였고, Al Ni 순서대로 선형적인 경도 감소 경향성을 보였다. 색도 분석 결과 Ge와 Al의 경우  $a^*$  값 감소,  $b^*$  값 증가, Ni의 경우  $a^*$  값과  $b^*$  값이 모두 감소하는 경향성을 보였다.

**[P26-17]**

**제 2상 분산을 통한 Cu-Ge 기반 고강도 컬러 합금의 특성 연구:** 황의정, 장성문, 조가은, 강결찬, 박혜진, 홍성환, 김기범\*(세종대학교)

**Keywords:** 컬러 합금, CIE  $L^*a^*b^*$  색 공간, Cu-Ge 합금, 분산 강화

금속 소재의 기계적 물성과 심미적 가치를 동시에 확보하는 것은 재료 설계 측면에서 중요한 과제로 인식되어 왔다. 선행 연구인 Cu-Ge 이원계 합금 연구에서는 용체화 처리를 통해 고유의 색상 변화를 유도하고 기계적 특성을 일부 향상시킬 수 있음이 확인되었다. 그러나 단상 고용체 기반의 Cu-Ge 합금은 고용 강화만으로는 높은 기계적 강도를 만족시키기에 한계점이 존재하여 이를 극복하기 위한 새로운 합금 설계가 요구된다. 이에 본 연구에서는 Cu 기지와 상용성이 낮은 성질을 가져 효과적인 분산 강화 거동을 기대할 수 있는 Cr을 첨가 원소로 선정하여 합금군을 설계하였다. Ge 고용량에 따른 Cr의 분산 강화 효과 차이를 비교하기 위하여 Cu-3at%Ge 및 Cu-5at%Ge 기지에 Cr 함량을 0, 1, 3, 5at%로 변화시킨 총 8종의 합금 Cu<sub>97-x</sub>Ge<sub>x</sub>Cr<sub>y</sub> ( $x=0, 1, 3, 5$ )( $y=3, 5$ )을 제조하였고, 합금군에 따른 변화 거동을 체계적으로 분석하였다. XRD 분석 결과, Cr 첨가 시 기존 Cu-Ge 단상 합금에서는 관찰되지 않았던 제2상 피크가 시 검출되었으며, Cr 함량이 증가할수록 해당 피크의 강도(Intensity)가 증가함을 확인하였다. 미세조직 분석 결과, 두 가지 Ge 조성 합금 모두에서 Cr 첨가량이 증가함에 따라 기지 내에 미세한 Cr 입자의 분율이 증가하는 경향이 관찰되었다. 이러한 미세조직의 변화는 기계적 특성 향상으로 이어졌다. 또한 Ge 함량에 따른 압축 강도의 증가폭에서 뚜렷한 차이가 확인되었다. 두 합금계의 경도(Hardness)는 유사한 수준으로 증가한 반면, 압축 강도(Compressive Strength)의 경우 Cu-Ge 2원계 합금에 비해 Cu<sub>92</sub>Ge<sub>3</sub>Cr<sub>5</sub> 합금은 약 20% 향상된 데 비해, Cu<sub>90</sub>Ge<sub>5</sub>Cr<sub>5</sub> 합금은 약 50%의 향상 효과를 나타내어 고농도 Ge 기지에서 Cr 분산 강화 효과가 극대화됨을 확인하였다. 이러한 기계적 특성의 향상은 기지 내에 균일하게 분산된 미세 Cr 입자가 변형 시 전위(Dislocation)의 이동을 효과적으로 방해하는 장애물로 작용하여 기지를 강화시킨 결과로 판단된다. 광학적 특성 분석 결과, Cr의 첨가량이 많을수록 색도 지수( $a^*$ ,  $b^*$ )는 소폭 감소하는 경향을 보인다. 이는 고유의 붉은색을 띠는 Cu 기지에  $a^*$ ,  $b^*$  값이

거의 0에 가까운 무채색의 Cr 입자가 분산되면서 색의 채도(Saturation)를 떨어뜨리는 희석 효과(Dilution Effect)가 발생했기 때문이다. 본 연구는 제2상 분산 제어를 통해 기존 Cu-Ge 컬러 합금의 한계를 극복하고, 구조적 안정성과 심미성을 동시에 만족하는 고강도 소재 설계의 가능성을 제시한다.

#### [P26-18]

**Cu-Al-Zn-Sn 합금의 첨가 원소 제어 기반 적층 결함 에너지 제어를 통한 열간 압연에 따른 기계적 특성 거동 연구:** 강결찬, 조가은, 장성문, 이유진, 홍동성, 현명우, SHINDE KIRAN PRAKASH, 박해진, 홍성환, 김기범\*(세종대학교)

**Keywords:** 적층 결함 에너지, 소성변형, 전위, 쌍정, 동적재결정화

본 연구는 고유의 색상 미학으로 인해 화폐 및 장식용 소재로 널리 활용되는 Cu-Al-Zn-Sn 노르딕골드 합금계의 산업적 활용 가치를 극대화하기 위해, 합금 설계와 미세조직 제어를 통한 기계적 물성 향상 기구에 대해 고찰하였다. 일반적으로 구리 기반 합금의 소성 변형 거동은 적층결함에너지(Stacking Fault Energy, SFE)에 의해 결정되며, 이는 합금 내 용질 원소의 종류와 농도에 따라 민감하게 반응한다. 특히 Al, Zn, Sn과 같은 치환형 원소들은 구리 기질 내에서 전위의 해리 폭과 교차 활주 빈도를 결정짓는 핵심 인자로 작용한다. 합금의 SFE가 감소함에 따라 완전 전위가 두 개의 부분 전위로 분리되고 전위간 폭을 넓히며, 전위의 교차 활주를 구조적으로 억제하여 격자 내 결함 에너지를 안정화시킨다. 이러한 환경에서는 전위 활주에 의한 변형보다는 변형 쌍정(Deformation twinning)이 주된 변형 기구로 부상하게 된다. 본 연구에서는 이러한 금속 물리학적 배경을 바탕으로, SFE 저하 효과가 매우 강력한 Al과 상대적으로 완전한 Zn의 함량을 독립적으로 제어함으로써 SFE 값의 고저에 따른 변형 거동의 변별력을 확보하고자 하였다. 상용 노르딕골드 합금 시스템 기반으로 SFE를 제어하기 위해 합금설계를 진행하고, 열간 압연 공정을 도입하여 재료 내부의 전위 밀도를 극대화하고 변형 쌍정의 형성을 유도하였다. 열간 가공 과정에서 발생하는 동적 복구 및 재결정 거동과 SFE 사이의 상관관계를 면밀히 분석하였으며, 특히 고밀도로 축적된 격자 결함이 합금의 강화 기구에 기여하는 메커니즘을 규명하였다. 미세조직 분석 결과, SFE가 상대적으로 낮은 합금 조성에서는 변형 과정에서 미세한 쌍정 경계가 다수 관찰되었으며, 이는 전위의 이동을 효과적으로 차단하는 Hall-Petch 효과를 유발하여 강도와 연성의 동시 향상을 이끌어냈다. 최종적으로 본 연구는 첨가 원소에 따라 거시적인 기계적 특성 거동을 제어하고 최적화시킬 수 있는 조건을 확인할 수 있었으며, 이는 차세대 고강도 동합금 설계를 위한 정밀한 미세구조 제어 지침을 제공할 것으로 기대된다.

#### [P26-19]

**From Cu-Zn-Pb to Lead-Free Alternatives: Phase Transformation, Precipitation, and Microstructure in Brass:** Jieun Lee, Jaekwon Kim(Seoul National University), Siyeon Lee(WONJIN Metal), Eunsoo Park\*(Seoul National University)

**Keywords:** Lead-Free Brass, Precipitate, Microstructure, Mechanical property, Machinability

Brass alloys are widely used in water and gas piping systems and decorative components due to their excellent ductility, corrosion resistance, hardness, and wear resistance, where high machinability is essential. Although leaded brasses exhibit superior machinability, growing concerns over lead toxicity have driven global restrictions and intensified efforts to develop lead-free alternatives. Bi-containing brasses are a promising substitute; however, bismuth often forms film-like grain-boundary precipitates that can degrade machinability by promoting premature fracture during cutting. To overcome this limitation, we employ a multi-functional alloying strategy by introducing Fe-, Cr-, and Ni-bearing additions that preferentially form secondary precipitates rather than dissolving into the Cu-Zn matrix, aiming to simultaneously improve strength, corrosion resistance, and machinability while enabling cost-effective, recyclable feedstocks (e.g., scrap-based sources). A series of alloys including Cu-Zn (lead-free baseline), Cu-Zn-Pb (reference), and stainless-steel-added Cu-Zn were fabricated by induction melting and subjected to tailored heat treatments. Microstructure and phase constitution were evaluated using SEM and XRD, and correlated with mechanical properties (hardness, tensile strength) and machinability assessments. In addition, synchrotron based measurements (high-energy XRD, white-beam X-ray) were referenced to support phase transformation and precipitation pathway analysis. This study aims to clarify the relationships among precipitate composition, phase transformation behavior, microstructure, and the resulting mechanical performance and machinability, providing practical guidelines for designing environmentally friendly lead-free brasses that mitigate the conventional strength-machinability trade-off.

#### [P26-20]

**석출강화형 중엔트로피 합금에서  $\gamma'$  석출·재석출 거동의 정량적 분석:** 한상윤, 박은수\*(서울대학교), 류채우\*(홍익대학교)

**Keywords:** In-situ neutron diffraction, Coherent  $\gamma'$  precipitate, Precipitation and reprecipitation, supersolvus, subsolvus

석출강화형 고엔트로피 합금 및 중엔트로피 합금은 우수한 강도-연성 균형과 열적 안정성으로 차세대 구조재료로 각광받고 있다. 특히 Al 및 Ti 첨가로 형성되는 정합(coherent)  $\gamma'$  석출물은 강도-연성 균형을 좌우하는 핵심 미세조직으로 널리 보고되어 있다. 그러나  $\gamma'$  상은 크기가 작고 모상과의 정합성이 높아 벌크 스케일에서 가열·냉각에 따른 석출·재석출(precipitation and reprecipitation) 거동을 정량적으로 분석하는 데 어려움이 있다. 본 연구에서는 CoCrNi(Al, Ti) 기반 중엔트로피 합금에서 가열 및 냉각 과정에서의  $\gamma'$  상의 석출·재석출 거동과 이에 수반되는 결정학적 변화를 실시간 중성자 회절(in-situ neutron diffraction) 실험을 통해 분석하였다. 실시간 가열 및 냉각 조건은  $\gamma'$  석출물의 석출-용해-재석출 거동을 모두 관찰할 수 있도록 용해선 이상(supersolvus) 온도 구간을 포함하도록 설계하였다. 회절 데이터를 기반으로 온도에 따른  $\gamma'$  부피분율,  $\gamma/\gamma'$  격자상수 및 격자 부정합을 정량적으로 도출하였다. 이를 통해 용해선 이하(subsolvus) 온도에서  $\gamma'$  석출 거동, 용해선 이상 온도 구간에서의 용해 과정, 그리고 냉각 구간에서의  $\gamma'$  재

석출 과정을 연속적으로 추적하여, 열이력에 따른  $\gamma'$  거동의 특징을 규명하였다. 본 연구는  $\gamma'$  석출물의 열이력 의존 거동을 정량적으로 규명함으로써,  $\gamma'$  상의 열적 안정성에 대한 이해를 심화하고 석출강화형 중엔트로피 합금의 열처리 조건 최적화 및 합금 설계 고도화에 기여할 수 있는 기초적인 정보를 제공할 것으로 기대된다.

#### [P26-21]

**V 첨가에 따른 CoCuFeNi 기반 고엔트로피 합금의 미세구조 분석 및 기계적 물성 향상에 대한 연구:** 이규필, Yusupov Dilshodbek, Abbas Muhammad Aoun, 강결찬, 홍동성, 강원목, 김기범\*, 홍성환, 박혜진(세종대학교)

**Keywords:** High entropy alloy, Microstructure, Mechanical property, Cold rolling, CoCuFeNiV

고엔트로피 합금은 4~5개 이상의 금속 원소가 동비율과 가깝게 구성되어 있는 합금이다. 높은 엔트로피로 인하여 금속간 화합물의 형성 없이 단일 고용체의 합금을 형성한다. 그 중에서 단상 FCC 고엔트로피 합금은 뛰어난 연성을 가짐으로써 제조 및 가공이 용이하므로 많은 연구가 진행되고 있지만 상대적으로 낮은 강도를 보이는 한계점을 가지고 있다. 본 연구에서는 FCC 고엔트로피 합금 설계 방식에 기반하여 다 구성원소들과 양의 혼합엔탈피 관계를 갖는 Cu를 첨가한 이중상의 FCC 고엔트로피 합금을 설계하였다. 이중상을 통한 계면 강화 효과가 기대되는 CoCuFeNi에 대해 큰 원자반지름 차이를 갖는 V를 첨가함으로써 격자 왜곡 효과를 유도하여 고강도의 이중상 FCC 고엔트로피 합금을 설계하고자 하였다. 또한 V 첨가량에 따른 미세조직 및 기계적 물성 변화를 관찰하고 기계적 물성이 가장 우수한 조성을 대표 조성으로 선택하였다. 이후 대표 조성에 대하여 압연 공정 진행 후 어닐링을 진행하여 미세조직 내 이중상의 회복 및 재결정 통해 FCC 고엔트로피 합금의 한계를 극복하고 고강도 및 연성을 가진 우수한 물성의 합금 설계를 목표로 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 첨가 원소 V의 첨가량 변화에 따른 상 및 미세조직의 변화 및 물성 변화를 확인하고, 대표 조성에 대해 냉간 압연 및 어닐링을 진행하여 미세구조 분석 및 기계적 물성을 평가하였다. 합금의 제조는 (CoCuFeNi)<sub>100-x</sub>V<sub>x</sub>(x = 0, 3, 5, 7, 10, 13 and 15 at%) 조성의 합금을 아르 용해법과 흡입 주조법을 통해 5 mm × 5 mm × 50 mm의 판상시편을 주조하였다. 시편의 미세조직 및 상분석은 SEM(JEOL JSM-6390), X선 회절분석(XRD: Panalytical)을 이용하였으며 기계적 물성의 평가는 비커스 경도 시험(Vickers indentation test, SIMADZU HMV-G21DT), 만능시험기(UTM, Universal Testing Machine)을 이용한 상온에서의 압축 시험을 진행하였다.

#### [P26-22]

**Si 함량과 열처리 조건에 따른 초경량 AlTiVCrSi 고엔트로피 합금의 상 형상 제어를 통한 기계적 특성 분석:** 강원목, 홍동성, Yusupov Dilshodbek, Abbas Muhammad Aoun, 강결찬, 홍성환, 박혜진, 김기범\*(세종대학교)

**Keywords:** 내열 고엔트로피 합금, 공정 합금, 기계적 물성, AlTiVCrSi 합금 설계

공정 고엔트로피 합금(Eutectic High-Entropy Alloy, EHEA)은 연질상과 경질상이 복합된 조직을 지니 강도와 연성의 균형을 확보하여 기존 고엔트로피 합금의 단점을 보완했을 뿐 아니라, 높은 열역학적 안정성으로 인한 뛰어난 고온 물성을 지녔기 때문에 활발한 연구가 진행되고 있다. 하지만 기존에 보고된 대부분의 EHEA는 Co나 Ni 등 고밀도 원소를 기반으로 하고 있어, 높은 비강도가 요구되는 항공우주 분야의 구조용 부품 등에 적용하기에는 중량 측면에서 제약이 따랐다. 이에 본 연구에서는 Al, Ti, V, Cr, Si 등 저밀도 원소로 구성된 경량 EHEA 시스템을 설계하여, 경량화를 달성함과 동시에 상온 및 고온에서의 기계적 강도와 가공성을 확보하고자 하였다. 본 연구의 핵심 목표는 Al-Ti-V-Cr 기반 합금에 소량의 Si를 첨가하여 밀도를 낮추고 고온 강화 및 실리사이드 석출 강화를 유도함으로써 가공성 저하 없이 상온 및 고온 강도를 최적화하는데 있다. 이를 위하여 (Al<sub>45</sub>Ti<sub>35</sub>V<sub>15</sub>Cr<sub>5</sub>)<sub>100-x</sub>Si<sub>x</sub>(x=0, 1, 3, 5, 7 at.%) 조성을 설계하고, Si 첨가에 따른 미세조직의 변화가 기계적 물성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 또한, 고온 구조 재료로서의 적합성을 평가하기 위해 다양한 조건에서 열처리를 수행하여 장시간 고온 노출에 따른 상 안정성 및 미세조직과 물성의 변화를 분석하였다. 특히 Si 함량 변화와 열처리 조건에 따른 미세조직을 관찰하고 상을 규명하였으며, 압축 시험을 통해 기계적 물성을 평가하였다. 위 실험 결과에 근거하여 Si 첨가에 따른 강화 기구를 규명하여 우수한 상온/고온 물성 밸런스를 갖는 최적의 합금 조성을 도출하고자 하였다. 설계된 조성의 합금을 아르 용해 및 흡입 주조법을 이용하여 직경 3 mm, 길이 50 mm의 봉상 시편으로 제조하였다. 제조된 시편들은 튜브형 전기로를 사용하여 Ar 분위기 하에서 900°C, 24~72시간동안 열처리를 수행하여 미세조직의 변형을 관찰하였다. 제작된 시편의 결정 구조 및 미세조직은 X선 회절 분석(XRD, Panalytical)과 주사전자 현미경(SEM, JEOL JSM-6390)을 이용하여 분석하였으며, 상세한 화학 조성 및 상 분포는 에너지분산형 분광분석(EDS)을 통해 규명하였다. 기계적 특성은 만능 재료 시험기(UTM)를 활용한 압축 시험을 통해 평가하였다.

#### [P26-23]

**CoCrNi계 중엔트로피 합금의 Al 및 Ti 첨가에 따른 부식 거동 고찰:** 강승연, 고유정, 류채우\*(홍익대학교)

**Keywords:** 중엔트로피 합금, 원소 첨가, 부식 저항성, 부동태 피막

고엔트로피 및 중엔트로피 합금은 우수한 강도-연성 균형을 바탕으로 차세대 구조재료로 주목받고 있다. 특히 FCC 단상 구조를 갖는 CoCrNi계 중엔트로피 합금은 뛰어난 연성과 가공경화능을 보이며, 극저온 환경에서도 뛰어난 파괴인성을 유지하는 것으로 보고되어 있다. 또한 염화물 환경에서 Cr이 부화된 조밀한 부동태 피막을 형성함으로써 스테인리스강을 상회하는 전기화학적 안정성을 제공하는 것으로 알려져 있다. 그러나 단상 CoCrNi계 중엔트로피 합금은 낮은 항복 강도라는 공학적 한계를 가지며, 이를 개선하기 위해 Al과 Ti를 첨가하여 L<sub>12</sub> 석출물을 형성시킴으로써 강도와 연성의 최적 균형을 확보하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 원소 첨가는 석출물의 형성과 함께 기지상의 화학적 조성 재분배를 유발하여, 부동태 피막의 형성 및 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 그럼에도 불구하고 Al 및 Ti 첨가에 따른 조성 변화가 부식 전위, 부식 전류 밀도 및 부동태 피막 안정성에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구는 제한적이다. 이에 본 연구에서는 결정립 크기를 동일하게 제어한 단상 CoCrNi 합금과 단상 (CoCrNi)<sub>94</sub>Al<sub>3</sub>Ti<sub>3</sub> 합금

을 비교 시편으로 선정하여 전기화학적 부식 거동을 정밀하게 분석하였다. 이를 통해 Al 및 Ti 첨가에 따른 기지 조성 변화가 부동태 피막의 안정성과 내식성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 본 연구 결과는 내식성이 확보된 고강도 중엔트로피 합금 조성 설계를 위한 중요한 기초 지표가 될 것으로 기대된다.

#### [P26-24]

**결정립 조대화를 이용한 CrMnFeCoNi계 고엔트로피합금의 형상기억특성 향상:** 임진수<sup>1</sup>, 정휘윤, 이제인<sup>\*</sup>(부산대학교)  
**Keywords:** High-entropy alloy, Shape memory alloy, Martensitic transformation, Grain growth

Cr<sub>20</sub>Mn<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Co<sub>35</sub>Ni<sub>5</sub> 등 일부 Ni-lean CrMnFeCoNi 고엔트로피합금에서 fcc/hcp 상간의 가역적인 마르텐사이트 변태에 의해 형상기억특성이 발현된다고 알려져 있다. 가공재 Cr<sub>20</sub>Mn<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Co<sub>35</sub>Ni<sub>5</sub> 합금의 회복 변형률은 약 2 %로 FeMnSi계 형상기억합금과 유사하나, 상용 NiTi계 합금 대비 낮은 수준이다. 결정립 조대화는 CrMnFeCoNi 합금의 회복 특성 향상에 효과적이며, 주조 후 1200 °C에서 6시간 열처리된 잉곳에서 약 4.7 %까지 회복 변형률이 증가했다는 보고가 있다. 그러나 해당 균질화 조건에서 결정립 크기는 약 700 μm 수준까지 증가하지만 주상정 조직이 잔존한다는 한계가 있다. 한편, Cr<sub>20</sub>Mn<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Co<sub>35</sub>Ni<sub>5</sub> 단결정을 [-144] 방향으로 인장하는 경우 최대 15.7 %의 높은 회복 변형률을 보였다. 이에 본 연구에서는 CrMnFeCoNi계 주조재에서 μm 수준의 주상정 조직을 뛰어넘는 결정립 조대화가 진행되는 열처리 온도를 탐색하여, 수 mm급 결정립을 갖는 미세조직을 구현하였다. 또한 인장 변형을 통해 형상기억특성 평가를 수행하고, 타 형상기억합금계와 회복 변형률을 비교하였다. 본 연구를 통해 CrMnFeCoNi계 고엔트로피합금 주조재의 형상기억특성 향상을 위한 미세조직 제어 전략을 제시하고, 형상기억합금의 상용화를 위한 기반을 마련하고자 한다.

#### [P26-25]

**Silicide Coating Formation and Diffusion Behavior in MoNbTaV Medium-Entropy Alloy during Si Pack Cementation process:** Jini Park, Daeguen Kim<sup>\*</sup>(고등기술연구원), Joonsik Park(국립한밭대학교)

**Keywords:** Refractory Complex Concentrated Alloys, Pack cementation coatings, Silicide, Kinetic parameter

Refractory Complex Concentrated Alloys (RCCAs) have emerged as promising candidates for high-temperature structural applications owing to their excellent mechanical stability and compositional complexity. However, their oxidation resistance at elevated temperatures remains a critical challenge. In this study, silicide coatings were synthesized on a MoNbTaV refractory compositionally complex alloy and its constituent pure refractory metals using a Si pack cementation process in order to comparatively investigate coating formation behavior and diffusion characteristics. Under all processing conditions, the MoNbTaV RCCA formed a single-phase (MoNbTaV)Si<sub>2</sub> silicide layer. In contrast, the pure refractory metals exhibited distinct silicide phase formations depending on their intrinsic thermodynamic stability and diffusion characteristics. The coating thickness increased with temperature and time, following parabolic growth kinetics, indicating a diffusion-controlled growth mechanism.

#### [P26-26]

**FDS (Flow Drill Screw)의 Pack cementation 코팅 후 열처리를 통한 기계적 특성 고찰:** 정소영, 양하영, 김선진(국립한밭대학교), 최정목(진합), 박준식<sup>\*</sup>(국립한밭대학교)

**Keywords:** 고온 확산코팅, 이중 소재 접합, 오스템퍼링, 내마모성, FDS

탄소중립이 사회적인 주요 과제로 대두됨에 따라 자동차 차체의 경량화 기술과 함께 이중 접합 기술에 대한 수요가 증가하고 있다. 이중 접합 기술에 사용되는 체결 요소 중 FDS(Flow Drill Screw) 나사는 주로 표면처리장 및 열처리장 소재로 제작되며, 내부식성 확보를 위해 Geomet 코팅이 적용된다. 그러나 체결 과정에서 발생하는 마찰열로 인해 코팅층 박리가 발생할 수 있으며, 반복적인 체결 및 해체 과정에서의 마찰 하중은 코팅층의 마모 및 표면 상태 변화를 유발하여 접합 신뢰성 저하의 원인이 된다. 본 연구에서는 마찰열에 의한 기존 코팅층 박리 문제를 개선하기 위해 FDS 나사에 확산 코팅을 적용하였으며, 코팅 공정으로 인한 모재 경도 저하를 보완하기 위해 추가적인 열처리를 수행하였다. 주사전자현미경(SEM)을 통해 코팅 후 열처리에 따른 코팅층의 미세조직 변화를 관찰하였고, 모재 및 코팅층의 기계적 특성 변화를 분석하여 열처리가 코팅층 안정성 및 표면 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

#### [P26-27]

**Effects of Alloying Elements on Phase Formation during Nitriding of Fe-Based Materials:** Hyun Woo Seo, Hyojin Choi, Hojeong Kim, Wooyoung Lee<sup>\*</sup>, Seungyong Lee<sup>\*</sup>, Kyuhyoung Lee<sup>\*</sup>(Yonsei University)

**Keywords:** Martensite, Austenite, phase transformation, alloying

Martensitic microstructures are widely utilized in the automotive, aerospace, and energy industries due to their exceptional strength, hardness, and wear resistance. In addition, iron nitride martensitic phases have attracted significant attention because of their potentially high magnetic properties. Martensitic phase transformation, which is necessary for the formation of martensite, is strongly influenced by the quenching temperature and the stability of the austenite phase. The martensite start temperature (Ms) is a critical parameter that determines whether the transformation occurs. In Fe-based materials, individual alloying elements play distinct roles in controlling the Ms temperature and, consequently, the phase transformation behavior. In this study, we investigate the effects of alloying elements on the martensitic transformation in Fe-based materials. By analyzing variations in the Ms temperature, we examine how these changes influence the behavior of nitride phases during nitriding.

**[P26-28]**

**철강 소재의 보론 확산 코팅에 따른 코팅층 성장 거동 및 표면 특성 고찰:** 김성진, 최지성, 정소영, 김선진, 박준식\*(국립한밭대학교)

**Keywords:** 확산 코팅, 동역학, 내마모성, Vickers 경도, 표면 특성

자동차 생산 및 타이어 생산량 증가에 따라 타이어 가황 공정에서 사용되는 철강 타이어 몰드의 사용 빈도와 반복 사이클이 증가하고 있다. 가황은 열과 압력을 동반하는 공정으로, 몰드 표면에는 오염 및 미세 결함이 누적될 수 있으며, 이는 제품 표면 결함으로 이어져 품질 저하를 유발한다. 본 연구에서는 반복 사용 과정에서 발생하는 몰드 표면의 pinhole(핀홀) 및 표면 손상 문제를 개선하기 위해 확산 코팅을 적용하고, 코팅층 형성에 따른 표면 경도 및 내마모 특성 향상을 평가하였다. 몰드용 철강의 탄소 함량 차이가 코팅층 성장 거동과 두께에 미치는 영향을 체계적으로 비교하였고, 공정 조건(온도 및 시간) 조절에 따른 코팅층 성장 동역학을 분석하였다. 코팅층의 미세조직과 두께는 주사전자현미경(SEM)으로 분석하였으며, Vickers 경도(HV) 시험을 통해 기지 및 코팅층의 기계적 특성을 평가하였다. 또한 내마모 시험을 수행하여 코팅 적용에 따른 표면 손상 억제 효과를 정량적으로 분석하였다.

**[P26-29]**

**Suppression of  $\delta$ -Phase Nucleation by Elastic Energy Penalty Enables Room-Temperature Stabilization of  $\gamma$ -CsPbI<sub>3</sub> Thin Films:** Tariq Ali\*, Pil-Ryung Cha\*(Kookmin University)

**Keywords:** CsPbI<sub>3</sub> perovskites Strain-induced metastability Substrate clamping Phase-field modeling Nucleation suppression

All-inorganic CsPbI<sub>3</sub> thermodynamically favors the non-perovskite  $\delta$  phase at room temperature, while the optoelectronically desirable  $\gamma$  phase is stable only at elevated temperatures. Recent experiments have demonstrated that substrate clamping can stabilize the metastable  $\gamma$  phase at room temperature; however, whether this stabilization originates from a strain-induced reversal of thermodynamic stability or from the suppression of transformation kinetics has remained unresolved. Here, we show that room-temperature persistence of  $\gamma$ -CsPbI<sub>3</sub> arises not from altered phase stability, but from the suppression of  $\delta$ -phase nucleation by elastic energy penalties under mechanical constraint. We employ a phase-field model coupled with classical nucleation theory to investigate  $\delta$ -phase nucleation in a realistic thin-film geometry subject to biaxial substrate clamping. First-principles chemical free energies from the literature are adopted without modification, and anisotropic single-crystal elastic constants are converted to effective isotropic moduli via Voigt–Reuss–Hill polycrystalline averaging, yielding distinct elastic parameters for the  $\gamma$  and  $\delta$  phases that capture the averaged mechanical response of polycrystalline films. Residual strain develops self-consistently from the dilatational misfit between phases under in-plane constraint. Our simulations reveal that above a critical in-plane strain of approximately 0.85%, the elastic energy penalty associated with  $\delta$  phase nucleation in the film interior exceeds the chemical driving force, rendering nucleation energetically inaccessible and causing the classical nucleation barrier to diverge. This critical strain is in excellent quantitative agreement with experimentally reported substrate-clamping strains by Steele et al. and Le et al., achieved without adjustable parameters. Furthermore, we show that the elastic penalty depends sensitively on nucleus location, with surface nucleation remaining favorable at substantially higher strains. This finding provides a direct mechanistic rationale for the effectiveness of surface passivation and capping strategies. These results establish a general theoretical framework for understanding strain-engineered metastability in halide perovskite thin films through the control of nucleation pathways.

**[P27-1]**

Three-Dimensional Nanomaterial Superlattice Assembly with Cymatics-Driven Periodic Patterning: SUNGJUN AHN, Wooyoung Shim\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Cymatics, Nanomaterial Assembly.

Analogous to the definition of crystallographic 'lattice', symmetric and periodic points comprised of accumulated building blocks can be seen as 'lattice equivalent', resulting from the material assembly. By virtue of the tailoring ability of the system, we deliberately control the pattern size and dimensionality and understand the wave mechanics as well. This approach is technologically unique in that (i) it is a method that enables the construction of three-dimensional nanomaterial assembly, which has never before been observed in the field of cymatics, and (ii) a massively parallel method that creates arrays over macroscale areas where the total patterned area is only limited by the size of the plate surface. Periodic and symmetric patterns are easily made in the Cartesian coordination system, where liquids on the centimeter scale plate are employed as a medium. We show how transparent polymer can be used as a 'three-dimensional spacer' within nanoparticle superlattices assembled, which has never before been observed in cymatics. Consequently, we expect this versatile strategy to be widely adopted by academic and industrial researchers for prototyping.

**[P27-2]**

Improving Sodium Wetting on  $\beta''$ -Alumina Using Bismuth Interlayers: Junwoo Ko, Wooyoung Shim\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Sodium- $\beta''$ -Alumina Batteries, Interfacial Wetting, Bismuth Alloy Engineering

As the importance of renewable energy grows, Sodium/ $\beta''$ -alumina(BASE) cell has been recognized as one of the most effective energy storage device because of its high specific energy, high efficiency of charge/discharge and long cycle life. For better operation of Sodium-BASE cell, poor wettability, which is caused by moisture and impurity in the BASE such as calcium, of electrolyte on liquid sodium anode should be enhanced. However, the formation of the oxide film, which is related to moisture absorbed on the BASE surface, impedes sodium dissolution, thereby hindering an accurate determination of wetting behavior. In this study, the sessile drop technique under controlled moisture and  $O_2$  environment is used as a type of an artificial Sodium-BASE cell system to study the issue of water interface formed onto the BASE. To separate water interface, BASE surface needs to be coated by metal that can form an alloy with sodium and therefore completely isolated its surface in a way that emulate the sealed and complete real cell. Bi is chosen as protect layer and sodium alloy with Bi is impervious to water yet does not interfere with sodium conductivity. By the enhanced wettability, the Sodium-BASE batteries can be operated at lower temperature with solving the safety issues and to use low cost polymeric seals.

**[P27-3]**

A Phenomenological Model for Cation-eutaxy Structures Based on ABX Compounds: Eunmin Hong, Wooyoung Shim\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** 2d materials, cation-eutaxy structures, ABX compounds

Predicting stable ternary structures has remained difficult because atomic size, bonding, and charge redistribution vary strongly with composition, limiting the reliability of conventional binary-based rules and intuition. To meet this need, we developed a phenomenological model for cation-eutaxy in A-III-V ternaries, organizing compounds by III-V network dimensionality (OD-3D) and focusing on the 2D cation-eutaxy regime. We introduced stoichiometry-weighted descriptors that combine configuration-energy-based bonding metrics, ionic-radius ratios, and ionic-potential considerations to quantify relative III-V and A-V bonding and electrostatic stabilization. Using high-throughput screening and Materials Project database, we correctly classified 35 known cation-eutaxy compounds and identified additional candidates. We then synthesized boundary-case phases  $K_2In_2P_3$  and  $Na_2In_2As_3$ , confirming the predicted cation-eutaxy structures via electron microscopy and diffraction. Overall, we expect this phenomenological model, combined with intuitive atomic features, to accelerate targeted discovery of new layered materials relevant to topochemical etching, while clarifying current limits of applicability.

**[P27-4]**

Enhancing the Long-Term Stability of  $SnO_2$ -Based Hydrogen Sensors via Thermal Aging of Noble-Metal Catalysts: Sungjae Cho, Junho Hwang, Junseok Park, Hyun-Sook Lee\*, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Hydrogen gas sensor, Long-term stability, Noble-metal, Thermal annealing

Hydrogen has rapidly emerged as an alternative energy source. However, colorless and odorless hydrogen is difficult to identify, and there is a risk of explosion. This has led to a growing demand for reliable and stable sensing systems. Among various sensing technologies, metal oxide semiconductor (MOS)-based gas sensors have attracted significant attention due to cost-effectiveness, high



sensitivity, and low power consumption. Despite these advantages, widespread implementation has been challenging due to the long-term stability and reliability<sup>[1]</sup>. In this study, we propose a strategy to enhance the long-term stability of MOS-based hydrogen sensors by employing thermal aging of noble metal catalysts. By systematically controlling the catalyst type as well as post-annealing temperature and duration, this work aims to achieve improved long-term stability in SnO<sub>2</sub>-based hydrogen sensors operating at low temperatures. The sensors were fabricated by depositing noble metal catalysts (Pd, Au, and Pt) onto SnO<sub>2</sub> nanorods with an average length of approximately 200 nm, followed by thermal aging at temperatures ranging from 200 to 250 °C for 12, 24, and 50 h<sup>[2, 3]</sup>. Experimental results demonstrate that the catalyst material plays a critical role in determining the long-term stability of the sensors. In particular, the sensor employing an Au catalyst subjected to thermal aging at 250 °C for 50 h exhibited the most stable baseline resistance during prolonged operation, with the coefficient of variation (C.V.) maintained within 10%. These findings indicate that appropriate catalyst selection combined with optimized thermal aging conditions can effectively improve the long-term stability of SnO<sub>2</sub>-based hydrogen sensors. The enhanced stability achieved through this approach enables reliable hydrogen detection across a wide range of hydrogen-related industrial applications. Furthermore, the proposed strategy shows strong potential for advanced safety applications, including early detection of thermal runaway events in lithium-ion battery systems.

#### [P27-5]

Comparative Hydrogen Sensing Analysis of Metal-Catalyzed MOS Nanorod Arrays Using a Gas Sensor Inspection System: Junseok Park, Junho Hwang, Sungjae Cho, HyunSook Lee\*, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Hydrogen gas sensor, Metal oxide semiconductor, Glancing angle deposition

Hydrogen is a key energy carrier for future carbon-neutral energy systems. However, its high flammability and explosion risk necessitate reliable and sensitive hydrogen detection technologies [1]. Metal oxide semiconductor (MOS)-based gas sensors are promising candidates owing to their cost-effectiveness, high sensitivity. MOS sensors depend on the intrinsic properties of the sensing material and the catalyst, making material and catalyst optimization a critical challenge [2]. In this study, we systematically investigate and compare the hydrogen sensing characteristics of metal-catalyzed SnO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and WO<sub>3</sub> nanostructured sensors to identify an optimized MOS platform for hydrogen detection. Nanorod arrays of SnO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and WO<sub>3</sub> were fabricated via the glancing angle deposition (GLAD) using electron-beam evaporator. Au, Pd and Pt catalyst layer were subsequently deposited onto the nanorod arrays using DC magnetron sputtering to enhance hydrogen dissociation and spill-over effects. Hydrogen sensing performance was evaluated using a gas sensor inspection system (GSIS), which enables precise control of gas concentration and electrical bias under identical operating conditions. Furthermore, sensing data obtained from the 3×3 sensor array was analyzed using machine learning to extract characteristic response patterns and improve hydrogen detection reliability. By correlating material-catalyst combinations with distinct sensing dynamics, this approach enables discrimination beyond conventional single-sensor analysis. This work provides the potential of combining MOS-based sensor arrays with data-driven analytics for intelligent gas detection applications.

#### [P27-6]

Near-field Photolithography for Nano Scale Patterning on Non-planar Substrate Using Elastomeric Photomask: Jaehyeok Seo, Wooyoung Shim\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:**

Photolithography continues to be the prevailing microfabrication technology as long as it continues to meet the resolution and yields demands at a cost that makes it economically viable. Among these requirements, the fundamental resolution challenge is diffraction of light at the edge of an opaque feature on the mask as the light passes through an adjacent clear area, which has been addressed by 'optical trick' with complex optics, but eventually compromises the cost-effectiveness. Here, we present an unprecedented near-field optical printing approach that uses chromium patterns embedded in elastomer for near-field operation, which routinely generates sub-diffraction patterns using existing hardware and prevailing 400-nm light source. Conformal contact with a substrate using an elastomeric photomask overcomes the diffraction issues of light-based printing systems, and also eliminates a depth-of-focus issue, thereby enabling photolithography for non-planar substrate which is important for future wearable electronics. Our method secures high resolution, parallel-writing and cost-effective characteristics of photolithography and provides routine patterning process for non-planar substrate, which should be widely used in academic and industrial production for electronic, optical and metamaterial applications. but secures parallel-writing and cost-effective characteristics, which should be widely used in academic and industrial production for electronic, optical and metamaterial applications.

#### [P27-7]

Silicon Anode with Achieving Structural and Electrochemical Stability Enabled by Si-C Interfacial Bonding: Junho Shin(KERI, UNIST), Jungeun Lee(KERI), Sangyong Lee(KERI, UNIST), Jungmo Kim\*(KERI)

**Keywords:** SWCNT, Silicon Anode, Si-C Interfacial Bonding, LIB

Recently, various materials are being researched to increase the energy density of lithium-ion batteries. Among them, silicon (Si) is receiving a lot of research due to its characteristics such as high theoretical capacity (4200 mAh/g), low operating voltage, and cost-

effectiveness owing to its high abundancy. However, instability of Si-based anode due to large volume expansion (400%) and low electrical conductivity limit the maximum Si content in the anode (e.g., Si-based anode in commercialized products contain only 5 wt% of Si). Various attempts have been made in order to increase the Si content; by 1) Forming SiO<sub>x</sub> or carbon layer on Si particles, [1] 2) Alloying Si with other elements (e.g., Al, Mg, Fe, etc.), [2], 3) Using nano Si particles, [3] 4) Incorporating highly stable binders [4], and 5) Incorporating nano carbon materials such as carbon nanotubes (CNTs) and graphene as conductive agents [5]. Such attempts are partly effective in enhancing the cyclic stability of the Si-based anode with increased Si content, yet the Si content is still limited, and result in other limitations, such as decrease in the theoretical capacity, high processing cost. Therefore, increasing the silicon content while maintaining the cyclic stability of the electrode remains a challenging issue. In this study, we demonstrate a free-standing, binder-free independent Si anode with superb rate capability and cyclic stability even at exceptionally high Si loading up to 98 wt% through formation of interfacial Si-C bond between Si and single walled CNTs (SWCNT). The free-standing binder-free electrodes are fabricated by a simple coating and lift-off process using a mixture of micro-Si (size~7 μm) and defect-free SWCNT dispersion. Afterwards, the electrode is exposed to rapid heating process, which results in a formation of direct interfacial Si-C bond between the Si and SWCNTs, as well as partial nanofication of the Si particles. The interfacial Si-C bond allows superb cyclic stability (83.17% @ 100 cycles) and rate capability (96.8% recovery after 10 A/g cycle) at high Si loading of 95 wt%. We believe the demonstrated result proves the importance of providing direct interfacial bonding between the active material and the conductive agent, which can be a core strategy in designing a high Si loading electrodes for advanced Li-ion battery with high energy density. [1] H. Wei et al., Journal of Alloys and Compounds, 969 (2023) [2] N. Umirov et al., ACS Appl. Mater. Interfaces 17406–17414 (2020) [3] X. H. Liu et al., ACS Nano, 1522–1531 (2012) [4] C. Luo et al., ACS Sustainable Chem. Eng, 12621–12629 (2018) [5] W. Ten et al., Energy Storage Materials, 45 412–421 (2022)

#### [P27-8]

Multi Gas Sensor Module Based Early Detection of Thermal Runaway in EV Batteries in Semi-Enclosed Parking Facilities: MinJae Kim, Min-Gi Kim, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Thermal runaway, Electric vehicle fire, Gas detection, Underground parking, Gas sensors, Full-scale test, Early warning system

Thermal runaway (TR) in EV batteries can lead to rapid fire development, and the risk becomes more critical in semi-confined environments such as underground parking garages where heat and smoke can accumulate. Despite extensive laboratory investigations, the performance of early-warning approaches has been insufficiently assessed under realistic, full-scale parking-like conditions. In this work, we investigate a gas-based early warning strategy using a multi-gas sensor array during a full-scale experiment with a production IONIQ electric vehicle. Thermal runaway was triggered by externally heating a single lithium-ion pouch cell located inside the battery pack. Custom gas sensors selective to H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, and CO<sub>2</sub> were deployed at two locations: within the battery pack and on the vehicle underbody near the chassis. All sensor outputs were time-aligned with electrical (module voltage), temperature, thermal imaging, and optical observations to reconstruct the pre-TR timeline through multi-modal sensor fusion. The internal hydrogen sensor responded first, detecting H<sub>2</sub> approximately 7 s before the module voltage drop and more than 20 s prior to underbody gas detection and visually observable off-gassing. Importantly, the underbody sensors also produced clear and repeatable warning signals without requiring access to the battery pack interior. These synchronized measurements indicate that hydrogen is the earliest and most robust gaseous precursor of impending thermal runaway, demonstrating the feasibility of non-invasive, gas-based early warning suitable for underground parking applications.

#### [P27-9]

Wet-spun synthesis of Cu-seeded SWCNT core for fabrication of uniform SWCNT-Cu hybrid fiber: SangYong Lee(KERI), Junho Shin(KERI, UNIST), Jungeun Lee, Jungmo Kim\*(KERI)

**Keywords:** SWCNT, Fiber, Cu, hybrid

As the needs for the miniaturization of electronic and electric devices grows, diverse efforts to fabricate light-weight electrical wires have been made by researchers and industries. Among various strategies, hybridization of copper (Cu) and single walled carbon nanotube (SWCNT) fiber showed advantages in ability to overcome the ampacity limitation in pure Cu wires, while providing lowered density [1]. However, the configuration of the SWCNT-Cu hybrid fiber has mostly been limited to core-shell structure because the Cu ions cannot infiltrate into the inner region of the highly packed SWCNT fibers during the conventional hybridization process. Such limitation in the configuration hinders the synergistic effect that could be expected from the hybridization, thereby requiring a new approach for the effective hybridization. In this research, SWCNT-Cu nanoparticle hybrid fiber is fabricated by using simple wet-spinning technique. The SWCNT dope used in the process is prepared by dispersing SWCNT in electron solution, resulting in negatively charged SWCNT [2]. Implementing aqueous copper sulfate solution as the coagulant result in the formation of SWCNT fiber decorated with copper oxide nanoparticles, which is reduced to Cu nanoparticles through simple annealing process. The SWCNT-Cu hybrid fiber is comprised of SWCNT bundles with diameter ranging from 20 nm to 500 nm and the voids between the bundles. We believe the SWCNT-Cu nanoparticle hybrid fiber is promising template material for the formation SWCNT-Cu hybrid wire using electrodeposition process, which will be conducted in the future.

**[P27-10]**

Quantitative Safety Diagnostics of Lithium-Ion Batteries via Early Hydrogen Evolution under Variable Heating Conditions: Mingi Kim, Min-Jae Kim, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Lithium-ion batteries safety, Thermal runaway, Early warning, Hydrogen evolution

Thermal runaway (TR) is a critical safety issue in lithium-ion batteries (LIBs), and practical early-warning metrics that can be integrated into battery management systems (BMS) remain limited under realistic heating scenarios. Hydrogen (H<sub>2</sub>) evolution has been suggested as an early-stage TR indicator; however, quantitative frameworks linking H<sub>2</sub> generation to TR onset across variable heating rates are still insufficient. Here, we report a Pd-decorated SnO<sub>2</sub> nanorod chemiresistive sensor enabling real-time, ppm-level H<sub>2</sub> detection and demonstrate its applicability as a predictive TR diagnostic under controlled heating profiles (5, 7, 10, and 15 °C min<sup>-1</sup>). H<sub>2</sub> evolution was consistently observed near ~100 °C, substantially earlier than the TR initiation temperature (~180 °C), providing a measurable mitigation window prior to catastrophic failure. A predictive threshold of ~10 ppm H<sub>2</sub> enabled early warnings spanning 5–24 min depending on heating rate. Notably, both the peak H<sub>2</sub> concentration and its rate of increase exhibited distinct transitions under accelerated heating, correlating with a reduced mitigation window and highlighting the importance of dynamic H<sub>2</sub> features beyond a single threshold. In situ mass spectrometry further confirmed the temporal precedence of H<sub>2</sub> among evolved gases, supporting its role as a robust TR precursor. These results establish a heating-rate-aware, hydrogen-based early-warning strategy and suggest a viable pathway for integrating low-ppm H<sub>2</sub> sensing into next-generation BMS for proactive TR mitigation.

**[P27-11]**

Solubility and Solution Thermodynamics ( $\Delta H$ ,  $\Delta S$ ) of Carbon in Liquid Co–Sn, Ni–Sn, Co–Ge, and Ni–Ge Systems: Adnan Yousaf(UNIST), Vijay Gupta(Institute for Basic Science), Md Mahbulul Alam(UNIST), Won Kyung Seong\*, Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science)

**Keywords:** diamond growth, Liquid metal, Solubility

Dissolution of diamond of four eutectic compositions at T about 1250 °C (Co–20.5 at% Sn, Ni–18 at% Sn, Co–25 at% Ge, and Ni–29 at% Ge) was studied. A single-crystal diamond plate (7 mm × 7 mm × 1 mm) weighed and then placed at the bottom of an alumina crucible that was filled with pellets of: Co, Sn, Ge, Ni, weighed to provide the indicated eutectic compositions. The crucible, sometimes with a lid and sometimes left open, was heated (in a Joule heating configuration that the alumina crucible resides in) to ~1250 °C and held at this temperature for a given time, followed by rapid cooling (the current to the Joule heater is turned off). Dissolved C is retained in the solidified liquid metal (SLM) with a small amount precipitated at the top surface. C in the SLM was obtained by mass balance and separately with an elemental analyzer (LECO). The carbon solubility was: 3.9 at% in Ni–Sn; 2.3 at% in Co–Ge; 1.4 at% in Co–Sn; and 0.22 at% in Ni–Ge. X-ray diffraction did not show any carbide phases after solidification, and SEM–EDS analysis was done of the surface and of samples cut with a diamond wire saw and will be presented. Temperature-dependent solubility measurements were fit to the Van't Hoff equation, from which enthalpy ( $\Delta H$ ) and entropy ( $\Delta S$ ) of solution were determined. This research is supported by IBS-R019-D1

**[P27-12]**

Angstrom-flat and Large-area Single-crystal Monolayer Graphene on Ni(111) by an Ultrafast Cyclic Synthesis Method: Yongqiang Meng(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Meihui Wang, Anirban Kundu, Yongchul Kim(Institute for Basic Science (IBS)), Minhyeok Kim(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Dongwook Kwak(Institute for Basic Science (IBS)), Alisher Sultangaziyev(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Da Luo, Won Kyung Seong\*(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST)

**Keywords:** CVD graphene, Ultra-flat graphene, Single crystal graphene, Ni(111)

We report the growth of angstrom-flat large-area monolayer single crystal graphene (SCG) films on Ni(111) foils. We have measured and will report the electrical transport and macroscopic mechanical properties of these SCG films. SCG films each having the same quality and flatness can be repeatedly grown on the same Ni(111) foil without the need for any (additional) carbon precursor being supplied, with each growth cycle taking just three minutes. We will describe an efficient method for rapidly diffusing carbon atoms from the sub-surface of a C-saturated Ni(111) foil to make, repeatedly, high-quality and super-flat monolayer SCG films. To the best of our knowledge, super-flat (wrinkle-free and step-bunching-free) single crystal (or polycrystalline) graphene films have not been achieved on metal foils, to date. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

**[P27-13]**

Solid-State Carbon Isotope Fractionation via Electromigration: Alisher Sultangaziyev(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Yongchul Kim(Institute for Basic Science (IBS)), Yongqiang Meng, Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Won Kyung Seong\*(Institute for Basic Science (IBS))

**Keywords:** Electromigration, isotope enrichment, carbon diffusion, graphite growth

Carbon isotope fractionation is commonly achieved through gas-phase or liquid-phase processes, while solid-state routes remain less

explored. Electromigration, the current-driven movement of atoms, is known for impurity redistribution and for causing reliability issues in microelectronics, yet its potential for solid-state isotope fractionation has thus far not been reported. Here, we investigate solid-state carbon isotope fractionation driven by electromigration in high-carbon-solubility metals, specifically nickel (Ni) and cobalt (Co). Ni and Co bars loaded with mixed carbon isotopes ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) were subjected to direct, or alternating current, at elevated temperatures. Under direct current, graphite segregated out exclusively on one side of the bar for all samples, indicating directional carbon transport induced by electromigration. Raman spectroscopy and TOF-SIMS analysis of the precipitated graphite in the 800 to 1000 °C region revealed consistent enrichment of  $^{12}\text{C}$  relative to  $^{13}\text{C}$  across all initial isotope ratios. These observations are supported by density functional theory (DFT) calculations and kinetic Monte Carlo (KMC) simulations. This work demonstrates a new solid-state approach to carbon isotope fractionation and provides insight into the effect of electromigration on carbon transport. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

#### [P27-14]

Layer-by-Layer Fabrication of Graphene-Fullerene Nanostructures: Korlan Duisenova(Institute for Basic Science, UNIST), Madi Arsakay(Institute for Basic Science), Bekbolat Mamyrbekov(UNIST), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science, UNIST), Sun Hwa Lee\*(Institute for Basic Science, UNIST)

**Keywords:** Graphene, polyhydroxylated fullerene, Layer-by-layer assembly, hybrid materials

We report bottom-up fabrication via the electrostatic Layer-by-Layer (LbL) assembly of: positively charged, polyethyleneimine-exfoliated graphene (graphene-PEI) and negatively charged polyhydroxylated fullerene (PHF). Zeta potential analysis showed high colloidal stability and strong opposite surface charges (+38.3 mV for graphene-PEI and -36.7 mV for PHF) within the pH range of 6.5-8.0, facilitating a robust, charge-driven assembly process. Macroscopic visual evidence, including a distinct color transition from blue to dark brown, confirmed the linear growth of the films over 200 bilayers, with the total thickness increasing proportionally to the number of deposition cycles. Morphological characterization via SEM, AFM, and TEM showed a layered architecture uniformly decorated with PHF nanoclusters. In an attempt to enhance the structural integrity and electrical potential of the films, thermal annealing was employed to remove/carbonize PEI. XPS and Raman spectroscopy validated this transformation, showing a significant increase in carbon content from 33.8% to 63.7% and characteristic graphitic D, G, and 2D bands. Nanoindentation shows a progressive decoupling from the substrate as film thickness increased. For the 200-bilayer sample, we measured an effective reduced modulus ( $E^*$ ) of ~17 GPa and hardness ( $H$ ) of ~0.35 GPa, values which are highly consistent with porous carbonized multilayer systems. This work is supported by Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

#### [P27-15]

Sonication-Assisted Pd Nanogap Networks with Serpentine Geometry for Stable Hydrogen Cycling: Joonho Lee, Sangkil Lee, Jiwoo Hong, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Serpentine, Palladium nanogap, Stress control, Capacitive hydrogen sensing

We report a serpentine-patterned Pd nanogap thin-film hydrogen sensor that improves response linearity and device-to-device consistency by effectively managing hydrogenation-induced stress. In continuous Pd thin films, hydrogen absorption causes volumetric expansion, but the associated stress is not sufficiently released within the film. As a result, the sensor response can remain near a maximum level up to a certain hydrogen concentration and then drop abruptly, leading to poor linearity and unpredictable behavior. To address this, we introduce a serpentine nanogap architecture in which the active Pd layer is patterned into multiple interconnected lines. This geometry provides additional mechanical compliance and enables more efficient stress relaxation during hydrogenation, thereby suppressing sudden, localized failure and promoting a more gradual and predictable response. In addition, distributing the sensing area into many line segments helps reduce the impact of local randomness, resulting in smaller response variation between sensors compared with continuous films. Using a capacitive readout at room temperature, the serpentine-patterned devices achieve a 3 ppm detection limit with fast and reversible response/recovery times of ~20–30 s, and maintain stable signal amplitudes over 100 cycles across a broad hydrogen concentration range.

#### [P27-16]

Early Safety Monitoring for Energy Storage Systems via Ultra-Low Methane Detection Using Bi-Layer Catalyst-Functionalized  $\text{SnO}_2$  Nanorod Arrays Gas Sensor: Jongbeom Park, Kyung-Ho Park, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Metal oxide semiconductor, Methane gas sensor,  $\text{SnO}_2$  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 ( $\text{CH}_4$ ). Among the gases released during battery fault conditions and thermal runaway, methane ( $\text{CH}_4$ ) 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  $\text{CH}_4$  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<sub>2</sub> 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<sub>4</sub>, 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.

#### [P27-17]

Hydrogen Emission Feature Mapping for Quantitative Diagnosis of Mechanical Crack Severity in Cylindrical Lithium-Ion Batteries: Kyung-Ho Park, Kwang-young Yoo, Hyun-Sook Lee, Wooyoung Lee\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Cylindrical cell, Hydrogen sensor, Real-time diagnostics, Battery safety

Mechanical cracks in cylindrical lithium-ion batteries accelerate degradation and cause serious safety risks, yet their early detection remains challenging using conventional diagnostic methods. Crack-induced damage is accompanied by hydrogen (H<sub>2</sub>) generation, which is significantly enhanced under rapid cycling conditions-particularly during discharge-due to localized temperature rise and electrochemical reactions. In this study, we present a hydrogen-based sensing approach to quantitatively diagnose crack-induced damage in cylindrical lithium-ion cells using a Pd-SnO<sub>2</sub> based hydrogen sensor with high sensitivity and selectivity. Real-time hydrogen emission behaviors were systematically analyzed as a function of crack size, cycling conditions, and sensor positions. Both the maximum hydrogen concentration and emission rate exhibit strong correlations with crack severity, enabling quantitative discrimination of mechanical damage. Feature-based analysis of hydrogen signals establishes a multidimensional diagnostic space that clearly separates crack severity and cycling conditions. These results demonstrate that hydrogen emission fingerprints provide a physically meaningful and practical early-warning strategy for real-time battery degradation monitoring and safety diagnostics.

#### [P27-18]

Additive Assisted Stoichiometric Growth of Phase Pure CsPbBr<sub>3</sub> Single Crystals for Perovskite Light Emitting Diodes:

Sol Lee, Soo Young Kim(고려대학교)

**Keywords:** Perovskite

Lead halide perovskites have emerged as promising materials for next generation light emitting applications due to their exceptional optoelectronic properties. However, solution processed polycrystalline perovskites encounter significant challenges related to device efficiency, stability, and scalability. In contrast, single-crystal perovskites exhibit superior electrical conductivity, enhanced stability, and ultralow trap-state densities. These advantages have enabled the demonstration of high-efficiency light-emitting diodes (LEDs). Nevertheless, all-inorganic CsPbX<sub>3</sub> perovskites remain relatively underexplored due to the large solubility disparity between cesium- and lead-based precursors and the fabrication complexity arising from this disparity. In this work, we introduce a hypophosphorous acid (HPA) additive strategy to address the solubility imbalance in the conventional synthesis of CsPbBr<sub>3</sub> single crystals. By incorporating HPA into the precursor solution, we alleviate the solubility disparity between CsBr and PbBr<sub>2</sub>, improving crystallization efficiency. Unlike the conventional approach that requires excess PbBr<sub>2</sub> to compensate for precursor imbalance, our method enables the growth of CsPbBr<sub>3</sub> single crystals from a stoichiometric 1:1 precursor ratio, significantly reducing excess Pb consumption. Without the additive, attempts to grow single crystals from a 1:1 precursor solution resulted in the formation of a Cs-rich secondary phase, Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub>. Gradual introduction of HPA suppresses the formation of Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub> and enables the growth of pure-phase CsPbBr<sub>3</sub> single crystals. Mechanistically, HPA promotes controlled nucleation and crystallization of CsPbBr<sub>3</sub> and enhances the solubility of CsBr in the precursor solution, and completely evaporates during annealing, leaving no residual species. This additive-assisted approach provides a simple and effective route to improve precursor utilization and phase purity in the growth of all-inorganic perovskite single crystals. We further fabricated perovskite LEDs by converting CsPbBr<sub>3</sub> single crystals into thin films via single-source thermal evaporation. The resulting devices exhibited strong green emission centered at 520 nm, along with enhanced emission uniformity and improved charge transport characteristics.

#### [P27-19]

Chemical-Free and Fully Dry Patterning of Graphene Quantum Dots via Ion-Beam-Assisted Thermal Processing: Jun Mok Ha\*, Sunmog Yeo, Junhyeok Seo, Jun Kue Park, Chan Young Lee, Yong Seok Hwang, Jae Kwon Suk, In Mok Yang, Hye Ran Jeon, Cho Rong Kim, Myung-Hwan Jung(Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI))

**Keywords:** Graphene quantum dots, Ion-beam-assisted fabrication, Fully dry and chemical-free process, Patterned growth, Nanostructured materials

We report a chemical-free and fully dry fabrication strategy for the synthesis and patterning of graphene quantum dots (GQDs) using an ion-beam-assisted thermal process. Unlike conventional solution-based or chemical routes, the proposed method relies solely on ion-beam irradiation or ion sputtering followed by thermal annealing, without the use of any liquid chemicals, solvents, or etchants during GQD formation. In this approach, metal catalytic species introduced by ion-beam or sputtering are transformed into nanoscale catalyst

particles through thermal dewetting. Subsequent annealing under a hydrocarbon atmosphere induces the selective nucleation of GQDs, while the catalysts are gradually removed at high temperature, resulting in high-purity GQDs with minimal residual metal contamination. Importantly, spatially selective ion irradiation enables direct patterning of GQDs, allowing controlled growth only in predefined regions without additional lithographic or wet-chemical processes. The entirely dry and chemical-free nature of this process offers high compatibility with semiconductor manufacturing and minimizes environmental and contamination concerns. Furthermore, by adjusting process parameters such as catalytic ion dose and annealing conditions, the growth behavior of carbon nanostructures can be further extended toward other allotropes, including carbon nanotubes. This work demonstrates a versatile ion-beam-based nanofabrication platform for patterned carbon nanomaterials and provides a promising pathway toward scalable and eco-friendly manufacturing of functional nanostructures.

#### [P27-20]

One-Step Fabrication of Porous Laser-Scribed Graphene for Self-Powered NO<sub>2</sub> Gas Sensing Applications: Chil-Hyoung Lee, Sungmin Youn, Min-Joon Park\*(Korea Institute of Industrial Technology(KITECH))

**Keywords:** Laser-Scribed Graphene, Porous Nanostructure, Self-Powered Gas Sensor, NO<sub>2</sub> Detection

Laser-scribed graphene (LSG) is attracting significant attention as a functional nanocarbon material due to its eco-friendly synthesis, low fabrication cost, and excellent electrical properties. In this study, we report a facile one-step fabrication of highly porous LSG and its application to a self-powered chemiresistive NO<sub>2</sub> gas sensing platform operating at room temperature. The microstructural and chemical characteristics of the porous LSG were systematically analyzed using SEM, HR-TEM, Raman spectroscopy, XRD, XPS, and Hall measurements, along with thermographic infrared imaging to evaluate thermal and electrical behaviors. The fabricated LSG exhibited high electrical conductivity with a low sheet resistance of approximately 23 Ω/sq. The sensor demonstrated reversible, selective, and highly sensitive responses to NO<sub>2</sub> without external thermal activation. Notably, the intrinsically formed three-dimensional porous network contributed to stable sensing performance over 42 days and enabled ppb-level NO<sub>2</sub> detection even under mechanical strain. These results indicate that one-step porous LSG fabrication offers a promising route toward scalable, low-power nanomaterial-based gas sensing devices and highlights its potential in nano-convergent sensor applications.

#### [P27-21]

Time-dependent Nucleation of hBN Layers on Liquid Copper: Sungwhan Kim(Institute for Basic Science (IBS)), Yongqiang Meng(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Sun Hwa Lee, Won Kyong Seong\*(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST)

**Keywords:** Hexagonal boron nitride (hBN), Copper, CVD Synthesis

5-cm diameter multilayer single crystal hBN was reportedly grown on molten copper (Cu) [1]. We have explored hBN growth on molten copper by melting Cu (111) foil on tungsten substrate at 1100 °C. XPS revealed a 1:1 stoichiometry of boron and nitrogen, while Raman spectroscopy and TEM were used to further investigate the structure of the hBN grown on Cu. For an exposure of 15 min to amino borane, we find the largest islands formed in the center of the molten Cu region, while smaller islands were on the periphery. Longer time exposure to amino borane resulted in full-area coverage of a uniform hBN layer across the melted Cu foil. This work is in progress. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1). [1] Xin Zhang et al., Mater. Today, 2025, 88, 168

#### [P27-22]

The Effect of Heat Treatment on FAU Zeolite Templated Carbon: Madi Arsayay(Institute for Basic Science (IBS)), Korlan Duisenova, Alisher Sultangazyev(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Sun Hwa Lee, Won Kyung Seon(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science (IBS), 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 °C increments from 800 to 1000 °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 °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 2θ ≈ 6.5°, with no peaks at 2θ ≈ 26.4–26.6° or 42.3–44.5° (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

#### [P27-23]

**Fabrication of Isotropic Thermal Composites with Segregated Filler Networks of MWCNT-based Core-shell Fillers:** Jungeun Lee(KERI), Junho Shin(KERI, UNIST), Sangyong Lee, Jungmo Kim\*(KERI)

**Keywords:** carbon nanotube, core-shell structure, isotropic thermal composite

Recently, electronic devices used in the mobility and electronic fields are required to be compact, lightweight, and multifunctional. As device integration advances, the increased heat generation within these systems can significantly impair performance and reduce operational lifespan, thereby underscoring the critical importance of efficient thermal management. Furthermore, with the rapid development of wearable technologies, material flexibility has emerged as a key characteristic. In this context, polymer-based composite materials incorporating high-thermal-conductivity fillers have attracted considerable attention due to their mechanical flexibility and low density. Among various thermal conductive fillers, carbon-based materials have been extensively investigated due to their superior thermal conductivity and lower density compared to conventional alternatives (i.e., metal, ceramic). In particular, carbon nanotubes (CNTs) possess a well-defined hexagonal lattice structure composed of  $sp^2$ -hybridized C=C bonds and exhibit a high aspect ratio. These unique structural attributes endow CNTs with exceptional thermal and mechanical properties. However, strong van der Waals interaction between CNTs hinder their uniform dispersion within polymer matrices, posing a significant challenge in composite fabrication [1]. Even if the van der Waals forces are mitigated, enabling the uniform dispersion of CNTs within the composite, their inherently high aspect ratio presents an intrinsic limitation, inevitably inducing anisotropic thermal properties in the composite. In this study, core-shell structured fillers were fabricated by encapsulating spherical particles with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) to enhance uniform filler dispersion within the composite and to mitigate the anisotropy induced by the intrinsic structure of MWCNTs. To establish isotropic thermal properties, the fabricated fillers were incorporated into the matrix, promoting the formation of a 3D thermal conduction network. PS/MWCNT core-shell particles were fabricated by encapsulating polystyrene (PS) particles with non-oxidized MWCNTs through a dropwise coagulation process, followed by their integration into a polydimethylsiloxane (PDMS) matrix. To enhance isotropic thermal conductivity, hybrid composites were fabricated by introducing pristine MWCNT into the PDMS+PS/MWCNT system. The pristine MWCNT served as an interconnection bridge between the particles. Thermal conductivity analysis demonstrated that a hybrid composite with a specific mixing ratio achieved an isotropic ratio (i.e.,  $\kappa_{in-plane}/\kappa_{through-plane}$ ) of 0.86, approaching the ideal isotropic value of 1. In comparison, PDMS+MWCNT composite with same amount of MWCNT inclusion exhibited highly anisotropic property: isotropic ratio of 2.0. This study highlights the potential of MWCNT-based core-shell hybrid fillers in enhancing the thermal transport properties of polymer composites for advanced thermal management applications. References [1] Z. Han et al., Progress in Polymer Science, 36, 914-944 (2011).

#### [P27-24]

**Macroscale Mechanical Properties of Single-Crystal Graphene:** ANIRBAN KUNDU(Institute for Basic Science (IBS)), Seyed Kamal Jalali(University of Trento, Queen Mary University of London), Minhyeok Kim(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Meihui Wang, Da Luo, Sun Hwa Lee(Institute for Basic Science (IBS)), Nicola M. Pugno(University of Trento, Queen Mary University of London), Won Kyung Seong\*(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST)

**Keywords:** Single Crystal Graphene, High Tensile Strength, Near-ideal Stiffness, Chiral Dependency, Damage Evolution

'High end' values of Young's modulus ( $E$ ) and particularly, of tensile strength ( $\sigma$ ), have been reported for monolayer graphene: but for strength (particularly) there are only reports for samples in the micrometer length scale.[1] We are studying the macroscale mechanics of single crystalline adlayer-free monolayer graphene (SCG) by polymer thin film-assisted tensile testing to 'extract' the values of  $E$  and  $\sigma$  for SCG.[2] We will present the mechanical properties of centimeter-scale SCG using 'dog bone' samples with edges aligned along specific crystallographic directions. For SCG samples with zigzag (zz) edges  $E = 1.11 \pm 0.04$  TPa and  $\sigma = 27.40 \pm 4.36$  GPa, with failure strain ( $\epsilon_f$ ) of  $6.01 \pm 0.92\%$ . Samples with armchair (ac) edges had  $E = 1.01 \pm 0.10$  TPa,  $\sigma = 20.21 \pm 3.22$  GPa, and  $\epsilon_f = 3.69 \pm 0.38\%$ , while chiral samples displayed intermediate values:  $E = 0.75 \pm 0.12$  TPa,  $\sigma = 23.56 \pm 3.42$  GPa, and  $\epsilon_f = 4.53 \pm 0.40\%$ . The limiting strength ( $\sigma$ ) of SCG (the stress at which the first crack occurs) was extracted from the linear region of SCG-PC stress strain curves (just prior to each curve becoming non-linear). The SCG was synthesized using chemical vapor deposition (CVD) on single-crystal Cu(111) foils and the dog bone samples were tensile loaded with a custom-built 'float-on-water' (FOW) tensile system that allows for in situ observation of crack initiation and propagation. Quantized fracture mechanics (QFM) analysis indicated edge defects range from several to tens of nanometers in size, and are likely influenced by chirality and notch angle. Weibull statistical analysis projects the strength of A4-sized SCG sheets would range between 13.67 and 18.43 GPa, depending on chirality, with the assumption that failure is initiated at edge defects (which has been the case for all dog bone specimens, numbering now in the many hundreds, that we have tensile loaded to fracture—cracking initiates at the edges of the gauge section). These findings highlight the remarkable mechanical performance of macroscale SCG, establishing it as a promising material for a wide range of applications, including aerospace, flexible



electronics, and straintronics. This work is supported by the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1). References [1] Changgu Lee, Xiaoding Wei, Jeffrey W. Kysar, and James Hone. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 2008, 321(5887), 385-388. [2] Bin Wang, Da Luo, Zhancheng Li, Youngwoo Kwon, Meihui Wang, Min Goo, Sunghwan Jin, Ming Huang, Yongtao Shen, Haofei Shi, Feng Ding, and Rodney S. Ruoff. Camphor enabled transfer and mechanical testing of centimeter scale ultrathin films. *Advanced Materials*, 2018, 30(28), 1800888.

#### [P27-25]

Phosphorus Vacancy Engineering of P-terminated MoP for Selective Hydrogen Peroxide Electrosynthesis: Jieun Seo, Hyeuk Jin Han\*(Sungshin Women's Univ.)

**Keywords:** MoP, Topological semimetal, Vacancy engineering, Phosphorization

Controlling the atomic environment is central to modern catalysis. Beyond composition, this requires engineering surface termination, atomic coordination, and defect chemistry to modulate the local electronic states responsible for adsorption. We present a controlled chemical vapor deposition (CVD) strategy that stabilizes P-terminated MoP with tunable phosphorus-vacancy concentrations ( $V_P$ ). This model platform elucidates how termination-specific orbital hybridization dictates adsorption energy scaling and reaction pathway selectivity in the two-electron oxygen reduction reaction ( $2e^-$  ORR). Electrochemical measurements show that the sample annealed at  $700^\circ\text{C}$  for 2 hours exhibited the highest  $2e^-$  ORR selectivity and efficiency, attributed to the optimization of defect concentration and surface electronic structure. By quantitatively linking surface electronic structure to selective peroxide formation, we establish a general framework for transition-metal phosphides in which termination and defect control provide routes to overcome the traditional activity-selectivity trade-off. References [1] Han, H. J. et al. Topological Metal MoP Nanowire for Interconnect. *Advanced Materials* 35, (2023). 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).

#### [P27-26]

해수 환경 하 전기화학적 CO<sub>2</sub> 환원 촉매의 거동 분석: 이미경\*, 전우진(인천대학교)

**Keywords:** 이산화탄소, 해수, 촉매

산업혁명 이후 대기 중 이산화탄소 농도가 급격히 증가함에 따라, 탄소중립 달성을 위한 전 세계적인 요구가 지속적으로 확대되고 있다. 이러한 맥락에서 전기화학적 이산화탄소환원 반응( $e\text{CO}_2\text{RR}$ )은 CO<sub>2</sub> 배출 저감을 넘어 고부가가치 화학제품으로의 전환을 가능하게 하는 기후 변화 대응 및 탄소중립 실현의 핵심 기술로 주목받고 있다.  $e\text{CO}_2\text{RR}$  기술의 산업적 적용을 위해서는 촉매 성능 뿐 아니라 전해질 선택 또한 중요한 요소로 작용한다. 특히 기존  $e\text{CO}_2\text{RR}$  연구는 주로 담수 기반 전해질을 사용해 왔으나, 담수 자원의 한계와 환경적 부담을 고려할 때 풍부하게 존재하는 해수를 전해질로 활용하는 접근은 대규모 공정 적용을 위한 현실적인 대안으로 제시되고 있다. 그러나 해수는 다양한 이온을 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  등) 동시에 포함하는 복합 전해질로 각 이온은 촉매 종류에 따라 상이한 방식으로 작용하며, 경우에 따라  $e\text{CO}_2\text{RR}$  성능 향상 또는 촉매 열화를 유도할 수 있다. 따라서 해수 전해질을 효과적으로 활용하기 위해서는 촉매에 따른 해수 이온의 선택적 상호작용과 반응 거동에 대한 체계적인 이해가 필수적이다. 본 연구에서는 다양한 CO<sub>2</sub> 전기환원 촉매를 활용하여 해수 전해질 조건에서의 반응 가능성과 촉매별 반응 거동을 정밀 분석하고, 해수 이온과 촉매 활성점 간 상호작용에 따른 성능 차이의 원인을 규명하였다.

#### [P27-27]

Controlled Growth of Single-Crystal CoSi Nanowires on Plasma-Treated Si Substrates: 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 chiral topological semimetal with a non-centrosymmetric B20 structure, has attracted interest for nanoscale interconnects due to its unconventional transport properties and thermal stability. However, controlled growth of 1D CoSi nanostructures remains challenging, as conventional methods typically yield low-density, randomly oriented nanowires. Here, we demonstrate high-density growth of single-crystal CoSi nanowires on Si substrates through substrate engineering. Mixed Ar/SF<sub>6</sub> plasma pretreatment was applied before chemical vapor deposition (CVD) to modify the Si surface and promote uniform nucleation. This resulted in dense CoSi nanowire arrays with a density of  $\sim 22.6$  wires/ $\mu\text{m}^2$ —over two orders of magnitude higher than on untreated Si. Structural characterization confirms that the nanowires are phase-pure B20 CoSi with a preferential [2 1 1] growth direction. Our findings offer a scalable route for CoSi nanostructure synthesis, facilitating the integration of 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).

## P28 : 재료분석

Room 3층 로비, 4월 30일

### [P28-1]

Atom Probe Tomography for Molecular-level Food Chemistry: Structural and Chemical Analysis of Monosodium Glutamate: Seok-Woo Hong, I-Jun Ro, Won-Hyoung Lee, Se-Ho Kim\*(Korea Univ.)

**Keywords:** Atom probe tomography, Monosodium glutamate

Atom probe tomography (APT) enables three-dimensional elemental mapping with near-atomic resolution, but its application in food science has been limited. In this study, we assess the feasibility of applying APT to food chemistry by using monosodium glutamate (MSG), both with and without a ribonucleotide additive, as a representative model system. Analyses conducted using multiple instruments (LEAP 4000, 5000, and 6000 HR) show consistent and reproducible results. By precisely adjusting electrostatic field conditions, we improve mass spectral quality and suppress desodiation effects, which allows the observation of small yet reproducible sodium clustering. Quantitative compositions are determined from elemental and low-mass fragment peaks under a fixed C:N:O ratio of 5:1:4, and the CO to CO<sub>2</sub> cluster-ion ratio is employed as an internal indicator of field strength. Overall, the findings confirm that APT is capable of quantitatively mapping organic salt systems at the nanoscale and suggest its potential for investigating more complex, hydrated, and multiphase food materials.

### [P28-2]

Bias-free Electrostatic Force Separation and Visualization via F-D Curve Analysis: Yeyeong Kim, Junseong Seo, Changhyo Sun, Minyoung Yoon, Minseung Park, Hongseok Kim, Owoong Kwon, Junoh Shim, Sunkook Kim(Sungkyunkwan Univ.), Yunseok Kim\*(Sungkyunkwan Univ.)

**Keywords:** F-D curve, electrostatic force, bias-free, AFM, KPFM, machine learning

As electronic devices continue to scale down with increasing integration density, local electrostatic inhomogeneities play an important role in device performance. Kelvin probe force microscopy (KPFM) is commonly used to probe such local electrostatic properties. However, conventional KPFM inherently requires an applied electrical bias, which can alter the electronic state of the device. In this study, we first established a comprehensive Force-Distance (F-D) curve measurement methodology by utilizing a polystyrene (PS) reference sample. Based on this established protocol, we introduced a newly defined parameter extracted from atomic force microscopy (AFM) F-D curves to separate electrostatic force contributions from mechanical interactions without applying an additional electrical bias. Analysis of amorphous TiO<sub>2</sub> thin films confirmed that electrostatic force induces significant deformations in F-D curve parameters, specifically the baseline, jump-to-contact (JTC), and adhesion force. In particular, the proposed F-D curve method exhibited improved spatial resolution compared to conventional KPFM. Furthermore, when combined with machine learning based analysis across diverse material systems, this framework demonstrated the potential for bias-free material classification and advanced nanoscale property mapping. These results provide essential guidelines for the accurate evaluation of nanomechanical properties in various oxide thin film systems.

### [P28-3]

Geometry of a Non-Centrosymmetric 'Truncated Octahedron' Diamond Particle: Md Mahbubul Alam(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Yongjin Choi(KAIST), Adnan Yousaf(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Won Kyung Seong(Institute for Basic Science (IBS)), Seunghwa Ryu(KAIST), Rodney S. Ruoff\*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST)

**Keywords:** diamond, geometry, microscopy, volume

We measured and analyzed the geometry of a ~2.2 mm single crystal diamond particle (SCDP; made by HPHT by the vendor) and sold (in large quantities of such particles) as a high-quality diamond grit. This particular SCDP is found to be an irregular truncated octahedron with 14 faces (8 hexagonal, 6 quadrilateral), 24 vertices, and 36 edges (14F, 24V, 36E). Scanning Electron Microscopy (SEM) and bright- and dark-field Optical Microscopy (OM) were used to measure surface morphology and edge lengths (36E), and 3D Laser Microscopy was used for high-resolution optical profilometry (facet roughness and step heights). The Cartesian coordinates of the 24V were obtained by constrained nonlinear optimization that minimizes 36E length residuals. Inter-facet angles calculated from the 24V positions shows 8 {111} and 6 {100} facets and Laue X-ray back scatter diffraction also shows 8 {111} and 6 {100} facets. We are attempting X-ray Computed Tomography (CT) of this SCDP at the time of abstract submission. The volume of this SCDP (5.207 mm<sup>3</sup>) obtained by measuring its mass (18.303 mg) and dividing by diamond's crystallographic density (3.515 g/cm<sup>3</sup>) is a useful constraint on the digital twin. We find this SCDP is non-centrosymmetric, and the center of mass (COM) and the "lopsidedness" can teach about some possible aspects of the HPHT growth. We will present volume values calculated by different methods at KIM in Jeju, including how measurements with a handheld Mitutoyo micrometer can yield a set of distances that provide volume values close to 5.20 mm<sup>3</sup>. One of our strong objectives is to establish a protocol to "know well" the geometry of any SCDP prior to studies of how that SCDP

(partially) dissolves by interrupted-dissolution studies: Which facets and regions of the SCDP dissolve first, and at what rates? And for studies of attempted new diamond growth: the prior shape is important to know relative to SCDP geometry after the post-growth experiments. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

#### [P28-4]

APT를 이용한 Ni/NiO계면에서의 새로운 산화상 형성 가능성 분석: 조모현, 김세호\*(Korea Univ.)

**Keywords:** Ni/NiO 계면, APT, 열 산화

일반적으로 금속 Ni는 열산화 과정을 통해 NiO 산화층이 형성되는 것으로 알려져 있다. 그러나 산화 과정 중 Ni/NiO 계면에서 비화학양론적 산화물 또는 중간 산화상(예:  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ )이 형성될 가능성이 제기되어 왔음에도, 계면 영역을 원자 단위에서 직접 관측한 실험적 증거는 매우 제한적이다. 특히, 중간상의 실제 여부와 형성 조건(온도 및 유지 시간)에 대한 체계적인 규명은 이루어지지 않았다. 본 연구는 Ni/NiO 계면이 단순한 이중상 구조인지, 혹은 조성 구배 또는 중간 산화상이 존재하는 복합 구조인지를 원자 단위에서 규명하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 Ni wire를 다양한 온도 및 유지 시간 조건에서 열산화시킨 후, 계면 영역을 atom probe tomography(APT)로 분석하였다. APT를 통해 계면 부근의 Ni:O 조성비를 정량적으로 도출하고, 공간적 조성 분포를 3차원적으로 재구성함으로써 새로운 산화상의 존재 가능성을 평가하고자 하였다.

#### [P28-5]

Current Challenges in Atom Probe Tomography and its Outlook for  $\text{SrTiO}_3$  Perovskites: Christian Krug, Se-Ho Kim\*, Yeon-Ha Jo(Korea Univ.)

**Keywords:** Atom probe tomography, perovskites,  $\text{SrTiO}_3$

Atom probe tomography (APT) is a three-dimensional compositional mapping technique that provides quantitative insight into nanoscale chemistry. By combining field evaporation with mass spectrometry, APT enables reconstruction of atomic positions and identification of individual atoms. Recent instrument advances, including improved laser system, now expand accessible materials space (i.e. perovskite). These capabilities are particularly valuable for resolving oxides variation, interfacial chemistry, and compositional gradients. Perovskites oxides present unique challenges for APT because specimens are prone to fracture due to field-driven stresses. With the introduction of deep-UV-assisted laser pulsing, APT is increasingly capable of probing fundamental processes in perovskites, including degradation mechanisms and performance-limiting chemical distribution. In this experiment, we use LEAP 6000 XR to compare simultaneous laser-and-voltage pulsing with conventional laser-pulsed APT from earlier-generation systems. By analyzing trace-element segregation and impurity distributions at phase and grain boundaries, we aim to identify chemical signatures that correlate with functional and structural properties in  $\text{SrTiO}_3$ -based perovskites. These experiments will test the practical limits and provide deeper insight into the atomic-scale analysis of perovskites oxides.

#### [P28-6]

Real-Time Observation of Skyrmion Dynamics in  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  under External Stimuli: Sejin An(Seoul National Univ.), Beom Tak Kang, Jun Sung Kim(POSTECH), Hyobin Yoo\*(Seoul National Univ.)

**Keywords:** 반데르발스 마그넷, 투과전자현미경

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  $\text{Fe}_3\text{GaTe}_2$  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.

#### [P28-7]

In-situ TEM Analysis of Ferro-rotational Order Switching in  $1\text{T-TaS}_2$ : Huseung Lee, Hyobin Yoo\*(Seoul National University)

**Keywords:** In-situ TEM, 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  $1\text{T-TaS}_2$ , 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.

#### [P28-9]

**하나로(HANARO) 중성자 회절 연구: 잔류응력측정장치(RSI) 및 빔타임 이용 방법:** 갠태욱, 채호병\*, 우완측 (한국원자력연구원)

**Keywords:** 중성자, 회절, 재료분석

본 발표는 대한민국 유일의 고선속 중성자 연구로인 하나로(HANARO)의 잔류응력측정장치(RSI)를 활용한 연구 활동을 소개하고, 빔타임 제안서 제출 절차를 안내한다. 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-셰러(Debye-Scherrer) 기하학 구조와 위치 민감형 검출기(파장 1.46 Å, 4° 커버리지)를 사용하여 2θ = 25–100° 범위의 회절 중성자를 측정한다. 이러한 설정은 용접부와 같이 수 센티미터 두께의 시편에서도 신뢰성 있는 잔류응력 분석을 가능하게 한다. 또한, 인장기나 환경 챔버와 같은 부대 장치를 활용하여 응력이나 온도 변화 조건 하에서 회절 피크를 실시간으로 모니터링할 수 있다. 최근 연구는 용접 및 적층 제조 금속의 잔류응력 매핑에 집중되어 있으며, 격자 간격의 변화를 추적하여 훅의 법칙(Hooke's law)을 통해 잔류응력을 계산한다. 아울러 피크 분석은 미세조직 정보를 제공하여, 유물의 산화막 두께 비파괴 측정부터 배터리 내 원소의 위치별 정량 분석에 이르기까지 다양한 응용 분야를 지원하고 있다. 하나로 중성자 빔라인을 이용하기 위해 이용자는 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. 자세한 정보는 <https://www.kaeri.re.kr/hanaro> 에서 확인할 수 있다.

#### [P28-10]

**고주파 열처리에 따른 중탄소강의 표면 경도, 미세조직 및 잔류응력 간의 상관관계 연구:** 김안나\*(에이치엘만도)

**Keywords:** 잔류응력, 중탄소강, 미세조직

고주파 열처리는 중탄소강의 표면 경도와 피로 성능을 향상시키는 표면 열처리 공정으로 널리 사용된다. 그러나 열처리 후 발생하는 잔류응력은 강재의 기계적 특성이 큰 영향을 미치며, 과도한 잔류응력은 균열 및 파손을 유발할 수 있다. 기존 연구들은 고주파 출력에 따른 경도와 미세조직 변화 분석은 있었으나, 잔류응력 분포와 미세조직, 경도 간의 명확한 상관관계에 대한 이해는 부족했다. 본 연구는 S45C강을 대상으로 고주파 출력 조건에 따른 표면 경도, 미세조직 및 잔류응력 분포의 변화를 분석하여 최적 조건을 도출하고자 한다. 실험 결과, 고주파 출력의 증가에 따라 표면 경도와 경화층 깊이가 증가하는 경향을 보였으며, 그에 따른 잔류응력 분포도 변화하였다. 고주파 출력이 높은 조건에서는 마르텐사이트 변태가 이루어지고, 완전한 인장 잔류응력이 형성되었다. 중간 출력 조건에서는 미세조직의 균일성이 떨어지고 높은 인장 잔류응력이 발생하였다. 낮은 출력 조건에서는 경화층이 얇고 잔류응력의 크기도 작았다. 이 연구는 고주파 출력에 따라 경도 및 미세조직의 변화가 잔류응력 분포에 미치는 영향을 규명하였으며, 출력 조건에 따른 미세조직 변화와 잔류응력 분포의 상관관계를 밝혔다. 이를 통해 고주파 열처리 공정의 최적화 및 피로 민감 부품의 열처리 조건 개선을 위한 기초 자료를 제공한다.

#### [P28-11]

**글로우 방전 발광 분광 분석법(GD-OES)을 이용한 비급랭 주철의 화학 성분 정량 분석 표준화 연구:** 김재학\*, 김현정, 김동인, 이종민(한국화학융합시험연구원), 추성진\*(유로사이언스)

**Keywords:** 비급랭주철, 글로우방전분광분석기, 표준화, GD-OES, 시험방법

비급랭 주철(Non-chilled Cast Iron)은 조직 내에 존재하는 조대 흑연(Coarse Graphite)의 영향으로 인해 일반적인 스파크 방전 발광 분광 분석법(Spark-OES) 적용 시 분석 정밀도 확보에 한계가 있다. 이로 인해 비급랭 주철의 화학성분분석은 원소별로 탄소·유황 분석기(Combustion method), 유도결합 플라즈마 분광 분석법(ICP-OES) 및 중량법(Gravimetric Analysis) 등의 화학적 습식 분석법에 의존해 왔다. 그러나 습식 분석법은 긴 분석 시간(TAT)과 높은 유지비용이 소요될 뿐만 아니라, 전처리 과정에서 발생하는 폐산으로 인한 환경 부하 및 작업자 안전 문제, 숙련도에 따른 결과값의 편차 등 다수의 취약점을 내포하고 있다. 이에 본 연구에서는 KS D ISO 14707 규격을 준용하여, 시료의 미세조직에 민감도가 낮은 글로우 방전 발광 분광 분석법(GD-OES)을 활용한 비급랭 주철의 건식 분석 표준화 기법을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 GD-OES를 이용한 분석 결과의 객관성과 신뢰성을 확보하기 위해 다음과 같은 최적화 과정을 수행하였다. 첫째, 비급랭 주철 분석에 특화된 정밀도를 확보하기 위해, 기존 검량선에 다양한 함량의 비급랭 주철 표준물질(RM)을 추가하여 검량선 최적화 및 매트릭스 보정을 실시하였다. 둘째, 스퍼터링(Sputtering) 효율을 극대화하기 위해 방전 전압, 전류 및 아르곤 가스 압력 등 핵심 매개변수를 조정하여 최적의 방전 조건을 도출하였다. 마지막으로 표준화된 시험 조건하에서 동일 시료에 대한 반복 시험을 실시하여 분석의 반복성(Repeatability)과 재현성(Reproducibility)을 통계적으로 검증하였다. 연구결과 최적화된 GD-OES 분석법은 기존 습식 분석법 대비 분석 시간을 대폭 단축하면서도 유사한 수준의 정밀도를 나타내었다. 본 표준화 연구는 비급랭 주철의 성분 분석에 있어 시험자의 숙련도에 의한 오차를 최소화하고 건식 분석의 적용 범위를 확대함으로써, 향후 주물 산업 전반의 품질 관리 효율성을 제고할 수 있는 근거 자료로 활용될 것으로 기대된다.

**[P28-12]**

Second-Layer Graphene Growth Atop Graphene/Cu(111) : NIKETA AVINASH KUMAR(Institute for Basic Science (IBS)), Yongqiang Meng(Institute for Basic Science (IBS), UNIST), Lee Sun Hwa, Pavel Bakharev(Institute for Basic Science (IBS)), Rodney S. Ruoff \*(Institute for Basic Science (IBS), UNIST)

**Keywords:** Graphene, hexa-peri-hexabenzocoronene, hybridized carbon network, liquid metal, and polycyclic aromatic hydrocarbon.

We investigate a strategy for second-layer graphene growth on single-crystal monolayer graphene (SCG) supported on Cu(111). Hexa-peri-hexabenzocoronene (HBC) is deposited in our attempt to grow an additional graphene layer. Liquid gallium is introduced atop the HBC-on-SCG-Cu(111). Gallium may facilitate C-H activation and promote inter-HBC C-C coupling, potentially into an extended  $sp^2$ -hybridized carbon network. This work aims to establish whether PAH-templated assembly combined with a liquid metal coating can provide a viable pathway toward controlled second-layer graphene formation. We appreciate support from the Institute for Basic Science (IBS-R019-D1).

**[P28-13]**

저손상 TEM 분석플랫폼을 활용한 CsPbBr<sub>3</sub>의 미세구조 특성 고찰: 권다미, 박경진, 문수현, 서윤경, 유정호, 박윤창\*(나노종합기술원), Zeeshan Tahir, 김용수(울산대학교)

**Keywords:** CsPbBr<sub>3</sub>, TEM, Low Dose, Low Voltage, Cooling holder, CMOS-Camera

CsPbBr<sub>3</sub>는 우수한 광학적 특성과 전하 수송 특성을 지니는 무기 할라이드 페로브스카이트 소재로, 광전자 소자 및 차세대 반도체 응용 분야에서 주목받고 있다. 그러나 제조 조건에 따른 결정 구조의 변화와 미세구조적 불균일성은 소재의 구조적 안정성과 성능 신뢰성에 직접적인 영향을 미친다. 이에 따라 나노 스케일에서의 정밀한 구조 분석이 요구되지만, 일반적인 재료분석 분야 투과전자 현미경(TEM, 200 keV)을 이용한 관찰중에 전자빔에 의한 심한 시편의 구조변화 손상이 발생하는 것이 빈번히 보고 되고 있다. 전자빔에 약한 소재를 손상 없이 분석하기 위해서는 시편준비 부터 관찰까지 세심한 주의가 필요하다. 본 연구에서는 TEM 관찰중에 손상을 줄이기 위한 방법으로 low-dose, 저가속전압(80 keV), 냉각홀더(-160°C) 이용한 시편냉각, CMOS-type Camera(Metro, Gatan) 사용하여, CsPbBr<sub>3</sub>의 상 동정(Phase Identification)과 결정학적 특성을 분석한 사례를 공유하고자 한다. 본 연구는 영상·회절·분광 기법을 통합한 고분해능 TEM 분석 플랫폼을 통해 전자빔 손상이 빈번했던 소재의 구조 특성을 체계적으로 규명할 수 있음을 보여주며, 나노종합기술원의 전자현미경 기반 분석 인프라가 다양한 소재의 구조-특성 상관관계 분석에 효과적으로 활용될 수 있음을 제시한다.

**[P28-14]**

사용후핵연료 심층처분 혐기성 Sulfide 지하수 환경에서 Ni-Cu 합금의 부식저항 특성평가: 장준현\*, 김가영, 박선영, 우정현(한국원자력연구원)

**Keywords:** Ni-Cu 합금, 혐기성 지하수, 부식, 심층처분, 처분용기

원자력발전의 안정적이고 지속적인 활용을 위하여, 발전 후 발생하는 사용후핵연료를 지하 500미터 이상의 안전한 암반층에 영구 격리하는 심층처분방식에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 심층처분방식은 암반층으로 구성된 천연방벽과 처분용기/완충재/덮개층 재료로 구성된 공학적방벽시스템(Engineered Barrier System, EBS)으로 구성되어 있다. 그 중에서 처분용기는 사용후핵연료를 격리하는 첫 공학적방벽재료로서 처분안전성에 큰 영향을 미친다. 용기재료는 우수한 기계적 강도 뿐만 아니라 혐기성 지하수에 대한 뛰어난 내부식성이 담보되어야 한다. Ni-Cu 합금은 황화물 환경에서 내부식성이 뛰어난 재료로 현재 정유시스템에 많이 적용되고 있다. 하여 Ni-Cu 합금의 내부식성 평가를 통하여 처분용기 적용성을 평가하고 최적의 합금조성을 도출하고자 한다. 실제 현장 부식환경을 모사하기 위하여 한국원자력연구원 지하연구시설에서 채취한 지하수를 기반으로 0.1M NaCl과  $5 \times 10^{-5}$ M의 Na<sub>2</sub>S를 첨가하여 모의 혐기성 지하수를 제조하였다. Ni-Cu 합금은 Al을 첨가하여 기계적 강도를 개선한 Monel을 기반으로, 다양한 Al 함유량의 Ni-Cu 합금을 사용하여 내부식성을 평가하였다. 모든 Ni-Cu 합금이  $I_{corr}$  값이 SKB에서 사용하고 있는 Cu에 비해 10-1배 이상 낮아지는 것을 확인하였다. 반면에 Cu의  $E_{corr}$ 은 -0.9 V(vs. SCE)인 반면에, Ni-Cu 합금은 -0.7 V 근방으로 소폭 높아지는 것을 확인할 수 있었다. Cu와 Ni-Cu 합금 모두  $E_{pit}$ 은 -0.2 V 근방에서 확인되었다. 본 연구결과는 Al을 첨가하여 기계적 강도를 개선한 Ni-Cu 합금이 Cu에 비해 더욱 우수한 내부식성을 보여줌으로써 처분용기의 높은 적용 가능성을 보여주고 있다. 본 연구는 2025년도 과학기술정보통신부 한국연구재단의 나노·소재기술개발사업의 지원을 받아 수행되었다(RS-2025-25441247).

**[P28-15]**

Enhancement of TEM Analysis for Air-Sensitive Metallic Materials using a Portable Vacuum Transfer System with In-situ Plasma Cleaning and Thermal Control: Jaeyoung Eo, Hee-Suk Chung,, JaeHyuck Jang \*(한국기초과학지원연구원)

**Keywords:** 공기 민감 소재

Characterizing air-sensitive metallic materials and energy storage electrodes requires stringent environmental control to prevent oxidation and surface degradation. In this work, we present a portable integrated device designed to bridge the gap between sample preparation, such as Focused Ion Beam (FIB), and Transmission Electron Microscopy (TEM) observation without atmospheric exposure. The developed system features a high-vacuum main housing and an integrated heating module capable of maintaining the sample at a constant temperature of 130-140 °C during transfer and storage. This thermal control is crucial for preventing the adsorption of residual moisture and stabilizing the specimen's surface state. Following the FIB process, the specimen is loaded into the seating unit and hermetically sealed under vacuum using a dedicated valve unit. A key advancement of this device is the integrated plasma

generation module. By applying low-vacuum plasma pre-treatment immediately before TEM insertion, we successfully eliminated hydrocarbon contaminants that typically lead to carbon build-up under electron beam irradiation. The combination of vacuum-tight transfer, precise temperature maintenance at 130-140 °C, and in-situ plasma cleaning effectively suppressed image drift and resolution loss, enabling high-fidelity lattice imaging and accurate chemical analysis of pristine metallic structures.

#### [P28-16]

**고강도 고탄소 강의 구오스테나이트 결정립계 현출 및 관찰방법:** 김학현, 이정훈\*(포항산업과학연구원)

**Keywords:** 고탄소강, 구오스테나이트결정립계, 펄라이트, 마르텐사이트

고강도 고탄소 펄라이트 강은 교량용 와이어나 철도 레일과 같이 극한의 환경에서 사용되는 핵심 구조재료로, 그 기계적 성질과 파괴 저항성을 결정짓는 근본적인 요소인 구오스테나이트 결정립 크기(Prior Austenite Grain Size, PAGS)의 제어가 매우 중요합니다. PAGS는 최종 미세조직인 펄라이트의 패킷 및 블록 크기를 규정하는 지표로서 인성 및 수소 취성 저항성, 강도, 잔류응력에 직접적인 영향을 미치지만, 고탄소강의 특성상 냉각 후 조밀하게 형성되는 펄라이트 라멜라 조직이 일반적인 Nital 에칭시 PAGB를 관찰하기 힘들기 때문에 이를 선명하게 관찰하는 과정은 많은 어려움이 있다. 따라서 입계에 편석된 미세 불순물 원소와 선택적으로 반응할 수 있도록 피크린산 포화 용액의 온도와 계면활성제 농도를 정밀하게 제어하는 특수 에칭 기법이 필수적이며, 본 연구에서는 이러한 최적의 현출 조건을 정립함으로써 고강도 고탄소강의 PAGB를 관찰 하고자 한다.

#### [P28-17]

**FIB를 이용한 Si기반 P/N 접합소자의 STEM-EBIC 시편준비 방법:** 박경진, 차호일, 이명근, 권다미(나노종합기술원), 권지희, 안병선(한국에너지기술연구원), 배태성(한국기초과학지원연구원), 박윤창\*(나노종합기술원)

**Keywords:** STEM-EBIC, PN junction, FIB damage

전자현미경을 이용한 재료구조 분석은 이미 원자단위의 미세구조, 성분분석, 전자구조를 직접적으로 관찰하고 해석할 수 있는 수준에 이르렀으며, 최근에는 -160도에서 +1,000도까지 온도에 따른 미세구조, 성분분석, 결정구조의 변화를 실시간 원자단위 분석이 가능한 수준에 올랐다. 하지만, 반도체소자의 직접적인 특징인 전기적 특성을 간접적인 현미경적인 미세구조와 동시에 측정하는 것은 아직 도전적인 일이다. 특히 공간적인 제약이 있는 TEM 내에서의 전기적 측정을 위해서는 하드웨어적으로는 특수 홀더, 전용 MEMS 칩, 전자/홀 검출기가 요구되며, 무엇보다도 시편제작을 위한 FIB장비와 제작과정을 발행하는 시편손상에 대한 이해가 실험의 성공에 반드시 필요하다. 본 연구에서는 Ga-FIB를 이용한 STEM-EBIC 시편제작 과정 중에서 30 keV 고에너지 Ga<sup>+</sup>이 결정질 Si 소자에 이온 주입됨으로 발생하는 Ga-doped Si의 비정질화 손상과 소자의 I-V 특성의 관계를 실험으로 측정하였으며, 이를 통해 5 keV 이하의 Ga-FIB를 사용함으로써 다이오드 소자의 PN 접합 프로파일을 STEM-EBIC을 활용하여 영상화 할 수 있었던 과정을 공유하고자 한다.

#### [P28-18]

**5% Cr Hot Work Die Steel의 V 및 Mo 합금원소에 따른 미세조직 제어와 표면처리에 따른 내열피로 특성 거동 :** 김주엽, 윤국태\*, 홍창완, 이락규(대구기계부품연구원), 윤상일, 최지석(삼기), 손동민(세아창원특수강)

**Keywords:** Hot work Tool Steel, Thermal fatigue, Heat checking, MC/M6C Carbide, Microstructure, Nitriding, Hard Coating

5% Cr martensitic hot work die steel에서 V 및 Mo 첨가와 제조공정 및 열피로시험 후 탄화물 변화를 고찰하고 forging 조건에 따른 미세조직이 열피로 균열거동에 미치는 영향을 파악하였다. 또한 개발 GRST(Grain Refined Slurry Technology) 공정효과인 용탕 온도 저감( $\Delta T$  조정)을 통한 열피로 균열 감소 효과를 실험적으로 증명하였다. 일반적으로 합금원소 V 첨가는 미세하고 균일한 MC 탄화물 석출로 matrix 조직의 결정립 성장을 억제하고 경도 향상 효과가 있으며, Mo는 템퍼링 저항성을 높여 고온 강도 유지에 기여하는 것으로 알려져 있다. 이러한 합금원소 첨가량에 따른 생성탄화물이 열피로 특성에 미치는 영향을 고찰하였으며, 먼저 반복 열응력에 의한 표면 열화와 미세조직, 그리고 열피로 균열의 상관관계는 1000 cycle 열피로 시험 후 마이크로 비커스 경도시험기를 활용하여 표면 경도분포를 확인하였으며, 미세조직을 관찰한 결과 표면부는 열피로시험편의 반복 열에 비노출된 내부조직(또는 as-tempered 상태)에 비하여 carbide가 조대화되고, 열간공구강 종류에 따라 초기 경도 대비 약 140-230 Hv 정도까지 표면 경도가 저하되는 구간이 나타나 thermal degradation(softening) 정도의 차이가 확인되었으며, 반복 열노출에 의한 최저 경도구간과 1000cycle 이후 최대 열피로 균열길이는 유사하게 나타났다. 그리고 동일 조건의 열피로시험에서 경도저하 정도가 작은 비교재 2(ESR급) 및 개발재 VD-2 공구강의 경우 열피로에 의한 표면 열화 정도가 적고 carbide 조대화 경향이 작아 열피로 균열 지표도 양호한 것으로 판단할 수 있었다. 제조공정 및 열피로 시험에 의한 탄화물 거동 관찰을 위해 개발재 VD-1 및 multi-axial forging을 적용한 개발재 VD-2 공구강과 비교재 2중에 대한 탄화물 정량분석을 실시한 결과, 비교재 1(VD급) 소재의 경우 초기 조대한 MC 탄화물이 열피로 cycle 증가에 따라 조대화되고 면적분율도 증가하는 것이 확인되며, 개발재 VD-1 및 개발재 VD-2와 비교재 2(ESR급) 소재의 경우 상대적으로 미세한 Cr-rich M23C6, Mo-rich M6C 탄화물 분율이 커지는 경향을 나타냈다. 특히 개발재 VD-2와 비교재 2(ESR급) 공구강의 경우 3000cycle 열피로 시험 이후에도 미세한 M6C 탄화물의 면적분율이 상대적으로 높으며 조대 MC 탄화물 면적분율의 변화는 미미하였다. 이는 적정한 Mo 첨가에 의해 M6C 탄화물 석출을 유도하고, 이를 통한 열 cycle 증가시 조대한 MC 탄화물의 성장을 억제하는 효과를 가져오는 것으로 판단된다. 그리고 martensite matrix의 PAG size가 미세하고, substructure(sub-grain)의 random 집합조직의 확보가 열간공구강의 내열피로 특성에 유효함을 확인하였다. 그리고 열간 공구강의 수명향상을 위해 적용가능한 질화처리(산질화, 카본질화, 가스질화, 이온질화)와 coating처리(TiAlN)를 실시하고 최대 열노출 온도에 따른 열피로 특성을 분석하여 금형 수명에 미치는 유효성을 확인하였으며, 그 중 TiAlN coating 적용재는 표면 heat checking 발생

이 지연되어 균열 수가 가장 적고 최대 노출온도 700°C 및 610°C 각 열피로 시험조건 모두 최대 균열 길이도 작아 내열피로 특성이 우수한 것으로 나타났다. \* Acknowledgements 본 연구는 2023년 산업통상부 국제공동기술개발사업(P0025666)과 2020년 산업통상부 소재부품기술개발사업(전략핵심소재기술개발, 20010988)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### [P28-19]

**표면처리에 따른 알루미늄 용탕과 다이캐스팅용 공구강의 반응성 연구:** 이탁균\*, 윤국태, 김주엽, 김용유, 김봉고(대구기계부품연구원), 이수안(유림테크)

**Keywords:** Die-casting Mold, Surface-treated tool steel, Melt-Out, Intermetallic compound

본 연구에서는 열간 금형강에 적용된 표면처리 종류에 따라 용융 알루미늄 합금과의 반응 거동 및 용손 특성을 비교 분석하였다. 용손 실험을 위해 표면처리가 적용된 금형 시편의 구성은 가스질화(gas nitriding), 이온질화(ion nitriding), 산질화(oxy-nitriding), 카본질화(carbon coating nitriding), 경질피막처리 TiAlN 코팅과 그리고 무처리 STD 61 등 여섯 가지 유형의 시편을 준비하여 실제 주조 환경과 유사한 700°C의 ALDC12 알루미늄 합금 용탕에 일정 시간 침적하여 용손 실험을 수행하였으며, 표면처리 금형재와 용융 알루미늄 합금과의 반응한 시료를 대상으로 표면부 중심으로 용손층 깊이 분석과 화학적 반응에 의해 생성된 금속간화합물 형성 거동을 평가하였다. 표면처리 종류에 따른 용손 발생 표면층 깊이 측정 결과, 일부 표면처리층은 용융 알루미늄 합금과의 직접적인 반응을 억제하여 금속간화합물층의 형성을 지연시키는 효과를 보였으나, 열적 안정성이 낮은 표면처리층의 경우 국부적인 파손 이후 용손현상(melt-out)이 급격히 진행되는 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 표면처리층의 화학적 안정성이 용손 거동에 영향을 주는 인자임을 확인하였다. 사 사 : 이 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 산업기술국제협력-글로벌산업기술협력센터(공동연구R&D) 기술개발사업(P246800137)의 지원을 받아 수행된 연구임.

#### [P28-20]

**Phase-Resolved Redox Hysteresis Dynamics on Carbon Steel Probed by Operando FORC-ESM:** SuMin Lee, Chenxi Wang, Hyekyung Choi, Seungjae Heo, Yunseok Kim\*(Sungkyunkwan Univ.)

**Keywords:** electrochemical strain microscopy, first-order reversal curves, polarization dynamics, ferrite-pearlite

Electrochemical phenomena at metal-electrolyte interfaces are inherently heterogeneous, yet conventional techniques such as cyclic voltammetry (CV) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) provide only ensemble-averaged responses, obscuring localized redox mechanisms. Atomic force microscopy (AFM)-based techniques, including electrochemical AFM (EC-AFM) and AFM-scanning electrochemical microscopy (AFM-SEM), have emerged to address this limitation through nanoscale spatial resolution. However, these methods remain constrained in providing comprehensive operando characterization of local electrochemical reversibility. In this study, electrochemical strain microscopy (ESM) combined with first-order reversal curve (FORC) analysis reveals pronounced electrochemical heterogeneity between ferrite and pearlite on carbon steel. Ferrite exhibits significantly stronger hysteretic responses, indicating enhanced local redox activity, as validated by bias-dependent ESM and current measurements. This approach enables quantitative, nanoscale characterization of polarization dynamics. By correlating microstructure and local hysteresis, this work establishes a robust framework for understanding corrosion initiation and enabling correlative scanning probe studies of complex electrochemical interfaces.



## P29 : 생체재료

Room 3층 로비, 4월 30일

### [P29-1]

3D-Printed Functional Hydrogels for Hemostatic Diabetic Wound Healing: Kimin Park, Sejoon Bang, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

**Keywords:** tissue regeneration, hemostasis, 3D Printing

Chronic foot ulcers are a major complication of diabetes and remain difficult to treat due to impaired hemostasis and delayed tissue regeneration. From a materials perspective, effective wound dressings must provide rapid bleeding control while maintaining structural stability and biological compatibility. In this study, we designed a 3D-printed functional hydrogel patch aimed at addressing these requirements through polymer network engineering and composite reinforcement. The hydrogel system was based on a biocompatible polymer matrix designed to form a hydrated and compliant network suitable for wound contact. To enhance both structural and functional performance, nanoclay and DNA were incorporated into the polymer network. The nanoclay interacted physically with the polymer chains, acting as a reinforcing component that improved network integrity and resistance to deformation. In addition, the nanoclay functioned as a carrier for DNA, enabling its stable incorporation within the hydrogel matrix without compromising printability. The combined use of nanoclay and DNA allowed the formation of a composite network in which physical interactions contributed to both mechanical reinforcement and functional stabilization. Rheological analysis of the composite bioink revealed shear-thinning behavior and rapid structural recovery, which are essential for extrusion-based 3D printing. These properties enabled stable filament formation and high shape fidelity during printing. Using a 3D bioprinter, the bioink was fabricated into wound-conforming hydrogel patches with controlled geometry and uniform thickness. The printed constructs maintained their structural features after printing and during handling, indicating sufficient mechanical robustness for practical application. Cytocompatibility of the hydrogel patches was evaluated using fibroblasts to assess their suitability for contact with soft tissue. The results showed favorable cell viability, suggesting that the composite hydrogel environment supports basic cellular functions relevant to wound healing. In parallel, the swelling behavior and structural stability of the hydrogels under physiological conditions were examined, confirming that the reinforced network retained its integrity without excessive deformation. Hemostatic performance was examined using whole blood assays. Upon contact with blood, the hydrogel patches induced rapid clot formation while exhibiting low hemolytic activity, demonstrating effective and blood-compatible hemostatic behavior. This response is attributed to the porous hydrogel structure and the presence of nanoclay, which together promote blood component adsorption and clot stabilization. Such material-driven hemostatic performance is particularly relevant for diabetic wounds, where coagulation is often compromised. The in vivo performance of the 3D-printed hydrogel patches was further evaluated using diabetic wound models. Application of the patches resulted in faster hemostasis at the wound site and a marked increase in wound closure compared to untreated controls. The treated wounds showed improved healing progression over time, indicating that the material design supports both immediate bleeding control and subsequent tissue repair. In summary, this work presents a 3D-printed composite hydrogel patch that integrates polymer network design, nanoclay reinforcement, and DNA-based bioactivity within a single material system. By balancing printability, mechanical stability, and biological performance, the developed hydrogel patch offers a promising materials-based strategy for the treatment of diabetic wounds.

### [P29-2]

Sundew-Inspired 4D Platform for Minimally Invasive Bone Cancer Therapy and Bioadhesive Bone Regeneration: Seo Jong Hwa, Sejoon Bang, Hyeong Seok Kang, Chan Ho Moon, Ju Yeong Gwon, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

**Keywords:** bioinspiration, 4D-printed SMP, aDNA, Photothermal therapy, tissue regeneration

Osteosarcoma, the most prevalent primary malignant bone cancer in adolescents and young adults, remains difficult to cure due to frequent local recurrence after resection, the creation of large and irregular bone defects, and insufficient vascularization that compromises regeneration. Conventional reconstructive options such as metallic implants or bone cements provide mechanical stability but lack the ability to conform to patient-specific geometries, support vascularized bone healing, or eradicate residual tumor cells. These limitations highlight the urgent need for multifunctional biomaterial platforms capable of uniting structural adaptability with therapeutic and regenerative functions. Inspired by the prey-capturing strategy of *Drosera capensis*, we developed a bioinspired theragenerative scaffold based on 4D-printed shape memory polymer (SMP) structures with adhesive DNA (aDNA) immobilization. This platform integrates three levels of biomimicry: (i) motion mimicry, through temperature-dependent shape memory and NIR-triggered recovery that enable minimally invasive implantation and defect conformability; (ii) surface mimicry, achieved by aDNA immobilization via PDA-based anchoring, which provides strong interfacial adhesion and stable coating; and (iii) functional mimicry, realized by aDNA immobilization, which supplies osteoinductive, angiogenic, antioxidative, and immunomodulatory cues. Importantly, physicochemical analyses (FT-IR, cryo-TEM, DLS, zeta potential, XPS, TGA/DSC, TMA) confirmed successful and stable immobilization of aDNA without impairing the bulk thermo-mechanical properties of the SMP framework, while slightly enhancing shape fixity through

interfacial interactions dominated by the PDA domain. The multifunctional potential was validated through systematic biological evaluations. In vitro, aDNA immobilization significantly enhanced osteoblast adhesion, proliferation, and differentiation, as well as calcium mineralization, compared with pristine SMP or PDA-based immobilization alone. aDNA also conferred strong antioxidative capacity, reducing intracellular ROS and improving cell survival under oxidative stress, while simultaneously promoting M2 macrophage polarization to create a pro-regenerative environment. Furthermore, endothelial cell assays with HUVECs demonstrated that aDNA@SMP markedly improved migration, wound closure, and capillary-like tube formation, with NIR-induced mild hyperthermia amplifying early angiogenic responses and supporting stable vascular network development. In addition, NIR-triggered photothermal heating enabled complete and reproducible shape recovery of pre-deformed scaffolds, providing a mechanism for defect-conformal self-fixation under minimally invasive conditions. In vivo, the therapeutic efficacy of the platform was confirmed in an osteosarcoma xenograft model, where aDNA@SMP(+) scaffolds induced localized photothermal ablation of residual tumor tissue and significantly improved survival without systemic toxicity. In parallel, in a rat calvarial critical-size defect model, aDNA@SMP(+) scaffolds promoted substantial new bone formation, enhanced trabecular thickness, reduced trabecular separation, and facilitated neovascularization, as validated by  $\mu$ CT, histological staining, and immunohistochemistry. These outcomes confirm that aDNA immobilization and NIR-triggered mild hyperthermia act synergistically to achieve both osteogenesis and angiogenesis while maintaining the structural and shape-memory integrity of the SMP platform. Collectively, this study demonstrates the first aDNA immobilization-based, NIR-responsive 4D-printed SMP scaffold that embodies motion, surface, and functional mimicry. By enabling minimally invasive implantation, precise defect conformability, localized tumor ablation, and vascularized bone regeneration, this platform represents a transformative theragenerative strategy to overcome the dual challenges of recurrence prevention and critical-sized bone defect repair in osteosarcoma treatment.

### [P29-3]

3D-printed Multifunctional Hydrogel Implant with Human Nail-derived Keratin for Anticancer Treatment and Promoting Chronic Wound Healing Through Photothermal Therapy: Seojoon Bang, Hyeong Seok Kang, Chan Ho Moon, Jong Hwa Seo, Ju Yeong Gwon, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

**Keywords:** 3D printing, Multifunctional hydrogel, Tissue regeneration, Photothermal therapy, Bio-derived biomaterial

Chronic wounds and skin cancer continue to pose substantial clinical challenges due to impaired tissue regeneration, persistent inflammation, and the limited efficacy of conventional therapeutic strategies. Post-surgical skin defects, in particular, are frequently associated with delayed healing and a high risk of tumor recurrence, highlighting the necessity for multifunctional platforms capable of simultaneously eradicating residual malignant cells and promoting regenerative repair. To address these limitations, this study introduces a multifunctional 3D-printed hydrogel implant that integrates photothermal therapy with bioactive skin regeneration within a single engineered construct. The hydrogel scaffold was fabricated using a keratin derived from human nails. Keratin was selected for its intrinsic biocompatibility, structural similarity to native extracellular matrix (ECM) components, and ability to support cell adhesion and proliferation. By leveraging these biological properties, the scaffold was designed to provide a favorable microenvironment for tissue remodeling while maintaining structural integrity post-implantation. The extrusion-based 3D printing process enabled precise fabrication of patient-specific architectures, ensuring conformal contact with irregular wound sites and enhancing localized therapeutic performance. To introduce therapeutic functionality, MXene nanosheets were incorporated into the hydrogel matrix. MXene is recognized for its high photothermal conversion efficiency and strong near-infrared (NIR) absorption capability. Under NIR irradiation, the MXene-integrated hydrogel generated localized hyperthermia, facilitating targeted photothermal ablation of cancer cells while minimizing damage to surrounding healthy tissues. This photothermal effect offers a non-invasive strategy for eliminating residual tumor cells following surgical excision, thereby reducing the likelihood of recurrence. In addition to anticancer functionality, bioactive DNA molecules were embedded within the hydrogel network to enhance regenerative capacity. DNA has been reported to modulate cellular signaling pathways associated with proliferation, angiogenesis, and inflammatory regulation. Its incorporation aimed to stimulate keratinocyte and fibroblast activity, promote neovascularization, and accelerate extracellular matrix deposition, all of which are critical for efficient wound closure and tissue restoration. The synergistic combination of MXene-mediated photothermal therapy and DNA-driven regenerative stimulation establishes a theragenerative platform capable of dual therapeutic action. Comprehensive physicochemical characterizations, including morphological and structural analyses, confirmed the stable integration and homogeneous dispersion of MXene and DNA within the keratin matrix. Mechanical and swelling evaluations further demonstrated that the hydrogel maintained structural stability and hydration properties suitable for dynamic skin environments. Biological assessments validated the multifunctional performance of the implant. In vitro studies revealed effective photothermal tumor cell ablation under NIR exposure, alongside enhanced cell viability and proliferation in regenerative conditions. In vivo experiments using diabetic wound and tumor models demonstrated significant tumor suppression, accelerated wound closure, improved re-epithelialization, and reduced inflammatory infiltration compared with control groups. Collectively, this multifunctional 3D-printed keratin-based hydrogel implant integrates biocompatibility, localized photothermal therapy, and bioactive regeneration into a single customizable platform. These findings suggest its strong potential as a translational strategy for simultaneous cancer treatment and advanced regenerative wound care.

**[P29-4]**

**3D-Printed Biofunctional GelMA-Based Layered Scaffolds for Cartilage Defect Repair:** SUNHWA LEE, Ju Yeong Gwon, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

**Keywords:** 3D-printed scaffold, Cartilage regeneration, Layered hydrogel, Nanomaterial-assisted delivery

Cartilage defects caused by trauma, aging, or degenerative diseases represent a persistent clinical challenge due to the limited intrinsic healing capacity of cartilage tissue. This limitation arises from the avascular, aneural, and low-cellularity characteristics of cartilage, which restrict cell migration and nutrient transport. As a result, spontaneous regeneration is minimal and current clinical outcomes remain unsatisfactory. Therefore, the development of biomimetic scaffolds capable of providing both mechanical support and a favorable biological microenvironment is essential for effective cartilage regeneration. Three-dimensional (3D) bioprinting has emerged as a promising approach for cartilage tissue engineering, with gelatin methacryloyl (GelMA) and alginate being widely used as bioinks. However, when used as single-component systems, these materials often exhibit insufficient mechanical strength and limited ability to regulate inflammatory microenvironments. To address these limitations, we developed a composite bioink by incorporating a synthetic nanoclay and a naturally occurring polyamine into a GelMA matrix. Furthermore, two different concentrations of the composite bioink were employed to construct a multilayered scaffold with layer-specific properties, thereby mimicking the zonal architecture of native articular cartilage. The multilayered scaffold was fabricated using extrusion-based 3D printing, enabling precise control over scaffold geometry, pore structure, and layer-specific composition. While GelMA provides a cell-friendly hydrogel environment, its mechanical properties are inherently limited. To overcome this drawback and to introduce functional bioactive molecule delivery, a synthetic nanoclay with high surface charge and strong electrostatic interaction potential was incorporated into the hydrogel matrix. Through this design, the nanoclay functioned both as a mechanical reinforcement agent and as a carrier for bioactive molecules. A naturally occurring polyamine known to promote chondrogenic differentiation, immune modulation, and enhanced cell viability was combined with the nanoclay via electrostatic interactions. This interaction enabled sustained and localized release of the polyamine within the hydrogel scaffold. As a result, the composite configuration improved the structural integrity and stability of the printed constructs while achieving controlled release behavior without additional chemical modification. The mechanical properties, degradation behavior, and release kinetics of the composite hydrogel scaffolds were systematically evaluated. In addition, their biological performance was assessed in vitro using adipose-derived stem cells, with a focus on cytocompatibility and chondrogenic potential. The results demonstrated that the nanoclay-polyamine-reinforced GelMA scaffold exhibited enhanced mechanical performance, sustained bioactive molecule release, and a favorable cellular microenvironment. Overall, this integrated 3D-printed hydrogel platform presents a promising strategy for cartilage tissue repair by unifying structural biomimicry, mechanical reinforcement, and controlled bioactive molecule delivery within a single scaffold system.

**[P29-5]**

**GelMA-Based Electroconductive Hydrogel Nanocomposite for Accelerating Bone regeneration:** Gyungmin Ryu, Hyeong Seok Kang, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

**Keywords:** Electrical stimulation therapy, MXene, DNA, Polydopamine, Bone regeneration

Bone defects can arise from trauma, infection, osteosarcoma, and genetic disorders, leading to significant physical and psychological burdens for patients. Critical-sized bone defects, such as open fractures, cannot undergo spontaneous healing and therefore require surgical intervention. These treatments often result in prolonged recovery periods and, in severe cases, may necessitate limb amputation. Accordingly, strategies that enable rapid and effective bone regeneration are urgently needed to improve patient outcomes. Electrical stimulation therapy (EST) is increasingly utilized in a wide range of clinical and research settings. Beyond promoting tissue regeneration, EST has been reported to enhance tissue differentiation, exert anti-inflammatory effects, stimulate angiogenesis, and increase cellular activity. To apply EST in biological systems, electrically conductive materials must be implanted in vivo. For effective application, such materials are required to exhibit adequate mechanical and electrical performance, along with ensured biocompatibility and biodegradability. Metal-based electrodes possess excellent electrical conductivity and mechanical rigidity; however, their high stiffness, limited biocompatibility, and lack of biodegradability necessitate secondary surgical removal after treatment. Synthetic polymers offer favorable electrical conductivity, mechanical properties, and improved biocompatibility, yet their biodegradability remains insufficient. In contrast, natural polymers exhibit outstanding biocompatibility and biodegradability but suffer from limited functionality as well as inferior mechanical and electrical properties. In this study, gelatin methacryloyl (GelMA), a naturally derived synthetic polymer with excellent biocompatibility and biodegradability and tunable physical properties via photoinitiated crosslinking, was employed as the primary matrix. To compensate for the insufficient mechanical strength and electrical conductivity of GelMA, a composite hydrogel incorporating the two-dimensional nanomaterial; MXene was developed. However, the direct application of MXene in biological systems may induce cytotoxicity due to its high oxidation reactivity arising from abundant surface functional groups. To mitigate this issue, MXene was treated with surface modification with polydopamine, a naturally derived polymer, and DNA was further coated to enhance tissue-regenerative functionality. Surface modification of MXene was confirmed using FT-IR, XPS, and DLS analyses. The composite hydrogel exhibited enhanced mechanical and electrical properties, which were quantitatively evaluated using a universal testing machine (UTM) and an LCR meter. In vitro studies demonstrated that polydopamine-coated MXene significantly

reduced oxidative stress-induced cytotoxicity. Additionally, the tissue regenerative capability of DNA was confirmed through cell viability assays. Moreover, electrical stimulation promoted cell proliferation and cell adhesion in MXene-containing groups, as verified by fluorescence microscopy and CyQuant DNA assays. Collectively, these results demonstrate that the developed composite hydrogel provides enhanced electrical conductivity, biocompatibility, and regenerative potential. Owing to its improved properties, this hydrogel composite is expected to serve as an effective alternative to conventional invasive electrical stimulation materials, enabling more efficient bone tissue regeneration. This material represents a promising theragenerative strategy for overcoming the challenges associated with the recovery of critical-sized bone defects and for the development of biocompatible, electroconductive platforms for personalized electrical stimulation therapy.

#### [P29-6]

All-3D-Printed Soft and Biodegradable Electronics via Porous-Structured Composite: Joo-Hyeon Park(Seoul National Univ.), Ju-Yong Lee\*(Seoul National Univ., Stanford Univ.), Min-Seong Chae(Seoul National Univ., Asan Medical Center), Se-Hun Kang, Jae-Young Bae, Seung-Kyun Kang\*(Seoul National Univ.)

**Keywords:** Bioelectronics, Soft electronics, 3D printing, Biodegradable, Porous composite

As human lifespans increase and sustainable healthcare gains importance, research on implantable bioelectronic devices has drawn significant attention. These devices provide localized and real-time stimulation or signal monitoring. However, current implantable bioelectronics face challenges in fitting perfectly within the body's complex structure, often leading to physical mismatches with tissue. Furthermore, long-term implantation of these devices can cause tissue damage or inflammatory responses. 3D printing using biodegradable materials would be a candidate of solution by customization of design and degradation after functioning. But still, there exists the limitation in modulating the mechanical and degradation properties due to the intrinsic characteristics of the material. In this study, we designed a structure with a low mechanical modulus, accelerated biodegradation, and maintained electrical performance by introducing a porous structure without altering the material. The porous structure was made by mixing a porogen into a biodegradable polymer, 3D printing it, and leaching in solvent. Compared to non-porous structures, the porous material exhibited a significantly lower modulus, making it softer and more flexible. Additionally, conductive nanoparticles in porous matrix are more likely to aggregate, leading to the reduction of percolation threshold while the maximum conductivity remained similar. This provides an advantage in electrical properties. Moreover, the pores allowed better penetration and diffusion of biofluids, accelerating the biodegradation process of the matrix. We optimized the rheological properties of a metal-polymer-porogen composite ink for 3D printing and demonstrated its potential by printing simple bioelectronic devices. We demonstrated functional devices such as resistive and capacitive sensors, which maintain electrical stability under bending, twisting, and crumpling. Furthermore, a cylindrical nerve-stimulation electrode was 3D-printed and applied to the mouse sciatic nerve. Electrical stimulation elicited measurable changes in compound muscle action potentials (CMAPs), demonstrating that the soft electrode operates reliably as an in vivo bioelectronic interface. This approach is expected to be adapted for other metal-polymer combinations as well and consequently contributing to the development of the next-generation biodegradable electronic devices.

#### [P29-7]

Strategies to Improve Stability of PEDOT:PSS-Coated Neural Interfaces in Physiological Environments: Minki Hong, Gilmo Kim, Seunghun Han, Jahyun Koo\*(고려대 학교)

**Keywords:** Neural electrodes, PEDOT:PSS, Interfacial Impedance, Surface engineering

Recent advances in brain-computer interface and neural monitoring technologies reflect growing clinical interest in high-fidelity neural signal acquisition for the diagnosis and treatment of neurological disorders<sup>1</sup>. In such systems, the quality of recorded signals strongly depends on the electrochemical properties of the electrode-tissue interface, where electrical impedance plays a critical role in determining signal fidelity. Conducting polymers such as PEDOT:PSS have been widely employed to reduce interfacial impedance due to their high volumetric capacitance and mixed ionic-electronic conductivity<sup>2</sup>. However, PEDOT:PSS films often suffer from delamination and material degradation under physiological conditions, limiting their long-term in vivo stability<sup>3</sup>. In this study, we explored strategies to improve the adhesion and stability of PEDOT:PSS-coated neural electrodes in physiological environments. The gold electrode surface was chemically etched to increase surface roughness and effective interfacial area, which may enhance mechanical interlocking between PEDOT:PSS and the substrate. In addition, polymer reinforcement approaches were introduced to improve the structural integrity of the conducting polymer layer. These modifications resulted in reduced impedance and improved interfacial stability under soaking conditions compared to untreated electrodes. The findings suggest that such surface and material engineering strategies could contribute to more stable neural signal acquisition in bioelectronic interfaces.

#### [P29-8]

Conductive Biomaterials and Bioelectronic Strategies for Peripheral Nerve Repair: Jun Yeong Hwang, Yerim Lee, Eunsoo Kim, Jahyun Koo\*(고려대 학교)

**Keywords:** 말초신경재생, 전도성 바이오소재, 신경유도관

Peripheral nerve injuries have an intrinsic regenerative capacity, yet functional recovery remains limited due to slow axonal growth and degeneration of target tissues during prolonged denervation. Conventional clinical treatments have focused on bridging the damaged nerve using grafts or guidance conduits, but these approaches primarily provide structural support and rarely restore full biological function. Therefore, therapeutic approaches that can actively modulate the regeneration and guide biological signaling within the injury site are needed. In this study, we outline recent bioelectronic approaches aimed at improving peripheral nerve regeneration through controlled electrical stimulation. Conductive biomaterials capable of delivering electrical cues within the injury environment are introduced in relation to neural regeneration, while conventional electrode-based systems are briefly considered for comparison. Engineered conduit structures and implantable bioelectronic devices are further described as strategies that integrate these materials into functional therapeutic platforms.

#### [P29-9]

**금속 3D 프린팅 Ti-6Al-4V 임플란트에서 TIPS 기반 탄탈륨 나노 구조 형성과 골세포 반응 개선 연구:** 최시은, 김수영, 장태식\*(부산대학교)

**Keywords:** 티타늄 합금, 표면 처리, 나노구조, 탄탈륨, osteogenesis

최근 금속 3D 프린팅 기술의 발전과 함께 환자 맞춤형 임플란트의 임상 적용이 확대되고 있으나, Ti-6Al-4V(Ti64) 합금은 우수한 기계적 특성을 지니고 있음에도 불구하고 표면 생체활성 부족으로 인한 초기 골유착이 지연되는 한계를 갖는다. 이에 본 연구에서는 Target-ion Induced Plasma Sputtering(TIPS) 공정을 적용하여 3D 프린팅 Ti64 표면에 탄탈륨(Ta) 기반 나노구조를 형성하고, 이에 따른 표면 물리·화학적 특성 변화, 전기화학적 내식성 및 전골아세포의 생물학적 반응을 종합적으로 평가하였다. 선택적 레이저 용융(SLM) 방식으로 제작한 Ti64 디스크 시편에 TIPS 처리를 수행하여 각각 나노리플(nanoripple) 및 나노포어(nanopore) 구조를 구현하였다. FE-SEM 및 AFM 분석 결과, 2000V 조건에서는 규칙적인 주름형 나노리플 구조가, 3000V 조건에서는 최대 약 400 nm 깊이의 다공성 나노포어 구조가 형성되었으며, TIPS 처리를 통해 마이크로 거칠기가 완화되고 보다 균일한 나노 표면이 구현되었으며, 화학 조성분석을 통해 두 나노 구조 표면 모두에서 약 7-8 at% 수준의 Ta가 균일하게 도입된 것을 확인하였다. 접촉각 분석에서는 Bare Ti64(약 60°) 대비 나노구조 표면에서 10-15° 수준의 초친수성이 나타났으며, 14일 침지 후에도 낮은 접촉각이 안정적으로 유지되어 장기적 표면 친수성 유지 특성을 보였다. 전기화학적 평가 결과, TIPS 처리 시편은 Bare Ti64 대비 부식 전위( $E_{corr}$ )가 양극 방향으로 이동하고 전하 전달 저항( $R_{ct}$ )이 유의하게 증가하였다. 특히 나노포어 구조는 가장 높은 패시브 안정성과 내식성을 나타내어, Ta 기반 복합 산화막 형성이 부식 억제에 효과적으로 기여함을 확인하였다. In vitro 생물학적 평가에서 MC3T3-E1 전골아세포의 초기 부착 및 확산은 나노구조 표면에서 현저히 향상되었으며, 필로포디아 및 라멜리포디아 형성이 활발히 관찰되었다. CCK assay 결과 배양 3일 이후부터 나노구조 표면에서 유의한 세포 증식 증가가 나타났고, ALP 활성 분석에서는 14 일차에 골분화가 뚜렷하게 향상되었다. 종합적으로, TIPS 기반 Ta 나노구조 표면 개질은 3D 프린팅 Ti64 임플란트의 표면 나노구조 제어와 화학적 개질을 동시에 달성하며, 내식성 향상과 초기 골세포 반응 촉진을 통해 골유착 성능을 효과적으로 증진시킬 수 있음을 입증하였다. 본 연구는 환자맞춤형 고기능 금속 임플란트의 표면 설계 전략으로서 임상적 적용 가능성을 제시한다.

#### [P29-10]

**A Lung-on-a-Chip Platform for Real-Time, Label-Free Monitoring of Tissue Stiffness under Breathing-Mimetic Cyclic Strain:** Junmin Lee\*, Giheon Ha(POSTECH)

**Keywords:** biomaterial, in-vitro, organ on a chip

Physiological mechanical forces, such as cyclic stretching and relaxation during respiration, play a vital role in maintaining lung homeostasis and influencing disease progression. In pulmonary fibrosis, aberrant extracellular matrix (ECM) remodeling leads to progressive tissue stiffening, disrupted mechano-transduction, and impaired respiratory function. These stiffness alterations are not only hallmarks of disease progression but also directly modulate cellular responses to therapeutic agents. Therefore, precise and continuous monitoring of mechanical properties under physiologically relevant dynamic conditions is essential for advancing fibrosis research and improving preclinical drug evaluation. Conventional in vitro models, however, are limited in their ability to simultaneously reproduce breathing-associated mechanical cues and enable real-time assessment of evolving tissue stiffness. To overcome these challenges, we present a lung-on-a-chip platform that integrates physiologically relevant cyclic mechanical stimulation with real-time, label-free stiffness sensing. The device is constructed on a thin (tens of micrometers), patterned polydimethylsiloxane (PDMS) membrane designed to mimic the structural and mechanical characteristics of the alveolar basement membrane. A cell-laden collagen methacrylate (ColMA) hydrogel is coated onto the membrane to establish a biomimetic alveolar microenvironment. Cyclic pressure modulation within an underlying air channel reproduces inhalation-exhalation dynamics, thereby imposing controlled, breathing-like strain on the engineered tissue construct. Mechanical properties are quantified through an image-based deformation analysis approach, enabling continuous, non-destructive monitoring of stiffness without the need for fluorescent labels or destructive mechanical assays. Our platform could track the transition from a compliant, healthy-like tissue state to a stiff, fibrotic-like phenotype during fibrosis induction. Moreover, the system enabled dynamic monitoring of mechanical recovery following antifibrotic drug treatment, capturing the reversion toward a softer, physiologically relevant state. Quantitative stiffness measurements obtained via image-based analysis showed strong agreement with nanoindentation results. Additional cross-validation using finite element analysis further confirmed the accuracy and robustness of the mechanical characterization strategy. Collectively, this lung-on-a-chip platform provides a dynamic, non-invasive, and predictive in vitro tool for preclinical antifibrotic drug screening. By integrating breathing-mimetic mechanical stimulation with real-

time stiffness monitoring, the system establishes a physiologically relevant framework for investigating mechano-regulated fibrosis progression and therapeutic responses under conditions that closely emulate the native pulmonary microenvironment.

#### [P29-11]

Functionalized In-Bath 3D Printed PDMS via Sputtering-Based Plasma Immersion Ion Implantation for Soft Tissue Regeneration: Sebin Lee, Tae-sik Jang\*, Byoung Soo Kim\*, Jae-seong Lee(Pusan National University), Won-pyo Lee(Chosun University)

**Keywords:** 고분자

Customization of soft polymeric interfaces is critical for managing irregular soft-tissue defects across oral and skin environments. In this study, we established an in-bath 3D printing strategy to fabricate patient-adaptable polydimethylsiloxane (PDMS) constructs with precise geometrical control. The rheological properties of the support matrix were systematically optimized to satisfy hydrostatic pressure–yield stress balance and rapid structural recovery, enabling stable extrusion, high shape fidelity, and multilayer stacking of PDMS composites. Although PDMS offers flexibility and biostability, its bioinert surface limits tissue interaction. To overcome this limitation, titanium (Ti) was introduced via sputtering-based plasma immersion ion implantation (S-PIII). The modified surface maintained stable hydrophilicity for up to four weeks and demonstrated sustained surface integrity under both dry and wet conditions. Mechanical characterization confirmed that the surface modification did not compromise the intrinsic mechanical properties of PDMS, indicating stable physicochemical performance after implantation. In vitro studies demonstrated significantly enhanced cell attachment, proliferation, and accelerated migration compared to bare PDMS. In vivo evaluation using a rat oral soft-tissue defect model revealed improved tissue integration and reduced inflammatory response in the Ti-implanted group. Furthermore, clinical application in an oral environment demonstrated promoted soft-tissue regeneration and improved clinical stability. This study presents an integrated platform combining rheologically optimized in-bath 3D printing and plasma-based surface engineering to actively modulate soft-tissue healing. Beyond oral applications, this approach provides a versatile framework for customizable soft-tissue interface devices in broader biomedical settings.

#### [P29-12]

AI-Optimized DNA-Guided Siliceous Microgels Inspired by Marine Organisms for Rapid Hemostasis and Chronic Wound Healing : Chan Ho Moon(Hanyang Univ.), Hyun Lee(Kitech), Sejoon Bang, Hyeong Seok Kang, Ju Yeong Gwon, Jong Hwa Seo, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

**Keywords:** artificial intelligence, chronic wound healing, hemostasis, DNA-guided nanosilica, bioinspiration

Chronic wounds, particularly those associated with diabetes, remain a major clinical challenge because of prolonged inflammation, impaired angiogenesis, excessive oxidative stress, and insufficient hemostatic control at the wound site. These pathological conditions disrupt the coordinated progression of the wound healing cascade, often resulting in delayed closure, recurrent infection, and poor tissue regeneration. To address these multifactorial limitations, we developed an injectable multifunctional microgel platform based on DNA guided siliceous biomineralization inspired by natural biosilica synthesis mechanisms observed in marine organisms. The microgels were further optimized using artificial intelligence assisted manufacturing strategies to precisely control particle size, structure, and injectability. An electrohydrodynamic encapsulation process was employed to fabricate DNA silica hybrid microgels, and key processing parameters including functionalized alginate concentration, silica content, and applied electrical conditions were systematically optimized using machine learning models. Random forest based predictive modeling enabled accurate determination of manufacturing conditions that ensured uniform microgel size distributions compatible with syringe injection, thereby overcoming the reproducibility and injectability limitations commonly encountered in conventional hemostatic materials. Physicochemical characterization confirmed that the resulting microgels exhibited robust structural integrity, biomimetic features, colloidal stability, and tunable mechanical properties suitable for minimally invasive delivery. The silica infused microgels demonstrated excellent biocompatibility and hemocompatibility with negligible cytotoxicity and hemolysis across multiple cell types. Their intrinsic porous architecture and swelling behavior enabled rapid absorption of blood and wound exudates, while the negatively charged silica surface effectively promoted platelet adhesion and surface induced coagulation. As a result, the microgels exhibited significantly enhanced hemostatic performance both in vitro and in vivo. In addition, sustained release of bioactive silicon ions and the antioxidative properties of the DNA silica network contributed to effective scavenging of reactive oxygen species, mitigating oxidative stress at the wound site. Beyond hemostasis, the microgels exerted pronounced immunomodulatory effects by suppressing excessive inflammation and promoting macrophage polarization toward the pro regenerative M2 phenotype. In vitro assays further revealed enhanced proliferation and viability of fibroblasts and endothelial cells, indicating that the microgels provided a favorable microenvironment for tissue regeneration without inducing cytotoxic effects. Importantly, these biological responses were achieved while maintaining stable injectability and mechanical integrity, ensuring reliable delivery to irregular and deep wound geometries. The therapeutic efficacy of the microgels was further validated in a diabetic murine wound model, where treatment resulted in significantly accelerated wound closure compared with control groups. Histological and immunohistochemical analyses demonstrated enhanced re epithelialization, increased collagen deposition, and robust angiogenesis, accompanied by a marked reduction in inflammatory markers. Notably, the microgels

supported all four sequential phases of wound healing hemostasis, inflammation, proliferation, and remodeling, highlighting their comprehensive and coordinated therapeutic action. Collectively, these findings demonstrate that the synergistic integration of DNA guided biomineralization and silica based bioactivity within an artificial intelligence optimized injectable microgel system offers a powerful strategy for chronic wound management. This nature inspired data driven platform represents a promising and versatile approach for next generation multifunctional wound dressings capable of addressing the complex pathophysiology of chronic wounds.

#### [P29-13]

DLP-Printed Inorganic Nanoparticle-Integrated Hydrogel for Melanoma Treatment and Skin Regeneration: Hyun-Do Jung\*, Geonwoo Kim, Jong Hwa Seo(Hanyang University)

**Keywords:** Multifunctional hydrogel, Photodynamic therapy, Skin tissue regeneration

Melanoma is a highly aggressive skin malignancy associated with a substantial risk of recurrence, often resulting from incomplete surgical excision and unintended damage to surrounding healthy tissues. These clinical limitations highlight the need for advanced therapeutic platforms capable of simultaneously eliminating residual tumor cells and supporting tissue regeneration. To address this challenge, we developed a patient-specific hydrogel incorporating inorganic nanoparticles and a photosensitizer, fabricated using a DLP-based 3D printing approach adaptable to irregular, patient-specific defect geometries. The incorporation of inorganic nanoparticles reinforced the hydrogel network, enhancing its mechanical strength and physicochemical stability under physiological conditions. Beyond structural reinforcement, the inorganic components are known to contribute to tissue regenerative responses by modulating cellular behavior, supporting cell adhesion, and promoting a favorable microenvironment for tissue repair. In addition, the nanoparticles enabled efficient incorporation of the photosensitizer through non-covalent interactions, such as hydrogen bonding, allowing stable loading without disrupting the crosslinked matrix. This design preserved high-resolution printability and structural fidelity while introducing phototherapeutic functionality. The resulting composite hydrogel provides a multifunctional platform that integrates localized photothermal or photodynamic tumor ablation with structural and biological support for skin tissue regeneration. Overall, the DLP-printed, nanoparticle-reinforced hydrogel demonstrates strong potential as a customizable therapeutic system for melanoma treatment and defect-specific skin repair.

#### [P29-14]

Theragenerative and 3D printed Hydrogel scaffold for Osteosarcoma: Hyeong Seok Kang, Sejoon Bang, Chan Ho Moon, Ju Yeong Gwon, Jong Hwa Seo, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

**Keywords:** Hydrogel, 3D printing, Bone regeneration, Osteosarcoma

Osteosarcoma is an aggressive primary bone malignancy that often requires surgical resection combined with adjuvant therapies, resulting in critical-sized bone defects and impaired tissue regeneration. Effective post-resection treatment strategies must not only eliminate residual tumor cells but also promote bone regeneration and vascularization. Hydrogel-based biomaterials have gained attention for their biocompatibility and tunable properties; however, conventional hydrogels often lack sufficient mechanical strength and multifunctionality for load-bearing bone applications. In this study, a methacrylated derivative of hyaluronic acid (HAMA) was synthesized to enhance mechanical robustness while preserving biocompatibility. To enable combined therapeutic and regenerative functions, MXene and salmon-derived DNA were incorporated into the HAMA hydrogel. MXene, a two-dimensional nanomaterial with high photothermal conversion efficiency, facilitates photothermal therapy (PTT) for eliminating residual osteosarcoma cells and promotes angiogenesis. Salmon-derived DNA provides bioactive cues that support osteogenic differentiation and tissue regeneration. Hyaluronic acid was chemically modified under controlled conditions to produce HAMA with an optimal degree of methacrylation. The chemical structure of HAMA was confirmed using nuclear magnetic resonance (NMR) and Fourier-transform infrared (FT-IR) spectroscopy. MXene nanosheets were uniformly dispersed within the HAMA matrix to enable efficient photothermal responsiveness, and salmon-derived DNA was incorporated to enhance osteoinductive potential. The mechanical properties of the composite hydrogel were evaluated through tensile and compressive testing to assess suitability for bone tissue applications. In vitro studies cytocompatibility, osteogenic differentiation, angiogenic potential, and photothermal tumor cell ablation efficiency. In vivo experiments using an osteosarcoma resection bone defect model evaluated tumor suppression, bone regeneration, and tissue integration. The methacrylated HAMA hydrogel demonstrated significantly improved mechanical properties compared to unmodified hydrogels, providing enhanced structural stability. Upon near-infrared (NIR) irradiation, MXene-enabled photothermal effects effectively induced hyperthermia sufficient to suppress residual osteosarcoma cells. Additionally, MXene incorporation promoted angiogenic activity, supporting vascularized tissue regeneration. Salmon-derived DNA further enhanced osteogenic differentiation and extracellular matrix formation. In vitro results confirmed high cytocompatibility, efficient tumor cell ablation under NIR stimulation, and enhanced osteogenic marker expression. In vivo studies showed effective tumor suppression and accelerated bone defect repair, with improved new bone formation and integration compared to control groups. This multifunctional HAMA-based hydrogel incorporating MXene and salmon-derived DNA provides a dual therapeutic strategy for osteosarcoma management by combining localized photothermal tumor ablation with enhanced bone regeneration. With improved mechanical strength, photothermal responsiveness, and osteoinductive capability, this platform shows strong potential as an advanced biomaterial for post-osteosarcoma reconstructive therapy.



**[P29-15]**

Soft, conformal tissue–electrode interfaces for bioelectronic devices: SUJIN LEE, Sungeun Kim, Jahyun Koo\*(Korea Univ.)  
*Keywords:* tissue electrode interface, bioelectronics, shape morphing materials, conformal contact, soft bioelectronics

A soft and conformal tissue–electrode interface is essential for the long-term, stable, and high-performance operation of bioelectronic devices. Mechanical property matching and intimate adhesion between the target tissue and the device interface minimize tissue damage and prevent delamination caused by dynamic tissue motion, thereby enabling stable device function. To suppress impedance variations arising from interfacial delamination and to ensure reliable implantation, the device must be capable of adapting its shape to the surrounding tissue. To address this requirement, a shape memory polymer (SMP) is employed. Above its transition temperature, increased polymer chain mobility allows the SMP to be deformed into a desired temporary shape, which is fixed upon cooling. Upon reheating to the transition temperature, the polymer recovers its programmed shape, facilitating an efficient implantation process. In this study, we utilize an SMP with a transition temperature of 37 °C (body temperature) to enable conformal contact with biological tissue. This design allows spontaneous conformal wrapping of the electrode around the tissue without the need for additional external stimuli. In this poster, we present an SMP-integrated tissue–electrode interface for bioelectronic applications. Conductive polymer materials are investigated, and the electrical performance of the SMP-integrated electrode is evaluated through impedance measurements and charge storage capacity analysis. Furthermore, thermally induced shape transformation at body temperature is examined to assess the feasibility of effective implantation.

**[P29-16]**

Bile Duct Inner Structure-Inspired Tantalum Nanopatterned Nitinol Stent for Photothermal and Drug-Responsive Modulation of the Biliary Microenvironment: Nayoung Lee(Hanyang Univ.), Yubeen Park(Asan Medical Center), Chan Ho Moon(Hanyang Univ.), Jung-Hoon Park\*(Asan Medical Center, Ulsan Univ.), Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

*Keywords:* bioinspiration, biliary stent, phase-change material, photothermal therapy, drug release, Nitinol

Biliary stents are widely used as palliative and therapeutic options for relieving biliary strictures caused by cholangiocarcinoma, gallstones, and pancreatic cancer. By restoring bile flow, these devices play a critical role in reducing jaundice, preventing cholangitis, and improving patient outcomes. Despite their clinical utility, however, conventional biliary stents frequently suffer from premature failure. Bacterial adhesion to the stent surface and subsequent biofilm formation lead to stent occlusion. These complications significantly impair patient quality of life and substantially increase healthcare costs, highlighting the urgent need for advanced biliary stents with improved antibacterial activity and long-term biocompatibility. To address these challenges, we developed a near-infrared (NIR)-responsive nitinol biliary stent that integrates photothermal antibacterial functionality with controlled drug delivery. Nitinol was selected as the stent substrate due to its superelasticity, shape memory effect, and excellent mechanical compatibility with the biliary tract, enabling stable deployment and sustained luminal patency under dynamic physiological conditions. To engineer antibacterial surface properties, tantalum nanopatterns were fabricated via target ion plasma sputtering (TIPS). This approach enabled the formation of uniform nanoscale surface features without altering the bulk mechanical properties of the stent. The resulting nanotopography effectively inhibited bacterial adhesion while simultaneously promoting biliary epithelial cell attachment and proliferation, thereby enhancing surface biocompatibility. To further suppress infection and support tissue regeneration, a multifunctional drug delivery system was incorporated into the nanopatterned surface. A polydopamine (PDA) coating was employed as a bioadhesive interfacial layer to immobilize polydeoxyribonucleotide (PDRN) within the nanopatterned pores. PDRN is a well-established bioactive molecule known to stimulate cell proliferation, angiogenesis, and tissue repair. The nanopatterned pores acted as micro-reservoirs, enabling efficient drug loading while preserving surface stability and structural integrity. For on-demand and localized drug release, a thermoresponsive phase-change fatty acid–PDRN matrix was applied to the stent surface. This matrix remains solid under physiological conditions, ensuring minimal passive drug leakage, but undergoes a phase transition upon NIR irradiation. Under NIR exposure, the tantalum nanopatterns generate localized photothermal heat, triggering controlled melting of the matrix and subsequent drug release. This design allows externally regulated, repeatable drug delivery with precise temporal control while minimizing systemic side effects. In vitro studies demonstrated that the NIR-responsive stent exhibited superior antibacterial performance compared to bare stents, effectively inhibiting both bacterial growth and biofilm formation. Furthermore, cytocompatibility assays confirmed enhanced biliary epithelial cell adhesion and viability on the modified surface. Collectively, these results indicate that the proposed multifunctional stent platform—combining mechanical reliability, nanotopographical antibacterial surfaces, photothermal responsiveness, and stimuli-triggered drug delivery—offers a promising integrated strategy for preventing stent-related infections and occlusion. This approach holds strong potential for next-generation biliary stent applications and long-term clinical use.

**[P29-17]**

A Multifunctional Hydrogel Platform Enabling ROS-Mediated Photodynamic Cancer Therapy: Juyeong Gwon, Sejoon Bang, Hyeong Seok Kang, Chan Ho Moon, Jong Hwa Seo, Heungsoo Shin, Hyun-Do Jung\*(Hanyang Univ.)

*Keywords:* 3D printing, Drug delivery, Cancer therapy

Cancer therapy is frequently limited by insufficient selectivity and severe systemic side effects associated with conventional

chemotherapy and radiation treatments. These drawbacks highlight the need for localized, controllable, and minimally invasive therapeutic platforms capable of confining cytotoxic effects to diseased tissues while sparing healthy cells. To address this challenge, we engineered a three-dimensional hydrogel system designed as a light-responsive biomaterial platform for photodynamic therapy (PDT). This system integrates material engineering, photochemistry, and cellular responsiveness to create a multifunctional therapeutic microenvironment. The structural matrix consists of a biocompatible, photo-crosslinkable polymer network that enables reproducible fabrication and spatial control over gel formation. Photo-crosslinking allows mild processing conditions, facilitating encapsulation of bioactive molecules and living cells without compromising viability. The resulting hydrated three-dimensional scaffold mimics aspects of the extracellular matrix, providing mechanical support and a permissive environment for cellular interaction. By adjusting crosslinking density, the stiffness, porosity, and diffusion characteristics of the hydrogel can be precisely tuned, which are critical parameters influencing cellular behavior and therapeutic performance. To enhance mechanical stability and modulate physicochemical properties, inorganic nanoscale additives were incorporated into the polymer network. These nanomaterials reinforce structural integrity, adjust viscoelastic characteristics, and influence microstructural organization. Their inclusion enables optimization of compressive strength and elastic modulus, improving handling properties and maintaining stability during implantation or injection. Additionally, the nanoscale components may contribute to improved interaction with incident light, potentially supporting more efficient activation of the photodynamic process. A light-activated sensitizing molecule was embedded within the hydrogel to enable therapeutic function. Upon irradiation at a specific wavelength, the photosensitizer transitions to an excited state and transfers energy to molecular oxygen, generating reactive oxygen species (ROS), including singlet oxygen. These ROS induce oxidative damage to nearby cancer cells through lipid peroxidation, protein oxidation, and DNA disruption, ultimately triggering apoptosis or necrosis. Because ROS production occurs only in irradiated regions, this strategy allows spatially confined cytotoxicity with reduced systemic toxicity. Adipose tissue-derived stem cells (ADSCs) were incorporated as a biological component responsive to oxidative microenvironments. ADSCs are sensitive to redox conditions and can modulate inflammatory and regenerative signaling pathways. Their inclusion enables investigation of cell-material interactions under ROS-mediated stress and provides insight into how oxidative cues affect stem cell viability and function within the engineered scaffold. Physicochemical properties of the hydrogel formulations were systematically evaluated to identify cell-compatible compositions suitable for light-mediated therapy. Mechanical testing assessed compressive modulus and structural resilience, while rheological analysis characterized viscoelastic behavior relevant to injectability. Swelling measurements determined water uptake and network stability, which influence oxygen diffusion and photosensitizer activity. Microstructural and elemental analyses verified internal morphology and homogeneous distribution of nanoscale additives. Overall, this engineered hydrogel platform provides a controllable, minimally invasive framework for localized photodynamic cancer therapy, integrating tunable mechanics, light-triggered ROS generation, and cellular responsiveness to enhance therapeutic precision.

#### [P29-18]

Customizable Drug-Loaded dECM-GelMA Microneedle Patch for Modulating Pathological ECM Remodeling in Fibrotic Skin: Geonho Lee, Junmin Lee\*(POSTECH)

**Keywords:** dECM, GelMA, Microneedle, fibrosis, ECM Remodeling

Fibrotic skin disorders, including keloids, are driven by pathological ECM remodeling that stiffens tissue and sustains myofibroblast activation. Conventional therapies primarily target inflammatory or growth factor signaling pathways but fail to address the dysregulated extracellular microenvironment that perpetuates fibrotic progression. Here, we present a customizable drug-loaded microneedle (MN) patch composed of a decellularized extracellular matrix (dECM)/gelatin methacryloyl (GelMA) composite designed to locally modulate pathological ECM remodeling in fibrotic skin. The microneedle molds and patch platform were fabricated using a 3D-printed resin template followed by polydimethylsiloxane (PDMS) casting. The microneedle patch is designed in a customizable square format (up to 2 cm × 2 cm), with a dissolvable hyaluronic acid (HA) substrate that enables separation at body temperature. The dECM-GelMA core provides bioinstructive ECM cues, while therapeutic agents targeting fibrotic signaling pathways can be incorporated to achieve combinatorial microenvironmental modulation. Upon insertion, the microneedles are intended to locally deliver both matrix-derived components and drugs, potentially disrupting the stiffness-dependent feedback loop that maintains myofibroblast activation. This minimally invasive platform integrates structural ECM modulation with controlled therapeutic delivery, offering a microenvironment-focused strategy for localized fibrosis treatment. Ongoing studies aim to establish relevant fibrotic skin models to evaluate the biological response and therapeutic feasibility of this system.

**P30 : 가공-열처리**  
Room 3층 로비, 4월 30일

**[P30-1]**

Directed Energy Deposition으로 제조된 Inconel 625의 열처리 영향에 따른 조직 및 인장 특성 연구: 김준혁, 한재연(국립창원대학교), 권영삼(CetaTech), 박정효, 김대웅, 김규식(국방과학연구소), 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  $\gamma''$  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, 2 시간 이후부터  $\gamma''$  상의 초기 석출이 확인되었다. 이후 시간이 경과함에 따라  $\gamma''$  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  $\gamma''$  상 석출에 기인한 것으로 판단된다. 인장 시험 결과, as-built 대비 후열처리 조건에서 모두 강도 향상이 나타났으며, 이는  $\gamma''$  상의 석출 강화 효과에 기인한 것으로 판단된다. 이상의 결과를 바탕으로, 강도와 인성을 동시에 확보할 수 있는 최적의 열처리 설계 방안에 대해 논의하였다.

**[P30-2]**

열처리 온도에 따른 Zr-702 열간압연재의 미세구조 및 기계적 특성 변화 연구: 허민아, 신승환, 이강진, 박선영, 송기안\*(국립공주대학교)

**Keywords:** Zr-702 alloys, Hot rolling, Heat treatment, Microstructure, Mechanical properties

Zr-702 합금은 고온·고압의 극한 환경에서 우수한 내부식성을 나타내며, 이에 따라 화학 및 원자력 산업에서 구조용 재료로 광범위하게 활용되고 있다. 또한 기계적 특성을 더욱 향상시키기 위해 단조 및 압연과 같은 열기계적 가공을 적용한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. Zr-702 합금을 포함한 상업용 순수 Zr 합금은 상온에서 육방정계 밀집 구조 ( $\alpha$ -hcp)를 가지며, 약 865°C 이상의 온도에서는 체심입방 구조 ( $\beta$ -bcc)로 상변태가 발생한다. 이러한 상변태 온도 범위에 따라 상이한 미세조직 및 기계적 특성을 보인다고 알려져 있다. 구체적으로  $\alpha$  영역에서 열처리 시 아결정립을 형성하여 연성이 향상되며,  $\beta$ -퀵칭 후 Widmanstätten 판상 구조의  $\alpha$ 상으로 변형되어 물성이 향상된다고 보고되었다. 본 연구에서는, 상변태 온도 범위를 고려하여 600~1000°C에서의 체계적인 열처리를 통하여 Zr-702 열간압연재의 미세조직을 제어하고자 하였다. 이에 따라 미세조직 변화에 따른 기계적 물성을 분석하기 위해 주사전자현미경(SEM), X-선 회절 분석(XRD), 후방 산란 전자회절패턴분석(EBSD), 상온 인장 시험(Tensile Test)을 수행하였다. 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). This work was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT), and Ministry of Trade, Industry and Energy ((P0018009).

**[P30-3]**

극저온 압연된 CoCrFeMn 엔트로피 합금에서 열처리가 기계적 물성 및 미세조직에 미치는 영향에 관한 연구: 송동현(충남대학교, 국방기술진흥연구소), 정 현, 최정훈, 이동현\*(충남대학교)

**Keywords:** 엔트로피 합금, 극저온압연, 열처리

본 연구에서는 Co10Cr10Fe50Mn30(at%) 엔트로피 합금에 극저온(-193°C) 압연을 적용하여 TRIP을 유도한 후, 후속 열처리 조건이 미세조직과 기계적 물성에 미치는 영향을 분석하였다. CoCrFeMn 합금을 상온과 극저온에서 압하율 30%로 압연하였다. 각 압연재에 대해 600°C ~ 900°C에서 30분 간 어닐링 후 수냉하였다. 인장 시험과 EBSD 분석을 통해 기계적 특성과 FCC/HCP 상분율, GOS, GND, KAM을 분석하였다. 극저온 압연과 열처리 조건 조절을 통해 CoCrFeMn 엔트로피 합금의 미세조직과 기계적 특성을 설계할 수 있음을 정량적으로 확인하였다. 특히 800 °C에서 열처리한 경우, 기계적 특성이 가장 향상된 것으로 확인되어 그 원인에 대하여 논의하였다.

**[P30-4]**

고탄소강의 아임계 및 상간 구상화 열처리에 따른 미세조직 변화 거동 연구: 강지인, 이승희, 강신곤\*(동아대학교)

**Keywords:** 고탄소강, 구상화 열처리, 시멘타이트, 아임계, 상간임계

고탄소강은 높은 강도와 내구성이 요구되는 베어링강, 공구강 및 고강도 선재 등에 주로 사용된다. 고탄소강에서 뚜렷하게 형성되는 층상 시멘타이트 (lamellar cementite)는 전단 변형 시 전위의 이동을 방해하고, 절삭 가공 중 공구 마모를 촉진하여 냉간 가공성 및 절삭 가공성을 현저히 저하시킨다. 이러한 가공성 저하를 개선하기 위해, 시멘타이트의 형태를 제어하는 구상화 열처리

(spheroidized annealing)가 적용될 수 있다. 구상화 열처리는 공석 변태 온도( $A_1$ )를 기준으로 어느 온도 영역에서 열처리가 수행되느냐에 따라 아임계 구상화 열처리 (Subcritical Spheroidizing Annealing, SSA)와 상간 구상화 열처리 (Intercritical Spheroidizing Annealing, ISA)로 구분된다. 두 열처리 모두 페라이트와 시멘타이트 간 계면 에너지를 최소화하려는 열역학적 구동력에 의해 층상 시멘타이트가 분절 (fragmentation)되고, 점차 구형의 탄화물로 전환되는 공통적인 메커니즘을 따른다. 그러나 ISA의 경우 열처리 중 부분적인 오스테나이트화가 수반되므로, SSA와 비교하였을 때 상변태 경로와 탄화물의 재분포 과정에서 본질적인 차이가 발생한다. 이러한 차이는 최종 미세조직 특성과 균질성에 직접적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 고탄소강을 대상으로 SSA와 ISA 조건에서의 미세조직 거동을 비교함으로써, 열처리 온도 조건의 차이가 재료의 미세조직 특성에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

### [P30-5]

**열처리 후 헬리컬 기어의 깊이별 상 분포 정량화 및 혼재상(Multi-phase)의 기계적 물성 평가:** 이인복, 이명규\*(서울대학교), 이경민, 이신영(현대모비스)

**Keywords:** 헬리컬 기어, 열처리, 상분리, 미세조직

자동차 핵심 부품 중 하나인 헬리컬 기어(Helical gear)는 형상적 특성상 고하중 및 피로 환경에 노출되므로 우수한 내구성이 요구된다. 이를 위해 산업 현장에서는 표면 경화 열처리를 수행하는데, 이 과정에서 표면으로부터의 깊이에 따른 냉각 속도 차이가 발생하여 심부로 갈수록 마르텐사이트, 배이나이트, 페라이트 및 펄라이트가 혼재된 불균질한(heterogeneous) 미세조직 구배를 갖게 된다. 그러나 기존의 기어 해석 모델은 이러한 위치별 상 분포를 고려하지 않고 소재의 평균적인 등가 물성만을 적용하고 있어, 복합 하중 하에서의 탄소성 변형 예측의 정밀도가 저하되는 한계가 있다. 본 연구에서는 헬리컬 기어의 깊이별 상 분포를 정량적으로 분석하고, 다상(Multi-phase)이 혼재된 영역의 정밀한 물성 평가를 통해 신뢰성 높은 재료 모델을 개발하고자 하였다. 우선 비커스 경도 시험과 EBSD(Electron BackScatter Diffraction) 분석을 통해 깊이에 따른 상 분포 맵(Map)을 구축하였다. 특히, 형상학적으로 구분이 난해한 마르텐사이트와 배이나이트 상은 EBSD Band Contrast Map 기반의 통계적 기법을 적용하여 정밀하게 구분하였다. 이후 dilatometer(Dilatometer) 실험을 통해 상변태 예측 모델인 연속냉각변태(CCT) 곡선을 확보하였으며, 이를 바탕으로 각 단상(Single phase) 조직을 얻기 위한 열처리 조건을 도출하였다. 최종적으로 재현된 각 단상 시편에 대해 압축 시험을 수행하여 얻은 기계적 물성을 바탕으로, 헬리컬 기어 혼재상의 물성 평가를 진행하였다.

### [P30-6]

**열처리 조건이 구상화처리 된 0.95 wt.%C 고탄소강 (SK95)의 미세조직 및 기계적 물성에 미치는 영향:** 김규범, 이승찬, 한재준, 김도형\*(영남대학교)

**Keywords:** 고탄소강, 탄화물, 상변태, 열처리, 마르텐사이트

고탄소강은 높은 경도와 내마모 특성을 바탕으로 공구, 베어링, 제철 소재 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 그러나 퀴칭을 통해 얻어진 마르텐사이트 조직은 우수한 경도를 가지지만 높은 tetragonality에서 기인하는 내부 응력으로 인해 취성을 가지는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 탄화물의 분율을 제어하여 경도와 인성을 동시에 확보할 수 있는 열처리 조건을 확립하여야 한다. 본 연구에서는 0.3 mm까지 냉간압연 후 구상화 열처리를 통해 균일한 탄화물 조직을 가지는 0.95 wt.%C 판재 (SK95)를 이용하여 790°C, 800°C 및 810°C의 세 가지 온도로 가열하고 유지시간을 10 min, 15 min 및 20 min로 변화시켰으며 마르텐사이트 상을 얻기 위해 오일 퀴칭을 진행한 뒤 광학 및 주사전자현미경, 비커스 경도시험기 및 나노인덴테이션을 이용하여 탄화물 분율과 기계적 물성 평가를 진행하였다. 연구 결과, 구상화 탄화물이 이미 존재하는 미세조직의 경우 평형 상태도에서 예측되는 미세조직과 상당히 다를 수 있었으며 790°C 10 min, 800°C 10 min 및 15 min, 그리고 810°C 모든 조건에서 780 Hv 이상의 높은 경도를 나타냄을 알 수 있었다. 한편 미세조직의 경우 810°C에서 열처리한 시편의 경우 경향성 있는 변화를 나타내지만 790°C 및 800°C에서 열처리한 경우 미세조직 변화의 경향성이 일관적이지 않았으며, 이러한 변화를 속도론 및 국부평형관계를 고려하여 분석하였다. 한편 열처리된 시편들의 탄화물 분율을 분석하였으며 이를 통해 템퍼링 후에 탄화물 분율과 경도 및 인성과의 관계 분석에 활용하여 고탄소강의 최적 열처리 조건을 확립하고자 한다.

### [P30-7]

**Mechanical Property Evaluation of Ti-low Maraging Steel 300 Fabricated via Scrap Recycling Process:** Jini Park, Jiwon Choi, Byoungyong Im, Jaelyang Park\*(고등기술연구원)

**Keywords:** Maraging steel 300, Aging treatment, Mechanical properties, Scrap recycling

Maraging steel 300 is an 18 wt.% Ni-based ultra-low carbon martensitic alloy strengthened by precipitation during aging heat treatment. The formation of fine intermetallic precipitates such as  $Ni_3Ti$  and  $Ni_3Mo$  enables the alloy to achieve ultra-high strength while maintaining excellent toughness. However, during the recycling process of high-alloy tool steel scrap, selective oxidation and elemental loss may occur during smelting and refining, particularly for titanium due to its high oxygen affinity. Such compositional variations can significantly influence the conventional precipitation-hardening mechanism of maraging steel, yet related studies remain limited. In this study, post-service die steel scrap was recycled through melting, refining, ingot casting, and forging processes to produce a maraging steel-type alloy. Chemical composition analysis revealed the near depletion of titanium, resulting in the formation of a Ti-low maraging steel. The aging behavior and hardness evolution of the Ti-low alloy were systematically investigated to evaluate its heat-treatment characteristics and potential strengthening mechanisms. This study demonstrates that Ti-low maraging steel can realistically form during high-alloy scrap recycling processes and provides fundamental insights into its aging response and potential applicability.

### [P30-8]

**고망간강(High-Mn Steel) 체결류의 열처리 조건 최적화 및 제조방식에 따른 특성 평가:** 허성보\*(한국생산기술연구원), 박영민(화신하이테크), 박인욱, 김왕렬, 김준호(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 고망간강, 전조공정, 열처리, 체결류, 극저온

LNG 및 극저온 액화가스 저장 설비의 안전성은 시스템을 구성하는 체결류(Bolts & Nuts)의 기밀 유지 성능과 직결된다. 극저온 환경에서는 소재의 저온 취성으로 인한 균열 발생 및 열팽창 차이에 따른 체결력 저하가 가스 누출 및 폭발의 주요 원인이 된다. 본 연구에서는 극저온에서도 우수한 강도와 연성을 유지하는 고망간강을 기반으로 체결류를 제작하고, 가공 방식(선삭 vs 전조)이 나사산의 기계적 신뢰성 및 피로 내구성에 미치는 영향을 규명하고자 한다. 고망간강 소재를 활용하여 각각 선삭가공(Turning)과 전조가공(Rolling) 방식으로 나사산을 성형하였다. 가공 방식에 따른 품질 비교를 위해 나사 규격 정밀 측정 및 표면조도(Surface Roughness) 분석을 수행하였다. 기계적 물성 평가를 위해 상온 및 극저온(-196°C)에서의 경도, 인장강도, 항복강도 및 연신율을 측정하였으며, 특히 전조가공 시 발생하는 가공 경화층의 미세조직 변화를 관찰하기 위해 단면 분석을 실시하였다. 고망간강 체결류는 극저온 환경에서도 안정적인 오스테나이트 조직을 유지하여 우수한 충격 인성과 강도를 나타내었다. 가공 방식 비교 시, 전조가공된 나사산은 소재의 섬유상 조직(Fiber flow)이 절단되지 않고 연속적으로 형성되어 선삭가공 대비 높은 압축 잔류응력과 강화된 표면 경도를 확보하였다. 이러한 가공 경화 효과는 극저온 응력 집중 구간에서의 균열 발생을 억제하고, 반복적인 열수축-팽창 환경에서도 체결력을 장기적으로 유지하는 데 기여함을 확인하였다. 표면조도 측면에서도 전조가공이 우수하여 체결 시 발생하는 갈링(Galling) 현상 저감에도 효과적인 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 고망간강 기반 전조가공 체결류가 극저온 설비의 가혹한 환경에서도 우수한 기계적 특성을 보였다.

### [P30-9]

**다양한 미량 합금원소가 첨가된 슈퍼 듀플렉스 내식강의 부식특성:** 조용빈, 김정민\*(한밭대학교)

**Keywords:** duplex stainless steel, corrosion, electrochemical, Ce, B

원자력 발전소, 담수화 설비, 해양 구조물, 바이오 가스 설비 등 가혹한 조건에서 견딜 수 있는 슈퍼 듀플렉스 내식강의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 하지만 다량의 합금원소들이 첨가된 소재이기 때문에 시그마상과 같은 유해 석출상이 형성되기 쉽다는 원천적인 문제도 존재한다. 이러한 석출상은 슈퍼 듀플렉스 내식강의 기계적 성질뿐만 아니라 내식성도 크게 낮출 수 있으므로 화학 조성 및 열처리 공정을 최적화하는 것이 중요하다. 저자들은 S32750 슈퍼 듀플렉스 내식강에 다양한 합금원소를 첨가하여 부식특성에 미치는 연구를 수행하고 있으며, 이번 연구에서는 Ti+Cu, Ti+Cu+Ce 및 B 합금원소의 미량 첨가로 인한 미세조직과 부식특성의 변화를 조사하는데 중점을 두었다. 내식강 시편의 제조공정의 경우 1300 oC 고용화 열처리 후 압연을 수행하고, 추가적으로 950 oC에서 1시간 열처리하는 조건을 사용하였으며, 기본 합금조성 대비 상기 첨가를 통해 부식전위가 전반적으로 모두 높아지는 결과가 관찰되었다. 또한, EIS 분석결과, 표면 부동태 피막의 안정성도 기본 합금에 비해 개선되는 것으로 나타났으며, 특히 Ti+Cu 및 B 첨가 합금에서 그 차이가 명확하였다. 성형성 연구를 통해 상기 미량 합금원소 첨가로 인한 성형성 개선의 효과도 관찰되었으므로 향후 산업적 적용 가능성이 높을 것으로 기대된다.

### [P30-10]

**Influence of Cleanliness Variation Induced by Ingot Processing on Microstructural Homogeneity and Temper Embrittlement Resistance in 3.5NiCrMoV Steel:** Gayoung Yoo, Dongbae Kim\*, Hyewon Choi, Youngmin Lee, Hyunjeong Shin(대구기계부품연구원)

**Keywords:** Clean steel, 3.5NiCrMoV steel, Gas turbine compressor, Thermal aging, Temper embrittlement

This study evaluates the influence of material cleanliness on the microstructure and mechanical performance of high-cleanliness steel and conventional air-melted 3.5NiCrMoV steel intended for gas turbine compressor components. Although both steels contained comparable levels of major alloying elements, the high-cleanliness steel exhibited substantially reduced impurity contents, including S (-50%), P (-62.5%), and Al (-94.6%). After austenitizing at 850 °C followed by quenching and tempering at 580 °C for 1 h, the high-cleanliness steel developed a refined and uniform martensitic packet structure with homogeneous grain distribution. In contrast, the air-melted steel showed pronounced banding and microstructural heterogeneity associated with chemical segregation. Long-term thermal exposure at 400 °C and 500 °C for 1, 000 h resulted in moderate strength degradation in both steels with only limited changes in ductility. However, a marked difference was observed in impact toughness: the high-cleanliness steel retained significantly higher Charpy impact energy and exhibited minimal ductile-to-brittle transition temperature (DBTT) shift, whereas the air-melted steel showed severe toughness loss accompanied by a pronounced DBTT increase, indicating greater susceptibility to temper embrittlement. These findings demonstrate that enhanced cleanliness improves microstructural uniformity, stabilizes toughness during thermal aging, and increases resistance to temper embrittlement, supporting the applicability of high-cleanliness 3.5NiCrMoV steel for long-term elevated-temperature service.

### [P30-11]

**열간 단조 금형 STD61의 질화 열처리 두께 예측 모델 개발:** 권동술\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** 질화 열처리, 질화층 두께 예측, 열간공구강

열처리 공정 중 제품에 열에너지를 가할 경우 이에 비례하는 열처리 품질을 얻을 수 있다는 열에너지수치를 이용한 열처리 제어 기술을 열간 단조금형 소재로 사용되는 STD61의 플라즈마 질화공정에 적용하여 열에너지수치에 따른 플라즈마 질화층 두께 예측

모델을 개발하였다. 질화온도와 공정시간을 변수로 플라즈마 질화공정 실험을 진행하였으며, 플라즈마 질화공정 중 실시간으로 제품이 받은 열에너지수치를 측정하여 공정시간에 누적된 열에너지수치를 연산하였다. 다양한 질화온도, 공정시간 조건에서 누적 열에너지수치에 따른 질화층두께를 분석하여 질화층두께가 누적 열에너지수치의 유일함수임을 Master Nitriding Curve (MNC) 개발로 확인하였다. 본 연구에서 개발한 STD61의 MNC 모델을 이용하여, 생산 현장에서 플라즈마 질화 시 제품의 누적 열에너지수치를 실시간으로 측정하여 이에 따른 질화층 두께를 예측할 수 있으며, 목표로 하는 질화층 두께를 얻기 위한 목표 누적 열에너지수치에 도달할 때 열처리 공정을 종료 제어한다면 목표로 하는 질화층 두께를 정확하게 예측 제어할 수 있다.

#### [P30-12]

**Al-Mg-Si계 합금의 미세조직과 경도에 미치는 열처리의 영향:** 김선진(한밭대학교), 신경식(세립티앤디), 김점민\*(한밭대학교)  
**Keywords:** Al-Mg-Si, aluminum, heat treatment, microstructure, hardness

자동차 부품 등에 널리 사용되는 Al-Mg-Si계 알루미늄 합금은 기계적 성질, 내식성, 성형성 등이 전반적으로 모두 우수하며, 최근 들어서는 전기자동차 배터리지지 부품에도 적용되고 있다. 본 연구에서는 Al-Mg-Si 합금의 냉간단조 과정에서 필수적인 중간 어닐링 공정과 최종 T6 열처리를 요구 조건에 맞추어 최적화하고자 하였다. 냉간단조 후 합금의 성형성을 회복하기 위해 다양한 어닐링 온도에서 1시간 가열한 후 미세조직과 경도를 분석하였으며, 가열 온도 300 °C 이상에서 재결정이 일어나므로 현저한 경도 감소가 관찰되었다. 흥미로운 점은 300 보다 높은 400 °C 온도로 어닐링을 수행하면 경도가 더 감소하나 500 °C에서는 오히려 경도가 약간 더 높게 관찰되는 것이다. 이러한 현상은 미세 석출상의 고용 및 재석출과 관련이 있는 것으로 판단되며, TEM 분석을 포함한 추가 연구가 수행되었다. 분석결과, Mg<sub>2</sub>Si 석출상 이외에도 불순물 Fe로 인하여 다수의 미세 AlFeSi상이 존재하는 것을 알 수 있었으며, 이러한 상들의 기지 고용 및 재석출에 대한 연구가 더 필요하다고 판단된다. 한편, Al-Mg-Si 합금의 최종 열처리인 T6 조건을 최적화하는 연구도 진행 중에 있다.

#### [P30-13]

**Reactive spark plasma sintering of in-situ synthesized TaSi<sub>2</sub>-SiC composites: Densification behavior and phase evolution:**  
**Lee Jeong Han\***(한국생산기술연구원)

**Keywords:** Reactive spark plasma sintering, Densification behavior, Phase transformation, Refractory Silicide, Microstructure

This study investigates the microstructural evolution and enhanced properties of in-situ TaSi<sub>2</sub> and TaSi<sub>2</sub>-SiC composites fabricated via Spark Plasma Sintering (SPS). The composites were fabricated using an in-situ solid-state reaction ( $\text{TaC} + 3\text{Si} \rightarrow \text{TaSi}_2 + \text{SiC}$ ) to achieve a thermodynamic equilibrium and uniform dispersion of SiC reinforcements. The sintering behavior and phase evolution were systematically analyzed. The in-situ synthesized SiC particles effectively inhibited grain growth and improved the mechanical properties through dispersion strengthening and crack deflection mechanisms. Consequently, the TaSi<sub>2</sub>-SiC composite exhibited superior Vickers hardness (1347.9 kg/mm<sup>2</sup>) and fracture toughness (7.3 MPa·m<sup>1/2</sup>) compared to the monolithic TaSi<sub>2</sub> (1209.9 kg/mm<sup>2</sup>, 5.9 MPa·m<sup>1/2</sup>). Furthermore, high-temperature oxidation tests at 1000°C revealed that the composite showed enhanced oxidation resistance due to the formation of a protective oxide scale, which suppressed oxygen diffusion into the bulk material.

#### [P30-14]

**Pd-Ag-Cu 합금의 미세조직과 기계·전기적 물성에 미치는 용체화 및 시효 열처리의 영향:** 이병수\*, 최민호(한국생산기술연구원), 김상권, 송람, 조훈(한국생산기술연구원), 박정웅, 박형진, 설재복(국민대학교), 이석연, 문정탁(MKE전자)

**Keywords:** 포고핀, Pd-Ag-Cu합금, 석출상, 비저항

포고핀 (Pogo Pin) 은 안정적인 전류 전송 및 수 만회 이상의 탈착을 견디기 위해 높은 전도율과 동시에 우수한 내구성을 요구하고 있다. 특히 우수한 내마모성 때문에 500 Hv 이상의 높은 경도를 요구하고 있다. 기존 Be-Cu 소재는 우수한 경도와 강도를 가지고 있으나 환경적인 문제로 인해 더 이상 사용이 어렵다. 최근, Pd-Ag-Cu 합금이 대체소재로 급부상하고 있으나 제조 공정 기술개발이 필요한 상황이다. Pd-Ag-Cu 합금을 연속주조하고 이후 스웨이징 가공하여 용체화 열처리 후 시효열처리를 통해 경도 및 전도도를 개선한다. 그러나, Pd-Ag-Cu 합금의 열처리 후 전기적 및 기계적 물성 해석에 대한 미세조직 해석이 부족한 상황이다. 본 연구에서는 Pd-Ag-Cu합금의 미세조직과 기계적·전기적 물성에 미치는 용체화 및 시효 열처리의 영향을 분석하였다. 시험편은 SiC sand paper로 연마하고 이후 Diamond paste로 1 μm 까지 연마하였다. 미세조직 분석을 위해 SEM, EBSD, TEM을 이용하였다. 경도를 시험당 5회 이상 측정하였다. 인장시험편은 봉상형 인장시험편을 가공하여 상온에서 인장시험을 수행하였다. 비저항 측정을 위해 100 mm 단위로 샘플을 제작하고 4 probe test를 수행하였다. 상분석을 위해 XRD를 이용하여 시험편에 형성된 상들을 분석하였다.

## P31 : 고온재료

Room 3층 로비, 4월 30일

### [P31-1]

**Haynes 282 초합금 Laser 용접부의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 용접후열처리 효과:** 백재영, 양희평, 조덕현, 이학성, 전중배\*(동아대학교)

**Keywords:** 레이저 용접, 후열처리 (PWHT), 시효처리, 미세조직, 기계적 특성

초임계 CO<sub>2</sub> 발전용 터빈과 차세대 항공우주 추진 시스템 등 극한 환경용 고온 부품의 수요가 증가함에 따라, 700 °C 이상에서의 안정적 강도 유지와 산화-부식 내구성 확보를 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Haynes 282는  $\gamma'$  석출 강화형 Ni 기반 초내열 합금으로, 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,  $\gamma'$ 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,  $\gamma'$ 상의 석출을 유도해 석출 강화 효과를 향상시키는 것이 중요하다. 본 연구에서는 Haynes 282(HY282) 레이저 용접부를 대상으로 PWHT에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화를 분석하였다. 500 W, 5 mm/s 조건에서 레이저 용접을 수행하여 무결합 용접부를 확보한 후, OM으로 2차 수지상 간격(SDAS)을 측정하여 용접 조직의 정량적 변화를 평가하였다. 또한 SEM, EDS로 조성 분석을 통해 수지상 간 화학 조성 편식과 탄화물-석출물 분포를 정량화하였다. EBSD 분석을 통해 열처리에 따른 결정립 크기, 형상 및 분포 변화를 평가하여 미세조직 안정화 정도를 확인하였다. 이를 바탕으로 최적 PWHT 조건을 도출하고,  $\gamma'$  석출 거동과의 연관성을 포함하여 as-welded 대비 기계적 물성 향상을 확인하는 동시에 미세조직 변화와 물성 향상과 후열처리의 개선 효과를 검증하고자 한다.

### [P31-2]

**Alloy Design of a Novel Positive-Misfit Superalloy for AM: Enhanced Crack Resistance and Unique Deformation Behavior:** Kim Tae Gyeong, Lee A Reum, Hong Hyun Uk\*(Changwon National University)

**Keywords:** Ni-based superalloy, Additive Manufacturing, Strain-age cracking,  $\gamma/\gamma'$  lattice misfit

The application of high- $\gamma'$  Ni-based superalloys in additive manufacturing (AM) is severely limited by strain-age cracking (SAC) during post-processing heat treatments. In conventional alloys like IN738LC, a negative lattice misfit at elevated temperatures increases the geometrically necessary dislocation (GND) density, exacerbating residual stresses and leading to crack formation at grain boundaries. To overcome this fundamental limitation, we propose a novel alloy design strategy based on lattice misfit control to develop a highly weldable, crack-resistant superalloy, designated as 738P-2. To enhance printability, elements susceptible to cracking (Al, Ti, C, Zr) were strategically reduced. Furthermore, to compensate for the loss of positive misfit caused by the reduction of Ti and to maintain a high volume fraction of the strengthening  $\gamma'$  phase, 5 wt.% of Ta was systematically added. The newly designed 738P-2 alloy was processed via selective laser melting (SLM), achieving an excellent relative density of up to 99.8%. Upon direct aging treatment at 850°C for 1 hour, the conventional IN738LC exhibited severe intergranular cracking. In stark contrast, the 738P-2 alloy demonstrated exceptional SAC resistance with absolutely no crack formation. This remarkable improvement is attributed to the positive lattice misfit, which effectively relaxes the tensile residual stress accumulated in the as-built state and suppresses stress concentration. These findings present a robust framework for designing next-generation, high-performance superalloys tailored for crack-free additive manufacturing and reliable high-temperature applications.

### [P31-3]

**적층제조용 Ni기 초내열합금 설계와 열처리 설계:** 이찬희, 노현빈, 진민수(한국과학기술원), 김태경, 홍현욱(국립창원대학교), 최벽파(한국과학기술원)

**Keywords:** Ni-based superalloys, Electron beam melting, Alloy design, Microstructure, Heat treatment optimization

Ni기 초내열합금은 고온에서 우수한 기계적 물성, 내부식, 내산화 특성 등을 가지기 때문에 고온, 고압, 부식, 산화 환경과 같이 매우 혹독한 환경에 주로 사용된다. 가스터빈에 사용되는 터빈 블레이드는 직접적으로 폭발 가스와 충돌하는 부품으로써 상당히 높은 열과 압력에 노출되기에, 기본적으로 고온에서도 그 우수한 물성을 유지할 수 있어야 하여 주로 Ni기 초내열 합금으로 제작되고 있다. 이때 가스터빈의 효율은 폭발가스의 입구 온도 상승과 함께 향상될 수 있기 때문에, 최근에는 적층제조 공정을 적용하여 터빈 블레이드 내부에 복잡한 냉각 유로를 형성시키고 그 온도 수용성을 획기적으로 향상시키고자 하는 연구들이 다수 수행 중에 있다. 하지만 Ni기 초내열합금의 고온에서의 기계적 물성은 L12 ordered FCC 구조의  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>(Al, Ti) 석출상 분율이 높을수록 전위의 움직임을 효과적으로 방해하여 우수해지나, 이는 재료를 brittle하게 만들고 적층제조 공정 도중 porosity나 crack과 같은 defect를 형성하여 적층제조를 어렵게 한다. 따라서 본 연구에서는 우수한 고온 물성과 우수한 적층제조 용이성을 동시에 만족할 뿐만 아니라 Hf, Ta과 같은 희소 금속을 저감하여 가격 경쟁력까지 우수한 새로운 Ni기 초내열합금을 설계하고자 하였고, 이를 위해 다양한 열역학적 인자들을 고려하여 screening을 하는 방식으로 합금 설계를 수행하였다. 또한 이렇게 설계된 합금에 최적화된 열처리 공정 조건을 설계하기 위해, 다양한 조건에서의 열처리를 통해 열처리-미세조직-기계적 물성 간의 상관 관계를 파악하는 연구를 수행하였다.



**[P31-4]**

**인코넬 939 계열 니켈계 내열합금의 석출상 구성 원소 분율 제어를 통한 기계적 특성 최적화 전략:** 김동환, 김민석, 김재권, 민현기 (서울대학교), 정희찬(한화에어로스페이스), 박은수\*(서울대학교)

**Keywords:** 니켈계 초합금, 석출 강화, 미세구조, 기계적 물성, 연신율

인코넬 939는 크리프 수명과 산화 저항성이 우수한 니켈계 내열합금 소재이지만, 연신율이 비교적 떨어지며 용접 및 적층 제조 과정에서 발생하는 균열에 취약하다는 한계 또한 가지고 있다. 본 연구에서는 인코넬 939 계열 니켈계 내열합금의  $\gamma$ -석출상 구성 원소 분율 제어를 통해 미세구조 및 기계적 특성의 최적화를 수행하고자 하였다. Al, Ti, Ta 및 Nb와 같은 석출상 구성 원소의 분율이 제어된 다수의 인코넬 939 기반 내열합금 시편이 제조되었으며, 4-step 균질화 및 열처리 과정을 거친 뒤 그 미세구조 및 기계적 특성을 평가하였다. 실험 결과 특정 원소 분율이 높은 조성의 미세구조에서 독특한 바늘 모양의 석출 거동이 관찰되었으며, EDS mapping을 통해 이것이 취성이 높은  $\eta$ -석출상을 확인할 수 있었다. 이러한 취성 석출상의 생성을 억제하기 위해 석출상 구성 원소의 분율을 정밀하게 재조정함으로써, 강도의 하락을 최소화하면서도 연신율은 대폭 향상시킬 수 있는 합금 설계 전략을 수립할 수 있었다. 해당 전략을 통해 설계한 신규 개발 합금 조성은 기존 인코넬 939 합금 대비 상온 강도, 상온 연신 및 고온 연신이 모두 10% 이상 개선되는 등 우수한 기계적 특성을 나타냄을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구는 인코넬 939뿐 아니라 다른 니켈계 내열합금의 취성 문제를 해결하고 기계적 특성을 최적화하는 새로운 합금 설계 방향성을 제시할 수 있을 것으로 기대한다. 이 논문은 2026년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No. KRIT-CT-23-042-03)

**[P31-5]**

**고내식·고청정 Ni-Cr-Mo-W계 초내열합금의 열역학 기반 스크리닝을 통한 성분계 최적화:** 김종훈, 주하연, 이상현(국립창원대학교), 김덕령(세아창원특수강), 홍현욱\*(국립창원대학교)

**Keywords:** Hastelloy C-22, Hastelloy C-276, intergranular corrosion,  $\mu$  phase, TCP phase, alloy design

고내식·고청정 Ni-Cr-Mo-W계 하스텔로이 합금(C-22, C-276)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-22 및 C-276)의 미세조직/특성 분석과 열역학·속도론 기반 성분계 개량 및 후보 조성 스크리닝을 수행하였다. 초도품 미세조직 관찰 결과, C-22 및 C-276 모두에서 Mo/Si-rich TCP 상이 입계 주변에 존재하였으며, C-276에서 상대적으로 더 뚜렷한 분포 경향을 보였다. 평균 결정립 크기는 C-22가 36.9  $\mu\text{m}$ , C-276이 25.0  $\mu\text{m}$ 로 확인되었다. 부식 특성은 ASTM G28(method B) 침지 시험으로 평가하였으며, C-22의 부식 속도는 7.5 mpy(또는 6.3 mpy 수준), C-276은 325.4 mpy로 측정되어 합금 간 큰 차이를 나타냈다. 부식 후 미세조직 분석에서는  $\mu$ -phase가 존재하는 입계를 따라 국부 부식이 진행되었고, STEM line-scan 결과  $\mu$ -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 프레임워크를 구축함으로써 고내식·고청정 Ni-Cr-Mo-W계 소재의 성분계 최적화에 기여할 것으로 기대된다.

**[P31-6]**

**석출물 제어 미세조직이 Inconel 718의 인장 균열 특성에 미치는 영향 :** 허수빈(한국생산기술연구원, 부산대학교), 안지섭(두산에너지리티), 여승현, 조아라, 이나경(한국생산기술연구원, 부산대학교), 김종식(KPCM), 황선광\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** Inconel 718, Delta processing, Precipitate, Tensile deformation, Crack evolution

Inconel 718은 니켈 기반 초내열합금으로서 고온·고압 환경에서도 우수한 기계적 특성을 유지하여 우주항공 및 발전소 분야의 부품 소재로 활용되고 있다. 해당 소재에 대한 여러 연구에서 균질화 열처리(Homogenization, Ho) 대비 델타 프로세싱(Delta Processing, DP)을 통한  $\delta$  상 석출이 결정립 미세화와 열간 성형성 향상에 효과적임이 보고된바 있다. Ho 조건에서 발생한 균열 주변에서 NbC 석출물이 관찰되어 석출물 종류에 따른 균열 메커니즘의 차이가 제기되었다. 그러나 기존 연구는 사후 파괴 분석에 국한되어 균열 개시 및 전파 과정에서 석출물의 역할을 실시간으로 규명하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 in-situ SEM 인장시험 모듈을 활용하여 Ho 및 DP 시편에서의 인장 균열 개시 및 진전 메커니즘을 실시간으로 관찰하고, 석출물 제어 미세조직이 인장 변형 거동 및 균열 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고자 하였다. 상온 및 고온 조건에서 만능재료시험기와 Gleeble 3800-GTC를 이용한 거시적 인장시험을 수행하여 기계적 거동 차이를 평가하였으며, in-situ tensile module이 결합된 FE-SEM 분석을 통해 국부 인장 변형 및 균열 개시 메커니즘을 규명하였다. 또한 결정립계 특성과 석출물 분포를 관찰하고, EBSD 기반 IPF, KAM 맵과 GND 분석을 통해 변형 특성을 평가하였다. 분석 결과, 상온에서는 두 시편 모두 전위 슬립이 주요 변형 기구로 작용하였으나, 결정립계 및 결정립 내부에서의 균열 개시와 전파 거동은 석출물의 유형과 분포에 따라 상이한 파괴 양상을 보였다. 특히 DP 시편에서는 결정립계에서의 변형 조절 효과가 나타났으며, 변형 온도 증가에 따라  $\delta$  상과 연관된 변형 완화 메커니즘이 활성화되어 국부 변형이 감소하고 균열 저항성이 향상되는 경향을 보였다. 본 연구는 Inconel 718에서 석출물 제어 미세조직이 인장 변형 및 균열 개시에 미치는 영향을 규명하였으며, 이는 우주항공용 합금의 열간 성형 공정에서 변형 안정성 확보를 위한 미세조직 설계 지침으로 활용될 수 있다.

### [P31-7]

Creep Behavior at 630°C of Ferritic/Martensitic Heat-Resistant Steel with Cu Addition: Duhyun Kim, Byeong-Hyeon Lee(Korea Institute of Science and Technology), Seong Hoon Kim(Korea Institute of Materials Science), Woo-Sang Jung, Dong-Ik Kim, Gyeong Ho Kim(Korea Institute of Science and Technology), Seoung-Ho Lim(Korea Advanced Institute of Science and Technology), Jin-Yoo Suh\*(Korea Institute of Science and Technology), Seok Su Sohn\*(Korea University), Pyuck-Pa Choi\*(Korea Advanced Institute of Science and Technology), Jong-Ho Shin(Doosan Enerbility Co., Ltd.), Tae-Ho Lee\*(Korea Institute of Materials Science)

**Keywords:** Ferritic/Martensitic heat-resistant steel, Steam turbine, Rotor, Blade, Creep property, Dislocation density

This study aims to enhance the high-temperature properties and creep resistance of 10% Cr ferritic/martensitic steels used in steam turbine rotors and blades in combined heat and power systems. By replacing Co with Cu, which performs a similar role but at a lower cost, an alloy was designed to improve high-temperature strength and maintain performance under prolonged exposure to elevated temperatures. Creep tests were conducted for the reference (Cu-free) and modified (Cu-added) steels at 630°C under various stress conditions to evaluate the effect of Cu addition. Notably, the Cu-containing steel exhibited superior creep resistance for long-term creep under low stress conditions, especially at 145 MPa, where its life was increased up to 12,733 hours which is 14% improved compared to the Cu-free steel. Microstructural analysis using Electron Back-Scattered Diffraction (EBSD) revealed that the Cu-containing steel exhibited stable prior austenite grain size and better retention of martensite lath structure during long-term creep. Transmission electron microscopy (TEM) and atom probe tomography (APT) confirmed that Cu-rich precipitates formed both at the grain boundaries and within the grains played a crucial role in suppressing grain coarsening and delaying recovery, thereby maintaining a high dislocation density. XRD data analysis using the Modified Williamson-Hall (MWH) and Modified Warren-Averbach (MWA) methods demonstrated that the dislocation density of the Cu-free steel decreased by 81%, while that of the Cu-containing steel decreased by only 66% after long-term creep under 145 MPa. This study highlights the importance of copper as an effective substitute for cobalt in improving the high-temperature properties of ferritic/martensitic steels for turbine applications, especially under prolonged low-stress conditions.

### [P31-8]

HIP 공정으로 제조된 Zr 피복관용 Cr-Al 타겟의 Zr 첨가에 따른 미세조직 및 산화거동에 미치는 영향: 심재현, 김대현, 이준구, 박상하, 홍순직\*(국립공주대학교)

**Keywords:** Cr-Al alloy, Cr-Al-Zr alloy, Hot Isostatic Pressing (HIP), Oxidation resistance, Sputtering target

원자력 발전 설비의 안전성 강화를 위한 사고저항성 핵연료(ATF, Accident Tolerant Fuel) 기술 개발이 전 세계적으로 활발히 진행되고 있으며, 특히 고온 산화 분위기에서 급격한 산화 반응을 보이는 Zr 기반 피복관의 취약성을 보완하기 위한 내산화 코팅 소재 개발이 요구되고 있다. 본 연구는 Cr-Al 타겟 소재에 Zr를 첨가하여 두 합금의 특성을 비교하고, 고온 산화 저항성이 우수한 최적 타겟 조성을 선정하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 진공 유도 용해(Vacuum Induction Melting, VIM)를 이용하여 Cr-Al 및 Cr-Al-Zr 합금 잉곳을 제조 후 불 밀링으로 분쇄하였으며, 분급을 통해 입도 분포 차이에 따른 변수를 최소화하였다. 이후 Hot Isostatic Pressing (HIP) 공정으로 직경 3인치 크기의 타겟을 제조하였다. 제조된 분말은 입도(PSA), 산소함량(OH), 탭 밀도(분말 충전률 및 유동도) 분석 등에서 유사한 특성을 나타낸 분말 사용하여 Zr 첨가 효과 차이에 의한 타겟의 산화 저항성에 미치는 영향을 확인하였다. 이후 X선 회절 분석(XRD) 및 주사전자현미경(SEM) 관찰 결과, 두 분말 모두 체심입방(BCC) 단상을 나타내었으며 Cr 기지 내 Al의 고용이 확인되었다. 다만 Cr-Al-Zr 합금에서는 Zr이 완전히 고용되지 않고 국부적으로 편석된 영역이 관찰되었다. HIP 공정을 통해 제조된 타겟의 특성 평가 결과, XRD 분석을 통해 공정 중 상변화가 발생하지 않았음을 확인하였으며, 밀도 측정 결과 Cr-Al-Zr 타겟은 99%의 상대 밀도를 나타내 Cr-Al 타겟 대비 약 4% 높은 치밀화를 보였다. 열중량분석(TGA) 결과에서는 Cr-Al 타겟은 2.7%, Cr-Al-Zr 타겟은 0.5% 무게가 증가하였다. 이는 Zr 첨가가 고온 산화 환경에서 보다 안정적인 산화 거동을 유도함을 의미하며, 결과적으로 Cr-Al-Zr 조성이 스퍼터링 공정용 타겟 소재로서 보다 우수한 산화 저항성을 나타냄을 시사한다.

### [P31-9]

열간 등압 성형을 통해 제조된 초내열합금 분말 성형체의 지연 냉각 조건에 따른 미세조직 및 기계적 특성: 김대용\*, 김동훈, 김연태, 김규식, 고윤석, 양성호(국방과학연구소)

**Keywords:** 항공 엔진 디스크, 초내열합금, 열간 등압 성형, 열처리, 기계적 특성

항공 엔진 디스크는 고온, 고압 환경에 노출되기 때문에 고온 환경에서 높은 기계적 물성이 요구된다. 항공 엔진 요구 성능이 향상됨에 따라 항공 엔진 디스크 합금도 개발이 되었으며, 고온 환경에서 기계적 물성을 향상시키기 위하여 많은 Gamma상의 분율과 높은 Solvus 온도를 요구하는 방향으로 발전되었다. 이러한 합금은 고온에서 성형이 어렵기 때문에 분말 형태로 제조하여 열간 등압 성형(Hot Isostatic Pressing, HIP) 후 디스크 형태로 제작하며, 용체화 열처리 및 시효 열처리 후 최종 부품으로 적용된다. 하지만, 합금의 높은 강도로 인하여 용체화 처리 후 냉각시 균열이 발생할 가능성이 있으며, 이를 해결하기 위하여 용체화 열처리 후 지연 냉각을 통하여 균열 성장을 억제한다. 그러나, 지연 열처리 과정에서 Solvus 온도 이하로 냉각되기 때문에 Gamma상의 형상과 분율의 변화로 기계적 물성이 달라질 수 있다. 이에 본 연구에서는 가스 분무 공정을 통해 제조된 니켈계 초내열 합금 분말을 열간 등압 성형하여 소형 디스크 형태로 제작하였으며, 용체화 열처리 후 지연 냉각 조건 변화에 따른 미세조직 및 기계적 특성 변화에 대해서 분석하고자 하였다.

**[P31-10]**

**분말야금으로 제작된 고강도 초내열합금의 미세조직 제어를 위한 단조 성형 연구:** 김규식\*, 송영범, 이성호, 김동훈, 김대웅, 고윤석 (국방과학연구소), 조재현(케이에스피), 김정기(경상국립대학교)

**Keywords:** 분말야금, 초내열합금, PPB, 단조성형, 미세조직제어

니켈계 초내열합금(Ni-base superalloy) 분말야금 소재는 우수한 고온 강도, 내식성, 우수한 피로 특성을 지니고 있어 우주/항공 및 발전용 가스 터빈 엔진 등의 고성능 핵심 고온 부품으로 적용되고 있다. 일반적으로 분말야금용 고강도 초내열합금은 난성형 소재이므로 분말을 제조하고 고온등압성형/고온 성형을 통해 중간재를 제작하게 된다. 하지만, 제조된 중간재는 PPB(Prior particle boundary, 산화물 또는 개재물의 연결로 형성)로 명명되는 결함이 존재함에 따라 기계적 물성이 크게 저하될 수 있다. PPB 제거를 위해서는 초내열합금 분말이 매우 낮은 산소함량(10 ppm 이하)을 가지도록 제어되어야 하지만 분말은 표면적이 넓어 약 80~120 ppm 수준의 산소 함량을 나타낸다. 따라서 분말의 청정도 제어를 통한 PPB 제거는 현실적으로 어려움이 있다. 본 연구에서는 고온 등압성형(hot isostatic pressing)으로 제작된 중간재의 내부 결함으로 존재하는 PPB 및 내부 기공 제어, 이와 함께 목걸이 형태(necklace)의 결정립 구조를 제어하기 위하여 단조 성형을 적용하였으며 단조 조건에 따른 미세조직학적 변화를 연구하였다.

**[P31-11]**

**니켈기 단결정 합금의 고용화 열처리 조건에 따른 미세조직 변화:** 고윤석, 김대웅, 김규식, 김연태, 김동훈, 송영범, 이성호, 양성호\*(국방과학연구소)

**Keywords:** 니켈기 단결정 합금, 열처리, 미세조직

니켈계 초내열합금은 gamma prime( $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ ) 강화상에 의한 우수한 고온 기계적 특성으로 항공 우주 및 발전용 터빈 부품에 사용되고 있다. 특히 니켈기 단결정 합금의 경우 다결정 혹은 일방향 응고 합금에 비해 높은 온도수용성을 갖기 때문에 항공기 터빈 부품의 핵심 소재로 주목받고 있다. 일반적으로 니켈기 단결정 합금은 기존 다결정 합금에 비해, 입계 강화 목적으로 첨가되었던 C, B, Zr 등의 원소들을 제한하는 대신 W, Ta, Mo, Re과 같은 합금원소들이 다량 첨가되는 특징이 있다. 이중에서도 Re은 초고 가임에도 합금의 온도수용성을 획기적으로 향상시키기 때문에 매우 중요하게 다뤄지며, 일반적으로 Re의 첨가량에 따라 Re이 첨가되지 않은 제1세대 단결정 합금부터 Re이 약 6 wt.% 첨가된 제3세대 단결정 합금까지 분류된다. 이러한 높은 온도 수용성에도 불구하고, 니켈기 단결정 합금은 고온에서 장시간 노출될 경우 기계적 물성을 저하할 수 있는 TCP(Topologically Close-Packed)상이 형성될 수 있으며, 알루미늄이드 코팅 적용시 확산층 아래에서 형성되는 SRZ(Secondary Reaction Zone)으로 인해 응력 과단 수명이 감소하는 등의 문제가 보고되고 있다. 합금 내 높은 함량의 Re, Mo, W 등의 원소가 원인으로 지목되고 있으며, 이러한 문제점들은 특히 주조 시 주조 조직 내 원소들의 불균일한 분포에 의해 악화될 수 있다. 선진사들의 경우 정밀하게 설계된 열처리 공정을 통해 미세조직을 최적화하여 해당 문제를 최소화하고 있다. 단계적 열처리, 승온 속도, 고용화 온도 및 냉각속도 등이 주요 열처리 인자로 알려져 있으나 정확한 조건은 공개되지 않고 있으며, 특히 전략물자로 통제되는 일부 합금의 경우 관련 문헌은 전무한 실정이다. 따라서 본 발표에서는 고용화 열처리 조건에 따른 니켈기 단결정 합금의 미세조직 관찰을 통해, 니켈기 단결정 합금에 대한 최적 열처리 조건을 고찰해보고자 한다.

**[P31-12]**

**TZM 합금의 Si 및 B 기반 확산 코팅 공정에 따른 미세구조 및 고온 산화 거동 비교 분석:** 최지성, 김성진, 정소영, 김선진, 박준식\*(국립한밭대학교)

**Keywords:** TZM 합금, 확산 코팅, 코팅 성장거동, 내산화성, 미세구조

몰리브덴은 고온 응용 분야에서 중요한 역할을 하는 내화 금속의 가장 중요한 구성 요소 중 하나이다. 탄화물 안정화 합금으로 분류된 TZM은 가장 널리 사용되는 몰리브덴 기반 합금이다. Mo-0.5Ti-0.08Zr-0.002C (wt%)의 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 합금으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 TZM 합금에 확산 코팅 기법으로 Si 코팅, B/Si 단계별 코팅, Si + B 혼합코팅을 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.

**[P31-13]**

**니켈 초합금의 조성 변화에 따른 나노 석출물 및 탄화물의 에칭 기법 연구:** 홍승규, 이초현, 양성현, 강민유, 강다원, 박형진(국민대학교), 윤대원(한국재료연구원), 박노근(영남대학교), 홍현욱\*(국립창원대학교), 설재복\*(국민대학교)

**Keywords:** 니켈 초내열합금, 에칭, 나노 석출물, 입계 탄화물, 주사전자현미경, 정량 분석

니켈 기반 초내열합금의 고온 특성은 주로  $\gamma'$  석출물과 입계(grain boundary) 탄화물의 크기, 분율 및 분포에 의해 지배되며, 합금 개발 및 미세조직 평가를 위해서는 이들에 대한 신뢰성 있는 정량 분석이 필수적이다. 그러나 기존의 화학적 에칭 절차는 합금 조성 변화에 따른  $\gamma'$  석출물의 크기 및 분율 변화나 탄화물 종류의 차이를 충분히 고려하지 않고 관측적으로 적용되는 경우가 많아, 불명확한 상(phase) 대비와 신뢰할 수 없는 이미지 분석 결과를 초래한다. 본 연구에서는 Haynes® 282와 이를 기반으로 주요 합금 원소를 조절한 두 종류의 모델 합금을 대상으로, 합금 조성이 에칭 거동에 미치는 영향을 체계적으로 규명하고  $\gamma'$  석출물 및 입계 탄화물 관찰을 위한 최적의 에칭 조건을 확립하였다. 실험 결과,  $\gamma'$  석출물의 에칭 특성은 Al 및 Ti 함량에 따른 석출물의 크기와 분율 변화에 직접적으로 의존함을 확인하였다. Al/Ti 함량이 높아 조대한  $\gamma'$  석출물이 형성된 합금의 경우 질산 기반 에칭을 통

해 안정적인 대비 확보가 가능하였으나, Al/Ti 함량이 감소하여 미세  $\gamma'$  석출물이 형성된 합금에서는 불산(HF)을 첨가하여  $\gamma$  기지(matrix)의 부동태 피막을 제어해야만 명확한 관찰이 가능하였다. 한편, 입계 탄화물의 에칭 거동 역시 Nb 및 Ta와 같은 탄화물 형성 원소의 첨가 여부에 따라 달라졌다. Cr-rich  $M_{23}C_6$  탄화물이 주를 이루는 Haynes® 282는 질산 에칭만으로도 충분한 대비가 확보된 반면, Nb/Ta가 첨가되어 화학적 안정성이 높은 MC 탄화물이 공존하는 모델 합금의 경우 염화물(chloride) 기반 에칭액을 적용해야만 모든 탄화물을 효과적으로 식별할 수 있었다. 본 연구는 합금 조성 변화에 따른 맞춤형 에칭 프로토콜을 제시함으로써, 다양한 니켈 기반 초내열합금의 미세조직 정량 분석 신뢰도를 향상시키는 데 기여한다.

#### [P31-14]

**유동 반응에 의한 텅스텐 산화물의 환원 및 W 입자 제어에 대한 연구:** 하국현\*, 박민수\*, 신하진, 박정우(한국재료연구원)

**Keywords:** 텅스텐 산화물, 환원, 유동반응, 입자제어, 텅스텐 분말

텅스텐(W)은 비중이 높고, 내열 및 고강도 특성을 가지고 있으므로 전기/전자, 열 제어 부품 및 우주 발사체, 항공기 등의 주요 소재로 사용되는 주요한 전략 물질이나, 세계적으로도 공급이 부족한 대표적 희유금속 중의 하나이다. 텅스텐(W)은 고용점 금속으로써, 텅스텐 제품은 주로 분말 야금 공정으로 제조되므로, 텅스텐을 활용하기 위해서는 분말 형태로의 합성이 필요하다. 텅스텐은 정광 형태로 채굴되거나 혹은 재활용 공정 중 스크랩으로 부터 산화물 형태로 회수되고 있으므로, 이를 활용하기 위해서는 산화물 환원 공정이 필요하다. 또한, 텅스텐 및 이를 활용한 텅스텐 탄화물 소재의 물성을 향상시키기 위해서는 분말 입자의 미세화가 필요하므로, 텅스텐 산화물 분말로부터 균일하고, 미세한 텅스텐 분말을 합성하기 위하여 회전 유동형 환원 장치를 사용하여 미립자 W분말을 합성하였다. 본 연구에서는 초경 스크랩으로 부터 얻어진 텅스텐 산화물을 활용하여 텅스텐 분말을 회수하는 공정을 개발하였으며, 산화물 분말을 최종 환원 열처리하여 100 nm급 텅스텐 분말을 얻을 수 있었고, 이를 고밀도 소결하여 99%이상의 고밀도 소재를 제조하였다. 후기) This study was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP, Grant No. 20217510100070), the National Research Council of Science & Technology(NST) grant by the Korea government (MSIT) (No. GTL25031-210).

## P32 : 열전

Room 3층 로비, 4월 30일

### [P32-1]

**Se 치환에 따른 Wittichenite  $\text{Cu}_3\text{BiS}_{3-y}\text{Se}_y$  고용체의 열전특성:** 이푸른, 이도현, 김일호\*(국립한국교통대학교)

**Keywords:** thermoelectric, wittichenite,  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ , doping

Wittichenite( $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ )는 비교적 저렴하고 저독성 원소로 구성된 삼원계 황화물 반도체로, 사방정계( $\text{P2}_1\text{2}_1\text{2}_1$ ) 결정구조와 약 1.0–1.6 eV 범위의 적절한 밴드갭을 지녀 중·저온 열전 소재로서의 잠재력을 갖는다. 본 연구에서는  $\text{Cu}_{33}\text{BiS}_3$ 의 S 자리에 Se를 치환 도핑하여 치환형 고용체  $\text{Cu}_3\text{BiS}_{3-y}\text{Se}_y$  ( $y = 0.10\text{--}0.25$ )를 형성하고, 이에 따른 결정 구조 변화와 전하 수송 및 열전 특성의 상관관계를 조사하였다. 조성 제어를 위해 Se 도핑량을 단계적으로 변화시켰으며, 기계적 합금화(mechanical alloying, MA)와 열간 압축 성형(hot pressing, HP) 공정을 적용하여 벌크 시편을 제조하였다. Cu, Bi, S 및 Se 원소 분말을 아르곤 분위기에서 350 rpm으로 6 시간 동안 MA 합성한 후, 진공 분위기에서 623 K, 70 MPa 조건 하에서 2 시간 동안 HP 소결을 수행하였다. X-선 회절 분석 결과, 모든 조성에서 wittichenite 단일상이 안정적으로 형성되었으며, Se 치환에 따른 이차상은 관찰되지 않아 전 조성 범위에서 치환형 고용체가 성공적으로 형성되었음을 확인하였다. 또한 Se 도핑량 변화에 따른 전기전도도, 제벡계수, 열전도도 및 열전 성능의 변화를 분석하여, 음이온 치환에 의한 전하 수송 거동 조절 효과를 연구하였다. 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).

### [P32-2]

**Cu 비화학양론 결핍에 의해 제어된 보르나이트  $\text{Cu}_{5-x}\text{FeS}_4$ 의 전하수송 및 열전성능:** 오혜민, 김형일, 김일호\*(국립한국교통대학교)

**Keywords:** thermoelectric,  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ , bornite, off-stoichiometric, non-stoichiometric

보르나이트(bornite,  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ )는 본질적으로 낮은 격자 열전도도와 화학조성 조절을 통한 전하수송 특성 제어가 가능하다는 점에서 유망한 중·저온 열전 소재로 주목받고 있다. 본 연구에서는 보르나이트 구조에서 Cu 비화학양론 결핍( $\text{Cu}_{5-x}\text{FeS}_4$ ;  $x = 0\text{--}0.2$ )을 도입하여 정공 캐리어 농도를 제어하고, 이에 따른 전하수송 거동 및 열전 특성의 변화를 체계적으로 조사하였다. 시료는 기계적 합금화(mechanical alloying, MA)와 열간 압축 소결(hot pressing, HP) 공정을 결합하여 합성하였다. Ar 분위기에서 350 rpm으로 6시간 동안 MA를 수행한 후, 합성된 분말을 진공 조건에서 70 MPa의 압력 하에 723 K에서 2시간 동안 HP 소결하였다. 합성 분말 및 소결체의 X-선 회절 분석 결과, 대부분의 조성에서 단일상 보르나이트 구조가 안정적으로 유지되었으며, 뚜렷한 2차상은 관찰되지 않았다. 다만,  $\text{Cu}_{4.80}\text{FeS}_4$  조성의 소결 시편에서는 미량의 칼코피라이이트(chalcopyrite,  $\text{CuFeS}_2$ ) 2차상이 검출되었다. Hall 효과 측정과 함께 전기전도도, 제벡계수, 파워팩터, 열전도도 및 열전 성능지수(ZT)를 평가하여, Cu 결핍이 보르나이트의 전하수송과 열전성능에 미치는 영향을 연구하였다. 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).

### [P32-3]

**Sn 도핑된 위티체나이트  $\text{Cu}_3\text{Bi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{S}_3$ 의 열전 특성:** 이도현, 이푸른, 김일호\*(국립한국교통대학교)

**Keywords:** thermoelectric, wittichenite,  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ , doping

위티체나이트(wittichenite,  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ )는 사방정계(orthorhombic) 결정구조를 갖는 반도체 물질로, 약 1.0–1.6 eV 범위의 밴드갭을 지니며 차세대 태양전지 및 열전 소재로서 주목받고 있다. 본 연구에서는 친환경적이며 원소 매장량이 풍부한 위티체나이트 기반 화합물의 열전 성능 향상을 목적으로, Bi 자리에 Sn을 부분 치환한  $\text{Cu}_3\text{Bi}_{1-x}\text{Sn}_x\text{S}_3$  ( $x = 0.02\text{--}0.08$ ) 조성을 합성하고 그 구조적 및 열전 특성을 체계적으로 분석하였다. 시편은 Cu, Bi, Sn, S 분말을 아르곤 분위기에서 기계적 합금화(mechanical alloying, MA)한 후, 진공 조건에서 열간 가압 소결(hot pressing, HP)을 통해 벌크 형태로 제조하였다. X-선 회절 분석 결과, 모든 조성에서 이차상은 검출되지 않아 위티체나이트 단일상이 안정적으로 형성되었음을 확인하였다. 또한 Sn 도핑 농도에 따른 격자 구조, 미세조직 변화 및 상 안정성과 열전 특성 간의 상관관계를 정밀하게 분석하였다. 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).

### [P32-4]

**기계적 합금화와 열간 압축 공정으로 준비된  $\text{Cu}_4\text{Bi}_4\text{S}_9$ 의 열전 특성:** 추규선, 김성윤, 김일호\*(국립한국교통대학교)

**Keywords:** thermoelectric,  $\text{Cu}_4\text{Bi}_4\text{S}_9$ , mechanical alloying, hot pressing

Cu계 칼코제나이트 열전 재료는 지구상에 풍부하고 비교적 저독성인 원소로 구성되어 있어, 우수한 열전 성능과 환경친화성을 동

시에 확보할 수 있다는 장점으로 인해 활발히 연구되고 있다. 특히  $\text{Cu}_2\text{Se}$ 계 및  $\text{Cu}_2\text{S}$ 계 화합물은 높은 전기전도도와 낮은 격자 열전도도를 나타내어 좋은 영역용 열전 소재로 주목받고 있으나, 고온에서의 상전이 및 조성 불안정성으로 인한 신뢰성 문제는 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있다. 선행 연구에서는 복잡한 결정 구조, 현저히 억제된 격자 열전도도, 그리고 적절한 밴드갭을 지닌  $\text{Cu}_4\text{Bi}_4\text{Se}_9$ 에 주목하여 열적 및 전기적 수송 특성을 체계적으로 평가한 바 있다. 이에 반해,  $\text{Cu}_4\text{Bi}_4\text{Se}_9$ 와 구조적으로 유사한  $\text{Cu}_4\text{Bi}_4\text{S}_9$ 에 대한 연구는 아직 제한적이나, 낮은 열전도도와 열전 성능 향상 가능성으로 인해 새로운 열전 소재 후보로 부각되고 있다. 본 연구에서는  $\text{Cu}_4\text{Bi}_4\text{Se}_9$ 와 유사한 결정 구조를 갖는  $\text{Cu}_4\text{Bi}_4\text{S}_9$ 를 대상으로 고상 합성 공정과 열전 특성을 체계적으로 분석하였다. Ar 분위기에서 350 rpm으로 6시간 기계적 합금화(mechanical alloying, MA)를 수행하여 2차상 없이 단일상  $\text{Cu}_4\text{Bi}_4\text{S}_9$  분말을 성공적으로 합성하였으며, 이후 523–623 K에서 각각 2시간 동안 열간 압축 소결(hot pressing, HP)을 통해 벌크 시료를 제조하였다. 합성 및 소결 시편에 대해 상 분석, 열분석, 미세조직 관찰 및 전하 수송 특성 평가를 수행하였고, 이를 통해  $\text{Cu}_4\text{Bi}_4\text{S}_9$ 의 열전 거동을 규명함과 동시에 향후 Cu–Bi–S 계 열전 소재 설계를 위한 기초적인 실험 데이터를 제공하고자 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).

### [P32-5]

**Cu 결핍에 의해 유도된 Cu–Bi–Se계 파보나이트 구조군 화합물의 합성 및 열전 수송 특성:** 김성윤, 추규성, 김일호\*(국립한국교통대학교)

**Keywords:** thermoelectric,  $\text{Cu}_4\text{Bi}_4\text{Se}_9$ , pavonite, off-stoichiometric, non-stoichiometric

중·저온 영역에서 유망한 열전 소재로 주목받는 pavonite 구조군(homologous series)에 속하는 Cu–Bi–Se계 화합물을 대상으로, Cu 비화학양론적 결핍이 상 형성 및 전하 수송 특성에 미치는 영향을 연구하였다. Pavonite는 Cu 결핍과 Bi 과잉이 특징적인 Cu–Bi–Se 계 광물로, Bi–Se 기반 모듈 구조와 부분 점유된 Cu 사이트로 구성된 복합 결정 구조를 갖는다. 최근 이러한 pavonite 구조군에 속하거나 구조적으로 연관된 합성 Cu–Bi–Se 화합물들이 낮은 격자 열전도도와 조성 조절에 따른 전하 수송 특성 제어 가능성으로 인해 열전 소재로 주목받고 있다. 본 연구에서는 Cu가 결핍된  $\text{Cu}_{4-x}\text{Bi}_4\text{Se}_9$  ( $x = 0.05\text{--}0.20$ ) 조성으로 설계하였으며, 고순도 원료 분말을 이용한 기계적 합금화(mechanical alloying, MA)와 열간 가압(hot pressing, HP) 공정을 통해 치밀한 소결체를 제조하였다. Rietveld 구조 정밀 분석 결과, 화학양론 조성인  $\text{Cu}_4\text{Bi}_4\text{Se}_9$ 는 단일 상으로 합성되었으나, Cu 결핍이 증가함에 따라 pavonite 구조군의 조성 범위에 위치한  $\text{Cu}_{1.78}\text{Bi}_{4.73}\text{Se}_8$  상이 함께 형성되어  $\text{Cu}_4\text{Bi}_4\text{Se}_9\text{--Cu}_{1.78}\text{Bi}_{4.73}\text{Se}_8$  컴포짓 구조로 전이됨을 확인하였다. 이러한 상 형성 거동을 보다 명확히 규명하기 위해 열 분석(TG-DSC)과 표면 분석(SEM-EDS)을 이용하여 구성 상과 미세조직을 분석하였다. 또한 Cu 결핍에 의해 유도된 pavonite 구조군 기반 컴포짓 형성이 전하 수송 특성과 열전 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석하여, 조성-구조-물성 간의 상관관계를 규명하였다. 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).

### [P32-6]

**비화학양론적 보르나이트  $\text{Cu}_{5+x}\text{Fe}_{1+y}\text{S}_4$ 의 전하 수송 및 열전 특성:** 김형일, 오혜민, 이승민, 오현식, 김일호\*(국립한국교통대학교)

**Keywords:** thermoelectric,  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ , bornite, off-stoichiometric, non-stoichiometric

비화학양론적 보르나이트(bornite)  $\text{Cu}_{5+x}\text{Fe}_{1+y}\text{S}_4$ 를 대상으로, 양이온 자리( $\text{Cu}^+$  및  $\text{Fe}^{3+}$ )의 비화학양론 결합이 전하 수송과 열전 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 시료는 기계적 합금화(mechanical alloying, MA)와 열간 가압(hot pressing, HP) 공정을 통해 합성되었다. Cu 결핍 조성( $x < 0$ )을 갖는 보르나이트  $\text{Cu}_{5+x}\text{FeS}_4$  ( $-0.20 \leq x \leq 0$ )의 경우, 대부분의 조성에서 orthorhombic 보르나이트 단일상이 안정적으로 유지되었으며, 과도한 결핍 조성에서는 미량의 칼코피라이이트(chalcopyrite,  $\text{CuFeS}_2$ ) 2차상이 관찰되었다. Cu 결핍은 Cu 공공에 기인한 정공 농도 증가를 유도하여 전기전도도를 향상시켰다. 한편, Fe 비화학양론 조성( $\text{Cu}_5\text{Fe}_{1+y}\text{S}_4$ ,  $-0.06 \leq y \leq 0.06$ )을 도입하여 Fe 결함이 구조적 변화와 전하 수송 메커니즘에 미치는 영향을 분석하였다. Fe 비화학양론에 따라 a축 수축과 b·c축 팽창이 동반되는 이방성 격자 변형이 관찰되었으며, Fe 결핍( $y < 0$ ) 조성에서는 페르미 준위가 가전자대에 근접한 축퇴 p-형 수송 거동이 나타난 반면, Fe 과잉( $y > 0$ ) 조성에서는 n-형 전환과 이동도 저하가 관찰되었다. 보르나이트의 고유한 낮은 격자 열전도도 특성이 유지되었으며, 비화학양론 결합에 따른 점결합 및 조성 무질서로 인해 총 열전도도는  $0.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  이하로 유지되었다. 이러한 전하 수송 특성의 조성 의존적 변화는 파워 팩터와 열전 성능의 유의미한 향상으로 이어졌으며, Fe 결핍 조성의  $\text{Cu}_5\text{Fe}_{0.94}\text{S}_4$  ( $y = -0.06$ ) 시편은 673 K에서 최대  $ZT = 0.61$ 을 나타냈다. 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).

### [P32-7]

**Effect of Ag-content Variation on the Microstructure and Thermoelectric Properties of  $\text{AgSbTe}_2$ -based Materials:** Hyojun Son, Suhyeon Woo, Joseph Ngugi Kahiu, Samuel Kimani Kihoi, Jihwan Im, Ho Seong Lee\*(Kyungpook National Univ.)

**Keywords:** Thermoelectric,  $\text{AgSbTe}_2$ , Ag-deficiency, Phase Stability

$\text{AgSbTe}_2$  is a promising mid-temperature thermoelectric material due to its moderate bandgap and low thermal conductivity.

However, the conventional stoichiometric composition suffers from thermal instability, leading to the formation of secondary phases. In this study, we aimed to optimize thermoelectric performance by adjusting the Ag content to control phase separation behavior and carrier concentration. Ingots were synthesized via a melting and quenching method, followed by a hot-pressing process to fabricate high-density sintered pellets. The phases and microstructures were characterized using XRD and SEM, and temperature-dependent thermoelectric properties were evaluated. We confirmed that the intentional reduction of Ag content effectively stabilizes the matrix phase and suppresses the formation of the secondary  $\text{Ag}_2\text{Te}$  phase by reducing the number of electrons in antibonding states. Furthermore, cation vacancies induced by Ag deficiency optimized the carrier concentration, thereby refining the power factor (PF). The average PF was enhanced by approximately two times compared to stoichiometric  $\text{AgSbTe}_2$ . Consequently, the  $\text{Ag}_{0.98}\text{SbTe}_2$  composition achieved a peak  $zT$  value of  $\sim 1.46$  at 673 K. These results demonstrate that defect engineering through compositional control is a critical strategy for the development of high-performance  $\text{AgSbTe}_2$ -based thermoelectric materials.

### [P32-8]

Microstructural Analysis of (TiCr)FeSb Double Half-Heusler Thermoelectric Material: Suhyeon Woo, Ho Seong Lee\*, Hyojun Son, Jihwan Im, Joseph Ngugi Kahi, Samuel Kimani Kihoi (Kyungpook National Univ.)

**Keywords:** thermoelectric, half-Heusler, lamellar structure

Double half-Heusler (dHH) thermoelectric materials have attracted significant attention as a promising approach to reducing the intrinsically high lattice thermal conductivity of conventional half-Heusler compounds. However, despite numerous theoretical predictions of excellent thermoelectric performance, experimental demonstrations of their successful synthesis and structural stability remain scarce. In this study, we investigated the feasibility of synthesizing (TiCr)FeSb with a double half-Heusler structure and aimed to elucidate its structural characteristics with a particular focus on microstructural features. The samples were prepared via arc melting, followed by annealing and sintering. Formation of the double half-Heusler phase was verified through X-ray diffraction (XRD) and energy-dispersive spectroscopy (EDS) analyses. Notably, a lamellar structure was observed during scanning electron microscopy (SEM) analysis. To further clarify this feature, transmission electron microscopy (TEM) was conducted, which enabled the identification of the lamellar phase and confirmed the presence of this microstructure within the specimen. Additionally, the synthesized material exhibited high electrical conductivity and was identified as a p-type thermoelectric material. The lamellar microstructure and processing strategy demonstrated in this study are expected to provide important foundational insights for the design and performance enhancement of next-generation double half-Heusler-based thermoelectric materials.

### [P32-9]

Utilization of Electroplated Metal Layers for Enhancing Performance of Bismuth Telluride-Based Thermoelectric Modules:

NGA LINH VU, Van-Ninh Tran, Tien-Anh Doan, Cuong-Tung Do, Injoon Son\*(경북대학교)

**Keywords:** thermoelectric,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , power performance, electroplating, diffusion barrier

This study investigated the effects of the electroplated metal layers on the power performance of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -based thermoelectric (TE) modules under low-current operating conditions. Electroless Ni-P was introduced as a diffusion barrier, followed by electroplating of Ag, Cu, and Au layers with varying thicknesses to enhance electrical and thermal properties. The results demonstrated that all electroplated metals significantly improved the output power of TE modules compared with uncoated samples. In particular, the output power increased markedly with increasing temperature difference ( $\Delta T$ ), confirming the strong dependence of module performance on thermal driving force. Furthermore, thicker Ag, Cu, and Au layers led to a systematic enhancement in output power, indicating reduced contact resistance and improved interfacial conductivity. Single-pair TE modules exhibited high sensitivity to both temperature variation and metallization conditions, highlighting limitations in stability and reliability. Therefore, multi-pair TE modules were fabricated and evaluated to achieve more robust performance. Among the investigated configurations, a seven-pair TE module with Ag/Ni-P electroplating showed the most favorable balance between electrical conductivity and thermal stability. An optimal metallization structure of 6  $\mu\text{m}$  Ag and 1  $\mu\text{m}$  Ni-P was identified, providing enhanced output power and reliable thermal performance for practical thermoelectric applications.

### [P32-10]

Measurement of In-plane Thermal Conductivity of Two-dimensional van der Waals Ferromagnets: Minseok Choi(KRISS, Yonsei Univ.), Jae Yeon Seo(Yonsei Univ.), Seunghoe Koo, Young Jai Choi(KRISS), Hosun Shin\*(Yonsei Univ.)

**Keywords:** Ferromagnets, 2D, Thermal Conductivity

Two-dimensional van der Waals (vdW) magnets have emerged as promising candidates for next-generation spintronic devices. In particular,  $\text{Fe}_5\text{GeTe}_2$  and  $\text{Fe}_5\text{GaTe}_2$  are expected to exhibit high Curie temperatures ( $T_c$ ) near or above room temperature, overcoming the limitation of  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  ( $T_c \sim 200$  K). This potential enables the realization of practical spin devices operating without external cooling. However, experimental studies on thermal conductivity—a critical factor governing thermal stability and device efficiency—remain scarce, especially regarding thermal transport in thin films. In this study, high-quality single crystals of  $\text{Fe}_5\text{GeTe}_2$  and  $\text{Fe}_5\text{GaTe}_2$  were mechanically exfoliated and transferred onto a Micro-Thermoelectric Measurement Platform (MTMP). We utilized a suspended



structure to eliminate heat loss to the substrate and precisely measured the in-plane thermal conductivity of the thin films as a function of temperature. We investigated the distinct thermal transport behavior arising from strong phonon scattering, which is induced by the structural disorder and intrinsic vacancies characteristic of the  $\text{Fe}_5$ -system, in comparison to  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ . This work provides essential baseline data for designing high-efficiency spin caloritronic devices and developing thermal management strategies for 2D planar devices based on  $\text{Fe}_5\text{GeTe}_2$  and  $\text{Fe}_5\text{GaTe}_2$ .

#### [P32-11]

**Fabrication of Dimension-Reduced and Bond-Distorted ZnSb via Li Intercalation:** Ji Hee Pi, Chul Oh Park(Yonsei University), Yong Hoon Kim(University of Seoul), Ga Yeong Koo, Ki Wook Bae(Yonsei University), Sang Hyun Ji(Sogang University), Ik Seon Kwon(Kunsan National University), Hyun Sik Kim\*(University of Seoul), Kyu Hyung Lee\*(Yonsei University)

**Keywords:** Li intercalation, phonon transport, structural transition, internal strain and bond distortion

Dimensional reduction from three-dimensional (3D) to quasi-two-dimensional (2D) frameworks has been reported to effectively suppress phonon transport by constraining lattice vibrations, thereby reducing lattice thermal conductivity. Based on this concept, Li was intercalated into 3D-ZnSb to induce a structural transition toward 2D  $\text{Li}_x\text{ZnSb}$ . In the present study, a series of  $\text{Li}_x\text{ZnSb}$  compounds ( $x = 0 - 1.0$ ) was synthesized via solid-state reaction to elucidate the effects of Li intercalation on local bonding characteristics and thermoelectric transport properties. Li can be intercalated into the ZnSb structure, generating internal strain and bond distortion, that trigger a structural transition from 3D to 2D. X-ray diffraction confirms a phase transformation from 3D ZnSb to 2D  $\text{Li}_x\text{ZnSb}$  with increasing Li content. Zn K-edge NEXAFS/EXAFS analyses further reveal systematic modulation of the Zn-Sb bond length and local coordination environment. Compacted bulk  $\text{Li}_{0.5}\text{ZnSb}$ , containing intermediate Li concentration, exhibits a significantly reduced lattice thermal conductivity compare with pristine 3D ZnSb and achieves a maximum ZT of  $\sim 1.1$  at 600 K. This enhanced thermoelectric performance is attributed to intensified phonon scattering associated with the formation of a quasi-2D structure arising from intercalation-induced bond distortion. In contrast, excessive Li intercalation ( $x^3 0.4$ ) promotes structural ordering and reduces phonon scattering effectiveness, resulting in degraded thermoelectric performance.

#### [P32-12]

**용매열 합성 기반 SnSe microplate 소결체의 결정립 크기와 전기적 특성간의 상관관계 규명:** 강태경, 오세민(부경대학교), 손지희, 김봉서(한국전기연구원), 정찬원\*(부경대학교)

**Keywords:** SnSe, 열전재료, 용매열 합성, grain boundary, 전기전도도

전 세계적으로 생산되는 에너지의 65% 이상은 열로 손실된다. 열전 발전은 이러한 폐열을 전기에너지로 변환할 수 있는 기술로 회전부가 없어 소음이 거의 없고 기계적 고장 염려가 없는 친환경 발전방식이다. 열전 성능은 무차원 성능지수  $zT = S^2 \sigma T / \kappa_{\text{tot}}$ 로 평가되며, S는 제벡 계수,  $\sigma$ 는 전기전도도, T는 절대온도,  $\kappa_{\text{tot}}$ 는 전자 열전도도( $\kappa_{\text{ele}}$ )와 격자 열전도도( $\kappa_{\text{lat}}$ )의 합인 총 열전도도이다. 열전 성능 향상을 위한 방법으로 미세구조 조절을 통하여 파워 팩터( $S^2 \sigma$ )의 증가 또는 격자 열전도도( $\kappa_{\text{lat}}$ )의 감소 등이 있다. 특히, 미세구조 요소 중 결정립계는 전자 및 포논 산란에 영향을 미쳐 전기전도도와 열전도도를 영향을 주기 때문에 결정립계 미세구조를 제어하고 해석하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 용매열 합성법으로 SnSe microplate를 제조하고 결정립 크기에 따른 열전 특성 변화를 분석하였다. 환원제( $\text{NaBH}_4$ )의 양과 체질을 통해 네 가지 입도의 합성 분말을 확보하였고, 이를 활용하여 소결체의 결정립 크기를 조절하였다. 일반적으로 결정립 미세화는 전자 산란 증가로 인해 전기전도도를 감소시키는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 결정립 크기 감소에 따라 전기전도도가 증가하였다. STEM-EDS 분석을 통해 결정립계에 Na 원소의 편석을 확인하였고, 이는 Na 편석이 결정립계의 전기전도를 증가시켜, 결정립 미세화로 인한 전도성 입계의 분율 증가가 소결체의 전기전도도를 향상시킨 것으로 해석하였다.

#### [P32-13]

**Predicting Thermoelectric Performance via Magnetic Interactions in  $\text{NiCl}_{2-x}\text{Br}_x$  and  $\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Sb}$ :** Yunseok Shin, Taesu Park(POSTECH), Won-Joon Son (North Carolina State University), Ji Hoon Shim(POSTECH), Changhoon Lee (POSTECH), Myung-Hwan Whangbo(North Carolina State University)

**Keywords:** .

We investigated the magnetic, electronic, and thermoelectric properties of  $\text{NiCl}_{2-x}\text{Br}_x$ ,  $\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{Sb}$  and  $\text{CoCl}_2$  using density functional theory (DFT). Our analysis focuses on the correlation between Tc and the Seebeck coefficient to evaluate whether Tc can predict optimal doping levels and operating conditions. Increasing Br content reduces the band gap and delocalizes electronic states near the Fermi level, while Tc decreases due to enhanced antiferromagnetic interactions arising from stronger orbital overlap, leading to a reduction in the Seebeck coefficient (S). Extending the analysis to  $\text{CoCl}_2$  suggests that the presence of an additional magnetic orbital introduces an extra interaction channel, strengthening spin-exchange interactions. These results indicate that dopant-induced modifications of magnetic exchange pathways strongly influence thermoelectric behavior and demonstrate that Tc can serve as a useful descriptor for predicting the Seebeck coefficient and optimal working temperature in thermoelectric materials.

**[P32-14]**

An Interactive Phonon Scattering Simulator Based on the Debye–Callaway Model: Joseph Ngugi Kahi, Samuel Kimani Kihoi, Hyoju Son, SuHyeon Woo, Jihwan Im, Ho Seong Lee\*(Kyungpook National University)

**Keywords:** Thermoelectrics, phonon transport, phonon scattering, defect engineering, heat transport, Debye–Callaway software

Reducing lattice thermal conductivity ( $\kappa_{\text{lat}}$ ) is central to improving thermoelectric performance, yet doing so requires a clear understanding of how microstructural defects govern phonon scattering. The Debye–Callaway model provides a powerful framework for describing these processes, but its nonlinear integral formulation has traditionally restricted its application to researchers with advanced computational expertise. In this work, we present a focused review of the Debye–Callaway formalism, highlighting the physical parameters associated with nine major phonon scattering mechanisms. We further introduce a standalone simulation platform featuring an intuitive, slider-based graphical user interface that enables real-time visualization of how microstructural parameters influence  $\kappa_{\text{lat}}$ . The program supports customizable experimental datasets, temperature ranges, and material-specific inputs, delivering immediate graphical feedback. Two case studies demonstrate the tool's effectiveness in separating defect-related scattering contributions, detecting modelling inconsistencies, and forecasting the impact of specific defects. This platform lowers the barrier to advanced phonon transport modelling and provides a practical resource for accelerating thermoelectric materials design.

**[P32-15]**

Synergistic Effect of Ag/Mn Co-doping on the High-Temperature Thermoelectric Properties of  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ : Ye-Ji Shin, Eun-Ji Meang(Kyungpook National Univ., DAEYANG Co., Ltd.), Joseph Ngugi Kahi, Hyoju Son(Kyungpook National Univ.), Kwan-Ho Park, Jaehan Chung(DAEYANG Co., Ltd.), Ho Seong Lee\*(Kyungpook National Univ.)

**Keywords:** BiSbTe, Thermoelectric, Bipolar Conduction, Band Engineering, Thermal Conductivity, Scalable synthesis

This study investigates the synergistic effects of Ag and Mn co-doping on the thermoelectric performance and band gap evolution of p-type  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  (BST) alloys fabricated via scalable melting and hot-pressing processes. Following the initial optimization of Ag single-doping,  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3 + 0.075 \text{ wt\% Ag}$  was identified as the reference composition. Subsequently,  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5-y}\text{Mn}_y\text{Te}_3 + 0.075 \text{ wt\% Ag}$  ( $y=0, 0.0025, 0.0075, 0.015$ ) samples were synthesized to elucidate the synergistic effects on thermoelectric properties. Considering practical applications, all specimens were produced as 200 g batch ingots and sintered into disk shapes with a diameter of 50 mm. Experimental results revealed that Ag and Mn function as acceptors, thereby enhancing carrier concentration. While this resulted in a slight reduction in the power factor, the expansion of the band gap effectively suppressed the bipolar effect at elevated temperatures. Co-doping of Ag and Mn shifted the peak temperature of the Seebeck coefficient and reduced lattice thermal conductivity. Notably, the lattice thermal conductivity began to decrease at 423 K, showing a 20–23% reduction at 573 K. Consequently, the optimized composition  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.4925}\text{Mn}_{0.0075}\text{Te}_3 + 0.075 \text{ wt\% Ag}$  achieved a maximum figure of merit ( $ZT_{\text{max}}$ ) of 0.97 at 473 K. While this value is comparable to the  $ZT_{\text{max}}$  of the Ag single-doped sample ( $y=0$ ), the peak temperature shifted from 423 K to 473 K, improving high-temperature thermoelectric performance. Furthermore, the average  $ZT$  ( $ZT_{\text{avg}}$ ) in the temperature range of 473–573 K, a common range for industrial waste heat recovery, was recorded at 0.85, marking a 10.4% improvement compared to Ag single-doping. These findings propose Ag/Mn co-doping as a promising strategy to extend the operating range of Bi-Te-based materials for mid-temperature applications.

**[P32-16]**

Monolithic All-ZnO Tandem Thermoelectric Generators for High Voltage and Output Power: Hyunjin Joh, Seong Min Park, WooJun Seol(GIST), Gopinathan Anoop(Amrita Vishwa Vidyapeetham), Hyeon Jun Lee\*(Kangwon National Univ.), Ji Young Jo\*(GIST)

**Keywords:** Thermoelectric generator, Tandem structure, Monolithic integration, Zinc oxide, Atomic layer deposition, RF magnetron co-sputtering, Energy harvesting

Thin-film thermoelectric (TE) generators are promising power sources for IoT microsensors, yet single-layer films are unable to achieve the microwatt-to-milliwatt power requirements due to their low output power. [1] To overcome this low output power, conventional approaches typically employ lateral serial connections of p-n TE pairs, [2] which requires much larger surface area than the commercial microsensors. While vertical stacking architecture enables the increase of output power within a limited area, stacking with conventional heterogeneous materials suffers from structural failure within a few hundred thermal cycles. This failure arises from the mismatch in coefficients of thermal expansion (CTE) between various materials, such as polymers ( $(20\text{--}300) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), metals ( $(8.8\text{--}14.2) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) and oxide TE materials ( $(4.0\text{--}6.0) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), which generates interfacial stress leading to cracking, and delamination.[3, 4] To address these limitations, we propose a monolithic all-Zinc Oxide (ZnO) tandem TE generator (TTEG). Strategic doping in ZnO can tune its properties to function as p-type (e.g., Cu-doped), n-type (e.g., Al, Sn-doped), or even insulating layers. The constituent functional layers were systematically optimized to maximize their thermoelectric power factors. The n-type Al-doped ZnO (AZO) films were deposited via atomic layer deposition (ALD), and p-type Cu-doped ZnO (CZO) films were fabricated using RF magnetron co-sputtering, achieving a peak power factors of 6600 and 388  $\mu\text{W/mK}^2$ , respectively. Utilizing undoped ZnO as an insulating interlayer, we fabricated vertically stacked TTEGs. The 5-stacked device ( $N_{\text{PN}} = 5$ ) demonstrated a linearly scaled effective

Seebeck coefficient of 482.4  $\mu\text{V/K}$ , successfully amplifying the voltage output. Consequently, the maximum output power reached 633 nW at  $N_{\text{PN}} = 5$ , representing a 3.7-fold enhancement compared to the output of the single-stacked ( $N_{\text{PN}} = 1$ ) device. Crucially, the monolithic design exhibited exceptional durability in thermal cycling tests with a temperature difference of 200°C. The all-ZnO TTEG retained over 94% of its initial performance after 2, 000 cycles. In contrast, hybrid devices utilizing Au and Pt interconnects failed completely within 50 and 1, 000 cycles, respectively, due to interfacial cracking driven by the CTE mismatch.

### P33 : 금속역사

Room 3층 로비, 4월 30일

#### [P33-1]

**X-선 CT를 활용한 총통의 주조기법 연구:** 김재연(국립공주대학교), 김라미(더한문화유산연구원), 조남철\*(국립공주대학교)  
**Keywords:** X-선 CT, 소승자총통, 소총통, 주조기법, 채플릿

연구 대상은 서천여고 3동 그린스마트 증축 및 리모델링공사 내 유적 1호 건물지에서 출토된 소승자총통 1점과 소총통 2점이다. 서천여고 3동 그린스마트 증축 및 리모델링공사 내 유적은 충청남도 서천시 서천읍성 충청남도 문화유산자료 내부에 자리하고 있다. 정밀발굴조사 결과 건물지 4동, 석렬유구 4기, 소성유구 4기, 수혈유구 1기, 구상유구 1기 등 총 14기의 유구가 확인되었다. 소승자총통 및 소총통은 조선 중기에 사용하던 화기류이다. 대상 유물의 표면에는 이물질들로 인해 고유의 색상이 가려져 있는 상태로, 보존처리가 필요한 상황으로 판단되었다. 안정적인 보존처리를 위해 X-선 CT를 실시하여 내부 구조와 보존상태를 파악하였고, p-XRF 성분분석, SEM-EDS 성분분석, XRD 분석 등을 활용하여 총통의 재질 성분과 표면 오염물 등을 분석하였다. X-선 CT 분석 결과, 유물 3점 모두 내부에 다량의 기포가 관찰되었고 육안으로는 확인되지 않던 채플릿도 확인되었다. 소총통 2점은 주조분할선으로 보아 주형을 반으로 나눈 분할 제작(piece mold)이며, 용탕은 병부로 주입된 것으로 추정된다. 소승자총통은 분할선 흔적을 비교적 깔끔히 제거해 표면이 매끈하고 완성도가 높게 나타났다. 채플릿은 일정한 패턴을 보이지만 배치에는 차이가 있으며(허일권, 2021), 본 연구 대상은 총열 L자형 1개와 약실부 끝 M자형 1개가 확인되었다. 선행 사례(신수 2364 2점, 경희대 800011)와 비교하면, 1591년 제작된 서천여고 소승자총통은 1587년 제작품보다 채플릿 배치를 줄이고 위치를 조정해 주형을 간소화한 변화가 드러난다. 채플릿은 주입 과정에서 습기·산화물·이물질 등의 영향으로 내부 기공을 유발할 수 있고, 이는 사용 시 위험 요인이 되었을 가능성이 크다(Rowley, 2007; 허일권, 2021). 같은 장인 층군이 동일 무게로 제작했지만, 1587년 제작 신수 2364(3-1)과 비교하면 1591년 제작 서천여고 소승자총통은 주형을 간소화한 변화가 확인된다. 즉, 모병부의 M자형 채플릿을 약실 끝으로 옮기고, 총열에 M·L자형 2개를 두던 구조에서 약실부에 가까운 위치의 L자형 1개로 축소·변경한 것이다. 이처럼 육안으로 확인되지 않는 세부적인 주조기법의 조사는 당대 기술 수준을 명확히 확인할 수 있는 중요한 자료로 본 연구의 결과가 추후 조선의 화약 무기 발달사 연구에 도움이 되기를 기대한다.

#### [P33-2]

**항남대총 출토 철기의 미세조직 분석을 통한 신라시대 철기 제작기술 연구:** 김소진, 홍주현\*(국립문화유산연구원)

**Keywords:** 주조철기, 단조철기, 용융환원, 저온환원, 신라

항남대총은 신라 마립간 시기의 합장묘로 추정되는 쌍분으로, 연구자마다 의견이 나뉘지만 대체로 내물, 실성, 눌지 마립간이 피장자로 거론되고 있다. 본 연구는 항남대총에서 출토된 다양한 유물 중 철기를 대상으로 미세조직 관찰 및 성분분석을 통해 신라 철기 제작기술을 확인하고자 했다. 분석대상 철기에서 단조철기와 주조철기가 모두 확인되며, 분석결과 철부는 ledeburite가 관찰되는 아공정 백주철, 철술은 ledeburite와 graphite가 모두 관찰되는 반주철로 확인되었다. 단조철기의 경우 pearlite와 ferrite가 공존하는 공석조직이 관찰되는데 모든 시료에서 widmanstätten ferrite가 발달되었다. 이는 담금질과 같은 단조과정에서 생성된 것으로, annealing 또는 normalizing 처리는 이루어지지 않은 것으로 추정된다. 특히 철기 생산의 중간소재로 알려진 판상철부의 미세조직은 중심의 ferrite 조직을 기준으로 좌우 외곽조직에서는 각각 pearlite-ferrite, pearlite-cementite의 공석강과 과공석강 조직이 관찰된다. 이를 통해 신라지역에서는 선철을 생산하는 용융환원법과 고체상태에서 괴련철을 생산하는 저온환원법 기술을 모두 갖추고 있었으며 저온환원법으로 생산한 저탄소강은 담금질과 같은 침탄 및 열처리 제강기술을 활용하였음을 알 수 있어 4~5세기 신라의 제철기술 체계를 보여준다.

**[P34-1]**

Enhanced electrical property of triboelectric energy harvesting using Ni-W-based inorganic-organic composites via insulation assisted interfacial charge engineering: Wooseong Jeong, Gihyeon Han, Kyuhyoung Lee\*(Yonsei University)

**Keywords:** transition metal, Nickel, Tungsten, composite, permittivity, power

In this study, transition-metal-based functional fillers were strategically combined to simultaneously enhance dielectric response and suppress leakage-current losses in organic-inorganic composites for triboelectric nanogenerators (TENGs). A Ni-W-derived high-permittivity filler (metal/metal oxide) and a W-based electrically insulating filler were co-dispersed in a polydimethylsiloxane (PDMS) matrix, while systematically varying the total filler volume fraction. The composite films were fabricated to achieve uniform dispersion and controlled interfacial characteristics, and their dielectric properties were characterized with an emphasis on polarization behavior and charge-transport pathways. TENG devices incorporating the composite films were then evaluated by measuring open-circuit voltage, short-circuit current, transferred charge density, dielectric constant, and leakage-related electrical losses to establish composition-microstructure-property-performance relationships. The results indicate that the dual-filler design maintains permittivity-driven output enhancement while effectively mitigating unintended conductive pathways that typically arise from high-permittivity inorganic fillers, thereby improving overall device efficiency and operational stability. These findings provide practical design guidelines for transition-metal-material-centered composite architectures toward high-performance, self-powered triboelectric power generation.

**[P34-2]**

주조 기반 알루미늄 복합소재의 기계적 및 열적 특성 연구: 정다운, 박현재, 이태호(한국재료연구원, 부산대학교), 강민우, 김정환, 이상복, 이상관(한국재료연구원), 김양도(부산대학교), 조승찬\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 금속복합소재(Metal Matrix Composites), 알루미늄(Aluminum), 입방정 질화붕소(cubic boron nitride), 열적 특성(Thermal properties)

전자제품의 소형화 및 반도체 고집적화로 인한 발열 문제가 심화되고 있다. 이러한 발열은 전자제품의 수명 단축과 같은 성능 저하를 초래하여 열을 효과적으로 방출할 수 있는 방열 소재에 대한 수요가 증가하고 있다. 기존 구리(Cu)계, 알루미늄(Al)계 방열 소재는 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 열팽창계수를 갖는 세라믹 소재로 우수한 열적 특성을 보인다. 따라서 cBN/Al 금속복합소재는 우수한 열적 특성을 갖는 방열 소재 후보로 기대된다. 금속복합소재에서는 강화재의 입자 크기에 따라 기계적 및 열적 특성이 크게 좌우되며, 강화재/기지 계면에서 형성되는 반응상 및 결합의 영향을 받는다. 하지만 현재 cBN/Al 금속복합소재는 이러한 요소들이 기계적 및 열적 특성에 미치는 영향에 관한 연구가 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄을 기지재로 사용하고, cBN을 강화재로 하는 금속복합소재를 액상가압공정을 통하여 제조하였다. 제조된 복합소재의 강화재 크기에 따른 기계적 및 열적 특성을 평가하고, 강화상 분산 및 강화재/기지 계면과 같은 미세조직 분석을 통해 열적 특성과의 상관관계를 규명함으로써, cBN/Al 금속복합소재의 방열 소재로서의 적용 가능성을 검토하였다.

**[P34-3]**

cBN 강화재 입도 제어 및 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅을 통한 고열전도도 중성자 흡수 Al 복합재료 개발: 조은서, 강민우, 김민수, 이동현, 김정환\*, 이상복(한국재료연구원), 김양도(부산대학교), 조승찬\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 복합재료, 열중성자, 열전도도

사용후핵연료(Spent Nuclear Fuel, SNF)의 저장 및 운반을 위해, 열중성자 흡수 성능과 동시에 붕괴열을 효과적으로 방출할 수 있는 열관리 특성이 요구된다. 현재 상용화된 B<sub>4</sub>C/Al 복합재료는 우수한 중성자 흡수능을 확보할 수 있으나, B<sub>4</sub>C 함량이 증가할수록 열전도도가 저하되는 한계를 가진다. 이러한 문제를 개선하기 위해, 선행연구에서 높은 열전도도(1300 W/m·K)와 중성자 흡수 특성을 가지는 입방정 질화붕소(cBN)를 강화재로 적용한 Al 기지 복합재료를 제조하고, 강화재 입도 변화가 물성에 미치는 영향을 분석하였다. 30 vol.% cBN/Al 복합재료를 방전 플라즈마 소결(SPS) 공정을 통해 제조하였으며, 40, 100, 300 μm의 서로 다른 입도를 적용하였다. 열전도도 측정 결과, 입자 크기가 증가할수록 열전도도가 향상되는 경향을 보였다. 이는 입자 크기 증가에 따라 단위 체적당 계면 면적이 감소하고, 그에 따라 계면 열저항이 완화되었기 때문으로 판단된다. 반면, 열중성자 감쇠계수는 입자 크기가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 동일 체적을 조건에서 입자 크기가 커질수록 단위 부피당 입자 수와 총 표면적이 감소하여 중성자와의 상호작용 확률이 낮아지기 때문으로 판단된다. 한편, cBN은 B<sub>4</sub>C 대비 중성자 흡수 단면적이 낮아 동일 체적률 조건에서 흡수능 확보에 한계가 존재한다. 이를 개선하기 위해, 중성자 흡수 단면적이 매우 큰 Gd 성분을 도입하고자 40 μm cBN 표면에 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOF(Metal-Organic Framework) 코팅을 적용하였다. 40 μm 입도는 선행 연구에서 가장 높은 감쇠계수를 나타낸 조건으로, 여기에 Gd 성분을 부가함으로써 B<sub>4</sub>C 수준의 흡수능 확보를 목표로 하였다. 본 연구는 과학기술정보통신부 나노 및 소재기술개발사업 (RS-2022-NR068258) 및 기후에너지환경부 에너지기술개발사업(RS-2022-KP002838)의 지원으로 수행되었음.

**[P34-4]**

**Ni-P 무전해도금을 통한 cBN/Al 복합재의 표면 특성 향상 연구:** 이지윤(한국재료연구원, 부경대학교), 김민수(한국재료연구원), 조은서(한국재료연구원, 부산대학교), 이상복, 이상관(한국재료연구원), 권한상(부경대학교), 조승찬, 김정환\*(한국재료연구원)

**Keywords:** 금속복합소재, 무전해도금, 표면 조도, 경도

무전해 도금은 우수한 내식성, 내마모성을 가지며 복잡한 형상의 재료에도 균일한 코팅을 형성할 수 있다는 장점으로 주목 받고 있다. 그 중에서도 Ni-P 무전해 도금은 공정이 간단하고 조작이 용이하며 저렴한 비용으로 기계 부품의 내마모성과 내식성, 경도, 윤활성 등의 특성을 향상시킬 수 있어 항공우주, 자동차 산업, 배터리 및 센서 등과 같은 분야에서 주목받고 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)의 경우 강화재의 높은 경도와 상대적으로 연질인 기지재 사이의 차이로 인해 불균일한 표면 형상이 형성되어 표면 조도가 우수한 금속 기지 복합재료의 개발이 요구된다. 또한 알루미늄 기반 소재의 경우 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 금속 기지 복합재료인 cBN/Al 복합재에 Ni-P 코팅을 하여 불균일한 표면을 보완하여 표면 특성을 향상시키는 것을 목표로 한다. 실험은 Nickel 공급원으로 Nickel sulfate를 사용하여 Ni-P 무전해도금을 진행하였으며 코팅 후 미세구조 관찰과 경도, 표면 조도 측정을 위해 Normal SEM과 비커스 경도기, Alpha-Step을 활용하였다. 실험 결과, cBN/Al 복합재에 Ni-P 층이 균일하게 도금된 것과 도금 전에 비해 경도와 표면 조도가 향상된 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 Ni-P 무전해도금을 통해 cBN/Al 복합재에 균일하게 코팅을 함으로써 복합재의 표면 조도를 향상시키고 동시에 경도와 같은 기계적 특성을 향상시킬 수 있었다. 향후 복합소재 Soldering시 젖음성 개선과 금속간 화합물 형성을 차단하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**[P34-5]**

**나노인덴테이션 데이터 기반 유한요소해석을 통한 HP 및 SPS로 제조된 Al/B<sub>4</sub>C 복합재료의 강화기구 분석:** 권택규, 조의제\*(국립순천대학교)

**Keywords:** Al/B<sub>4</sub>C 복합재료, HP, SPS, 나노인덴테이션, SSCUBONI 알고리즘

B<sub>4</sub>C 입자를 강화재로 사용한 Al 복합재료는 뛰어난 강도, 강성, 내마모성 및 경량성을 지닌다. B<sub>4</sub>C 입자에 의한 Al 기지의 강화 효과를 분석하기 위해서는 기계적 특성의 측정이 요구된다. 거시적인 표준 기계적 특성 시험은 여러 미세조직적 인자의 효과를 개별적으로 평가하기엔 한계가 있기 때문에, 입자·계면 등 미시 수준에서의 새로운 측정법을 적용해야 한다. 나노인덴테이션(Nanoindentation)은 재료의 국부 영역을 대상으로 탄성계수와 경도를 정밀하게 측정할 수 있는 방법이다. 하지만 실험적으로 획득하는 결과는 하중-변위 곡선에 한정되어, 이를 응력-변형률 곡선으로 역산하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 나노인덴테이션 데이터 기반의 유한요소해석을 통해 HP 및 SPS로 제조된 Al/B<sub>4</sub>C 복합재료의 강화기구를 분석하였다. 5-30 wt% B<sub>4</sub>C와 Al 분말을 볼 밀링으로 혼합한 후, HP와 SPS를 각각 이용하여 630 °C에서 소결하였다. 하중-변위 곡선을 응력-변형률 곡선으로 역산하기 위해, 실험 및 유한요소해석으로 수집한 나노인덴테이션 데이터를 비교하며 재료 상수를 업데이트하는 SSCUBONI 알고리즘을 사용하였다. 응력-변형률 곡선에서 추출한 특성을 바탕으로, 소결 공정에 따른 강화기구를 하중 전달, 결정립 미세화, Orowan 강화 등의 관점에서 분석하였다.

**[P34-6]**

**Effect of carbon content on the microstructure and mechanical properties of WC-Mo<sub>2</sub>C-Co strengthened by  $\eta$ -phase:**

Jinwoo Seok(한국생산기술연구원, 경희대학교), Juree Jung, Jongtae Kim, JeSun On, Seul-Ki Han(한국생산기술연구원), Bin Lee(경희대학교), Junhee Han, Leeseung Kang\*(한국생산기술연구원)

**Keywords:** Cemented carbide, Spark Plasma Sintering(SPS), Powder metallurgy, Microstructure, Mechanical properties

Cemented carbides are widely applied in cutting and forming tools because of their high hardness, wear resistance, and reliable mechanical performance. Among these, the WC-Co system has become the most representative composition. However, hardness and toughness in cemented carbides are generally in a trade-off relationship, making it difficult to simultaneously improve both properties. This trade-off has motivated intensive research on microstructural control and binder modification. Previous studies have shown that adding Mo<sub>2</sub>C as a dual hard-phase can improve mechanical properties compared to conventional WC-Co through the formation of the  $\eta$ -phase. Due to its lower Gibbs free energy of formation( $\Delta G_f^\circ$ ) and a higher solubility in Co than WC, Mo<sub>2</sub>C preferentially dissolves into the binder. While the resulting  $\eta$ -phase enhances hardness, it typically leads to a deterioration in fracture toughness. Although the  $\eta$ -phase generally precipitates under carbon-deficient conditions, this study focuses on the simultaneous stabilization of both the  $\eta$ -phase and the Co binder phase through precise carbon addition. This approach effectively improves both hardness and fracture toughness, overcoming the conventional trade-off.

**[P35-1]**

**Titanium Grade 7의 제조 공정에 따른 미세조직 및 부식특성 평가:** 이진우, 강신곤\*(동아대학교)

**Keywords:** 타이타늄, 주조, 단조, 이차상, 내식성, 부식특성

티타늄 (Ti)은 우수한 물리화학적 안정성으로 인해 다양한 산업 분야에서 필수 소재로 활용되고 있으며, 전 세계적으로 수요가 급증하고 있다. 특히 Titanium Grade 7은 소량의 Pd 첨가를 통해 탁월한 내식성을 구현하여 화학 및 해양 플랜트 환경에서 광범위하게 적용되고 있다. 그러나 제조 공정에 따른 미세조직 변화와 그에 따른 물성 및 부식 거동에 대한 체계적인 비교 연구는 제한적이다. 본 연구에서는 주조 및 단조 공정으로 제조된 Titanium Grade 7 시편을 대상으로 미세조직 분석, 기계적 특성 평가 및 전기화학적 부식 거동 분석을 체계적으로 수행하였다. 미세조직 관찰 결과, 주조재  $\alpha$ -Ti의 기지 조직 내에서 이차상으로 추정되는 국부적 영역이 관찰되었으며, 이는 단조재에서는 감소한 경향을 확인하였다. 전기화학적 실험을 통한 부식 거동 평가에서, 주조재에서 관찰된 이차상 추정 영역은 국부적인 전기화학적 불균일성을 유발하여 부식 특성에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 반면 단조재는 균질한 미세조직으로 인해 안정적이고 우수한 부식 저항성을 나타내었다.

**[P35-2]**

**열간 및 상온 압축 변형이 Ti-5Mo-4Fe 합금의 slip/twin 거동에 미치는 영향:** 이재관, 박정연, 이동근\*(순천대학교)

**Keywords:** Metastable  $\beta$  titanium, deformation mechanism,  $\{110\}<111>$  slip,  $\{112\}<111>$  twin

BCC 구조의 metastable  $\beta$  titanium의 경우 많은 slip system과 높은 stacking fault energy로 인해 전위의 이동이 자유롭기 때문에 slip이 발생하기 쉽다. 그러나 상온에서의 변형은 고온에 비해 더 높은 변형 에너지가 형성되고, 이를 해소하기 위한 열적 에너지가 부족하여 slip을 보완 및 촉진시키기 위해 twin과 같은 보조 메커니즘이 활성화된다. 그 중  $\{112\}<111>$  twin mode는  $\{332\}<113>$  twin mode에 비해 형성되는 임계 전단응력이 높기 때문에  $\{112\}<111>$  twin mode가 활성화되기 어렵다. 본 연구에서는 열간 및 상온 압축 변형 시 발생하는 slip과 twin에 대해 분석하였다. Multi-pass 열간 압축 변형 시 특정 orientation을 갖는 recrystallized grain에서 slip이 활성화되기 유리한 orientation으로 정렬이 되었으며,  $\{100\}[110]$  orientation을 갖는 grain 내에서  $\{110\}<111>$  slip system이 활성화되기 쉬운 것을 확인하였다. 반면, 상온 압축 시험 결과 우수한 압축강도와 연신율이 측정되었으며, 미세조직 관찰 및 EBSD 측정 시  $\{112\}<111>$  twin mode가 활성화되었다. 이러한  $\{112\}<111>$  twin은  $\{111\}[110]$  orientation을 갖는 grain 내에서 활성화되었으며, 열간 및 상온에서의 변형 메커니즘을 분석한 결과  $[110]$  orientation을 갖는 grain에서 slip과 twin의 변형 메커니즘이 유리하게 발생할 것으로 분석되었다.

**[P35-3]**

**Omega Phase Formation during DED and Its Role in Strength-Ductility Synergy of Ti-Cr Alloys:** Yeonju Noh, Yejun Park, Donghyeon Chae(Korea Advanced Institute of Science and Technology), Young-hwan Cha, Hyub Lee(Korea Institute of Industrial Technology), Pyuck-Pa Choi\*(Korea Advanced Institute of Science and Technology)

**Keywords:** .

Directed Energy Deposition (DED) generates steep thermal gradients and cyclic reheating, which can induce athermal  $\omega$  phase formation in metastable  $\beta$ -Ti alloys. This  $\omega$  phase is hypothesized to act as a precursor or preferential nucleation site for  $\alpha$  phase during subsequent thermal exposure, thereby altering the phase transformation pathway and microstructural evolution. Metastable  $\beta$ -Ti alloys often achieve enhanced ductility through deformation-induced phase transformation (TRIP) or twinning (TWIP). While these mechanisms improve work-hardening behavior, their relatively low critical resolved shear stress (CRSS) results in reduced yield strength, leading to an inherent strength-ductility trade-off. Introducing finely dispersed strengthening phases offers a potential strategy to overcome this limitation. In this study,  $\omega$  phase formation was confirmed by Transmission Electron Microscopy (TEM) immediately after DED processing of a Ti-Cr binary alloy. Post-deposition heat treatments were conducted to investigate the transformation of  $\omega$  into  $\alpha$  phase and its role in refining  $\alpha$  precipitation. The evolution of  $\alpha$  was characterized using X-ray Diffraction (XRD) and Electron Backscatter Diffraction (EBSD), with emphasis on phase fractions and orientation relationships. Oxygen, a strong  $\alpha$  stabilizer in  $\beta$ -Ti alloys, is expected to influence  $\omega$  stability and promote localized  $\alpha$  precipitation through preferential segregation. Such oxygen-mediated  $\omega$ -assisted  $\alpha$  refinement may provide a pathway to achieve improved strength without sacrificing ductility in DED-processed Ti-Cr alloys.

**[P35-4]**

**항공기 엔진 부품용 TiAl 잉곳의 화학성분 균질도 제어기술개발:** 임연민, 이민숙(에이치브이엠), 강성훈(한국재료연구원), 나혜성\*(에이치브이엠)

**Keywords:** Ti-Al alloy, chemical composition, ISM melting

TiAl 기반 합금은 낮은 밀도와 우수한 고온강도로 인해 차세대 항공기 엔진 저압터빈 블레이드 소재로 주목받고 있다. 특히  $\gamma$ -TiAl 합금에 W와 같은 고용점 금속을 첨가하여 Ni기 초내열합금을 대체할 수 있는 경량 고온소재로 활용되고 있다. 그러나 W와



같은 고용점 금속이 첨가된 TiAl 합금의 경우 잉곳 제조 시 합금원소 간의 높은 화학적 활성도 차이로 인해 응고 시 화학적 편석 (segregation)으로 인해 조성 불균일이 발생하며, 이는 미세조직 불균일 및 기계적 특성 편차의 주요 원인이 된다. 본 연구에서는 이러한 TiAl 합금 잉곳의 화학적 조성 불균일을 제어하기 위하여 전자빔 용해(Electron beam melting) +, ISM(Induction Skull melting) 용해를 통하여 잉곳을 제조 하였다. 먼저 W와 같은 고용점 금속을 용해하기 위하여 1차 전자빔 용해를 통하여 모합금을 제조 하였고, 최종 합금화는 2차 ISM 용해를 통하여 합금화 하였다. 1, 2차 용해 후 TiAl 합금 잉곳의 부위별 화학성분을 분석한 결과, 상 하부 조성 편차가 거의 없는 것을 확인하였다. 또한 용해 후 합금의 가스불순물 함량 분석을 위하여 N/O 분석을 진행하였다. N/O 분석 결과 질소 100ppm, 산소 550ppm으로 가스불순물이 잘 제어된 합금 잉곳을 제조 할 수 있었다. 본 연구를 통하여 W 원소재를 활용하여도 W이 첨가된 TiAl 합금 잉곳 제조가 가능하다는 것을 확인 하였으며, 하이브리드 용해 공정을 통하여 가스불순물 함량이 잘 제어된 건전한 TiAl 잉곳 제조가 가능함을 확인하였다.

#### [P35-5]

Ti-6Al-4V 판재 전자빔 용접부의 Focusing Current 변화 및 후열처리에 따른 미세조직과 경도 특성: 이수정, 이성호, 윤재원(부산대학교), 김상훈(국방과학연구소), 이태경\*(부산대학교)

Keywords: 타이타늄, 전자빔 용접, 후열처리

전자빔 용접(electron beam welding, EBW)은 높은 에너지 밀도를 이용하여 깊은 용입을 확보할 수 있는 공정으로, Ti-6Al-4V 합금 판재 접합에 널리 적용되고 있다. EBW 공정에서 focusing current는 용입 깊이 및 용접부 형성에 영향을 미치는 주요 공정 변수이며, 이러한 공정 조건에 의해 형성된 초기 미세조직은 후열처리(post-weld heat treatment, PWHT) 거동에 영향을 받는다. 본 연구에서는 Ti-6Al-4V 판재를 대상으로 focusing current를 변화시킨 EBW 실험을 수행하여 용입 특성을 비교하고, 선정된 조건에 대해 PWHT를 적용하여 용접부 미세조직 및 경도 특성 변화를 분석하였다. PWHT는 서로 다른 온도 조건에서 수행되었으며, 이에 따른 용접부 조직 및 경도 분포 변화를 비교 평가하였다. 그 결과, EBW 공정 조건에 의해 형성된 용접부 미세조직은 PWHT 온도에 따라 상이한 변화 양상을 보였으며, 경도 분포 역시 후열처리 조건에 따라 차이가 남을 확인할 수 있었다.

#### [P35-6]

Ti-Nb-Zr-X-O 합금에서 X 원소 및 산소 함량 변화에 따른 Gum metal 거동 평가: 김근채, 이혜미, 김재일\*(동아대학교)

Keywords: Gum metal,  $\beta$ 형 Ti-based 합금, cycle test

Gum metal은 독성이 없는 IVa 및 Va족 원소와 산소로 구성되어 있으며 비선형적 탄성거동, 고강도, 저탄성 계수의 물성을 지닌 준안정  $\beta$ -Ti 합금이다. 일반적인 금속재료와 다른 독특한 특징으로 인해 생체재료 및 항공우주산업에서의 응용 가능성으로 주목받고 있다. Gum metal은 다음의 조건을 만족해야 하는 것으로 알려져 있다. (i) 평균 화학 조성에 따른 원자가 전자 수(e/a 비율) 약 4.24~4.30, (ii) 결합 강도를 나타내는 결합 차수(Bo 값) 약 2.80~2.87, (iii) 전기음성도를 나타내는 d-orbital 에너지 수준(Md 값) 약 2.40~2.50 eV. 한편 산소는 Ti 합금에서 octahedral site에 고용되어 격자 왜곡과 탄성 변형장을 형성한다. 이로 인해 전위 이동에 필요한 임계 전단응력이 증가하여 강도가 상승한다. Gum metal에서 산소가 첨가되면  $\alpha$ 상으로 변태 또는  $\omega$ 상 형성이 억제되고,  $\beta$ 단상이 보다 안정적으로 유지된다고 보고되었다. Gum metal의 기계적 물성 향상을 위해 Ta를 제외한 5원계 및 6원계 합금에 대한 연구가 진행되어 왔다. Ta는 고용점 원소로써 대용량 용해 및 응고 공정 시 편석 발생의 우려가 있고 산업적 경쟁력이 떨어지는 단점이 있다. 또한 높은 밀도로 인해 미세구조와 상 안정성 제어의 장애요인으로 작용할 수 있다. 본 연구는 기존의 Gum metal에서 Ta를 대체하여 경제성과 조성 균일성을 개선하면서 Ti-Nb-Zr기 합금에서의 Gum metal 특성을 평가하고자 하였다. 진공 아크 용해로를 통하여 Ti-Nb-Zr-X-O 합금(산소 함량 0~2 at%)을 용해하였고, 최종 압연을 96%까지 냉간압연 후 방전가공을 통해 시편을 커팅하였다. Ar 분위기에서 진공 봉입 후 용체화 열처리 후 퀴칭하였고, 합금의 강도, 탄성계수 등을 조사하기 위해 인장시험을 진행하였다.

**P36 : 항공재료**  
Room 3층 로비, 4월 30일

**[P36-1]**

**저궤도 인공위성용 소재 개발을 위한 원자산소와 재료 간 상호작용 연구:** 조연하, 이원형, 김세호\*(고려대학교)

**Keywords:** 인공위성, 원자산소, 광학적 특성

차세대 인공위성 시장은 주로 통신위성의 역할을 하는 저궤도 인공위성이 많은 비중을 차지할 것으로 예상된다. 저궤도 인공위성의 임무 수행 경제성을 떨어뜨리는 주요 요인 중 하나는 원자산소(Atomic Oxygen)이다. 원자산소는 180~650 km 고도에서 가장 풍부한 대기 성분이며 약 5eV의 에너지를 갖고 인공위성과 충돌하는데, 이로 인해 열 제어 소재로 이용되는 알루미늄(Al), 은(Ag), 니켈(Ni) 등의 금속소재의 부식/침식이 발생한다. 이러한 현상은 반사율, 흡수율 등 소재의 광학적 특성을 변화시키고 인공위성의 장기간 운용에 제한요소가 된다. 본 연구는 원자산소와 소재 간 상호작용을 미시적 관점에서 분석하여, 소재의 열화 메커니즘을 규명하고 원자산소 저항성 합금과 보호막 소재를 개발하는 데 그 목적이 있다. 원자산소의 영향을 효과적으로 규명하기 위해, 저궤도 우주환경 모사장비를 설치하여 연구 기반을 구축하였다. 해당 장비는 산소 이온을 발생시킨 후 전자 빔을 조사하여 원자 산소를 생성하며, 온도범위 조절과 자외선 공급 기능으로 실제 저궤도 우주환경과 유사한 실험 환경을 구현할 수 있다. SiC 웨이퍼를 이용한 실험으로 생성된 원자산소의 유동과 에너지를 간접적으로 계산하였으며, Al, Ag, Ni 단결정 시편을 대상으로 한 노출 실험을 통해 원소 종류와 결정방향에 따른 열화의 차이를 분석하였다. 재료의 열화 현상을 원자 수준에서 분석하기 위해, 주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM), 에너지 분산 X선 분광법(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS), 전자 후방 산란 회절(Electron Backscatter Diffraction, EBSD) 외에도 원자 단층 현미경(Atom Probe Tomography, APT)을 활용하였다.

**[P36-2]**

**단결정 니켈기 초내열합금의 크리프 거동에 미치는 HIP 공정의 영향:** 조대현(국립창원대학교), 구지호(한화에어로스페이스), 이재현\*, 진혜승, 장익제(국립창원대학교)

**Keywords:** 초내열합금, IN792, 단결정, HIP(Hot Isostatic pressing), 크리프

IN792는 니켈기 초내열합금으로 중·고온 영역에서 우수한 기계적 특성을 나타내는 합금이지만, 주조 과정에서 발생하는 결함에 비교적 민감한 특성을 지닌다. 본 연구에서는 경제성을 고려한 합금 설계를 위해 0.6 wt% Hf를 첨가한 modified IN792 합금을 단결정으로 주조하였다. 일반적으로 단결정 초내열합금은 낮은 기공률과 재결정 가능성 문제로 인해 HIP(Hot Isostatic Pressing) 공정을 적용하지 않는 경우가 많다. 그러나 본 연구에서는 기계적 특성 향상을 목적으로, 초고속 냉각속도(660 K/min)가 수반되는 HIP 공정을 도입하였다. 또한 HIP 온도 및 유지 시간을 기존 용체화처리 조건과 동일하게 설정함으로써, HIP 공정이 용체화처리를 대체할 수 있는 가능성에 대해 검토하였다. 실험 결과, HIP + 용체화 + 시효 처리를 적용한 조건에서 가장 우수한 기계적 특성이 나타났다. 이는  $\gamma'$  상의 크기 및 형태 변화와 탄화물 형상의 변화에 기인한 것으로 확인되었다.

# 발표자 색인

ㄱ

강결찬 P26-18  
강경록 적층2-5  
강남현 원전3-4  
강대환 메모리1-1  
강동현 마그네슘2-4  
강민서 P1-19  
강민성 집합1-2  
강민우 복합1-10  
강민욱 P17-6  
강민재 적층9-8  
강상준 저장1-4  
강석훈 융복합2-3  
강성 분석2-1  
강수성 P17-1  
강승균 A바이오2-3  
강승연 상변태1-5, P26-23  
강용준 원전4-1  
강원목 P26-22  
강전연 집합3-2  
강정한 P1-23  
강주원 P6-4  
강주희 분석1-1  
강지인 P30-4  
강청아 알루미늄1-1  
강태경 P32-12  
강태연 P1-5  
강태욱 P28-9  
강태훈 RK2-1  
강희삼 저탄소1-1  
고건호 차체2-1  
고경민 P5-4  
고도열 적층1-4  
고민성 이차전지 2-2  
고성민 철강B1-1  
고세진 용접4-6  
고신범 용접2-6  
고윤석 P31-11  
고은찬 P6-5  
공병욱 고온2-1  
곽종현 용접5-5  
곽지윤 P19-11, 재료강도4-6

구분우 적층2-3  
구승희 나노융합2-3  
권다미 P28-13, P28-17  
권대선 메모리2-4  
권동일 신뢰2-1  
권민지 P12-6  
권시은 항공1-3  
권윤익 철강B4-3  
권진구 P14-5  
권택규 P34-5  
권혁민 복합1-8  
권흥기 용접2-1  
권희홍 역사1-3  
김가민 P5-8  
김가연 고온2-5  
김가은 P8-2  
김가형 내열2-3  
김강산 학생1-3  
김건일 알루미늄1-5  
김경덕 내열1-4  
김경택 마그네슘3-3  
김규낙 비철4-3  
김규범 P30-6  
김규식 P31-10, P17-19  
김규현 P9-9  
김근채 P35-6  
김기원 철강A4-3  
김기훈 기술2-2  
김나영 이차전지 3-2  
김대웅 P31-9  
김대원 용접4-1  
김대한 P1-20  
김대현 고온1-7, 역학3-2  
김덕 저탄소3-4  
김도연 P2-2, P2-3  
김도원 P17-24  
김도현 P13-2, 학생4-1  
김동규 P18-17  
김동수 원전2-4  
김동현 역학1-2, P18-12, 철강B4-4, RK1-4  
김동환 P31-4, 적층6-4,

희토류1-2  
김동훈 차세대2-1  
김두연 P7-7  
김두영 용접4-4  
김래연 표면처리2-4, 고엔1-3  
김려현 학생1-5  
김리주 철강A3-2  
김미림 P1-6  
김민규 표면처리2-3  
김민기 적층4-5  
김민석 니켈1-4  
김민수 P11-9, 복합1-9  
김민준 P16-7  
김민중 저탄소2-3  
김민철 P18-22  
김민희 P10-10  
김병철 저탄소3-3  
김보규 역학1-1  
김부승 P15-22  
김상승 P26-1  
김선민 학생2-4  
김선진 상변태2-5  
김성남 분석2-2  
김성욱 표면처리1-6  
김성원 적층5-3  
김성윤 P32-5  
김성제 집합1-6  
김성준 원전5-3  
김성줄 철강A4-4  
김성진 열처리1-1, P26-28  
김성철 학생3-2  
김성환 수소1-3  
김세광 신뢰1-3  
김세호 모빌1-3  
김세훈 저탄소3-1  
김소진 역사1-2, P33-2  
김수민 P19-12, 재료강도4-5, 여성1-3  
김수안 저탄소3-2  
김수정 P18-13  
김수한 P12-9

김수현 P24-2, 신뢰3-3  
김승현 열처리1-3  
김안나 P28-10  
김연우 적층8-7  
김영규 P26-14  
김영대 고온1-5  
김영우 적층4-4  
김영찬 P8-7, 항공4-2  
김영호 표면계면1-1  
김영훈 적층2-4  
김오섭 적층2-6  
김완 상변태3-1  
김용원 에너지1-3  
김용유 P6-8  
김용주 A바이오1-3  
김용호 P5-9  
김우진 학생1-1, AW1-1  
김유리 P15-16  
김유섭 P18-21  
김윤하 철강A2-2  
김은찬 P17-11  
김이재 재료강도3-1  
김인아 P7-9  
김재성 용접3-5, 마그네슘2-1  
김재식 P7-10  
김재연 P33-1  
김재학 P28-11  
김재형 P17-15  
김재훈 고엔1-2  
김정기 마그네슘2-3, 내열1-3  
김정길 원전3-2, 융복합2-2  
김정민 P30-9, P30-13, 용접1-1  
김정우 P18-14  
김정웅 상변태2-3  
김정일 첨단3-4  
김정환 수소5-3  
김종현 P15-2  
김종형 신뢰3-2  
김종호 니켈2-1  
김종환 P20-13

김종훈 고온1-3, P31-5  
김주업 P28-18  
김주영 RK1-1  
김준영 P2-9  
김준혁 P30-1, P17-7  
김중훈 철강B2-4  
김지현 P19-1  
김지훈 철강B2-1  
김진섭 고엔4-4  
김진우 적층6-2  
김찬 P17-4  
김철우 P20-17  
김치원 재료강도2-4  
김태영 P21-11  
김태훈 P4-10  
김하늘 알루미늄2-2  
김현 철강B1-2  
김현준 인공1-3  
김현중 P21-1  
김현진 열처리1-4  
김형섭 내열1-2  
김형안 P22-11  
김형욱 AW1-2  
김형일 P32-6  
김형준 P6-1  
김호병 P8-4  
김호혁 인공1-1  
김홍규 첨단3-1  
김홍석 항공3-2  
김화정 에너지2-1  
김효준 희토류2-3  
김희상 P15-20

ㄴ

나영상 저장2-1  
나인성 반도체2-3  
나주원 인공5-3  
남서우 P19-10  
남석우 저장1-1  
남세현 P10-1  
남정훈 P15-3  
남지민 용접3-2  
남태욱 메모리2-1

|          |               |
|----------|---------------|
| 남효문      | 비철2-2         |
| 노시언      | P3-6          |
| 노우람      | 신뢰2-4         |
| 노이준      | P15-5         |
| 노주림      | 융접2-2,P20-6   |
| <b>ㄹ</b> |               |
| 류상완      | 소반3-1         |
| 류채우      | 여성1-2         |
| <b>ㄴ</b> |               |
| 마영화      | 원전3-1         |
| 명재우      | 철강A5-6        |
| 명재욱      | P7-11         |
| 목승민      | P18-9         |
| 문광현      | P3-1          |
| 문수현      | P11-4         |
| 문승현      | 재료강도2-5       |
| 문정민      | 차체4-4         |
| 문준오      | 원전1-2         |
| 문준혁      | 상변태3-3,P26-12 |
| 문태영      | P9-3          |
| 문하영      | 복합1-7         |
| 민기득      | 신뢰3-1         |
| 민두원      | 마그네슘2-5       |
| 민성구      | 학생4-6         |
| 민항기      | 차체2-2         |
| <b>ㄷ</b> |               |
| 박가람      | P18-11        |
| 박건우      | P9-11         |
| 박광석      | 니켈1-3         |
| 박규완      | P15-9         |
| 박규현      | P17-12        |
| 박동민      | 학생4-7         |
| 박민수      | 적층1-3         |
| 박보현      | P6-10         |
| 박봉준      | 철강B3-6        |
| 박상규      | 에너지3-1        |
| 박상민      | P3-5,P19-9    |
| 박상은      | 적층8-1         |
| 박선영      | P19-15        |
| 박성수      | 마그네슘3-1       |
| 박성현      | 고엔1-4         |
| 박성환      | 철강A5-5        |
| 박소연      | 적층6-3         |
| 박순홍      | 표면계면1-4       |
| 박시현      | 역학2-1         |
| 박연우      | P10-6         |
| 박용욱      | P16-22        |

|     |                         |
|-----|-------------------------|
| 박윤지 | 적층4-6                   |
| 박은하 | 에너지1-1                  |
| 박은혜 | 융접1-3                   |
| 박재범 | 이차전지 2-1                |
| 박재우 | 기술3-3                   |
| 박정빈 | P5-5                    |
| 박정섭 | 철강A1-6                  |
| 박정현 | 융접5-3,<br>P17-27,P17-18 |
| 박종욱 | 저탄소4-2                  |
| 박종형 | P7-3                    |
| 박주영 | 내열2-5                   |
| 박주현 | P9-6                    |
| 박준영 | 재료강도3-4                 |
| 박준호 | P15-6                   |
| 박중철 | 표면계면1-3                 |
| 박지우 | 철강A2-5                  |
| 박지현 | 철강A1-5                  |
| 박지훈 | 반도체1-1                  |
| 박진홍 | 수소4-1                   |
| 박찬호 | 적층7-7                   |
| 박철호 | 융복합3-2                  |
| 박태연 | 고엔2-5                   |
| 박태준 | 철강A3-5,니켈1-1            |
| 박태창 | 분석2-5                   |
| 박하음 | 적층5-2                   |
| 박현우 | 학생1-6                   |
| 박현재 | 복합1-5                   |
| 박현준 | 융접5-2                   |
| 박현호 | 전산2-5                   |
| 박형권 | 소성1-1                   |
| 박형원 | 표면계면1-5                 |
| 박홍빈 | P1-16                   |
| 박효진 | 재료강도4-3                 |
| 반현승 | P4-12                   |
| 방종원 | P20-15                  |
| 방진현 | P16-23                  |
| 방현식 | P6-6                    |
| 배규열 | 재료강도2-1                 |
| 배민혁 | P20-9                   |
| 배상환 | 수소2-3,P15-7             |
| 배소영 | P18-4                   |
| 백관우 | P14-1                   |
| 백승현 | 메모리1-2                  |
| 백운봉 | 수소5-1                   |
| 백인섭 | P19-3                   |
| 백재영 | P31-1                   |
| 백정연 | P20-1                   |

|          |               |
|----------|---------------|
| 백종민      | P20-5         |
| 백준하      | 반도체1-4        |
| 백하은      | 적층1-1         |
| 변영훈      | 차체4-3         |
| 복현호      | 열처리1-6        |
| <b>ㅅ</b> |               |
| 서기완      | P23-6,타이타늄1-4 |
| 서동우      | 원전1-3         |
| 서민석      | 니켈1-2         |
| 서보성      | 적층8-2         |
| 서성지      | 열처리1-5        |
| 서세덕      | P19-7         |
| 서승원      | 표면처리1-3       |
| 서예진      | 적층4-1         |
| 서위결      | 마그네슘1-2       |
| 서재완      | 수소3-2         |
| 서주원      | 적층8-3         |
| 서판기      | 차체3-1         |
| 서형석      | 원전4-3         |
| 서혜진      | 철강B4-1        |
| 석왕록      | P23-1         |
| 석우영      | 고온2-3         |
| 성민영      | 고엔3-5         |
| 성시영      | 저탄소1-2        |
| 성예찬      | 적층6-1         |
| 성현우      | P16-25        |
| 성효경      | 학분1-2,모빌1-4   |
| 소영섭      | 고엔3-4         |
| 소윤지      | P8-11,P8-6    |
| 소지영      | P8-3          |
| 손경호      | 알루미늄2-3       |
| 손동환      | P1-3          |
| 손석원      | P30-12        |
| 손성국      | 소성1-3         |
| 손시우      | 수소3-4         |
| 손영호      | P2-12         |
| 손은지      | P6-9          |
| 손인수      | 극한1-3,첨단2-1   |
| 송건호      | 철강B1-6        |
| 송기욱      | P16-10        |
| 송노건      | P17-26        |
| 송동현      | P30-3         |
| 송람       | 저탄소1-3        |
| 송석원      | 철강B4-5        |
| 송영주      | 여성2-2         |
| 송원택      | P26-13        |
| 송은경      | 여성1-1         |
| 송준근      | 니켈2-2         |

|          |             |
|----------|-------------|
| 송태현      | P6-2        |
| 송호정      | P26-2       |
| 신규현      | 기술3-2       |
| 신동주      | P10-4       |
| 신선호      | 학생1-4       |
| 신승철      | 융접4-2       |
| 신승환      | 고엔2-3       |
| 신윤우      | 항공2-1       |
| 신은하      | P23-5       |
| 신재원      | 철강A2-4      |
| 신재홍      | 니켈2-3       |
| 신정호      | 첨단2-2       |
| 신좌영      | 표면처리2-5     |
| 신종호      | 원전5-2       |
| 신지영      | 융접2-5       |
| 신지용      | 비철4-4       |
| 신지윤      | P22-3       |
| 신희욱      | 고엔4-6       |
| 신하진      | 적층1-5       |
| 신현우      | 이차전지 1-2    |
| 신현정      | P20-14      |
| 신헌섭      | 수소4-2       |
| 신희철      | P15-4       |
| 심경태      | 기술3-4       |
| 심승현      | 철강A5-3      |
| 심영래      | 고온1-2       |
| 심예훈      | P20-2       |
| 심재혁      | P31-8       |
| 심현보      | 항공2-2       |
| <b>ㅇ</b> |             |
| 안가람      | P11-3       |
| 안다영      | 알루미늄1-2     |
| 안동현      | P16-24      |
| 안서영      | 표면처리1-1     |
| 안성민      | 학생3-3       |
| 안성열      | 적층4-3       |
| 안세환      | 원전3-3       |
| 안정수      | P2-22       |
| 안종혁      | 분석2-4       |
| 안지영      | 비철3-4       |
| 안진호      | AW2-1       |
| 양수미      | 표면처리1-4     |
| 양승우      | P9-5        |
| 양현석      | P22-5,P14-6 |
| 양희평      | P20-8       |
| 여광준      | 모빌1-1       |
| 여두림      | 내열2-2       |
| 여승현      | 고온2-6       |

|     |             |
|-----|-------------|
| 염진석 | 재료강도3-5     |
| 예정원 | P3-4,철강B1-5 |
| 오동규 | 재료강도2-3     |
| 오예지 | P1-8        |
| 오윤석 | 극한1-2       |
| 오윤주 | P11-5       |
| 오은기 | 집합2-2       |
| 오재석 | P18-7       |
| 오진우 | 전산7-3       |
| 오태웅 | P5-11       |
| 오혜민 | P32-2       |
| 우정현 | P19-16      |
| 원예지 | P23-4       |
| 원윤정 | 마그네슘2-2     |
| 원태호 | P1-15       |
| 위신혜 | P13-1       |
| 위태규 | 철강A2-1      |
| 유건아 | 항공1-1       |
| 유경호 | 학생4-4       |
| 유성호 | P17-21      |
| 유성훈 | 융접5-6       |
| 유윤재 | 철강B3-4      |
| 유일현 | 고온2-7       |
| 유재석 | 융접3-1       |
| 유재원 | 전산7-5       |
| 유제현 | 타이타늄1-1     |
| 유지성 | 소성1-2       |
| 유진영 | 인공2-1       |
| 유하영 | 융접2-7       |
| 유한결 | 차체1-1       |
| 유한준 | 반도체2-4      |
| 유현웅 | 항공1-2       |
| 유효상 | P6-11       |
| 윤교식 | 학생1-2       |
| 윤국태 | 차체1-4       |
| 윤대원 | 신뢰1-1       |
| 윤병현 | P20-12      |
| 윤상일 | 저탄소2-1      |
| 윤성민 | 융접4-4,P26-6 |
| 윤연희 | 알루미늄2-6     |
| 윤영아 | P1-17       |
| 윤영철 | 수소2-6,P17-8 |
| 윤재원 | P15-21      |
| 윤제인 | P26-4,학생2-2 |
| 윤종필 | 기술2-3       |
| 윤주희 | P3-11       |
| 윤종묵 | 차체4-1       |
| 윤지민 | 마그네슘1-3     |

|     |              |     |              |      |              |     |              |     |                 |
|-----|--------------|-----|--------------|------|--------------|-----|--------------|-----|-----------------|
| 윤지상 | 적층9-3        | 이수용 | 차체2-3        | 이중형  | 기술3-1        | 장경현 | P17-20       | 정은진 | 이차전지 3-1, 학분1-3 |
| 윤지용 | P18-18       | 이수정 | P35-5        | 이지용  | 알루미늄3-4      | 장규백 | 에너지3-2       | 정의석 | 첨단3-2           |
| 윤지현 | P22-12       | 이수현 | 용접2-4,니켈2-4  | 이지원  | 여성2-3        | 장도현 | 적층3-4        | 정이화 | 비철3-3           |
| 이강식 | 생체1-1        | 이순기 | 극한2-1        | 이지윤  | P34-4        | 장동민 | 적층8-6        | 정재갑 | 수소1-5           |
| 이강진 | 고엔2-4        | 이승건 | 수소3-1        | 이지혁  | P7-8         | 장문호 | 항공2-1        | 정재석 | 원전1-1           |
| 이강현 | P21-2        | 이승연 | 적층6-5        | 이진규  | 철강B2-5       | 장병록 | 저탄소2-2       | 정주리 | P3-3            |
| 이건희 | 용접1-4        | 이승현 | P9-7         | 이진우  | P35-1        | 장서현 | 역학2-4        | 정준영 | 표면계면1-6         |
| 이경환 | 학생4-2        | 이승희 | 소성1-4,P14-2  | 이찬양  | 비철2-1        | 장성모 | P5-6         | 정준오 | P2-8            |
| 이경훈 | RK2-2        | 이시연 | 역학2-3        | 이찬영  | P19-13       | 장성문 | P26-16       | 정차희 | 용접3-4           |
| 이계만 | 철강B3-3       | 이시우 | 타이타늄1-5      | 이찬표  | 재료강도3-2      | 장성혁 | 상변태1-3       | 정창현 | 적층4-8           |
| 이광병 | 첨단1-2        | 이시환 | 수소5-2        | 이찬희  | P31-3        | 장여진 | 용접4-5        | 정현  | 수소3-6           |
| 이광원 | 차체4-2        | 이아름 | 고온1-4,P18-10 | 이창민  | 용접1-2        | 장정아 | 비철2-5        | 정현우 | 비철2-4           |
| 이광희 | 차체1-3        | 이아영 | P18-1        | 이창선  | 기술2-4        | 장준혁 | P28-14       | 정현주 | P7-1            |
| 이규필 | P26-21       | 이언진 | P1-4         | 이창호  | 철강A5-2       | 장준호 | 상변태2-2       | 정현준 | 기술1-3           |
| 이기안 | 극한3-1        | 이영주 | P9-4         | 이치현  | 인공1-2        | 장창희 | 원전4-2        | 정혜은 | 용접3-6           |
| 이기영 | 저장1-2,첨단3-3  | 이영채 | 적층7-1        | 이태경  | 내열2-1        | 장형욱 | P16-20       | 정혜지 | 알루미늄1-3         |
| 이도성 | P15-19       | 이영호 | P20-16       | 이태호  | 복합1-3,원전1-4  | 장호성 | P25-2        | 정휘윤 | P3-2,상변태1-2     |
| 이도현 | P32-3        | 이용건 | 고엔1-1        | 이태혁  | 비철1-1        | 전동술 | P30-11       | 정희재 | 고엔4-3           |
| 이동규 | P9-8         | 이우영 | P6-12,희토류1-1 | 이태호  | 복합1-3,원전1-4  | 전병철 | 항공4-1        | 정희태 | 에너지1-2          |
| 이동주 | 극한2-3        | 이운해 | 원전2-3        | 이푸른  | P32-1        | 전빈  | 학분1-1        | 조기섭 | AI바이오1-5        |
| 이동호 | 저장1-3        | 이원도 | P6-3         | 이하훈  | P3-10        | 전상현 | 이차전지 2-3     | 조남철 | 역사1-1           |
| 이동희 | P5-2         | 이원찬 | 고온1-6        | 이한술  | P21-10       | 전소희 | P1-10        | 조다한 | 철강A3-3          |
| 이락규 | P28-19       | 이유나 | 용접3-3        | 이혁재  | 인공1-5        | 전승민 | 용접5-1        | 조대현 | P36-2           |
| 이명호 | 알루미늄3-2      | 이유진 | P3-9         | 이현석  | 타이타늄2-4      | 전우진 | P27-26       | 조모현 | P28-4           |
| 이목영 | 용접1-7        | 이윤기 | 알루미늄3-1      | 이현수  | P22-1        | 전정민 | 알루미늄1-4      | 조민서 | P7-5            |
| 이민경 | P15-18       | 이은세 | P17-13       | 이현준  | 비철1-3        | 전준협 | 모빌1-2        | 조아섬 | P20-7           |
| 이민서 | P1-11        | 이의종 | P17-10,극한1-1 | 이형국  | 철강B4-7       | 전지현 | 역학3-1,P18-19 | 조연하 | P36-1           |
| 이민제 | P1-13        | 이인복 | P30-5        | 이형웅  | 기술3-5        | 전창우 | P17-16       | 조용훈 | P17-2           |
| 이민주 | 철강A2-3       | 이자성 | 비철1-5        | 이호   | 전산3-4        | 전초록 | 집합2-3        | 조우빈 | 알루미늄2-5         |
| 이민호 | 적층3-5        | 이재관 | P35-2        | 이호중  | P28-8        | 정경우 | 희토류2-1       | 조원준 | 알루미늄1-6         |
| 이병건 | P5-10        | 이재성 | 역사1-4        | 이홍철  | 첨단1-4        | 정다은 | P34-2        | 조은서 | P34-3           |
| 이병덕 | 저탄소4-4,모빌2-1 | 이재용 | P15-11       | 이화영  | P2-14        | 정다은 | 학생2-1        | 조준영 | 수소3-5           |
| 이병수 | P30-15       | 이재원 | 분석2-3        | 이효정  | 복합1-4,여성1-5  | 정대호 | 항공3-3        | 조중욱 | 내열1-1           |
| 이병현 | 항공3-1        | 이재호 | 수소5-4        | 이희상  | P26-5        | 정민섭 | 철강B2-2       | 조지현 | 역학2-2,P18-5     |
| 이상봉 | 마그네슘1-1      | 이재화 | RK2-4        | 임가람  | 융복합3-1       | 정민재 | 적층3-2        | 조창순 | ENGE1-3         |
| 이상엽 | P19-8        | 이재훈 | P20-4,P1-12  | 임기현  | P14-4        | 정성훈 | 적층9-2        | 조하영 | P7-6            |
| 이상원 | 고엔3-6        | 이정민 | P9-1,학생4-3   | 임상엽  | P2-17,P2-18  | 정세윤 | 표면계면1-7      | 조해주 | 적층9-6           |
| 이상현 | P20-3        | 이정아 | 여성1-4        | 임성진  | P26-3        | 정세인 | P18-16       | 조현욱 | 역학3-3           |
| 이상훈 | 학분2-2        | 이정호 | 철강A1-4       | 임시은  | 적층7-5        | 정소영 | P26-26       | 조휘재 | P16-21          |
| 이서진 | 적층7-3        | 이정훈 | P28-16,집합1-4 | 임연민  | P35-4        | 정수진 | P15-17       | 주성환 | P1-14           |
| 이선훈 | 첨단1-1        | 이종석 | 기술2-1        | 임용수  | P9-10        | 정양진 | P10-8        | 주소영 | P10-9           |
| 이성민 | 복합1-6        | 이종익 | 타이타늄2-2      | 임정민  | P7-12        | 정영길 | 모빌2-2        | 주수빈 | 적층2-1           |
| 이성호 | 철강B2-3       | 이종혁 | 타이타늄1-2      | 임준희  | P19-6        | 정우빈 | 생체1-2        | 주용하 | 전산1-2           |
| 이성희 | 철강A3-1       | 이주영 | P2-21        | 임지해  | P1-18        | 정유인 | 신뢰1-2,첨단1-3  | 주정균 | 저탄소4-3          |
| 이세일 | 집합3-4        | 이주혁 | 이차전지 1-3     | 임진수랑 | P26-24,인공1-6 | 정윤종 | 고엔2-2        | 진봉민 | 철강A1-3          |
| 이소영 | 고엔1-6,P26-7  | 이준석 | 고엔4-5        | 임채림  | P6-7         | 정은주 | 철강A5-4       | 진시원 | 수소2-2           |
| 이수연 | P20-10       | 이준표 | P14-7        | 임현빈  | P3-15        |     |              |     |                 |
| 이수열 | 융복합3-3,극한2-2 | 이준호 | P5-1,알루미늄2-4 | 임화섭  | 기술1-2        |     |              |     |                 |

|     |             |     |                      |                            |         |                 |          |                      |                |
|-----|-------------|-----|----------------------|----------------------------|---------|-----------------|----------|----------------------|----------------|
| 진영하 | 원전5-1       | 추성권 | P11-6                | 홍성준                        | 표면처리2-6 | Chanyoung Yoo   | 메모리2-3   | Geonwoo Kim          | P29-13         |
| 진훈  | P23-3,P16-5 | ㅎ   |                      | 홍수직                        | 철강B4-2  | Cheol Kang      | P10-11   | Giheon Ha            | P29-10         |
| ㄸ   |             | 하국현 | P31-14               | 홍순직                        | 응복합2-1  | Chihun Kim      | 전산2-3    | Gihyeon Jeon         | 인공5-1          |
| 차다은 | 적층9-4       | 하륜  | P10-3                | 홍승규                        | P31-13  | Chil-Hyoung Lee | P27-20   | Go Eun Kim           | P26-15         |
| 차명주 | P1-21       | 하석  | 희토류2-2               | 홍영오                        | P23-9   | chohyeon Lee    | 적층9-1    | GONI HAN             | P4-1           |
| 차은빈 | P10-2       | 하성준 | P2-19                | 홍재근                        | 첨단2-4   | CHOI HYESEONG   | P26-10   | Gunuk Wang           | 소반1-3          |
| 차은환 | P7-4        | 하수빈 | 고엔4-2                | 홍정화                        | 신뢰2-2   | Choi yoonhyeong | P11-7    | gunwoong An          | 재료강도1-6        |
| 채민석 | 기술2-5       | 하유미 | 철강B3-1               | 홍지우                        | P25-1   | Christian Krug  | P28-5    | GUNYOUNG YOON        | 분석1-4          |
| 채수관 | 철강A4-1      | 하윤철 | P7-2                 | 홍창완                        | 재료강도3-6 | Chul-Ho Lee     | NCM4-1   | Gyumin Hwang         | 반도체1-2, P11-8  |
| 채호병 | P10-5       | 하재민 | P1-22                | 홍현빈                        | 재료강도1-1 | D               |          | Gyungmin Ryu         | 생체2-4, P29-5   |
| 천세호 | 인공2-6       | 하태준 | 수소2-1                | 황건호                        | 마그네슘3-4 | Dadong Jie      | 적층4-2    | H                    |                |
| 천영범 | 타이타늄2-3     | 하효정 | 수소5-5                | 황동현                        | P18-15  | Dae Woo Kim     | 철강B3-7   | Haeun Kim            | 철강A1-2         |
| 천재은 | 모빌2-4       | 한규미 | 적층9-5                | 황성두                        | 철강A5-1  | Dae-In Kang     | 철강B1-3   | Haitao Zhu           | 용접1-5          |
| 최가영 | 철강B4-6      | 한규석 | 집합3-3                | 황예나                        | P9-2    | Daeho Kim       | 인공3-3    | Han Kim              | 생체1-3          |
| 최강현 | 철강B3-5      | 한도경 | 용접3-7                | 황예민                        | P1-9    | Daeun Jung      | P15-14   | HaSeong Baek         | P13-3, 타이타늄1-3 |
| 최경한 | 차체1-2       | 한상우 | 이차전지 1-1             | 황의정                        | P26-17  | Dahye Han       | 철강A3-6   | HASSAAN              | 전산7-1          |
| 최광수 | P8-9        | 한상윤 | P26-20,상변태1-4        | 황지인                        | 비철3-1   | Dain Choi       | 집합1-5    | Hayoung Jeong        | 전산3-3          |
| 최기인 | 극한3-3       | 한선구 | P1-7                 | A                          |         | Do Hwan Kim     | 소반2-1    | Hazina Charles       | 에너지4-2         |
| 최단웅 | 수소1-1       | 한성희 | 집합4-3                | Adnan Yousaf               | P27-11  | Do-Hyeon Kim    | 마그네슘 3-2 | Hea-Lim Park         | 소반2-2          |
| 최동현 | 용접1-6       | 한수빈 | 적층5-1                | Ahmad Raza Javed           | 철강A3-4  | Dong Whan KIM   | 고엔4-1    | Hee Geon Lee         | P24-4          |
| 최문수 | 표면처리2-1     | 한승준 | P17-3                | Aleksander Albrecht        | 여성2-1   | Dong-Uk Kim     | 전산4-2    | Hee Yeon Jeon        | P2-20          |
| 최민서 | 에너지2-3      | 한인성 | 표면계면1-2              | Alireza Derakhshandeh      | 비철3-2   | Dongjoon Rhee   | ENGE2-2  | Heeju Kim            | 철강A4-2         |
| 최민재 | 신뢰1-4       | 한재연 | 재료강도4-2, P18-2,P18-3 | ALISHER FATKHULLOEV        | P16-2   | dongjun Shin    | P3-12    | Ho-Jeong Kim         | P21-5          |
| 최민호 | 적층3-3       | 한정민 | 내열2-4                | Alisher Sultangaziyev      | P27-13  | dongkyung KIM   | P16-16   | HOANG CUONG PHAN     | 인공2-7          |
| 최백규 | 첨단2-3       | 한정훈 | P15-12               | Amir Aghababaei            | 적층9-9   | Dongyi Seo,     | 극한1-4    | Hoang Hai Nam Nguyen | 인공2-2          |
| 최병철 | 수소1-6       | 한준희 | P19-2                | Ana Paula Nolasco Aguilera | P3-8    | DooHyo Jeong    | P1-1     | Hoje Chun            | 전산3-1          |
| 최상구 | P5-7        | 한지민 | 적층5-4                | ANIRBAN KUNDU              | P27-24  | Doosun Hong     | 전산6-1    | Hongxiu Liu          | 마그네슘2-5        |
| 최성호 | P16-6       | 한지은 | 생체2-5                | B                          |         | Doowon Jeong    | 수소1-4    | Hoon Kang            | 분석1-2          |
| 최세원 | P8-8        | 한지혜 | 철강B1-4               | Bo Hyun Park               | 타이타늄2-1 | Du Hyeon Woo    | 집합1-1    | Huisuk Yun           | AW2-1          |
| 최수환 | P15-10      | 한춘수 | 분석1-5                | Bogeun Park                | 전산1-4   | Duhyun Kim      | P31-7    | Huseung Lee          | P28-7          |
| 최순원 | P3-14       | 한홍남 | 신뢰2-3                | BOKYEONG SOHN              | P4-11   | E               |          | Hwan-Hee Cho         | 차세대1-4         |
| 최승규 | 차체3-2       | 한홍남 | 신뢰2-3                | BORIS I. YAKOBSON          | NCM3-3  | EI-JOON SHIM    | 수소3-3    | Hye Jung Chang       | KJ2-1          |
| 최시은 | P29-9       | 함성원 | 집합2-4                | Boris I. Yakobson          | NCM3-3  | Eugene Cho      | P27-27   | Hyeokjun Park        | 차세대1-2         |
| 최윤석 | 고엔3-1       | 허민아 | P30-2                | Burhan Febrinawarta        | 비철1-4   | eui Pyo kwon    | P22-8    | Hyeong Seok Kang     | P29-14         |
| 최재식 | 기술1-1       | 허성보 | P30-8,P22-4, P22-6   | BYEONGKWON LEE             | P5-3    | Eui Tae Lee     | 인공5-6    | Hyeongbin Park       | 전산6-5          |
| 최재혁 | 역학1-4       | 허수빈 | P31-6                | BYEONGSEON KIM             | 생체2-2   | Eun Ryeol LEE   | 전산1-1    | HyeonJi Kim          | P15-8          |
| 최재훈 | 집합2-1       | 허용강 | 저탄소4-1               | Byung Ik Park              | 생체2-3   | Eunho Ma        | P8-5     | hyeonwoo Kim         | 집합2-5          |
| 최정민 | 적층7-2       | 허재혁 | P18-8                | Byung-Gil Yoo              | 철강B3-2  | EUNJIN PARK     | 비철4-1    | HyeSu Kim            | P21-12         |
| 최정현 | 용접4-3       | 허정호 | 비철1-2                | Byungmoon Yoo              | P15-1   | eunmin hong     | P27-3    | Hyeuk Jin Han        | 나노융합1-2        |
| 최주미 | 고엔1-5       | 허현준 | P14-8                | C                          |         | Eunsun Kim      | P4-6     | Hyo joo Lee          | 재료강도3-3        |
| 최중호 | 적층3-1       | 현명우 | 상변태2-4               | Chaeeun Lim                | P16-1   | Eunyoung Ahn    | P4-7     | Hyobin Yoo           | ENGE2-1        |
| 최지석 | 차체3-3       | 현세미 | P18-20               | Chaehyeon Moon             | P16-18  | Gaeun Song      | 열처리1-2   | Hyochan Ahn          | 인공5-2          |
| 최지성 | P31-12      | 호종웅 | P2-1                 | Chaehyun Kim               | P16-14  | Gahyun Choi     | P2-15    | Hyojin Choi          | P26-8          |
| 최태열 | 수소2-5       | 홍기하 | 전산4-1                | Chan Ho Moon               | P29-12  | Gayoung Yoo     | P30-10   | Hyoju Son            | P32-7          |
| 최현중 | 첨단3-5       | 홍민성 | P2-13                | CHAN YOUNG LEE             | P24-3   | Geonho Lee      | P29-18   | Hyomin Hong          | P16-17         |
| 최호준 | P15-15      | 홍석원 | P19-14, 재료강도4-4      | Chan-Jun Lee               | 철강A2-6  |                 |          |                      |                |
| 최희은 | 알루미늄2-1     |     |                      | CHANGGI LEE                | 분석1-7   |                 |          |                      |                |
| 추규성 | P32-4       |     |                      | CHANGHYEON HAN             | P16-15  |                 |          |                      |                |



543

|                  |                  |                    |         |
|------------------|------------------|--------------------|---------|
| SuMin Lee        | 수소2-4,<br>P28-20 | Ye Ryeong Jang     | 희토류2-6  |
| Sun Hwa Lee      | NCM4-3           | Ye-Ji Shin         | P32-15  |
| Sun-Young Lee    | KJ1-2            | Yeon Seung Jung    | 저장2-3   |
| Sung-Dae Kim     | 원전2-2            | Yeonju Noh         | P35-3   |
| Sung-Kyun Jung   | 차세대1-1           | YeWon Han          | P22-9   |
| Sung-Wook Kim    | P12-7            | Yeyeong Kim        | P28-2   |
| Sungjae Cho      | P27-4            | Yi Je Cho          | RK1-2   |
| SUNGJUN AHN      | P27-1            | Yijie Ban          | 비철4-2   |
| Sungwhan Kim     | P27-21           | YONG HUI KIM       | 전산3-2   |
| Sungwoo Kang     | 신뢰3-4,<br>소반3-4  | Yongchul Kim       | P16-27  |
| SUNHWA LEE       | P29-4            | Yongqiang Meng     | P27-12  |
| <b>T</b>         |                  | Yoonmoon Chung     | 수소4-4   |
| Tae Young Go     | 재료강도4-1          | Youngho Sihn       | P23-10  |
| Tae-Hoon Kim     | 희토류2-4           | Yujin Moon         | P15-24  |
| Taegyu Kwon      | P11-1            | Yujin Rhee         | 알루미늄3-1 |
| Taehu Kang       | 적층3-7            | Yunseok Shin       | P32-13  |
| Taehyun Kim      | 이차전지 3-3         | <b>Z</b>           |         |
| TAESUK KIM       | 반도체2-2           | Zaigham Saeed Toor | 분석2-7   |
| Tariq Ali        | P26-29           | Zhe Gao            | P19-5   |
| Thiri Shwe Sin   | 상변태3-4           | <b>#</b>           |         |
| To Hai Ha Nguyen | 재료강도1-5          | A. Rajesh Kannan   | 집합4-4   |
| <b>V</b>         |                  | ByeongJun Jeon     | P16-11  |
| VIJAY GUPTA      | 나노융합2-4          |                    |         |
| VIKAS SHIVAM     | P3-13            |                    |         |
| <b>W</b>         |                  |                    |         |
| Wang EunChan     | 표면처리1-2          |                    |         |
| Wenlong Zhou     | 용접2-3            |                    |         |
| Won Bin Im       | 소반3-3            |                    |         |
| Won Kyung Seong  | NCM2-2           |                    |         |
| Won Pyo Hong     | 재료강도1-2          |                    |         |
| Won-Hyoung LEE   | 분석1-6            |                    |         |
| Won-Kyu Lee      | NCM3-2           |                    |         |
| won-wook SEO     | P10-7            |                    |         |
| Wongyu Park      | 인공3-5            |                    |         |
| Wonjin Jang      | 나노융합1-3          |                    |         |
| Wonjong Jeong    | 적층8-4            |                    |         |
| Wonjun Choi      | P23-8            |                    |         |
| Wook Ha Ryu      | 상변태2-1           |                    |         |
| Wooseok Lee      | 전산6-3            |                    |         |
| wooseong jeong   | P34-1            |                    |         |
| Woosun Jang      | 희토류2-5           |                    |         |
| Wu-young Goh     | 에너지2-2           |                    |         |
| <b>Y</b>         |                  |                    |         |
| Yan Li           | NCM2-1           |                    |         |
| Yang Jeong Park  | 전산5-1            |                    |         |
| Yang Yang        | AW2-2            |                    |         |



# 2026년도 춘계 학회상 수상자

## 1. POSCO학술상

- ◆ 김우진 (홍익대학교)

## 2. 현송공학상

- ◆ 김형욱 (한국재료연구원)

## 3. LS학술상

- ◆ 안진호 (한양대학교)

## 4. 아모공학상

- ◆ 윤희숙 (한국재료연구원)

## 5. POSCO김철우상

- ◆ 김용진 (국방과학연구소)

## 6. 공로상

- ◆ 박경태 (국립한밭대학교)
- ◆ 유상임 (서울대학교)

## 7. 기술상

- ◆ 서병찬 (한국재료연구원)
- ◆ 신상훈 (현대제철)
- ◆ 정은주 (포스코 기술연구원)

## 8. 신진학술상

- ◆ 김지훈 (부산대학교)
- ◆ 남대현 (고려대학교)
- ◆ 배재웅 (국립부경대학교)
- ◆ 이미경 (인천대학교)

## 9. 신진기술상

- ◆ 김영균 (한국재료연구원)
- ◆ 박태준 (고려대학교)
- ◆ 송명석 (한국생산기술연구원)
- ◆ 홍재완 (포스코 기술연구원)

## 10. International Scholar Award

- ◆ Yang Yang (The Pennsylvania State University)
- ◆ 류채우 (홍익대학교) ※TMS 2027 Annual Meeting에서 수상 예정

# 2026년도 춘계 학회상 수상자



## 11. 논문상

### 1) 제1부문: 우수 논문

- ◆ 대한금속 · 재료학회지(Korean Journal of Metals and Materials)  
「Microstructure and Texture Evolution in Thermomechanically Processed FCC Metals and Alloys: a Review」  
Vol. 62, No. 7, pp. 714–720 (2024)  
Aman Gupta<sup>1</sup>, Ranjeet Kumar<sup>2</sup>, Lalit Kaushik<sup>3</sup>, Sourabh Shukla<sup>4</sup>, Vipin Tandon<sup>5</sup>, 최시훈<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>국립순천대학교, <sup>2</sup>IT Delhi, <sup>3</sup>IT Jodhpur, <sup>4</sup>G H Raison College of Engineering, <sup>5</sup>Manipal Academy of Higher Education.
- ◆ Metals and Materials International  
「Cryogenic Deformation Behaviour of Aluminium Alloy 6061–T6」  
Vol. 30, No. 6, pp. 1492–1504 (2024)  
진민수<sup>1</sup>, 이병주<sup>2</sup>, 유지성<sup>3</sup>, 조용희<sup>4</sup>, 이승건<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>Max Planck Institute for Sustainable Materials, <sup>2</sup>히타치 하이 테크, <sup>3</sup>한국재료연구원, <sup>4</sup>전남대학교.
- ◆ Electronic Materials Letters  
「Copper Bonding Technology in Heterogeneous Integration」  
Vol. 20, No. 1, pp. 1–25 (2024)  
이윤구<sup>1</sup>, Michael McInerney<sup>2</sup>, 주영창<sup>3</sup>, 최인석<sup>3</sup>, 김사라은경<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>SK하이닉스, <sup>2</sup>Rose-Hulman Institute of Technology, <sup>3</sup>서울대학교, <sup>4</sup>서울과학기술대학교.

### 2) 제2부문: 논문 다수 인용

- ◆ 대한금속 · 재료학회지(Korean Journal of Metals and Materials)
  - Gold: 박주현 (한양대학교)
  - Silver: 이성희 (국립목포대학교)
  - Bronze: 이욱진 (부산대학교)
- ◆ Metals and Materials International
  - Gold: 박주현 (한양대학교)
  - Silver: 박성혁 (경북대학교)
  - Bronze: 안병민 (아주대학교)
- ◆ Electronic Materials Letters
  - Gold: 김수영 (고려대학교)
  - Silver: 심욱 (성균관대학교)
  - Bronze: 정우철 (서울대학교)

## 12. 굿리뷰어상

- ◆ 대한금속 · 재료학회지(Korean Journal of Metals and Materials)
  - 김영균 (한국재료연구원)
- ◆ Metals and Materials International
  - 김정기 (경상국립대학교)
- ◆ Electronic Materials Letters
  - 홍기하 (국립한밭대학교)

# 2026년도 춘계 학회상 수상자



## 13. 재료과학예술상

### 1) Science 부문

- ◆ 최우수: 「니켈계 초합금의 가열 낙엽 Ni<sub>3</sub>Ti 석출상」  
김동환<sup>1</sup>, 김민석<sup>1</sup>, 박은수<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>서울대학교.
- ◆ 우 수: 「트리아진 활성화 기반의 황동-폴리프로필렌 계면 접합 기술」  
양수미<sup>1,2</sup>, 김민직<sup>1,3</sup>, 김은영<sup>1</sup>, 한병준<sup>4</sup>, 김정한<sup>4</sup>, 신다슬<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>한국재료연구원, <sup>2</sup>부산대학교, <sup>3</sup>포항공과대학교, <sup>4</sup>국립한밭대학교.
- ◆ 우 수: 「충돌구 주위로 형성된 고엔트로피 해안가 마을」  
이소영<sup>1</sup>, 노시연<sup>1</sup>, 김재권<sup>1</sup>, 김현수<sup>1</sup>, 김윤호<sup>1</sup>, 박은수<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>서울대학교.
- ◆ 장 려: 「Double-sided molybdenum selenide nanosheet growth on hollow zinc stannate nanofibers for efficient CO<sub>2</sub> photoreduction to chemical fuel」  
Hazina Charles<sup>1</sup>, Plassidius J. Chengula<sup>1</sup>, 이선영<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>한양대학교.
- ◆ 장 려: 「결정면에 따른 부식 거동의 차이」  
이원찬<sup>1</sup>, 김정한<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>국립한밭대학교.

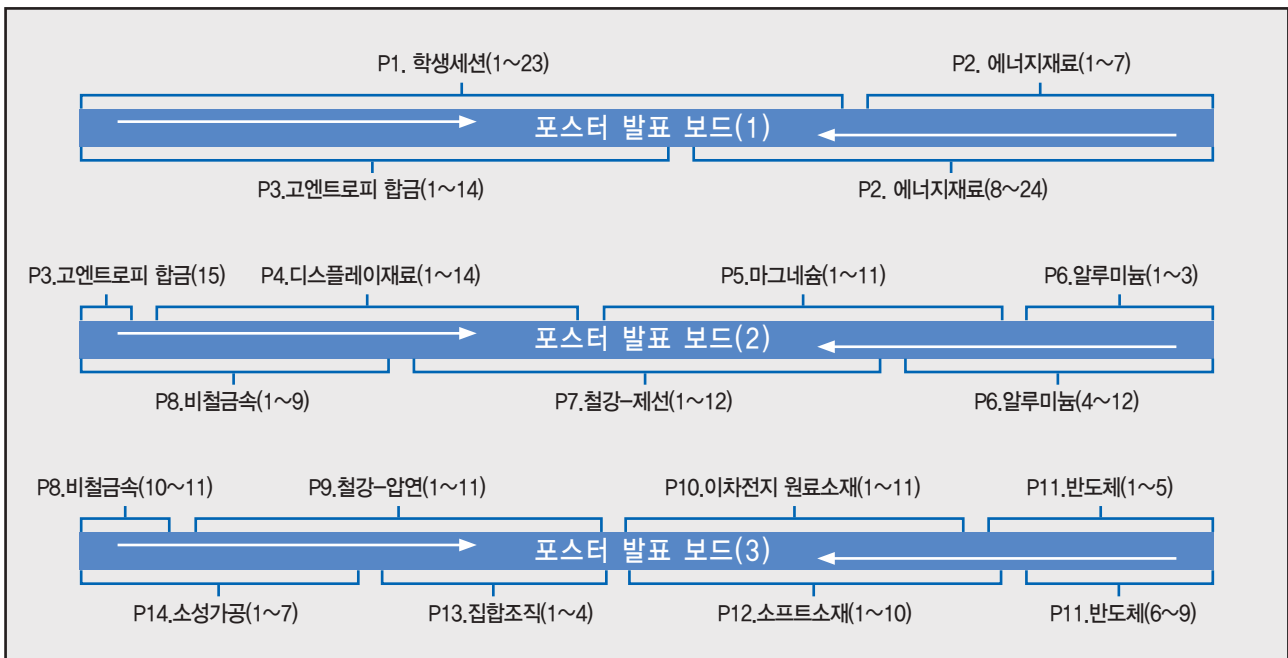
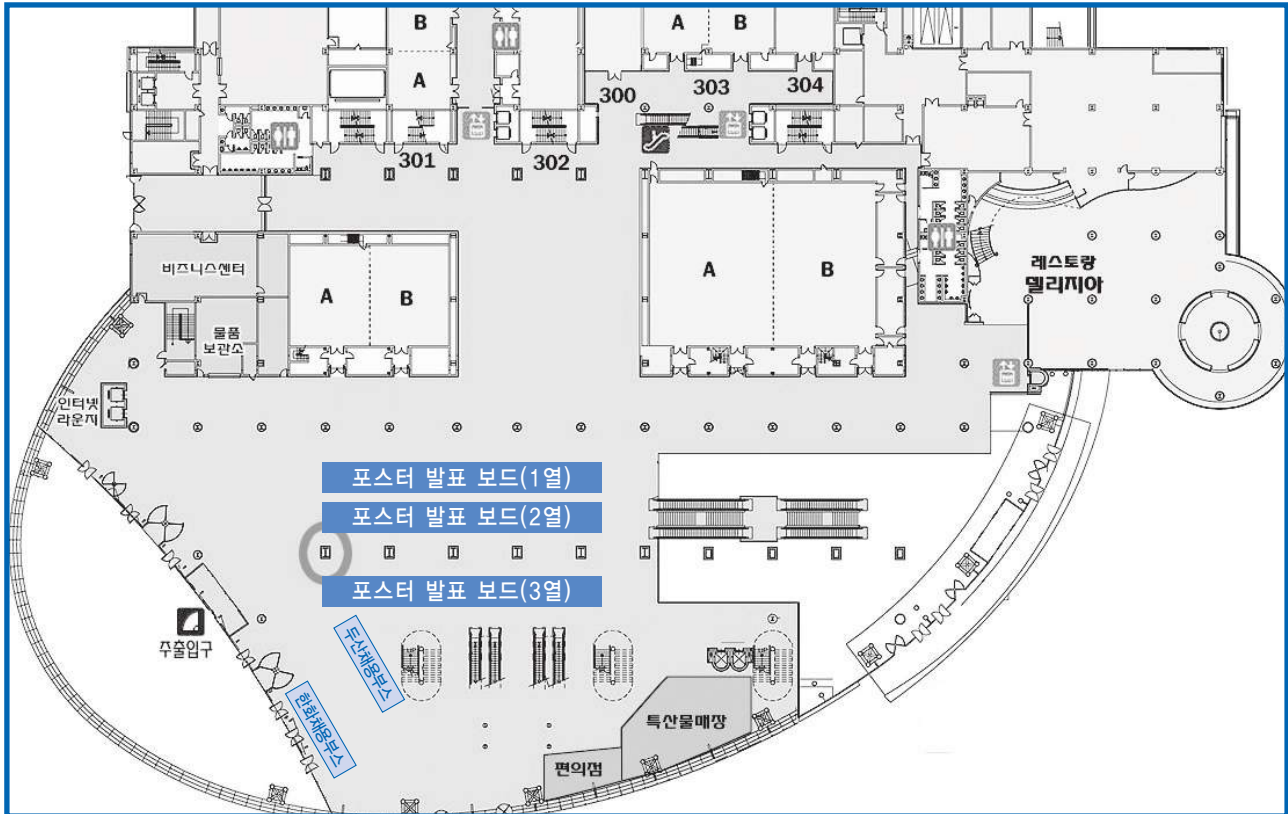
### 2) Art 부문

- ◆ 최우수: 「나노코낙」  
이준서<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>경희대학교.
- ◆ 우 수: 「심연의 서가(書架)」  
이찬희<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>한국과학기술원.
- ◆ 우 수: 「축소된 풍경: 나노 입자가 만든 한반도」  
윤어진<sup>1</sup>, 이태우<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>서울대학교.
- ◆ 장 려: 「고엔트로피의 얼굴」  
이강현<sup>1</sup>, 김민중<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>한양대학교.
- ◆ 장 려: 「나노포러스 사이에 피어난 꽃과 별」  
성지혜<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>단국대학교.

# 포스터배치

4월 28일 (화)

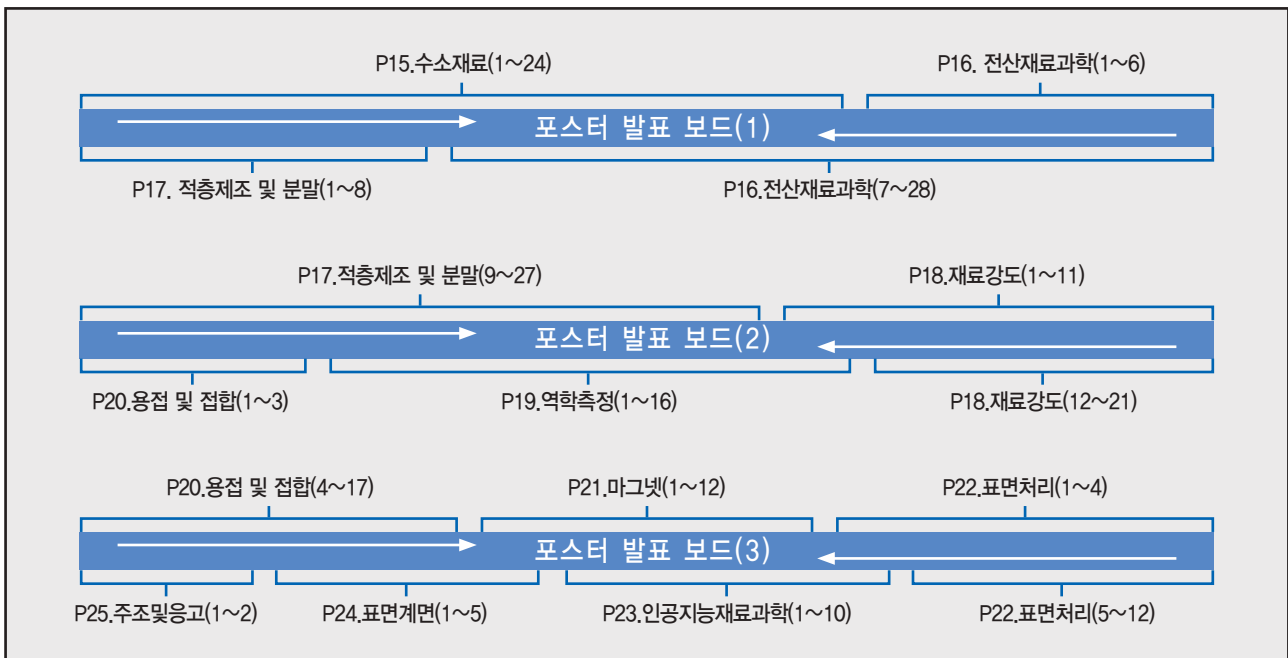
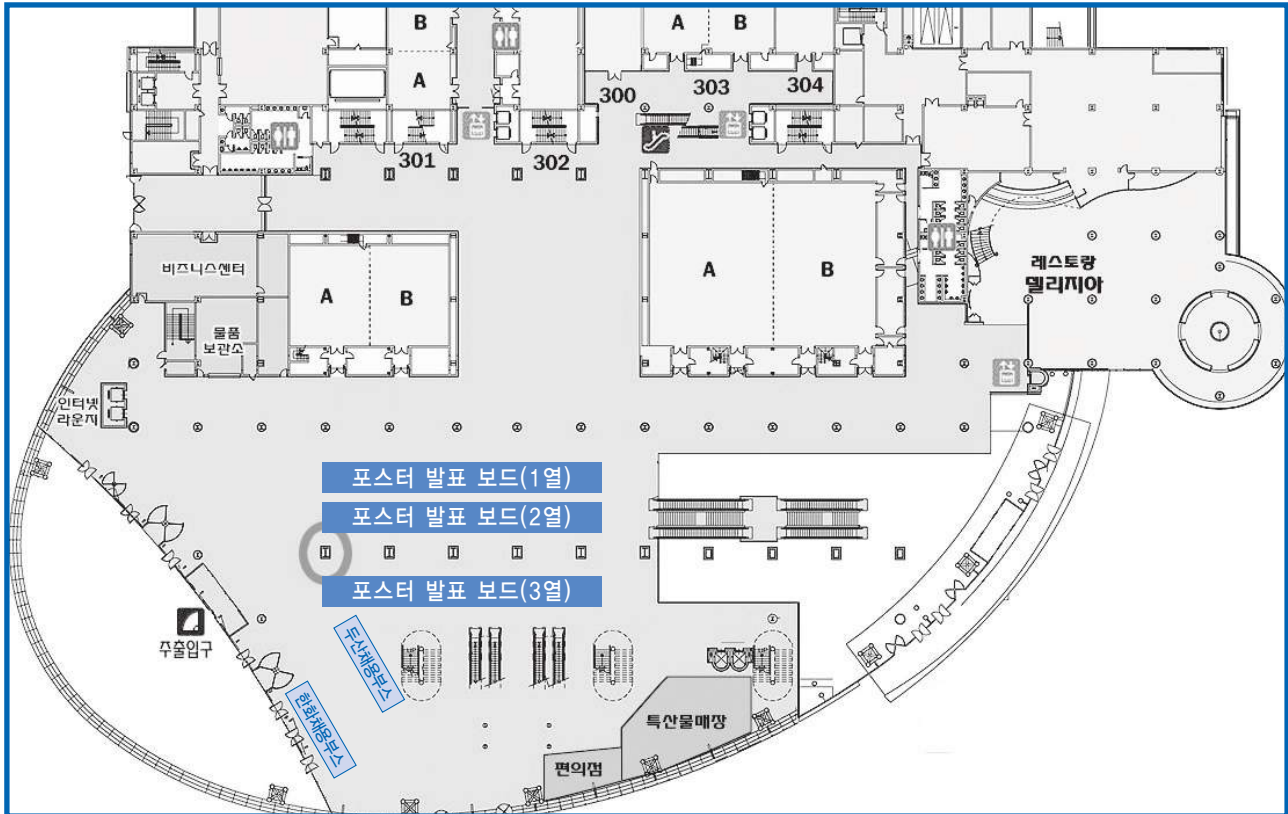
포스터발표 (Poster-I)



# 포스터배치

4월 29일(수)

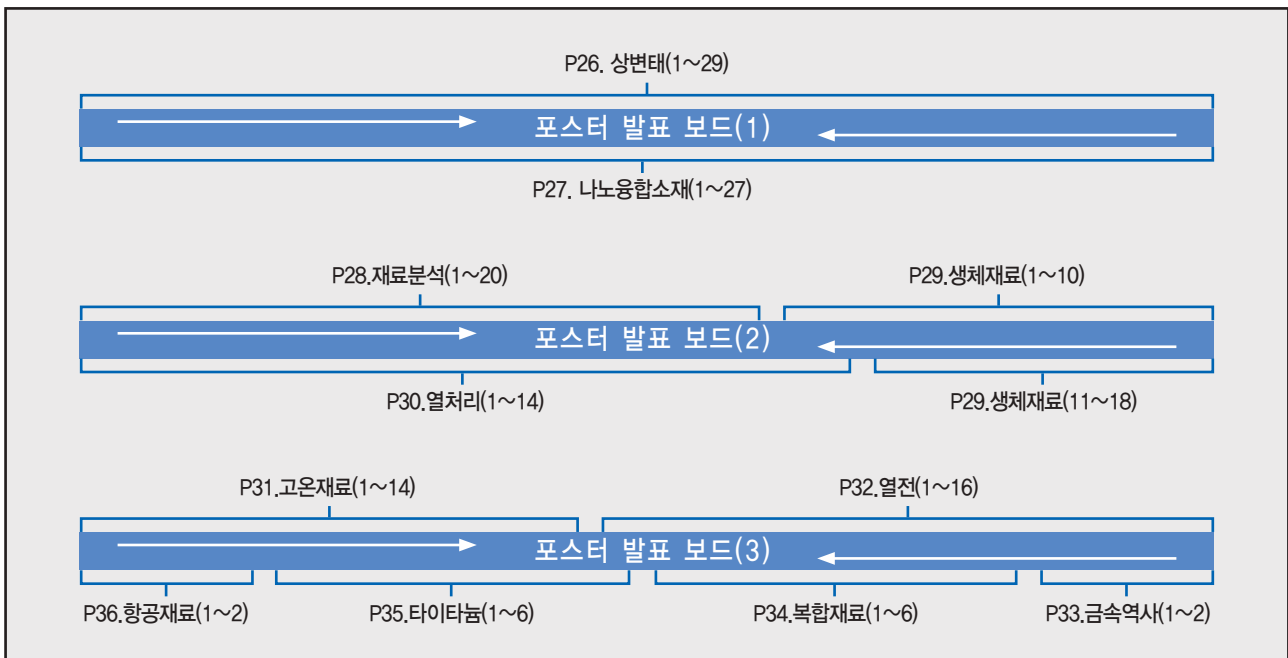
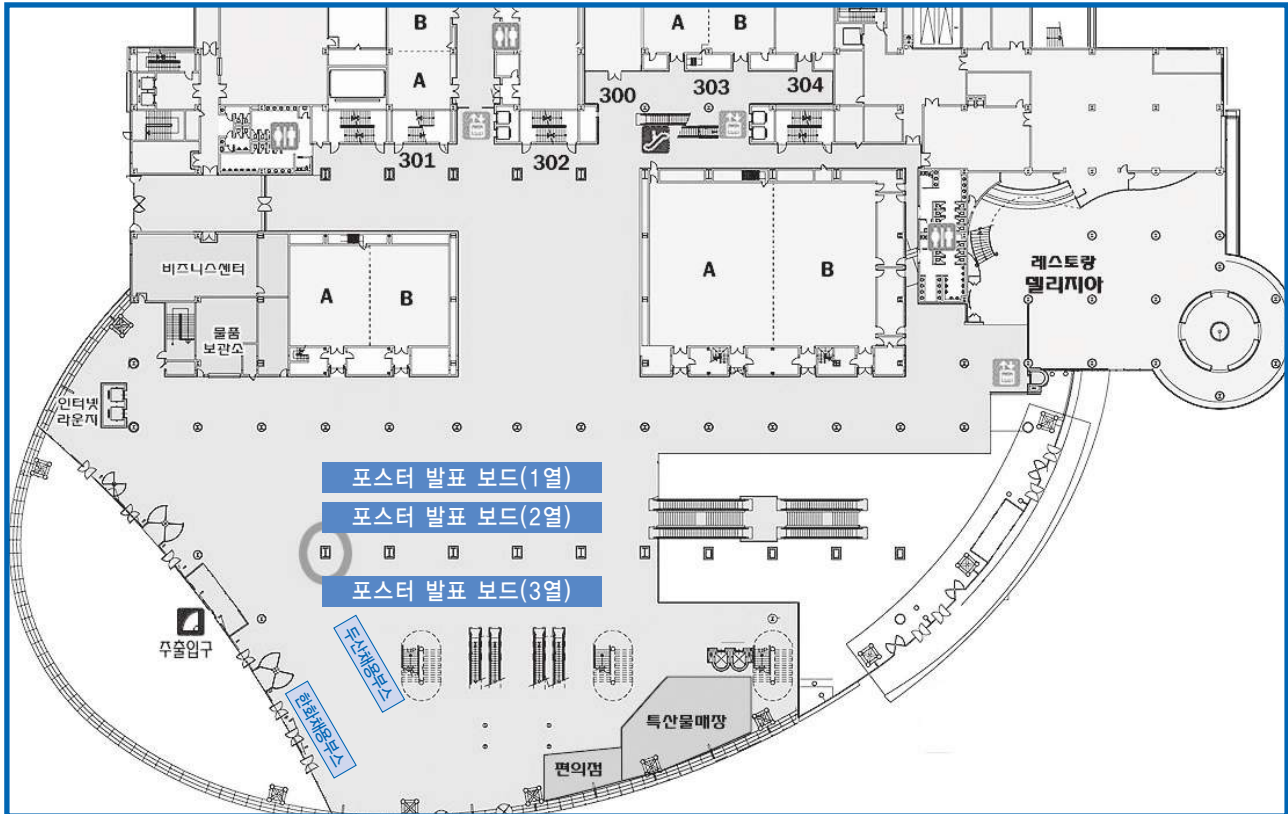
포스터발표 (Poster-II)



# 포스터배치

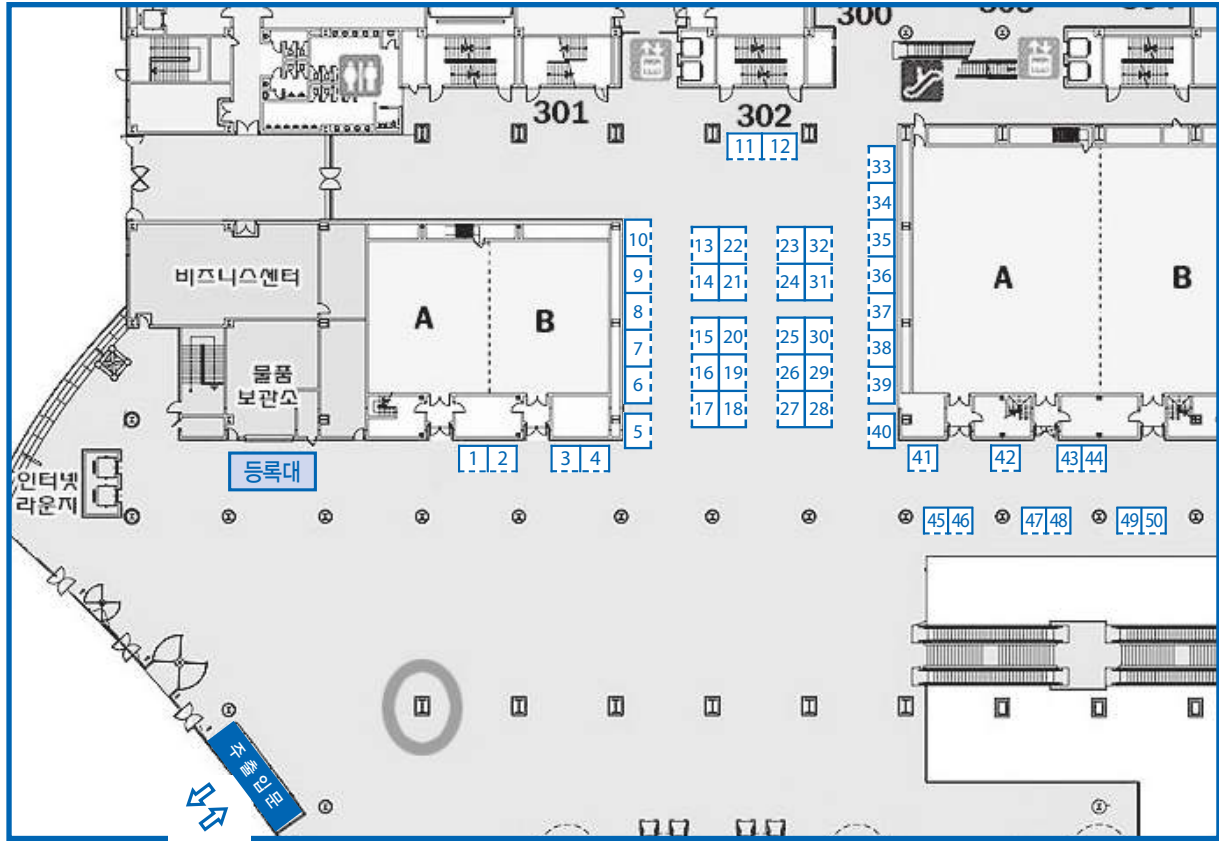
4월 30일(목)

포스터발표 (Poster-III)





# 부스배치



## 학회 부스 참가회사

- |       |                          |    |                     |    |                                |
|-------|--------------------------|----|---------------------|----|--------------------------------|
| 1,2   | 브루커코리아(주)                | 21 | (주)팜테크              | 37 | 한국재료연구원                        |
| 3     | (주)신영사이언스                | 22 | 한국전자통신연구원           |    | 극한소재실증연구기반조성사업단                |
| 4     | 자이스 코리아                  | 23 | 코린스테크               | 38 | (주)제이엠                         |
| 5     | (주)만진교역                  | 24 | 비포스 주식회사            | 39 | (주)케이에스이엠                      |
| 6     | 한국표준과학연구원                | 25 | 제이엘교역               | 40 | (주)웨이브센스                       |
| 7,8,9 | Thermo Fisher Scientific | 26 | 크라이오에이치앤아이(주)       | 41 | (주)솔루션랩                        |
| 10    | 린테크                      | 27 | 카메카코리아              | 42 | 한국재료연구원 재료데이터분석연구본부            |
| 11    | 주식회사 루안                  | 28 | (주)알앤비              | 43 | (주)한스코리아                       |
| 12    | (주)이공교역                  | 29 | 한국재료연구원 신뢰성기반활용지원사업 | 44 | 주신산업                           |
| 13    | 주식회사 엠엔피                 | 30 | 비전플러스 주식회사          | 45 | 에스제이원트레이딩 주식회사                 |
| 14    | (주)에프엠케이                 | 31 | (주)알트소프트            | 46 | Thermo-Calc Software Korea LLC |
| 15    | (주)유로사이언스                | 32 | 아이에스지               | 47 | 엔젯 주식회사                        |
| 16    | (재)포항산업과학연구원             | 33 | (주)에이스이앤지           | 48 | 버추얼랩                           |
| 17,18 | (주)진우테크                  | 34 | (주)프론틱스             | 49 | 주식회사 세미안                       |
| 19    | Anton Paar Korea         | 35 | (주)솔트               | 50 | (주)솔텍트레이딩                      |
| 20    | 유아이티                     | 36 | 한국재료연구원 소재혁신선도본부    |    |                                |



# 인력채용 부스

- ▶ 참여회사 : 두산에너지빌리티, 한화에어로스페이스
- ▶ 부스위치 : 3층(로비층) 로비
- \* 면접 참가시 경품 도장 4개 날인

2026년도 춘계학술대회  
인력채용부스에 초대합니다.



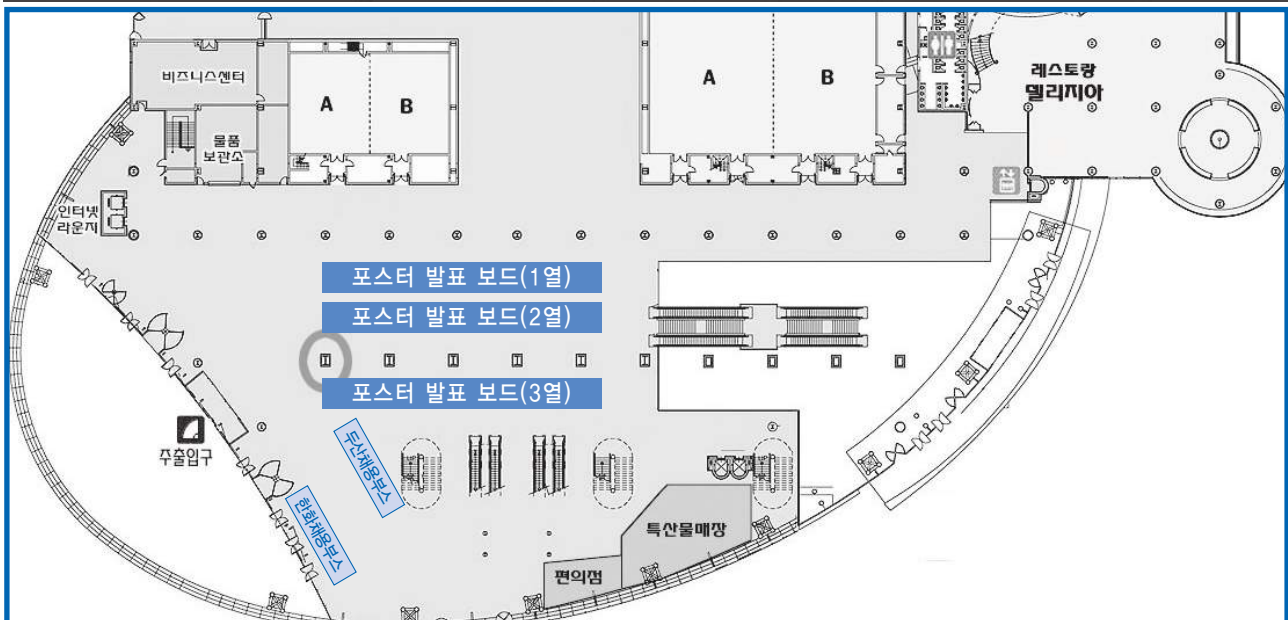
4월 28일 ~ 30일

제주ICC 3층 로비



Hanwha Aerospace

**DOOSAN**



# 경품 추첨 안내

- ◆ 학술대회 전시부스 도장 18개 → 응모함(大) 응모 → 4.29(수) & 4.30(목) 1~5등 경품 추첨
- ◆ 경품 추첨 일시 : 4월 29일 (수) 12:30 / 4월 30일 (목) 13:30 ~ ◆ 추첨 장소 : 3층 로비

4월 29일 (수) 12:30 ~

1등  
(1명)



[다이슨] 슈퍼소닉 헤어드라이어 Y26

2등  
(2명)



[Apple] 워치 SE3  
(40mm, 스타라이트)



[Apple] 워치 SE3  
(40mm, 미드나이트)

3등  
(3명)



[Apple] 에어팟4 액티브 노이즈캔슬링(화이트)

4등  
(4명)



[Starbucks] 기프트카드(15만원)

5등  
(5명)



[신세계] 상품권(10만원)

4월 30일 (목) 13:30 ~



[다이슨] 슈퍼소닉 헤어드라이어 Y26



[Galaxy] 워치 8(40mm, 실버)



[Galaxy] 워치 8(44mm, 그라파이트)



[Galaxy] 버즈3 프로(화이트)



[Starbucks] 기프트카드 (15만원)



[신세계] 상품권(10만원)

- ◆ 경품 추첨 시, 당첨자가 자리에 있는 경우에만 유효하고 자리에 없는 경우에는 재추첨 하게 됩니다.