

ISSN 2982-6268(Print)  
ISSN 2982-6306(Online)

# E2M

Vol. 39, No. 1

March 2026

전기 전자와  
첨단 소재

Special Theme **금속 단일원자 기반 전기화학촉매 분야 연구 동향**

기업 탐방 (주)브리오라

연구실 소개 전기화학 에너지 소재 연구실

VISIT 국제 학술대회 참관기 2025 환태평양 화학회 연합 국제 학술회의  
해외 연구 기관 탐방 파리 시떼 대학교

Column CMOS 이미지 센서(CIS) 기술의 혁신과 미래 전망

Rookie Interview 이금비 조교수(경북대학교 응용화학공학부)

**부록 2026 학회 조직**



한국전기전자재료학회  
The Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers



34 (주)브리오라



38 전기화학 에너지 소재 연구실



44 2025 환태평양 화학회 연합 국제 학술회의



48 파리 시떼 대학교



54 CMOS 이미지 센서(CIS) 기술의 혁신과 미래 전망



58 이금비 조교수(경북대학교 응용화학공학부)

## contents

04	취임사	
06	2026년도 한국전기전자재료학회 임원, 평의원, 협력이사 명단	
18	<b>Special Theme</b> 금속 단일원자 기반 전기화학 촉매 분야 연구 동향	
34	기업 탐방	(주)브리오라
38	연구실 소개	전기화학 에너지 소재 연구실

44	<b>VISIT</b>	국제 학술대회 참관기 2025 환태평양 화학회 연합 국제 학술회의 해외 연구 기관 탐방 파리 시떼 대학교
54	<b>Column</b>	CMOS 이미지 센서(CIS) 기술의 혁신과 미래 전망
58	<b>Rookie Interview</b>	이금비 조교수(경북대학교 응용화학공학부)
68	<b>KIEEME Story</b>	故 이준용 교수님을 추모하며 KIEEME News   Best Paper
80	<b>부록</b>	2026 학회 조직

발행일 2026년 3월 1일      발행인 최지원      편집인 김지완  
 발행처 사단법인 한국전기전자재료학회 서울시 강남구 테헤란로 7길 22 한국과학기술회관 1관 807호  
 전화 02)538-7949      팩스 02)538-3623      홈페이지 <https://www.kieeme.or.kr>

편집위원 김지완(위원장/서울시립대학교) | 김윤석(부위원장/성균관대학교) | 원상민(부위원장/성균관대학교)  
 정승준(부위원장/고려대학교) | 하돈형(부위원장/중앙대학교) | 오민석(한국전자기술연구원) | 오종민(광운대학교)  
 최지원(한국과학기술연구원) | 김동영(부경대학교) | 김명길(성균관대학교) | 김수진(고려대학교) | 김영국(성균관대학교)  
 김영훈(성균관대학교) | 김재훈(가천대학교) | 김진식(동국대학교) | 남인호(중앙대학교) | 노지형(대구경북첨단의료산업진흥재단)  
 류채우(홍익대학교) | 박수형(한국과학기술연구원) | 백세웅(고려대학교) | 변명환(계명대학교) | 양희선(홍익대학교)  
 양현승(한국전자기술연구원) | 오승주(고려대학교) | 유강열(한국전자기술연구원) | 이철호(서울대학교) | 임유승(세종대학교)  
 임준원(경희대학교) | 정선호(경희대학교) | 정소희(한국과학기술연구원) | 조기현(단국대학교) | 주중훈(광주과학기술원)  
 황도경(한국과학기술연구원)      편집 서유빈(사무국)      디자인 및 인쇄 한국학술정보(주) 031)940-1007

## E<sup>2</sup>M Title Story

E<sup>2</sup>M - 전기 전자와 첨단 소재는 한국전기전자재료학회 회원님들의 소중한 의견이 반영된 제호입니다.  
 메인 타이틀인 'E<sup>2</sup>M(Electrical & Electronic Materials의 약칭)'과 서브 타이틀인 '전기 전자와 첨단 소재'는 시대의 흐름과  
 우리 학회의 정체성을 잘 반영하고 있습니다.

E<sup>2</sup>M - 전기 전자와 첨단 소재에 실린 어떤 내용도 무단으로 복제해서 사용할 수 없으며, 게재된 기사와 본 학회의 견해는 다를 수 있습니다.



### 취임사

존경하는 한국전기전자재료학회 회원 여러분!  
안녕하십니까?

2026년 한국전기전자재료학회  
제34대 학회장 최지원입니다.

지난 39년간 우리 학회를 위해  
헌신과 노력을 아끼지 않고 봉사해주신  
모든 회원님들과 함께 대한민국 최고의 학회로  
도약하는 한 해가 될 것임을 다짐하며 취임사를  
시작하고자 합니다.



전 세계적으로 인공지능, 양자, 휴머노이드 등 전기전자재료 관련 산  
업과 연구 분야가 매우 중요해지는 시점에서 우리 학회의 역할이 더욱  
중요해지고 있습니다. 이러한 전기전자재료 분야의 발전을 위해 학회  
회원 모두가 힘을 모아 함께 준비한다면 대한민국의 발전과 우리 학회  
의 발전은 의심할 여지 없이 이루어질 것이며, 우리 학회는 최고의 학  
회가 될 것입니다.

대한민국 최고의 학회가 되기 위한 전략은 여러 가지가 있으나, 그중  
가장 중요한 두 가지 전략을 먼저 말씀드리고, 이와 더불어 함께 해야  
할 일들을 간단히 첨부드리고자 합니다.

첫째, 2,000명 이상의 회원이 참가하는 학술대회로 만들겠습니다.

2026년도는 ICAE가 개최되지 않는 해로서 6월에 부산 벡스코에서 하  
계학술대회가 개최되며, 11월에는 여수 디오션리조트에서 추계학술  
대회가 개최됩니다. 현재 우리 학회의 학술대회가 1,000명 이상의 회  
원이 참가하는 학술대회로 발전하게 된 계기는 약 10년 전 연구회 중  
심의 학술대회를 개최하면서부터입니다. 연구회 중심의 학술대회가

약 10년간 지속되면서 상당수의 연구회가 대형 연구회로 자리를 잡았으므로 2026년에는  
중·소규모 연구회 개편을 통하여 하계에는 2,000명 이상, 추계에는 1,000명 이상의 회원이  
참석하는 대형 학회로 개최할 수 있도록 잘 준비하겠습니다.

두 번째는 우수저널을 보유한 학회로 만들겠습니다.

우리 학회는 영문논문지(TEEM)과 국문논문지(JEEM)을 출판하고 있습니다.

영문논문지에 저명한 연구자들의 리뷰논문과 우수한 연구논문의 게재를 통하여 2025년  
부터 TEEM의 피인용 지수가 눈에 띄게 증가하고 있으며, 이에 따라 향후 3년 이내에  
ESCI를 벗어나 SCIE로 초청받고 5년 이내에 우수저널의 반열에 오를 수 있도록 논문지  
고급화 추진에 박차를 가하겠습니다. 또한 국문논문지도 올해 안에 SCOPUS에 등재시킬  
수 있도록 치밀한 준비를 하겠습니다.

이와 더불어 신진연구자의 학회 참여 확대, 우리 학회 회원사인 대기업-중견기업-중소  
기업의 밸류체인이 잘 생성되면서 대학과 연구소가 함께 협력하여 산학연 교류가 실질  
적이고도 활발하게 조성되는 분위기, 학회의 글로벌화 등을 통하여 학회가 발전할 수 있  
는 시스템을 만들어 보겠습니다.

이러한 계획을 달성하기 위해서는 학회 임원진, 연구회의 헌신적인 도움도 필요하겠지  
만 무엇보다도 회원 여러분의 많은 관심과 도움이 필요합니다. 한국전기전자재료학회의  
회원이라는 것에 자부심을 가질 수 있도록 우리 학회를 도약시키는 데 최선을 다할 것을  
회원님들께 맹세하는 것으로 짧은 취임사를 대신하고자 합니다.

2026년 병오년 새해가 밝았습니다. 새해 복 많이 받으시고 소원성취하시어 행복한 한 해가  
되기를 기원합니다.

감사합니다. 🙏

최 지원

한국전기전자재료학회 제34대 회장

# 2026년도 한국전기전자재료학회 임원 명단

The Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers



회장 **최지원**  
한국과학기술연구원



차기회장 **이재형**  
성균관대학교



부회장 **구상모**  
광운대학교



부회장 **김기훈**  
서울대학교



부회장 **김상우**  
연세대학교



부회장 **임은주**  
단국대학교



부회장 **강신욱**  
스마트전자



부회장 **강종윤**  
한국연구재단



부회장 **강태영**  
파워큐브세미



부회장 **고현필**  
삼성메디슨



부회장 **김경범**  
이에스이엔지



부회장 **김권제**  
아이큐랩



부회장 **김남군**  
한국전기연구원



부회장 **김상진**  
케이나인반도체



부회장 **김평중**  
동우일렉트릭



부회장 **김현주**  
대한전선



부회장 **김현호**  
한국실장산업협회



부회장 **김희동**  
효성중공업



부회장 **남기준**  
가온전선



부회장 **문재경**  
한국전자통신연구원



부회장 **민병권**  
국가과학기술연구회



부회장 **박영두**  
동미전기



부회장 **박윤휘**  
보부하이테크



부회장 **서동식**  
테스



부회장 **서병주**  
미코



부회장 **신호순**  
한국세라믹기술원

2026년도 한국전기전자재료학회 임원 명단

The Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers



부회장 원종석 | 미래엔지니어링



부회장 윤종락 | 삼화콘덴서공업



부회장 이병화 | 한화솔루션



부회장 이수민 | 센서연구소



기획이사 김태현 | 한국과학기술연구원



기획이사 임유승 | 세종대학교



기획이사 조형균 | 성균관대학교



기획이사 최덕현 | 성균관대학교



부회장 이용욱 | 일진전기



부회장 이억재 | 과학기술분석센터



부회장 이재익 | LS전선



부회장 임종찬 | 대주전자재료



총무이사 오승주 | 고려대학교



총무이사 김혁 | 서울시립대학교



재무이사 오종민 | 광운대학교



재무이사 손선영 | 상지대학교



부회장 전민석 | 한국산업기술시험원



부회장 정채환 | 한국생산기술연구원



부회장 한동빈 | 위너테크놀로지



부회장 허봉재 | 에이치시티



편집이사 정창규 | 전북대학교



편집이사 황건태 | 부경대학교



편집이사 박귀일 | 경북대학교



편집이사 최문기 | 울산과학기술원



부회장 홍동석 | 대한전선



감사 조한구 | 성균관대학교



감사 백종후 | 한국세라믹기술원



기획이사 조욱 | 울산과학기술원



편집이사 한형수 | 울산대학교



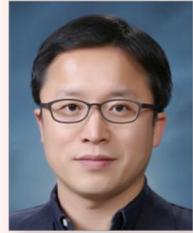
편집이사 김수영 | 고려대학교



편집이사 김영훈 | 성균관대학교



편집이사 장지수 | 한국과학기술연구원



| 편집이사 장호원 |  
서울대학교



| 편집이사 고중혁 |  
중앙대학교



| 편집이사 김지완 |  
서울시립대학교



| 편집이사 하동형 |  
중앙대학교



| 학술이사 이규형 |  
연세대학교



| 학술이사 이금비 |  
경북대학교



| 학술이사 이기문 |  
군산대학교



| 학술이사 이철호 |  
서울대학교



| 편집이사 원상민 |  
성균관대학교



| 편집이사 정승준 |  
고려대학교



| 편집이사 김윤석 |  
성균관대학교



| 학술이사 오민석 |  
한국전자기술연구원



| 학술이사 양희선 |  
홍익대학교



| 학술이사 정유진 |  
영남대학교



| 학술이사 황도경 |  
한국과학기술연구원



| 국제이사 백정민 |  
성균관대학교



| 학술이사 이순일 |  
창원대학교



| 학술이사 강주훈 |  
연세대학교



| 학술이사 김용우 |  
IIS



| 학술이사 김용주 |  
고려대학교



| 국제이사 송현철 |  
고려대학교



| 국제이사 이재현 |  
성균관대학교



| 국제이사 이진욱 |  
서울대학교



| 국제이사 허성훈 |  
한국과학기술연구원



| 학술이사 김중규 |  
포스텍



| 학술이사 김효정 |  
세종대학교



| 학술이사 우주영 |  
한국생산기술연구원



| 학술이사 유승호 |  
고려대학교



| 산학연협력이사 박성대 |  
한국전자기술연구원



| 산학연협력이사 기현철 |  
한국광기술원



| 산학연협력이사 김도영 |  
울산과학기술대학교



| 산학연협력이사 김진모 |  
한국광기술원

2026년도 한국전기전자재료학회 임원 명단

2026년도  
한국전기전자재료학회  
평의원 명단



산학연협력이사 **박진주** |  
청주대학교



산학연협력이사 **박영** |  
한밭대학교



산학연협력이사 **박진홍** |  
성균관대학교



산학연협력이사 **김상모** |  
원테크솔루션



산학연협력이사 **강형원** |  
한국전자기술연구원



산학연협력이사 **최종민** |  
맥사이언스



교육이사 **백세웅** |  
고려대학교



교육이사 **구자영** |  
효성중공업



교육이사 **김종만** |  
전남도립대학교



교육이사 **김형진** |  
울산과학기술대학교



교육이사 **문한얼** |  
동아대학교



교육이사 **백승협** |  
한국과학기술연구원



교육이사 **이동원** |  
한국산업기술시험원

The Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers

강병우 포항공과대학교

강신욱 스마트전자㈜

강종윤 한국연구재단

강주훈 연세대학교

강태영 파워큐브세미㈜

강형원 한국전자기술연구원

경신수 파워큐브세미㈜

고윤석 디엔아이코퍼레이션

고종혁 중앙대학교

고현필 삼성메디슨

구상모 광운대학교

기현철 한국광기술원

김경범 (주)이에스이엔지

김국영 (주)진우이엠씨

김권제 (주)아이큐랩

김기환 경상국립대학교

김기훈 서울대학교

김남균 한국전기연구원

김도영 울산과학기술대학교

김명길 성균관대학교

김민경 광운대학교

김봉훈 대구경북과학기술원

김상모 원테크솔루션

김상우 연세대학교

김상진 케이나인반도체

김성진 충북대학교

김성훈 동의대학교

김수영 고려대학교

김영국 성균관대학교

김영훈 성균관대학교

김용우 IT소재(주)

김용주 고려대학교

김윤석 성균관대학교

김일두 한국과학기술원

김재호 태영건설

김종규 포항공과대학교

2026년도 한국전기전자재료학회 평의원 명단

The Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers

김종만	전남도립대학교	김희동	효성중공업(주)	박윤희	보부하이테크	손선영	상지대학교	원상민	성균관대학교	이병화	한화솔루션
김지완	서울시립대학교	김희동	세종대학교	박진성	한양대학교	송현철	고려대학교	원종석	미래엔지니어링	이상권	중앙대학교
김지훈	공주대학교	남기준	가온전선	박진주	청주대학교	신원호	광운대학교	유강열	한국전자기술연구원	이상렬	가천대학교
김진모	한국광기술원	류정호	영남대학교	방 욱	한국전기연구원	신호순	한국세라믹기술원	유승호	고려대학교	이상태	이노시엠
김태현	한국과학기술연구원	문대규	순천향대학교	배시영	국립부경대학교	안창원	(주)퀀테스	윤성민	경희대학교	이성갑	경상국립대학교
김평중	동우전기(주)	문재경	한국전자통신연구원	백세웅	고려대학교	양현승	한국전자기술연구원	윤중락	삼화콘덴서공업(주)	이수민	(주)센서연구소
김혁	서울시립대학교	문한얼	동아대학교	백승협	한국과학기술연구원	양희선	홍익대학교	이규복	충남대학교	이순일	국립창원대학교
김현주	대한전선(주)	민병권	국가과학기술연구회	백정민	성균관대학교	오민석	한국전자기술연구원	이규형	연세대학교	이용욱	일진전기
김현호	한국실장산업협회	박영	한밭대학교	백종후	한국세라믹기술원	오승주	고려대학교	이금비	경북대학교	이원재	동의대학교
김형우	한국전기연구원	박귀일	경북대학교	서동식	테스	오종민	광운대학교	이기문	군산대학교	이익재	(주)과학기술분석센터
김형진	울산과학대학교	박성대	한국전자기술연구원	서병주	미코	우종창	한국폴리텍대학교	이기태	전북대학교	이재익	LS전선
김호정	세종대학교	박영두	동미전기(주)	서인태	한국전자기술연구원	우주영	한국생산기술연구원	이동원	한국산업기술시험원	이재현	성균관대학교

2026년도 한국전기전자재료학회 평의원 명단

2026년도  
한국전기전자재료학회  
협력이사 명단

이재형 성균관대학교

정선호 경희대학교

최덕현 성균관대학교

이진욱 서울대학교

정성민 한국세라믹기술원

최문기 울산과학기술원

이철호 서울대학교

정소희 한국과학기술연구원

최종민 맥사이언스

이한보람 인천대학교

정승준 고려대학교

하돈형 중앙대학교

임유승 세종대학교

정유진 영남대학교

한동빈 (주)위너테크놀로지

임은주 단국대학교

정창규 전북대학교

한형수 울산대학교

임종찬 대주전자재료

정채환 한국생산기술연구원

허봉재 에이치시티

임호선 숙명여자대학교

정학준 한국전자기술연구원

허성훈 한국과학기술연구원

장지수 한국과학기술연구원

조욱 울산과학기술원

황건태 부경대학교

장호원 서울대학교

조한구 성균관대학교

황도경 한국과학기술연구원

전대우 한국세라믹기술원

조형균 성균관대학교

황석원 고려대학교

전민석 한국산업기술시험원

조힘찬 한국과학기술원

강두원 스마트전자

이성일 한국교통대학교

강현기 파워큐브세미

장원수 HE시스템

류정호 영남대학교

장유철 HI만도

이석희 차세대지능형반도체사업단

현종필 한국전기기술인협회

당연직 협력이사 [지부장]

강원지부

안철현 강릉원주대학교

광주·전남지부

차상준 서정전기

대구·경북지부

신훈규 포항공과대학교

부산·경남·울산지부

신호순 한국세라믹기술원

전북지부

이기태 전북대학교

충청지부

류호준 한국전자통신연구원

# 1 금속 단일원자 기반 전기화학 촉매 분야 연구 동향

글\_ 동창욱 박사과정 · Alfi Rodiansyah 박사과정 · 임준원 교수 | 경희대학교 정보디스플레이학과

## 1. 서론

최근 전 세계적으로 에너지 위기, 환경 오염, 탄소 중립 등 인류의 지속가능성에 대한 이슈가 부각되면서 이를 해결하기 위한 방안으로 전기화학적 방법을 활용한 다양한 기술들이 제안되고 있다 [1]. 전기화학적 방법이란 전기에너지와 화학에너지 간 가역·비가역적 전환을 이용하여, 기존에 활용하기 어려웠던 신재생에너지를 효과적으로 이용하거나 생산된 전기를 보다 효율적으로 저장·변환하는 원리 및 공정을 포괄하는 개념이다. 대표적인 예로 2차전지는 전기에너지와 화학에너지 간의 가역적인 변환을 기반으로 전기차 구동을 위한 동력원으로 사용되며, 에너지 저장 시스템 (energy storage system, ESS)의 핵심 소자로서 스마트그리드에 적용되고 있다. 반면, 전기

에너지와 화학에너지 사이의 비가역적 변환 과정으로는 전기화학적 물 분해 반응, 전기화학적 암모니아 합성 반응 등이 있으며, 이러한 공정을 통해 수소나 암모니아와 같은 화학연료를 생산할 수 있다. 다양한 전기화학 에너지 소자 및 친환경 공정의 효율은 전극 구조, 전해질, 반응 조건 등 여러 요소에 의해 결정되지만, 그중에서도 전기화학 반응의 속도와 선택도에 직접적인 영향을 미치는 전기화학촉매의 촉매활성도가 가장 핵심적인 인자라 할 수 있다. 즉, 특정 전기화학 반응의 열역학적 에너지 장벽을 촉매가 얼마나 효과적으로 낮출 수 있는지가 시스템 전체의 에너지 효율과 직결된다. 이에 따라 최근 전기화학 공정을 기반으로 한 에너지 및 환경 응용 분야 전반에서 높은 활성도와 동시에 경제성을 갖춘 촉매 소재를 발굴·설계하려는 연구가 더욱 중요하게 대두되고 있다.

단일원자촉매(single atom catalyst, SAC)는 원자 1개 수준의 활성종이 고체 지지체 상에 고르게 분산·고정되어 특정 화학반응을 촉진하는 촉매 시스템을 의미한다 [2]. 실제 반응은 원자 단위로 존재하는 촉매 활성점에서 일어나며, 이때 고체 지지체는 활성 원자를 강하게 고정함과 동시에 전하 이동 경로를 제공하는 역할을 수행한다. 따라서 단일원자촉매 시스템을 설계할 때에는 (1) 단일원자 자체의 본질적인 촉매 활성, (2) 단일원자와 지지체 사이의 결합 강도 및 안정성, (3) 지지체의 전기전도도와 구조적 특성 등을 종합적으로 고려하는 것이 중요하다. 지금까지 벌크 형태의 소재 대비 반응면적을 크게 넓힐 수 있는 나노입자 형태의 전기화학 촉매에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다. 그러나, 나노입자 형태의 촉매소재 역시 나노입자 내부에 존재하는 원자는 촉매 반응에 참여하지 못하고, 표면에서 반응물과 직접 접촉이 가능한 원자만 촉매반응에 참여할 수 있다는 근원적 한계가 존재한다. 모든 원자가 촉매 반응에 참여 가능한 단일원자촉매는 기존에 널리 사용되던 나노입자 기반 전기화학 촉매소재의 활용원자수의 비율과 촉매 활성점의 노출 한계를 극복하면서, 우수한 활성도와 원자 활용 효율을 달성할 수 있는 차세대 촉매 플랫폼으로 주목받고 있다. 이러한 이점 덕분에 수전해를 통한 수소 생산, 2차전지 전극 반응, 탈염소 반응, 바이러스 센서, 환경 정화 등 다양한 전기화학 및 환경 관련 분야에서 단일원자촉매를 활용한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다 [3-7]. 본 Special Theme

에서는 단일원자촉매의 성능을 좌우하는 핵심 설계 인자와 지지체의 일반적인 특성을 정리하고, 단일원자촉매가 적용되고 있는 다양한 응용 사례와 최신 연구 동향을 정리함으로써 향후 단일원자촉매 기반 전기화학 시스템의 발전 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 금속 단일원자 전기화학 촉매 및 응용

### 2.1 단일원자촉매 소재

전기화학촉매의 성능을 극대화하기 위한 대표적인 설계 전략 중 하나는 촉매를 나노입자 형태로 미세화하는 것이다. 전기화학 반응은 본질적으로 촉매 표면에서 촉매 활성점과 반응물 사이의 전자 교환을 통해 진행되는 표면 반응이므로, 실제로 촉매를 구성하는 원자 중 반응에 직접 관여하는 원자는 입자 표면에 노출된 원자들이다. 반면, 나노입자 내부에 위치하여 전해질 및 반응물과 접촉하지 못하는 원자들은 촉매 반응에 기여하지 못한다. 이러한 점을 고려하면, 단위 부피(또는 질량)당 표면적을 최대화하여 반응이 가능한 활성점의 비율을 높이는 ‘촉매의 나노화’ 전략은 전기화학 반응의 전체 효율을 향상시키는 데 매우 효과적인 접근법이라 할 수 있다. 더 나아가, 나노입자 촉매는 합성 조건(온도, 전구체 농도, 환원 분위기 등)을 정밀하게 조절함으로써 특정 결정면을 우세하게 갖는 형태로 합성이 가능하다.

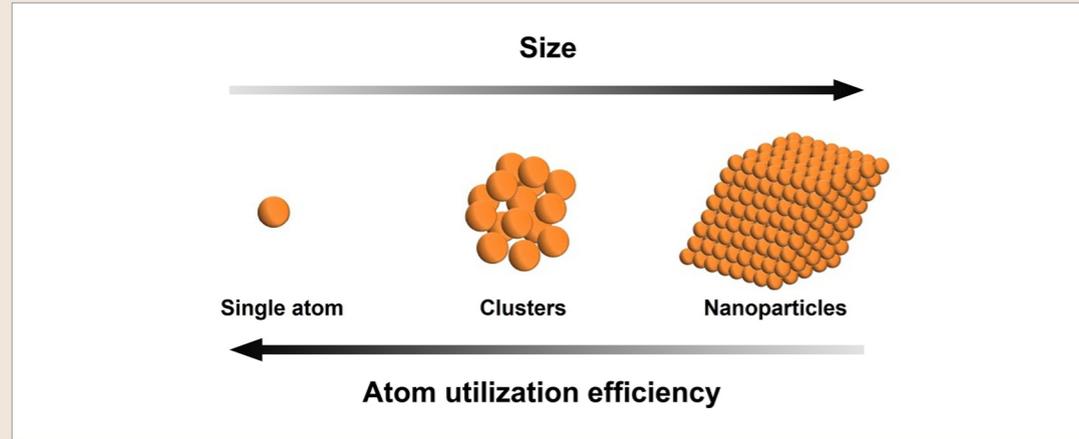


그림 1 ▶ 단원자, 클러스터, 나노입자 형태의 촉매 소재 모식도.

이를 통해, 전기화학 반응에 대해 상대적으로 높은 활성과 선택도를 가지는 결정면을 선택적으로 노출시키는 결정면 공학(crystal facet engineering)이 가능해지며, 이는 촉매 활성 및 안정성 향상을 도모하는 중요한 소재 설계 전략으로 활용되고 있다.

한편, 수백에서 수천 개의 금속 원자가 결합한 군집 구조로 이루어진 나노입자 촉매와 달리, 단일원자촉매는 명칭 그대로 개별 원자 하나가 촉매 활성점으로 작용하는 시스템을 의미한다(그림 1). 이러한 단일원자는 지지체 표면 위에 서로 응집되지 않고 분리된 상태로 분산되어 존재하며, 각 원자 하나하나가 독립적인 촉매 활성점으로 기능한다. 그 결과, 단일원자촉매는 동일 질량 기준으로 고려했을 때 이론적으로 가능한 표면 노출 원자 비율을 극대화할 수 있는 형태로, 나노입자 촉매와 같이 반응에 기여할 수 없는 '내부 원자'가 존재하지 않는다. 따라서 단일원자촉매는 이상적인 경우 100%에 가까운 원자이용률(atom utilization

efficiency)에 도달할 수 있는 궁극적인 촉매 플랫폼으로 간주된다. 이와 같이 최대한의 원자 이용률을 제공하는 단일원자촉매 합성 기술이 충분한 안정성과 재현성을 갖추어 구현된다면, 소량의 촉매로도 우수한 전기화학 성능을 확보할 수 있기 때문에 현재 고비용으로 인해 매우 제한적으로 활용되고 있는 백금(Pt)과 같은 귀금속 전기화학 촉매의 활용성 역시 넓힐 수 있다. 이는 귀금속 기반 촉매 시스템의 경제성을 크게 향상시켜, 연료전지, 수전해, 이차전지 등 다양한 전기화학 에너지 변환·저장 장치에 대한 실용화 범위를 획기적으로 확장시키는 데 기여할 것으로 기대된다.

## 2.2 단일원자촉매의 활성도 영향 인자

단일원자촉매의 촉매 활성은 (i) 전이금속 단일원자 고유의 전자·촉매 특성과 (ii) 해당 원자를 둘러싼 국소 화학 환경(local coordination environment)에 의해 복합적으로 결정된다. 그림 2는 대표적인 예로, 동일 중심 금속종이

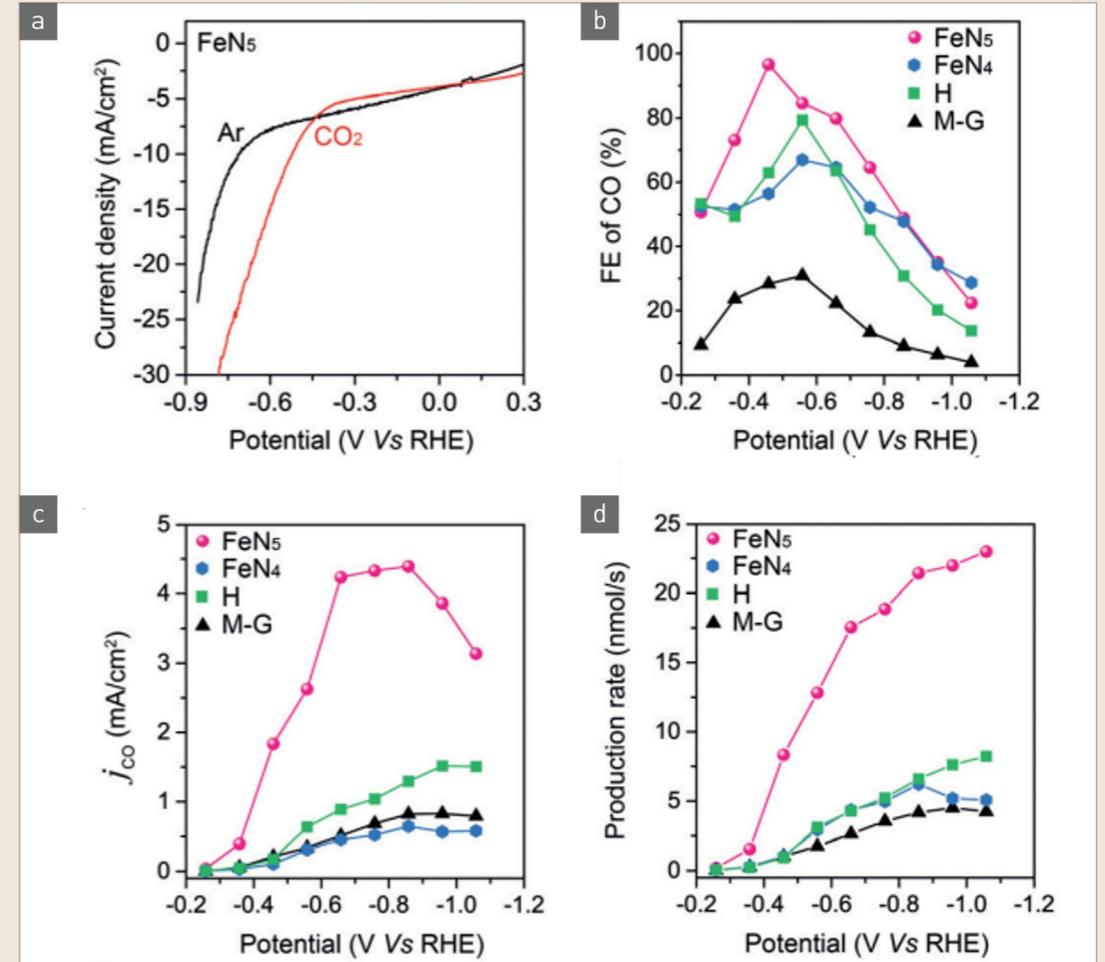


그림 2 ▶ Fe-N<sub>4</sub>와 Fe-N<sub>5</sub> 단일원자 촉매의 이산화탄소 환원 반응 촉매 활성도 [8].

지만 서로 다른 배위 구조를 갖는 Fe-N<sub>4</sub> 및 Fe-N<sub>5</sub> 단일원자촉매의 이산화탄소 환원반응(CO<sub>2</sub> reduction reaction, CO<sub>2</sub> RR) 성능을 비교한 결과를 제시한다 [8]. Fe-N<sub>5</sub> 구조를 갖는 단일원자촉매는 일산화탄소(CO)에 대해 약 97%에 달하는 매우 높은 생성 선택도를 보여주는 반면, Fe-N<sub>4</sub> 구조의 CO 생성률은 이에 비해 현저히 낮은 값을 나타낸다. 이러한 차이는 동일한 Fe 단일원자라 할지라도 N<sub>4</sub> 배위구조와 N<sub>5</sub> 배위구조를 형성할 때 상이한 전자 구조를 갖게

되며, 그 결과 CO의 흡착·탈착 거동이 달라지기 때문이다. 구체적으로, Fe-N<sub>5</sub> 활성점은 생성된 CO 분자를 촉매 표면으로부터 비교적 용이하게 탈착시키는 반면, Fe-N<sub>4</sub> 활성점은 전자 구조 특성상 CO의 탈착보다 강한 흡착을 선호하여, 생성된 CO가 표면에 머무르며 추가적인 전기화학 환원 반응을 겪게 되고, 결과적으로 CO의 생성률이 크게 감소하게 된다.

그림 3은 동일한 N<sub>4</sub> 배위 구조 내 중심 금속 이온을 Fe, Co, Ni로 치환한 Fe-N<sub>4</sub>, Co-N<sub>4</sub>,

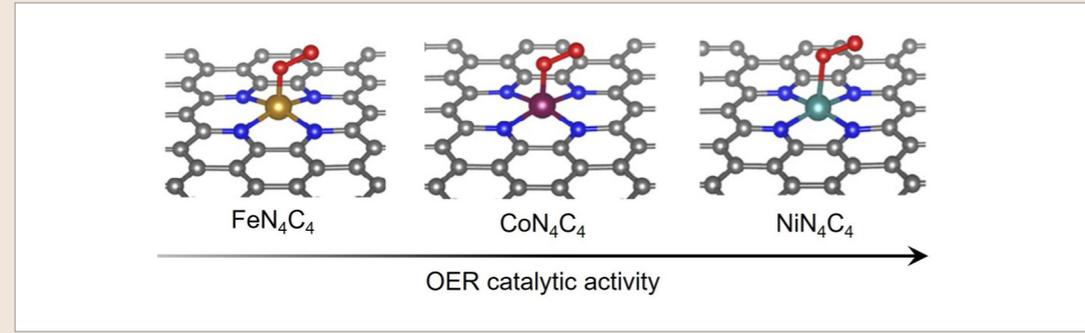


그림 3 ▶ 전이금속 중심원자의 종류에 따른 촉매 활성도의 변화 [9].

Ni-N<sub>4</sub> 단일원자촉매의 산소발생반응(oxygen evolution reaction, OER) 활성 비교 결과를 나타낸다 [9]. 일반적으로 전이금속 단일원자가 N<sub>4</sub> 배위자와 결합을 통해 고정(anchoring)된 금속-N<sub>4</sub> 구조는, 지지체 표면에 배위되지 않은, 즉 ‘고립된’ Fe, Co, Ni 단일원자에 비해 현저히 향상된 OER 성능을 보인다. 이는 N<sub>4</sub> 배위 환경이 중심 전이금속의 전자 구조를 조정하여 OER에 유리한 촉매 활성점을 형성하기 때문이다. 동시에, 동일한 N<sub>4</sub> 배위 구조를 공유함에도 불구하고 중심 전이금속의 종류(Fe, Co, Ni)에 따라 OER 활성에 유의미한 차이가 나타난다는 점은, 단일원자 주변의 배위 환경뿐 아니라 전이금속 자체의 전자 구조 역시 촉매 성능을 좌우하는 핵심 인자임을 잘 보여준다.

그림 4는 Co 단일원자가 N<sub>4</sub> 배위 환경에 놓여 있다는 점에서는 동일하지만, 질소 배위자의 결합 형태가 서로 다른 두 종류의 단일원자촉매, 즉 pyridine-type Co-N<sub>4</sub> 구조(Co-N SAC<sub>Mm</sub>)와 pyrrole-type Co-N<sub>4</sub> 구조(Co-N SAC<sub>Dp</sub>)의 산소환원반응(oxygen reduction reaction, ORR) 특성을 비교한 결과를 제시한다 [10].

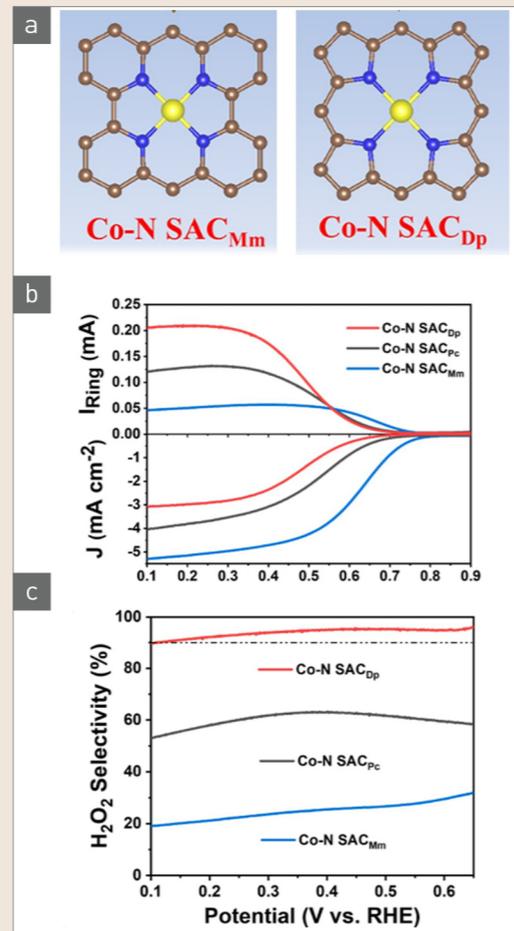


그림 4 ▶ Pyridine-type Co-N<sub>4</sub> 구조와 pyrrole-type Co-N<sub>4</sub> 구조의 산소환원반응 촉매활성도. (a) Co-N SAC<sub>Mm</sub>와 Co-N SAC<sub>Dp</sub>의 화학 구조. (b) 산소환원반응에 대한 전기화학 특성 분석 결과. (c) 전위에 따른 과산화수소 생성물 변화 [10].

두 촉매 모두 Co-N<sub>4</sub> 배위를 갖지만, 질소가 형성하는 화학 결합의 유형과 고분자/탄소 골격 내 위치가 상이하기 때문에 전자 구조 및 반응 경로가 뚜렷하게 달라진다. Pyridine-type Co-N<sub>4</sub> 활성점은 주로 4전자 ORR 경로를 선호하여 산소(O<sub>2</sub>)를 물(H<sub>2</sub>O)로 환원시키는 반면, pyrrole-type Co-N<sub>4</sub> 활성점은 2전자 ORR 경로를 선호하기 때문에 O<sub>2</sub>를 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)로 부분 환원시키는 촉매반응 거동을 보인다. 이로부터, 동일한 금속-질소 배위 수(Co-N<sub>4</sub>)를 가지더라도 배위자의 결합 모티프와 국소 구조가 반응 경로 선택성(4전자 ORR 경로 vs. 2전자 ORR 경로)을 결정짓는 중요한 요인임을 알 수 있다.

이상의 사례들에서 볼 수 있듯이, 단일원자촉매의 활성 및 반응 선택성은 (1) 중심 전이금속의 종류와 (2) 금속 주변을 둘러싼 배위 원자 수, 배위자 종류, 결합 모티프 등의 국소 화학 환경에 강하게 의존한다. 따라서 원자 수준에서 금속-비금속 배위 구조와 전자 구조를 정밀하게 제어할 수 있는 합성 및 도핑 기술이 뒷받침된다면, 특정 전기화학 반응(예: CO<sub>2</sub>RR, OER, ORR)과 목표 생성물(CO, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 등)에 최적화된 다양한 단일원자촉매를 설계·개발하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

### 2.3 단일원자촉매의 지지체

단일원자촉매의 촉매 활성은 중심 금속 원자 자체의 특성뿐만 아니라 그 주변을 둘러싼 국소 화학 환경에 의해 크게 좌우되므로, 단일원자촉매를 지지하는 지지체의 선택과 지지체

상에서의 고정(anchoring) 전략은 성능 향상을 위한 핵심 설계 요소라 할 수 있다 [11]. 이에 따라 지지체를 설계·선정할 때에는 다음과 같은 사항을 우선적으로 고려할 필요가 있다.

첫째, 단일원자촉매의 지지체는 가능한 한 높은 비표면적을 가져야 한다. 단일원자촉매 개념의 주요 장점은 단위 부피(또는 질량)당 촉매의 표면적을 극대화하여 원자이용률을 최대한 끌어올리는 데 있으며, 비표면적이 큰 지지체를 도입할 경우 동일한 질량의 금속 원자 촉매 활성점을 더 쉽게 분산·노출시킬 수 있다. 이는 곧 단일원자촉매의 이점을 가장 효과적으로 구현 가능하게 하며, 전기화학 반응의 전반적인 촉매 활성과 효율을 크게 개선할 수 있다.

둘째, 단일원자촉매의 지지체는 우수한 전기전도도를 확보해야 한다. 전기화학 촉매는 지지체를 통해 전달되는 전자와 반응물 간의 전하 이동 과정(charge transfer)의 에너지 장벽을 낮춤으로써, 전기에너지와 화학에너지 간 변환 효율을 향상시킨다. 따라서 전자의 신속한 전달을 가능하게 하는 지지체의 우수한 전기전도성 확보는 전기화학 시스템의 과전압(overpotential) 최소화, 전류 밀도 향상, 에너지 효율 증대 등에 직결되는 매우 중요한 핵심인자이다.

셋째, 지지체는 단일원자촉매를 열역학적으로 안정한 형태로 강하게 고정할 수 있어야 한다. 독립적으로 분산된 단일 금속 원자는 일반적으로 높은 표면 에너지와 화학 반응성을 가지므로, 주변 종과의 화학 결합 형성이나

금속 간 응집(agglomeration)을 통해 보다 안정한 상태로 전이하려는 경향이 크다. 이러한 응집 현상은 단일 활성점의 소실, 나노입자 형성에 따른 원자이용률 저하, 촉매 활성 감소로 이어지기 때문에, 적절한 배위자 도입, 결합 사이트 활용, 헤테로원자 도핑 등과 같은 전략을 통해 단일원자를 지지체 상에 강하게 고정하는 설계가 필수적이다. 이는 단일원자촉매의 구조적·화학적 안정성을 보장하고, 장기 구동 시 촉매 수명과 신뢰성을 확보하는 데 있어 결정적인 역할을 한다.

## 2.4 고엔트로피 단일원자촉매

고엔트로피 단일원자 촉매(high-entropy single-atom catalysts, HESACs)에 대한 연구는 최근 촉매 분야의 주요 연구 흐름으로 부상하고 있다. 고엔트로피 단일원자 촉매(그림 5)는 고엔트로피 합금 개념과 단일원자 촉매 개념을 융합한 최첨단 촉매 물질군이다. HESACs에서는 일반적으로 다섯 가지 종류 이상의 서로 다른 금속 원소들이 공통 지지체 상에 고르게 분산된 고립된 단일 원자 상태로 존재한다.

이러한 다원계 단일 원자 구조는 서로 다른 금속 종 간의 독특한 시너지 상호작용을 통해 우수한 촉매 성능을 발현할 수 있다. 통상적으로 한두 가지 금속 성분만을 포함하는 기존의 단일원자 촉매(single atom catalysts, SACs)와 비교할 때, HESACs는 (예: Co, Fe, Ni, Mn, Cu 등) 훨씬 더 높은 조성 복잡성을 특징으로 한다. 특히, 계의 큰 배열(구성) 엔트로피가 단일 원자 분산 상태를 열역학적으로 안정화함으로써, 가혹한 반응 조건하에서도 나노입자로의 응집, 클러스터 형성, 소결(sintering)을 효과적으로 억제하는 데 기여한다. 더 나아가, 다양한 금속 원자의 공존은 독특한 전자적 미세환경을 형성한다. 서로 다른 원자 종이 근접하여 존재함으로써 복잡한 전자 구조가 조성되며, 이는 국소 전자 구조(예: d-밴드 중심)의 정밀 조절을 가능하게 한다. 이러한 전자 구조의 가변성은 주요 반응 중간체의 흡착 세기를 최적화하여 촉매 활성 및 선택도를 향상시키는 데 유리하게 작용한다.

Zeng 그룹은 Au 단일원자 기반의 AuSA-MnFeCoNiCu 물분해 촉매 소재를 보고하

였다 [12]. 이 촉매는 흡착종 진화 메커니즘(adsorbate evolution mechanism, AEM)에서 격자 산소 매개 메커니즘(lattice oxygen-mediated mechanism, LOM)으로의 반응 경로 전환을 유도한다. 또한, 고엔트로피 매트릭스, Au 단일원자, 그리고 산소 결합 간의 시너지 상호작용이 O 2p 대역 중심(O 2p-band center)의 뚜렷한 상향 이동을 유도함으로써, LOM 경로의 동역학적 에너지 장벽이 감소시킬 수 있다는 것을 밝혀냈다. 그 결과, 전류 밀도 10 mA cm<sup>-2</sup>에서 213 mV라는 매우 낮은 과전압을 달성하였고, 약 100 mA cm<sup>-2</sup>의 전류 밀도에서 700시간 작동 후 활성 감소가 6.4%에 불과한 탁월한 안정성을 보여주었다. Luo 연구그룹은 MoS<sub>2</sub> 및 MoSe<sub>2</sub> 기판 위에 다원계 단일원자 및 고엔트로피 단일원자 촉매를 합성하기 위한 기판-매개 합성 전략을 보고하였다 [13]. 전이금속 칼코젠화합물(transition-metal dichalcogenide, TMD)과 금속 이온 간의 가역적 산화·환원반응을 활용하여 가역적이면서 제어 가능한 금속 단일원자 촉매소재 합성 원리를 제시하였다. 특히, Mo 기반 TMD를 구성하는 모든 Mo 원자가 촉매 역할을 하는 단일원자 금속 종으로 치환될 때까지 단일원자촉매의 담지량을 지속적으로 증가시킬 수 있다고 설명하고 있으며, 이를 통해 기존 SAC 시스템과 비교해 이례적으로 높은 원자 밀도를 구현하였다. He 연구그룹은 고엔트로피 합금(high-entropy alloy, HEA) 골격 내에 단일원자 프로모터를 도입하는 신규 설계 전략

을 제시하였으며, Mo 단일원자로 정밀 조율된 PdPtNiCuZn 초박막 나노시트를 소개하였다 [14]. HEA 호스트의 조성 복잡성과, 초박막 나노시트 구조로부터 발생하는 인장력(tensile strain)을 활용하여 약한 Pt-Pt 집합체(dilute Pt-Pt ensembles)을 생성하였다. 메탄올 산화 반응(methanol oxidation reaction, MOR)을 위한 전기화학촉매로서 질량 기준 활성(mass activity) 24.55 A mgPt<sup>-1</sup> and 11.62 A mg(Pd+Pt)<sup>-1</sup> 에 이르는 매우 높은 촉매활성도를 달성함과 동시에, 기존 Pt 기반 기준 촉매를 상회하는 우수한 장기 내구성을 확보하였다.

## 2.5 단일원자 전기화학 촉매의 응용

### 2.5.1 수소발생반응

수소발생반응(hydrogen evolution reaction, HER)은 물의 전기분해를 통해 청정 에너지 원인 수소를 생산하는 핵심 반응이다. 백금(Pt)은 가장 이상적인 수소 흡착 에너지를 가져 HER 촉매의 벤치마크로 여겨져 왔으나, 높은 가격과 희소성이 상용화의 걸림돌이었다. 이를 해결하기 위해 Pt 사용량을 극단적으로 줄인 Pt 단일원자촉매(Pt SAC)가 제안되었으나, 초기 연구들에서는 Pt 단일원자가 수소와 너무 강하게 결합하거나 반응 중 응집되는 등의 문제가 제기되기도 했다. 최근에 Pt의 단점을 극복하기 위해 전기화학 물 분해에 큰 잠재력을 가지는 탄소 기반 단일원자촉매가 개발되었다. Li 그룹은 Pt 원자 촉매를 두 개의 풀러렌 분자 사이에 가교된 형태로 결합된

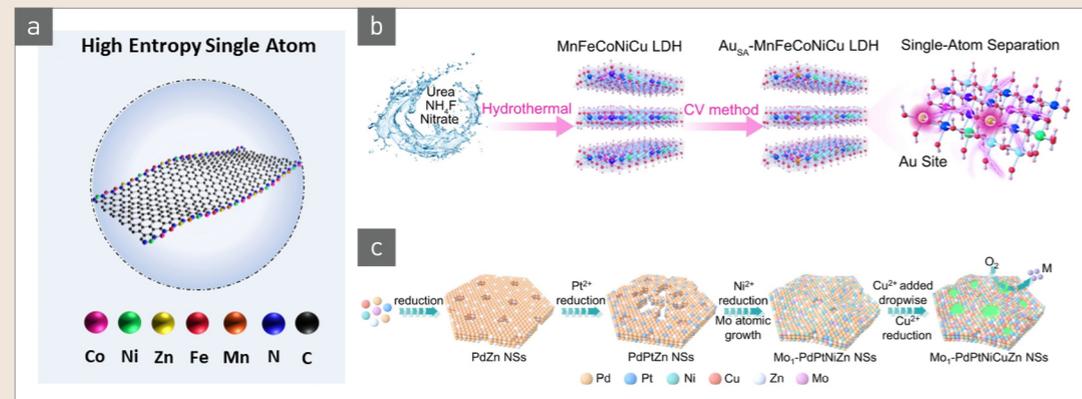


그림 5 ▶ 고엔트로피 단일원자 촉매와 고엔트로피 단일원자 촉매의 합성법 [12-14].

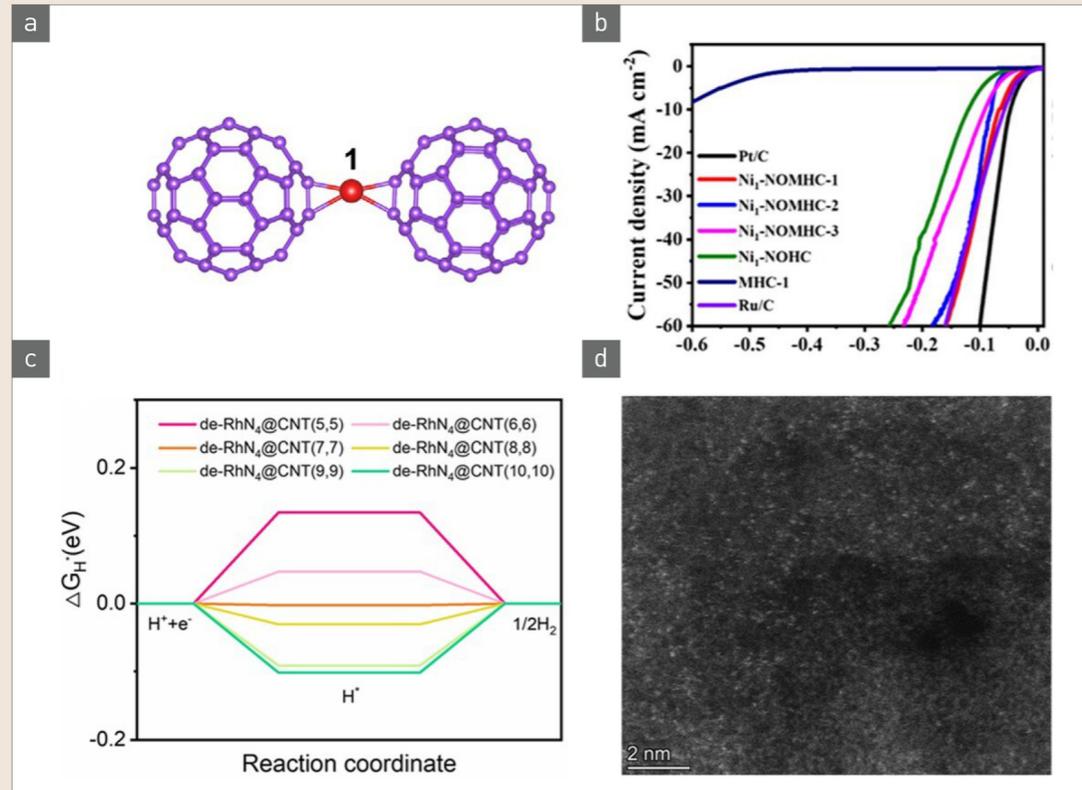


그림 6 ▶ 단일원자 기반 HER 전기화학 촉매 소재. (a) 풀러렌 기반 Pt 단일원자촉매 [15]. (b) 메조포어 탄소 기반 니켈 단일원자 촉매소재의 전기화학 성능 평가 [16]. (c) CNT 기반 니켈 단일원자촉매소재의 흡수 자유 에너지 계산값 [17]. (d) 질소 도핑된 그래핀에 고정된 Fe, Co, Ni 단일원자촉매소재의 STEM 분석 [18].

Pt-C<sub>60</sub> 고분자 네트워크 구조를 형성하여 높은 HER 촉매 활성을 보이는 연구 결과를 보고하였다 (그림 6a) [15]. 1M KOH 알칼리 전해질에서 10 mA cm<sup>-2</sup>에서 25 mV의 낮은 초과 전위를 나타내었으며, 이는 상용 20 wt% Pt/C의 HER 성능과 동등 혹은 우수한 수준이다. Kim 연구그룹은 이중 템플릿 전략을 사용하여 질소와 산소가 함께 도핑된 초박형 메조포어 중공 탄소(mesoporous hollow carbon, MHC)를 합성하고, 여기에 단일 Ni 원자를 고정하는 단일원자촉매를 보고하였다. 해당 촉매는 Ni 원자가 2개의 질소와 2개의 산소 원자와 결합된

형태로 비대칭 배위 구조 형태로 알칼리 조건에서 10 mA cm<sup>-2</sup>에서 68 mV의 과전압을 나타내며, 50 mV 초과 전위에서도 5 A mg<sup>-1</sup>의 높은 질량 활성을 보였다 (그림 6b) [16]. Su 연구그룹은 CNT를 활용하여 격자 불일치와 변형을 유발하여 Ru 원자 종의 전자 상태를 제어하는 연구 결과를 보고하였다. 질소 도핑된 탄소 지지체에 Ru 고정을 하면서, 해당 지지체의 곡률 반경을 조절함으로써 Ru 단일 원자와 소수의 원자 클러스터가 공존하여 전자적 상호 작용 제어가 가능함을 보였다. 해당 촉매는 1M KOH에서 10 mA cm<sup>-2</sup>에서 29 mV의 매우 낮은 초과

전위를 나타냈으며, 이는 상용 20 wt% Pt/C의 HER 성능을 능가하는 수준이다 (그림 6c) [17]. Gu 연구그룹은 질소가 도핑된 그래핀 산화물에 Fe, Co, Ni 세 가지 전이금속을 단일원자 형태로 고정하는 연구 결과를 보고하였다. 이는 각 금속 원자가 서로 인접하여 전자적 커플링을 일으키며, 해당 금속의 담지량은 6.78 wt% 높은 담지량을 보이고 있다. 알칼리 전해질에서 해당 촉매는 10 mA cm<sup>-2</sup>에서 77 mV의 초과 전위를 보이며, 물 분해 시스템에서 1.68 V의 낮은 셀 전압을 나타내었다 (그림 6d) [18].

### 2.5.2 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 환원 반응

이산화탄소 환원 반응(CO<sub>2</sub>RR)은 온실가스인 CO<sub>2</sub>를 고부가가치 화합물로 전환하는 기술이다. 이 분야의 난제는 반응 경로가 복잡하여 생성물의 선택도(selectivity)를 제어하기 어렵고, 경쟁 반응인 수소 발생을 억제해야 한다는 점이다. 최근에는 이러한 높은 촉매활성도와 함께 높은 전류밀도를 달성하는 것에 대한 개발이 중요해지고 있다. 그래핀 기반의 단일원자촉매가 수용액 상에서 매우 효과적인 CO<sub>2</sub>RR 촉매활성도를 가진다는 연구 결과가 보고된 바 있다.

Shao 연구그룹은 중공 탄소 나노구체(HCNs)에 니켈 원자를 고정하고, 표면을 소수성으로 제어하여 전해질이 기공을 막아 가스 공급이 차단되는 현상을 억제하는 결과를 보고하였다. 유동 셀(Flow cell) 시스템에서 577 mA cm<sup>-2</sup>라는 높은 전류밀도에서도 96%의 CO 패러데이 효율을 보이며, -1.17 V (vs. RHE)의 전위에서

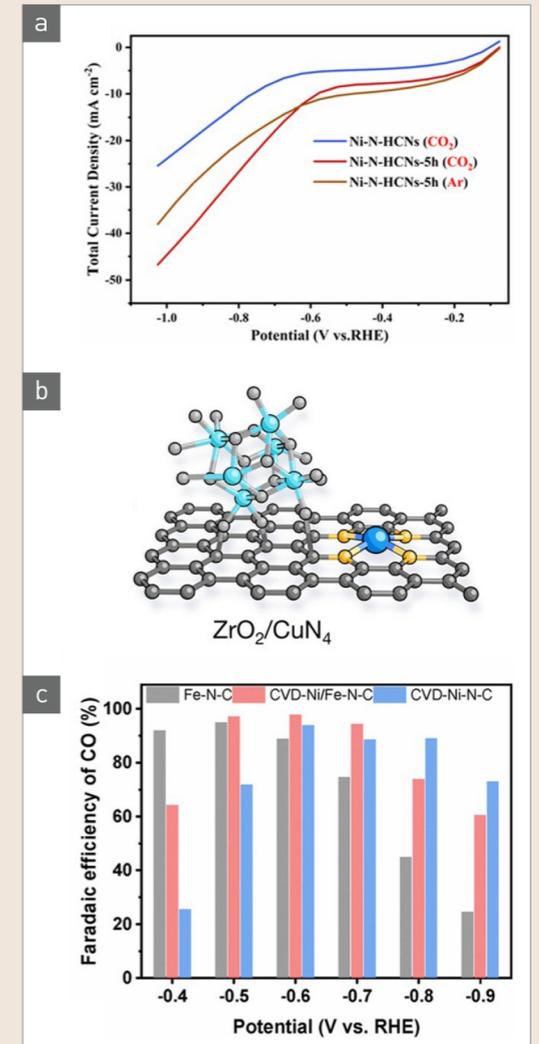


그림 7 ▶ (a) 중공 탄소 나노구체에 니켈 원자가 고정된 촉매의 LSV 곡선 [19]. (b) 자가 치유 메커니즘을 가진 Cu 단일원자 촉매의 구조도 [20]. (c) 고밀도 Fe-Ni 구조의 높은 CO 전환 효율 [21].

해당 성능을 달성하여 산업 적용 가능성을 보였다 (그림 7a) [19]. Wu 그룹은 산화지르코늄 클러스터를 도입하여, 촉매 반응 중 Cu-N<sub>4</sub>의 구리 원자와 질소 원자간의 결합이 끊어지면, 산화지르코늄의 산소 원자와 결합하여 Cu-N<sub>1</sub>O<sub>2</sub> 하이브리드 구조로 재구성되는 결과를 보고

하였다 (그림 7b) [20]. 이를 통하여 -500 mA cm<sup>-2</sup>의 고전류 밀도에서 87%의 높은 메탄 생성 패러데이 효율을 달성하였으며, 25시간 반응 후에도 성능 저하가 미미한 자가 치유 원리 기반 안정성 확보 기술을 함께 보고하였다. Wu 그룹은 화학 기상 증착법을 이용하여 Fe가 미리 도핑된 ZIF-8 전구체에 Ni를 추가로 도입하여 4.8 wt%의 고밀도 Fe-Ni 혼합 구조를 보고하였다. 이 촉매는 중성 전해질에서 700 mA cm<sup>-2</sup>의 전류 밀도에서 96%의 CO 생산에 대한 효율을 달성하였으며, 수소 발생이 우세한 산성 조건에서도 600 mA cm<sup>-2</sup>에서 95% 효율을 유지하였다 (그림 7c) [21].

### 2.5.3 암모니아 생성 반응

NH<sub>3</sub>는 화학 산업과 농업에서 활용도가 높은 화학물질로서, 현재 Haber-Bosch 방법을 이용하여 합성되고 있다. Haber-Bosch 방법을 통한 NH<sub>3</sub>의 합성은 글로벌 에너지의 약 2%를 소모하며 많은 양의 탄소를 배출하고 있어, 최근

친환경적인 암모니아 생산을 위한 새로운 방법의 필요성이 매우 커지고 있다. NH<sub>3</sub>의 전기 화학 합성 기술 개발은 전 세계 탄소 배출저감을 위한 매우 중요한 연구 분야이다. NH<sub>3</sub> 생성 반응의 반응물인 N<sub>2</sub>는 자연에 풍부하지만 N<sub>2</sub>의 강한 N≡N 삼중 결합 (941 kJ mol<sup>-1</sup>)으로 인해 전기화학적 NH<sub>3</sub> 합성 효율은 매우 낮은 것이 큰 단점이다. 이를 극복하기 위해 단일원자 형태의 질소환원반응(nitrogen reduction reaction, NRR) 촉매 개발이 최근 많은 연구 그룹들에 의해서 진행되고 있으며, 괄목할 만한 성과를 보고하고 있다.

Kwon 그룹은 붕소와 질소가 함께 배워된 구조를 통해 Mn의 스핀 상태를 제어하고 질소 활성화를 촉진하는 형태를 보고하였다. 일반적인 Mn-N<sub>4</sub> 구조는 NRR 활성이 낮으나, 붕소와 질소를 도핑된 탄소에 Mn 원자를 고정하여 Mn-B<sub>2</sub>N<sub>2</sub> 배위 구조를 제작하였다. 수용액 시스템에서 37.15%의 높은 암모니아 패러데이 효율을 달성하였으며, 기상 시스템에서는

45.66%의 패러데이 효율과 87.54 μg mg<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>의 암모니아 생성률을 달성하였다. DFT 이론 연구를 통해 Mn-B<sub>2</sub>N<sub>2</sub> 구조가 Mn의 스핀 상태를 최적화하여 에너지 장벽을 낮추면서 경쟁 반응인 HER을 억제할 수 있다는 것을 밝혀냈으며, 이는 NRR 촉매 분야의 난제인 반응선택성 문제 해결에 새로운 방향을 제시한다 [22].

## 3. 맺음말

단일원자촉매 시스템은 지지체 상에 담지된 모든 금속 원자를 촉매 활성점으로 활용할 수 있기 때문에 기존 나노입자 촉매의 낮은 원자 이용률과 활성점 노출 한계를 근본적으로 극복할 수 있는 차세대 전기화학 촉매 플랫폼이다. 중심 금속의 종류와 금속-비금속(예: M-N<sub>4</sub>, M-B<sub>2</sub>N<sub>2</sub>) 배위 구조, 그리고 이를 지지하는 고전도·고비표면적 지지체의 설계는 CO<sub>2</sub>RR, HER, ORR, OER, NRR 등 다양한 반응에서 활성과 선택도를 정밀하게 조율하는 핵심 인자로 작용한다. 최근에는 다원소 조합과 고엔트로피 개념을 도입해 단일원자의 분산 안정성과 전자 구조 조절 능력을 동시에 향상시키는 연구가 활발히 진행되고 있다. 응용 측면에서, 단일원자촉매 시스템은 HER에서 상용 Pt/C에 필적하거나 이를 능가하는 활성을 보이고, CO<sub>2</sub>RR 및 NRR에서도 높은 전류밀도와 우수한 생성물 선택성을 달성하며 실용화 가능성을 입증하고 있다. 그럼에도 스케일업 했을 때

고부하량에서의 구조 안정성, 장기 내구성, 대면적·대량 합성, 그리고 실제 전해 시스템과의 통합 등은 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있다. 향후 원자 수준 구조 제어 합성, operando 분석, 계산·데이터 기반 설계를 접목한 연구가 뒷받침된다면, 단일원자촉매는 탄소 중립 달성과 친환경 에너지·화학 공정 구현을 위한 핵심 기술로 자리매김할 것으로 기대된다. 단일원자촉매 시스템의 연구 역사가 길지 않고, 전 세계적으로 단일원자촉매의 한계 극복을 위한 연구가 전폭적으로 진행되고 있는 만큼 빠른 시일 내에 단일원자의 실용화 기술을 확보하길 바란다. 나아가 우리 후속세대와 인류의 지속가능한 번영을 위해서, 단일원자촉매 기술이 인류가 직면한 에너지, 환경, 기후 문제를 해결하는데 기여할 수 있기를 기대한다. 🌱

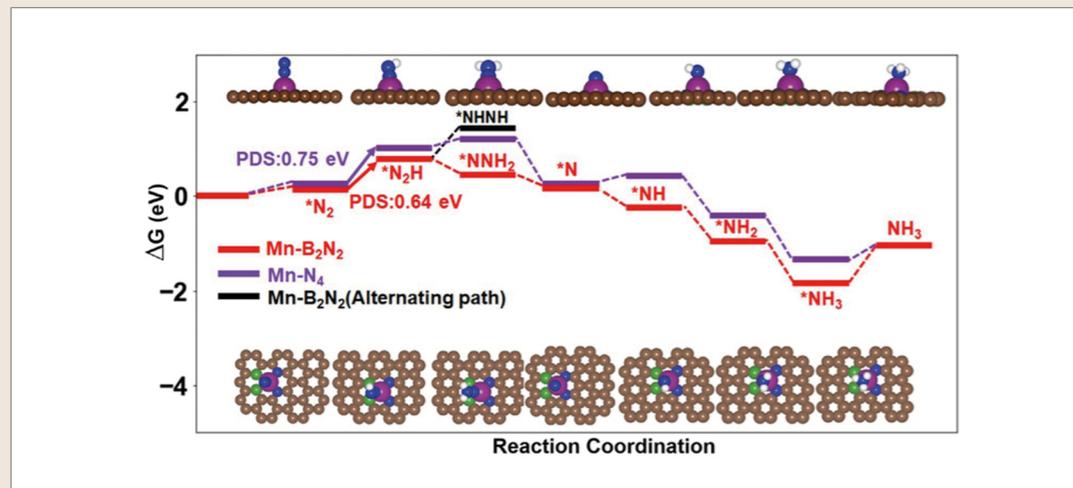


그림 8 ▶ 붕소와 질소가 함께 배워된 형태의 망간 촉매의 반응 경로 모식도 [22]

## 참/고/문/헌

- [1] D. A. R, *J. Solid State Electrochem.*, 15, 1579 (2011).
- [2] C. Zhu, S. Fu, Q. Shi, D. Du, and Y. Lin, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 56, 13944 (2017).
- [3] C. Rong, X. Shen, Y. Wang, L. Thomsen, T. Zhao, Y. Li, X. Lu, R. Amal, and C. Zhao, *Adv. Mater.*, 34, 2110103 (2022).
- [4] W. Zhou, Y. Tan, J. Ma, X. Wang, L. Yang, Z. Li, C. Liu, H. Wu, L. Sun, and W. Deng, *ACS Sens.*, 7, 3422 (2022).
- [5] J. Lim, J. W. Jung, N. Y. Kim, G. Y. Lee, H. J. Lee, Y. Lee, D. S. Choi, K. R. Yoon, Y. H. Kim, and I. D. Kim, *Energy Storage Mater.*, 32, 517 (2020).
- [6] J. Li, C. Zhang, Y. Li, Y. Pan, and Y. Liu, *ACS Catal.*, 13, 9633 (2023).
- [7] T. Cai, Z. Teng, Y. Wen, H. Zhang, S. Wang, X. Fu, L. Song, M. Li, J. Lv, and Q. Zeng, *J. Hazard. Mater.*, 440, 129772 (2022).
- [8] H. Zhang, J. Li, S. Xi, Y. Du, X. Hai, J. Wang, H. Xu, G. Wu, J. Zhang, and J. Lu, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 131, 15013 (2019).
- [9] I. H. Kim, J. Lim, and S. O. Kim, *Acc. Mater. Res.*, 2, 394 (2021).
- [10] S. Chen, T. Luo, X. Li, K. Chen, J. Fu, K. Liu, C. Cai, Q. Wang, H. Li, and Y. Chen, *J. Am. Chem. Soc.*, 144, 14505 (2022).
- [11] H. Xu, Y. Zhao, Q. Wang, G. He, and H. Chen, *Coord. Chem. Rev.*, 451, 214261 (2022).
- [12] F. Wang, P. Zou, Y. Zhang, W. Pan, Y. Li, L. Liang, C. Chen, and H. Liu, *Nat. Commun.*, 14, 6019 (2023).
- [13] Z. Luo, Y. Guo, C. He, Y. Guan, L. Zhang, Y. Li, Q. Zhang, C. He, X. Sun, and X. Ren, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 63, e202405017 (2024).
- [14] L. He, M. Li, L. Qiu, S. Geng, Y. Liu, F. Tian, M. Luo, H. Liu, Y. Yu, W. Yang, and S. Guo, *Nat. Commun.*, 15, 2290 (2024).
- [15] R. Zhang, Y. Li, X. Zhou, A. Yu, Q. Huang, T. Xu, L. Zhu, P. Peng, S. Song, L. Echegoyen, and F. F. Li, *Nat Commun.*, 14, 2460 (2023).
- [16] D. Kim, K. E. Ryou, G. Park, S. Jung, J. Park, M. Kim, J. Jang, M. Song, S. Kim, J. Kim, H. Lim, Y. Yamauchi, H. An, S. M. Bak, and J. Kim, *J. Am. Chem. Soc.*, 147, 16522 (2025).
- [17] W. Zhao, S. Shen, Y. Zhao, T. Wu, S. Ding, and Y. Su, *J. Mater. Chem. A*, 12, 16476 (2024).
- [18] Yang H, Zhu C, Zhang Y, and Gu M, *Catalysts*, 15, 1108 (2025).
- [19] Z. Liu, L. Cao, M. Wang, Y. Zhao, M. Hou, and Z. Shao, *J. Mater. Chem. A*, 12, 8331 (2024).
- [20] W. Shen, X. Gao, Q. Liu, P. Li, R. Huang, Y. Tan, Z. Wang, Y. Zhang, F. Zhao, X. Wang, S. Ji, X. Zheng, and Y. Wu, *Nat Commun.*, 16, 7943 (2025).
- [21] M. Qi, M. J. Zachman, Y. Li, Y. Zeng, S. Hwang, J. Liang, M. Lyons, Q. Zhao, Y. Mao, Y. Shao, Z. Feng, Z. Wang, Y. Zhao, and G. Wu, *Energy Environ. Sci.*, 18, 5643 (2025).
- [22] H. Choi, S. Sultan, M. Zafari, A. Yoon, H. Lee, M. Ha, B. Jeong, H. Ju, H. C. Yoon, K. S. Kim, Z. Lee, G. Lee, and Y. Kwon, *Small*, 21, e07387 (2025).

## 저/자/약/력



성명	동창욱	
학력	2023년 2025년 2025년 - 현재	경희대학교 정보디스플레이학과 (학사) 경희대학교 정보디스플레이학과 (석사) 경희대학교 정보디스플레이학과 (박사과정)



성명	Alfi Rodiansyah	
학력	2012년 - 2016년 2019년 - 2021년 2022년 - 현재	UIN SGD Bandung, Chemistry (학사) 경희대학교 정보디스플레이학과 (석사) 경희대학교 정보디스플레이학과 (박사과정)



성명	임준원	
학력	2008년 2011년 2016년	경희대학교 정보디스플레이학과 (학사) Ecole Polytechnique 응용물리 (석사) KAIST 신소재공학과 (박사)
경력	2018년 - 2019년 2020년 - 2020년 2020년 - 현재	LG화학 Battery연구소 책임연구원 KIST 기능성복합소재연구센터 선임연구원 경희대학교 정보디스플레이학과 조교수

E<sup>2</sup>M

Electrical & Electronic Materials

Vol. 39, No. 1

March 2026

34

기업 탐방 (주)브리오라

38

연구실 소개 전기화학 에너지 소재 연구실

44

VISIT

국제 학술대회 참관기 2025 환태평양 화학회 연합 국제 학술회의  
해외 연구 기관 탐방 파리 시떼 대학교

54

Column CMOS 이미지 센서(CIS) 기술의 혁신과 미래 전망

58

Rookie Interview 이금비 조교수(경북대학교 응용화학공학부)



# (주)브리오라 Briora

- ▶ 주소 경기도 고양시 일산동구 동국로 상영바이오관 413호
- ▶ Phone 031-961-5155
- ▶ E-mail lookup2@dongguk.edu
- ▶ 대표이사 김진식



(주)브리오라는 전기전자공학, 재료, 생명공학의 융합을 통해 차세대 바이오 센싱 플랫폼을 개척하는 기술 혁신 기업이자, 현대인의 삶의 질을 혁신적으로 개선하고자 노력하는 테크 기반 라이프케어 기업입니다. 본사는 생체 친화적 하이드로겔 소재를 기반으로, 바이오 물질 내 수용체 간의 결합 및 분리 현상을 전기적 임피던스(impedance spectroscopy) 기법으로 정밀 분석하는 독보적인 원천 기술을 보유하고 있습니다.

(주)브리오라는 기존의 정성적인 스트레스 측정에서 벗어나, '핸드헬드(hand-held) 타입의 초소형 임피던스 측정 시스템'을 통해 체액 내 호르몬 농도 변화에 따른 전기적 신호를 정밀하게 계측함으로써 객관적인 데이터를 제공하는 스트레스 측정 제품 개발에 매진하고 있습니다.

현재의 스트레스 호르몬 측정을 출발점으로 타액 내 다양한 호르몬과 바이오마커를 동시에 분석하는 다중 센싱 플랫폼을 구축하여, 개인 맞춤형 예방의학과 라이프케어 서비스를 실현하고 '밝은 기술'의 가치를 확산하겠습니다.

## 연혁

### 2026 기술 상용화 및 도약

- 2026. 03. 동국대학교 BMC 창업보육센터 입주
- 2026. 01. 동국대학교 지주회사 자회사 편입 (우수 기술력 기반 상용화 본격화)

### 2025 법인 설립 및 창업 생태계 진입

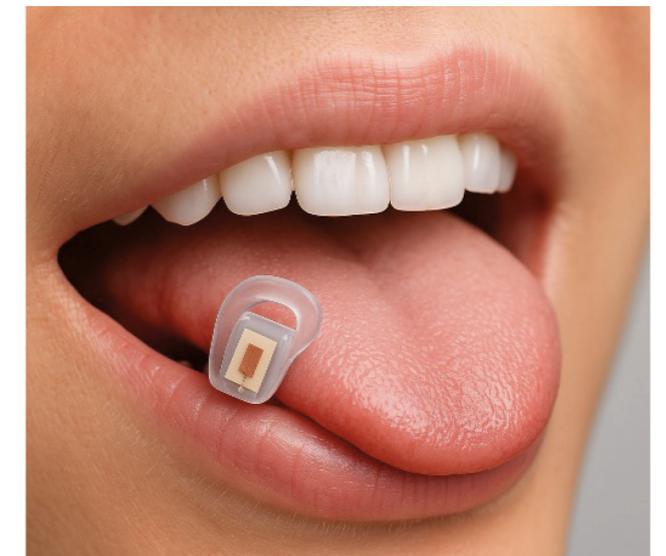
- 2025. 11. 19 (주)브리오라 법인 설립
- 2025. 06. 동국대학교 '혁신형 창업실험실 선도대학' 사업 내 창업실험실 선정

### 2021-2024 국가 전략 기술 개발 수행

- 2021. 05. 산업통상자원부 '나노소재 부품 기술 개발 사업' 과제 수행 시작
  - 과제명 : 근감소증 진단과 모니터링을 위한 나노 소재 기반 다중 바이오마커 측정용 유연/신축 센서 시스템
- 2021-2024 하이드로겔 센서의 정밀도 및 내구성 고도화 연구 진행

### 2019-2020 기술의 탄생 (R&D 기반 구축)

- 2019. 03. 하이드로겔 기반 센서 원천 기술 연구 착수 및 데이터 확보 시작

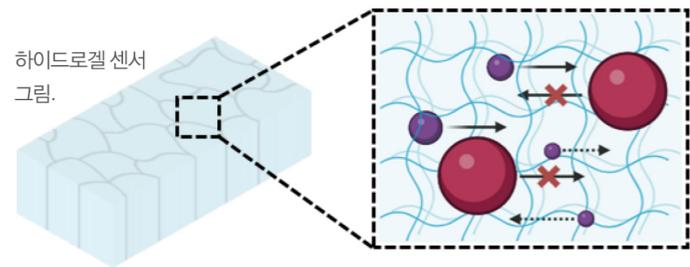


브리오라.

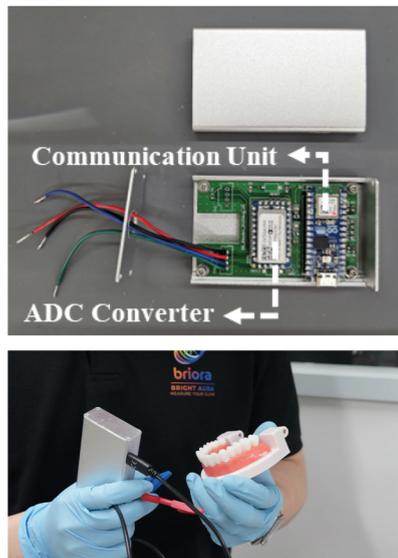
제품 소개

Pre-treatment free 하이드로겔 센서

(주)브리오라 솔루션의 핵심은 별도의 복잡한 정제 과정 없이 타액 내 바이오마커를 검출할 수 있는 ‘다공성 하이드로겔 센서 기술’입니다. 하이드로겔의 가교 밀도를 제어하여 적합한 mesh 구조를 구현함으로써, 체액 내 고분자 불순물을 효과적으로 배제하고 저분자 호르몬만을 선택적으로 투과합니다. 사용자는 치아나 구강 내에 얇은 하이드로겔 센서를 착용하는 것만으로 이물감 없이 자연스럽게 검체를 포집할 수 있으며, 구강 내에 전자 회로를 넣지 않고 바이오마커가 포획된 하이드로겔 센서를 외부 기기로 측정하는 방식을 채택함으로써 전자파 및 오작동 우려를 최소화하였습니다.



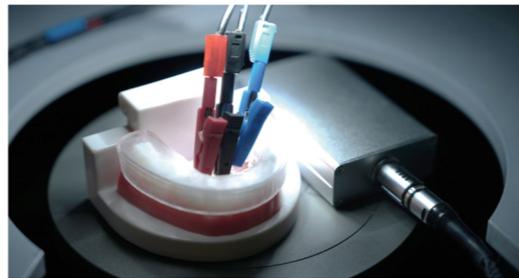
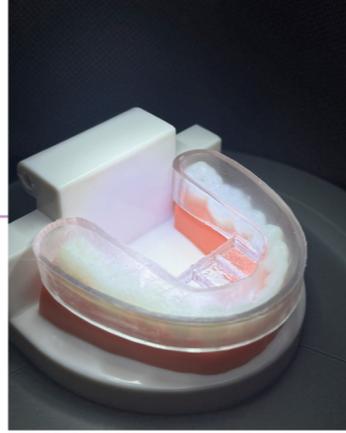
임피던스 측정 기기 내부 사진.



고정밀 소형 분석 하드웨어

함께 제공되는 핸드헬드 임피던스 분석 기기는 실험실 수준의 고가 장비를 손바닥 크기로 소형화한 혁신 제품입니다. 노이즈 저감 shielding 기술과 소형 아날로그 프론트 엔드 설계를 적용하여, 휴대용 기기임에도 불구하고 상용 고정밀 장비 대비 0.9 이상의 높은 상관계수를 확보했습니다. 이를 통해 언제 어디서나 연구 장비 수준의 정밀도로 개인의 스트레스 호르몬 수치를 모니터링할 수 있습니다.

(주)브리오라는 이 기술을 바탕으로 단순한 측정을 넘어, 뇌파 분석 기술과의 융합을 통해 정신적·신체적 스트레스를 통합 관리하는 ‘헬스케어 플랫폼’으로 확장해 나갈 계획입니다.



마우스피스 모듈 및 임피던스 측정 모듈.



부서 소개 / 직원 소개

(주)브리오라는 전체 구성원의 75%가 석·박사급 전문 연구 인력으로 이루어진 멘탈 헬스케어 R&D 기업입니다. 각 분야에서 깊이 있는 전문성을 쌓아온 연구진들이 모여, 기술을 통해 사람을 이롭게 한다는 하나의 목표를 향해 달리고 있습니다.

과도한 스트레스는 개인의 행복을 갉아먹을 뿐만 아니라, 사회 전체의 안전을 위협하는 요인이 되기도 합니다. (주)브리오라는 이러한 문제의식에서 출발했습니다. 우리는 언제 어디서나 쉽게 접근할 수 있는 스트레스 관리 솔루션(App & Device)을 통해 사람이 더 사람답게 살 수 있는 환경, 그리고 스트레스로 인한 불의의 사고가 없는 안전한 세상을 만들 고자 합니다. (주)브리오라는 당신의 일상을 지키고 사회의 안전망을 단단하게 만드는 따뜻한 기술을 전 세계에 전하겠습니다.

기타 회사 홍보

Briora – Where your bright aura begins  
당신의 밝은 기운이 시작되는 곳

브리오라(briora)는 ‘밝음(bright)’과 ‘기운·분위기(aura)’의 결합에서 출발한 이름으로, 스트레스 관리를 통해 개인이 지닌 고유의 밝은 분위기가 다시 드러나는 순간에 주목합니다. 스트레스를 효과적으로 관리하는 사람들은 공통적으로 안정된 에너지와 긍정적인 태도를 지니며, 이는 일상 전반에 자연스럽게 드러나는 ‘밝은 기운’으로 이어집니다.



(주)브리오라는 이러한 밝은 분위기가 단순한 성향이 아닌, 관리를 통해 빛낼 수 있다는 점에 주목합니다. (주)브리오라는 일상에 스며들어, 누구나 자신의 밝은 기운을 다시 시작할 수 있도록 돕는 헬스케어 솔루션을 만들어갑니다. 🌟

# 전기화학 에너지 소재 연구실

## Electrochemical Energy Materials Lab.

- ▶ 주소 경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732  
경희대학교 국제캠퍼스 공학관 362호
- ▶ homepage <https://sites.google.com/view/mjkims-lab>
- ▶ E-mail [mj.kim@khu.ac.kr](mailto:mj.kim@khu.ac.kr)
- ▶ 지도교수 김민중



경희대학교 신소재공학과 전기화학 에너지 소재 연구실은 지속 가능한 에너지 생산 및 활용을 위한 전기화학 기반의 전극 소재 개발을 목표로 한다. 특히 2050 탄소중립 달성의 핵심이 될 수소에너지 분야에 집중하여, 그린수소를 생산할 수 있는 수전해(water electrolysis) 기술과 수소를 활용해 청정에너지를 생산할 수 있는 연료전지(fuel cells) 기술에 적용될 수 있는 고효율, 고내구성 전극 소재 개발 연구를 주로 수행 중에 있다. 개발된 전극 소재들은 소재 레벨에서의 평가에 그치는 것이 아닌 막-전극 접합체(membrane-electrode assembly, MEA) 제작 후 셀 레벨에서 평가를 거쳐 실제 구동 환경에서의 사용 가능성을 함께 검증하고 있다.

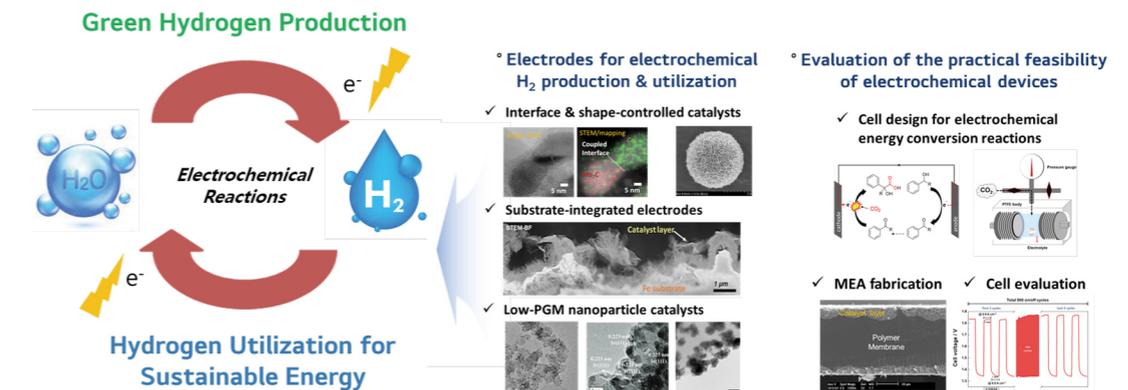
### 연구 분야 및 내용

#### 수전해 고효율, 고내구성 전극 소재 개발 연구

본 연구실에서는 100℃ 이하에서 구동되는 알칼라인, proton exchange membrane (PEM), anion exchange membrane (AEM) 수전해에 사용될 수 있는 고효율, 고내구성 전극 소재를 개발하고 있다. 각 기술들은 고유의 장점과 단점을 가지고 있어 각각의 단점을 극복하고 장점을 극대화하는 방안이 필요하다. 알칼라인 수전해는 상대적으로 낮은 운전 전류밀도를 극복하고자 고전류밀도 운전이 가능한 고효율 전극 소재 구조를 설계하고 이를 다공성 기재와 일체화된 전극 형태로 구현함으로써 상용화에 근접한 전극 기술을 확보하는 것을 목표로 한다. PEM 수전해는 값비싼 이리듐 사용량을 저감할 수 있는 이리듐 저감 신규 촉매를 설계하는 것을 목표로 하며, 이는 지지체 담지 촉매 합성 기술과 다양한 형태의 나노구조화 기술로부터 구현이 가능하다. AEM 수전해는 촉매층 내 촉매/이오노머와의 계면 특성이 중요하여 이오노머와의 계면 형성을 극대화할 수 있는 구조의 촉매 개발과 수소발생극에서의 귀금속 사용량을 저감할 수 있는 촉매 개발을 중점으로 하고 있다.

#### 막-전극 접합체 계면 특성 연구

막-전극 접합체(membrane-electrode assembly, MEA)는 전극층과 분리막(혹은 전해질막), 그리고 다공성 수송층



그린수소 생산 및 활용을 위한 전극 소재 개발 및 셀 응용 연구 소개.



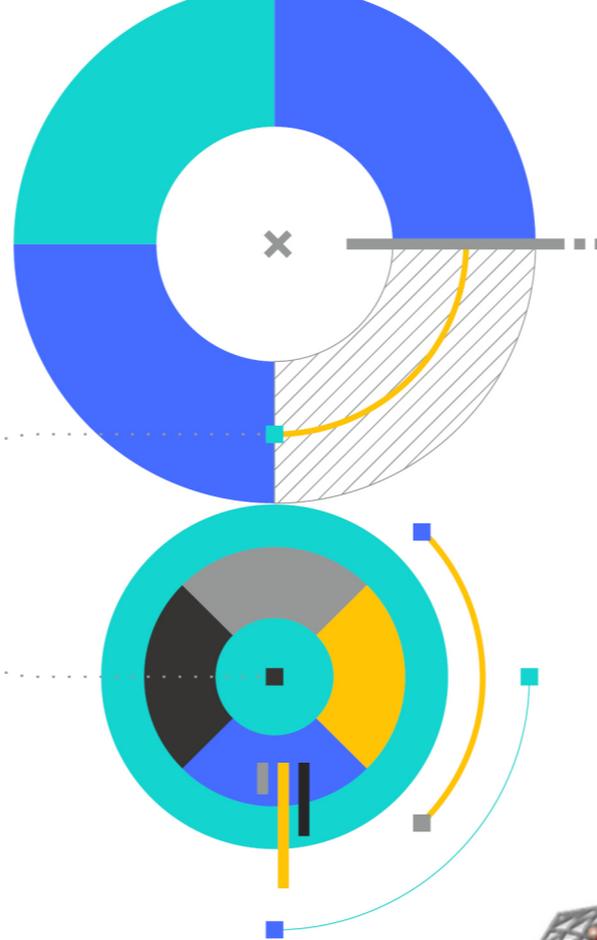
(porous transport layer, PTL)이 서로 접하는 계면을 이루고 있고 이 계면에서의 전기화학 반응 효율과 전하 및 물질전달 효율이 실제 장치에서의 성능과 내구성에 큰 영향을 미친다. 수전해 촉매 및 분리막을 이용해 MEA를 실제로 제작하고 평가할 수 있는 연구 시설을 보유하고 있으며, 계면에서의 특성을 정밀하게 평가하기 위한 전기화학 분석과 실제 운전 환경에서의 성능과 내구성을 평가할 수 있는 평가 프로토콜 개발에 대한 연구들을 수행 중이다. 이러한 셀 평가 결과들은 MEA 내 계면 특성 향상을 위한 계면 제어 연구 및 신규 전극 소재 개발 연구의 기초 데이터로 활용될 수 있으며, 이를 바탕으로 보다 실제 적용 가능성이 향상된 전극 관련 기술들을 개발 할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

### 연구 성과

#### PEM 수전해 Ir 촉매층/Ti PTL 계면 제어 연구

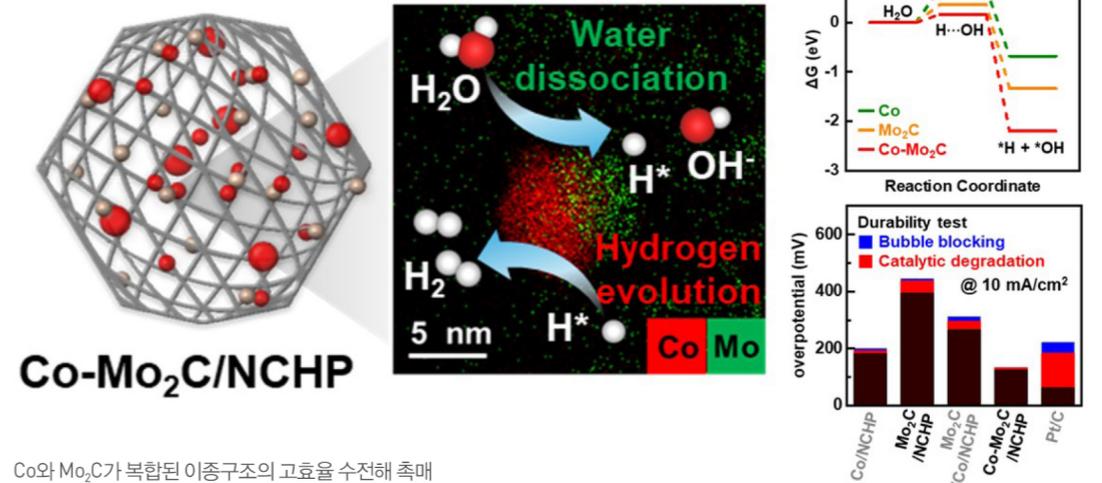
PEM 수전해의 Ir 촉매층과 Ti PTL 계면에서는 운전 중 형성된 TiO<sub>2</sub> 산화물층으로 인해 금속반도체 접촉이 형성되어 전기전도도가 급격히 떨어지며 이를 방지하기 위해 고가의 Pt 코팅을 수행한다. 본 연구에서는 결정질 및 비정질 Ir 촉매가 이중층 구조를 이루고 있는 촉매층을 설계하여 고가의 Pt 코팅 없이도 촉매층과 PTL의 계면 열화 없이 우수한 성능과 내구성을 얻을 수 있는 기술을 제안하였다. 이중층 구조의 Ir 촉매층은 결정질 촉매층이 Ti PTL과 우수한 계면특성을 제공하고, 비정질 촉매층이 뛰어난 전

기화학적 촉매 활성을 발현함으로써 시너지 효과를 나타낸다. 그 결과, Ti PTL의 Pt 코팅 없이도 우수한 성능과 장기 내구성을 확보할 수 있었으며, 본 기술이 PEM 수전해에서 소재 비용 저감을 위한 실용적인 전략이 될 수 있음을 검증하였다. (한국에너지기술연구원 공동 연구)

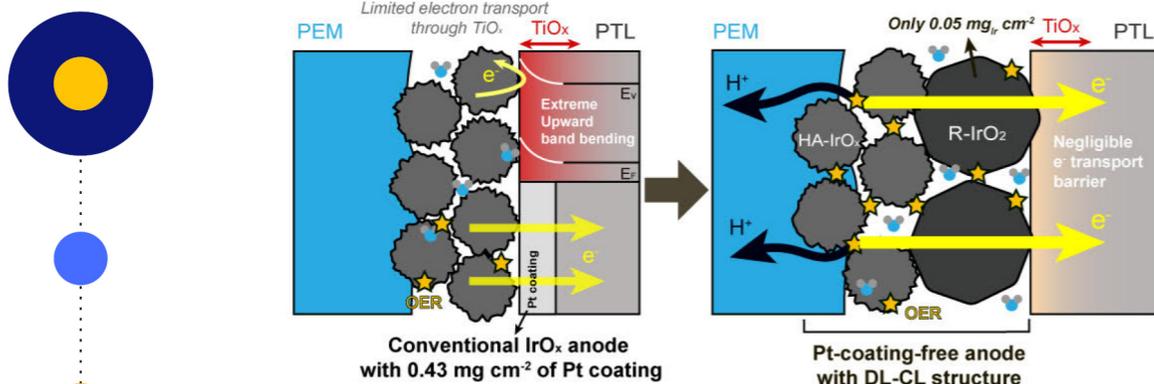


#### 이중구조를 갖는 고효율 수전해 촉매 소재 개발

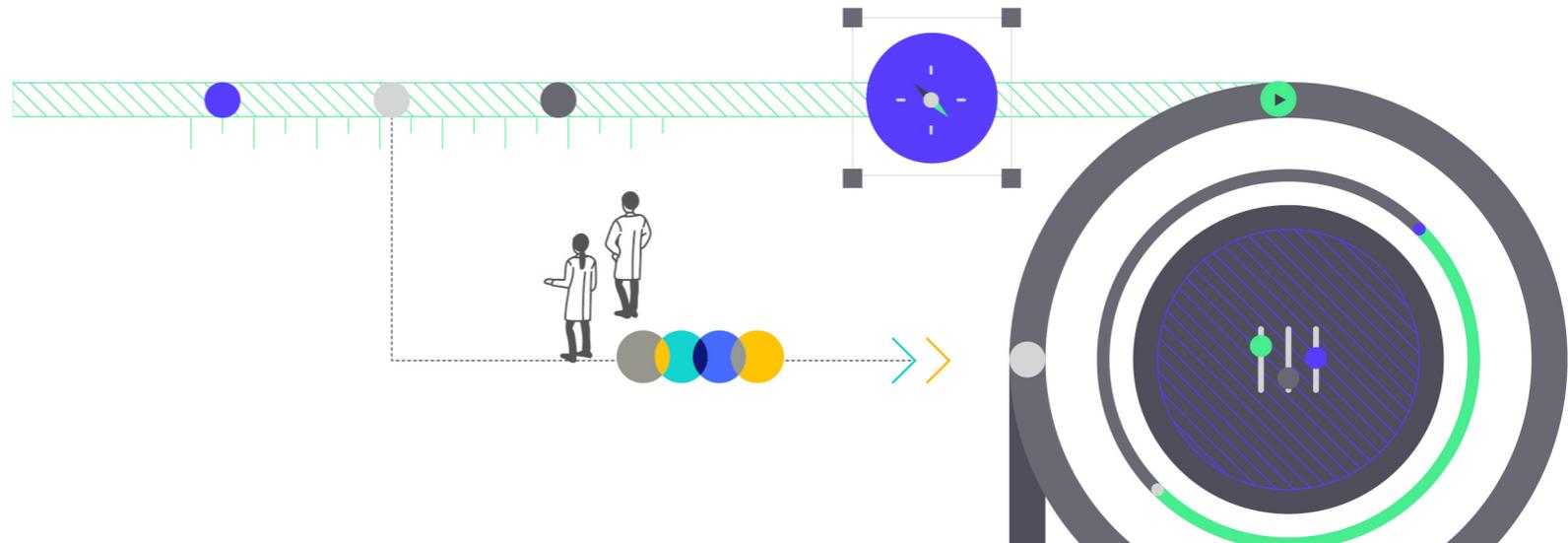
알칼라인 환경에서의 수전해는 귀금속 없이 저비용 수소 생산이 가능하다는 장점이 있지만, 비귀금속 촉매의 느린 물 분해 반응 속도와 낮은 내구성 때문에 높은 성능을 확보하기가 어렵다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 Co와 Mo<sub>2</sub>C가 강하게 결합된 이중구조 촉매를 질소 도핑된 중공 탄소 구조체 지지체에 고정된 새로운 촉매 시스템을 제안하였다. 이중구조 내에서 Co와 Mo<sub>2</sub>C 사이의 전하 재분포는 물 분해 반응을 촉진하고, 계면에서의 수소 발생 반응(hydrogen evolution reaction, HER) 속도를 향상시켜 알칼라인 HER 성능을 크게 개선한다. 또한 중공 탄소 구조 내에서 계면 형성이 극대화되고 촉매의 물리·화학적 열화가 억제되어 우수한 장기 내구성을 확보하였다. 본 연구는 알칼라인 HER에서 반응 속도 및 내구성 한계를 극복하기 위한 계면 설계 전략의 중요성을 제시한다. (KAIST 공동연구)

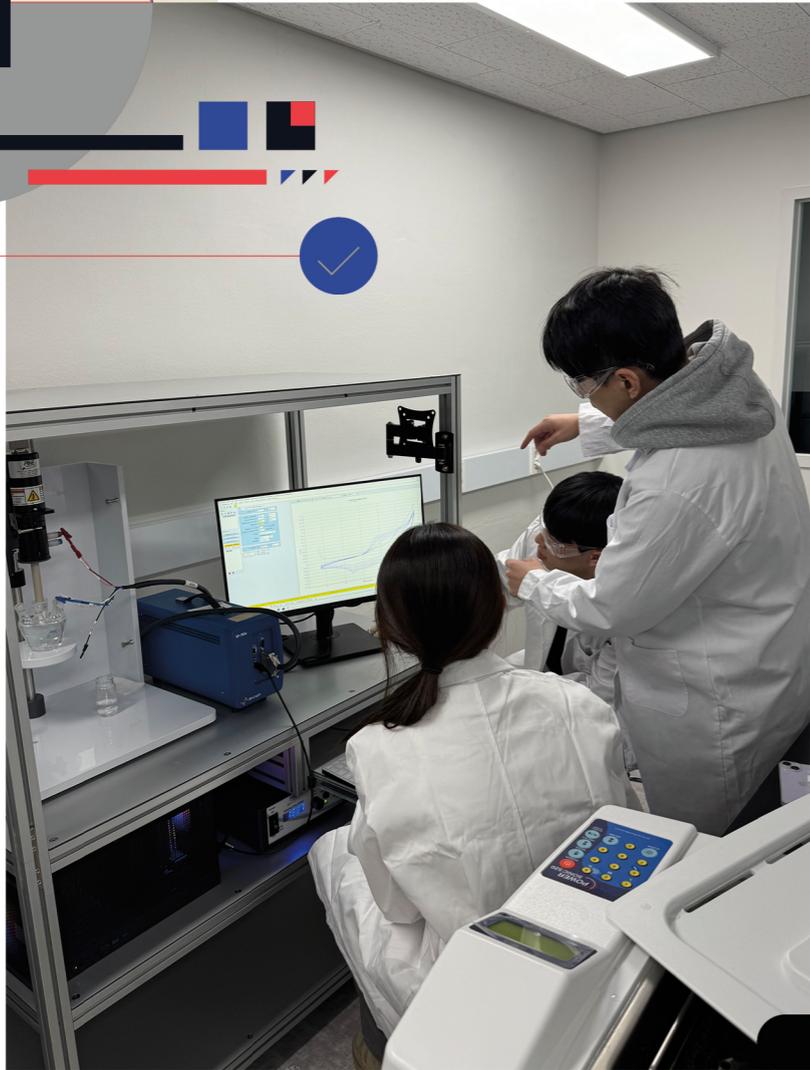


Co와 Mo<sub>2</sub>C가 복합된 이중구조의 고효율 수전해 촉매  
[J. Mater. Chem. A, 2025,13, 19717]



이중층 구조의 촉매층 도입으로 계면 특성이 향상된 PEM 수전해 전극 개발 연구 [J. Mater. Chem. A, 2025, 13, 39748-39758].





### 앞으로의 연구 계획

현재 수행 중인 PEM 수전해 및 알칼라인 수전해 분야의 신규 연구과제를 바탕으로, 본 연구실은 PEM 수전해 스택 환경을 모사할 수 있는 전기화학적 셀 특성 평가 기술 개발과 알칼라인 수전해용 고효율·고안정성 산소 발생 반응(OER) 전극 소재 개발을 핵심 연구 주제로 삼고 있다. 본 연구실에서는 소재 합성에 국한되지 않고, 다양한 전기화학적·분광학적·구조적 분석 기법을 활용하여 신규 소재 설계를 위한 심층적인 인사이트를 제공하고자 한다. 아울러 e-fuel 합성, 부식 거동 분석, 기능성 전기 도금 등 다양한 전기화학 응용 분야에 대한 연구도 병행하고자 한다. 🌐



## 연구원 인터뷰 우리 연구실은 어떤 연구실인가요?

# Q & A

김영준 (학부연구생)



우리 연구실은 차세대 친환경 에너지원인 그린수소 생산을 위한 수전해 촉매(HER/OER) 개발에 주력하고 있습니다. 학부연구생도 단순 보조가 아닌 주도적 연구자로서 소재 합성, 특성 분석, 성능 평가의 전 과정을 경험하며 연구 역량을 키웁니다.

교수님께서서는 학부생의 아이디어를 진지하게 검토하여 실제 실험으로 구현할 기회를 제공하시며, 예상과 다른 결과에도 원인을 함께 분석하며 성장할 수 있도록 이끌어 주십니다. 실패를 두려워하지 않는 연구 문화와 수평적 소통 속에서 진정한 연구자로 성장할 수 있는 연구실입니다.

김강민 (학부연구생)



우리 연구실은 전기화학 수전해 기술을 기반으로 수소와 산소 생산을 위한 다양한 연구를 수행하고 있습니다. 촉매의 형성 및 활성화 메커니즘을 이해하고, 이를 바탕으로 수전해 시스템의 성능 향상과 안정성 확보를 목표로 연구를 진행하고 있습니다. 또한 전기화학 실험과 소재 분석을 통해 전극 반응의 특성과 구조적 변화를 체계적으로 분석하며, 실제 수전해 기술에 적용 가능한 방향을 모색하고 있습니다.

연구 과정에서는 자유롭게 의견을 나누고 서로를 배려하는 분위기를 중요하게 생각하며, 구성원들이 편안한 환경 속에서 즐겁게 연구에 몰입할 수 있도록 노력하고 있습니다. 단순한 연구 성과에 그치지 않고, 함께 배우고 성장하는 과정을 소중히 여기는 연구실 문화를 지향하고 있습니다.

이원채 (학부연구생)



우리 연구실은 연료전지를 비롯한 전기화학 에너지 변환 시스템을 중심으로, 차세대 친환경 에너지 기술 개발을 목표로 연구를 수행하고 있습니다. 연료전지, 수전해 시스템, 전기화학 반응 기반 에너지 변환 기술을 통해 고효율·고내구성 전극 소재와 촉매, 전극 구조 및 반응 메커니즘을 심도 있게 연구합니다. 연구실에서는 직급이나 학년에 관계없이 각자의 생각과 아이디어를 존중하며, 질문이나 새로운 접근 방법을 부담 없이 제안할 수 있는 분위기입니다. 교수님께서서는 학생 개인의 성장과 연구 스타일을 존중하며, 스스로 생각하고 결정할 수 있는 자율적인 연구 환경을 조성해 주십니다. 이처럼 자유로운 소통과 상호 존중을 바탕으로, 한 명 한 명의 성장을 가장 중요하게 여기는 연구실입니다.



# 2025 환태평양 화학회 연합 국제 학술회의

## Pacificchem 2025 (The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2025)

글\_김명길 교수 | 성균관대학교 신소재공학부

- ▶ 학술대회명 2025 환태평양 화학회 연합 국제 학술회의
- ▶ 학술대회기간 2025. 12. 15 ~ 2025. 12. 20
- ▶ 학술대회장소 미국 하와이 호놀룰루
- ▶ 주관기관 Canadian Society for Chemistry
- ▶ Keyword 환태평양, 순수화학, 화학공학, 재료화학, 인공지능



Pacificchem 2025 (The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2025)는 환태평양 연안 국가 화학회들이 공동 주최하는 국제학술대회이다. 본 학회는 1984년부터 시작되어 약 5년마다 하와이 호놀룰루에서 개최되고 있으며 이번에 9회차를 맞이하고 있다. 올해의 행사는 대한 화학회를 포함하여 환태평양 주요국가들의 화학회인 미국 화학회(american chemical society), 캐나다 화학회(canadian society for chemistry), 일본 화학회(chemical society of japan), 중국 화학회(chinese chemical society), 뉴질랜드 화학회(new zealand institute of chemistry), 호주 화학회(royal australian chemical institute)가 조직위를 구성하고 있으며, 이 중 캐나다 화학회의 주관으로 개최되었다. 본 행사는 환태평양 국가들의 기초화학 및 응용화학을 아우르는 폭넓은 화학 연관분야의 산학연 연구자들이 국제적인 교류를 가지는 주요 국제학술대회이다.

Pacificchem은 1984년 최초로 개최되어 코로나 시기인 21년의 온라인 개최를 제외하고는 매 5년마다 하와이 호놀룰루에서 개최되고 있는 환태평양 연안국가 화학관련 연구자들의 국제 교류 행사이다. 본 학회는 기초화학, 응용화학, 화학교육등의 폭넓은 화학연관분야의 연구자들이 참여하는 행사이다. 본 행사의 경우 일반적으로 대규모의 참석인원 및 다양한 분야의 심포지엄이 운영되어, 2025년의 경우 12월 15일 ~ 20일의 행사기간 동안 하와이 컨벤션 센터, 힐튼 하와이안 빌리지 와이키키 비치 리조트, 웨라톤 와이키키 비치 리조트, 웨라톤 프린세스 카이올라니 와이키키 비치의 4곳의 장소에서 심포지엄의 발표가 이루어졌다.



본 저자의 경우 이번 학회의 경우 주요관심 분야인 무기소재의 전자소재 적용과 광촉매 소재등에 대한 최신 연구동향을 주로 파악하고자 하여 해당 분야의 심포지엄 발표가 주로 이루어지는 힐튼 하와이안 빌리지 와이키키 비치 리조트를 중심으로 해당 행사를 참여하였다.

해당 학회장소의 경우 국내 여행객들에게도 널리 알려진 유명한 리조트로 가족 단위 휴양객들이 즐겨 찾는 리조트이며 내부의 다양한 휴게 시설 및 식당가를 갖추고 있었다. 다소 아쉽게도 학회기간 중 지속적인 비로 인하여 하와이의 아름다운 경관을 감상하기에는 아쉬움이 남았으나, 해당 호텔의 규모 및 시설들은 학회 참가자들에게 학회 중간에 잠시나마 휴식을 취하기에는 충분한 환경을 제공해주었다.

첫날에는 광촉매소재에 대한 다양한 강연을 참석하였다. 기존 고가의 금속촉매에 의존하여 이루어지고 있는 화학반응을 유기촉매와 광화학반응을 이용하여 금속을 사용하지 않는 새로운 반응 경로를 제시하는 다양한 연구들이 발표되었다. 날로 심화되는 희귀 금속자원의 부족 및 산업안보 위협을 고려시 기초과학적인 연구성과에서 나아가 해당 연구가 산업적 파급력을 가질 수 있음을 깨닫게 해주었다.

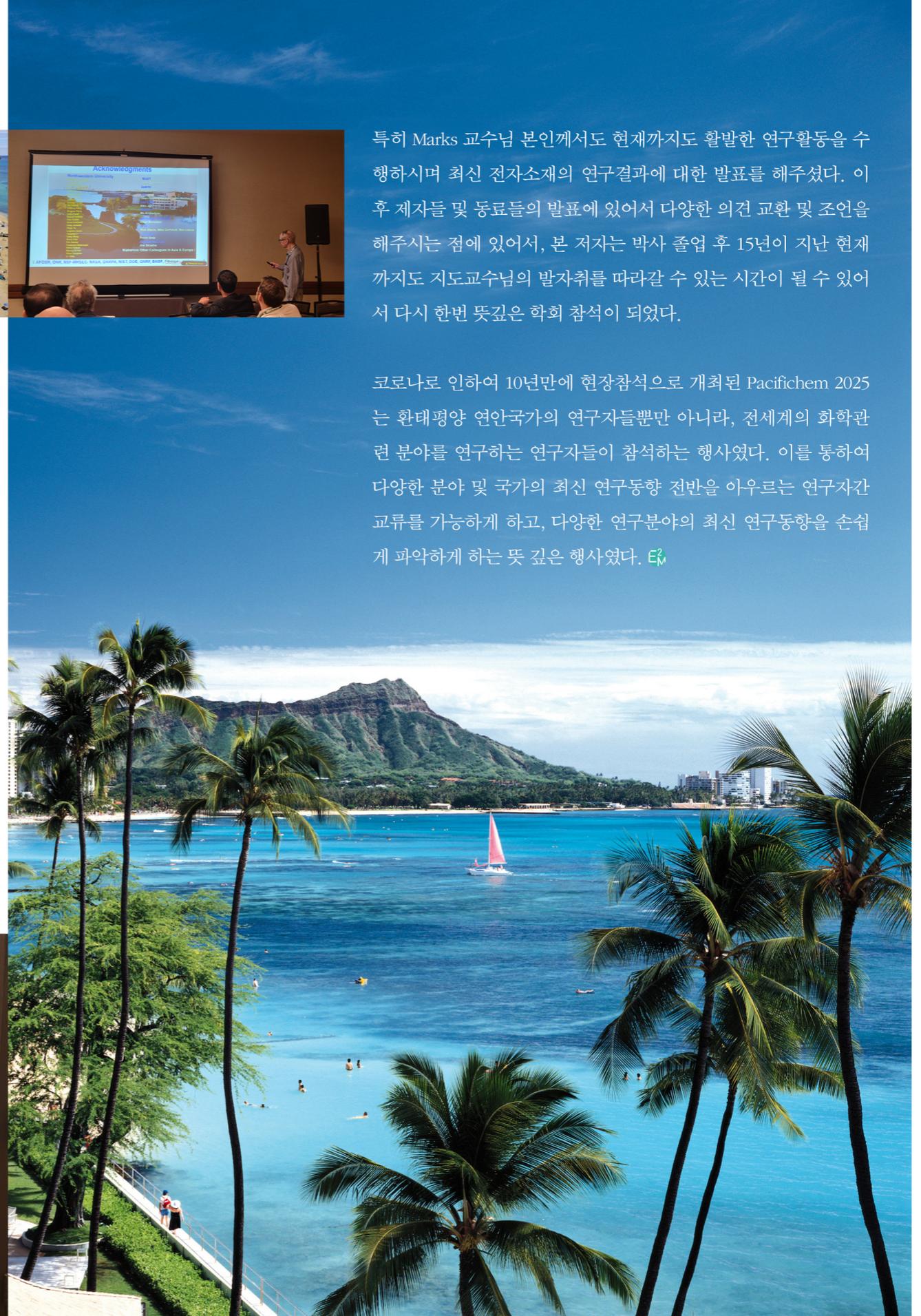
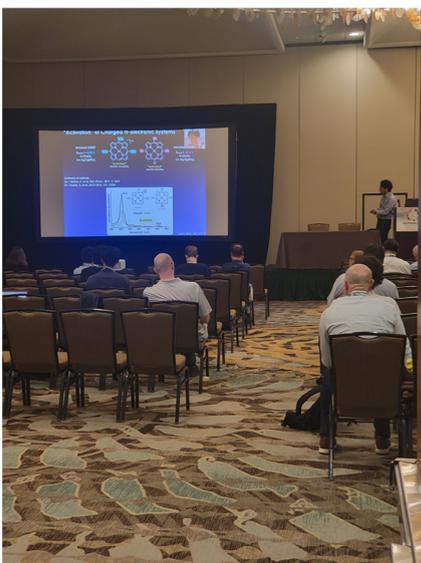
다양한 강연 및 행사 중 본 저자의 지도교수님이신 미국 노스웨스턴 대학의 Tobin J. Marks 교수님의 80세 기념 심포지엄인 “Frontiers of Catalysis and Functional Materials: Recognizing the International Contributions of Tobin J. Marks”의 경우, Marks 교수님께서 오랜 기간 동안 수행해오신 1) 유기금속화합물의 합성 및 촉매응용, 2) 차세대 대면적 전자소자용 전자소재, 3) 광전소재 및 태양전지 소재에 관하여 다양한 제자 및 동료 연구자들의 발표가 있었다.



## The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2025

특히 Marks 교수님 본인께서도 현재까지도 활발한 연구활동을 수행하시며 최신 전자소재의 연구결과에 대한 발표를 해주셨다. 이후 제자들 및 동료들의 발표에 있어서 다양한 의견 교환 및 조언을 해주시는 점에 있어서, 본 저자는 박사 졸업 후 15년이 지난 현재까지도 지도교수님의 발자취를 따라갈 수 있는 시간이 될 수 있어서 다시 한번 뜻깊은 학회 참석이 되었다.

코로나로 인하여 10년만에 현장참석으로 개최된 Pacificchem 2025는 환태평양 연안국가의 연구자들뿐만 아니라, 전세계의 화학관련 분야를 연구하는 연구자들이 참석하는 행사였다. 이를 통하여 다양한 분야 및 국가의 최신 연구동향 전반을 아우르는 연구자간 교류를 가능하게 하고, 다양한 연구분야의 최신 연구동향을 손쉽게 파악하게 하는 뜻 깊은 행사였다. 



## 파리 시떼 대학교 Université Paris Cité

글\_최효정 박사과정 | 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과

- ▶ 연구기관명 : 파리 시떼 대학교, Université Paris Cité
- ▶ 연구기관주소 : 15 Rue Jean Antoine de Baïf, 75013 Paris, France
- ▶ 탐방기간 : 2025.01~2027.01

Université Paris Cité.

[출처] <https://u-paris.fr/language/en/no-relationship-between-universite-paris-cite-and-the-private-company-operating-under-the-name-city-university-of-paris/>

Université Paris Cité(UPCité)는 프랑스 파리를 기반으로 한 다학제적 연구중심 종합대학으로, 파리 도심 전역에 분산된 도시형 캠퍼스를 바탕으로 연구와 교육을 수행하고 있습니다.

현재 UPCité에는 약 68,000명의 학생과 4,800여 명의 교수 및 연구진, 2,700여 명의 행정 직원이 소속되어 있으며, 100여 개가 넘는 연구기관과 공과대학, 단과대학, 대학원으로 구성된 대규모 연구·교육 체계를 갖추고 있습니다. 이러한 규모와 연구 역량을 바탕으로 UPCité는 프랑스 정부로부터 '탁월함의 주도(IdEx, Initiative d'Excellence)' 대학으로 지정되었으며, 국제 연구 평가에서도 프랑스를 대표하는 연구중심대학 중 하나로 자리매김하고 있습니다.

UPCité의 형성은 프랑스 고등교육 체계의 역사적 변화와 긴밀히 맞닿아 있습니다. 중세 유럽 학문의 중심이었던 소르본 대학교(sorbonne university)을 기원으로 하는 전통적 파리 대학 체제는 1968년 학생·사회 운동을 계기로 해체되었고, 이후 여러 개의 독립 대학으로 분화되었습니다. 이 과정에서 의학·보건·생명과학을 중심으로 한 Paris Descartes University(Paris V)와 자연과학 및 인문사회과학을 아우르는 Paris Diderot University(Paris VII)가 각각 형성되었으며, 여기에 지구과학 분야의 세계적 연구기관인 IGP(institut de physique du globe de paris)가 결합하게 되었습니다. 이러한 통합은 단일 학문이나 학과 중심의 연구를 넘어, 복합적 사회 문제에 대응할 수 있는 새로운 형태의 연구중심대학을 구축하려는 시도의 결과로, 2019년 Université de Paris 출범을 거쳐 2022년 Université Paris Cité로 이어졌습니다.



5구 캠퍼스 전경 (구) Paris Descartes University.  
[출처] <https://5ans.u-pariscite.fr/>

6구 캠퍼스 전경.  
[출처] <https://5ans.u-pariscite.fr/>



5구 캠퍼스 전경 (구) Paris Descartes University.  
[출처] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Universit%C3%A9\\_Paris-Descartes](https://fr.wikipedia.org/wiki/Universit%C3%A9_Paris-Descartes)

13구 캠퍼스 전경 (구) Paris Diderot University.  
[출처] <https://5ans.u-pariscite.fr/>



이와 같은 역사적 배경 위에서 UPCité는 단일 캠퍼스 중심의 전통적 대학 모델을 지양하고, 연구 주제의 성격에 따라 최적의 연구 환경을 도시 안에 배치하는 도시형 캠퍼스 구조를 채택하였습니다. 연구소와 교육시설은 파리 5·6·7·13구 등 도심 전역에 위치해 있으며, 이는 병원, 공공 연구기관, 정책 및 산업 거점과의 물리적 접근성을 전제로 한 공간적 설계라 할 수 있습니다. 이러한 구조는 연구가 대학 내부에 머무르지 않고, 의료·사회·환경 시스템과 직접 연결된 상태에서 수행될 수 있도록 합니다.

13구 캠퍼스 전경 (구) Paris Diderot University.  
[출처] <https://5ans.u-pariscite.fr/>

UPCité의 연구 비전은 이러한 공간적·구조적 설계에 반영되어 있습니다. 대학을 대표하는 연구기관으로는 생의학 연구의 중심 역할을 수행하는 Institut Pasteur(파리 15구), 지구·환경·기후 시스템을 선도하는 IPGP(파리 5구), 그리고 전기화학·촉매·나노소재 연구를 수행하는 ITODYS (Institut des Sciences Analytiques et de Physico-Chimie pour l'Environnement et les Matériaux)(파리 13구)가 있습니다. 이들 연구소는 각기 다른 연구 분야를 담당하면서도, 공동 연구 프로그램과 연구 인프라 공유를 통해 하나의 연구 네트워크로 연결되어 있으며, 이와 같은 연구기관 구성은 단순한 분야의 병렬적 집합이 아니라, UPCité가 추구하는 연구 방향이 조직 차원에서 구현된 결과라 할 수 있습니다.

이러한 연구 및 공간 구조의 중심에는 'Global Health'라는 UPCité의 연구 비전이 자리하고 있습니다. UPCité에서 말하는 지구 건강은 의학이나 보건학에 국한된 개념이 아니라, 인간의 건강과 환경, 기후 변화, 에너지 전환, 사회적 불평등과 회복력을 하나의 연속선상에서 통합적으로 바라보는 연구 패러다임을 의미합니다. 이는 앞서 살펴본 도시형 캠퍼스 구조와 연구기관 구성, 그리고 학제 간 연구 방식이 지향하는 방향을 개념적으로 정리하는 핵심 축이라 할 수 있습니다.

ITODYS 연구소.  
[출처] <https://itodys.u-paris.fr/>



파스티르 연구소.  
[출처] <https://www.pasteur.fr/fr/institut-pasteur>



파스티르 연구소.  
<https://www.unjourdeplusaparis.com/paris-culture/musee-pasteur>

저는 2025년부터 UPCité 소속 ITODYS를 방문하여 연구활동을 수행하며, 이러한 연구 비전과 운영 구조는 실제 연구 현장에서 어떻게 구현되고 있는지를 직접 확인할 수 있었습니다. 자가조립단층(self-assembled monolayer, SAM)을 기반으로 한 전자수송층 계면 제어를 주제로 광전지 소자의 안정성과 성능 향상을 목표로 연구를 진행하면서, 실험 장비와 분석 인프라가 연구소 간에 비교적 유연하게 공유되고, 특히 ITODYS를 중심으로 인접 연구소 및 외부 기관 연구자들이 참여하는 정기적인 공동 세미나와 연구 미팅이 운영되고 있으며, 이 과정에서 재료과학, 전기화학, 물리화학 등 서로 다른 연구 배경을 지닌 연구자 간의 논의가 자연스럽게 이루어지고 있음을 느낄 수 있었습니다. 이러한 정기적 학술 교류 구조는 연구소 간 물리적 분산에도 불구하고 연구 네트워크를 유지하는 핵심적인 운영 장치로 기능하고 있었습니다.

ITODYS 연구소 멤버.  
[출처] <https://itodys.u-paris.fr/>



UPCité는 현재 의료, 환경, 에너지 연구를 개별 학문 단위가 아닌 하나의 운영 체계 안에서 통합적으로 관리하는 연구 플랫폼으로 기능하고 있습니다. 특히 단일 캠퍼스에 집적되지 않고 도시 공간 속에 배치되어 있기 때문에, 파리의 아름다운 문화와 더불어 다양한 연구를 경험할 수 있을 것입니다. 특히 복합적 사회 문제를 다루기 위한 연구를 조직적으로 수행할 수 있는 하나의 대학 모델로 자리매김하게 될 것이며, 오늘날 파리와 프랑스가 추구하는 지속가능성과 사회적 책임의 가치 속에서, UPCité는 학문과 사회를 연결하는 핵심 연구 플랫폼으로 자리매김하여 향후 연구와 국제 협력의 중요한 기준점이 될 것입니다. 🌱



지질 연구.  
[출처] <https://www.ipgp.fr/actus-et-agenda/actualites/printemps-des-masters-2026/>

# CMOS 이미지 센서(CIS) 기술의 혁신과 미래 전망

글\_ 김수진 교수 | 고려대학교 전기전자공학부

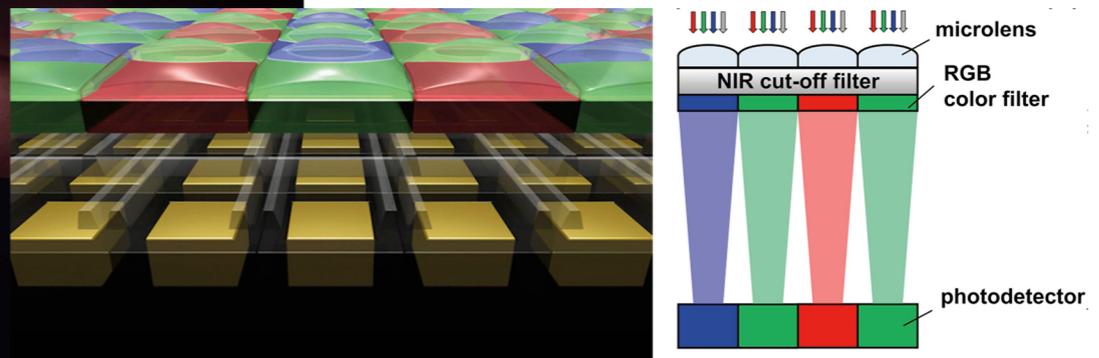
## 1. 서론

인류의 문명이 시각 정보를 기록하고 전달하려는 욕구에서 시작되었듯, 현대 전자공학의 역사는 시각적 아날로그 정보를 얼마나 정밀하게 디지털 데이터로 변환하느냐에 집중해 왔습니다. 과거 아날로그 카메라 필름이 수행하던 역할을 반도체가 대체하면서, 이미지 센서는 디지털 기술과 일상생활의 물리적 정보를 연결하는 가장 중요한 브리지 기술 중 하나로 발전해 왔습니다. 특히 인공지능(AI)과 자율주행 기술이 빠르게 발전하면서, 이미지 센서는 인공지능이 세상을 인지하는 능력을 결정짓는 요소 중 하나로서 비메모리 반도체 기술의 핵심 경쟁력이 되었습니다. 초창기 낮은 해상도와 노이즈 문제로 고전하던 CMOS 이미지 센서(CIS)는 이제 인간의 망막이 가진 한계를 뛰어넘어, 가시광선을 넘나드는 초광대역 감지와 수억 화소에 달하는 초고정밀 묘사가 가능한 수준으로 기술 발전에 이르렀습니다. 이에 반도체 기술의 집약체라 불리는 CIS의 기본 구조부터, 글로벌 기술 패권 경쟁의 중심에 있는 최신 혁신 기술들, 그리고 퍼지컬 AI 시대의 핵심 동력으로서의 기술적 비전을 조망하고자 합니다.

## 2. CMOS 이미지 센서(CIS) 구조의 기술적 혁신과 진화

이미지 센서의 기술적 진화는 제한된 면적(픽셀) 내에서 어떻게 하면 더 많은 빛을 감지하고(감도), 인접한 픽셀 간의 간섭을 최소화하여 순수한 신호를 뽑아낼 것인가(노이즈 제어) 라는 난제를 해결해 온 과정입니다. 이를 위해 나노미터 단위의 광학 구조 설계와 반도체 공정 기술이 유기적으로 결합되어 왔습니다.

CIS의 기본 구조와 영상 생성 원리: Stack 구조 예시.



### 2.1 CIS의 기본 구조와 영상 생성 원리

CIS의 한 픽셀은 크게 세 가지 핵심 층으로 구성됩니다. 가장 상단에는 빛을 모아주는 마이크로 렌즈 어레이(MLA)가 위치하며, 그 하단에는 가시광 색을 인지하기 위해 특정 파장의 빛만 투과시키는 컬러 필터(color filter)가 배치됩니다. 마지막으로 빛 에너지를 전기 신호로 변환하는 포토다이오드(pinned photodiode, PPD) 층으로 구성됩니다.

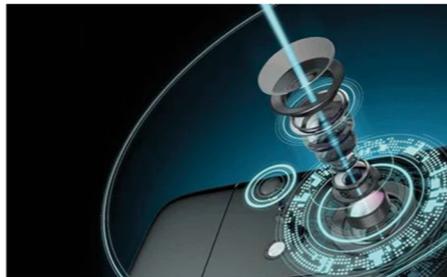
이미지가 생성되는 과정은 외부의 빛이 마이크로 렌즈를 통해 굴절되어 포토다이오드 영역으로 집중되면서 시작됩니다. 여기서 광전효과(photoelectric effect)에 의해 빛의 세기에 비례하는 전자가 생성되어 축적됩니다. 이렇게 생성된 전하량은 픽셀 내의 트랜지스터를 통해 전압 신호로 변환되고, 아날로그-디지털 변환기(ADC)를 거쳐 우리가 보는 디지털 영상 데이터로 출력됩니다.

### 2.2 초고화소 센싱 한계 돌파를 위한 첨단 공정 및 설계 기술

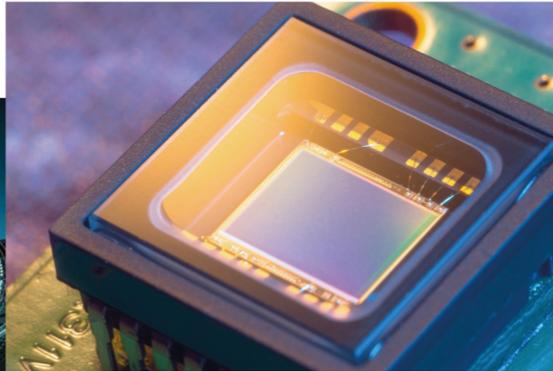
차세대 자율주행 및 지능형 로봇 비전 기술 수요가 점차 확대되면서, 먼 거리의 사물을 식별하고 미세한 균열까지 감지할 수 있는 초고화소 센서 기술이 더욱 중요해졌습니다. 이에 따라 삼성전자, 소니 등 글로벌 기업들은 픽셀 크기를 수백 나노미터 수준으로 줄이면서도 감도를 유지하기 위한 치열한 기술 경쟁을 벌이고 있습니다. 픽셀이 작아질수록 수광 면적이 줄어들어 노이즈가 증가하고 인접 픽셀 간 신호가 섞이는 크로스토크(crosstalk) 현상이 발생하는데, 이를 극복하기 위해 다음과 같은 혁신 기술들이 개발되었습니다.



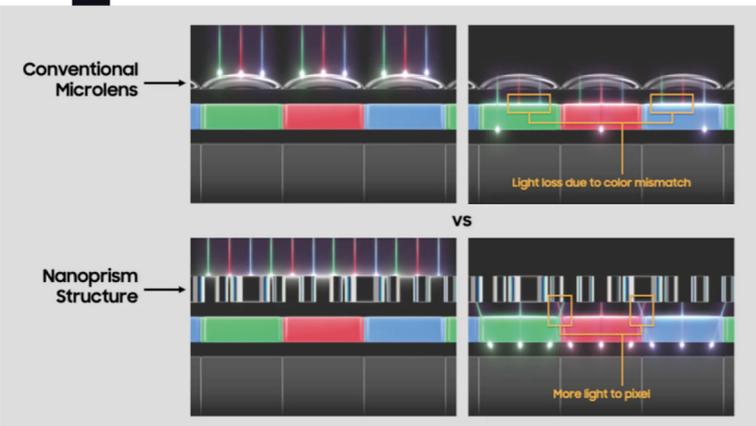
출처: [https://stockcake.com/i/futuristic-robotic-eye\\_755332\\_783130](https://stockcake.com/i/futuristic-robotic-eye_755332_783130)



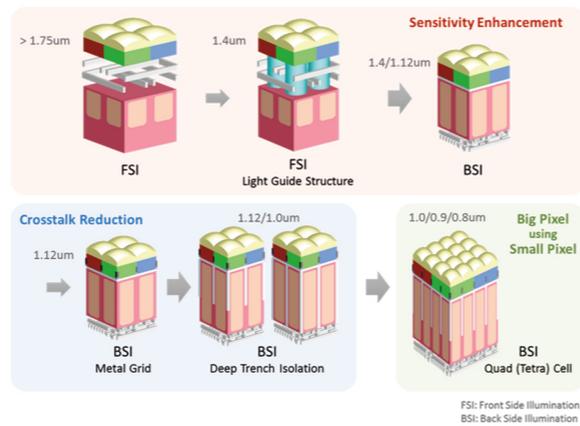
출처: google image.



출처: <https://www.dbhitek.com/en/technology/portfolio/cis>



초고화소 센싱 한계 돌파를 위한 첨단 공정 및 설계 기술: 나노프리즘 기술, 출처:삼성전자.



초고화소 센싱 한계 돌파를 위한 첨단 공정 및 설계 기술: BSI 및 DTI 기술, 출처: SK hynix.

첫째, 후면수광형(back-side illumination, BSI) 기술은 금속 배선층 아래에 포토다이오드를 배치하여 빛의 경로를 방해 하던 배선층을 제거함으로써 수광 효율을 비약적으로 향상시켰습니다. 둘째, DTI (deep trench isolation) 및 아이소셀(ISOCELL) 기술은 픽셀과 픽셀 사이에 물리적인 벽을 세워 인접한 방향으로 빛이나 전하가 넘어가지 않도록 격리하는 기술입니다. 셋째, 최근 도입된 나노프리즘(Nanoprism) 기술은 컬러 필터 대신 나노 구조물의 굴절 특성을 이용하여 빛을 파장별로 분리함으로써, 기존 컬러 필터에서 흡수 되어 버리던 빛까지 모두 활용해 감도를 기존 대비 30% 이상 높이는 데 성공했습니다. 이러한 기술적 도약은 모바일 기기에서의 2억 화소 시대를 열었을 뿐만 아니라, 어두운 야간 도로 상황을 정확히 인지해야 하는 자율주행 분야의 기술 신뢰성을 높이는 데 기여하고 있습니다.

### 3. 맺음말

이미지 센서는 단순한 디지털 카메라로서 전통적인 기능을 넘어, 물리적 환경을 이해하고 반응하는 피지컬 AI (physical AI)의 비전으로 진화하고 있습니다. 완전 자율주행을 위한 스마트 모빌리티 분야에서는, 초고화소 이미지 센서가 차량 주변 환경을 면밀하게 인지하고 완성도 높은 주행을 현실화하는 데 기여하고 있습니다. 또한, 로봇 비전은 복잡한 공장 환경에서 정밀한 조립을 수행하거나 인간과 상호작용하는 데 필수적인 시각 정보를 제공합니다. 향후 도래될 메타버스(metaverse) 환경에서는 사용자의 시선과 동작을 실시간으로 추적하고 주변 공간을 스캐닝하여 몰입감을 극대화하는 기술적인 역할을 수행합니다. 이처럼 미래의 CIS는 이미지 데이터를 생성하는 전통적인 센서로의 역할을 넘어서, 인공지능 기반의 자율 판단 시스템의 핵심 역할을 하는 지능형 플랫폼 하드웨어로 중요한 역할을 할 것으로 예상됩니다. 🌐

# 사람 · 자연 걸음으로 다가가는 전자소자를 꿈꾸며

이금비  
조교수

경북대학교 응용화학공학부



경북대학교 본관 [출처: 경북대학교 개교 80주년 기념 홈페이지]

## Q1

**간단히 자기소개를 부탁드립니다.**

안녕하세요. 경북대학교 응용화학공학부 조교수로 재직 중인 이금비입니다. 'Rookie Interview'는 젊은 연구자들의 실제 경험을 통해 학생들에게 진로와 취업에 대한 실질적인 정보를 제공하는, 상당히 의미 있는 콘텐츠라고 생각합니다. 이 뜻깊은 기획에 함께할 수 있어 개인적으로도 매우 기쁘고 영광스럽습니다. 제 개인적인 진로 경험이 앞으로의 진로를 고민하는 학생 여러분께 작은 참고자료가 되기를 바라는 마음으로 인터뷰에 응하겠습니다. 저는 덕성여자대학교 화학과에서 이학사를 취득하였습니다. 졸업을 앞두고 진로에 대해 고민하던 중, 학과 교수님의 추천으로 한국과학기술연구원(KIST)에서 인턴 연구원으로 근무할 기회를 얻게 되었습니다. 이 경험을 통해 보다 체계적으로 연구를 배우고 싶다는 생각이 들었고, 자연스럽게 대학원 진학을 결심하였습니다. 이후 고려대학교 화공생명공학과 하정숙 교수님 연구실에 진학하여 석사과정을 시작하였으며, 연구에 대한 흥미와 책임감을 알아봐주신 지도교수님의 제안으로 석박사통합과정으로 전환하게 되었습니다. 통합과정 중에는 지도교수님의 연구년을 계기로 미국 일리노이 대학교 어바나-샴페인(university of illinois at urbana-champaign, UIUC)에서 1년간 연구와 생활을 경험할 수 있었습니다. 해외 환경에서의 경험은 연구 시야를 넓히는 데 큰 도움이 되었고, 다양한 해외 연구자들과의 교류를 통해 연구에 대한 관점 또한 한층 확장할 수 있었습니다. 이후 귀국하여 공학박사 학위를 취득하였으며, 새로운 연구 분야에 도전을 이어가기 위해 미국 노스웨스턴대학교(northwestern university)의 존 로저스 교수님 (Prof. John A. Rogers) 연구 그룹에서 약 5년간 박사후연구원으로 근무하였습니다.



## Q2

**현재 하시고 계신 일에 대해 간략히 말씀해주세요.**

현재 저는 기능성 소재를 기반으로 다양한 전자 소자를 제작하고 응용하는 연구를 수행하고 있습니다. 조금 더 자세하게 설명하자면, 인체와 환경에 부담을 주지 않는 소재를 활용해 전자 소자를 만들고, 이를 통해 사람의 건강을 돕거나 환경 문제 해결에 기여할 수 있는 기술이나 플랫폼을 개발하는 것이 제 연구의 핵심입니다. 제가 사용하고 합성하는 소재들은 기본적으로 생체 적합성을 갖춘 것들로, 여기에 생체 분해성까지 부여함으로써 전자 소자가 사용된 이후 자연에서 별도로 회수하거나 체내에서 다시 추출할 필요가 없도록 설계하고 있습니다. 이러한 접근은 전자폐기물을 줄여 환경 오염을 최소화하는 동시에 의료·헬스케어 분야로 확장될 수 있는 가능성을 지니고 있습니다.

로저스 연구그룹 연말 행사 (2021) [출처: Rogers Research Group].





대표 연구 테마 - 바이오 전자 소재 · 소자 · 시스템.

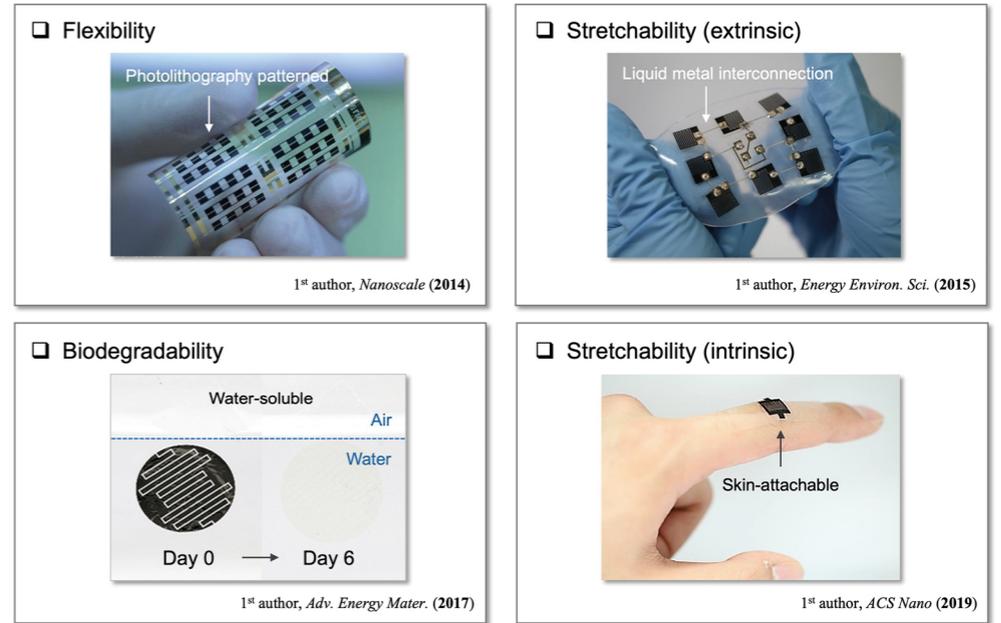
### Q3 학위 과정 중 하셨던 연구에 대해서 간단히 소개해 주실 수 있나요?

학위 과정 동안 저는 이차전지인 ‘전기화학 커패시터(슈퍼커패시터)’와 관련한 연구를 수행했습니다. 당시 연구의 초점은 단순히 에너지 저장 용량을 크게 만드는 것보다는, 앞으로의 전자기기에 적합한 새로운 형태의 전원 장치를 구현하는 데 있었습니다. 먼저, 통상적인 슈퍼커패시터는 주로 샌드위치형 구조로 제작되어 두께를 줄이는 데 한계가 있었습니다. 저는 이를 개선하기 위해 반도체 포토리소그래피 공정을 도입하여 평면형(in-plane) 구조로 전환하였고, 이를 통해 두께를 현저히 줄이면서 다른 전자 부품과의 집적이나 커패시터 자체를 쌓아 올리는 적층형 구조로의 확장 가능성을 확보하였습니다. 다음으로, 저는 용량 향상보다는 유연성, 신축성, 생분해성, 피부 부착성과 같은 다양한 기능성에 주목했습니다. 이러한 특성은 특히 웨어러블 일렉트로닉스의 전원 공급 장치로 활용되기 위해 필수적인 요소라고 판단했기 때문입니다.



박사학위 연구 테마 개요.

[출처: Accounts of Chemical Research, 2019, 52, 91]



박사학위 과정 중 ‘기능성 전기화학 커패시터(슈퍼커패시터)’ 관련 대표 연구 성과.

사람의 움직임과 피부에 자연스럽게 맞닿을 수 있는 전원 장치를 구현하고자 했습니다. 최종적으로는 개발한 전기화학 커패시터에 저장한 전기 에너지를 이용하여 LED를 켜보거나, 센서를 작동시키는 응용 연구를 수행하며, 실제 시스템에서의 활용 가능성을 검증했습니다. 이러한 연구는 에너지 저장 소자가 개별 부품을 넘어 웨어러블 시스템의 핵심 구성 요소로 기능할 수 있음을 보여주는 경험이었습니니다.

### Q4 해당 연구 분야에 관심을 갖게 된 동기는 무엇인가요?

‘전기화학 커패시터(슈퍼커패시터)’에 관심을 갖게 된 계기는 특별한 동기라기 보다 연구 과정 속에서 자연스럽게 이어진 선택에 가까웠습니다. KIST에서 인턴 연구원으로 근무하며 처음으로 에너지 소자 연구를 접하게 되었습니다. 당시 저는 연료전지연구센터에서 전지의 양극 소재 개발 연구를 수행했고, 이 경험을 통해 전극 소재와 계면 특성이 에너지 소자의 성능에 중요한 역할을 한다는 점을 현장에서 직접 느낄 수 있었습니다. 이후 대학원에 진학했을 때, 마침 지도교수님께서 이차전지 연구를 시작하고자 계획하고 계셨고, 저의 이러한 연구 배경을 고려해 전기화학 커패시터 연구를 제안해 주셨습니다. 슈퍼커패시터 연구는 전지와는 다른 작동 원리를 갖고 있지만, 전극 소재 중심의 접근이라는 점에서 이전 연구 경험과 자연스럽게 연결되는 분야였습니다.





대구시 고등학교 방문 및 강연 모습.

# Q5

**어떠한 계기로 현재 회사에 취직하게 되었나요? 또 이를 위해 어떤 준비를 하셨나요?**

돌이켜보면 저는 오래전부터 교육 현장에 대한 관심을 가지고 있던 학생이었습니다. 중·고등학교 생활기록부의 장래희망란에 늘 ‘화학 교사’를 적을 만큼, 학생들과 소통하며 지식을 전달하는 역할에 매력을 느끼고 있었습니다. 이러한 관심으로 학부 전공 역시 화학을 선택하게 되었고, 졸업을 앞두고는 교육대학원 진학과 취업을 고민하던 시기도 있었습니다. 이후 학과 교수님의 권유로 정부출연연구소에서 약 1년간 인턴 연구원으로 근무하게 되었고, 이 경험은 제 진로를 바꾸는 중요한 전환점이 되었습니다. 연구소는 교육보다는 실제 연구 성과를 만들어내는 현장이었고, 저는 연구 주제를 설정하고 실험을 수행하며 결과를 해석하는 전 과정을 처음으로 경험하게 되었습니다. 이 과정에서 연구의 매력은 느꼈지만, 제 스스로의 준비가 충분하지 않다는 사실도 분명히 깨닫게 되었습니다. 이를 계기로 양질의 연구 교육을 받을 수 있는 대학원 진학을 결심했고, 이후 석박사통합과정 6년과 박사후연구원 5년의 연구 생활을 거치며 전자 소자 분야의 전문성을 쌓아왔습니다. UIUC에서의 생활 동안에도 잡지는 시간을 줄여가며, 주어진 1년을 마치 2년처럼 활용하고자 노력했습니다. 박사학위과정 중에도 연구 결과를 조금이라도 더 빠르게 도출하기 위해 새벽까지 실험실에 남아 있는 날이 많았습니다. 그렇게 매 순간 연구에 성실히 임해 온 시간들은 논문과 특허라는 결과로 남았고, 이는 전임교원직에 도전할 수 있는 중요한 기반이 되었습니다. 전임교원 채용을 준비하는 과정은 쉽지 않았습니다. 학교에서는 최근 3-5년의 연구 실적을 중심으로 평가하고, 학과마다 요구하는 지원 분야가 다르기

고등학생 대상 화학공화 관련 진로 탐색 인터뷰 현장.



# Q6

**앞으로의 (연구) 계획은 어떻게 되시나요?**

연구자로서의 앞으로의 계획과 철학을 한 문장으로 정리하자면, 저는 지도학생들이 스스로 원하는 연구를, 재미있게 할 수 있는 연구 환경을 만들고 싶습니다. 연구는 분명 쉽지 않은 과정이지만, 스스로 재미를 느끼는 주제라면 어려움에 부딪히더라도 오히려 빨리 해결하고 싶어지고, 다음 실험을 떠올리며 내일이 설레는 순간도 생긴다고 믿습니다. 지도학생들이 “이 실험은 꼭 해보고 싶다”, “이 결과는 빨리 논문으로 정리해 보고 싶다”는 적극적인 마음으로 연구에 임할 수 있다면, 그 자체가 가장 이상적인 연구실의 모습이라고 생각합니다. 개인적으로 학생들이 그런 감정을 느끼며 연구하는 시간을 많이 경험했으면 하는 바람이 있습니다. 빠른 시일 내에 경북대학교 소속 학생들과 함께 의미 있는 연구 결과를 도출하고, 이를 통해 독립적인 연구자로서의 연구 방향과 가능성을 분명히 보여주고 싶다는 포부를 가지고 있습니다. 연구 주제 측면에서는, 박사후연구원 과정 동안 수행했던 생체소재 기반 전자 소자 연구를 중심으로 연구를 이어갈 계획입니다. 다만 당시에는 미국 지도교수님의 연구 방향과 프로젝트를 따라가느라 시도해 보지 못했던 작은 아이디어들이 여럿 있었고, 앞으로는 그러한 아이디어들을 하나씩 풀어가는 연구를 해보고자 합니다. 크고 완성된 주제보다는, 질문에서 출발하는 연구를 통해 새로운 가능성을 만들어가는 데에 더 집중하고 싶습니다.

박사학위 수여식 당일, 지도교수님과 함께.





바이오전자소자연구실 소속 학생들과 캠퍼스 나들이.

## Q7

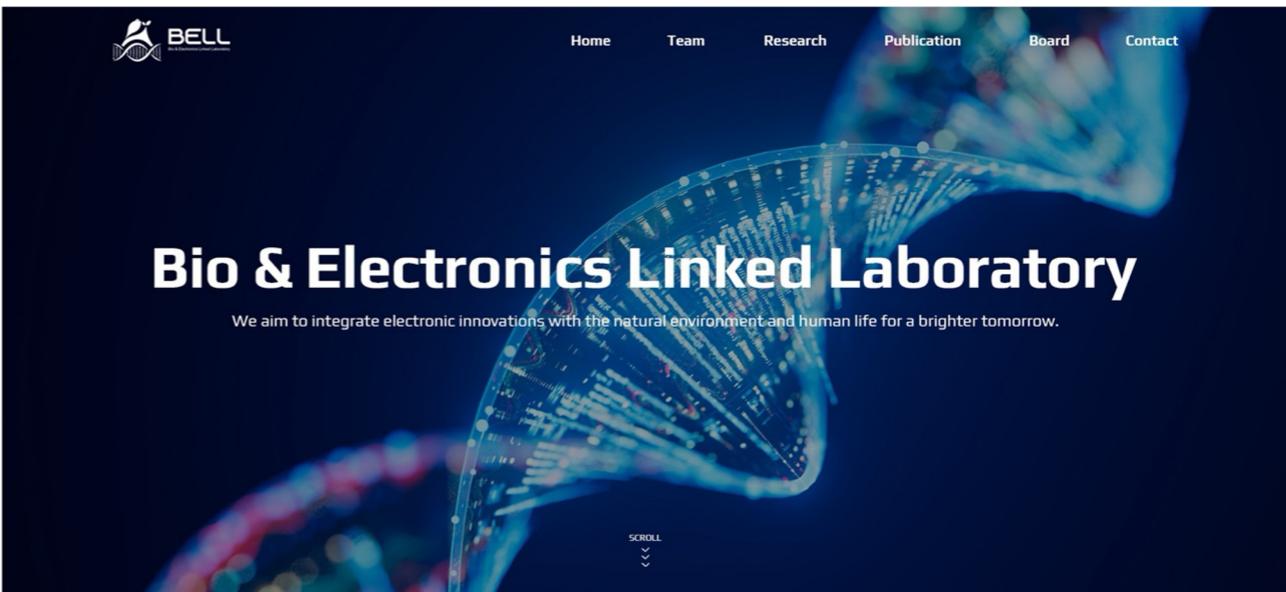
**현재 대학원에서 석/박사 학위과정을 밟고 있는 후배들에게, 힘이 될 수 있는 한마디 부탁드립니다.**

돌이켜보면 제 커리어는 처음부터 명확한 계획 아래 설계된 경로라기보다는, 매 순간 주어진 기회를 통해 선택하고 도전하며 형성된 결과라고 생각합니다. 진로와 취업을 고민하고 있는 대학(원)생 여러분께 전하고 싶은 메시지는, 완벽한 방향을 미리 정해두기보다 다양한 경험을 통해 스스로에게 맞는 길을 찾아가는 과정이 무엇보다 중요하다는 점입니다. 계획을 세운다고 해서 모든 일이 그 계획대로 이루어지지는 않지만, 연구를 비롯한 주어진 모든 일에 매 순간 열과 성을 다해 임하다 보면 그 모든 경험이 의미있는 발자취가 되어있더라구요. 또, 그 과정 속에는 여러분의 성장을 지켜보고, 때로는 조용히, 때로는 적극적으로 도와주시는 분들이 반드시 존재합니다. 많은 경우 그 중심에는 지도교수님이 계실 것입니다. 지도교수님과의 관계를 소중히 여기고, 좋은 연구적 호흡과 신뢰를 쌓기 위해 부단히 노력하다 보면, 예상하지 못했던 기회가 열리기도 하고, 중요한 선택의 순간에 보다 올바른 방향을 제시받을 수 있습니다. 제가 그랬던 것처럼요. 혼자 모든 것을 결정하고 감당해야 한다고 느끼는 순간에도, 여러분의 고민을 함께 나누고 길잡이가 되어줄 사람이 있다는 사실을 잊지 않으셨으면 합니다.

## Q8

**마지막으로, 'E<sup>2</sup>M - 전기전자와 첨단소재'를 통해 홍보하고 싶은 사항 또는 하고 싶은 이야기를 자유롭게 부탁드립니다.**

'Rookie Interview'를 통해 전기전자 및 재료 분야 연구자분들께 제 이야기를 전할 수 있어 기쁩니다. 이 인터뷰는 마치 한 장의 사진처럼, 신입교수 시절 제가 품고 있는 생각과 다짐, 그리고 포부를 글로 남길 수 있는 소중한 기록이 될 것이며, 훗날 초심을 되새길 수 있는 귀한 자료가 될 것이라 생각합니다. 앞으로 연구 활동은 물론, 전기전자재료학회의 다양한 학술 활동에도 적극적으로 참여하며, 학회 발전에 기여하고 싶습니다. 특히, 지도학생들과 함께 연구 성과를 공유하고, 학회에서 활발히 교류하며 젊은 연구자들이 성장할 수 있는 장을 만들어가는 데 힘을 보태고자 합니다. 우리 바이오전자소자 연구실(bio & electronics linked laboratory, BELL)에서는 전기·전자 소재, 소자, 그리고 생체 응용이 만나는 융합 연구를 수행하며, 우리 연구실만의 색깔을 열심히 만들어가고 있습니다. 연구실의 일상과 연구 이야기는 홈페이지에서도 확인하실 수 있으니, 관심 있으신 분들은 언제든지 편하게 찾아와 주시면 좋겠습니다 :) 🍀



바이오전자소자 연구실 홈페이지 메인 화면 [출처: 바이오전자소자 연구실 홈페이지].

# E<sup>2</sup>M

Electrical & Electronic Materials

**Vol. 39, No. 1**  
March 2026



## KIEEME Story

故 이준웅 교수님을 추모하며

...

KIEEME News

...

Best Paper



## 부록

2026 학회 조직

故 이준웅 교수님을 추모하며



# 이준웅 교수님! 보고 싶습니다.



매년 봄과 가을, 그리고 재료연구실 송년 모임에서 교수님을 뵙고, 그동안의 소식과 제자들의 근황을 나누며 따뜻한 격려와 때로는 안타까움을 함께 나누던 시간이 아직도 생생합니다. 그러던 중 교수님의 갑작스러운 부음을 접하고, 누구보다도 먼저 달려가 마지막 인사를 드렸지만, 가슴이 아리고 슬픈 마음은 억제할 수 없었습니다. 동시에 교수님과 함께했던 수많은 순간들이 한꺼번에 머릿속을 스쳐 지나갔습니다.



1994 추계학술대회.

교수님께서 프랑스 몽펠리에 대학에서 박사학위를 취득하신 이후 광운대학교에서 교편을 잡으시고, 여러 보직교수로 봉사하시며 학문과 교육에 평생을 헌신하셨습니다. 물리전자공학 등 14편의 저서를 집필하셨고, 전기·전자재료 분야에서 총 238편에 달하는 연구논문을 발표하시며 활발한 활동과 학생 지도에 힘을 쏟으셨습니다. 또한 한국전기전자재료학회와 대한전기학회에서 회장 및 임원으로 봉사하시며 학회의 기틀을 다지고 발전시키는 데 큰 공헌을 하셨습니다.

교수님께서 대한민국 전기·전자 분야 기술의 미래를 남들보다 앞서 내다보시고, 불모지와도 같던 전기·전자재료 분야를 개척하고자 하셨습니다. 은사이신 김봉흡 교수님을 비롯하여 강도열 교수님, 박창엽 교수님, 성영권 교수님, 이덕출 교수님 등 여러 교수님과 뜻을 모아, 서울 종로구 돈의동에서 제1대 김봉흡 회장님을 모시고 1987년 10월 말 서울 종로구 돈의동에서 제1대 김봉흡 회장님을 모시고 한국전기전자재료학회를 창립하신 일은 모두가 기억하는 큰 업적입니다.

이후 제8대 학회장으로 재임하시며, 1987년 약 300여 명의 회원으로 출발한 학회를 여러 대학의 교수님과 연구자, 개발자, 그리고 산업계와의 긴밀한 협력을 통해 비약적으로 성장시키셨습니다. 그 결과, 오늘날 회원 수 7천여 명에 이르는 학회로 도약할 수 있는 든든한 토대를 마련하셨습니다.

정년 이후에도 교수님께서 학회에 대한 깊은 애정을 놓지 않으시고, 2024년까지도 학회를 찾으시며 도움이 될 수 있는 일을 늘 고민하셨습니다. 특히 학회 영문 논문지(TEEM)가 KCI, SCOPUS, ESCI에 등재되었음에도 SCIE 등재로 이어지지 못한 점을 늘 안타까워하시며, 학회의 한 단계 더 높은 도약을 진심으로 염원하셨습니다.

2018 하계학술대회 환영리셉션.



그러면서도 지난 30여 년간 전기·전자·정보통신 산업 분야에서 첨단 소재와 전자부품 기술 발전의 주춧돌이 된다는 점, 그리고 학회의 국제화 노력의 결실로 ICAE 국제학술대회가 성공적으로 개최되고 있는 점을 누구보다 자랑스러워 하셨습니다.

교수님께서 학문과 학회뿐만 아니라 국가 사회에도 헌신 하셨습니다. 정부 산하 여러 기관과 주요 기관의 자문위원으로 활동하시며 실무 지도와 정책 결정에 이바지하셨고, 국가 기술 발전을 위한 책임 있는 역할을 수행하셨습니다.

여름이면 진흙밭이던 성북역 인근을 지나 광운공과대학으로 향하던 시절부터, 1970년대 전기공학과와 초창기를 거쳐 교수님께서 수많은 학부생과 100여 명이 넘는 대학원생을 길러내셨습니다. 그 제자들은 오늘날 사회 각계각층에서 눈부신 활약을 펼치고 있으며, 그래서 모든 여타 선배 교수님들도 그러하듯이 전국 어디를 가시더라도 즉석에서 제자들의 모임이 이루어질 만큼 교수님의 가르침은 깊고 넓게 퍼져 있습니다.



2019 임원선출 평의원회. 제3대 김용주 전임회장님과 함께.

2025년도 신년 인사회.



교수님께서 제자들에게 매우 엄격하셨지만, 탕크 같은 추진력으로 한 사람의 연구자로서 성장할 수 있도록 앞길을 열어 주신 분이셨습니다. 제자들이 학계와 산업계로 나아갈 수 있도록 직접 운전해 동행하시고, 비행기를 타고 제자와 함께 지원 대학을 찾으시며 길을 열어 주시던 그 모습은 모든 제자의 가슴 속에 평생 잊히지 않을 기억으로 남아 있습니다.

교수님께서 학회 당시 품으셨던 큰 뜻을 이어받아, 한국전기전자재료학회가 앞으로도 더욱 발전해 나가기를 기원하며, 교수님의 모습을 다시 한번 깊이 마음에 새깁니다. 🍀

2025년 말일에  
제자 이원재 드림

잊지 않겠습니다

# KIEEME News

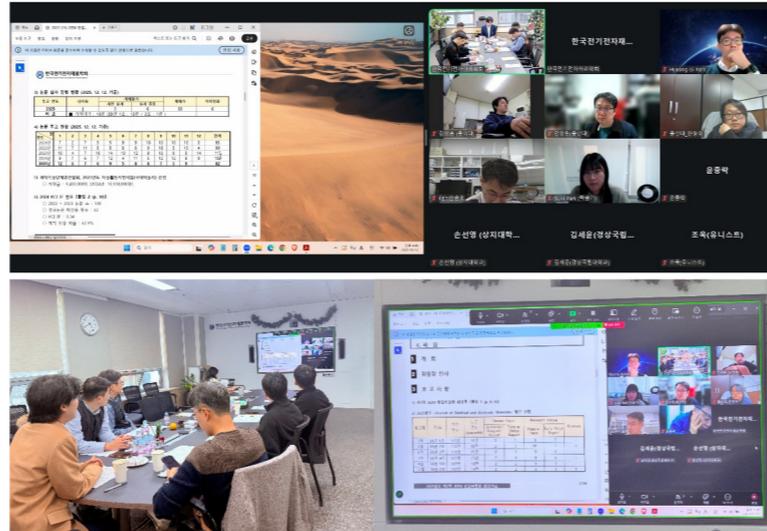
## 01 2025 교육위원회 송년회 2025년 12월 9일(화), 학회 회의실



교육위원회는 2025년 송년회를 개최하여 한 해 동안의 주요 활동 성과를 되돌아보는 시간을 가졌다. 이날 위원들은 지난 여정을 정리함과 동시에 2026년도 활동 계획을 내실 있게 수립하며 새해의 운영 방향을 공유했다.

## 02 2025년 제2차 국문지편집위원회 2025년 12월 12일(금), 학회 회의실 (온/오프라인)

제2차 국문지편집위원회 회의에서는 2025년도 <JEEM> 발간 현황을 공유하고, 2026년도 저널 경쟁력 강화를 위한 운영 계획을 수립했다. 특히 영문 논문 원고료를 증액하고 게재료 면제 혜택을 유지하는 등 투고 지원책을 대폭 강화하였다. 아울러 SCOPUS 등재를 준비하기 위해 홈페이지 업체 변경 계획에 대해 논의하였다.



## 03 제1차 운영위원회 2025년 12월 23일(화), 학회 회의실

제1차 운영위원회가 개최되었다. 연구회와 논문모집 분야와의 연계성을 강화하고, 최신 연구동향을 반영한 연구회를 신설하는 등의 전문연구회 활성화 방안에 대해 집중 논의하였다.



## 04 제2차 운영위원회 2025년 12월 30일(화), 학회 회의실

2026년도 학술대회 활성화를 위한 제2차 운영위원회 회의가 개최되었다. 이번 회의에서는 'ICAE 심포지엄 및 논문 모집 분야와의 연동' 및 '최신 기술 트렌드를 반영한 신규 분야 신설' 등의 연구회 개편 방안이 집중 논의되었다.

## 05 2025 편집위원회 통합 송년회 2025년 12월 30일(화), 여회장택

학회지, 영문지, 국문지 편집위원회가 한자리에 모여 한 해의 성과를 공유하고 결속을 다지는 통합 송년회를 개최하였다. 각 위원회가 2025년 거둔 학술적 결실을 되돌아보는 동시에, 편집 운영의 노하우를 공유하며 위원들 간의 유대를 강화하였다.



## 06 제1차 이사회 2026년 1월 8일(목), 한국과학기술회관 12층 아나이스홀

한국과학기술회관 아나이스홀에서 제1차 이사회가 개최되었다. 이날 회의에서는 각 부서별 보고와 함께, 1) 2026년도 협력이사 및 각 위원회 위원 구성 승인의 건 2) 학회지 웹진 출판 전환의 건 3) JEEM 영문논문 게재료 면제 운영 연장 및 영문 원고료 인상(안)의 건 4) 2026년도 학술대회 전시부스 참가비 인상의 건 5) 전문연구회 개편의 건에 대하여 심의하였으며, 4번 안건을 제외하고 원안대로 승인하였다. 4번 안건은 차기 이사회에서 재논의하기로 하였다.



# K IEEEM News

한국과학기술회관 아나이스홀에서 2026년도 신년인사회가 개최되었다. 오승주 총무이사가 사회를 맡았으며, 최지원 회장의 신년 인사, 명예회장들의 격려사, 2026년도 임원 소개 및 선임장 수여가 진행되었다. 제34대 최지원 회장은 '연구회 개편을 통해 학술대회 규모를 2,000명 이상으로 확대'하고 '논문지의 SCIE·SCOPUS 등재 추진으로 글로벌 수준의 산학연 협력 시스템을 구축'하겠다고 포부를 밝혔다.

## 07 2026년도 신년 인사회

2026년 1월 8일(목), 한국과학기술회관 12층 아나이스홀



## 10 제1차 산학연 협력위원회

2026년 2월 3일(화), 학회 회의실 (온/오프라인)

온/오프라인으로 제1차 산학연 협력위원회가 개최되었다. 이번 회의에서는 산업계·학계·연구계 매칭 플랫폼 개설 등 산학연의 긍정적인 네트워킹을 위한 여러 방안에 대해 토의하였다.



## 08 제1차 SCIE 추진위원회

2026년 1월 26일(월), 학회 회의실

영문 논문지(TEEM)의 국제적 위상을 높이기 위해 제1차 SCIE 추진위원회가 개최되었다. 이번 회의에서는 지난해 TEEM 발간 및 심사·투고 진행사항을 살펴보고 최근 영향력 지수(IF) 현황을 공유하며 논문지가 나아갈 방향에 대해 논의하였다.



## 09 제1차 학술위원회

2026년 2월 2일(월), 학회 회의실 (온/오프라인)

온/오프라인으로 제1차 학술위원회가 개최되었다. 이번 회의에서는 하계학술대회 규모를 확대하고 전문연구회 체계를 강화하기 위한 방안에 대해 집중 논의하였다. 등록비를 동결하는 대신 중식을 기프트 카드로 대체하고 학생 만찬을 선택제로 운영하는 등 운영 효율을 높였으며, 기업체 특별 세션과 신진과학자 프로그램 등을 통해 산학연 협력을 공고히 할 계획이다.



## 11 제1차 학회지 편집위원회

2026년 2월 6일(금), 학회 회의실 (온/오프라인)

온/오프라인으로 제1차 학회지 편집위원회가 개최되었다. 이번 회의에서는 2026년도 신규 위원 보강 사항을 공유하고, 편집위원회 운영 방향을 논의하였다. 또한 제10회 재료사진공모전 홍보 및 참여 확대 방안에 대해 논의하고, 2026년 6월호부터 학회지 온라인(Webzine) 전환 계획을 공유하고, 이에 따른 운영 및 홍보 방안을 검토하였다.



# Best Paper

Journal of Electrical and Electronic Materials  
〈전기전자재료학회논문지〉  
Vol. 39, No. 1

## Piezoelectric Speaker Technologies

Muhammad Sheeraz<sup>1</sup>,  
정연학<sup>2</sup>, 정순중<sup>3</sup>, 안창원<sup>4</sup>

- 1 울산대학교반도체공학과
- 2 ㈜BNC
- 3 한국전기연구원 전력변환연구센터
- 4 울산대학교 기초과학연구소

Corresponding author;  
a. cwahn@ulsan.ac.kr

### Abstract

The growing demand for thinner, lighter, and more energy-efficient electronic systems has driven the development of acoustic technologies toward compact and flexible sound generation platforms. Despite significant progress, conventional electromagnetic speakers remain limited by bulky structures, energy losses, and poor compatibility with modern ultrathin devices. In this review, recent advancements in piezoelectric acoustic systems are presented, demonstrating a new generation of speakers capable of producing high-fidelity sound from ultra-slim, lightweight, and mechanically compliant designs. Through refined structural configurations and efficient electromechanical coupling, these piezoelectric exciters achieve strong acoustic output, fast response, and wide frequency operation while drastically reducing component thickness. These exciters also show their suitability for seamless integration into flexible displays, wearable devices, and automotive panels, offering enhanced spatial audio practicality and multifunctional operation, including demonstrative output and sensing. This advancement marks a step toward the convergence of acoustic, haptic, and interactive technologies, for the realization of sustainable and immersive human-machine interfaces in future electronic and automotive systems.

**Keywords** Piezoelectric, speakers, multilayers, ceramics, flexible, display, automobiles

Journal of Electrical and Electronic Materials  
〈전기전자재료학회논문지〉  
Vol. 39, No. 2

## 전기화학적 질산염-암모니아 전환을 위한 이중층상수산화물 촉매 연구 동향

남윤지<sup>†</sup>, 손부경<sup>†</sup>,  
지휘수<sup>†</sup>, 김건환<sup>‡</sup>

국립부경대학교 융합소재공학부  
재료공학전공

<sup>†</sup>저자들이 동등하게 기여하여 작성되었음.

Corresponding author;  
a. keon-han.kim@pknu.ac.kr

### Abstract

This review systematically examines the structural characteristics, compositional design strategies, and recent research trends of layered double hydroxides (LDHs), which are recognized as promising electrocatalyst materials in electrochemical nitrate-to-ammonia conversion. Despite the rapid growth in related research, achieving simultaneous high selectivity and efficiency remains a significant technical challenge due to the complex mechanisms of the nitrate reduction reaction (NitRR) and its inherent competition with the hydrogen evolution reaction (HER). In this study, we analyzed the structural contributions of LDH catalysts for maximizing nitrate reduction efficiency and systematically established key catalyst design indicators required to ensure optimal performance. Specifically, we provide a detailed investigation of the physicochemical mechanisms for enhancing NH<sub>3</sub> production by precisely regulating the adsorption energies of reaction intermediates and maximizing charge transfer efficiency through compositional control and defect engineering. Furthermore, we discuss advanced structural design strategies, such as core-shell tandem structures, MOF-derived architectures, and interlayer anion control, as effective methods for enhancing catalytic performance and optimizing mass transport processes. These insights offer a strategic roadmap for designing high-performance LDH catalysts and represent a critical step toward the practical implementation of sustainable green ammonia production systems, particularly for integration into high-efficiency membrane electrode assembly (MEA) technologies.

**Keywords** Layered double hydroxide, Electrocatalyst, Electrochemical nitrate reduction, Green ammonia

# Best Paper

Journal of Electrical and Electronic Materials  
〈전기전자재료학회논문지〉  
Vol. 39, No. 2

## Corning Ribbon Ceramic : A Roll-to-Roll, Continuous Sintering Platform for Ultra-Thin Technical Ceramics and Applications

한재현<sup>a</sup>

코닝 정밀연구 한국연구소

Corresponding author;  
a. jaehyunhan@conring.com

### Abstract

This review introduces Corning's Ribbon Ceramic process and the broader idea of ribbon ceramics—continuous, ultra-thin ceramic sheets made by tape or slot-die casting and fast, continuous sintering—covering key materials such as Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, YSZ/ScSZ, PZT, LLZO, and LCO. Motivated by the need for scalable, energy-efficient ceramic components for electrification (green-hydrogen SOECs), next-generation Li-metal batteries, and compact piezo devices, we summarize capabilities and use cases using only publicly available information. Our main contribution is a clear platform view: continuous roll-to-roll conveyance with minutes-scale firing produces fully dense, fine-grained, high-purity ceramics at ~10-100 μm thickness with smooth native surfaces and controlled shapes, delivered as long rolls (up to ~300 ft), panels (~100 mm wide), or narrow strips (~0.5 mm). Illustrative results include 20-40 μm 3YSZ electrolytes for SOECs (high oxygen-ion conductance, ~1 GPa bend strength), LLZO garnet separators that cycle at 25°C with interlayers, and free-standing LCO cathode ribbons tunable from dense to ~30% porous. For piezo acoustics, 60-80 μm PZT sheets (d<sub>33</sub> ~300 pC/N) enable fine metallization and on-screen speakers, while fast firing reduces volatile loss and yields smaller grains. Together, these advances point to high-volume, lower-footprint manufacturing and faster adoption of novel ceramic membranes and substrates in SOEC/green-hydrogen systems, solid-state or hybrid lithium batteries, RF/power electronics, and piezo applications.

**Keywords** Ribbon ceramic, Corning, Fast firing process, Roll-to-roll process

Journal of Electrical and Electronic Materials  
〈전기전자재료학회논문지〉  
Vol. 39, No. 2

## Recent Progress on Transition Metal-Based Oxygen Evolution Reaction Electrocatalysts in Alkaline Medium

박경배<sup>1,†a</sup>, 한다운<sup>1,2,†</sup>,  
김원래<sup>1</sup>, 양승민<sup>1</sup>

1 한국생산기술연구원 기능성소재부품그룹

2 한양대학교 신소재공학부

†저자들이 동등하게 기여하여 작성되었음.

Corresponding author;  
a. gpark@kitech.re.kr

### Abstract

Electrochemical water splitting has emerged as a pivotal technology for green hydrogen production, offering a viable pathway toward a sustainable energy future. Among various electrolysis systems, Anion exchange membrane water electrolysis is particularly noteworthy as a cost-effective solution capable of operating under the fluctuating power inputs typical of renewable energy sources. However, the overall efficiency of water splitting is fundamentally limited by the oxygen evolution reaction, which exhibits sluggish kinetics compared to the hydrogen evolution reaction. While IrO<sub>2</sub> and RuO<sub>2</sub> serve as current benchmarks, their scarcity and high cost necessitate the development of earth-abundant alternatives. This review provides a comprehensive overview of fundamental OER mechanisms including the adsorbate evolution mechanism, lattice oxygen mechanism, and oxide path mechanism while highlighting how new pathways can circumvent traditional scaling relations. We discuss recent advancements in transition metal-based electrocatalysts, encompassing oxides, hydroxides, chalcogenides, phosphides, nitrides, and carbides, with a focus on innovative design strategies such as defect engineering, heteroatom doping, and heterostructure construction. This paper concludes by addressing current challenges and offering perspectives on future directions for the development of highly efficient and economically viable oxygen evolution electrocatalysts for large-scale applications.

**Keywords** Noble metal-free, Electrocatalysts, Alkaline, Oxygen evolution reaction

THE KOREAN INSTITUTE OF  
ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
MATERIAL ENGINEERS



부록  
2026  
학회 조직

The Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers

상훈심의위원회

위원장 최지원 회장/KIST

위원 조 육 기획이사/울산과학기술원 | 오승주 총무이사/고려대 | 오종민 재무이사/광운대  
김지완 편집이사/서울시립대 | 정창규 편집이사/전북대 | 김수영 편집이사/고려대 | 오민석 학술이사/KETI  
이순일 학술이사/국립창원대 | 백정민 국제이사/성균관대 | 박성대 사업이사/KETI  
백세웅 교육이사/고려대

선거관리위원회

위원장 이재형 차기회장/성균관대

부위원장 조 육 기획이사/UNIST | 오승주 총무이사/고려대

위원 신호순 KICET | 김도영 울산과학대 | 오종민 광운대 | 손선영 상지대

윤리위원회

위원장 조한구 감사/성균관대

위원 오종민 재무이사/광운대 | 김지완 편집이사/서울시립대 | 정창규 편집이사/전북대 | 김수영 편집이사/고려대  
백종후 감사/KICET | 오민석 학술이사/KETI | 이순일 학술이사/국립창원대

기획위원회

- 위원장** 조 옥 울산과학기술원
- 부위원장** 김태현 KIST | 임유승 세종대 | 조형균 성균관대 | 최덕현 성균관대
- 위원** 최문기 UNIST | 박귀일 경북대 | 황건태 부경대 | 이한얼 전북대 | 한형수 울산대

TEEM 논문지 편집위원회

- 위원장** 김수영 고려대
- 부위원장** 김영훈 성균관대 | 장지수 KIST | 장호원 서울대 | 고중혁 중앙대
- 자문위원** 조형균 성균관대 | 김성진 충북대 | 박형호 연세대 | 윤성민 경희대
- 위원** 강기범 KAIST | 김영훈 한양대 | 김종순 성균관대 | 김지완 서울시립대 | 박태준 고려대  
오민석 KETI | 오승주 고려대 | 유상우 경기대 | 류학기 아주대 | 유효빈 서울대  
이기문 국립군산대 | 이동화 포항공과대 | 이미경 인천대 | 이상한 GIST | 임기식 한국폴리텍대

SCIE 추진위원회

- 위원장** 최지원 회장/KIST
- 부위원장** 김수영 고려대
- 위원** 김상우 연세대 | 김영훈 성균관대 | 오민석 한국전자기술연구원 | 오승주 고려대 | 장호원 서울대

JEEM 논문지 편집위원회

- 위원장** 정창규 전북대
- 부위원장** 황건태 부경대 | 박귀일 경북대 | 최문기 UNIST | 한형수 울산대
- 자문위원** 기현철 KOPTI | 김영훈 성균관대 | 류정호 영남대 | 이원재 동의대 | 이재형 성균관대 | 장호원 서울대  
조 옥 UNIST
- 위원** 김기환 경상대 | 김성훈 동의대 | 김세윤 경상국립대 | 김영민 전남도립대 | 김주현 중앙대  
김한솔 충북대 | 민유호 경북대 | 박슬기 전북대 | 배시영 국립부경대 | 상민규 가천대 | 서인태 KETI  
서준기 울산과학기술원 | 손선영 상지대 | 안창원 (주)퀀테스 | 윤중락 삼화콘덴서공업  
이성갑 경상국립대 | 이승기 부산대 | 이윤경 전북대 | 이한얼 전북대 | 임준원 경희대 | 임천용 전북대  
정성민 KICET | 진형민 충남대 | 최성환 한국공학대 | 최창순 한양대 | 하민정 광주과학기술원  
한승호 KETI | 한재현 코닝정밀소재

E²M 학회지 편집위원회

- 위원장** 김지완 서울시립대
- 부위원장** 하돈형 중앙대 | 원상민 성균관대 | 정승준 고려대 | 김윤석 성균관대
- 자문위원** 오민석 KETI | 오종민 광운대 | 최지원 KIST
- 위원** 김동영 부경대 | 김명길 성균관대 | 김수진 고려대 | 김영국 성균관대 | 김영훈 성균관대  
김재훈 가천대 | 김진식 동국대 | 남인호 중앙대 | 노지형 대구경북첨단의료산업진흥재단  
류채우 홍익대 | 박수형 KIST | 백세웅 고려대 | 변명환 계명대 | 양현승 KETI | 양희선 홍익대  
오승주 고려대 | 유강열 KIST | 이철호 서울대 | 임유승 세종대 | 임준원 경희대 | 정선호 경희대  
정소희 KIST | 조기현 단국대 | 주종훈 GIST | 황도경 KIST

**학술위원회**

- 위원장** 오민석 KETI | 이순일 창원대
- 부위원장** 강주훈 연세대 | 김용우 LI소재 | 김용주 고려대 | 김종규 포항공과대 | 김효정 세종대  
양희선 홍익대 | 우주영 KITECH | 유승호 고려대 | 이규형 연세대 | 이금비 경북대  
이기문 군산대 | 이철호 서울대 | 정유진 영남대 | 황도경 KIST
- 위원** 기현철 KOPTI | 김기환 경상대 | 김상우 연세대 | 김영훈 성균관대 | 김지완 서울시립대  
류정호 영남대 | 문석호 아주대 | 민성욱 동국대 | 박종남 UNIST | 백세웅 고려대  
상민규 가천대 | 송현철 고려대 | 신원호 광운대 | 안종태 창원대 | 오승주 고려대  
오종민 광운대 | 유강열 KETI | 유상우 경기대 | 이규복 충남대 | 이기영 홍익대  
이지열 부경대 | 임원빈 한양대 | 장호원 서울대 | 정선호 경희대 | 정창규 전북대  
조힘찬 KAIST | 최연식 연세대

**국제위원회**

- 위원장** 백정민 성균관대
- 부위원장** 송현철 고려대 | 이재현 성균관대 | 이진욱 서울대 | 허성훈 KIST
- 위원** 김경남 충남대 | 최경후 성균관대

**ICAE위원회**

- 위원장** 최지원 회장/KIST
- 부위원장** 이재형 차기회장/성균관대
- 간사** 백정민 국제이사/성균관대
- 위원** 임유승 세종대 | 이순일 창원대 | 손선영 상지대

**산학연 협력위원회**

- 위원장** 박성대 KETI
- 부위원장** 기현철 KOPTI | 김도영 울산과학대 | 김진모 KOPTI | 박진주 청주대 | 박 영 한밭대 | 박진홍 성균관대  
김상모 원테크솔루션 | 강형원 KETI | 최종민 맥사이언스
- 위원** 김민기 삼화콘덴서공업 | 김민수 KITECH | 김성진 충북대 | 김윤호 한국화학연구원  
김은도 (주)아스트로텍 | 임재홍 가천대 | 임호선 숙명여대 | 전창준 (주)티엘비 | 최현석 (주)에스엠티  
한병동 한국재료연구원

**교육위원회**

- 위원장** 백세웅 고려대
- 부위원장** 구자영 효성중공업 | 김종만 전남도립대 | 김형진 울산과학대 | 문한얼 동아대 | 백승협 KIST  
이동원 한국산업기술시험원
- 위원** 김도영 울산과학대 | 김민경 광운대 | 김봉준 숙명여대 | 김성훈 동의대 | 류한준 중앙대 | 박성대 KETI  
박성준 아주대 | 박윤석 경희대 | 신원호 광운대 | 심현석 부산대 | 양현승 KETI | 오승주 고려대  
오종민 광운대 | 원상민 성균관대 | 유재영 성균관대 | 이석희 차세대지능형반도체사업단  
이한보람 인천대 | 임준원 경희대 | 임호선 숙명여대 | 정윤장 고려대 | 정창규 전북대

**사이버정보화위원회**

위원장 오승주 고려대

부위원장 김 혁 서울시립대

위원 정창규 전북대 | 박태준 고려대 | 정윤장 고려대 | 조기현 단국대 | 유강열 KETI | 김용주 고려대

**특별기금관리위원회**

위원장 최지원 회장

위원 이재형 차기회장 | 오종민 재무이사 | 임기조 전임회장 | 박대희 전임회장 | 신훈규 전임회장  
김도영 울산과학대

**지부(지부장)**

강원지부	안철현 강릉원주대
광주·전남지부	차상준 서정전기
대구·경북지부	신훈규 포항공과대
부산·경남·울산지부	신호순 한국세라믹기술원
전북지부	이기태 전북대
충청지부	류호준 한국전자통신연구원

**전문연구회(위원장)**

반도체 재료·공정 연구회	최병준 서울과학기술대
기능성 박막·센서 연구회	김기환 경상국립대
디스플레이·광전소자 연구회	황도경 KIST
전자재료 연구회	고중혁 중앙대
고기능성 전기재료 연구회	이재형 성균관대
에너지하베스팅재료 연구회	최경후 성균관대
전기화학 에너지전환 재료 연구회	하든형 중앙대
2차전지 연구회	강병우 포항공과대
산화갈륨기술 연구회	문재경 한국전자통신연구원
SiC 반도체 재료와 소자 연구회	방 옥 한국전기연구원
전자 패키징 소재 연구회	김지훈 국립공주대학교
융복합 태양전지 연구회	정채환 한국생산기술연구원
디지털 바이오 전자 소자·시스템 연구회	원상민 성균관대
전기기술교육 연구회	김종만 전남도립대



## 2026년도 학회비 안내

회원 여러분의 건승하심을 기원합니다.

2026년도 회비, 논문구독료와 논문심사로 및 게재료를 아래와 같이 안내하오니 협조하여 주시기 바랍니다.

## 학회비

## 1. 일반 회비

회원별	입회비(가입 시)	연회비	합계
정회원	10,000원	75,000원	85,000원
학생회원	5,000원	35,000원	40,000원

## » 회원자격 (정관 제2장 제6조)

- 정회원 : 이 법인의 목적에 찬동하고 이 법인의 대상으로 하는 영역 또는 이와 관련있는 영역에 대한 전문학식, 기술 또는 경험을 가진자로 이사회의 승인을 얻은 자로 한다.
- 학생회원 : 학생회원은 이 법인의 대상으로 하는 영역의 대학원(석사과정), 대학 및 전문대학에 재학하는 자 또는 이에 준하는 자로 이사회의 승인을 얻은 자로 한다.

2. 특별 회비 (기업 및 연구소) : 1,000,000원 이상

3. 단체 회비 (도서관, 자료실) : 300,000원

4. 종신 회비 : 1,125,000원 (정회원 회비 15년분, 50세 이상은 10년분 750,000원)

## 논문 게재료 및 심사료

구분	면수	게재료	일반 심사료	긴급 심사료	감사의 글 게재
국문지	저자가 모두 회원인 경우	1면~6면	30,000원/면	없음	일반논문 게재료의 1.5배
	저자 중에 비회원이 있는 경우		40,000원/면		
	저자가 모두 회원인 경우	7면 이상	40,000원/면		
	저자 중에 비회원이 있는 경우		50,000원/면		
영문지		없음	없음	300,000원 (편당)	없음

## 납부방법

- 계좌이체 : 수협은행 0538-7958-7958(예금주 : 한국전기전자재료학회)
- 카드결제 : www.kieeme.or.kr/회원/로그인/마이페이지/회비납부
- 문의 : 한국전기전자재료학회 사무국 진영은 과장 Tel. 02-538-7958 E-mail. webmaster@kieeme.or.kr

학회지 『E<sup>2</sup>M - 전기 전자와 첨단 소재』 독자 참여 안내

『E<sup>2</sup>M - 전기 전자와 첨단 소재』는 한국전기전자재료학회에서 발행하는 전기전자재료 분야의 새로운 소식 및 연구 개발 동향, 학회 소식 등을 전하는 소식지입니다. 학회지에 기고를 희망하시는 회원님께서서는 사무국으로 이메일(kieeme@kieeme.or.kr)을 보내주세요. 회원님들의 적극적인 참여를 기다립니다.

## » Special Theme

담당권호	테마 주제	담당 위원	E-mail
39권 2호(2026년 6월)	IoT용 보안 소재 및 소자 기술	오승주 (고려대학교)	sjoh1982@korea.ac.kr
39권 3호(2026년 9월)	III-V족 화합물 반도체 기반 마이크로 LED 소재 및 디스플레이 기술 동향	유강열 (한국전자기술연구원)	gyyoo@keti.re.kr
39권 4호(2026년 12월)	Physical AI를 위한 소프트 일렉트로닉스	정승준 (고려대학교)	seungjun@korea.ac.kr
40권 1호(2027년 3월)	열 레이저 에피택시 기반 차세대 에피택셀 성장 기술	김동영 (부경대학교)	dykim@pknu.ac.kr

## » 기업탐방

담당권호	담당 위원	E-mail
39권 2호(2026년 6월)	노지형 (대구경북첨단의료산업진흥재단)	jhr726@kmedihub.re.kr
39권 3호(2026년 9월)	김영국 (성균관대학교)	bri3tain@skku.edu
39권 4호(2026년 12월)	김진식 (동국대학교)	lookup2@dongguk.edu
40권 1호(2027년 3월)	박수형 (한국과학기술연구원)	soohyung.park@kist.re.kr

## » 연구실소개

담당권호	담당 위원	E-mail
39권 2호(2026년 6월)	원상민 (성균관대학교)	sangminwon@skku.edu
39권 3호(2026년 9월)	하동형 (중앙대학교)	dhha@cau.ac.kr
39권 4호(2026년 12월)	남인호 (중앙대학교)	inhonam@cau.ac.kr
40권 1호(2027년 3월)	류채우 (홍익대학교)	cryu@hongik.ac.kr

## » VISIT : 국제 학술대회 참가기

담당권호	담당 위원	E-mail
39권 2호(2026년 6월)	오종민 (광운대학교)	jmoh@kw.ac.kr
39권 3호(2026년 9월)	정선호 (경희대학교)	sjeong@khu.ac.kr
39권 4호(2026년 12월)	양현승 (한국전자기술연구원)	hsyang@keti.re.kr
40권 1호(2027년 3월)	김명길 (성균관대학교)	myunggil@skku.edu

## » VISIT : 해외 연구 기관 탐방

담당권호	담당 위원	E-mail
39권 2호(2026년 6월)	김재훈 (가천대학교)	jaehoonkim@gachon.ac.kr
39권 3호(2026년 9월)	변명환 (계명대학교)	myunghyun@kmu.ac.kr
39권 4호(2026년 12월)	김수진 (고려대학교)	kimsjku@korea.ac.kr
40권 1호(2027년 3월)	임준원 (경희대학교)	joonwon.lim@khu.ac.kr

## » Column

담당권호	담당 위원	E-mail
39권 2호(2026년 6월)	김영훈 (성균관대학교)	yhkim76@skku.edu
39권 3호(2026년 9월)	임준원 (경희대학교)	joonwon.lim@khu.ac.kr
39권 4호(2026년 12월)	김지완 (서울시립대학교)	jiwank@uoa.ac.kr
40권 1호(2027년 3월)	조기현 (단국대학교)	kihyunc@dankook.ac.kr

## » Rookie Interview

담당권호	담당 위원	E-mail
39권 2호(2026년 6월)	황도경 (한국과학기술연구원)	dkhwang@kist.re.kr
39권 3호(2026년 9월)	정경재 (성균관대학교)	k.jeong@skku.edu
39권 4호(2026년 12월)	원상민 (성균관대학교)	sangminwon@skku.edu
40권 1호(2027년 3월)	백세웅 (고려대학교)	sewoongbaek@korea.ac.kr

문의 한국전기전자재료학회 사무국 서유빈 사원 Tel. 02-538-7949 E-mail kieeme@kieeme.or.kr

# CALL FOR PAPERS

## 전기전자재료학회논문지

Journal of Electrical and Electronic Materials

Journal of Electrical and Electronic Materials is published 6 times annually by the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers (KIEEME). Abbreviated title is 'J. Electr. Electron. Mater.'. It was launched in 1988. It is devoted to reports of original short communications, research and review articles.

The 'J. Electr. Electron. Mater.' encompasses all types of Semiconductor Materials and Processes, Functional Thin Films and Sensors, Display and Photoelectric Devices, Electronic Materials, High Voltage Direct Current and Insulation Materials, Energy Harvesting Materials, Fuel Cells and Water Electrolysis, Secondary Battery, Organic-Inorganic Hybrid, Electrical Technology Education, Gallium Oxide Technology, and Silicon Carbide Semiconductor Materials and Devices and so on. Full text is freely available from: <http://www.jkieeme.org/paper/intro/intro03.htm>. It is printed on acid-free paper. Indexed in Korea Citation Index.

Use the 'Submit Your Paper' link in our online system here:

<http://www.jkieeme.org/>

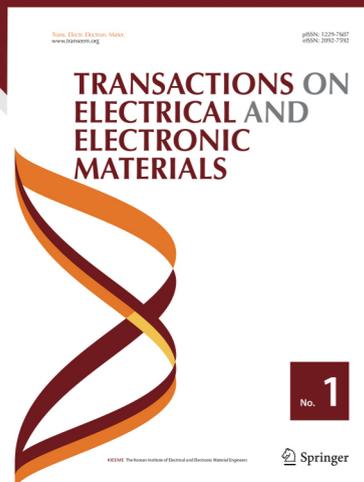
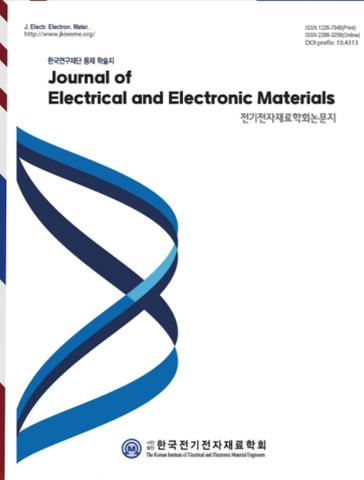
## TEEM

Transactions on Electrical and Electronic Materials

Transactions on Electrical and Electronic Materials enables professionals in research and industry to keep track of up-to-date developments in Electrical and Electronic Materials fields and their importance for future developments and success. This journal contributes toward development and propagation of science and technology regarding electrical, electronic materials, and also makes contribution toward scientific technical promotion and national industrial development

Use the 'Submit Your Paper' link in our online system here:

<https://www.editorialmanager.com/teem/>



For further assistance, contact us via

[manage@kieeme.or.kr](mailto:manage@kieeme.or.kr)

☎ 02-538-7959

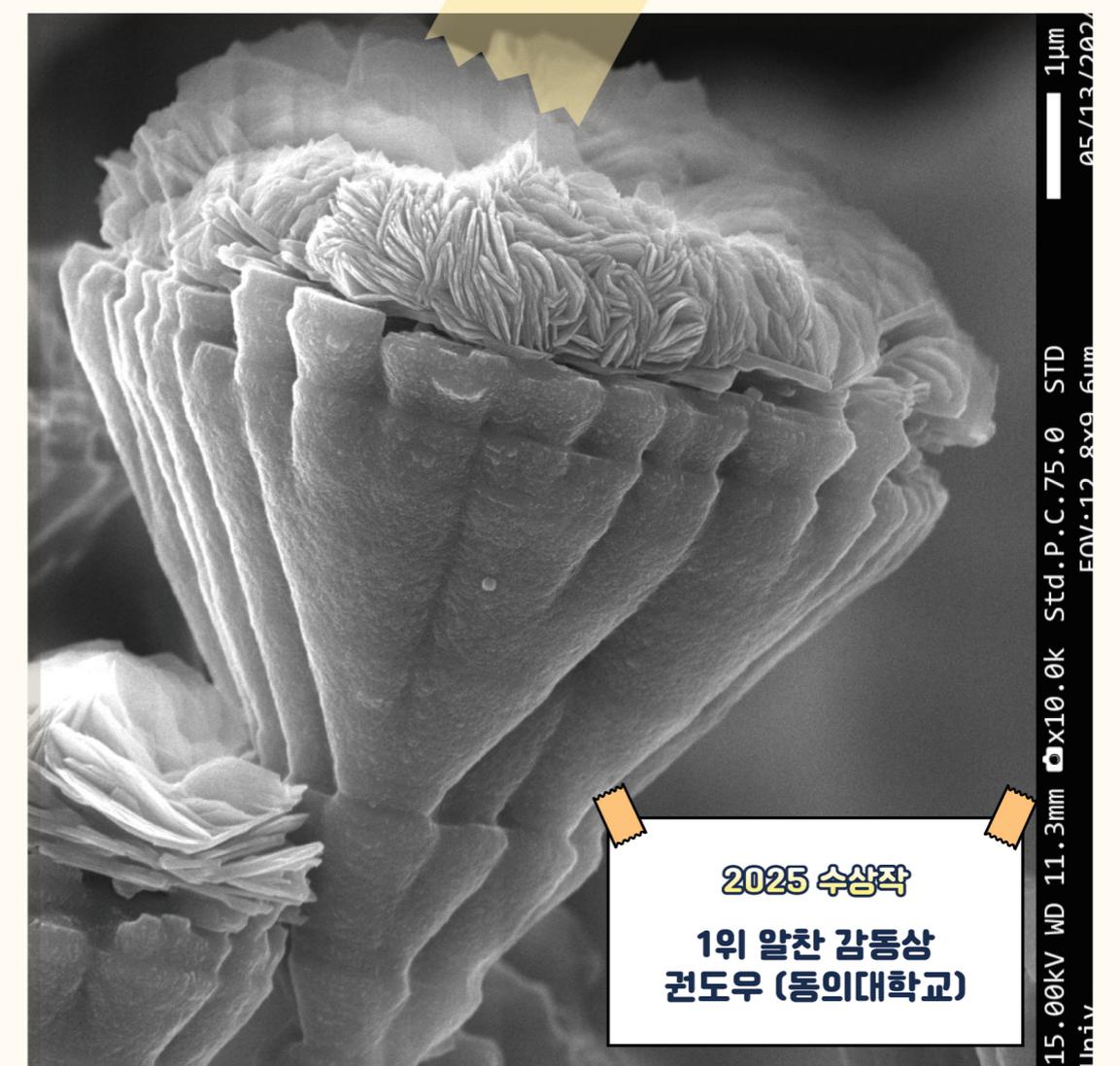


# 2026 한국전기전자재료학회

## 제10회 재료사진공모전

접수마감  
**2026. 4. 17 (금)**





**2025 수상작**

**1위 알찬 감동상**

**권도우 (동명대학교)**

**일정**

작품 접수	심사	결과 발표	시상	수상작 전시
<b>4. 17(금)까지</b>	<b>4~5월 중</b>	<b>5. 22(금)</b>	<b>6. 25(목)</b>	<b>6. 24(수) ~ 6. 26(금)</b>

\* 일정은 진행 상황에 따라 변경될 수 있습니다.  
\* 수상작 전시 및 시상식 - '부산 벡스코 컨벤션홀(2026년도 하계학술대회)에서 진행될 예정입니다.'

# NGPT 2026

8th International Conference on  
Nanogenerators and Piezotronics

June 9-12, 2026

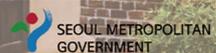
Sungkyunkwan University, Seoul, Korea

*Global Synergy for  
Self-Powered Solutions*

## SAVE THE DATES

Abstract Submission Due	15-DEC-2025
Abstract Acceptance	31-JAN-2026
Author/Early Registration Due	15-MAR-2026
Preliminary Program Announcement	01-APR-2026
Final Program Announcement	01-MAY-2026

ORGANIZED BY SUPPORTED BY



KIEEME  
ANNUAL  
SUMMER  
CONFERENCE

.....

# 2026

한국전기전자재료학회

# 하계학술대회

[www.kieeme.or.kr](http://www.kieeme.or.kr)

2026. 6. 24<sup>W</sup>-26<sup>F</sup>  
부산 BEXCO 컨벤션홀



---

제8대 전임회장  
故 이준웅

(1940~2025)

---

故 이준웅 전임회장은 프랑스 몽펠리에 대학에서 박사학위를 취득한 후 광운대학교에서 평생을 학문 연구와 인재 양성에 헌신하며 국내 전기·전자재료 분야의 기틀을 세운 선구자로서, 238편의 논문과 14편의 저서를 남기는 탁월한 학술적 성취를 거두었을 뿐만 아니라 한국전기전자재료학회 제8대 회장을 역임하며 학회를 비약적으로 성장시키고 국가 기술 발전에 이바지하였다.