

화학세계

CHEMWORLD

CODEN HWSEEX 66(05) ISSN 1225-004X



읽기쉬운 총설

분자접착분해제(Molecular Glue Degradar)의 발전과 발굴 전략 동향

이달의 하이라이트

최신 고분자 합성 기술 동향: 지속가능성, 정밀 중합 및 인공지능 기반 소재 설계

화학교육

화학 실험 상황에서 스마트폰은 우리의 눈이 될 수 있을까?
: 드라이아이스 실험에서 마주한 알파 세대의 '관찰'

우수선도연구기관

POSTECH 분자기반 노화 연구실

INTERVIEW

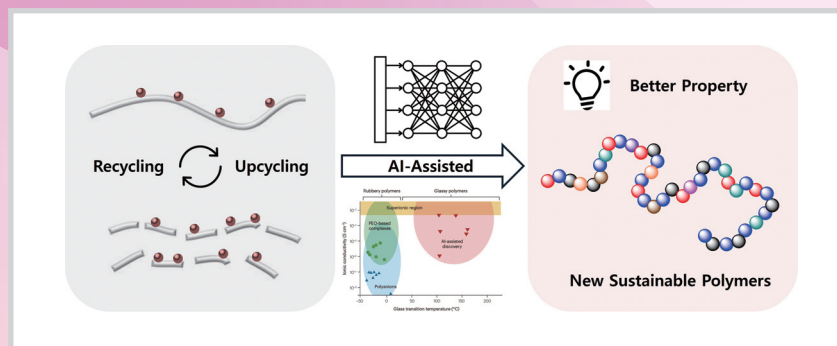
화학세계가 만난 화학자 | 한태동(Dt&C Bio Group 부회장, 前 앵티스(AbTis) 대표)

한국을 빛낸 화학자

최동훈 교수

05

제66권 제5호
May 2026



〈이달의 하이라이트〉 지속가능한 고분자 중합 및 인공지능 기반 고분자 설계 전략

“앞서가는 화학회, 공식후원사와 함께 합니다.”



Healthier Future for Humanity with Genomic Technology

BIONEER
Innovation • Value • Discovery

BIONEER Global Center

바이오니아는 1992년, 국내 최초로 올리고뉴클레오타이드 합성 서비스와
내염성 DNA 중합효소 등 유전자 증폭 연구에 필수적인 시약들을 상용화하여
'바이오 벤처 1호'로서 빛나는 출발을 이루었습니다.

34년, 혁신과 신뢰로 글로벌 리더로 성장

지난 34년간 끊임없는 연구개발 투자를 통해 혁신적인 기술을 개발하고, 고품질의 제품과 신속한 서비스를 제공하며
고객과의 신뢰를 쌓아왔습니다. 이러한 노력들은 결실을 맺어 바이오니아는 이제 글로벌 시장에서 인정받는 리더
기업으로 성장하고 있습니다.

생명공학 연구 발전을 위한 최첨단 솔루션 제공

바이오니아는 PCR, Real-time PCR, Gene Synthesis 등 다양한 분야에서 세계적인 경쟁력을 갖추고 있으며,
고객 맞춤형 연구 지원 서비스를 통해 고객들의 연구 성공을 위한 최고의 파트너가 되고 있습니다.



Life Science Research

DNA/RNA Amplification

- PCR, RT-PCR, qPCR

DNA/RNA Preparation

- Spin Column, Magnetic Bead

Protein Synthesis & Purification

- Synthesis, Purification
- Protein Service

Instruments & Devices

- Conventional PCR
- Real-time PCR
- Protein Synthesis and Purification
- DNA/RNA Preparation
- Electrophoresis
- Microbial Culture
- Vortexing & Spin-down

Custom Services

- Oligonucleotide (DNA/RNA)
- Gene Synthesis
- Gene Expression Analysis
- Yeast Genome-wide
Functional Analysis
- Cloning

채널 추가 / 팔로우 하셔서 바이오니아의 다양한 소식을 빠르게 받아보세요!



bioneer_lifescience



BIONEER



바이오니아

BIONEER
Innovation • Value • Discovery

바이오니아 글로벌센터
대전광역시 유성구 테크노2로 71
Tel : 1588-9788
E-mail : sales@bioneer.co.kr

바이오니아 대덕센터
대전광역시 대덕구 문평서로 8-11
Tel : 1588-9788
E-mail : sales@bioneer.co.kr

바이오니아 R&D센터
경기도 성남시 분당구 대왕판교로 700
코리아바이오파크 B동 702호
Tel : 031-628-0500
E-mail : sales@bioneer.co.kr

대한화학회와 함께, 미래의 화학자가 됩시다.

2025년부터 대한화학회는 학부생 회원 가입을 통해 미래 화학인재들이 학회에 보다 쉽게 가입하고 학술대회에 무료로 참여할 수 있는 제도를 마련하였습니다. 이와 같은 학문 공동체와의 교류를 통해 학부생들이 화학에 대한 자부심을 함양하고 소속감을 높일 수 있도록 하며, 나아가 대학원 진학에 대한 관심과 동기를 부여하고자 합니다. 또한 학부 시절부터 학술대회를 접함으로써 학문적 이해도를 제고하고, 학회 활동에 적극 참여함으로써 대한화학회의 회원 수 증대와 학문 공동체의 저변 확대에 기여하고자 합니다. 이에 따라 회원 여러분께서도 소속 학부생들에게 본 제도를 적극 안내하여 주시고, 학회 가입과 학술대회 참여를 독려하여 주시기 바랍니다. 많은 관심과 협조 부탁드립니다. 학부생들의 활발한 참여를 통해 학문 후속 세대가 한층 성장할 수 있기를 기대합니다.

대상

화학 및 화학관련 전공 학부 재학생

목적

1. 학문 공동체와의 교류 및 네트워크 확대
2. 화학에 대한 자부심 함양 및 소속감 고취
3. 학술대회 참여를 통한 학문적 이해도 제고
4. 회원 증대를 통한 학회 성장 기반 강화
5. 대학원 진학 및 연구 진로 탐색 기회 제공
6. 학문 후속세대 양성

연회비

1만원

학술대회 참가비

면제

※ 단, 학부생 회원 중 초록발표자는 연회비 50,000원 및 사전등록비 60,000원을 납부해야 합니다.



Top Quality · Best Service

이제 완제의약품으로 거듭납니다

차별화된 제품으로 찾아뵙겠습니다
글로벌 제약기업으로 나아가겠습니다
인류 건강 증진에 기여하겠습니다



지난 25년 동안 글로벌 원료회사의 길을 곳곳이 걸어온 것처럼
직접 연구개발한 차별화된 의약품으로 인류 건강과 복지 증진에 이바지하는
글로벌 제약회사로 성장하겠습니다

2026년 5월 광고 목차

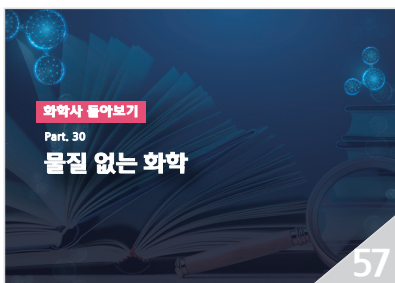
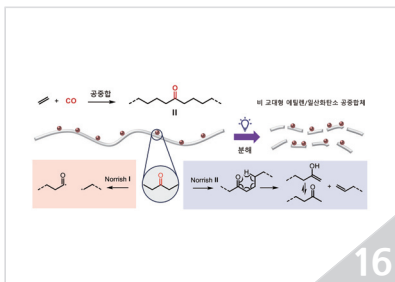
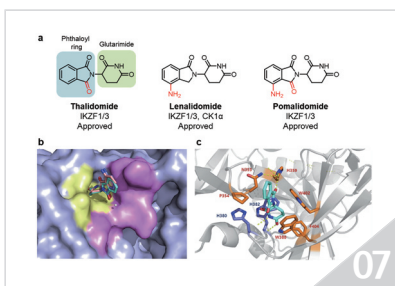
뒤표지 (주)동우화인켐
 앞표지 안쪽 (주)바이오니아
 뒤표지 안쪽 (주)아이센스
 p.02 (주)YS생명과학

2026년 운영진

회 장 금교창
부 회장 장우동(총무)
 정낙천(기획)
 광경원(학술)
 민선준(홍보)
 이정태(국제협력)
 조재홍(산학협력)
 임화준(교육)
실무이사 윤민영(총무)
 김병수(총무)
 전병선(총무)
 서대하(기획)
 박기영(기획)
 이혁진(기획)
 김영수(학술)
 김민(학술)
 변혜령(학술)
 이은성(학술)
 김명길(홍보)
 김은하(홍보)
 김형준(홍보)
 주정민(홍보)
 박정은(국제협력)
 이준희(국제협력)
 임지우(국제협력)
 이은지(산학협력)
 지형민(산학협력)
 황중연(산학협력)
 강훈식(교육)
 김병선(교육)
 김선우(교육)

2026년 화학세계 편집위원회

위원장 민선준
부위원장 김명길 김은하 김형준
 주정민
상임위원 고해란 구세영 김흥기
 김태호 양상희 임주현
 장홍제 전용웅 최은영
 최정모
편집자 박성완



NEWS

- 04 KCS 캘린더
- 05 이달의 학회
- 55 신진연구자 소개 · 조우현
- 56 신진연구자 소개 · 진다솔
- 73 KCS GALLERY | 이종목
- 75 KCS News | KCS 소식
- 2026년 대한화학회 화학교육분과회 세미나 및 총회 후기 · 김민환, 권혁순

PAPER

- 07 읽기 쉬운 총설 | 분자접착분해제(Molecular Glue Degradar)의 발전과 발굴 전략 동향 · 이강주
- 16 이달의 하이라이트 | 최신 고분자 합성 기술 동향: 지속 가능성, 정밀 중합 및 인공지능 기반 소재 설계 · 탁나연, 엄채윤, 김현석*

EDUCATION

- 23 화학 교육 | 화학 실험 상황에서 스마트폰은 우리의 눈이 될 수 있을까?: 드라이아이스 실험에서 마주한 알파 세대의 '관찰' · 이종혁

SPECIAL

- 27 우수선도연구기관 | POSTECH 분자기반 노화 연구실 · 장영태
- 34 INTERVIEW | 화학세계가 만난 화학자: 한태동(Dt&C Bio GROUP 부회장, 前 앱티스(Abtis) 대표) · 김은하
- 46 KCS 하이라이트 | 나노구조 자기조립 및 초분자 화학 기반 기능성 소재 연구 · 양상희

COLUMN

- 57 화학칼럼 | 화학사 돌아보기: 물질 없는 화학 · 최정모
- 65 한국을 빛낸 화학자 | 최동훈(고려대학교) · 강석훈, 김윤선, 엄현아, 김형중, 박수홍, 권나연, 김채영, 정성훈, 강민지

TREND

- 62 우리 실험실은요! | 국민대학교 화학과 인공지능화학 연구실(Spectroscopy and AI Lab(SAIL)) · 김지환
- 72 이달의 추천 도서 | 화학자의 숙면법
- 74 화학만평 | 한진욱

ADVERTISING & CAMPAIGN

- 43 대한화학회 발행지 및 협약발간지 안내
- 44 BKCS 논문 투고 시스템 안내
- 78 지면광고 안내/회비 및 구독료 안내
- 79 클린 인터넷을 선언합니다
- 80 모르면 사고, 알면 안전

2026

제137회 학술발표회, 총회 및 기기전시회
(4. 15(수)~17(금), 제주컨벤션센터)

제138회 학술발표회, 총회 및 기기전시회
(10. 28(수)~30(금), 수원컨벤션센터)

5월 주요일정

- 한국화학올림피아드 여름학교 입교대상자평가(5. 30(토))

MAY						
S	M	T	W	T	F	S
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30

2026

06

- 제138회 학술발표회, 총회 및 기기전시회
- 학회상 수상 후보자 추천
- 분과회별 심포지엄 주제확정
- 2026년 대한화학회 화학 인포그래픽 및 화학 시화 대회

07

- 제138회 학술발표회, 총회 및 기기전시회
- 초록접수/사전등록/기기전시회접수
- 대한화학회 창립일(7.7(월))
- 국제화학올림피아드(7.10(금)~19(일))
- 한국화학올림피아드 여름학교 (7.27(월)~8.8(토))

08

- 제138회 학술발표회, 총회 및 기기전시회
- 초록접수/사전등록/기기전시회접수
- 한국화학올림피아드 여름학교 (7.27(월)~8.8(토))

09

- 제138회 학술발표회, 총회 및 기기전시회
- 초록접수/사전등록/기기전시회접수

10

- 제138회 학술발표회, 총회 및 기기전시회 (10. 28(수)~30(금))

11

CONFERENCE OF THE MONTH

2026년 5월 18일~20일

10th Green & Sustainable Chemistry Conference

장소 | Dresden, Germany

안내 | <https://www.elsevier.com/events/conferences/all/green-and-sustainable-chemistry-conference>

2026년 5월 25일~29일

E-MRS 2026 Spring Meeting

장소 | Strasbourg, France

안내 | <https://www.european-mrs.com/meetings/2026-spring-meeting-exhibit>

NOTICE

은퇴 교수, 연구원 공지 안내

대한화학회에서는 화학 분야 발전에 헌신하신 분들의 수고와 노력에 감사드리는 의미로 은퇴하시는 분들의 명단을 화학세계 3월호와 9월호에 게재하고 있습니다.

명단 게재를 위해 필요한 내용(3번)을 대한화학회 이메일로 발송해 주십시오.

1. 신청 자격 : 은퇴 당사자 혹은 신청인이 대한화학회 회원인 경우
2. 신청 방법 : 이메일(swpark@kchem.org)로 신청
3. 신청 내용 : 이름, 소속(학교, 학과), 사진(3 x 4 cm, 300 dpi 이상)



PROJECT · II

표적 분해 기술: 단백질에서 RNA까지

PROJECT II

표적 분해 기술: 단백질에서 RNA까지 2

분자접착분해제(Molecular Glue Degradator)의 발전과 발굴 전략 동향

이강주 | 한국화학연구원 의약바이오연구본부 선임연구원, kjlee@kriict.re.kr

서론

전통적인 저분자 약물은 일반적으로 특정 표적 단백질에 결합하여, 그 기능을 활성화하거나 저해하는, 이른바 점유 기반(occupancy-driven) 기전을 바탕으로 작동한다. 이러한 접근법은 오랜 기간 신약 개발을 주도해 왔으나, 여러 가지 한계점도 드러나고 있다. 낮은 표적 특이성으로 인한 부작용, 장기간 투여 시 발생하는 약물 내성 등이 대표적인 문제로 지적된다. 더욱이 현재까지 알려진 약 3,000여 개의 질병 관련 단백질 가운데 85% 이상은 뚜렷한 약물 결합 포켓을 가지지 않는 비약물성(undruggable) 표적으로, 전통적인 저분자 화합물 모달리티만으로는 신약 개발에 근본적인 제약이 있는 실정이다.

이러한 근본적인 한계를 극복하기 위한 혁신 전략으로, 표적 단백질 분해(targeted protein degradation, TPD) 기술이 주목받고 있다. TPD는 E3 유비퀴틴 리가아제와 원하는 표적 단백질의 상호작용을 유도하여 표적 단백질을 유비퀴틴화하고, 이후 프로테아좀(proteasome)에 의해 선택적으로 분해되도록 하는 접근법이다. 대표적인 TPD 기술로는 PROTAC(PROteolysis-TArgeting Chimera)과 분자접착분해제(Molecular Glue Degradator, MGD)가 있다. TPD 전략의 전반적인 개념과 PROTAC의 기전 및 최근 동향에 대해서는 지난 호의 읽기쉬운 총설을 참고하기 바란다.

MGD는 PROTAC과 마찬가지로 유비퀴틴-프로테아좀 시스템(Ubiquitin-Proteasome System, UPS)을 통해 표적 단백질 분해를 유도하지만, 분자의 구조와 표적 결합 방식에 차이가 있다[그림 1]. PROTAC은 표적 단백질과 결합

하는 리간드와 E3 리가아제에 결합하는 리간드를 링커로 연결한 이중기능성(heterobifunctional) 분자인 반면, MGD는 표적 단백질 결합 부위와 E3 리가아제 결합 부분을 하나의 단일 저분자 내에 포함하고 있다. 이로 인해 MGD는 PROTAC에 비해 분자량이 작으며, 일반적으로 Lipinski의 규칙(rule of five)을 만족하는 약물성을 가지는 경우가 많다.

또한 MGD는 E3 리가아제의 결합 표면을 변화시켜 표적 단백질과의 새로운 상호작용을 유도한다. 이 과정에서 개별 단백질에 대한 결합력이 상대적으로 낮더라도, 안정적인 삼중 복합체(ternary complex) 형성을 촉진한다. 이러한 특성으로 인해 MGD의 경우에는, E3 리가아제에 결합한 후 새롭게 유도되는 신생기질(neosubstrate)을 예측하기 어렵기 때

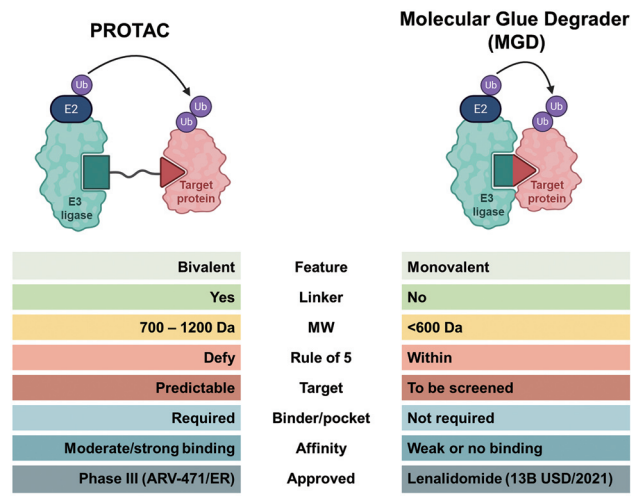


그림 1. PROTAC과 MGD 모달리티의 차이점

문에, 표적 단백질을 사전에 규명하거나 합리적으로 설계하는 데 어려움이 있다. 반면 PROTAC은 각 단백질에 결합하는 바인더를 링커로 연결하는 구조적 특성상 비교적 합리적인 설계가 가능하고, 표적 단백질을 명확하게 설정할 수 있다.

그럼에도 불구하고 MGD는 기존 저해제 기반 접근법뿐만 아니라 PROTAC 기술 대비 여러 장점을 지닌다. 우선, PROTAC과 마찬가지로 표적 분해 후 재사용이 가능한, 이른바 사건 기반(event-driven)의 촉매적(catalytic) 작용 기전을 통해 낮은 농도에서도 높은 효능을 발휘할 수 있다. 또한 표적 단백질을 완전히 제거함으로써 기존 저해제로는 달성하기 어려운 치료 효과를 기대할 수 있다. 이러한 기전은 기존 약물 내성 경로를 우회할 수 있는 새로운 치료 전략을 제공한다.

더 나아가 MGD는 상대적으로 작은 분자량으로 인해 세포 투과성, 경구 생체이용률, 혈액-뇌 장벽(Blood-Brain Barrier, BBB) 투과성, 대사 안정성 등 약물성 측면에서 이점을 가질 가능성이 크다. PROTAC의 경우 구조적 복잡성과 높은 분자량으로 인해 이러한 약물성 개선이 여전히 큰 도전 과제로 남아 있다. 또한 MGD는 구조적 단순성으로 인해 합성·제조 측면에서도 이점을 가질 수 있다. 아울러 삼

중 복합체 형성 과정에서 나타나는 협력성(cooperativity) 효과 덕분에, E3 리가아제나 표적 단백질에 대한 개별 결합력은 낮더라도 강력한 복합체 형성을 통해 높은 선택성을 확보할 수 있다.

이러한 이유로 최근 MGD는 학계뿐만 아니라 제약·바이오산업계를 중심으로 많은 관심과 투자를 받으며, 차세대 신약 개발을 이끌 유망한 약물 모달리티로 자리매김하고 있다. 이번 읽기 쉬운 총설에서는 이러한 흐름을 바탕으로, 대표적인 MGD의 개발 사례를 살펴보고, 최근 제안되고 있는 발굴 전략과 기술적 진화를 중심으로 MGD 연구의 최신 동향을 논의해보고자 한다.

본론

1. CRBN 기반 MGD – 우연에서 출발한 MGD 연구의 시작

탈리도마이드(Thalidomide)의 우연한 발견과 기전 연구는 현대 TPD 연구의 출발점이자, 현재 가장 널리 활용되는 E3 리가아제인 Cereblon(CRBN) 기반 MGD 개발의 초석이 되었다. 탈리도마이드는 1950년대 임산부의 입덧

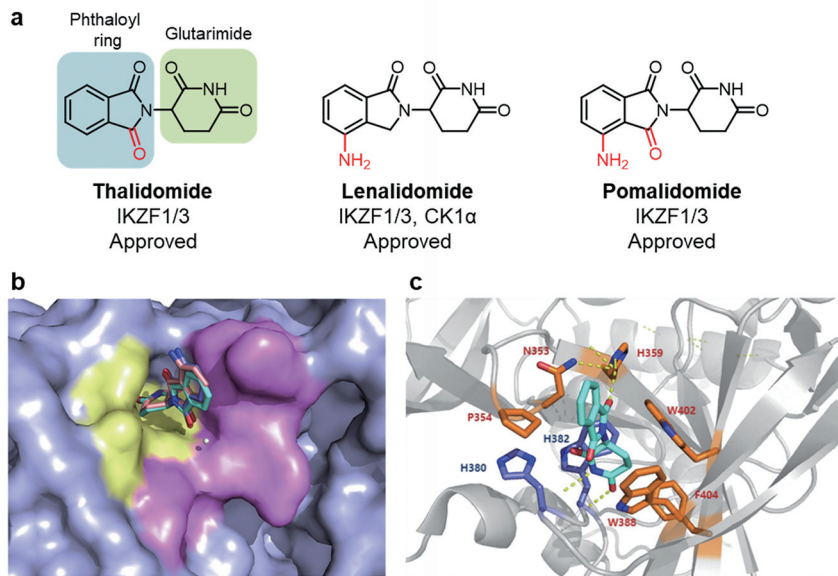


그림 2. (a) IMiDs 계열 MGD(탈리도마이드, 레날리도마이드, 포말리도마이드)의 구조 및 신생기질 예시 (b) CRBN-IMiDs 복합체의 결정구조 (PDB: 4C11, 4C12, 4C13) (c) CRBN과 탈리도마이드의 상호작용 [인용논문에서 발췌]

완화제로 판매되었으나, 심각한 선천성 기형을 유발하며 전 세계적인 비극을 초래했다. 당시에는 정확한 작용 기전을 알지 못했으나, 2010년대 들어 Handa 연구진이 탈리도마이드가 CRBN에 결합하여 기형성을 유발한다는 것을 밝혔다.¹ 이후, Ebert과 Kaelin 연구진이 탈리도마이드 및 그 유사체인 IMiDs(immunomodulatory imide drugs) 약물들이 CRBN에 결합하여 전사인자 IKZF1/3를 선택적으로 분해하는 것을 규명하였고, 이를 통해 MGD 개념의 분자적 근거가 제시되었다.² 이후 다수의 연구진이 글로벌 프로테오믹스 분석을 통해 IMiDs에 의해 분해되는 다양한 신규 신생기질을 발굴하였다.³

2014년에 IMiDs와 CRBN-DDB1 복합체의 공결정 구조(co-crystal structure)가 규명되었다[그림 2].⁴ 해당 구조에 따르면, IMiDs의 glutarimide ring은 CRBN 내 세계의 트립토판 잔기가 형성하는 얇은 소수성 포켓에 결합하며, 인접한 히스티딘 및 트립토판 잔기와 수소결합을 형성하는 것으로 밝혀졌다. 반면 phthaloyl ring은 용매에 노출된 영역에 위치하여, 이 부분의 화학적 변형을 통해 다양한 신생기질 단백질과의 새로운 상호작용을 유도할 수 있음이 제시되었다. 실제로 phthaloyl ring 부분의 미세한 구조 변화만으로도, 유도되는 신생기질의 선택성이 크게 달라지며, 예를 들어 구조적으로 유사한 IMiDs 계열 화

합물 가운데서도 레날리도마이드만이 CK1 α 에 대해 높은 분해 효능을 보인다.

이러한 구조적 발견을 전환점으로, CRBN 기반 MGD의 개발이 급속히 확장되었다. 대표적인 사례로, Celgene 연구진은 2016년 IMiDs 골격을 기반으로 구축한 화합물 라이브러리 스크리닝을 통해 번역 종결 인자인 GSPT1을 선택적으로 분해하는 화합물 CC-885를 보고하였다.⁶ 연구진은 이후 의약화학적 최적화를 통해 임상후보물질 CC-90009를 도출하였다. 이후 학계 및 산업계의 다양한 연구진의 노력으로, 기존 IMiDs의 주요 기질인 IKZF1/3 및 CK1 α 뿐만 아니라, GSPT1, IKZF2, WIZ, VAV1 등 다양한 신생기질을 표적으로 하는 CRBN 기반 MGD가 개발되었다[그림 3]. Phthaloyl ring 치환기의 방향 및 구조에 따라 서로 다른 신생기질 선택성이 유도된다는 점은 CRBN 기반 MGD 설계의 중요한 특징으로 자리 잡았다. 현재에는 다양한 후보 물질이 임상 단계에서 평가되고 있다.

다음에서 다룰 최근 보고에 따르면 구조 생물학 및 프로테오믹스 연구를 기반으로 CRBN 기반 MGD가 유도할 수 있는 신생기질의 범위는 향후 더욱 확장될 것으로 기대된다. CRBN 기반 MGD는 MGD 연구의 개념적·기술적 청사진을 제시했을 뿐 아니라, 다양한 비약물성 질

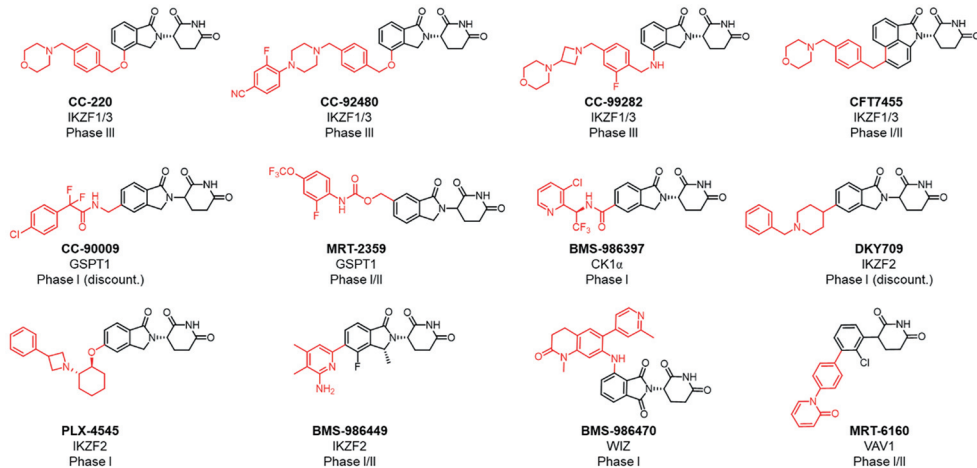


그림 3. 임상 단계에 진입한 CRBN 기반 MGD의 구조 및 표적 단백질 사례

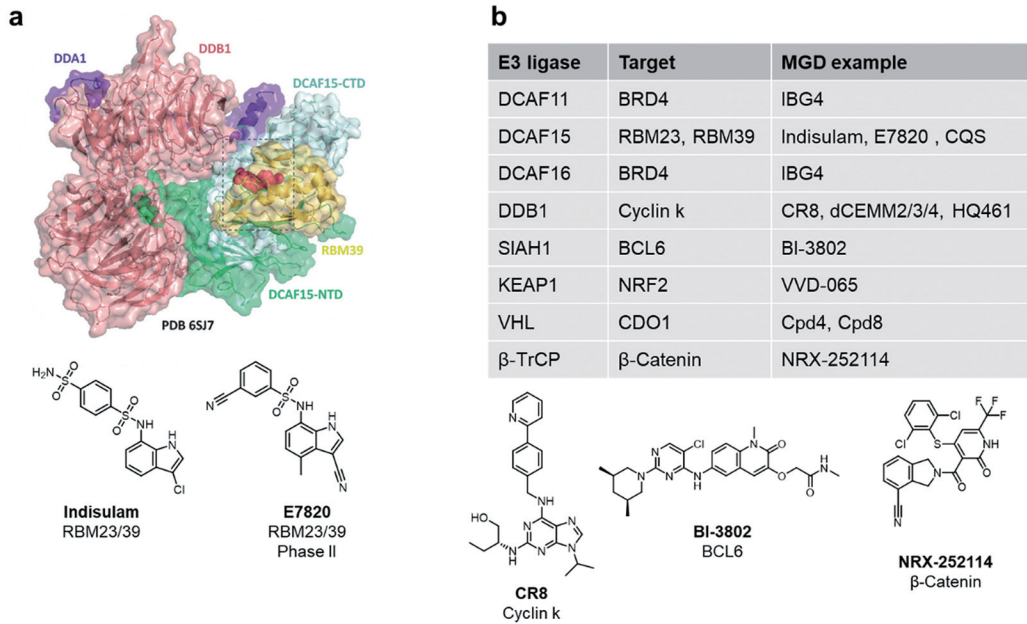


그림 4. (a)DCAF15 기반 MGD의 구조 및 DDB1-DDB1-DCAF15와 indisulam의 공결정 구조 [인용논문에서 발췌¹²] (b)비CRBN E3 리가아제 기반 MGD 예시 [인용논문에서 발췌¹³]

병 관련 단백질을 표적으로 하는 차세대 치료 전략으로 발돋움하고 있다.

2. 다양한 E3 리가아제 기반 MGD로의 확장

인체에는 600여 종의 E3 리가아제가 존재한다고 알려져 있으며, 각 리가아제는 조직 및 세포 유형에 따라 서로 다른 발현 양상을 보인다. 이러한 특성은 질병 세포에 선택적으로 작용하는 MGD를 개발할 수 있는 중요한 기회를 제공한다. 반면, 가장 널리 활용되어 온 CRBN 기반 MGD 계열의 화합물은 CRBN이 다양한 조직에서 범용적으로(ubiquitously) 발현된다는 점에서, 특정 질병을 표적으로 할 경우 선택성 측면에서 한계를 가질 수 있다. 이러한 배경에서, 다양한 E3 리가아제에 대한 새로운 MGD 발굴 전략이 주목받고 있다.

대표적인 사례로는 DCAF15 리가아제에 결합하는 indisulam 계열 화합물을 들 수 있다[그림 4a]. Indisulam은 항암 효과를 보이는 화합물로 발굴되었으나, 정확한 기전은 알려지지 않은 상태였다. 2017년, Nijhawan 연구진에 의해 indisulam이 DCAF15와 RNA-binding motif

protein 39(RBM39)의 상호작용을 유도하여 RBM39의 분해를 촉진한다는 사실이 보고되었다.⁷ 이후 유사구조의 추가 탐색을 통해 Eisai에서 개발한 E7820이 RBM39 표적 MGD로 발굴되었고, 임상 2상 단계에서 평가가 진행 중이다.⁸

이 외에도 DDB1, SIAH1, SCF β -TrCP 등의 다양한 E3 리가아제를 통해 cyclin K⁹, BCL6¹⁰, β -catenin¹¹ 등의 표적 단백질을 분해하려는 연구가 이어지고 있다[그림 4b]. 다양한 E3 리가아제에 대한 MGD 확보는 표적 단백질 분해의 범위를 확장할 뿐만 아니라, 조직 선택성을 활용한 부작용 최소화 및 치료 효능 향상이라는 측면에서 차세대 치료 전략으로 이어질 것으로 기대된다.

3. MGD 발굴 동향 ① - 표적에서 출발하는 MGD 발굴 전략: 합리적 설계와 표적 단백질 확장

MGD는 발굴 방법과 합리적 설계가 어렵기 때문에, 우연적 발견에 기반한 접근을 통해 개발된 사례가 대다수였다. 대표적으로, 알려진 MGD 모티프를 기반으로 다양한 구조의 화합물 라이브러리를 구축한 뒤, 세포 수준에서의

독성, 증식 억제, 분화 유도 등과 같은 표현형 변화를 출발점으로 후보 물질을 선별한다. 이후, 단백질 분석(proteomic analysis)을 통해 실제로 분해되는 표적 단백질을 규명함으로써 작용 기전을 확인하는 방식이 활용되어 왔다. 이러한 표현형 기반 스크리닝 전략은 다양한 성공 사례를 도출하였으며, 화합물의 세포 내 활성을 직접적이고 포괄적으로 평가할 수 있다는 점에서 여전히 강력한 발굴 방법으로 활용되고 있다. 최근에도 다양한 세포기반 어레이 플랫폼을 활용한 신규 MGD 발굴 연구가 지속적으로 보고되고 있으며, 특정 세포 내 기전을 정밀하게 모니터링 할 수 있는 정교한 분석 시스템 또한 빠르게 발전하고 있다.

그러나 이러한 전략은 표적 단백질을 사전에 예측하거나 선택하기 어렵고, 분해 메커니즘 규명을 위해 광범위한 단백질 분석에 의존해야 한다는 한계도 존재한다. 특히 화합물의 미세한 구조 변화에 따라 유도되는 신생기질의 패턴이 비예측적으로 변화하는 특성으로 인해, 합리적 설계를 기반으로 기술을 확장시키는 데 구조적 제약이 있다.

최근 이러한 한계를 극복하기 위한 새로운 MGD 개발 전략이 제안되고 있다. 표적 단백질에 결합하는 기존 리간드나 저해제를 출발점으로 공유결합 워헤드(covalent warhead)를 도입하여, 다양한 E3 리가아제와의 결합을 유도하는 방식이다. 이 접근법은 E3 리가아제 결합을 출발점으로 하는 기존 MGD 발굴 전략과 달리, 분해하고자 하는 표적을 사전에 선택할 수 있다는 장점을 가진다. 즉, 표적 단백질에 결합 이후 신규 E3 리가아제와의 상호작용이 형성되는 구조로 작동하며, 표적 단백질의 구조 정보나 결합 부위에 대한 이해를 바탕으로 분해 활성을 보다 합리적으로 설계할 수 있는 가능성을 제시한다.

대표적인 예로, Gray 연구진은 BRD9 저해제에 가역적 공유결합 워헤드인 cyanoacrylate를 도입하여 BRD9을 선택적으로 분해하는 MGD를 보고하였으며, 이 과정에서 DCAF16이 결합되는 E3 리가아제임을 규명하였다(그림 5a). 이 연구는 공유결합 워헤드가 단순한 결합 수단을 넘어, 특정 E3 리가아제를 선택적으로 유도할 수 있음을 보여준 사례이다.¹⁴ 또한 Nomura 연구진은 BRD4 바인더

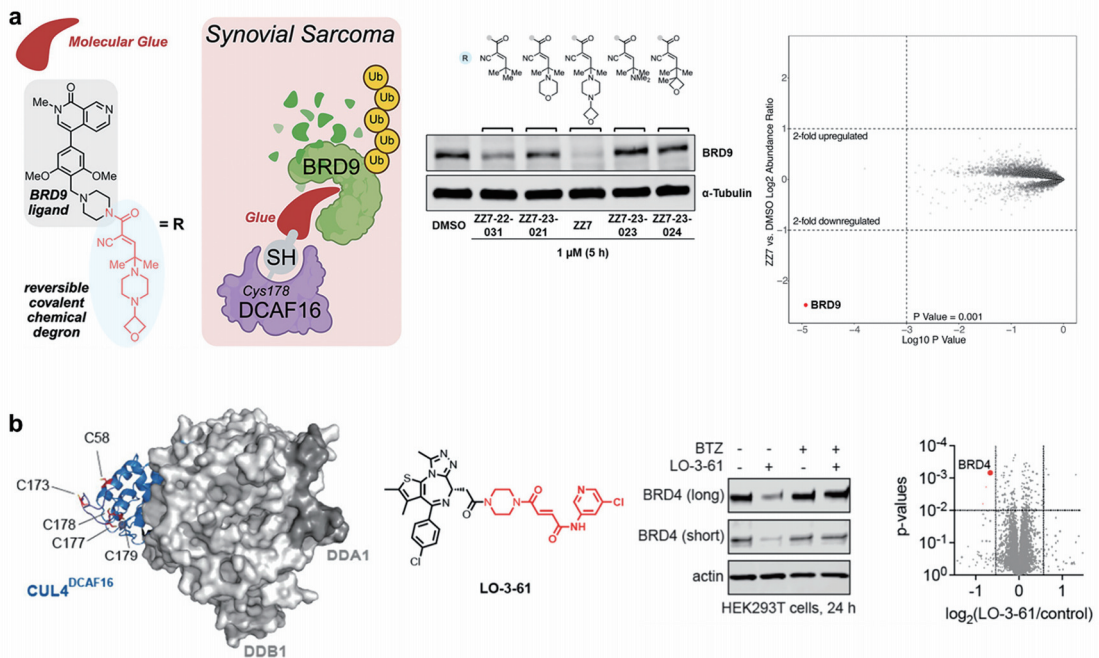


그림 5. (a)DCAF16 기반 BRD9 표적 MGD의 구조, 단백질 분해 정도의 웨스턴 블롯 및 프로테오믹스 기반 분석 결과 [인용논문에서 발췌¹⁴] (b) DCAF16 기반 BRD4 표적 MGD의 구조, 단백질 분해 정도의 웨스턴 블롯 및 프로테오믹스 기반 분석 결과 [인용논문에서 발췌¹⁵]

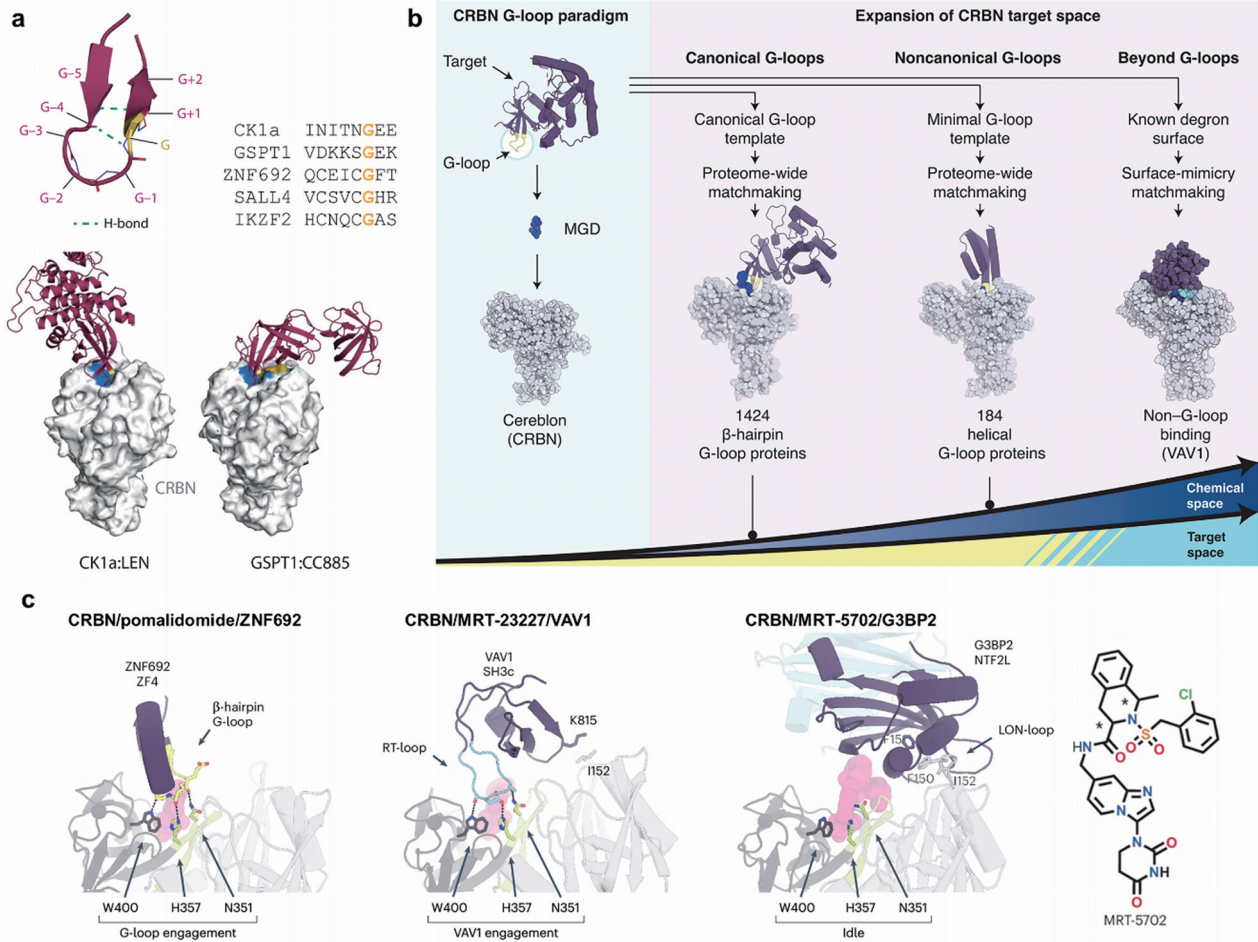


그림 6. (a) CRBN-MGD의 신생기질 인식 모티프인 G-loop의 구조 [인용논문에서 발췌] (b) CRBN 기반 MGD의 표적 확장 가능성 [인용논문에서 발췌^{16]}] (c) CRBN 기반 MGD에 따른 표적 단백질 인식 부위의 변화 [인용논문에서 발췌^{7]}] 결합 MGD에 따라 표적 단백질의 범위 확장이 가능함(ZNF692: G-loop을 가진 포말리도마이드의 신생기질; MRT-23227: VAV1 분해 MGD; MRT-5702: G3BP2 분해 MGD)

인 JQ1에 fumarate 유도체를 도입했을 때 BRD4 분해가 유도되며, 이 과정이 DCAF16 E3 리가아제에 의존적으로 진행됨을 보고하였다[그림 5b].¹⁵

4. MGD 발굴 동향 ② - 융합 기술이 여는 새로운 MGD 발굴 전략

한편, 구조 생물학 및 프로테오믹스 분석 기술의 발전은 MGD 발굴에 새로운 가능성을 제시하고 있다. 구조 생물학 연구에 따르면, CRBN-MGD 복합체는 β -hairpin 형태의 G-loop degron이라 불리는, 글리신을 포함한 여덟

개의 아미노산으로 구성된 특정 모티프를 인식할 수 있는 것으로 알려져 있다[그림 6a]. AlphaFold2 기반 구조 예측 연구에서는, 인간 단백질 중 약 2,000개 이상이 이러한 G-loop 구조를 포함할 가능성이 제시되었으며, 이는 향후 CRBN 기반 MGD의 표적 범위가 기존에 인식되었던 것보다 훨씬 넓을 수 있음을 시사한다.³

뿐만 아니라, 최근 Monte Rosa 연구진은 G-loop에 국한되지 않고, 전하분포 및 국소적 구조 유사성이 유지된다면 CRBN-MGD 복합체에 결합 가능한 새로운 구조적 모티프가 존재함을 보고하였다[그림 6b].¹⁶ 해당 연구진은 전산 알고리즘을 통해 신생기질 후보의 구조적 유사

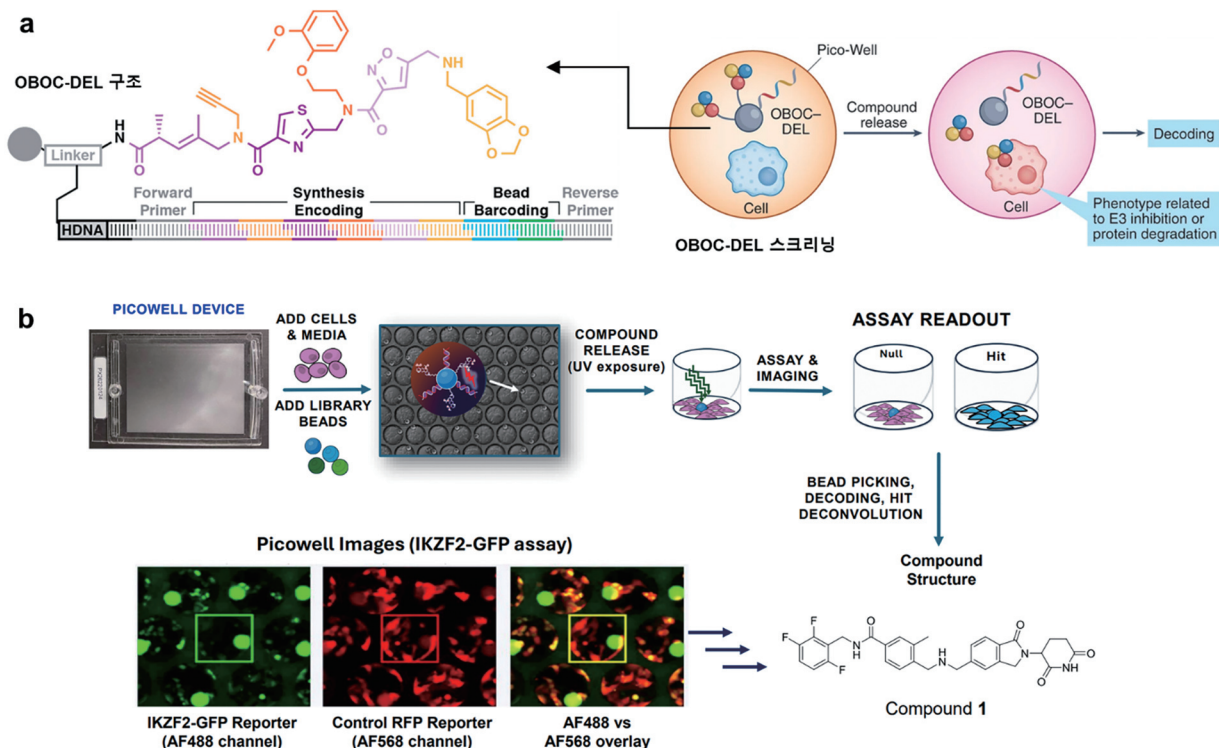


그림 7. (a) OBOC-DEL의 구조 예시 [인용논문에서 발취²⁰] 및 스크리닝 방법 [인용논문에서 발취²¹] (b) Plexium의 OBOC-DEL 기반 MGD 발굴 플랫폼 예시 [인용논문에서 발취²²]

성을 탐색하고, 이를 바탕으로 VAV1, NEK7, mTOR 등 기존에 알려지지 않았던 단백질들이 CRBN 기반 MGD에 의해 분해될 수 있음을 검증하였다.

더 나아가, Monte Rosa 연구진은 단백질 간의 자연적인 상호작용을 CRBN-MGD 표면에 묘사하는 glue-print 전략을 제시함으로써, 신규 신생기질을 유도할 수 있는 MGD 설계 가능성을 제시하였다[그림 6c].¹⁷ 구체적으로, G3BP2는 USP10과 상호작용하는 것으로 알려져 있으며, MRT-5702과 결합한 CRBN이 USP10의 결합 계면을 묘사함으로써 G3BP2의 선택적 분해를 유도함이 확인되었다. 이러한 연구는 MGD 발굴이 우연적 발견을 넘어, 단백질 표면 구조에 기반한 합리적 설계로 확장될 수 있음을 보여주는 중요한 사례로 평가된다.

또한 최근에는 초고효율 스크리닝 기술인 유전자 암호화 라이브러리(DNA-encoded library, DEL)를 활용한 MGD 발굴 사례도 주목받고 있다. DEL 기술은 대규모의 화합물 라이브러리를 빠르고 경제적으로 스크리닝할 수

있는 기술로, 유기화합물의 구조가 DNA 바코드로 암호화되어 있어 극미량의 활성 화합물도 DNA 증폭 및 시퀀싱을 통해 신속하게 동정할 수 있다.

대표적인 사례로, Plexium의 MGD 발굴 플랫폼이 있다[그림 7].¹⁸ 합성화합물과 암호화 DNA가 고체상에 결합된 one-bead one-compound (OBOC) 형태의 DEL을 세포주가 도포된 Picowell plate에 분주한 뒤, 고체상에서 방출된 화합물이 세포 표현형에 미치는 영향을 분석하는 방식이다. 표현형 변화가 관찰된 well에서의 유효물질 구조는, 해당 비드에 결합된 DNA 바코드를 증폭 및 시퀀싱함으로써 신속하게 규명할 수 있다. 이 플랫폼을 통해, 대량의 화합물 라이브러리를 세포 기반 환경에서 초고효율로 스크리닝할 수 있으며, PLX-4545[그림 3]등의 임상 후보물질이 도출된 바 있다.

이처럼 우연적 발견에 의존하던 기존 접근을 넘어, 구조생물학, 다중 오믹스 분석, DEL 스크리닝 등 다양한 융합 기술을 활용한 MGD 발굴 연구가 활발히 진행되고 있다.

나아가 AlphaFold를 비롯한 AI 기반 플랫폼의 활용과 방대한 구조·화합물·단백체·활성 데이터의 축적 및 학습을 통해, 향후 MGD 기반 신약 개발은 보다 체계적이고 예측 가능한 단계로 발전하여 한층 가속화될 것으로 기대된다.¹⁹

참고: 분자접착제, 분해를 넘어

이번 총설에서 모두 다루지는 못했지만, MGD 기술이 지닌 확장 가능성은 매우 크다. 이에 추가적인 정보를 위해, 최근 주목받고 있는 관련 연구 흐름을 간략히 소개한다.

최근에는 MGD의 표적 선택성을 더욱 정밀하게 제어하기 위한 전략으로, MGD를 항체와 결합한 MAC(Molecular glue-Antibody Conjugate) 기술이 개발되고 있다.²³ 이러한 접근은 CRBN과 같이 다양한 조직에서 범용적으로 발현되는 E3 리가아제를 활용할 때 발생할 수 있는 부작용을 줄이고, 특정 세포나 조직에서 선택적으로 단백질 분해를 유도할 수 있는 유망한 대안으로 주목받고 있다.

한편, 분자접착제의 개념은 반드시 표적 단백질의 분해에만 국한되지 않는다. 분자접착제를 통해 표적 단백질과 제3의 단백질 사이에 새로운 상호작용을 유도함으로써, 단백질을 분해하지 않고도 그 기능을 완전히 차단하는 전략 역시 가능하다. 대표적인 예로, 중요한 항암표적인 KRAS를 표적으로 하는 분자접착제 RMC-6291는 KRAS와 cyclophilin A 간의 새로운 상호작용을 유도하여 KRAS 신호 전달을 기능적으로 차단하는 기전을 가진다.²⁴ 해당 화합물은 현재 전이성 췌장암을 포함한 난치성

암을 대상으로 임상 단계에서 평가되고 있으며, 분자접착제 기반 치료 전략의 확장 가능성을 보여주는 대표적인 사례로 평가된다.

결론

MGD는 PROTAC과 함께 TPD 전략을 대표하는 약물 모달리티로서, 전통적인 점유 기반 약물을 넘어 사건 기반 약물 설계로의 패러다임 전환을 이끌고 있다. 특히 PROTAC과 비교하여 상대적으로 작은 분자량과 우수한 약물 동태학적 특성을 기대할 수 있다는 점에서, MGD는 임상적 활용 가능성이 높은 모달리티로 주목받고 있다. 다만 현재까지 보고된 약 20여 종의 임상 후보 물질 중 상당수가 CRBN 기반 MGD에 집중되어 있으며, MGD의 특성상 신규 물질의 발굴과 합리적 설계가 여전히 도전적인 과제로 남아 있는 것도 사실이다.

그럼에도 불구하고, 최근에는 다양한 E3 리가아제에 대한 MGD 발굴이 활발히 시도되고 있으며, 발굴 전략 또한 우연한 발견에 의존하던 초기 단계를 넘어 빠르게 진화하고 있다. 표현형 기반 스크리닝과 더불어, 표적 기반 설계 전략과 구조 생물학, 프로테오믹스, AI 기반 예측, DEL 기술 등과의 융합을 통해 보다 체계적이고 고숙화된 MGD 발굴이 가능해지고 있다. 이러한 기술적 진보를 바탕으로, MGD는 향후 신약 개발 분야에서 중요한 축을 차지하는 핵심 약물 모달리티로 자리매김할 것으로 기대된다.🌀



1. Ito, T.; Ando, H.; Suzuki, T.; Ogura, T.; Hotta, K.; Imamura, Y.; Yamaguchi, Y.; Handa, H. Identification of a primary target of thalidomide teratogenicity. *Science* **2010**, *327*, 1345.
2. (a) Kronke, J.; Udeshi, N. D.; Narla, A.; Grauman, P.; Hurst, S. N.; McConkey, M.; Svinkina, T.; Heckl, D.; Comer, E.; Li, X.; et al. Lenalidomide causes selective degradation of IKZF1 and IKZF3 in multiple myeloma cells. *Science* **2014**, *343*, 301. (b) Lu, G.; Middleton, R. E.; Sun, H.; Naniyong, M.; Ott, C. J.; Mitsiades, C. S.; Wong, K. K.; Bradner, J. E.; Kaelin, W. G., Jr. The myeloma drug lenalidomide promotes the cereblon-dependent destruction of Ikaros proteins. *Science* **2014**, *343*, 305.
3. Oleinikovas, V.; Gainza, P.; Ryckmans, T.; Fasching, B.; Thoma, N. H. From Thalidomide to Rational Molecular Glue Design for Targeted Protein Degradation. *Annu. Rev. Pharmacol. Toxicol.* **2024**, *64*, 291.

4. Fischer, E. S.; Bohm, K.; Lydeard, J. R.; Yang, H.; Stadler, M. B.; Cavadini, S.; Nagel, J.; Serluca, F.; Acker, V.; Lingaraju, G. M.; et al. Structure of the DDB1-CRBN E3 ubiquitin ligase in complex with thalidomide. *Nature* **2014**, *512*, 49.
5. An, J.; Zhang, X. Crbn-based molecular Glues: Breakthroughs and perspectives. *Bioorg. Med. Chem.* **2024**, *104*, 117683.
6. Matyskiela, M. E.; Lu, G.; Ito, T.; Pagarigan, B.; Lu, C. C.; Miller, K.; Fang, W.; Wang, N. Y.; Nguyen, D.; Houston, J.; et al. A novel cereblon modulator recruits GSPT1 to the CRL4(CRBN) ubiquitin ligase. *Nature* **2016**, *535*, 252.
7. Han, T.; Goralski, M.; Gaskill, N.; Capota, E.; Kim, J.; Ting, T. C.; Xie, Y.; Williams, N. S.; Nijhawan, D. Anticancer sulfonamides target splicing by inducing RBM39 degradation via recruitment to DCAF15. *Science*



- 2017, 356, eaal3755.
8. Faust, T. B.; Yoon, H.; Nowak, R. P.; Donovan, K. A.; Li, Z.; Cai, Q.; Eleuteri, N. A.; Zhang, T.; Gray, N. S.; Fischer, E. S. Structural complementarity facilitates E7820-mediated degradation of RBM39 by DCAF15. *Nat. Chem. Biol.* **2020**, *16*, 7.
 9. Slabicki, M.; Kozicka, Z.; Petzold, G.; Li, Y. D.; Manojkumar, M.; Bunker, R. D.; Donovan, K. A.; Sievers, Q. L.; Koepfel, J.; Suchyta, D.; et al. The CDK inhibitor CR8 acts as a molecular glue degrader that depletes cyclin K. *Nature* **2020**, *585*, 293.
 10. Slabicki, M.; Yoon, H.; Koepfel, J.; Nitsch, L.; Roy Burman, S. S.; Di Genua, C.; Donovan, K. A.; Sperling, A. S.; Hunkeler, M.; Tsai, J. M.; et al. Small-molecule-induced polymerization triggers degradation of BCL6. *Nature* **2020**, *588*, 164.
 11. Simonetta, K. R.; Taygerly, J.; Boyle, K.; Basham, S. E.; Padovani, C.; Lou, Y.; Cummins, T. J.; Yung, S. L.; von Soly, S. K.; Kayser, F.; et al. Prospective discovery of small molecule enhancers of an E3 ligase-substrate interaction. *Nat. Commun.* **2019**, *10*, 1402.
 12. Konstantinidou, M.; Arkin, M. R. Molecular glues for protein-protein interactions: Progressing toward a new dream. *Cell Chem. Biol.* **2024**, *31*, 1064.
 13. Liu, Y.; Bai, J.; Li, D.; Cang, Y. Routes to molecular glue degrader discovery. *Trends Biochem. Sci.* **2025**, *50*, 134.
 14. Byun, W. S.; Zhuang, Z.; Hnatiuk, A. P.; Jin, C.; Jiang, Z.; Baek, K.; Chao, E.; Donovan, K. A.; Fischer, E. S.; Mercola, M.; et al. Discovery of BRD9 Molecular Glue Degradators That Spare Cardiomyocytes. *J. Am. Chem. Soc.* **2025**, *147*, 35481.
 15. Orr, L. M.; Tomlinson, S. J.; Grupe, H. R.; Lim, M.; Ho, E.; Yilmaz, H.; Zhou, G.; Leon, B.; Olzmann, J. A.; Nomura, D. K. DCAF16-Based Covalent Degradative Handles for the Modular Design of Degradators. *ACS Cent. Sci.* **2025**, *11*, 1207.
 16. Petzold, G.; Gainza, P.; Annunziato, S.; Lamberto, I.; Trenh, P.; McAllister, L. A.; DeMarco, B.; Schwander, L.; Bunker, R. D.; Zlotosch, M.; et al. Mining the CRBN target space redefines rules for molecular glue-induced neosubstrate recognition. *Science* **2025**, *389*, eadt6736.
 17. Annunziato, S.; Quan, C.; Donckele, E. J.; Lamberto, I.; Bunker, R. D.; Zlotosch, M.; Schwander, L.; Murthy, A.; Wiedmer, L.; Staehly, C.; et al. Cereblon induces G3BP2 neosubstrate degradation using molecular surface mimicry. *Nat. Struct. Mol. Biol.* **2026**, *33*, 479.
 18. <https://plexium.com/platform/>.
 19. (a) Duran-Frigola, M.; Cigler, M.; Winter, G. E. Advancing Targeted Protein Degradation via Multiomics Profiling and Artificial Intelligence. *J. Am. Chem. Soc.* **2023**, *145*, 2711. (b) Zhang, Y.; Li, L.; Xu, J.; Che, C.; Jia, J.; Lu, H.; You, Q.; Xu, X. A Novel Paradigm for Targeting Challenging Targets: Advancing Technologies and Future Directions of Molecular Glue Degradators. *Molecules* **2026**, *31*, 459.
 20. Mendes, K. R.; Malone, M. L.; Ndungu, J. M.; Suponitsky-Kroyter, I.; Cavett, V. J.; McEnaney, P. J.; MacConnell, A. B.; Doran, T. M.; Ronacher, K.; Stanley, K.; et al. High-throughput Identification of DNA-Encoded IgG Ligands that Distinguish Active and Latent Mycobacterium tuberculosis Infections. *ACS Chem. Biol.* **2017**, *12*, 234.
 21. Huang, Y.; Li, Y.; Li, X. Strategies for developing DNA-encoded libraries beyond binding assays. *Nat. Chem.* **2022**, *14*, 129.
 22. Erika Green, A. S., Vincent Aguilar, Elliot Imler, Gabrielle Blanco, Alex Campos, Duc Tran, Quinn Spalding, Craig Stumpf, Greg Parker, Peggy Thompson, Lisa Liu, Cindy Huynh, Julie Huynh, Paige Burgin, Kira Ostrander, Michelle Pandolfi, Anastasia Velentza, Edward Hujber, Kenneth Chng, Tomás Duffy, Edgar Gutierrez, Jesse Lu, Mitchell Hull, John Bucci, Guy Oshiro, Daniel Sipes, Farhana Barmare, Animesh Roy, John Maina Ndungu, Andrew Burritt, Simon Bailey, Kevin Freeman-Cook, Michael Hocker. Application of Plexium's Picowell Screening Technology to the Identification of IKZF2 Molecular Glue Degradators. **2025**. <https://plexium.com/wp-content/uploads/2025/03/application-of-plexiums-picowell-screening-technology.pdf>.
 23. Poudel, Y. B.; Thakore, R. R.; Chekler, E. P. The New Frontier: Merging Molecular Glue Degradator and Antibody-Drug Conjugate Modalities To Overcome Strategic Challenges. *J. Med. Chem.* **2024**, *67*, 15996.
 24. Repity, M. L.; Deutscher, R. C. E.; Hausch, F. Nondegradative Synthetic Molecular Glues Enter the Clinic. *ChemMedChem* **2025**, *20*, e202500048.



이 강 주 Kang Ju Lee

- 포항공과대학교 화학과, 학사(2010.3-2014.2)
- 포항공과대학교 화학과, 박사(2014.3-2020.2, 지도교수: 임현석)
- 포항공과대학교 박사후 연구원(2020.2-2023.9, 지도교수: 임현석)
- 도쿄대학교 방문 연구원(2022.10-2023.9, 지도교수: Hiroaki Suga)
- 도쿄대학교 박사후 연구원(2023.10-2025.2, 지도교수: Hiroaki Suga)
- 한국화학연구원 의약바이오연구본부 선임연구원(2025.3-현재)

최신 고분자 합성 기술 동향: 지속 가능성, 정밀 중합 및 인공지능 기반 소재 설계

탁나연, 엄채윤, 김현석* | 충남대학교 화학과 조교수, hyunseok@cnu.ac.kr

서론

고분자는 반복 단위체인 단량체(monomer)가 공유결합을 통해 연결된 거대 분자이다. 낮은 밀도, 우수한 가공성, 높은 화학적 안정성 등의 특성을 바탕으로 금속이나 세라믹과 같은 기존 소재를 대체하는 기능성 소재로 널리 활용되고 있으며, 현대 사회의 기술 발전과 산업 구조를 지탱하는 중요한 재료로 자리 잡고 있다.¹ 특히 고분자 관련 소재는 최근까지 자동차, 항공우주, 반도체, 에너지 저장 장치, 의료기기 등 다양한 첨단 산업에서 필수적인 역할을 수행하고 있다.

이러한 폭발적인 수요에 맞추어 전 세계 고분자 생산량은 지속적으로 증가하여 현재 연간 약 4억 톤 이상이 생산되고 있으며, 이 중 상당량이 적절히 재활용되지 못한 채 매립되거나 자연환경에 축적되고 있다.² 대규모 생산과 사용이 편의성과 동시에 환경적 문제를 동시에 야기하고 있는 것이다. 특히 폴리에틸렌(PE)과 폴리프로필렌(PP)과 같은 폴리올레핀(polyolefin)은 전 세계 플라스틱 생산량의 약 절반을 차지할 정도로 가장 널리 사용되는 고분자 소재이지만, 탄소-탄소(C-C) 결합으로 이루어진 매우 안정한 구조를 가지고 있기 때문에 자연 분해가 거의 일어나지 않는다는 문제가 있다.³ 이러한 특성은 고분자의 내구성과 안정성을 높이는 장점과 동시에 폐기물 문제를 심화시키는 주요 원인이 되고 있다.

최근 고분자화학에서는 심화되는 환경 문제를 해결하기

위해 지속가능한 소재 설계(sustainable materials design)와 순환경제(circular polymer economy) 개념이 중요한 연구 방향으로 제시되고 있다. 예를 들어 고분자 사슬에 분해가능한 결합을 도입하여 필요할 때 화학적으로 분해가 가능하도록 설계하는 전략이 제안되었으며, 이러한 접근은 기존 고분자의 물성을 유지하면서도 재활용 가능성을 크게 향상시킬 수 있는 방법으로 평가되고 있다. 또한 친환경 기반 단량체를 이용한 고분자 합성이나 화학적 재활용 기술을 활용한 폐플라스틱 재생 기술 역시 활발히 연구되고 있다.

한편 소재 연구 분야에서는 인공지능(AI)과 머신러닝(Machine Learning, ML)을 활용한 설계 기술이 빠르게 발전하고 있다. 기존의 고분자 소재 개발은 실험 중심의 경험적 접근에 의존하는 경우가 많았지만, 현재는 데이터 기반 모델을 활용하여 고분자 구조와 물성 간의 관계를 분석하고 이를 바탕으로 새로운 고분자 소재를 설계하는 연구가 활발히 진행되고 있다.⁴ 이러한 접근은 방대한 화학 구조 공간을 효율적으로 탐색할 수 있게 하며, 원하는 물성을 갖는 고분자를 역설계(inverse design)하는 것을 가능하게 한다.

이처럼 현대 고분자 연구는 단순한 물질 합성을 넘어 지속가능성, 정밀 합성 기술, 기능성 소재 개발, 그리고 데이터 기반 소재 설계라는 다양한 연구 방향을 중심으로 빠르게 발전하고 있다. 따라서 본 글에서는 최근 고분자 합성 기술의 주요 연구 동향을 정리하고, 지속가능한 고분자 설계, 정밀 중합 기술, 스마트 고분자 소재, 고분자 나노복합재, 그

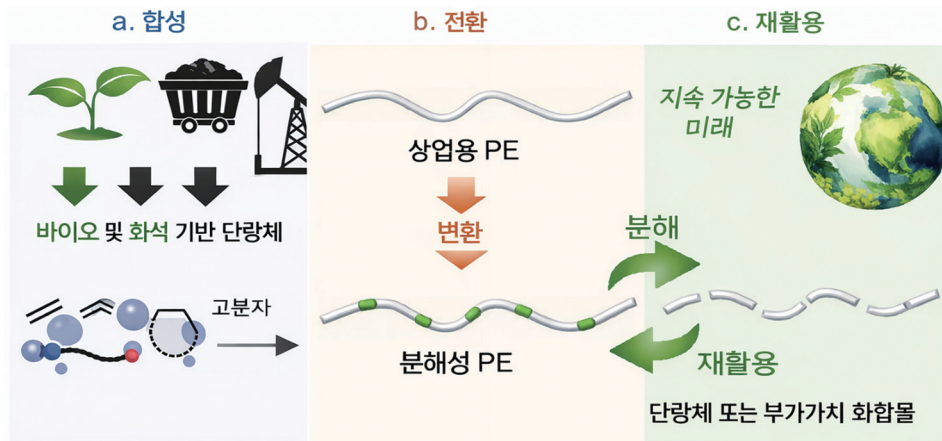


그림 1. 고분자 재료의 전 주기 및 분해/재활용 (a)바이오 또는 화학연료 기반 모노머로부터의 고분자 합성 (b)고분자 제조 후 분해성 고분자 및 고부가 가치 화학물질로의 전환 기술 (c)지속가능성을 위한 재활용단계 [인용논문에서 발췌]

리고 인공지능 기반 고분자 설계 기술을 중심으로 최신 연구 흐름을 고찰하고자 한다.

본 론

1. 지속가능한 고분자 합성과 화학적 재활용 기술

플라스틱 폐기물 문제는 현대 고분자 연구에서 가장 중요한 환경적 과제 중 하나로 인식되고 있다. 특히 폴리에틸렌 계열 고분자는 낮은 생산 비용과 우수한 기계적 특성으로 인해 산업 전반에서 널리 사용되고 있으나, 화학적으로 매우 안정한 공유결합으로 이루어져 있어 자연환경에서 거의 분해되지 않는다.⁵ 이러한 높은 화학적 안정성 때문에 폴리에틸렌은 재활용이 어려운 소재로 여겨져 왔으며, 현재 까지도 상당량이 소각 또는 매립 방식으로 처리되고 있다.

기존의 열분해(pyrolysis) 및 수소분해(hydrogenolysis)와 같은 촉매 기반 분해 기술은 폴리에틸렌을 에틸렌이나 프로필렌과 같은 유용한 단량체로 전환할 수 있다. 그러나 다양한 부산물이 포함된 복잡한 혼합물을 생성하기 때문에 원래의 고분자를 직접적으로 회수하기 어렵다는 한계를 가진다. 이에 따라 완전한 탈중합과 재중합이 가능한 분해성 폴리에틸렌의 개발이 지속가능한 플라스틱 순환경제 구현을 위한 핵심 과제로 부각되고 있다.

화학적 재활용은 크게 오픈 루프(open-loop)와 클로즈

드 루프(closed-loop) 방식으로 구분되는데 오픈 루프 재활용은 폴리에틸렌을 구조와 물성이 다른 고분자 또는 올리고머로 전환하는 방식으로, 불포화기 기반 또는 케토 기반 분해성 폴리에틸렌이 이에 해당한다. 반면 클로즈드 루프 재활용은 분해 후 재중합을 통해 동일한 구조와 물성을 갖는 원래의 고분자를 재생산하는 방식으로, 진정한 의미의 순환 재활용 기술로 간주된다[그림 1].

Johnson 연구진은 이러한 폐쇄형 재활용을 실현하기 위한 분자 설계 연구로서 O-Si-O 결합을 포함하는 고리형 올레핀 단량체를 고리열림 복분해 중합(ring-opening metathesis polymerization, ROMP)으로 중합한 후 수소화를 수행하여 고밀도 폴리에틸렌과 유사한 기계적 강도를 갖는 분해성 폴리에틸렌을 합성하였다.⁶ 이 시스템에서 O-Si-O 결합은 산 촉매 조건에서 선택적으로 절단될 수 있으며, 탄소-탄소 주사슬이나 에스터 결합을 손상시키지 않은 상태에서 양말단에 디하이드록시기를 갖는 말단 반응기 거대 폴리에틸렌 단량체를 생성한다. 이러한 선택적 분해 특성은 폴리프로필렌, 폴리에틸렌, 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET)가 혼합된 페플라스틱 환경에서도 목표 고분자를 효율적으로 분리·회수할 수 있게 한다. 또한 생성된 하이드록시 말단 폴리에틸렌 단량체는 다이알킬디클로로실란과 재중합되어 원래의 고분자로 재생될 수 있으며, 이를 통해 실제적인 폐쇄형 재활용(closed-loop recycling) 공정 구현 가능성이 제시되었다. 이러한 연구는

기능성 결합을 정밀하게 설계함으로써 기존 폴리올레핀의 물성을 유지하면서도 화학적 순환 재활용을 실현할 수 있음을 보여주는 대표적인 사례로 평가된다.

2. 분해 가능 작용기를 포함한 중합 및 고분자 미세구조 제어 기술

최근 고분자 합성 기술의 중요한 발전 중 하나는 지속가능한 고분자 소재 개발을 위한 정밀 중합 기술의 발전이다. 단순히 고분자 주사슬을 형성하는 데 초점을 맞추는 것이 아니라 중합 과정에서 고분자 미세구조에 분해가능한 결합(cleavable bonds)을 도입하는 설계 전략이다. 고분자 주사슬에 작용기를 도입하여 특정 촉매 반응이나 화학적 처리 과정을 통해 고분자를 단량체 또는 저분자 화합물로 분해할 수 있는 전략도 제안되고 있다. 이 접근법은 기존 폴리올레핀의 우수한 기계적 물성을 유지하면서도 화학적 재활용을 가능하게 한다는 점에서 중요한 지속가능 소재 설계 전략으로 평가된다. 고분자 사슬의 높은 안정성은 전체적으로 우수한 열적 안정성과 강도를 나타내지만, 주사슬에 약한 결합을 포함하는 고분자 합성을 통해 특정 조건에서 모노머 단위로 분해될 수 있도록 만드는 것이다. 예를 들어 케톤 결합, 에스터 결합, 불포화 결합과 같은 기능성 구조는 제어된 분해 또는 화학적 변환이 가능하도록 설계될 수 있다.

이러한 분해가능한 결합은 공중합(copolymerization)을 통해 낮은 밀도로 정밀하게 도입될 수 있으며, 이를 통해 폴리올레핀의 고유한 물성을 유지하면서도 원하는 수준의 분해성을 부여할 수 있다. 최근 Nozaki 연구팀은 두 종류의 카보닐기를 포함하는 폴리올레핀의 광분해 거동을 조사하였다.⁷ 하나는 주사슬 내부에 카보닐기가 포함된 비교대 E/CO 공중합체이며, 다른 하나는 곁사슬(pendant)에 카보닐 작용기를 갖는 에틸렌/메틸비닐케톤(E/MVK) 공중합체이다. 275 nm 자외선(UV) 조사 조건에서, E/MVK 공중합체(1.57 mol% MVK)는 E/CO 공중합체(1.70 mol% CO)보다 더 빠르게 분해되었다. 이들의 분해 과정에서는 Norrish type I 절단 반응에 의해 유도된 여러 라디칼 매개 부반응이 관찰되었으며, 여기에는 주사슬 하이드록실화(backbone hydroxylation), 추가적인 카보닐 형성, 그리고 높은 MVK 농도(4.37 mol%)에서의 가교(cross-linking) 반응 등이 포함된다. 또한 HDPE와 블렌딩될 경우, 이러한 자유 라디칼 반응은 HDPE의 분해도에 기여할 수 있음이 확인되었다[그림 2].

이처럼 장시간에 걸쳐 분해가 가능하다는 점에서, 케토 기반 폴리올레핀은 일회용 플라스틱 포장재 생산에 활용될 가능성이 있다. 그러나 분해 이후 생성물의 지속가능성은 여전히 이 분야의 주요한 한계로 남아 있다. 앞으로는 광분해 과정의 제어성을 향상시켜 분해 생성물의 구조를 조절하고, 이들의 재사용 가능성을 탐색하는 연구가 필요

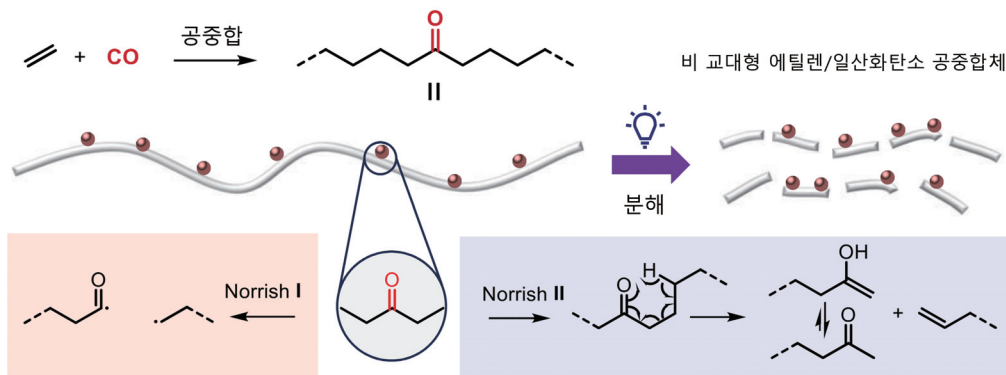


그림 2. 비(非) 교대형 에틸렌/일산화탄소 공중합체(폴리케톤)의 합성과 분해과정 [인용논문에서 발췌]

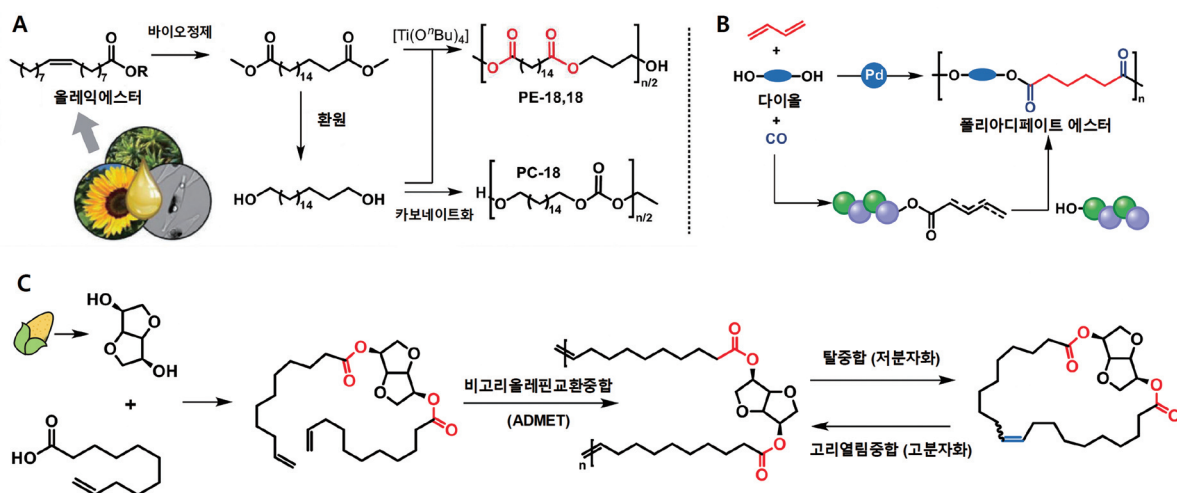


그림 3. 비(非) 교대형 에틸렌/일산화탄소 공중합체(폴리케톤)의 합성과 분해과정 [인용논문에서 발췌]

하다. 또한 이러한 광분해 생성물의 분자량이 일반적으로 수천 수준임을 고려할 때, 환경 내 거동(environmental fate)에 대한 체계적인 평가가 이루어져야만 이러한 광분해성 폴리에틸렌이 진정으로 친환경적이고 지속가능한 대안이 될 수 있다. 특히 저분자량 올리고머 분해에 효과적인 미생물 분해(microbial degradation)가 이 문제를 해결할 수 있는 유망한 접근법으로 제시되고 있다.

3. 바이오매스 자원으로부터의 고분자 합성

기존 연구는 주로 바이오매스 전환으로부터 얻은 말단 반응기 거대단량체(telechelic)를 이용한 단계적 축합중합에 기반하며, 바이오 유래 C_{18} 단량체를 활용한 지방족 폴리에스터 및 폴리카보네이트 합성이 대표적인 사례로 보고되었다[그림 3A].⁸ 이러한 고분자는 높은 분자량과 함께 HDPE에 상응하는 기계적 물성을 나타내지만, 에스터 결합으로 인한 결정성 저해로 녹는점은 감소하는 특징을 보인다.

한편, 탈수소 중합과 같은 대안적 에스터화 경로도 제시되었으며, 전이금속 촉매를 활용한 디올 간 결합 반응을 통해 화학량론적 제약을 극복하고 물성 조절이 가능한 재 활용성 멀티블록 폴리에틸렌 합성이 가능함이 보고되었다. 특히 다양한 다이올의 조합을 통해 엘라스토머(elas-

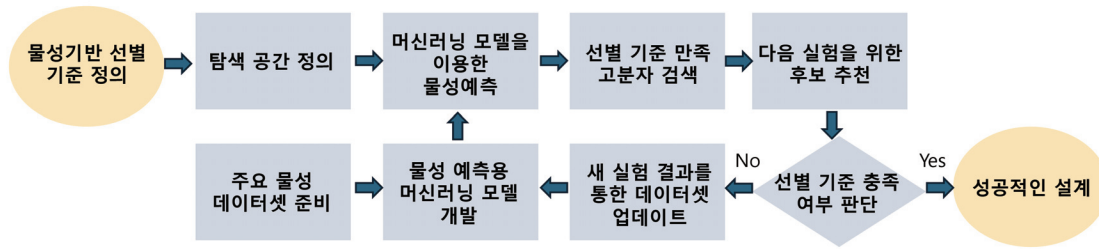
toomer)부터 열가소성 고분자까지 기계적 특성을 조절할 수 있으며, 높은 용융전이와 낮은 유리전이온도를 동시에 구현할 수 있다.

또한 팔라듐 촉매 기반 알콕시카보닐화 반응은 알켄, 알코올, 일산화탄소(CO)로부터 선형 지방족 폴리에스터를 직접 합성할 수 있는 방법으로 주목받고 있다. 다만 부반응에 의한 사슬 성장 억제로 분자량 증가에는 한계가 존재하며, 이를 개선하기 위해 단량체 구조 확장 및 반응 메커니즘 제어 연구가 진행되고 있다. 최근에는 이성질화 이중 하이드로에스터화 반응을 통해 높은 선형 선택성을 갖는 폴리아디페이트(poly(adipate)) 에스터의 직접 합성이 가능함이 보고되면서, 에스터 기반 폴리올레핀 설계의 새로운 가능성이 제시되고 있다[그림 3B].

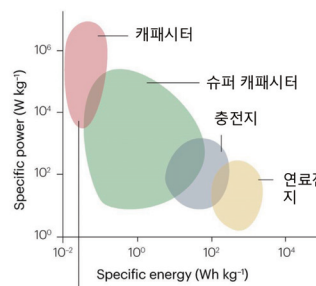
그리고 최근 연구에서는 해당 단량체의 비고리올레핀교환중합(acyclic diene metathesis, ADMET) 단독중합이 비교적 낮은 분자량의 고분자($M_n \leq 23.3$ kDa)만을 생성하는 것으로 나타났다. 그러나 이렇게 얻어진 올리고머는 고리닫힘 메타세시스 분해(ring-closing metathesis depolymerization)를 통해 고리형 올레핀으로 전환될 수 있으며, 이후 ROMP를 통해 다시 중합되어 매우 높은 분자량($M_n \leq 794.2$ kDa)의 고분자를 형성할 수 있음이 확인되었다[그림 3C].⁹

합성된 고분자는 우수한 열적 안정성($T_d = 375\text{--}426$ °C)

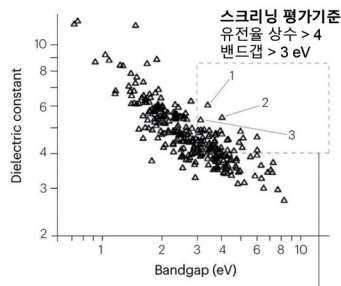
AI 기반 맞춤형 응용-특화 고분자 설계 전략



a 에너지 저장시스템의 라곤 플롯



b 고분자 유전체에 대한 계산 기반 스크리닝



c 설계된 고분자 유전체

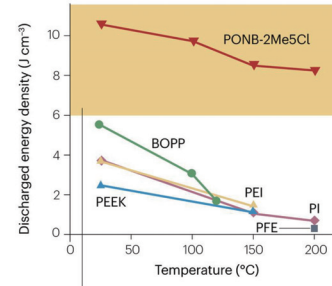


그림 4. AI 기반 맞춤형 특화 고분자 합성 및 설계과정 [인용논문에서 발췌¹³⁾

을 나타내었으며, 전형적인 엘라스토머 거동을 보였다. 특히 본 시스템은 두 가지 분해 경로를 동시에 갖는다는 점에서 주목된다. 가수분해 반응을 통해 텔레켈릭 디카복실산과 아이소만나이드(isomannide)가 재생될 수 있으며, 동시에 메타세시스 기반 고리형 탈중합(cyclodepolymerization)을 통한 대안적 분해 메커니즘도 가능성이 확인되었다.

4. 고분자 나노복합재와 고성능 소재

고분자 소재의 기계적 특성과 기능성은 최근 항공우주 분야에도 공격적으로 향상시키기 위해 나노소재 도입한 고분자 나노복합재 연구 역시 활발히 진행되고 있다. 그래핀(graphene), 탄소나노튜브(CNT), 나노셀룰로오스와 같은 나노소재는 매우 우수한 기계적 강도와 전기적 특성을 가지고 있으며, 이러한 나노소재를 고분자 매트릭스에 분산시키면 복합재의 성능을 크게 향상시킬 수 있다.^{10,11}

예를 들어 탄소나노튜브를 소량 첨가하는 것만으로도 고분자의 전기 전도성이 크게 증가할 수 있으며, 이는 전

자소자나 에너지 저장 장치와 같은 분야에서 중요한 역할을 한다. 또한 그래핀 기반 나노복합재는 높은 열전도성과 기계적 강도를 가지기 때문에 차세대 기능성 소재로 주목받고 있다. 한편 폴리에테르케톤(PEEK)나 폴리이미드(polyimide)와 같은 고성능 엔지니어링 고분자는 높은 온도와 화학적 환경에서도 안정한 특성을 유지하기 때문에 항공우주 산업, 반도체 공정, 고온 환경에서 사용되는 핵심 소재로 활용되고 있다.¹²

5. 인공지능 기반 고분자 설계

최근 소재 과학 분야(전자소자, 에너지 시스템, 항공우주 산업 등)에서 가장 빠르게 성장하는 연구 영역 중 하나는 인공지능 기반 소재 설계 기술이다. 고분자는 가능한 구조 조합이 매우 많기 때문에 전통적인 실험 방법만으로는 최적의 소재를 탐색하는 데 상당한 시간과 비용이 필요하고, 새로운 고분자가 실제 산업에 적용되기까지는 수십 년이 소요되는 경우가 많다. 최근 연구에서는 머신러닝 모


델을 활용하여¹³ 고분자의 화학 구조와 물성 사이의 관계를 학습하고 이를 기반으로 새로운 고분자를 설계하는 접근 방법이 개발되고 있다. 이러한 방식은 특정 응용 분야에서 요구되는 물성을 먼저 설정한 후 이를 만족하는 고분자 구조를 역으로 설계하는 방식으로 진행된다. 또한 수십만 편의 논문에서 고분자 데이터를 자동으로 추출하고 데이터베이스화 하는 연구도 진행되고 있다.¹⁴ 이러한 데이터 기반 접근은 향후 고분자 연구의 자동화와 소재 발견 속도를 크게 향상시킬 것으로 기대된다.

인공지능은 인간의 경험과 직관에 의존하던 기존 소재 개발 방식을 데이터와 알고리즘 기반 접근으로 확장함으로써 소재 설계 속도를 획기적으로 단축할 수 있는 가능성을 제시한다. 특히 AI는 방대한 고분자 화학 공간을 효율적으로 탐색하고, 목표 성능을 만족하는 소재를 역으로 설계할 수 있는 새로운 연구 패러다임을 제공한다. 머신러닝 모델은 고분자의 화학 구조와 물성 간의 상관관계를 학습하여 성능을 예측하며, 가상 합성(virtual forward synthesis)을 통해 실제 합성이 가능한 후보 고분자를 대량으로 생성한다. 이후 모델 예측을 기반으로 조건을 만족하는 후보를 선별하고, 실험적 검증을 통해 성능을 확인하는 과정이 수행된다[그림 4].¹⁵

이 과정에서 새롭게 축적된 실험 데이터는 다시 모델 학습에 활용되어 설계 정확도와 예측 신뢰도를 지속적으로

향상시키는 선순환 구조를 형성한다. 최근에는 수천 개 이상의 구조적 특징을 반영하는 고분자 fingerprint 기술과 그래프 신경망, 화학에 관한 언어 모델이 도입되면서 예측 정확도와 확장성이 크게 개선되었다. 이러한 접근은 단순한 물성 예측을 넘어 목표 성능을 만족하는 소재를 직접 제안하는 역설계를 가능하게 하며, 데이터 기반 고분자 설계의 핵심 방법론으로 자리 잡고 있다.

결론

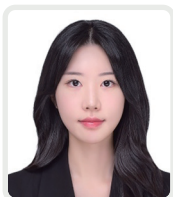
최근 고분자 합성 기술은 지속가능성, 정밀 합성 기술, 기능성 소재 개발, 그리고 인공지능 기반 소재 설계라는 네 가지 핵심 방향을 중심으로 빠르게 발전하고 있다. 특히 분해가능한 결합을 도입한 지속가능 고분자합성 연구는 플라스틱 폐기물 문제를 해결하기 위한 중요한 전략으로 주목받고 있으며, 화학적 재활용 및 순환경제 구현에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 또한 인공지능 기반 소재 설계 기술은 고분자 연구의 패러다임을 변화시키고 있으며, 데이터 기반 접근을 통해 새로운 기능성 소재 개발 속도를 크게 향상시킬 수 있다. 앞으로 고분자 과학은 화학, 재료공학, 데이터 과학이 융합된 다학제적 연구 분야로 발전할 것이며, 이러한 연구는 미래 에너지, 환경, 의료 기술을 위한 핵심 소재 개발에 중요한 기여를 할 것으로 전망된다. 



1. Matyjaszewski, K. Architecturally Complex Polymers with Controlled Heterogeneity. *Science* **2011**, 333, 1104.
2. Geyer, R.; Jambeck, J. R.; Law, K. L. Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made. *Sci. Adv.* **2017**, 3, e1700782.
3. Zhang, Y.; Liu, J.; Chen, X.; et al. Advances in Sustainable Polyolefins: Synthesis, Chemical Transformation and Recycling. *Natl. Sci. Rev.* **2025**, 12, nwaf489.
4. Tran, H.; Gurnani, R.; Kim, C.; et al. Design of Functional and Sustainable Polymers Assisted by Artificial Intelligence. *Nat. Rev. Mater.* **2024**, 9, 866.
5. Coates, G. W.; Getzler, Y. D. Chemical recycling to monomer for an ideal, circular polymer economy. *Nat. Rev. Mater.* **2020**, 5, 501.
6. Shieh, P.; Nguyen, H. V.-T.; Johnson, J. A. Tailored silyl ether monomers enable backbone-degradable polynorbornene-based linear, bottlebrush and star copolymers through ROMP. *Nat. Chem.* **2019**, 11, 1124.
7. Nobis, M.; Takahashi, K.; Uchida, J.; Nakagawa, S.; Yoshie, N.; Kato, T.; Nozaki, K. Polyethyleneketones with Controlled Spacer Units: Synthesis, Characterization, and Photodegradation. *J. Am. Chem. Soc.* **2025**, 147, 17034.
8. Mahadas N. A.; Suhail A.; Sobczak M. T. et al. High molecular weight biobased long-chain aliphatic polyesters with degradability: insights into mimicking polyethylene. *Macromolecules* **2025**, 58, 4070.
9. Ortman P. and Mecking S. Long-spaced aliphatic polyesters. *Macromolecules* **2013**, 46, 7213.
10. Roy, D.; Cambre, J. N.; Sumerlin, B. S. Future perspectives and recent advances in stimuli-responsive materials. *Prog. Polym. Sci.* **2010**, 35, 278.
11. Kim, H.; Abdala, A. A.; Macosko, C. W. Graphene/Polymer Nanocomposites. *Macromolecules* **2010**, 43, 6515.
12. Advincula. R. C. et al. High performance polymers for oil and gas applications. *Reactive and Functional Polymers.* **2021**, 162, 104878.
13. Kim, C.; Park, J.; Lee, S.; et al. Machine Learning in Polymer Research. *Adv. Mater.* **2025**, 37, 2413695.
14. Coley, C. W.; Eyke, N. S.; Jensen, K. F.; et al. Autonomous Discovery in the Chemical Sciences Part II: Outlook. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2020**, 59, 23414.
15. Butler, K. T.; Davies, D. W.; Cartwright, H.; et al. Machine Learning for Molecular and Materials Science. *Nature* **2018**, 559, 547.


탁 나연 Nayeon Tak

- 충남대학교 화학과, 학사(2021.3-2025.8)
- 충남대학교 화학과 석사과정(2025.9-현재, 지도교수: 김현석)


엄 채운 Chaeyun Eom

- 충남대학교 화학과, 학사(2021.3-2025.8)
- 충남대학교 화학과 석사과정(2025.9-현재, 지도교수: 김현석)


김 현석 Hyunseok Kim

- 부산대학교 화학과, 학사(2006.3-2010.2)
- 연세대학교 화학과, 석사(2010.3-2012.2)
- 서울대학교 화학부, 박사(2012.9-2017.2 지도교수: 최태림)
- 포항공과대학교 화학과, 박사후 연구원(2017.8-2019.12 지도교수: 이은성)
- 스크립스 연구소, 박사후 연구원(2019.2-2022.8 지도교수: K. Barry Sharpless)
- 충남대학교 화학과 조교수(2024.3-현재)

화학 실험 상황에서 스마트폰은 우리의 눈이 될 수 있을까? : 드라이아이스 실험에서 마주한 알파 세대의 ‘관찰’

이종혁 | 서울대학교 인포스피어 과학교육연구단 연수연구원, huak123@gmail.com

1. 들어가며: 실험 수업 중 예상치 못한 장면

2024년 8월, 한 대학부설 과학영재교육원에서 초등학교 5~6학년 학생 15명을 대상으로 ‘드라이아이스의 과학’이라는 주제의 실험 수업을 할 때였습니다. 저는 학생들이 드라이아이스라는 화학적으로 흥미로운 물질을 직접 감각하고 조작하며, 그 과정에서 나타나는 다양한 현상을 체험하길 기대했습니다. 예를 들어, ‘드라이아이스 관찰’ 활동에서는 학생들이 시계 접시 위에서 드라이아이스가 점차 크기가 줄어들며 흰 연기를 내뿜는 모습을 눈으로 ‘세심하게 관찰’하고, 지퍼백에 넣었을 때 빵빵하게 부풀어 오르는 것을 만져보기도 하며 승화 현상을 ‘느껴보길’ 바랐던 것이죠.

이때 수업 설계 단계에서 디지털 도구(예: 스마트폰, 센서 등) 사용은 고려하지 않았습니다. 디지털 기술이 화학 탐구의 본질적인 경험, 즉 물리적 세계와의 직접적인 상호작용을 보조할 수는 있어도 대체할 수는 없으며, 오히려 학생들의 주의를 분산시켜 세심한 관찰을 방해할 것이라 우려했기 때문입니다.

그런데 수업이 시작되고 학생들이 드라이아이스라는 신기한 물질에 호기심을 보이며 다양한 탐색을 시작했을 때, 몇몇 학생들은 아주 자연스럽게 자신의 스마트폰을 꺼내 들었습니다. 처음에는 단순히 ‘신기한 장면을 사진으로 남기려나 보다’ 싶었지만, 그들의 행동은 단순한 기록을 넘어서는 것처럼 보였습니다. 태어나면서부터 스마트폰이 보편적으로 사용되는 디지털 환경에서 자라난 소위 ‘알파

세대(Generation Alpha)’ 학생들에게 ‘스마트폰’은 지시하지 않아도 꺼내 드는 너무나 자연스러운 신체의 일부인 것처럼 느껴졌습니다.

스마트폰 화면을 통해 현상에 몰입하는 학생들의 진지한 눈빛을 보며, 문득 한 가지 의문이 스쳤습니다. ‘이것은 디지털 도구의 활용인가, 아니면 마치 안경을 통해 세상을 바라보는 것과 같은 체험적 관찰 방식인가?’ 이 글은 당시의 짧은 질문에서 출발했습니다. 이 질문에 대한 고민을 나누기에 앞서, 학생들이 실험 수업 상황에서 어떤 행동을 보였는지 간략히 소개하겠습니다.

2. 드라이아이스 실험 수업 속 장면들

‘드라이아이스 관찰’ 활동에서 시계 접시 위의 드라이아이스 덩어리가 시간이 지남에 따라 점차 작아지는 현상이나[그림 1], 지퍼백에 넣은 드라이아이스가 기체를 발생시켜 지퍼백이 부풀어 오르는 과정을 관찰할 때[그림 2], 몇몇 학생들은 스마트폰을 세워두고 카메라 앱의 ‘타임랩스(time-lapse)’ 기능을 사용하여 긴 시간 동안의 변화를 짧은 동영상으로 압축하여 관찰했습니다. ‘물에 넣은 드라이아이스 관찰’ 활동에서 드라이아이스가 물과 만나 격렬하게 흰 연기를 뿜어내는 순간, 한 학생은 스마트폰 카메라 앱의 ‘슬로우 모션(slow-motion)’ 기능을 활용하여 연기가 소용돌이치며 퍼져나가는 모습을 느린 화면으로 관찰하기도 했죠[그림 3].

특히 인상적이었던 것은 제가 수업을 설계할 때 의도했던

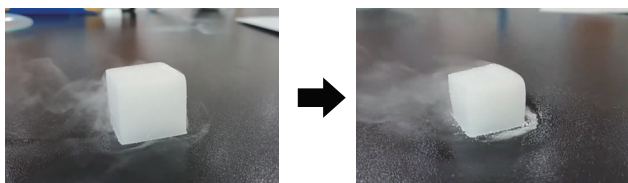


그림 1. 실온에서 드라이아이스가 점차 작아지는 승화 과정을 타임랩스로 촬영한 장면(URL: <https://vo.la/OvYkSD>)

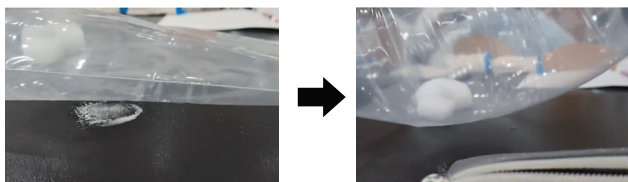


그림 2. 드라이아이스의 승화로 지퍼백이 팽창하는 모습을 촬영한 장면 (URL: <https://vo.la/RPSRSO>)

그림 3. 물에 넣은 드라이아이스에서 생성된 흰 연기를 슬로우 모션으로 촬영한 장면 (URL: <https://vo.la/XNAUuH>)

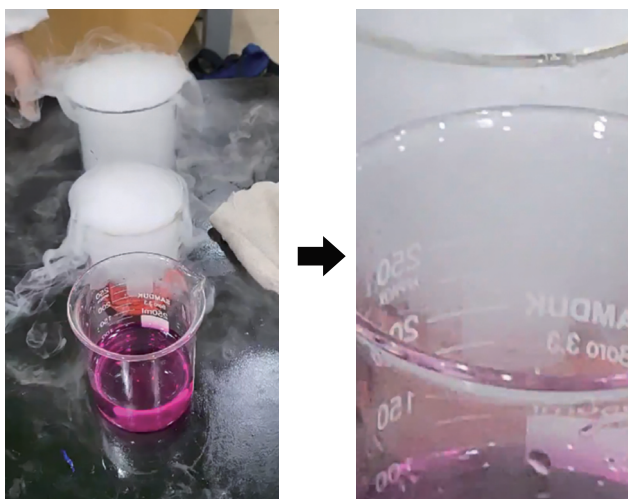
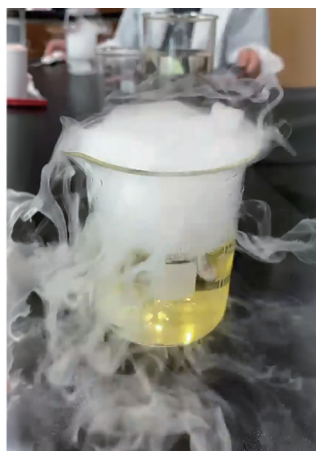


그림 4. 드라이아이스를 넣었을 때 지시약의 색 변화와 생성된 흰 연기를 확대 기능으로 촬영한 장면(URL: <https://vo.la/OaqRFb>)

‘세심한 관찰’을 위해 학생들은 스마트폰 카메라 앱의 ‘확대(zoom-in)’ 기능을 적극적으로 활용했다는 것입니다. ‘드라이아이스를 넣으면 색깔이 변하는 용액’ 실험에서 지시약을 넣은 물에 드라이아이스를 넣었을 때 색이 극적으로 변하는 순간과 흰 연기의 움직임을 “아주아주 세밀하게 관찰”하기 위해 카메라 앱으로 동영상을 촬영하는 과정에서 화면을 확대(zoom-in)하고 축소(zoom-out)하기도 했습니다(그림 4).

또한, 쉬는 시간이 되자 몇몇 학생들은 자신이 촬영한 동영상이나 사진을 서로 잘 몰랐던 다른 친구들에게도 보여주며 이야기꽃을 피웠습니다. 이때 학생들은 미적으로 ‘멋진 영상’, ‘흥미로운 장면’을 연출하기 위해 실험 재료를 다양하게 배치하고 조작하는 등 적극적인 태도를 보였습니다. 이러한 학생들의 활동은 제가 사전에 계획하거나 안내한 것이 아니었음에도 학생들 사이에서 매우 자발적이고 자연스럽게 나타났습니다. 이후, 저는 서로 잘 모르는 학생들끼리도 각자의 “작품”을 공유할 수 있도록 SNS 단체채팅방을 개설했고, 실험 종료 후 스크린에 작품을 띄워 모두 함께 감상했으며, 어떤 점이 흥미로웠는지, 어떤 방법으로 촬영했는지 등에 대해 이야기를 나누는 시간도 가졌습니다.

3. ‘관찰’을 다시 생각하다

화학 탐구의 역사는 곧 ‘관찰 도구’ 진화의 역사이기도 한 것 같습니다. 인류의 눈은 돋보기와 광학 현미경을 거쳐 전자 현미경이나 분광기까지 그 한계를 끊임없이 확장해 왔습니다. 도구가 발전할 때마다 우리가 실세계에서 ‘볼 수 있는 것’의 범위와 인식의 깊이도 달라졌습니다. 그렇다면 오늘날 학생들의 손에 들린 스마트폰은 ‘도구’로서 교육적 활용 가치가 있는 것일까요?

앞선 학생들의 행동을 주의 깊게 들여다보면, 학생들은 스마트폰을 통해 화학 현상의 시간과 공간을 능동적으로 조작한다는 것을 알 수 있습니다. 타임랩스는 너무 느려서 맨눈으로는 미세한 변화를 체감하기 어려운 승화 반응의 시간을 압축해서 보여줍니다. 반대로 슬로우 모션은 너무 빨라서 찰나에 흩어지는 기체의 움직임을 여유 있게 사고하며 살펴볼 수 있도록 해줍니다. 확대 기능은 육안으로

관찰하기에는 너무 흐릿한 산-염기 반응의 경계면을 세밀하게 관찰할 수 있도록 돕습니다.

기술철학자 돈 아이디(Don Ihde)는 인간이 기술과 맺는 관계를 설명하며 '체현 관계(embodiment relations)'라는 개념을 제시한 바 있습니다(Ihde, 1990). 우리가 안경을 쓸 때 안경의 렌즈 자체를 의식하기보다 안경을 '통해' 세상을 바라보듯, 특정 기술이 인간의 지각 경험 속으로 녹아들어 마치 신체의 일부처럼 기능한다는 의미입니다. 이러한 관점이 단지 철학적인 것만은 아닌 것이, 우리는 스마트폰 사용을 상상만 해도 팔 길이가 늘어난 것처럼 인지한다고 합니다(Lin, et al., 2023). 즉, 스마트폰은 신체 도식(body schema)을 변형할 정도로 우리의 지각과 밀접하게 연결되어 있다는 것입니다.

태어날 때부터 터치스크린과 고해상도 카메라에 익숙한 알파 세대에게 스마트폰은 세상을 지각하는 진화된 눈이자, 물리적 세계를 향해 뻗어 나가는 연장된 신체(extended body; Froese & Fuchs, 2012)로 기능하는 것은 아닌지 생각해 봅니다. 다시 말해, 학생들은 스마트폰으로 드라이아이스의 화학 반응을 단순히 '기록'한 것이 아니라 연장된 신체를 통해 시간과 공간의 척도를 스스로 조절해 가며 능동적으로 현상을 '관찰'하고 있었던 것입니다.

더 나아가 이 연장된 신체는 관찰을 사회적 행위로도 확장합니다. 맨눈으로 본 현상은 주로 관찰자 개인의 인식 속에 머무르지만, 스마트폰으로 포착되고 공유된 현상은 SNS와 스크린을 타고 다른 학생들에게 빠르게 번져나갑니다. 이 지점에서 그간 화학교육 연구들이 스마트폰의 역할을 어떻게 바라봐 왔는지 살펴볼 필요가 있겠습니다.

4. 화학교육 연구에서 나타나는 스마트폰의 역할

스마트폰을 화학교육 탐구 맥락에 활용한 최근의 선행 연구를 간략히 살펴본 결과, 스마트폰의 역할을 크게 두 가지로 분류해 볼 수 있었습니다.

먼저, 증강현실(AR) 및 가상현실(VR)을 통해 학습을 돕는 다양한 교육 자료를 제공하는 역할이 있습니다. 스마트폰을 통해 미시 세계의 3차원 분자 모형이나 결합 구조를 시각화하거나, 그래프를 그릴 때 필요한 수학 개념 등 다양한 분야의 정보를 동시에 제공하는 등의 앱을 개발하는 연

구가 대표적입니다(김진웅 외, 2022; Levy, et al., 2024 등).

다른 하나는 스마트폰에 내장된 센서를 기반으로 한 정량 분석을 가능케 하는 측정 도구로서의 역할이 있습니다. 예를 들어 사진으로부터 RGB 값을 추출하고 비색법(colorimetry)을 이용하여 특정 물질의 농도나 pH를 측정하는 다양한 선행연구를 찾을 수 있습니다(예: Li, et al., 2023; Zhang, et al., 2024 등).

이처럼 스마트폰은 화학교육의 효율성을 높이는 유망한 도구로 다양하게 연구되어 왔습니다만, 스마트폰을 단순히 측정이나 기록을 위한 '도구'로서가 아닌, 우리의 과학적 인식 행위를 좌우하는 연장된 신체로서 바라본 사례는 찾기 어려웠습니다. 그나마 스마트폰의 슬로우 모션 촬영 기능을 활용하여 연소나 폭발과 같이 빠르게 일어나는 화학 반응을 반복적으로 관찰하는 행위의 교육적 가능성을 보여준 연구(Sieve, 2021)가 있습니다만, 개념 이해나 정량적인 측정 이전에, 보다 신체적이고 감각적인 '관찰'의 차원에서 스마트폰의 교육적 가능성을 탐색한 연구는 왜 드물까요? 아직 충분히 무르익지 않은 성긴 생각이지만, 저를 포함한 우리 교육 연구자들이 '디지털 이민자(digital immigrant)'로서의 정체성을 갖고 있기 때문이라 추측해 봅니다. 즉, 스마트폰을 삶의 중간에 외부 기계로 도입한 기성세대는 스마트폰을 의사소통, 기록 등을 위한 효율적인 '도구'로 인식하지만, 태어날 때부터 스마트폰을 신체의 일부처럼 체화한 '디지털 원주민(digital native)'들에게는 '관찰'이라는 행위가 질적으로 다른 의미를 갖는 것은 아닐까요?

5. 나오며: 다시 질문으로

본고를 작성하며 필자는 학생들이 실험 수업 당시 촬영한 동영상들을 다시 돌려보았습니다. 사실 지퍼백에 넣은 드라이아이스의 승화, 물에 넣은 드라이아이스가 만드는 흰 연기와 지시약의 색 변화 등은 화학을 가르치는 사람이라면 수없이 많이 봤을 장면들일 것입니다. 그런데 이처럼 스마트폰으로 촬영한 동영상을 꼼꼼히 돌려보는 행위, 맨눈이 아닌 화면을 통해 능동적으로 시간적, 공간적 조작을 해가며 사물을 바라보는 행위, 이런 행위들은 화학 탐구 상황에서 '관찰'이라고 말할 수 있을까요? 만약 관찰이라

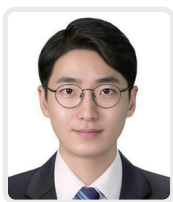
면 그것은 맨눈으로 보는 관찰과 무엇이 같고 무엇이 다를까요? 나아가, 화학 탐구 맥락에서 우리가 ‘좋은 관찰’이라고 부를 때 그것은 어떤 요소들을 갖추고 있어야 할까요?

알파 세대 이후로도 스마트폰은 더욱 정교해질 것입니다. 아니, 어쩌면 스마트폰을 뛰어넘는 놀라운 기술적 진보가 스마트폰을 사장시킬 수도 있습니다. 하지만 그 형태가 어떻든 간에, 미래에는 우리가 아직 이름 붙이지 못한 새로운 방식으로 학생들은 감각을 확장해 나갈 것입니다. 교육이 그 변화를 따라가려면 ‘관찰이란 무엇인가’라는 오래된 질문부터 다시 꺼내 들어야 할지도 모르겠습니다.

* 본 원고는 <이종혁. 과학교육에서 디지털 소양의 재개념화를 위한 탐색적 연구 - 인포스피어 관점을 중심으로, *초등과학교육*, 2025, 44, 380.>의 일부 내용을 바탕으로 작성됨.



1. 김진웅, 허지식, 하민우, 김수균. 증강현실 기술을 이용한 화학 학습 어플리케이션 디자인. *한국컴퓨터정보학회논문지* 2022, 27, 139.
2. Froese, T., & Fuchs, T. The extended body: a case study in the neurophenomenology of social interaction. *Phenom. Cogn. Sci.* 2012, 11, 205.
3. Ihde, D. (1990). *Technology and the lifeworld: From garden to earth*. Indiana University Press.
4. Li, J., O'Neill, M. L., Pattison, C., Zhou, J. H., Ito, J. M., Wong, C. S., Yu, H.-Z., & Merbouh, N. Mobile app to quantify pH strips and monitor titrations: Smartphone-aided chemical education and classroom demonstrations. *J. Chem. Educ.* 2023, 100, 3634.
5. Lin, Y., Liu, Q., Qi, D., Zhang, J., & Ding, Z. Smartphone embodiment: The effect of smartphone use on body representation. *Curr. Psychol.* 2023, 42, 26356.
6. Levy, J., Chagunda, I. C., Iosub, V., Leitch, D. C., & McIndoe, J. S. MoleculAR: An augmented reality application for understanding 3D geometry. *J. Chem. Educ.* 2024, 101, 2533.
7. Sieve, B. F. Tracking down chemical phenomena with the usage of mobile phone slow-motion videos. *Chem. Teach. Int.* 2021, 3, 221.
8. Zhang, H., Li, R., Ling, Y., Zhang, R., Zhu, G., Fu, G., & Tang, Y. Efficient colorimetry: Developing an application to support student digital colorimetry experiments. *J. Chem. Educ.* 2024, 101, 5507.



이종혁 Jong-Hyeok Lee

- 한국과학기술원(KAIST) 화학과, 학사(2006.3-2010.8)
- 서울대학교 대학원 과학교육과(화학전공), 석사(2012.3-2014.8, 지도교수: 홍훈기)
- 서울대학교 대학원 과학교육과(화학전공), 박사(2014.9-2020.8, 지도교수: 홍훈기)
- 단국대학교 미래교육혁신원 연구교수(2020.10-2023.6)
- 서울대학교 인포스피어 과학교육연구단 연수연구원(2024.9-현재)

분자기반 노화 연구실

(Chemical-Based Aging Research Lab)

| 주관연구기관 | POSTECH

| 연구책임자 | 장영태



POSTECH POHANG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

 포항시 남구 자곡로 127번길 50, 화학관 320호

 054-279-2101

 ytchang@postech.ac.kr

 <https://ytchang.postech.ac.kr>

살아있는 세포를 직접 보는 화학 ... 질병과 노화의 원리를 밝히다

POSTECH 분자기반 노화 연구실

POSTECH 분자기반 노화 연구실(연구책임자 화학과 장영태 교수)은 화학적 방법으로 살아있는 세포 내부의 분자 현상을 직접 관찰하는 새로운 연구 패러다임을 제시하고 있다. 생명과학은 오랫동안 유전자 분석과 생화학적 정량 측정을 통해 세포 기능을 이해해 왔지만, 실제 생명현상은 시간과 공간 속에서 동시에 변화하는 동적 과정이다. 연구실은 이 문제를 해결하기 위해 분자 설계와 합성, 반응성 화학, 이미징 물리학, 세포생물학을 통합하여 “살아있는 상태 그대로의 생명현상”을 측정하는 화학 기술을 개발하고 있다.

세포는 동일한 유전 정보를 가지더라도 대사 상태, 스트레스, 분화 단계, 노화 정도에 따라 서로 다른 기능적 상태를 나타낸다. 연구실은 이러한 세포의 상태를 직접 판별할 수 있는 형광분자를 설계하여 세포 집단의 평균값이 아니라 개별 세포의 상태를 구분하는 정밀 분석을 가능하게 한다. 이를 통해 질병 발생 초기 단계의 미세한 변화를 탐지하고, 노화 과정에서 나타나는 세포 기능 변화의 인과관계를 규명하는 것을 목표로 한다.

연구실의 궁극적 목표는 “보이지 않는 생명현상을 측정 가능한 물리량으로 변환하는 화학 기술”을 확립하고, 이를 기반으로 질병 진단·치료·노화 제어 연구에 새로운 기반을 제공하는 것이다.

1 구체적 연구 추진 현황

연구실은 세포 선택적 분자영상 기술을 중심으로 여러 층위의 연구를 동시에 수행하고 있다.

1. 세포 상태 선택적 형광 프로브 개발

기존 염색법은 특정 단백질 발현 여부만을 기반으로 세포를 구분하므로 기능 상태 차이를 반영하지 못하는 한계가 있다. 연구실은 세포 표면 수송체 활성화, 막 지질 조성, 당쇄 구조, 세포 내 환원 환경, 대사 반응성 등 화학적 차이를 이용하여 세포 상태를 구분하는 프로브를 개발하였다(그림 1).

이 접근법은 특정 표적 분자를 인식하는 방식을 넘어서 세포 전체의 생리적 상태를 반영하는 반응성을 이용하기 때문에,

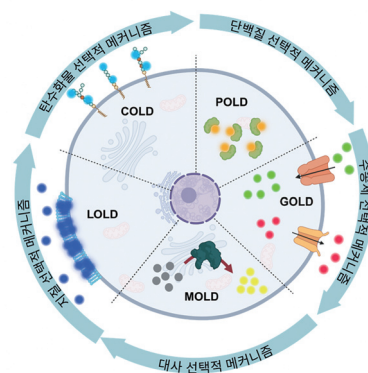


그림 1. 세포 선택적 프로브의 메커니즘

동일 세포 유형 내에서도 기능적으로 다른 하위 집단을 구분할 수 있다. 이를 통해 암 줄기세포, 분화 단계가 다른 줄기세포, 기능이 저하된 노화세포 등을 살아있는 상태에서 직접 식별할 수 있다.

2. 단백질 응집체 및 생체 콘덴세이트 이미징

세포 내부에서는 단백질들이 동적으로 모이고 흩어지며 기능적 구조체를 형성한다. 이러한 응집체는 스트레스 반응, 신호 전달, 신경퇴행성 질환과 밀접하게 관련되어 있지만 기존 형광 단백질 태깅 방법으로는 자연 상태 관찰이 어렵다.

연구실은 응집체 내부 환경의 극성, 점도, 분자 밀도 차이를 감지하는 화학 프로브를 개발하여 특정 단백질을 표지하지 않고도 구조체 형성과 해체 과정을 실시간으로 관찰하는 방법을 제시하였다(그림 2). 이 기술은 세포 기능 변화의 초기 단계를 이해하는 새로운 분석 도구가 된다.

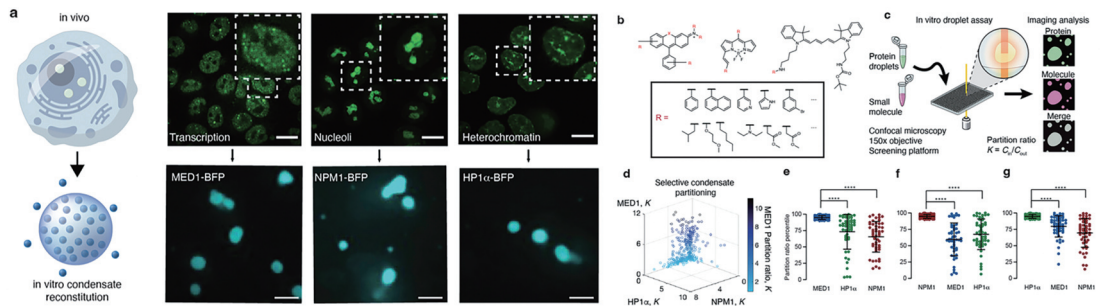


그림 2. 콘덴세이트 내부 특성을 감지하는 small-molecule chemical probe의 설계 및 분석

3. 초광안정 형광염료 및 장시간 단분자 이미징

단일 분자 수준의 생명현상을 이해하기 위해서는 장시간 추적이 필수적이지만, 기존 형광염료는 광표백으로 인해 수 초 내 관찰이 종료된다. 연구실은 분자 구조 설계를 통해 광화학 반응 경로를 제어하여 광안정성을 획기적으로 향상시킨 염료를 개발하였다(그림 3).

이 염료는 분 단위 이상의 장시간 단분자 추적을 가능하게 하며, 단백질 이동, 전사 활성, 세포막 수용체 동역학 등 기존에는 측정이 어려웠던 생체 분자 운동을 정량적으로 분석할 수 있다. 이는 생명현상을 시간 축에서 이해하는 새로운 연구 방법을 제공한다.

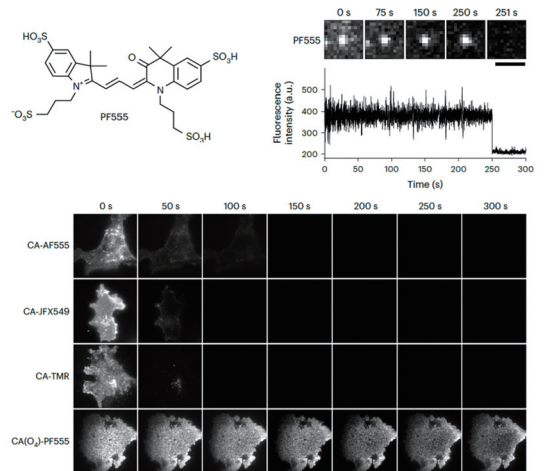


그림 3. 초광안정성 염료 개발

4. 노화세포 특이적 이미징 기술

노화는 특정 유전자 변화가 아니라 대사, 분비, 구조 변화가 복합적으로 나타나는 현상이다. 연구실은 핵에서 세포질로 유출된 DNA, 당쇄 구조 변화, 막 성분 변화 등 노화 과정에서 나타나는 특이적 화학 지표를 기반으로 노화세포를 식별하는 프로브를 개발하였다[그림 4].

이 기술은 조직 내 노화세포 분포를 직접 측정할 수 있게 하며, 노화 억제 및 제거 전략의 효과를 정량적으로 평가하는 도구로 활용될 수 있다.



그림 4. 노화세포 특이적 프로브 개발 모식도

2 국내외 연구성과

연구실은 화학적 접근으로 생명현상을 직접 관찰한다는 새로운 연구 방향을 제시하며 분자영상 분야에서 독자적인 연구 축을 형성해 왔다. 기존 생명과학이 유전자 조작 기반 형광단백질 또는 항체 염색에 의존했다면, 본 연구는 외부 조작 없이 세포 자체의 화학적 상태를 읽어내는 방법론을 구축했다는 점에서 차별성을 가진다.

첫째, 살아있는 세포 상태를 구분하는 선택적 형광 프로브 플랫폼을 구축하였다[그림 5]. 이 기술은 특

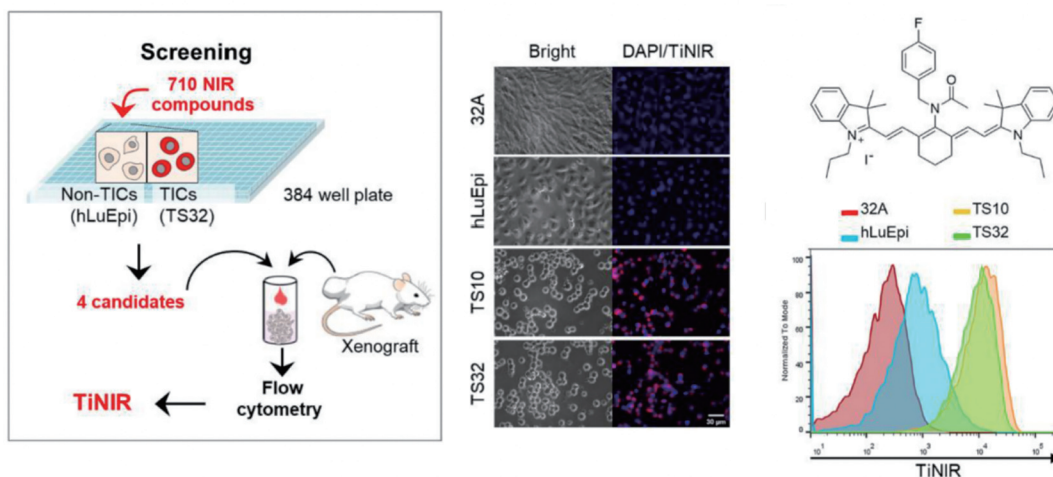


그림 5. 형광 프로브 플랫폼을 활용한 암 줄기세포 선택적 프로브 개발

정 단백질의 존재 여부가 아니라 세포막 구성, 수용체 활성화, 환원 환경, 대사 상태 등 복합적인 화학적 특성을 반영한다. 이를 통해 동일한 세포 집단 내부에서도 기능적으로 서로 다른 하위 집단을 분리할 수 있음을 입증하였다. 이러한 접근은 암 줄기세포, 분화 단계 세포, 기능 저하 세포를 동시에 분석할 수 있는 새로운 단일세포 분석 방법으로 활용되고 있으며, 세포 이질성 연구의 핵심 도구로 평가된다.

둘째, 단백질 응집체와 생체 콘덴세이트를 직접 관찰하는 이미징 기술을 확립하였다[그림 6]. 세포 내부 구조체는 막으로 구분되지 않는 동적 구조이기 때문에 기존 표지 방법으로는 자연 상태 분석이 어렵다. 연구실은 미세환경의 극성·점도·분자밀도를 감지하는 프로브를 이용해 구조체 형성과 해체 과정을 실시간으로 추적하였다. 이를 통해 스트레스 반응 및 신경퇴행성 질환 관련 초기 단계 변화를 관찰할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 성과는 단백질 응집이 결과가 아니라 과정이라는 점을 실험적으로 분석 가능하게 만든 기술적 기반을 제공한다.

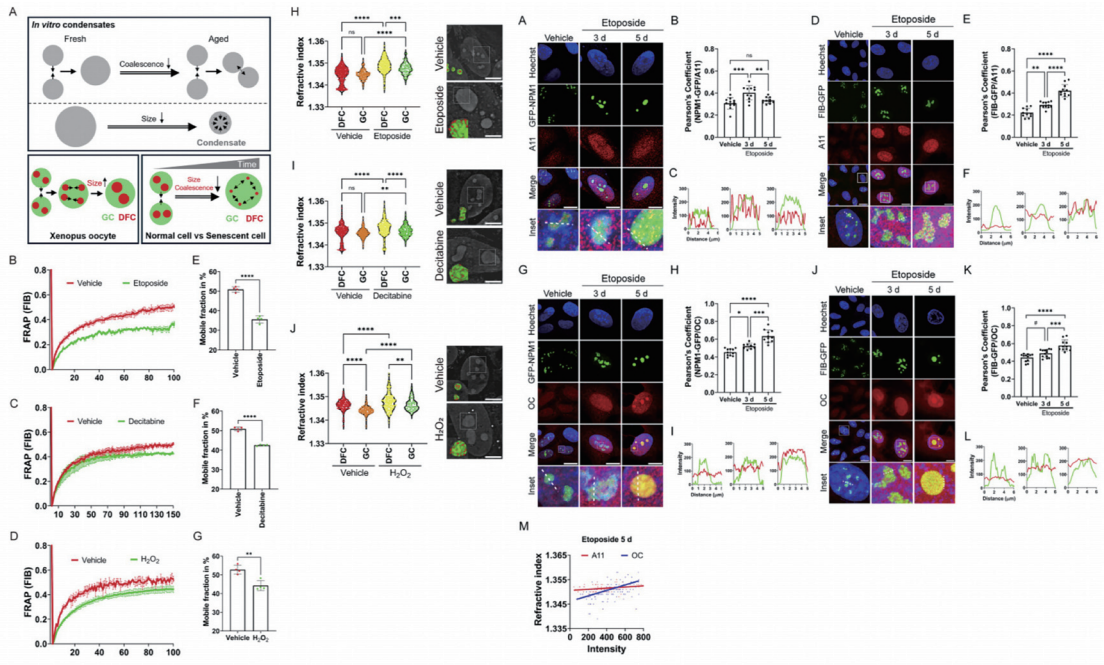


그림 6. 이미징을 통해 규명한 콘덴세이트의 역상-고상 전이와 응집 추적 과정

셋째, 초광안정 형광염료를 개발하여 장시간 단분자 이미징을 가능하게 하였다[그림 7]. 기존 형광염료는 광표백으로 인해 수 초 내 신호가 소멸되어 분자 이동이나 반응의 장기 동역학 분석이 제한적이었다. 연구실이 개발한 염료는 광화학 반응 경로 제어를 통해 안정성을 크게 향상시켜 분 단위 이상의 단분자 추적을 가능하게 하였다. 이 기술은 단백질 이동 경로, 수용체 클러스터 형성, 전사 활성 변동 등 생명현상을 시간 축에서 분석하는 새로운 방법론으로 활용되고 있다. 특히 기존 초해상도 이미징 기술의 관찰 시간을 확장함으로써 동역학 연구의 새로운 표준을 제시하였다.

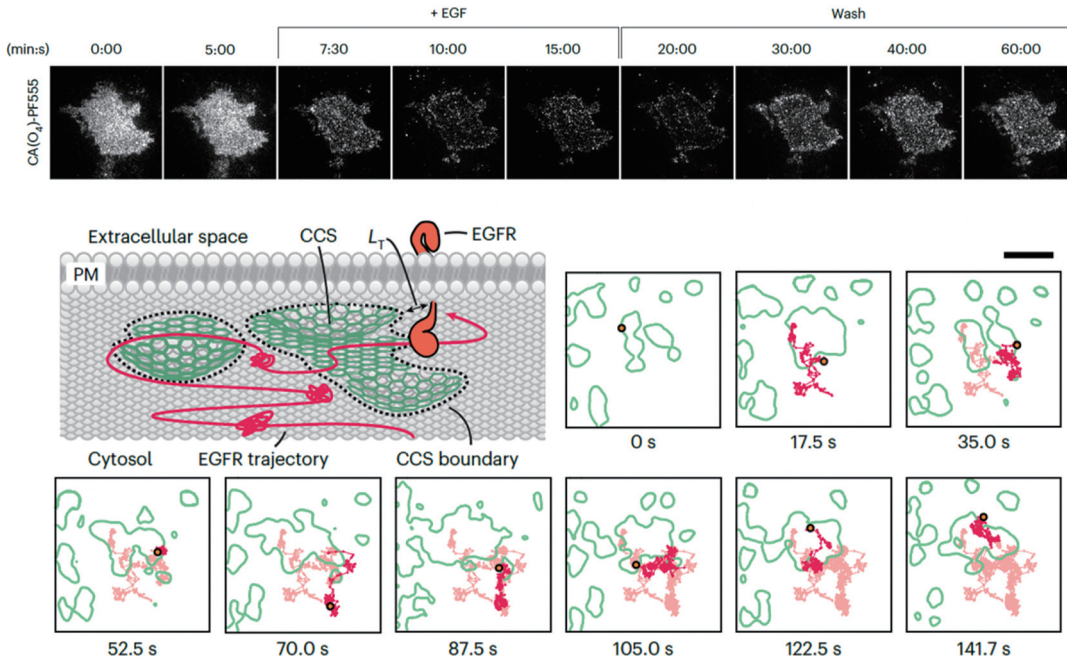


그림 7. 초광안정 염료를 이용한 장시간 단분자 이미징

넷째, 노화세포를 식별하는 화학적 바이오마커를 제시하였다. 노화는 특정 분자의 발현 변화보다 세포 환경 전체의 변화가 특징적인 현상이다. 연구실은 분비 DNA, 당쇄 구조 변화, 막 성분 변화 등 노화 환경을 반영하는 화학적 특징을 기반으로 노화세포를 직접 검출하는 방법을 개발하였다. 이를 통해 조직 내 노화세포 분포를 정량적으로 분석할 수 있으며, 노화 제거 치료 전략의 효과 평가 도구로 활용 가능성을 제시하였다. 이 접근은 노화를 ‘시간 개념’이 아니라 ‘측정 가능한 생물학적 상태’로 정의하는 연구 기반을 제공한다.

다섯째, 이러한 연구 결과들은 세포 기능 분석뿐 아니라 약물 평가, 치료 타겟 검증, 질병 모델 해석 등 다양한 응용으로 확장되고 있다. 특히 살아있는 상태에서 세포 기능을 측정할 수 있다는 점에서 기존 생화학 분석 대비 예측력이 높아 신약 개발 초기 단계의 기능 평가 도구로 활용 가능성이 제시되고 있다[그림 8]. 연구실이 제시한 화학 기반 분자영상 접근법은 기초 연구와 임상 응용을 아우르는 범용적 측정 플랫폼으로 자리잡고 있다.

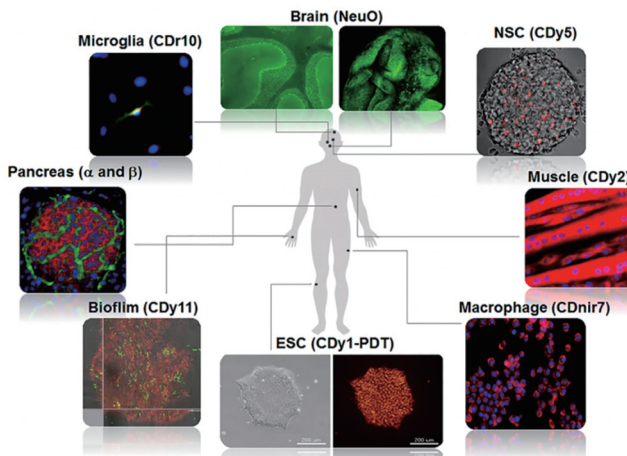


그림 8. 다양한 프로브를 이용한 살아있는 상태의 세포 관찰

한편, 장영태 교수는 20여 년간 축적한 기술을 바탕으로 2022년에는 센프로(SENPRO)라는 바이오테크놀로지 기업을 창업하였다. 센프로는 Sensors & Probes의 의미를 담아, 독창적인 기술과 혁신을 통해 보이지 않던 생명의 신호를 밝혀내는 것을 지향한다. 센프로의 핵심 기술은 DOFLA (Diversity Oriented Fluorescence Library Approach) 기반의 플랫폼으로, 10,000개 이상의 형광 분자 라이브러리와 고속 이미징 스크리닝 시스템을 통해 줄기세포부터 다양한 분화세포, 노화세포에 이르기까지 특정 세포를 선택적으로 표지하고 관찰할 수 있는 고성능 이미징 프로브를 제공하고 있다. 또한 센프로는 세계 최고 수준의 광안정성을 갖춘 유기 형광 염료 PhoenixFluor(PF)를 공동 개발하여, 세포 이미징은 물론 화학·생물학적 표지를 위한 다양한 기능성 시약을 공급하고 있다. 최근 센프로는 한국 파스퇴르 연구소와 “세포 페인팅 기반 차세대 신약개발 후보물질 발굴” MOU를 체결하고 공동 연구를 진행하고 있다.

About



POSTECH 분자기반 노화 연구실



장영태 연구책임자
POSTECH 화학과 교수

포스텍 화학과 분자기반 노화 연구실은 화학 합성, 분광 분석, 이미징 물리, 세포 생물학을 하나의 연구 흐름으로 통합한 융합 연구 환경을 구축하고 있다. 학생들은 특정 기술만 수행하는 것이 아니라 분자 설계 → 합성 → 물성 분석 → 세포 실험 → 이미징 해석까지 전 과정을 직접 수행한다. 이러한 구조는 연구자가 현상의 한 부분만 이해하는 것이 아니라 실험 결과의 원인과 의미를 동시에 해석할 수 있게 만든다.

특히 교육 과정은 “도구를 사용하는 연구자”가 아닌 “도구를 만드는 연구자” 양성을 목표로 한다. 기존 생명과학 연구자가 장비와 시약에 의존하는 것과 달리, 연구실 구성원은 주도적으로 새로운 분자를 설계하고 측정 원리를 구축하며 분석 방법까지 설계한다. 이는 연구자가 문제 해결 방식 자체를 설계할 수 있는 능력을 갖추도록 하는 교육 철학에 기반한다. 연구 환경 또한 다양한 분야 협력이 가능한 개방형 구조로 운영된다. 화학, 물리, 생명과학, 의학 연구자들과의 공동연구를 통해 기술을 실제 생명현상 문제에 적용하며, 새로운 측정 기술이 실제 연구 질문을 해결하는 방향으로 발전하도록 한다. 이러한 상호작용은 기초 연구 결과가 실제 생물학적 의미로 이어지는 과정을 빠르게 만든다.

연구실의 중장기 비전은 생명현상의 분석 체계를 정성적 관찰에서 정량적 측정으로 전환하는 것이다. 현재 많은 생명과학 연구는 특정 유전자 발현 증가 또는 감소로 현상을 설명하지만, 실제 생명현상은 시간과 공간에 따라 연속적으로 변화한다. 연구실은 이를 물리량으로 측정 가능한 데이터로 변환하는 화학 센서를 개발하여 생명과학의 측정 해상도를 높이고자 한다. 또한 질병 연구 패러다임 변화에도 기여하는 것을 목표로 한다. 질병은 특정 분자의 유무가 아니라 세포 상태의 변화 과정에서 발생한다는 관점에서, 연구실의 기술은 질병의 발생 이전 단계인 기능 변화 상태를 탐지하는 조기 분석 도구로 확장될 수 있다. 이는 치료 중심 의학에서 예방 중심 의학으로 전환되는 기반 기술이 될 수 있다.

궁극적으로 연구실은 화학을 생명현상 측정의 언어로 확립하는 것을 목표로 한다. 보이지 않는 생명현상을 실시간 데이터로 변환하고, 이를 통해 노화와 질병을 이해하고 제어 가능한 대상으로 만드는 것이 연구의 장기적인 방향이다. 이러한 연구는 기초과학의 확장뿐 아니라 정밀의학과 차세대 바이오 산업의 핵심 기반 기술로 이어질 것으로 기대된다.

화학세계가 만난 화학자 50

“연구에서
사람을 향한 가치로,
신약개발의 길을 묻다”

한태동

Dt&C Bio GROUP 부회장
前 앵티스(AbTis) 대표



<화학세계가 만난 화학자> 5월호에서는 한태동 박사(前 앵티스 주식회사 대표)를 모셨습니다. 한 박사는 유기합성 연구자로 출발하여 “아픈 사람을 도와주는 일”이라는 신념 아래 20여 년간 신약개발 분야에서 연구를 이어왔습니다. 이번 인터뷰에서는 연구자의 진로 선택과 현장에서의 고민, 의미 있는 일을 향한 지속적인 선택의 과정을 담았습니다. 또한 연구와 사업의 경계를 넘나들며 기술의 상업화와 글로벌 협력 속에서 축적된 경험과 통찰을 소개합니다. 이를 통해 ‘지금 주어진 일에 최선을 다하는 것’이 미래를 만들어간다는 메시지를 전하고자 합니다.

[모더레이터: 김은하 교수(아주대학교 분자과학기술학과)]

※ 본 인터뷰는 앵티스 주식회사 대표 재직 당시 진행된 내용입니다.

Q1. 먼저 대표님의 학부와 대학원 시절 연구 분야 등 간단한 소개 부탁드립니다.

저는 92년도에 경희대 화학과에 입학하여 유기화학, 무기화학, 분석화학 등을 공부하면서 새롭게 만드는 것에 흥미가 있었으며 성격 또한 맞다고 생각이 들어서 대학원에 가면 유기합성을 전공해야겠다고 생각하였습니다. 또한 그 당시에는 유기합성을 전공하면 제약 회사, 화학 회사, 페인트 회사, 반도체 회사 등 다양한 회사들에 취업을 할 수 있다는 장점도 고려하였습니다. 대학원에서 유기금속촉매 연구를 하였으며 졸업한 후 KIST에서 연구원 생활을 시작하게 되었습니다. 저의 KIST 연구실에서는 항생제를 개발하였는데, 이렇게

시작된 연구가 저의 신약개발 첫 여정이 아닌가 생각합니다. 1999년 말 KIST에 근무할 때 고향인 부산에 있는 조광페인트라는 회사에 합격하여 신입사원 교육까지 받았습니다. 그런데 교육을 받다 보니 정말 내가 하고 싶은 일인지, 돈을 벌기 위해 취업 때문에 내가 여기에 있는지에 대해 고민을 많이 하게 되었으며, 1주 교육 후 그만두겠다고 얘기하고 다시 KIST로 돌아왔습니다. 만약 제가 그때 조광페인트에 다녔다면 지금은 페인트를 만드는 연구원이 되어있지 않을까 생각이 듭니다. 그때의 선택으로 2000년 3월 유한양행 신약연구팀에 입사를 하게 되었으며, 지금까지 27년 동안 신약을 개발하는 운 좋은(?) 사람이 되었다고 생각합니다. 직업에 귀천은 없지만, 제가 하는 일이 아픈 사람을 도와주는 행복한 일이라 생각하면 다른 직업보다는 의미 있는 일이 아닐까 생각을 해 봅니다. 2000년 유한양행에 입사 후 16년 만에 합성신약을 총괄하는 팀장을 맡게 되었고, 많은 신약과제를 관리하게 된 것이 저의 신약개발 역량에 많은 도움을 줬다고 생각합니다. 동아에스티에서는 2020년에 합성신약 실장(상무)으로 합류하게 되었으며, 유한양행에서 하지 않았던 TPD(target protein degradation) 신약, 천연물 등 다양한 모달리티(modality)를 연구할 수 있는 기회도 가졌다고 생각합니다. 연구의 성과로는 유한양행 재직 시, J&J로 렉라자(레이저티닙) L/O, Gilead Sciences로 MASH 치료제 L/O 등 기술이전에 핵심적인 역할을 수행하였습니다. 2023년 동아에스티에서 ADC 전문기업인 앵티스를 인수하면서 신입 대표이사로 취임하여 앵티스의 ADC 신약개발과 경영 전반을 총괄했습니다.

대외활동으로는 현재 한국제약바이오협회 AI신약전문위원회 위원장, 한국의약화학회 회장을 맡고 있으며, 과거 대한화학회 의약화학분과 부회장, 한국비임상시험연구회 의약화학분과 분과장을 역임한 적이 있습니다.

Q2. 항체약물접합체(ADC) 분야에 관심을 갖게 된 계기와 전환점이 있었는지 궁금합니다.

우리나라 제약회사들의 신약개발은 1980년대 후반부터 시작되어 이제 40년이 되어가고 있으며, 개발되었던 신약들은 90% 이상 합성신약 위주로 연구되었습니다. 글로벌 제약사들도 신약으로 승인받은 약물의 대부분은 합성신약과 바이오신약(항체)으로 이루어져 있었으며, 치료 효과 등에 한계를 느끼고 신규 모달리티인 세포 치료제, 유전자 치료제, 방사선 치료제, TPD 등 새로운 영역으로 확장해 나가고 있는 실정입니다. 하지만 기존 제약사들의 연구원들은 신규 모달리티 연구 경험과 전공자들이 없어 쉽게 접근할 수 있는 상황이 아닙니다. 또한 이러한 새로운 영역에서 신약이 본격적으로 나오는 시점은 향후 5~10년 후가 되지 않을까 생각이 듭니다. 그러면 그 사이 우리가 할 수 있는 영역은 무엇인가를 고민하게 되었으며, 2020년 이후 가장 주목받는 분야가 ADC였기에 이에 대해 관심을 갖기 시작하였습니다. ADC (항체-약물 접합체)를 개발하기 위해서는 항체, 링커, 페이로드가 필요합니다. 동아쏘시오그룹에는 항체를 GMP 수준에서 생산할 수 있는 CDMO 회사인 에스티젠바이오가 있으며, 링커-페이로드를 생산할 수 있는 에스티팜이기에 ADC 신약을 개발한다면 그룹사 간의 상승효과(synergy)도 있을 것이라 판단되어 ADC 플랫폼이 있는 앵티스를 인수하여 ADC 신약개발을 하게 되었습니다.

Q3. 연구자에서 기업가로 진로를 바꾸게 된 결정적인 이유는 무엇이었습니까?

지금 전통 제약사들보다 시가총액이 수조 원에 이르는 바이오 신약개발 회사들인 알테오젠, 리가켄바이오, 에이비엘바이오 등의 창립자들은 모두 연구원 출신으로 그분들이 가진 기술과 경험들을 바탕으로 지

금의 회사들이 만들어졌다고 생각합니다. 지금도 끊임없이 새로운 벤처기업들이 만들어지고 있으며, 학교에서 연구한 결과물로 교수님들이 교내 벤처 창업을 하고 있습니다. 결국은 우리의 연구가 단순히 논문을 내는 연구에 그치지 않고 어떻게 이를 상업화 시킬 수 있는지에 대해 고민을 하게 되면 누구나 연구자에서 기업가가 되지 않을까 생각이 됩니다. 바이오벤처는 연구자와 기업가가 따로 있는 것이 아니라 한 몸이라고 생각되며, 그래서 바이오 벤처 대표들은 연구원 출신이 대부분을 차지하고 있습니다. 상업화에 초점을 맞추는 연구를 하시는 교수님, 연구원들은 언젠가는 사업가가 되리라 생각합니다.

Q4. 앵티스의 설립과 핵심 기술은 무엇인가요?

앵티스는 현 성균관대학교 약학대학 교수인 정상전 교수님이 2016년 8월에 설립한 바이오 벤처기업입니다. 2018년에 국내 기관투자자들을 대상으로 Series A 투자 유치에 성공하며 수원 벤처밸리에 ADC 연구소를 설립하였습니다. 연구소 설립으로 본격적인 ADC 신약개발의 핵심 구성요소인 링커 기술 개발에 착수하여 3세대 링커 기술인 “앵클릭(AbClick)” 플랫폼 개발에 성공하였고, 이를 바탕으로 2021년 대규모 Series B 투자를 유치하였습니다. 이후 위암·췌장암을 타깃하는 Claudin18.2 ADC(코드명 AT-211) 치료제가 임상 1상에 진행 중입니다. 후속 파이프라인으로 이중항체 ADC, ARC, DAC 등 다양한 항체-약물 접합체 과제들을 진행하고 있습니다. 이를 통해 신약 파이프라인과 3세대 링커 플랫폼 라이선싱 아웃을 통해 성장하는 회사라고 할 수 있을 것 같습니다.

2022년에는 세계 1위 바이오 CDMO(Contract Development and Manufacturing Organization) 기업인 스위스 론자(Lonza)와 기술 협력 파트너십 계약을 체결하였습니다. 2023년에는 ‘AT-211 프로젝트’와 ‘블록버스터 ADC 구성요소 개발 프로젝트’ 2가지에 대해서 국가신약개발사업단(KDDF) 지원 과제로 선정되는 등 국내외에서 기술력을 인정받고 있습니다. 또한 2025년 3월에는 중국 Wuxi XDC, 5월에는 ChemExpress와 ADC 분야 Toolbox Partnership 계약을 체결하고 7월에는 롯데바이오로직스와 MOU 계약을 맺어 글로벌 ADC 업계에서 앵티스의 경쟁력이 빠르게 부상하고 있으며, 7월에는 대한민국 특허 대상을 수상하는 등 앵티스의 차세대 링커 기술에 대해 우수성을 입증받았다고 생각합니다.

Q5. 현재 업계에서 뜨거운 관심을 받고 있는 앵티스가 보유한 3세대 ADC 링커 플랫폼인 ‘앵클릭’에 대해 설명해주신다면?

ADC에서 링커는 항체와 페이로드를 연결하는 화학 구조를 의미합니다. 링커의 역할은 약물-항체 비율(DAR, Drug Antibody Ratio) 조절, ADC의 수용성 조절을 통한 생물학적 반감기 조절, 절단형 링커(Cleavable linker) 또는 트리거(Trigger)를 통한 약물 방출조절 기능을 수행합니다.

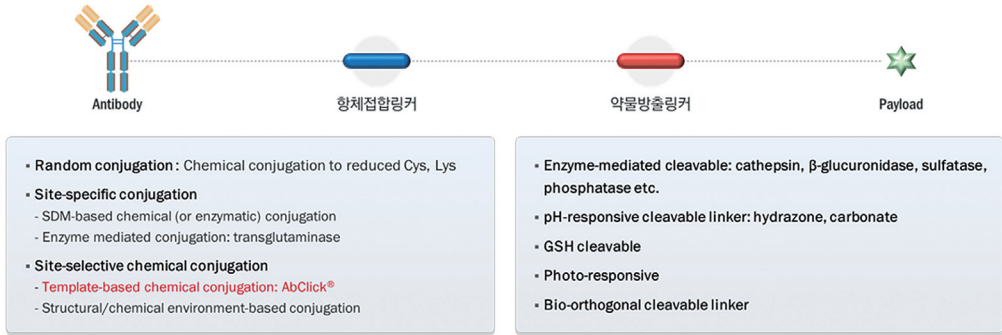
항체-약물 접합링커 기술은 크게 기술 개발 시기에 따라, 1, 2, 3세대 기술로 분류되며, 현재 FDA 승인을 받은 ADC 신약의 경우 모두 1세대 기술을 이용하여 개발되었습니다. 그러나 이들 신약의 경우 높은 시장성에도 불구하고, 여전히 약물의 비선택적 분리, 링커의 불안정성, 약물-항체 비율(DAR)의 불균일성 등으로 부작용 및 효능 저하가 빈번히 발생하고 있습니다.

이러한 시장의 미충족 수요(unmet needs)를 개선하기 위해 새로운 ADC 2세대, 3세대 기술이 개발되고 있고, 세대별 특징을 보면 아래와 같습니다.

편의상 ADC 링커는 항체접합 링커와 약물방출 링커로 구분됨

항체접합 링커 항체에 대한 접합 위치, DAR, 약물의 안정성, 용해도 등에 영향

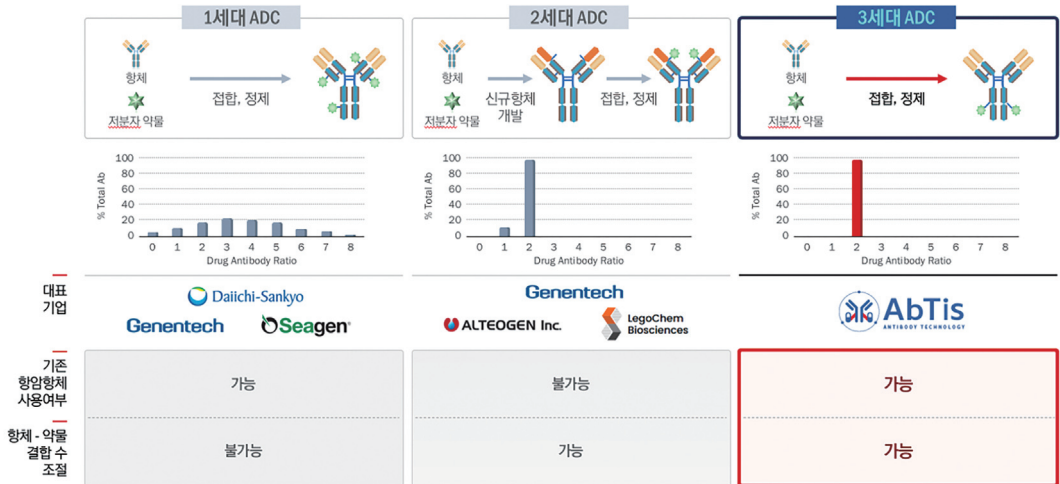
약물방출 링커 약물이 이탈하는 위치와 시간을 결정



• 1세대 링커 기술: 약물-항체 비율(DAR) 조절이 어려워 약물 생산 및 허가에 필요한 균일한 품질 관리가 어렵습니다(사용 기업: 제넨텍, 시젠, 다이이치산교 등). 여러 가지 형태의 ADC 혼합물로 구성되어있기 때문에 때때로 약물(=페이로드)이 혈장에서 분해되어 종양세포뿐 아니라 정상세포를 공격하여 부작용을 일으킬 수 있습니다.

• 2세대 링커 기술: 항체의 특정 부위에만 선택적으로 약물을 도입하기 위해 항체의 아미노산 서열에 일부를 변경하는 과정을 진행한 후 약물을 결합하는 방식입니다. 항체에 돌연변이를 유도하는 과정이 추가되었으나 DAR 조절이 가능하여 품질 관리가 용이합니다(사용 기업: 시젠, 레고켄, 알테오젠 등). 그러나 새로운 돌연변이 항체 개발을 위해 세포주 개발부터 다시 진행해야 하므로 ADC 신약개발 기간과 비용이 증가될 수 있는 단점이 있습니다.

• 3세대 링커 기술: 항체에 돌연변이를 유도하는 과정 없이 DAR 조절과 결합 위치를 조절할 수 있는 특화된 링커 기술입니다. 품질 관리가 용이하며 기존 항체의 사용으로 경제성이 높습니다(사용 기업: 앵티스, 아지노모토 등). 또한 가지 장점은 기존에 판매 중인 항체 또는 임상시험 중인 항체를 ADC 신약으로도 쉽게 개발이 가능하기 때문에 확장성이 좋은 기술이라고 볼 수 있습니다.



Q6. 대표님께서 보시기에 기존 ADC 기술의 가장 큰 한계는 무엇이며, 이를 해결하기 위해 앵티스만의 어떤 화학적 접근을 시도하셨는지 설명 부탁드립니다.

ADC 개발의 주 목적은 기존 세포독성 항암제의 주요 문제점인 오프타겟(off-target) 독성을 줄이는 것입니다. 이를 위해, 세포독성 항암제에 항체를 결합하여 정상세포가 아닌 항원이 과발현된 암세포만을 선택적으로 사멸시켜 최대허용용량(MTD)을 높입니다. 또한 약물이 항체에 결합해 있어 반감기를 늘리며, 암세포만을 효율적으로 공격하여 최소유효용량(MED)을 낮추어, 항암 치료 효율을 높이는 데 목적이 있습니다. 하지만 위에서 설명한 것처럼 1세대 ADC는 혈중 안정성이 낮아 세포독성 항암제가 분리되면서 정상세포를 손상시키는 off-target 독성이 충분히 개선되지 않는 문제점이 있었습니다. 이처럼 ADC에서 독성 개선은 여전히 해결해야 할 가장 중요한 과제 중 하나입니다. 이에 앵티스는 기존 항체에 혈중에서 불안정한 cysteine에 약물을 붙이는 방식이 아니라, 혈중에서 안정한 lysine에 amide 결합을 시킴으로써 이를 해결하고자 하였습니다. 그리고 1세대 ADC처럼 약물이 무작위(random)로 어디에 정확하게 결합하는지 모르는 물질을 만드는 것이 아니라, 특정 위치인 Lys 248에 선택적으로 결합할 수 있는 펩타이드 기반 화합물을 설계하여 개발함으로써 1세대의 문제점들을 해결했다고 판단됩니다. 이러한 물질 설계는 화학자들만이 생각할 수 있는 접근법이라 할 수 있겠습니다.

Q7. ADC 기술 개발 과정에서 기억에 남는 실패나 어려움, 그리고 이를 극복한 경험이 있다면 소개해 주십시오.

ADC는 연구개발 기간이 상대적으로 길고 복잡하며, 개발 비용도 합성신약, 항체신약 대비 최소 2배 이상 소요됩니다. 경쟁력 있는 ADC 파이프라인을 개발하기 위해서는 이러한 점을 고려하여 R&D 전략을 수립해야 합니다. 요약하자면, 제한적인 R&D 예산으로 IND 신청이 가능한 ADC를 빠르게 개발해야 했던 점이 가장 큰 어려움이었습니다.

ADC 신약 개발을 위해서는 크게 항체, 링커, 페이로드(약물)가 필요합니다. 앵티스가 3세대 링커 플랫폼 기술인 ‘앵클릭’을 보유하고 있지만, ADC 신약 개발을 위해서는 항체와 페이로드도 필요합니다. 우수한 항체 선정, 페이로드 연구, DAR 선정 등 최적의 ADC 설계를 도출하기 위한 discovery 과정이 매우 중요합니다. 또한 항체, 링커, 페이로드 각각의 CMC, 이들을 조합한 ADC DS/DP CMC 도 매우 복잡하여 높은 수준의 전문성과 경험이 요구됩니다.

앵티스는 이러한 R&D 과정을 성공적으로 수행했고, 결국에 리딩 파이프라인 AT-211의 IND 임상 승인을 얻어냈습니다. 이러한 경험을 통해서 얻은 검증된 개발 노하우를 후속 ADC의 파이프라인에 접목하고 있어, 이제는 과거의 어려움이 앵티스의 R&D 경쟁력으로 거듭나고 있습니다.

Q8. ADC개발은 항체공학, 링커기술, 공정기술 등이 결합된 융합 분야라고 생각합니다. 이 가운데 화학자의 역할은 무엇이라고 생각하십니까?

ADC는 항체(Antibody)에 세포독성 약물(Drug, payload)을 다양한 링커를 통해 공유결합으로 연결한 구조입니다. 이 중 우리 화학자들이 할 수 있는 분야는 새로운 페이로드(세포독성 항암제, small molecule)와 물질/수율/약물방출이 개선된 링커를 개발할 수 있으며, 최종물질인 ADC를 만드는 것도 유기합성과 동일

합니다. 결론적으로 융합 분야인 ADC에서 항체와 관련된 부분 외에는 많은 부분이 화학자와 연관되어 있다고 할 수 있겠습니다.

Q9. 학부생이나 대학원생이 ADC 분야에 진출하기 위해 어떤 화학적 기반을 갖추는 것이 중요할까요?

현재 국내뿐 아니라 해외 대학에서도 ADC 전공은 없으며, 단지 교수님들의 연구가 ADC에 사용될 수 있는 연구를 할 경우 이 분야에 적용하고 있어서 요즘 몇몇 대학에서는 ADC를 합성하고 평가하는 연구들이 진행되고 있습니다. 그래서 국내 ADC 전문 기업이라고 할 수 있는 L사, A사뿐 아니라 저희 앵티스 합성 연구원들의 대학원 전공도 대부분 유기합성 또는 생화학 전공자들로 되어 있습니다. 따라서 유기합성자들은 새로운 페이로드, 링커 개발 등 ADC의 다양한 부분에 관여할 수 있으며, 회사에서 항체와 약물을 접합하는 기술만 일정 수준 익힌다면 누구나 ADC 분야에 뛰어드는 데는 문제가 없다고 생각합니다. 저 역시 25년 동안 합성의약품을 개발하다가 무리 없이 ADC 분야 연구를 하고 있으나, 단지 이 분야에 필요한 항체(antibody)에 대한 공부를 조금 더 할 필요가 있다고 생각합니다. 모든 신약들은 모달리티에 따라 전임상 후보물질의 구조는 다를지라도 그들을 평가하는 약효/DMPK/독성/임상 평가 등은 거의 비슷하게 진행됩니다. 따라서 신약 개발에 있어서 한 분야에서 많은 경험은 새로운 모달리티 연구에도 확장이 가능하기에 화학자로서의 다양한 경험이 신약연구를 하는데 필요하다고 생각합니다.

Q10. 현재 글로벌 ADC 시장의 흐름과 성장 가능성을 어떻게 보고 계십니까?

현재 글로벌 ADC 업계는 빠르게 진화하고 있습니다. Bispecific ADC, Dual Payload, High DAR(Drug Antibody Ratio) 등 다양한 ADC 기술이 새롭게 부상하고 있습니다. 앵티스도 이러한 트렌드에 맞추어 단순한 ADC 파이프라인 개발에 그치지 않고, 자체 플랫폼 기술인 ‘앵클릭’의 경쟁력을 더욱 강화하는 방향으로 사업을 전개할 계획입니다.

향후 단순한 ADC 항암제 개발만으로는 시장에서 경쟁력을 확보하기 어려울 것으로 전망됩니다. 특히 다이이치산쿄(Daiichi Sankyo)의 엔허투(Enhertu)가 임상에서 탁월한 유효성을 입증하면서, 차별성이 부족한 ADC 파이프라인은 개발 동력이 떨어질 가능성이 높아졌습니다. 이에 따라 앞으로는 항체 선정도 중요하지만, 이를 연결하는 링커와 페이로드의 중요성이 더욱 부각될 것으로 전망됩니다.

앵티스 링커 기술은 확장성이 좋아 다양한 페이로드 접합에 최적화되어 있습니다. 앵클릭은 전통적인 ADC 개발뿐만 아니라, AOC(Antibody Oligonucleotide Conjugate), DAC(Degrader Antibody Conjugate), ARC(Antibody Radionuclide Conjugate), ISAC (Immune Stimulating Antibody Conjugate) 등 다양한 페이로드의 AxC 연구개발을 촉진시킬 수 있는 플랫폼 기술입니다. 앞으로 앵티스는 다양한 페이로드 접합 기술을 지속적으로 고도화할 계획이며, 특히 듀얼 페이로드 기술도 조만간 상용화할 계획입니다. 이러한 기술적 차별화를 통해 앵티스는 글로벌 ADC 시장에서 경쟁 우위를 가져갈 수 있을 것으로 전망합니다.

Q11. 한국 ADC 산업의 강점과 한계는 무엇이라고 생각하십니까?

한국의 ADC 산업의 가장 큰 허들은 임상 1상까지 진행하는 데 필요한 연구 비용이라고 할 수 있겠습니다.

일반적으로 ADC 개발 시 전임상 후보물질을 도출하는 과정에서는 기간과 비용이 합성의약품보다 적을 수 있습니다. 많은 화합물을 만들 필요도 없고 그에 대한 약효 및 다양한 DMPK 평가에 소요되는 시험과 기간이 들지 않는 것은 사실입니다. 하지만 전임상 단계로의 진입이 결정되면, 원료의약품(DS) 및 완제의약품(DP) 생산과 비임상 독성시험(영장류 포함), 그리고 임상 1상 수행에 필요한 연구비가 최소 200~300억 원 이상 소요됩니다. 또한 라이선스 아웃을 위해서는 최근 글로벌 빅파마들이 임상 1상 결과까지 요구하는 경우가 많아, 해당 단계까지 도달하기 위해서는 막대한 비용이 필요합니다. 이로 인해 국내 제약회사뿐 아니라 바이오벤처가 쉽게 접근하기 어려운 분야이기도 합니다. 그러다 보니 자금력이 뛰어난 중국 회사들은 너무 쉽게 접근하고 있고, 지금도 전 세계 ADC 신약 파이프라인의 60% 이상이 중국 개발사들이 차지하고 있어 향후에 이 격차는 더 벌어질 것으로 생각됩니다.

지금 국내에서 개발하고 있는 ADC 타깃은 중국 기업 중에 수행하지 않는 곳이 없으며, 향후 새롭게 개발하고자 하는 타깃들도 이미 중국에서 진행되고 있기에 국내 ADC 개발사들은 그들과의 차별성/특장점을 고려한 ADC 개발이 필요하다고 말씀드리겠습니다.

Q12. 향후 글로벌 ADC 사업 네트워크와 경쟁력 강화를 위한 애플리케이션의 전략과 계획이 있다면 설명 부탁드립니다.

경쟁이 치열한 ADC 분야에서 World ADC San Diego 등 글로벌 컨퍼런스에서 홍보하는 것도 중요하지만, 향후 2~3년간은 그들과 차별화 포인트가 있는 경쟁력 있는 R&D 데이터 확보에 집중하려고 합니다. 애플리케이션이 적용된 AT-211의 임상 개념 입증(PoC) 확보, AT-211 후속 유망 파이프라인 발굴, 차세대 플랫폼 기술 개발 등이 핵심 마일스톤입니다. 이러한 것들이 성공적으로 진행될 경우, 애플리케이션의 글로벌 사업 경쟁력은 한층 더 강화될 것으로 기대합니다.

AT-211은 현재 임상 1상 IND 승인을 받았으며, 올 3월부터 본격적으로 임상시험에 착수하고 1~2년 내 임상 1상 시험에 대한 안전성/유효성 중간 결과를 확보하면 애플리케이션은 한 단계 더 도약할 수 있을 것으로 기대됩니다. 특히, AT-211은 현재 동일 타깃 ADC로 임상 3상에 개발 중인 AZD-0901 대비 우수한 약효, 독성 결과를 확보하였기에 Best-in-Class ADC가 되지 않을까 기대해 봅니다. 두 번째는 AT-211을 이을 후속 유망 파이프라인 발굴입니다. ARC, DAC, AOC, Dual payload 등 다양한 과제들을 연구 중인데, 이 중에서 차별화된 R&D 결과가 도출되는 과제는 전임상시험에 진입시킬 예정입니다. 매년 최소 1~2개 과제는 전임상시험을 착수하는 것이 목표입니다. 마지막은 플랫폼 기술 L/O와 고도화입니다. 현재 국내외 ADC 관련 기업들과 다양한 공동연구 및 타당성 평가(feasibility test)가 성공적으로 진행되고 있어, 내년 L/O 가능성이 높을 것으로 기대됩니다. 또한 ‘애플리케이션 스탠다드’와 ‘애플리케이션 프로’를 잇는 차세대 플랫폼 기술을 개발하고, 이를 기반으로 특허 출원도 계획하고 있습니다.

내년에는 애플리케이션의 새로운 도약을 위한 중요한 전환점이 될 것으로 생각합니다. 앞서 말씀드린 목표들을 달성한다면, 애플리케이션이 글로벌 ADC 시장에서 한층 더 경쟁력 있는 기업으로 도약할 수 있을 것입니다.

Q13. 향후 5~10년 안에 애플리케이션이 이루고자 하는 가장 중요한 목표는 무엇입니까?

애플리케이션의 아이덴티티는 혁신과 스피드를 갖춘 스타트업입니다. 동아쏘시오그룹의 계열사이기는 하지만, 애플리케이션의 경쟁력은 스타트업 아이덴티티에서 나온다는 것을 잊지 않으려고 합니다. 동아에스티, 에스티젠바

이오, 에스티팜 등 동아 계열사의 신약 개발 노하우, 생산 노하우 등을 앵티스의 ADC 사업에 접목하는 것은 당연합니다만, 가장 큰 경쟁력은 작지만 강한 앵티스 그 자체에서 나올 것입니다. 글로벌 AI 업계에서 미국 “Open AI”사가 설립 10년 만에 세계 최고의 AI 기업이 되었습니다. 앵티스는 앞으로 10년 내 세계 최고의 ADC 기업이 될 수 있도록 노력하겠습니다. 2032년이면 동아제약 창립 100주년입니다. 그 시점에 앵티스의 매출, 이익, 기업가치 등이 동아 그룹 내 Top 3에 진입할 수 있도록 노력하겠습니다. 또한 앵티스의 첫 번째 ADC 신약 후보물질인 AT-211의 시판 허가도 2032년까지 받을 수 있도록 전 임직원이 최선을 다하겠습니다.

Q14. 그리고 향후 5~10년 안에 개인적으로 이루고자 하는 가장 중요한 목표는 무엇입니까?

저는 신약개발 연구자로서 운 좋게도 참여했던 과제가 폐암 치료제로 FDA에 승인을 받는 좋은 성과가 있었습니다. 잘 아시는 바와 같이 신약개발은 다양한 전공자들이 모여 하나를 만듭니다. 5년~10년 후의 목표가 아니라 앞으로도 어느 곳에 있던, 언제까지 신약개발의 일원으로 참여할지는 모르나, 제가 수행하는 신약연구가 환자들에게 도움이 되는 약을 여러 개 만들 수 있으면 좋겠다는 생각으로 열심히 노력해 볼 생각입니다.

Q15. 차세대 ADC의 향후 전략 및 방향은 어떻게 생각하고 계십니까?

차세대 ADC 전략을 이야기할 때, 저는 기존의 항체-링커-페이로드 구조를 고도화하는 것도 중요하지만, 그 외에 크게 영향을 줄 수 있는 몇 가지 축이 있다고 생각합니다.

첫째는 환자 정의(Patient Stratification)의 정밀화입니다. 이제는 단순히 항원 발현 여부만으로 환자를 나누는 시대는 지났다고 봅니다. 항원의 발현 밀도(density), 세포 내 유입 속도(internalization rate), 세포 내 이동(trafficking) 경로, 심지어 종양 미세환경(tumor microenvironment) 특성까지 고려한 다층적 바이오마커 기반 환자 선정이 굉장히 중요해질 것입니다. 결국 ADC는 생물학적 정밀도가 곧 임상 성공 확률로 직결됩니다. 둘째는 병용 전략의 구조적 설계입니다. ADC는 단독요법뿐 아니라 면역관문억제제(Immune checkpoint inhibitor), DNA 손상 복구 저해제(damage response inhibitor) 등과의 병용에서 큰 잠재력을 가지고 있습니다. 특히 일부 페이로드는 면역원성 세포사멸(Immunogenic Cell Death)을 유도할 수 있기 때문에, 면역항암제와의 시너지를 전략적으로 설계하는 접근이 차세대 전략의 핵심이 될 수 있다고 봅니다. 셋째는 투여 방식과 스케줄링의 최적화입니다. 지금까지는 MTD 기반의 개발이 많았지만, 앞으로는 MED 기반 접근, 분할 투여(fractionated dosing), 노출 기반 약동학/약력학(exposure-driven PK/PD) 최적화 전략이 중요해질 가능성이 큼니다. 약물 자체뿐 아니라 개발 전략이 진화해야 한다는 의미입니다. 마지막으로 차세대 모달리티와의 융합입니다. 이중 항체, 다중 특이 항체, 방사성 동위원소 결합체, 또는 비항체 기반 scaffold와의 융합은 ADC의 적용 범위를 크게 확장시킬 수 있습니다. 다만 이 역시 생물학적 주도 접근이 전제되어야 합니다.

정리하자면, 차세대 ADC의 경쟁력은 단순히 더 강한 페이로드나 더 안정한 링커에서 나오기보다는, 생물학, 공학, 임상 전략(clinical strategy)을 얼마나 통합적으로 설계하느냐에 달려 있다고 생각합니다. ADC는 이제 단일 기술의 경쟁이 아니라, 플랫폼 전체의 정밀도 경쟁 단계에 들어왔다고 봅니다.

Q16. 신약개발이나 ADC 분야로 진로를 고민하는 학부생·대학원생에게 조언을 해주신다면?

신약을 개발하든, 반도체를 개발하든, 친환경 페인트를 개발하든 화학자는 다양한 분야에서 전공 지식을

접목시킬 수 있습니다. 하지만 저와 같이 공부했던 나의 선배, 동기, 후배들 중에 대학원을 가지 않고 학부만을 졸업한 사람들은 우리가 얘기하는 화학밥을 먹고 사는 사람들은 많지 않습니다. 심지어 제 동기들 중에는 화학과를 졸업하였지만 은행원, 철도공무원, 건설회사, 영업사원 등 다양한 분야에서 일을 하고 있습니다. 내가 어떤 일을 하고 사는 것이 중요하지는 않고, 학부 전공이 맞지 않아 다른 분야의 일을 할 수도 있습니다. 여기서 가장 중요한 것은 내가 직업으로 하는 일이 진심으로 재미있는 일이면 정말 좋다는 것입니다. 그리고 내가 배운 학문으로 좋아하는 일과 의미 있는 일을 함께 할 수 있다면 금상첨화라고 생각합니다. 지금은 아직 ‘무엇이 되어야겠다’기보다는, 내가 배운 화학으로 내가 어떤 일을 하면 좋을지에 대해 고민하고 많이 공부했으면 합니다. 지금의 준비가 여러분의 미래를 바꿀 수 있으며, 준비하지 않는 사람에게는 기회가 오지 않는다는 것도 꼭 기억하면서 열심히 사는 매일매일이 되었으면 좋겠습니다.

Q17. 대표님의 연구와 삶을 이끌어온 개인적인 철학이나 좌우명이 있다면 들려주십시오.

저는 24년 동안 신약개발 연구만 하다가, 작년 2월에 대표가 되어 초보 경영자라 할 수 있습니다. 회사의 전반적인 운영에 대해서는 여전히 배워가는 단계라 “나는 꼭 이렇게 경영을 해야지”라는 것은 아직은 명확하게 있지 않습니다. 경영철학이라기보다 과거 팀장, 상무로 근무할 때도 항상 가지고 있는 생각은 “내가 더 뛰어야 나의 구성원들도 같이 달린다. 항상 웃으면서 행복하게 일해야 성과가 있을 때 같이 웃을 수 있다”라는 생각을 많이 하였습니다.

직원들이 행복하지 않고 지시에 의해서만 일을 하게 된다면 좋은 성과가 나와도 나의 행복이라고 생각하지 않는다는 것을 연구원 때 느꼈습니다. 그래서 다 같이 행복한 연구소를 만드는 것이 저의 철학이라고 생각하고 노력하고 있습니다.

좌우명이라고 하기에는 그렇지만 항상 저의 자녀들에게 말하는 것이 있습니다. “있을 때 잘해”라는 말입니다. 항상 지나간 것에 후회하지 말고, 그 당시 주어진 일을 후회 없이 열심히 한다면 비록 일이 잘못되더라도 미련이 남지 않는다고 말합니다. 저 역시도 이 말을 항상 생각하며 지금 이 자리에서 먼 훗날 후회가 되지 않도록 지금 주어진 일에 최선을 다해야겠다고 생각하며 일하고 있습니다.

Q18. 최근 읽은 책 중 감명 깊은 책이나 영화, 드라마 등이 있을까요?

시간 관계상 드라마를 자주 보는 것은 아니지만 예전 “이태원 클라쓰”라는 드라마를 아주 감명 깊게 본 적이 있습니다. 만화를 드라마로 만들었다는 얘기를 듣고 만화 전집을 사서 만화로도 다시 볼 정도로 좋았던 것 같습니다. 본인의 목표를 이루기 위해 한결같은 독심을 가지고 최선을 다하는 모습과 자기만의 철학을 가지고 동료들을 믿으며 사업을 성장시키는 과정이 지금 생각해 보면 저희 애플티스가 나아가야 하는 모습이 아닐까 생각합니다. 비록 드라마에서는 아버지를 죽이고, 본인을 감옥으로 보낸 사람들에게 가지는 복수심이 그러한 끈기를 끌어냈지만, 저희 애플티스는 복수심이 아닌 글로벌 경쟁자들에게 우리의 기술 우수성을 보여 주겠다는 다짐이 조금 다르다고 할 수 있겠습니다. 앞으로 드라마 주인공처럼 동료들을 믿으며 꼭 그 분야에 최고가 되겠다는 독심 하나로 최선을 다해 보고자 합니다.

대한화학회 발행지 및 협약발간지



Bulletin of the Korean Chemical Society (BKCS)

| 창간년도 | 1980년
 | 회수 | 월 1회
 | 국내등재 | KCI(2001년)
 | 국제등재 | SCI(1981년), SCOPUS(1996년), SCIE(2011년)
 | ISSN(Print) | 0253-2964
 | eISSN(Online) | 1229-5949



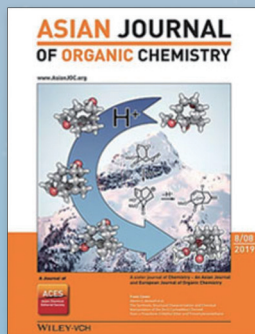
Journal of the Korean Chemical Society (JKCS)

| 창간년도 | 1949년
 | 회수 | 격월
 | 국내등재 | KCI(2002년), KCI 등재 후보(1999년)
 | 국제등재 | SCOPUS(2006년)
 | ISSN(Print) | 1017-2548
 | eISSN(Online) | 2234-8530



Chemistry, an Asian Journal

| 창간년도 | 2006년
 | 회수 | 월 2회
 | ISSN(Print) | 1861-4728
 | eISSN(Online) | 1861-471X
 2005년 9월 ACES(Asian Chemical Editorial Society)와 발간 협약 체결



Asian Journal of Organic Chemistry

| 창간년도 | 2010년
 | 회수 | 월 1회
 | ISSN(Print) | 2193-5807
 | eISSN(Online) | 2193-5815
 2011년 10월 ACES(Asian Chemical Editorial Society)와 발간 협약 체결



Physical Chemistry Chemical Physics

| 창간년도 | 1999년
 | 회수 | 주 1회
 | ISSN(Print) | 1463-9076
 | eISSN(Online) | 1463-9084
 2011년 6월 PCCP Owner Society 가입

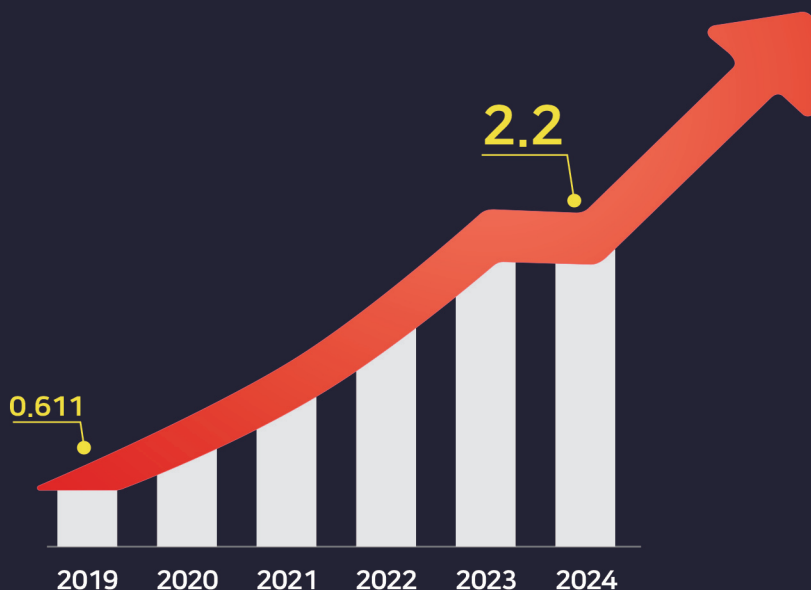


ChemNanoMat

| 창간년도 | 2015년
 | 회수 | 월 1회
 | ISSN(Print) | 2199-692X
 | eISSN(Online) | 2199-692X
 2014년 12월 ACES(Asian Chemical Editorial Society)와 발간 협약 체결

논문투고시스템안내

BKCS는 최근 수년간 꾸준한 성장과 함께 국제 학술 저널로서의 입지를 넓혀가고 있습니다. 2025년 발표된 JCR 기준 Impact Factor(2024)는 2.2로, 전년도(2.3)에 이어 안정적인 수준을 유지하고 있으며, 이는 다음과 같은 지속적인 성장 흐름 속에 이루어진 값진 성과입니다.



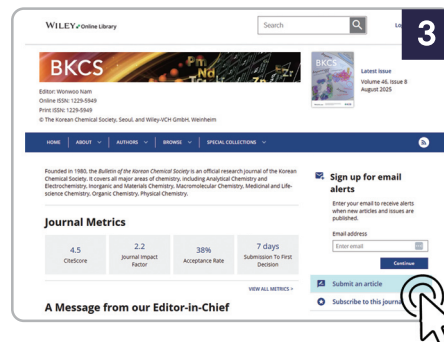
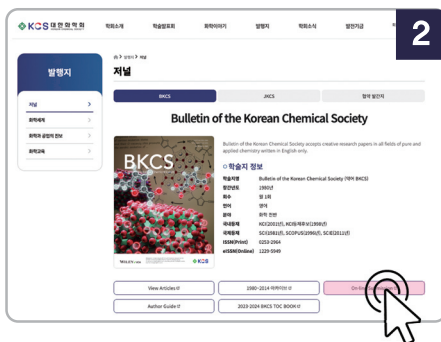
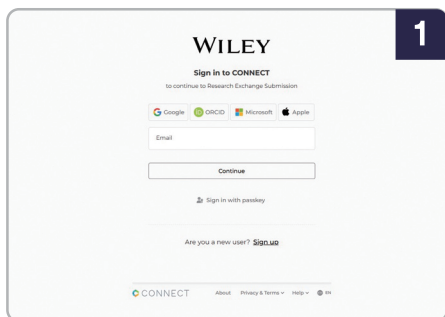
BKCS는 단순 수치를 넘어, 국제 저자 비율 증가, 피인용 논문의 지속적 확대, 전문 분야의 다양성 강화 등 학술적 신뢰도와 저널의 질적 성장을 함께 추구하고 있습니다.

BKCS의 이러한 발전은 여러분의 우수한 논문 투고와 지속적인 인용 덕분입니다. 앞으로도 BKCS가 국내외 연구자들과 함께 더 큰 도약을 이룰 수 있도록, 활발한 투고와 인용을 부탁드립니다.

- 외국인 심사위원은 점차적으로 늘릴 예정입니다.
- 논문 투고에 어려움이 있으실 경우 아래로 문의하여 주십시오.
- E-mail : bkcs@kchem.org / office : 02) 953-2095

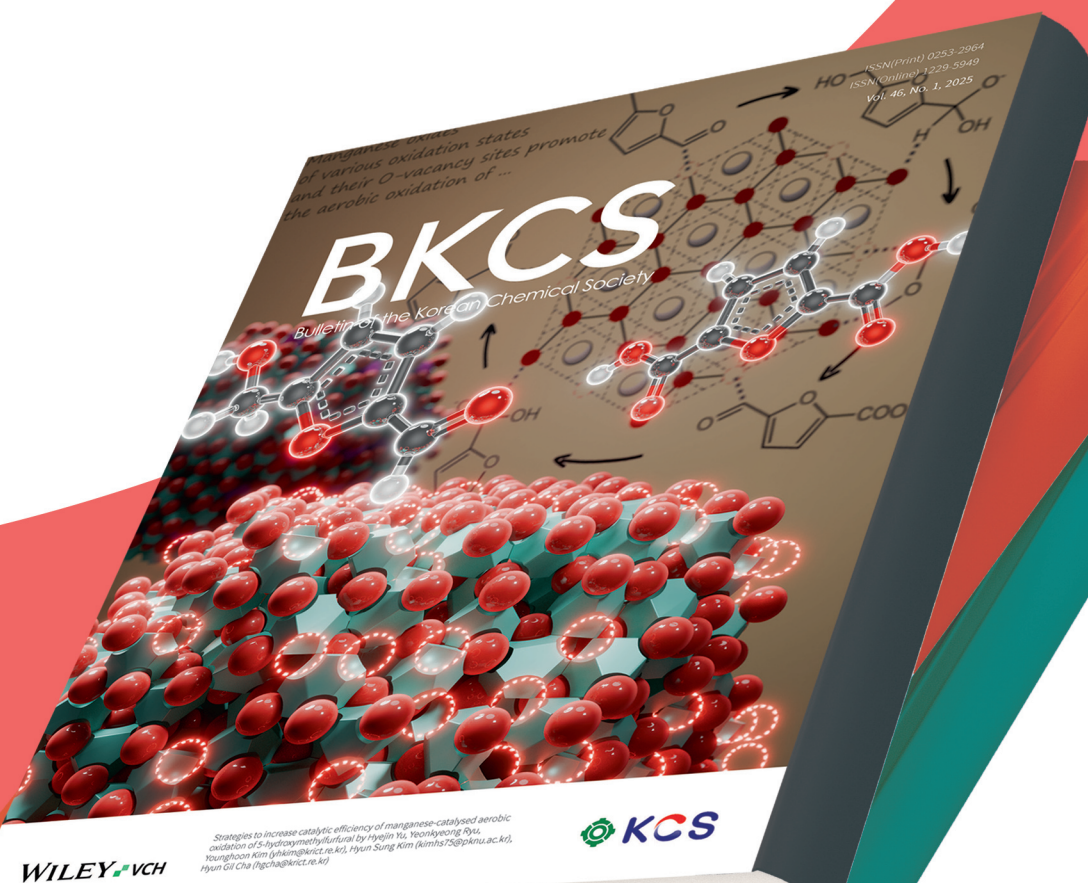
1. BKCS 논문 투고 시스템 접속 (1~3번 중 택1)

- 1 <https://submission.wiley.com/submission/dashboard?siteName=BKCS> 로 바로 접속
- 2 <https://kchem.org> 접속 후 논문투고 메뉴에서 **BKCS On-line Submission** 클릭
- 3 <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/12295949> 접속 후 우측 상단의 **Submit an Article** 클릭



2. 계정 개설 후 로그인 (※계정 개설 필수)

- 계정 개설 시 입력한 메인 이메일 주소와 비번으로 접속하여 논문 투고
- BKCS 홈페이지의 Author Guide를 참고하여 순서대로 진행



KCS 하이라이트

54 나노구조 자기조립 및 초분자 화학 기반 기능성 소재 연구

이번 호에서는 최근 3년간 (2024-2026) BKCS에 게재된 나노구조 자기조립 및 초분자 화학 기반 기능성 소재 연구를 소개합니다. 자기조립 전략을 활용한 금 나노입자의 형태 제어 합성 및 광학 특성 조절, host-guest 상호작용, 나노 다공성 전극의 활성 등 구조-물성 상관관계를 다룬 연구들이 포함됩니다. 또한 발광체의 분산 거동 정량화, 하이드로젤의 특성 제어, 블록공중합체의 역자기조립 메커니즘, 금속 초분자 구조의 제어, 그리고 아밀로이드 응집 메커니즘 분석 리뷰까지 폭넓은 주제를 아우릅니다. 다양한 연구 분야에서 자기조립과 초분자 화학이 나노구조 형성 및 기능 발현에 어떻게 기여하는지에 대해 회원분들의 많은 관심 부탁드립니다.

글 양상희(인하대학교 화학과 조교수, shyang@inha.ac.kr)

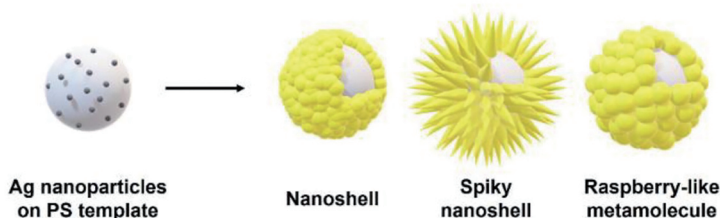
BKCS

Vol. 45 No. 06 p.486-494 / Personal Account

이화여자대학교 화학·나노과학과 박소정 교수 연구팀은 템플릿 기반 나노 입자 정밀 조립 전략을 통해 다양한 형태의 금 나노셸(nanoshell)을 합성하고, 구조에 따른 플라즈모닉 광학 특성을 분석하였습니다. 본 연구에서는 다양한 플라즈모닉 나노구조의 형태와 집합적 광학 특성을 제어하는 요인을 규명하고, 원하는 구조 설계를 위한 조립 전략을 제시하였습니다. [2024년 6월호, DOI:10.1002/bkcs.12845]

Gold nanoshells with varying morphologies through templated surfactant-assisted seed-growth method

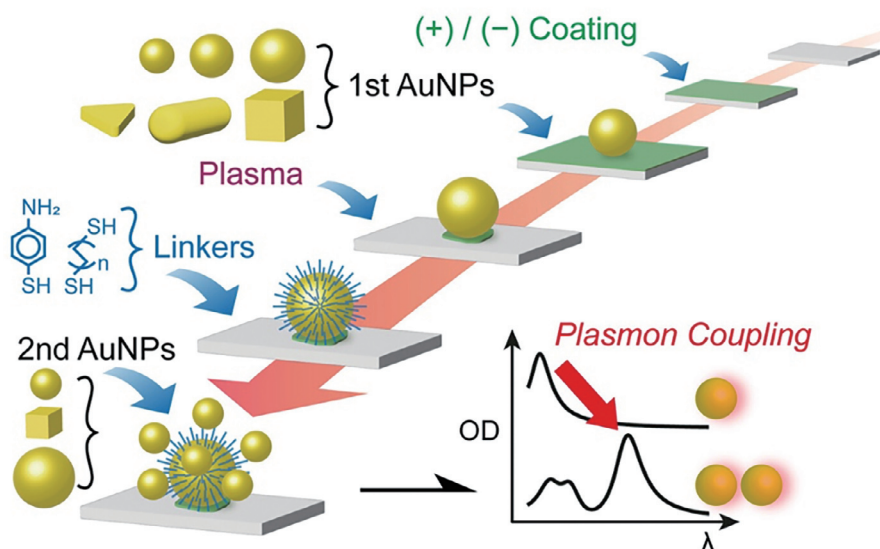
Plasmonic nanoparticles exhibit dramatic changes in optical properties depending on their spatial organization. Therefore, the ability to precisely control their assembly structure is important for both fundamental understanding and practical applications. In this personal account, we describe a templated surfactant-assisted seed-growth method to synthesize core-shell-type gold nanoparticle assemblies with controllable surface morphologies and optical properties. This approach provides a simple procedure for simultaneous growth and assembly of metal nanoparticles on polymer templates, producing well-defined nanostructures such as spiky nanoshells and raspberry-like metamolecules with useful and interesting optical properties, such as strong and uniform surface-enhanced Raman scattering and metamaterial properties. We discuss the factors that control the morphology and collective properties, describe the design rules acquired from the system, and suggest future directions of this research area.



중앙대학교 화학과 윤상운 교수 연구팀은 금 나노입자(AuNPs)의 정밀 조립을 통해 다양한 나노갭(nanogap)을 가지는 구조를 형성하고, 이에 따른 플라즈몬 결합 특성을 체계적으로 분석하였습니다. 특히 나노갭의 구조적 인자와 플라즈모닉 물성 간의 상관관계를 규명할 뿐 아니라, 입자 간 거리 제어에 따른 플라즈몬 결합 증폭 현상에 주목하여 나노플라즈모닉스 분야의 향후 발전 방향을 제시하였습니다. [2024년 8월호, DOI:10.1002/bkcs.12886]

Controlled assembly of gold nanoparticles: Methods and plasmon coupling properties

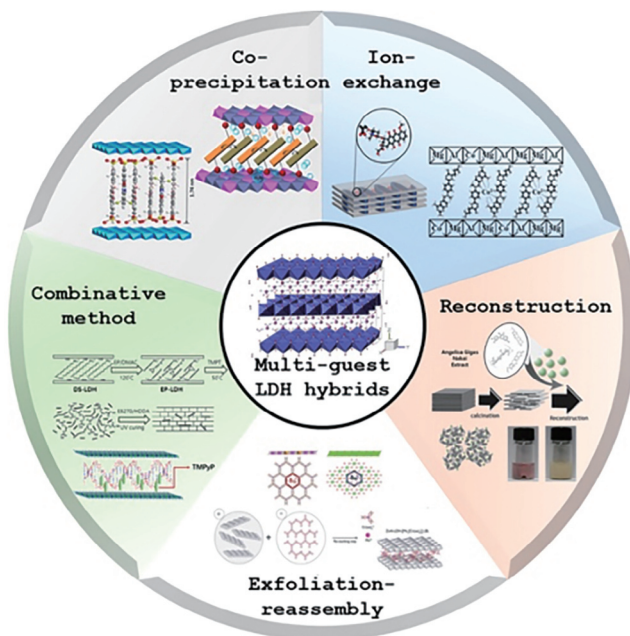
Gold nanoparticles (AuNPs) exhibit excellent plasmonic properties, including bright color and generation of localized electric field, hot carriers, and heat. These properties are widely applied in biology, sensing, spectroscopy, catalysis, and medicine. More attractive is that these properties are tremendously enhanced when AuNPs are assembled and form nanogaps between the particles. Therefore, assembling AuNPs in a controlled fashion is a key step for the study and applications of plasmonic properties. In this Account, I will introduce my group's collective efforts that have been made for a decade to develop the best assembly method. I will describe the assembly procedure in detail and demonstrate the various nanoassemblies produced by the method. The controlled assembly allows us to systematically examine the relationship between the plasmonic properties and structural parameters of the nanogaps. Among many properties, I focus on plasmon coupling. To conclude, I will discuss the prospects of nanoassembly plasmonics.



동국대학교 에너지신소재공학과 오제민 교수와 한국외국어대학교 화학과 박진균 교수 연구팀은 층상 이중 수산화물(LDH)에 두 종류 이상의 게스트(guest) 분자를 도입하는 전략을 초분자 화학 관점에서 정리하였습니다. 특히 게스트 간 상호작용에 주목하여 다양한 복합 게스트 삽입 전략을 소개하고 있으며, 게스트간 배열 제어를 통해 광학, 촉매, 약물전달, 환경 정화 등에서 시너지 효과를 유도할 수 있음을 보여줍니다. [2024년 9월호, DOI:10.1002/bkcs.12895]

Supramolecular chemistry for the incorporation of multi-guest molecules into two-dimensional metal hydroxide hosts

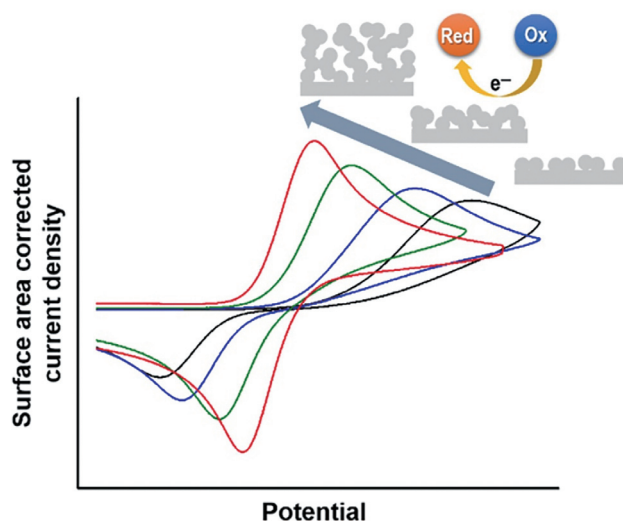
The incorporation of functional molecules into the interlayer space of layered double hydroxide (LDH) has been extensively studied for its role in immobilization, stabilization, manipulation of the molecular configuration, and the release from the host. To create dramatically enhanced properties and achieve unexpectedly high performances, it is necessary to incorporate multi-guests as well as control the guest-guest interaction. In the present review, we have summarized the multi-guest incorporation into LDH based on the supramolecular chemistry, which provides insights into non-covalent molecular interaction through host-guest chemistry. Four well-known intercalation methods in LDH, that is, coprecipitation, ion exchange, reconstruction, and exfoliation-reassembly, are generally applied to multi-guest intercalation. Combinative methods, in which two different intercalation approaches are combined, are also summarized. The multi-guest incorporation, despite the difficulty involved in its synthesis design, could provide fine-tuned and enhanced properties that are useful for a variety of applications.



충남대학교 분석과학기술대학원 배제현 교수와 한국교원대학교 화학교육과 서민지 교수 연구팀은 다양한 두께의 나노입자형 나노다공성 인듐주석산화물(ITO) 전극을 활용하여 나노구속(nanoconfinement) 효과가 전기촉매 반응에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였습니다. 이를 통해 나노공(nanopore)의 형성과 깊이에 따른 촉매 효과를 정량적으로 평가하고, 나노구속 효과가 나노다공성 전극에서 전기촉매 활성 향상을 유도하는 일반적 요인임을 제안하였습니다. [2024년 12월호, DOI:10.1002/bkcs.12912]

Enhanced electrocatalytic activity by nanoconfinement effects at nanoporous indium tin oxide electrodes

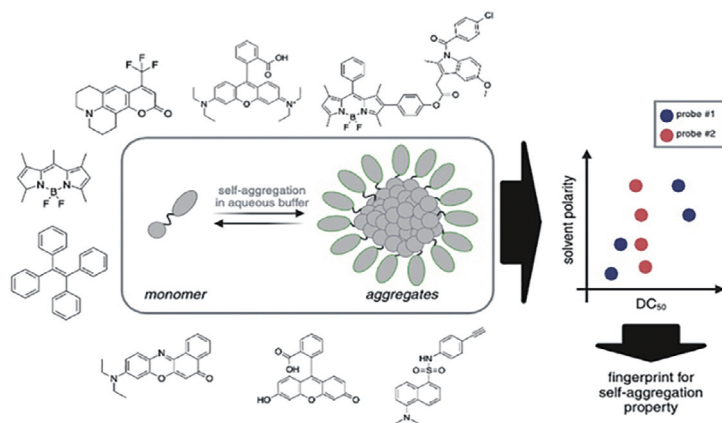
Among various strategies to enhance electrocatalytic activity, nanoporous structured electrodes have been widely utilized owing to their improved performance. Along with enlarged electrode surface, modified crystalline facets, and surface defects of nanoporous electrodes, recent studies have reported their unique electrocatalytic characteristics originating from the nanoconfined space, denoted as the nanoconfinement effect. Introducing nanoporous electrodes with controllable thickness made of indium tin oxide, an electrochemically inert material, has provided an optimal platform for analyzing the contribution of nanoporous structures to the catalytic effects. Nevertheless, the scope of reactants that has been studied based on this system so far is mostly limited to ferric/ferrous redox species in sulfate anion environment. Here, using the nanoporous indium tin oxide electrodes, we demonstrate the nanoconfinement effect toward the ferric/ferrous reaction in a different chemical environment that alters its electrokinetic characteristics compared to the previous studies. Furthermore, a complex multi-electron transfer reaction of oxygen reduction is employed to explore the effects of nanoporous structure toward inner-sphere reactions. Our work suggests that the nanoconfinement effects can be applied to a wider range of electrochemical reactions taking place in nanoporous electrodes.



고려대학교 의과대학 이준석 교수와 Northeastern University의 약학대학 Jane Lee 교수 연구팀은 응집유도발광체(AIEgens)를 포함한 11종의 형광체에 대해 용매 극성-분산화 농도 분석을 수행하여, 용매 의존적응집-분산 거동을 정량적으로 평가하는 방법을 제시하였습니다. 특히 구조적으로 유사한 염료 간에 유사 형광 거동이 나타남을 확인하였으며, 본 접근법이 차세대 형광 화학 센서 설계에 유용한 지표가 될 수 있음을 보여주었습니다. [2025년 2월호, DOI:10.1002/bkcs.12933]

Quantitative analysis of disaggregation properties of aggregation-induced emission luminogens (AIEgens) and off-the-shelf dyes

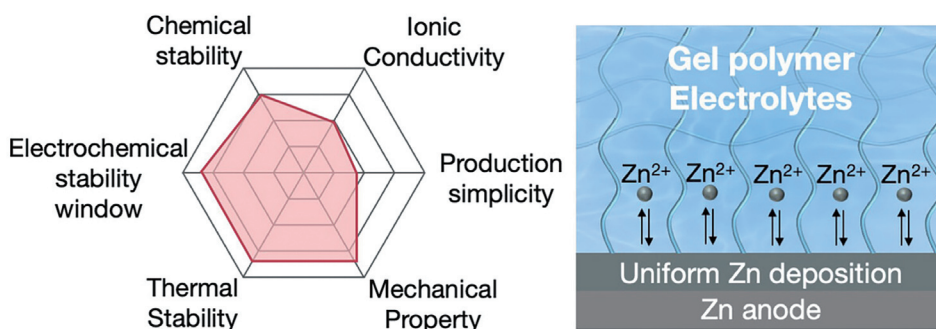
The aggregation state of chemosensors significantly influences their photophysical properties, making it critical for their applications in sensing and imaging. In this study, we systematically investigated the disaggregation properties of 11 representative fluorophores, including widely used dyes such as BODIPY, coumarin, fluorescein, rhodamine B, and Nile Red, as well as AIEgens like TPE and TPA. Through a quantitative approach, we determined the disaggregation concentration (DC_{50}) in various aqueous-organic co-solvent mixtures and correlated these values with solvent polarity parameters, such as dielectric constant and ET(30). Our analysis uncovered distinct DC_{50} patterns that act as unique fingerprints for each compound, reflecting their structural characteristics. Notably, structurally similar compounds, such as BODIPY derivatives and dansyl-based chemosensors, exhibited comparable trends. This study underscores the utility of solvent polarity versus DC_{50} scatter plots for evaluating aggregation-dependent chemosensors and offers valuable insights into the molecular determinants of self-aggregation, enabling more rational chemosensor design.



포항공과대학교 신소재공학과 김연수 교수 연구팀은 본 리뷰 논문에서 수계 아연이온전지(AZIBs)용 겔 고분자 전해질(GPEs)의 기계적 안정성 확보를 위한 설계 전략을 종합적으로 정리하였습니다. 기계적 내구성과 이온전도도 간의 균형 설계 필요성을 강조하고, 고분자간 상호작용에 기반한 다양한 젤 네트워크 형성 전략을 소개하였으며, 새로운 전략 도입을 통한 전해질-전극 간 접촉력 향상과 자기 조립 공정 단순화, 계면 문제 완화 가능성을 제시하였습니다. [2025년 7월호, DOI:10.1002/bkcs.70040]

Tough hydrogel designs for stable aqueous zinc ion batteries

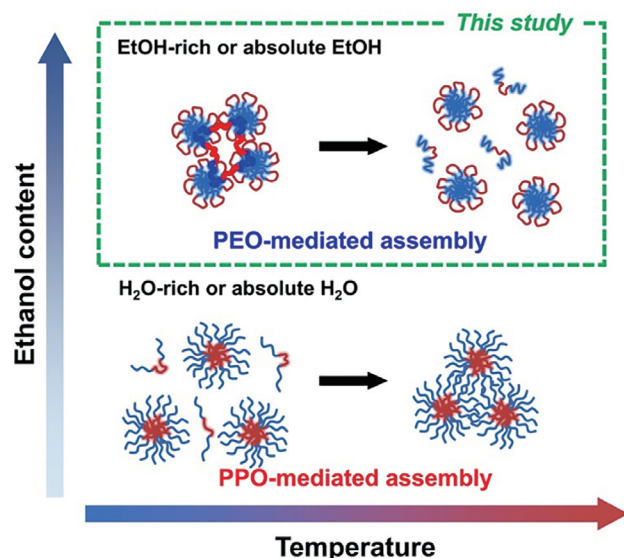
Aqueous zinc ion batteries (AZIBs) have emerged as a promising next-generation energy storage technology to replace lithium-ion batteries. Recently, gel polymer electrolytes (GPEs), as a critical component of AZIBs, have garnered significant attention due to their potential to address challenges associated with conventional aqueous electrolytes, such as dendrite growth, corrosion, electrolyte evaporation, and leakage. However, the mechanical properties of hydrogels often remain suboptimal due to inherent limitations. This review focuses on the mechanical requirements that GPEs must meet for practical implementation in AZIBs. Furthermore, it highlights various gel design strategies to achieve superior mechanical performance, including double-network (DN) gels, topological gels, and other advanced gel network architectures. Promising directions and rational perspectives for future research are also proposed, offering insights into the development of high-performance GPEs for AZIBs.



KAIST 화학과 이해신 교수 연구팀은 Pluronic® F127이 물에서의 일반적 마이셀 형성과 달리 고에탄올 조건에서 역 자기조립 거동을 보임을 보고하였습니다. 90% 이상 에탄올 환경에서는 PEO 블록의 용해도 및 결정성이 자기조립 거동을 지배하며, 이는 PEO와 PPO 블록 간 용해도 차이에서 기인합니다. 또한 탄닌산과의 수소결합이 구조 동역학을 조절함을 확인하고, Pluronic® F127의 가역적 자기조립이 용매 극성과 PEO블록의 용해도에 의해 지배됨을 확립하였습니다. [2025년 11월호, DOI:10.1002/bkcs.70067]

Reversed amphiphilic assembly mechanisms of Pluronic® F127 in high-ethanol content

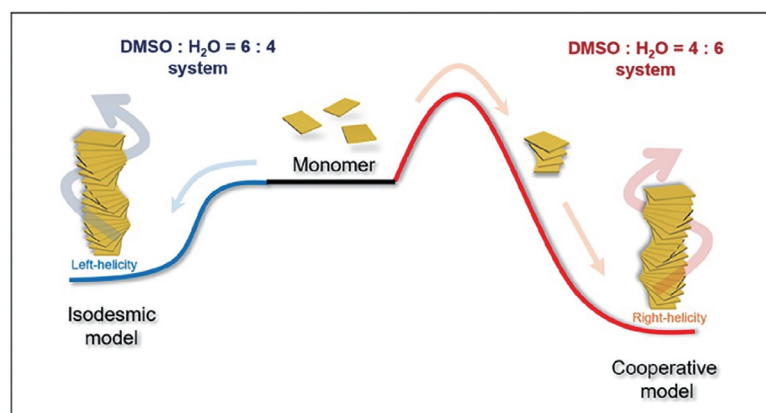
Pluronic® F127 (Poloxamer 407) is a thermoresponsive triblock copolymer widely used for drug delivery and templating for porous materials, owing to its temperature-dependent micellization and gelation in aqueous systems. While its self-assembly behavior in water-rich or low-ethanol cosolvents ($\leq 30\%$) is well established, the molecular behavior of F127 in near-anhydrous ethanol (90%–100%) remains largely unexplored. Here, we report a reversed self-assembly mechanism governed by the solubility and crystallinity of the hydrophilic poly(ethylene oxide) (PEO) blocks, rather than the hydrophobic PPO segments that drive micellization in water. F127 remains molecularly dissolved up to $\sim 95\%$ ethanol but undergoes precipitation above this threshold due to collapse of the dehydrated PEO chains. Upon heating, the precipitates reversibly dissolve through melting of PEO crystalline domains, a process confirmed by turbidity and dynamic light scattering analyses. Additionally, tannic acid (TA)—known to strongly hydrogen bond with PEO—modulates the precipitation and re-dissolution kinetics. These findings highlight a fundamentally distinct assembly mechanism of F127 in ethanol-rich environments, where solvent polarity and segmental solvation dominate. This study not only provides critical insight into the thermoresponsive behavior of amphiphilic polymers in poor solvents but also expands the potential utility of F127 in ethanol-dominant drug formulations and soft-material systems, particularly where aqueous conditions are undesirable.



경상대학교 화학과 정중화 교수와 한국화학연구원 김가영 교수 연구팀은 terpyridine기반 Pt(II) 복합체가 용매 조성에 따라 우·좌 나선형 초분자 중합을 형성함을 보고하였습니다. 다양한 초분자 상호작용에 의해 구동되는 자기조립 메커니즘과 성장 경로를 분석하고, 동역학적 중간체 없이 바로 열역학적으로 안정한 구조가 형성됨을 확인하였습니다. 본 결과는 미세한 분자 구조 차이가 거시적 조립 구조 성장을 결정함을 보여줍니다. [2025년 12월호, DOI:10.1002/bkcs.70078]

Influence of ligand substituents on the chirality of metallosupramolecular architectures

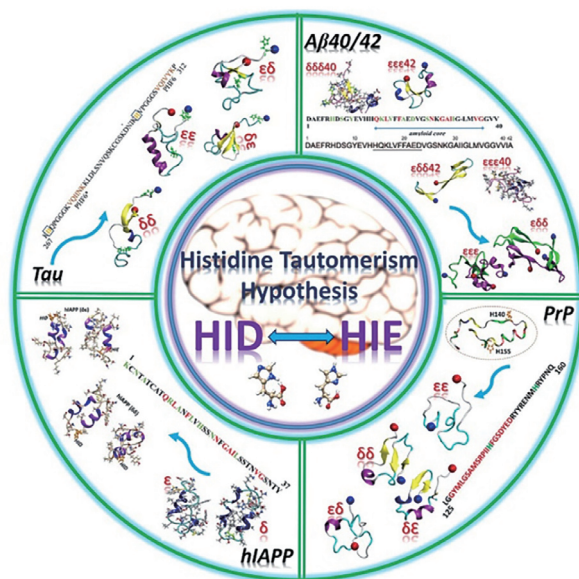
In biological systems, steric hindrance plays a critical role in supramolecular assembly by controlling intermolecular packing, interaction geometry, and the resulting structural specificity. Accordingly, introducing small substituents on ligands provides an artificial model to finely regulate the helicity and assembly pathway of supramolecular polymers. In this study, we report the self-assembly behavior of a terpyridine-based Pt(II) complex, R-Pt-Ph-C3, bearing a propyl-phenylacetylene ligand. Remarkably, R-Pt-Ph-C3 forms right- or left-handed helical supramolecular architectures in mixed DMSO/H₂O media, with the handedness being solvent-composition dependent. The self-assembled structures exhibit intense photoluminescence at 570–620 nm, arising from metal-to-ligand charge transfer (MLCT) and/or metal–metal-to-ligand charge transfer (MMLCT) transitions. Circular dichroism (CD) analysis revealed opposite Cotton effects in DMSO/H₂O (6:4, v/v) versus (4:6, v/v), indicating solvent-controlled inversion of supramolecular helicity. Spectroscopic (UV–vis, CD, FT-IR, ¹H NMR) analyses demonstrated that assembly is driven by π – π stacking, intermolecular hydrogen bonding, and Pt···Pt interactions. Variable-temperature UV–vis studies and curve fitting using the equilibrium (EQ) model revealed that the assemblies follow either an isodesmic or cooperative nucleation–elongation growth mechanism, depending on solvent composition. The DMSO/H₂O (6:4, v/v) system exhibited lower thermodynamic stability ($\Delta G_e = -23.3$ kJ/mol) consistent with isodesmic growth, whereas the (4:6, v/v) system showed higher stability ($\Delta G_e = -27.0$ kJ/mol) and strong cooperativity ($\sigma = 4.7 \times 10^{-4}$). These findings highlight the ability to control supramolecular helicity, morphology, and growth mechanism of Pt(II)-based assemblies through subtle changes in solvent environment.



성균관대학교 화학과 이진용 교수 연구팀은 히스티딘 토토머화가 아밀로이드 단백질 응집에서 공통적인 분자 스위치로 작용함을 제시하였습니다. 토토머 상태는 α -나선 안정성 또는 β -시트 간 상호작용을 조절하여 초기 오접힘, 응집 경향, 섬유 구조 다형성에 영향을 미칠 수 있습니다. 특히 본 연구 결과는 다른 아밀로이드 시스템에도 확장 가능하며, 향후 다중 스케일 시뮬레이션과 실제 생물학적 환경을 반영한 연구를 통해 정밀 의학 기반 치료 전략으로의 연결이 필요함을 강조하고 있습니다. [2026년 3월호, DOI:10.1002/bkcs.70123]

Revisiting amyloid aggregation across diseases: Mechanistic insights driven by histidine tautomerism

Protein misfolding and aggregation are critical in amyloidogenic diseases such as Alzheimer's disease, diabetes, and prion disorders. While aggregation has been widely studied in terms of extrinsic factors, the influence of intrinsic molecular features, particularly histidine tautomerism, remains poorly understood. In this mini-review, we summarize recent computational studies elucidating how histidine tautomeric states regulate the structural changes, aggregation propensity, and intermolecular interactions of major amyloidogenic proteins, including amyloid- β (A β 40/42), Tau, amylin, prion protein, and profilin-1, as well as their disease-associated variants. We discuss tautomer-dependent effects on monomer conformations, early oligomerization, fibril formation, and cross-seeding behavior, and highlight the integration of molecular dynamics simulations and computational two-dimensional infrared spectroscopy for resolving tautomer-specific signatures. These findings emphasize histidine tautomerism as a critical but underestimated factor in amyloid aggregation mechanisms.





조우현 Woo Hyun Jo

전북대학교 사범대학 과학교육학부 화학교육전공, 조교수
whjo94@jbnu.ac.kr, <https://sites.google.com/view/whjo>

소개글

조우현 교수는 붕소 화합물을 사용하여 전자결핍 N-고리 화합물에서의 친핵성 치환반응을 통한 위 치선택적 알킬화 반응 개발과 그 메커니즘을 규명하는 연구를 수행하였다. 특히 동일한 반응물 조합으로 3단계에 걸쳐 기존의 한계를 하나씩 뛰어넘는 점진적인 발전을 이루어내는 성과를 달성하였으며, 그 과정에서 각각의 반응 메커니즘이 모두 다른 방식으로 응용됨을 효과적으로 증명하였다. 현재는 다양한 전이 금속 촉매, 붕소, 질소 화합물 등을 사용해 새로운 효과적인 유기 합성 방법론을 탐구하며, 이를 실제 천연물 전합성 등 다양한 방향으로의 활용에 응용하는 연결고리를 만드는 연구를 수행하고자 한다.

주요연구분야

- 유기 화학(Organic Chemistry)
- 합성 방법론(Methodology Chemistry)
- 전이 금속 촉매 반응(Transition-Metal-Catalyzed Reaction)
- 전합성(Total Synthesis)

대표논문

1. **Jo, W.**; Scholz, J. K.; Lyu, H.; Cho, S. H.; Dong, G.* Size-Programmable Matteson-Type Annulation: Construction of Spirocycles from Simple Cyclic Ketones. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2025**, *64*, e202503269.
2. **Jo, W.**; Thangsrakeattigun, C.; Ryu, C.; Han, S.; Oh, C.; Baik, M.-H.*; Cho, S. H.* Regiodivergent Alkylation of Pyridines: Alkylolithium Clusters Direct Chemical Reactivity. *J. Am. Chem. Soc.* **2025**, *147*, 8597.
3. Jin, Y.; Lee, J.; **Jo, W.**; Yu, J.; Cho, S. H.* Axially Chiral α -Boryl-Homoallyl Boronic Esters as Versatile Toolbox for Accessing Centrally and Axially Chiral Molecules. *Nat. Commun.* **2024**, *15*, 9239.
4. Ahn, Y.; Park, J.; Park, M.; Jin, S.; **Jo, W.**; Kim, J.; Cho, S. H.; Seo, D.* Combinatorial selective synthesis and excitation experiments for quantitative analysis of effects of Au on a semiconductor photocatalyst. *Chem* **2022**, *8*, 2485.
5. **Jo, W.**; Lee, J. H.*; Cho, S. H.* Advances in Transition Metal-Free Deborylative Transformations of gem-Diborylalkanes. *Chem. Commun.* **2021**, *57*, 4346.
6. **Jo, W.**; Baek, S.; Hawng, C.; Heo, J.; Baik, M.-H.*; Cho, S. H.* ZnMe₂-Mediated, Direct Alkylation of Electron Deficient N-Heteroarenes with 1,1-Diborylalkanes :Scope and Mechanism. *J. Am. Chem. Soc.* **2020**, *142*, 13235.
7. Hwang, C.; **Jo, W.**; Cho, S. H.* Base-promoted, deborylative secondary alkylation of N-heteroaromatic N-oxides with internal gem-bis[(pinacolato)boryl]alkanes: a facile derivatization of 2,2'-bipyridyl analogues. *Chem. Commun.* **2017**, *53*, 7573.
8. **Jo, W.**; Kim, J.; Choi, S.; Cho, S. H.* Transition-Metal-Free Regioselective Alkylation of Pyridine N-Oxides Using 1,1-Diborylalkanes as Alkylating Reagents. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2016**, *55*, 9690.

- 포항공과대학교 화학과, 학사(2012-2016)
- 포항공과대학교 화학과, 박사(2016-2021, 지도교수: 조승환)
- 시카고대학교 화학과, 박사후 연구원 (2022-2023, 지도교수: Guangbin Dong)
- 포항공과대학교 화학과, 박사후 연구원 (2023-2025, 지도교수: 조승환)
- 전북대학교 사범대학 과학교육학부 화학교육 전공, 조교수(2025-현재)



진 다 솔 Dasol Jin

전북대학교 화학과, 조교수
dasoljin@jbnu.ac.kr

소개글

진다솔 교수는 전기화학적 에너지 변환 및 저장 장치에 적용 가능한 전극 재료 합성과 전기분석화학에 기반한 전극 반응 메커니즘 규명 연구를 수행해왔다. 특히, scanning electrochemical microscopy(SECM)를 비롯한 다양한 operando 전기화학 분석 기법을 활용하여 전극-전해질 계면에서의 반응 메커니즘을 규명하였고, 이를 통해 전극 반응의 활성 부위를 확인할 수 있었다. 이러한 연구 성과를 기반으로, 현재 SECM을 활용하여 리튬 이차전지의 충/방전 과정 동안 형성되는 고체 전해질 계면의 거동을 규명하는 연구를 진행하고 있다.

주요연구분야

- 전기화학(Electrochemistry)
- 분석화학(Analytical Chemistry)
- 재료화학(Materials Chemistry)

대표논문

1. Song, J.; Chitumalla, K. R.; Kim, M. H.; Jang, J.; **Jin, D.** Perturbing d-Band Center via High-Entropy Modulation within Spinel Lattices toward Enhanced Oxygen Evolution Reaction Catalysis. *Nano Energy* **2026**, *148*, 111632.
2. **Jin, D.**; Abruña, H. D. Regulated Li₂S Deposition through Evolution of Silver Chloride for Li-S Batteries. *ACS Nano* **2025**, *19*, 19454.
3. **Jin, D.**; Kim, J.; Chitumalla, R. K.; Kim, I. Y.; Lee, C.; Jang, J.; Kim, M. H. Tailoring Hydrogen Adsorption via Charge Transfer at Bimetallic Cr_{0.48}Ru_{0.52} Alloy Nanoparticles Decorated on Carbon Nanofiber for Enhanced Hydrogen Evolution Catalysis. *Carbon* **2025**, *232*, 119797.
4. **Jin, D.**; Krumov, M. R.; Mandel, R. M.; Milner, P. J.; Abruña, H. D. Prussian Blue Analogue Framework Hosts for Li-S Batteries. *ACS Energy Lett.* **2024**, *9*, 5822.
5. **Jin, D.**; Woo, H.; Prabhakaran, S.; Lee, Y.; Kim, M. H.; Kim, D. H.; Lee, C. Single Phase Trimetallic Spinel CoCr_xRh_{2-x}O₄ Nanofibers for Highly Efficient Oxygen Evolution Reaction under Freshwater Mimicking Seawater Conditions. *Adv. Funct. Mater.* **2023**, *33*, 2301559.

- 이화여자대학교 화학나노과학과, 학사 (2015.3-2019.2)
- 이화여자대학교 화학나노과학과, 박사 (2019.3-2023.8, 지도교수: 이종목, 이영미)
- 코넬대학교 화학과, 박사후 연구원 (2023.9-2025.7, 지도교수: Héctor D. Abruña)
- 전북대학교 화학과, 조교수(2025.9-현재)

화학사 돌아보기

Part. 30

물질 없는 화학

최정모 | 부산대학교 화학과 부교수, jmchoi@pusan.ac.kr

1890년대의 화학은 구조화학에 분자의 입체 구조까지 포함시키면서 많은 발전을 이루었습니다. 이 모든 이론의 기반에는 “원자” 개념이 있었습니다. 1860년대에만 해도 실재는 확인할 수 없지만 유용한 도구 정도로 취급받던 원자¹는, 1880년대를 거치는 동안 그 공간적인 배치가 화학적 성질을 설명할 수 있음이 밝혀지면서 보다 실제적인 존재로 받아들여지기 시작했습니다. 그럼에도 화학 한쪽 구석에서는 원자 개념을 두고 뜨거운 논쟁이 지속되고 있었습니다. 이 논쟁의 중심에는 탁월한 물리화학자 오스트발트가 있었죠. 그는 원자 개념을 거부하고 에너지를 중심으로 모든 화학을 다시 쓰고자 했습니다. 오스트발트는 왜 그렇게 생각했을까요? 오늘 글에서는 그를 중심으로 1890년대의 논쟁을 살펴보고자 합니다.²

오스트발트가 처음부터 원자 개념에 의심을 품었던 것은 아닙니다. 1880년대 전반까지 그가 수행한 연구에서는 당시 화학계에서 받아들여던 원자와 분자 개념을 동일하게 활용하는 모습을 볼 수 있습니다. 그의 가까운 동료이자 공동 연구자였던 판트호프와 아레니우스의 이론이 이온 등 입자 개념에 기반하고 있다는 것을 생각하면 더욱 당연한 일이었죠.³ 다만 오스트발트는 열역학의 아름다움에 매료되어 있었고, 열역학이 화학의 여러 문제를 설명하는 도구가 될 수 있다는 확신을 가지고 있었습니다.

당시 열역학의 상황은 다음과 같았습니다. 일과 열의 관계에 대한 논란은 1850년을 전후하여 열역학 제1법칙과 제2법칙이 형식화되면서 정리되었고, 열역학은 에너지를 중심으로 일관된 개념을 갖추게 되었습니다.⁴ 1865년 엔

1. “화학사 돌아보기 23. 원자는 실재하는가,” 『화학세계』 2025년 2월호 참조.

2. 이번 호의 내용은 다음 글들에서 큰 도움을 받았습니다. R. J. Deltete, “Wilhelm Ostwald’s Energetics 1: Origins and Motivations,” *Foundations of Chemistry* 9:3-56 (2007); Peter Clark, “Atomism versus thermodynamics,” in *Method and Appraisal in the Physical Sciences: The Critical Background to Modern Science, 1800-1905*, ed. Colin Howson (Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1976); Robert Deltete, “Helm and Boltzmann: Energetics at the Lübeck NATurforscherversammlung,” *Synthese* 119: 45-68 (1999); Erwin N. Hiebert, “The Energetics Controversy and the New Thermodynamics,” in *Perspectives in the History of Science and Technology*, ed. D. H. D. Roller (Norman, OK: University of Oklahoma Press, 1971);

3. 오스트발트의 초기 삶과 업적에 관해서는 “화학사 돌아보기 26. 새로운 물리화학 (2),” 『화학세계』 2025년 8월호 참조.

4. 19세기 전반의 열역학과 화학적 응용에 대해서는 “화학사 돌아보기 19. 1850년대의 풍경,” 『화학세계』 2024년 6월호 참조.

트로피 개념이 정의되었고, 1870년대부터 기브스(Josiah Willard Gibbs, 1839-1903)와 플랑크(Max Planck, 1858-1947)가 에너지 보존 법칙과 엔트로피 증가 법칙만 가지고 열역학 체계를 수학적으로 엄밀하게 만들기 시작했습니다. 1882년 헬름홀츠(Hermann Helmholtz, 1821-1894)는 두 법칙을 결합하여 오늘날 헬름홀츠 에너지로 알려져 있는 물리량을 정의하였고, 이 헬름홀츠 에너지를 이용하여 열역학적 변화가 자발적으로 일어날지 아닐지 판단할 수 있음을 보였습니다. 화학에도 시사하는 바가 큰 연구 결과였죠.

한편, 기본 입자들의 움직임으로부터 열역학적 설명을 제공하는 분자 운동론 역시 19세기 후반에 큰 발전을 이루게 됩니다.⁵ 분자 운동론은 역학 법칙에 따라 움직이는 기본 입자들이 매우 많이 존재한다고 가정하고, 이들 집단의 움직임을 통계적으로 처리하면 여러 가지 측정 가능한 양들을 도출해낼 수 있다는 가설에 기반을 두고 있습니다. 예를 들어 클라우지우스(Rudolf Clausius, 1822-1888)는 1857년 논문에서 다원자 분자의 움직임을 “적당히” 정리하면 돌턴의 부분 압력 법칙, 게이뤼삭의 동일 부피 법칙 등을 도출할 수 있음을 보였습니다.

분자 운동론 연구에 통계적인 관점을 도입한 것은 맥스웰(James Clerk Maxwell, 1831-1879)입니다. 맥스웰은 1860년 기체 분자들의 속도에 대한 확률 분포를 도입하여 기체의 열역학적 성질을 설명하고자 하였습니다. 여기서 바통을 이어받은 인물은 탁월한 젊은 물리학자 볼츠만(Ludwig Boltzmann, 1844-1906)이었습니다. 볼츠만은 맥스웰의 통찰을 일반화하고 수학적으로 정교화하여 단순하고 강력한 분자 운동론 이론을 만들어냈습니다. 이러한 초기 분자 운동론의 성공적인 사례 중 한 가지는 판데르발스 상태 방정식입니다. 판데르발스(Johannes Diderik van der Waals, 1837-1923)는 1873년 박사학위 논문에서 그 당시까지 축적된 분자 운동론을 활용하여 상호작용이 포함된 기체 분자의 거동을 묘사하는 식을 찾아냈죠.

두 가지 열역학 법칙⁶과 수학만을 사용하여 결과를 도출

하는 고전 열역학과, 기본 입자들의 거동을 통계적으로 처리하여 결과를 도출하는 분자 운동론은 큰 문제 없이 어울릴 수 있는 것처럼 보였습니다. 심지어 볼츠만은 1872년 엔트로피 증가 법칙을 분자 운동론을 사용하여 증명했다고 주장했습니다. 이는 H-정리(H-theorem)라고 불리는 데, 비평형 상태의 분자들이 평형 상태로 가기 위해서는 분자의 분포와 관련된 H라는 물리량이 점차 감소해야 한다는 내용을 담고 있습니다. 평형에 도달하면 H는 일정하게 유지되고요. 즉 H는 감소하거나 동일한 값을 유지해야만 하는데, 엔트로피는 -H에 비례하는 값이기 때문에 엔트로피는 동일하게 유지되거나 증가해야만 하는 것이죠.

그런데 이 H-정리는 큰 논란을 불러일으킵니다. 분자 운동론의 가정대로 기본 입자들이 역학 법칙에 따라 움직이고 있다면, 그 움직임을 역으로 돌려도 아무런 문제가 없어야 합니다. 어떤 비평형 상태에서 평형 상태까지 가는 기체 입자들의 움직임을 영상으로 녹화해서 본다고 하겠습니까. 그리고 볼츠만의 H-정리에 따르면 엔트로피가 점점 증가하겠죠. 그런데 그 녹화된 영상을 거꾸로 돌리면 어떨까요? 시간을 거꾸로 돌린다고 역학 법칙이 바뀌는 것은 아니므로, 각 기체 입자 입장에서는 어떠한 물리 법칙도 위배하지 않고 거꾸로 움직일 수 있습니다. 하지만 이 과정의 엔트로피는 점점 감소하게 됩니다. 따라서 H-정리는 “운 좋은” 초기 상태에만 적용되는 정리라고 비판할 수 있습니다.

상황은 점차 더욱 악화됩니다. 그간 분자 운동론에서 예측해 온 값들은 실험값과 차이를 보여 왔습니다. 이를 줄이기 위해 과학자들이 다양한 노력을 기울였지만, 좀처럼 합리적인 해결책이 나오지 않는 것입니다. 대표적인 예로 기체 분자의 비열(specific heat) 문제가 있었습니다. 다원자 분자의 비열은 분자 운동론의 예측값과 실제 실험으로 측정된 값 사이에 큰 차이를 보였습니다. 이 차이는 분자의 진동 운동이 불가능하다고 가정하면 설명할 수 있었기에,⁷ 1876년 볼츠만은 두 원자가 단단한 결합으로 연결되어 있어서 진동이 불가능하다는 설명을 제시하였습니다. 당대의 물리학자들은 이러한 설명에 불만을 표현했습

5. 분자 운동론의 초기 역사에 대해서는 “화학사 돌아보기 20. 칼스루헤 회의,” 『화학세계』 2024년 8월호에서 짚막하게 다루었습니다.

6. 열역학 제3법칙은 20세기 초에 네른스트에 의해 제안됩니다.

7. 오늘날은 에너지가 연속적이지 않고(양자역학적인 이유로 인해) 불연속적이라는 이유로 상온에서 대부분의 기체 분자는 진동 운동을 할 수 없다고 설명합니다.

니다. 볼츠만의 생각처럼 “이상적인”, 무한히 단단한 결합이 존재할 수 있을까요? 분자 내에 약간의 탄성만 존재해도 볼츠만의 논증은 무너지고 맙니다. 또한 당시에는 분자의 선 스펙트럼이 분자 내 원자들의 진동 운동에서 기인한다고 생각했기 때문에 분자 내에 진동 운동이 없다는 가정은 큰 반발을 샀습니다.

볼츠만의 시도 외에도 비열 문제를 해결하려는 여러 시도가 있었습니다. 맥스웰은 “단단한 구 형태의 원자”라는 개념을 포기하고, 대신 원자가 매질 내 소용돌이 형태로 존재한다고 보자고 제안하였습니다.⁸ 그러면 유체역학 법칙들로부터 원자와 분자의 성질을 끌어낼 수 있고, 볼츠만의 이상한 가정을 도입할 필요도 없어집니다. 하지만 실제로 의미 있는 값을 도출하기에는 계산이 너무 복잡했고, 실제로 이 이론이 실험값과 일치하는 비열을 예측한다는 것은 증명할 수 없었습니다. 운동 에너지가 분자 내에서 재배치되는 시간이 무척 길다는 가정을 도입하는 이론도 있었습니다. 이 경우에는 비열이 실험값과 가깝게 맞춰질 수는 있으나, 역시 그런 가정을 도입해야 하는 합당한 이유를 제시할 수 없었습니다. 이러한 상황을 한탄하며 켈빈은 이런 코멘트를 남겼습니다. “기체의 비열과 관련된 사실과 볼츠만-맥스웰 체계를 화해시킬 가능성은 사실상 없다.”⁹ 이러한 비열 문제는 수치 오차를 뛰어넘어, 분자 운동론의 기본 가정이 현실과 일치하는지를 의심하게 만드는 단초로 작용했습니다.

고전 열역학과 분자 운동론, 이 두 가지 이론은 딱 맞는 것 같았지만 본격적으로 맞추어 보려고 하니 짝이 맞지 않는 퍼즐처럼 어색한 관계였습니다. 그때까지 모든 실험을 잘 설명해 온 고전 열역학을 의심하는 사람은 없었습니다. 문제는 분자 운동론이었죠. 플랑크는 1891년 분자 운동론을 가리켜 이런 말을 남겼습니다. “[분자 운동론은] 60년대 초반에 반짝 성공을 거두었지만, 이 이론을 정교하게 만들려는 모든 시도는 새로운 물리적 결과만 준 것이

아니라 해결하기 힘든 어려움에 빠지고 말았다.”¹⁰ 심지어 원자나 분자가 실재한다는 입장을 포기하지 않고 있던 볼츠만마저도 1890년대 후반에 오면 분자 운동론을 현상을 설명하는 유용한 도구로 이해해도 무방하다는 식의 방어적 논법을 병행하기 시작합니다.

물리학계의 이런 변화는 오스트발트에게도 영향을 주었습니다. 그는 1880년대 말부터 분자 운동론에 기반하여 열역학을 설명하려는 여러 시도들이 대개 입증할 수 없는 무리한 가정에 기반을 두고 있음을 깨닫기 시작했습니다. 오스트발트는 자서전에서 다음과 같은 이야기를 들려줍니다. 1890년 봄의 어느 하루, 학생과 연구 관련 토론을 마치고 개인 연구실에 돌아온 그는 원자 개념에 기반하여 열역학적 현상을 설명하는 것이 혼란스럽고 불명료하다는 느낌 속에서 고민하고 있었습니다. 그러다 문득 에너지와 물질이라는 두 가지를 가정하는 것이 모든 문제의 근원이고, 에너지만으로 현상을 설명한다면 충분할 수 있겠다는 아이디어를 떠올리게 됩니다. “[그 생각]은 나에게 번개처럼 번쩍하는 효과를 주었다. 나는 마치 거센 바람 속에서 우산이 뒤집히는 것과 비슷한 물리적 느낌이 내 뇌에서 일어나는 것을 경험했다.”¹¹

이 “개종” 사건 이후 오스트발트가 바로 원자 및 분자 개념을 버린 것은 아닙니다. 그는 여전히 판트호프와 아레니우스, 그리고 새로 등장한 네른스트(Walther Nernst, 1864-1941)라는 젊은 물리화학자의 이론까지 포함하여 화학 내 물리화학의 가치를 방어하는 입장이었고, 이온 개념은 그 이론들의 중심에 있었습니다. 따라서 이온 개념을 대체할 개념을 아직 만들어내지 못한 오스트발트가 하루아침에 이온 개념을 포기할 수는 없었습니다. 하지만 이러한 논쟁 가운데 오스트발트는 비판자들의 공격 중 많은 부분이 기본 입자들의 평균적인 거동으로부터 열역학을 도출하는 과정을 향하고 있다는 것을 깨닫습니다. 이는 분자 운동론적 접근법을 포기하면 깔끔하게 방어할 수 있는 일이었습니다.

8. 소용돌이 원자 개념은 맥스웰이 처음 제안한 것은 아닙니다. 그 전에도 여러 물리학자들에 의해 비슷한 개념이 제시되었습니다. Helge Kragh, “The Vortex Atom: A Victorian Theory of Everything,” *Centaurus* 44(1-2): 32-114 (2002).

9. Clark (1976), 85쪽에서 재인용.

10. Clark (1976), 89쪽에서 재인용.

11. Deltete (2007), 31-32쪽에서 재인용. 하지만 Deltete는 실제로 이 경험이 아주 극적인 것은 아니었을 거라며, 1887년부터 오스트발트가 점차 에너지 중심 사고로 이동하고 있었음을 지적합니다.

오스트발트는 이후 기본 입자라는 개념 없이 에너지를 중심으로 연구를 수행합니다. 그는 역학, 열역학, 화학의 여러 사실들을 에너지 원리만 가지고 유도하였고, 화학적 변화는 그저 에너지의 형태가 바뀌는 것뿐이라고 주장하였습니다.¹² 그는 “물질 없는 화학(Chemie ohne Stoffe)”을 추구했습니다.¹³ 이러한 변화는 <물리화학 저널(Zeitschrift für physikalische Chemie)>의 편집자로서 그가 보인 태도에서 잘 드러납니다. 1887년 창간된 이 저널은 초반에는 분자 운동론 논문들에도 공간을 내어주었지만, 오스트발트의 “개종” 이후 태도가 변했습니다. 그는 1892년 10월 학술지에 투고된 분자 운동론 논문을 검토하면서 다음과 같은 코멘트를 남겼습니다. “본 심사자는 분자 운동론 가정의 유용성에 대해 계속해서 의구심을 표현해 왔으며, 본 연구가 의미 있는 여러 결과를 만들어냈지만 그 의구심을 극복하지는 못했다고 본다.”¹⁴

오스트발트의 강력한 에너지 중심 철학은 이내 반향을 만들어냈습니다. 1890년 이후 다양한 분야에서 “에너지론(energetics)”이라는 표현이 사용되기 시작했고, 에너지론을 다루는 논문들도 쏟아져 나왔습니다. 1893년 독일 자연과학자 대회(Naturforscherversammlungen)에서는 화학자 오스트발트를 비롯해 물리학자, 식물학자, 병리학자 등이 에너지론의 응용에 대해 논의하였습니다. 오스트발트는 급기야 진화와 자유 의지의 문제도 에너지를 사용해 설명할 수 있다고 주장하였죠. 이러한 관심을 반영하여, 1895년 뤼베크(Lübeck)에서 열릴 자연과학자 대회의 주제는 아예 “에너지론의 현황”으로 정해졌습니다.¹⁵

오스트발트와 더불어 이 시기 에너지론 진영을 대표하는 인물로 게오르크 헬름(Georg Helm, 1851-1923)이 있습니다. 헬름은 수리물리학자로 열역학을 다양한 분야에 적용하는 연구를 해왔습니다. 그는 “수리화학(mathe-

matical chemistry)”이라는 용어를 만들었고, 경제 현상을 에너지론의 관점에서 설명하려고 노력하였습니다. 헬름은 내성적이고 온화한 성격의 소유자였습니다. 이 헬름이 뤼베크 대회의 기조연설자로 초청받았고, 오스트발트 역시 연설 시간을 할당받았습니다. 타고난 연설가였던 오스트발트는 이 기회를 이용해 에너지론을 널리 전파하기 위해 자신의 발표 시간을 초반에 배치해 달라고 요청했습니다. 하지만 오스트발트의 화려한 언변을 두려워 했던 것일까요, 대회 주최측에서는 헬름을 초반에, 그리고 오스트발트를 가장 마지막 날에 배치하였습니다.

뤼베크 자연과학자 대회는 1895년 9월 16일 월요일에 시작했습니다. 화요일 오전에 헬름의 발표가 있었습니다. 헬름은 에너지로 현상을 설명하는 두 가지 방법으로 역학적 에너지만 이용하는 역학적 방법(분자 운동론은 여기 포함됩니다)과 여러 에너지 형태의 변환을 가정하는 열역학적 방법이 있다고 소개했고, 바로 토론 시간을 가졌습니다.¹⁶ 예상대로 볼츠만은 에너지론에 강한 반론을 제기하였고, 플랑크와 네른스트를 비롯한 여러 수학자, 물리학자, 화학자들이 여기 합류하였습니다. 반면 에너지론을 옹호하는 측은 헬름과 오스트발트 뿐이었습니다. 그마저도 헬름은 불붙은 토론에 당황하여 거의 말도 못 꺼내고 있었습니다. 오스트발트는 일기당천의 기세로 토론에 임했지만, 전세는 점점 불리하게 흘러갔습니다. 이 토론을 참관했던 젊은 물리학자 쾰머펠트(Arnold Sommerfeld, 1868-1951)는 다음과 같은 기록을 남겼습니다. “볼츠만과 오스트발트 사이의 토론은 마치(…) 황소와 절륜한 검투사 사이의 싸움 같았다. 하지만 이번만큼은, 놀라운 검술에도 불구하고, 투우사는 황소에게 패배하고 말았다. 볼츠만의 논증이 성공했다. 당시 우리 젊은 수학자들은 모두 볼츠만의 편에 섰다.”¹⁷

12. 말년의 그는 물리학과 화학뿐 아니라 생물학과 심리학, 경제학, 사회학에 이르기까지 에너지 원리로 설명하려는 시도를 하였습니다.

13. Niles R. Holt, “A Note on Wilhelm Ostwald’s Energism,” *Isis* 61(3): 386-89 (1970).

14. Deltete (2007), 42쪽에서 재인용.

15. 흥미롭게도 이 주제는 에너지론의 강력한 반대자였던 볼츠만의 추천으로 정해졌다고 합니다. Deltete(1999)는 볼츠만이 에너지론을 공개적인 자리에서 확실하게 무너뜨리려고 했을 수도 있고, 아니면 그저 논란이 많은 주제를 자유롭게 토론하고 싶었던 것일 수도 있을 것이라 추측합니다.

16. 헬름의 강연록은 미리 배포되었기 때문에 대부분의 참가자는 그 내용을 읽고 왔을 것입니다.

17. Deltete (1999), 56쪽에서 재인용.

뤼베크 대회가 끝나고, 헬름과 오스트발트는 불만을 쏟아냈습니다. 헬름은 자신이 함정에 빠졌다고 표현했고, 오스트발트는 이 행사가 에너지론자들을 무너뜨리기 위해 정교하게 설계된 행사였다고 비난했죠. 하지만 이것은 공격의 서막에 불과했습니다.¹⁸ 대회가 끝나고 두 달이 채 지나기도 전에 볼츠만은 에너지론을 공격하는 논문을 출판했습니다. 그는 헬름과 오스트발트가 오류와 아집으로 가득찬 이론에 갇혀 있다며, 이들이 젊은 세대를 오도하고 있다고 비난했습니다. 그 한 달 뒤에는 플랑크가 에너지론을 비판하는 논문을 출판했죠. 플랑크는 볼츠만과는 다른 방향에서 에너지론을 비판했는데, 그 수학적 체계가 부적절하다는 비판이 그것이었습니다. 특히 플랑크는 에너지론자들이 엔트로피 개념을 오용하고 있다고 공격하였습니다. 오스트발트와 헬름은 즉각 반박 논문을 썼지만, 볼츠만도 바로 재반박 논문을 써서 대응합니다. 이 과정을 지켜본 젊은 세대 과학자들은 점차 에너지론을 떠나기 시작했습니다. 과학사학자 히베르트(Erwin Hiebert)는 1896년 말부터 에너지론의 몰락이 본격화되었다고 봅니다.¹⁹

이러한 전쟁통에 오스트발트 이외의 화학자들은 어떤 입장이었을까요? 서두에도 이야기한 것처럼, 당시 화학은 이미 원자 개념을 중심에 두고 연구를 진행하고 있었습니다. 따라서 대부분의 화학자들은 원자가 존재하지 않고, 모든 것은 에너지일 뿐이라는 오스트발트의 입장에 동의할 수 없었습니다. 아레니우스도 자신의 전해질 이론이 원자론에 기반하고 있었기 때문에 오스트발트에게 동의할 수 없었지만, 그렇다고 은사를 노골적으로 공격하지는 않았습니다. 다만 아레니우스는 뤼베크 대회에 참석한 후 그 내용을 스웨덴 과학자들에게 보고하는 글에서, 에너지론은 “자연철학(Naturalphilosophie)의 추측”에 불과하다는 평가와 더불어 뤼베크 대회에서 오스트발트가 “완전히 패배”했다고 썼습니다.²⁰ 아마 주류 화학자들의 입장을 가장 잘 대변하는 사람은 뤼베크 대회에서 “원자론의 문제

들”이라는 제목으로 강연한 유기화학자 마이어(Viktor Meyer, 1848-1897)일 것입니다.²¹ 마이어는 이 강연에서 오스트발트의 에너지론은 화학 연구에 큰 도움이 안 된다고 평가합니다. 그는 화학 연구는 이미 원자 가설에 깊이 의존하고 있으며, 에너지론은 에너지 변환을 설명할 수 있지만 화학의 구조 문제를 설명할 수 없다고 지적하죠.

오스트발트의 에너지론은 1890년대 과학계를 휩쓸고 지나간 돌풍이었습니다. 이 시기에 물리학자들은 고전 열역학과 분자 운동론 사이의 관계를 두고 고민하고 있었고, 오스트발트의 에너지론은 한 가지 해결책으로 제시되었습니다. 하지만 초반의 인기에도 불구하고, 1895년 뤼베크 대회 이후 에너지론은 급격히 사람들의 관심에서 멀어집니다. 한편, 화학자들은 오스트발트의 과격한 주장에서 한 발짝 물러서 있었습니다. 원자가 무엇인지에 대해 정확한 이해를 가지고 있었던 것은 아니지만, 이미 화학 연구의 핵심 가설이 되어 버린 원자론을 포기할 수는 없었기 때문입니다. 원자의 실체에 대해 더 깊이 고민하는 화학자들도 있었습니다. 뤼베크 대회 강연에서 마이어는 원자 스펙트럼에 기반하여 원자가 복잡한 내부 구조를 가지고 있을 수도 있다는 언급을 남깁니다. 흥미롭게도 이 언급은 향후 10여 년 동안 과학계를 뒤흔들 발견들을 예견하는 것처럼 보입니다. 다음 글에서는 그 이야기를 다뤄보겠습니다.



최 정 모 Jeong-Mo Choi

- 한국과학기술원 화학과, 학사(2003. 3 - 2011. 8)
- Harvard University 과학사학과, 석사(2011. 9 - 2015. 5, 지도교수: Naomi Oreskes)
- Harvard University 화학 및 화학생물학과, 박사(2011. 9 - 2016. 5, 지도교수: Eugene I. Shakhnovich)
- Washington University in St. Louis, 박사후 연구원(2016. 8 - 2019. 4, 지도교수: Rohit V. Pappu)
- 한국과학기술원 자연과학연구소, 연구조교수(2019. 6 - 2020. 8)
- 부산대학교 화학과, 조교수(2020. 9 - 2024. 8), 부교수(2024. 9 - 현재)

18. 이 대회 전까지 볼츠만은 헬름, 오스트발트와 적대적인 관계가 아니었습니다.

19. Hiebert (1971), 78쪽.

20. Crawford, "Arrhenius, the Atomic Hypothesis, and the 1908 Nobel Prizes in Physics and Chemistry," *Isis* 75, 503-522 (1984), 특히 508쪽.

21. Viktor Meyer, "Probleme der Atomistik," *Verhandlungen der Gesellschaft deutscher Naturforscher und Ärzte* II(1), 95-110 (1895).



우리 실험실은요

국민대학교 화학과 인공지능화학 연구실

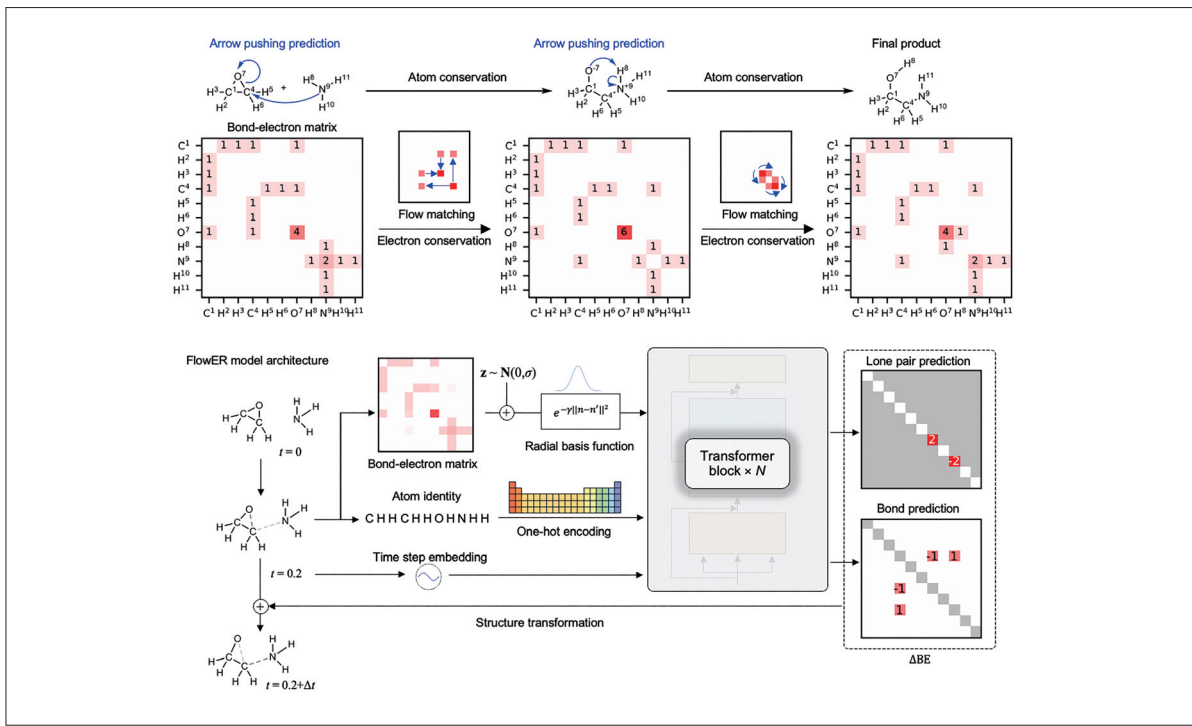
(Spectroscopy and AI Lab(SAIL))

글 | 김지환(국민대학교 화학과 석사과정, jihwan2098@kookmin.ac.kr)
연구실 책임자 | 정준영(국민대학교 화학과 교수, jjoung@kookmin.ac.kr)

화학의 바다를 항해하는 SAIL 연구실

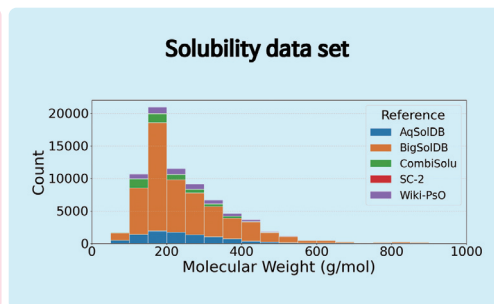
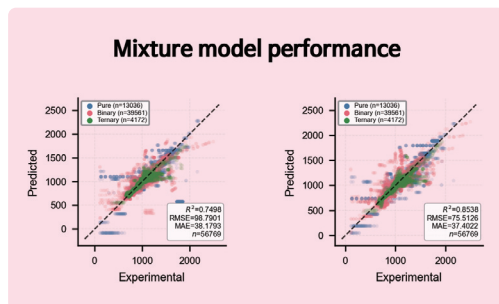
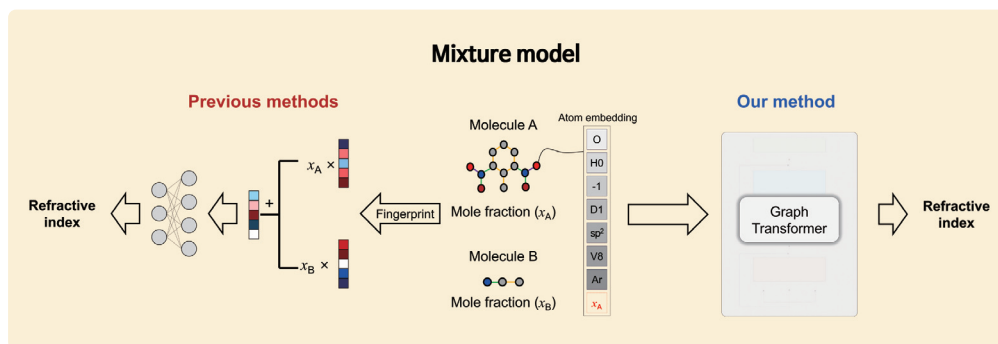
Spectroscopy and AI Lab(SAIL) 연구실은 2025년에 탄생한 신생 연구실로, 인공지능과 화학을 융합하여 시를 이용한

한 화학 연구를 진행하고 있습니다. 연구실 이름인 'SAIL'처럼, 저희는 방대한 화학 데이터의 바다에서 인공지능이라는 나침반을 들고 미지의 영역을 항해하고 있습니다.



■ 유기 반응을 예측하는 FlowER 모델

Joung, J.F., Fong, M.H., Casetti, N. et al. Electron flow matching for generative reaction mechanism prediction. Nature 645, 115–123 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09426-9>



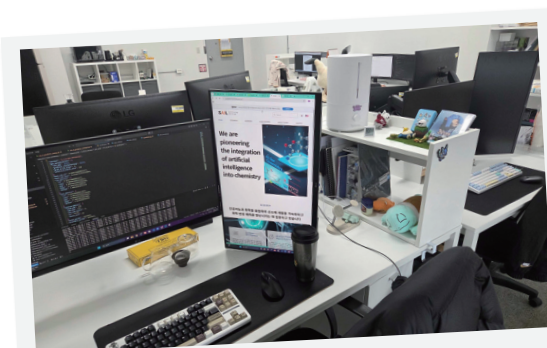
■ 분자 특성 예측 모델, solubility data set 등 현재 연구 내용

저희의 핵심 목표는 ‘예측 가능한 화학’입니다. 유기 물질의 반응 경로 및 메커니즘 예측부터 의약품 개발의 난제인 불순물 예측, 그리고 혼합물의 물리화학적 특성 예측에 이르기까지, 화학에서 일어나는 다양한 현상을 컴퓨터 프로그래밍과 AI 모델로 구현합니다.

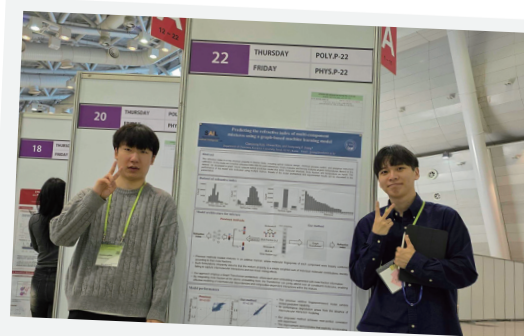
현재 저희는 세 가지 연구에 집중하고 있습니다. 첫째, 범용성 높은 분자 특성 예측 모델입니다. 화합물의 구성 비율을 나타내는 몰 분율의 표현 방식에 집중하여, 어떤 방식으로 몰 분율이라는 정보를 모델에 학습시켜야 할지 연구 중입니다. 둘

째, 고품질 데이터의 확보입니다. SI의 핵심은 양질의 데이터에 있기에, 직접 용해도 데이터 세트와 유기 반응 경로 데이터들을 체계적으로 수집하고 정제하고 있습니다. 셋째, 연구 협업입니다. 합성 연구실들과 협업을 하며 AI를 통해 실험 조건을 제안하거나, 물질 특성 예측을 통해 사전 선별을 진행하는 등 가이드 역할을 수행하고 있습니다.

SAIL의 연구실 생활
교수님께서서는 대학원생들이 좋은 연구자로 성장할 수 있게



연구실 내부



포스터 발표



생일파티



대학원생들과 교수님의 방탈출 기념 사진

지도해 주시고 계십니다. 매주 1대1 미팅을 통해 연구 방향을 잡아주시고, 최적의 연구환경에서 연구할 수 있도록 최신 사양의 데스크톱과 듀얼 모니터를 각 자리에 비치하여 연구에 집중할 수 있게 해주십니다. 연구실의 장점 중 하나는 미니 카페인데, 다양한 간식과 음료로 당을 보충하며 동료들과 의견을 나누는 시간을 가질 수 있습니다.

저희 연구실은 학문적 견해를 넓히기 위해 매년 학회를 적극적으로 참여하고 있습니다. 학회에서는 각자 연구한 성과를 발표하거나, 다른 사람의 연구 내용을 보며 새로운 연구 동향을 파악하고 네트워킹 기회를 가지려 합니다. 생일이나 종강처럼 특별한 날이 있는 달에는 다 함께 모여 방 탈출, 연극 등 다양한 활동을 즐기거나 맛있는 식사를 합니다. 각종 활동들과 함께 연구하며 쌓인 고민과 힘들었던 이야기들을 편하게 나누다 보면 새로운 마음으로 연구를 시작하는 데 도움이 되곤 합니다.

연구실 생활이 때로는 힘들고 막막할 수 있지만, SAIL에서는 혼자가 아닌 함께하는 생활을 하기 위해 다 같이 노력하고 있습니다. 동료들과의 활발한 소통, 교수님의 세심한 지도, 그리고 쾌적한 연구환경이 어우러져 연구와 행복을 모두 챙기는 연구실로 만들어 나가고자 합니다.



SAIL의 항로

SAIL은 화학과 시 융합 연구 분야에서 새로운 길을 개척해 나가고 있습니다. 현재 분자 특성 예측 모델 개발, 용해도 및 반응 경로 데이터 셋 구축 등 기초 연구들을 진행하며 연구 역량을 쌓아가고 있습니다. 2025년 첫발을 내디딘 SAIL 연구실은 이제 막 시작 단계입니다. 이제 막 시작한 SAIL 연구실이 앞으로 어떤 성과를 만들어낼지, 그 과정을 함께 지켜봐 주시기 바랍니다!

"우리실험실은요!"는 딱딱한 광고 같은 연구실 소개가 아닌 연구실의 구성원(대학원생 및 학부생)이 자유롭게 연구실의 구성원, 연구 내용, 또는 연구실의 특별한 점 등 원하는 것은 무엇이든 자유롭게 알리기 위한 코너입니다. 특별히 학생들의 자발적인 참여를 독려하기 위하여 원고를 작성해주신 분들께는 소정의 원고료도 드립니다. 무료로 실험실도 홍보하고 원고료도 챙길 수 있는 기회를 학생들이 잘 활용해 주었으면 합니다. 문의사항이나 작성한 원고는 코너 담당 편집위원인 김형준 교수님(kimhyungjun@hanyang.ac.kr)께 보내주시면 감사하겠습니다.

최동훈(崔東勳) 고려대학교 교수(1960~)



최동훈 교수
고려대학교 화학과

분자에서 소자까지, ‘연결’을 설계해 온 화학자

최동훈 교수님은 35여 년간 고분자화학을 기반으로 기능성 고분자와 유기전자 소재 연구를 선도해 온 화학자이다. 비선형광학·광굴절·홀로그래프에서 OLED, 태양전지, 유기 트랜지스터에 이르기까지 차세대 전자소자의 핵심 원천기술을 개척하며 연구의 지평을 넓혀왔다. 그는 ‘분자 설계’를 단순한 합성 기술이 아니라 전자와 빛의 거동을 정밀하게 조율하는 전략으로 이해하고, 분자구조-집합체-박막-소자 성능을 유기적으로 연결하는 연구 체계를 구축함으로써 기능성 재료화학의 새로운 방향을 제시해 왔다. 특히 ‘좋은 분자’란 합성의 완성에 머무르는 것이 아니라, 박막 배열과 계면 거동을 거쳐 재현 가능한 소자 성능으로 이어질 때 비로소 완성된다는 관점은 그의 연구 전반을 관통하는 핵심 철학이다.

그는 서울대학교에서 학사(1984)와 석사(1986)를 마친 뒤 미국 미시간대학교(University of Michigan, Ann Arbor) Macromolecular Science & Engineering Program에서 고분자화학

박사학위(1991)를 취득하였다. 학부 시절부터 유기물이 전기와 빛을 제어할 수 있다는 가능성에 주목했으며, 박사과정에서는 전도성·광전도성 고분자 합성과 함께 용액형 액정 거동을 보이는 polypeptide 기반 비선형 광학 고분자를 연구하여 구조-배향-광응답 간의 상관관계를 규명하였다. 도너-억셉터 구조의 분극 정렬 조건을 정밀화하고 온도·전계·시간에 따른 응답을 계량화한 경험은 이후 유기반도체 박막의 이방성 제어와 OLED 발광 및 수명 특성 해석의 중요한 토대가 되었다. 이 시기에 형성된 “구조를 바꾸면 응답이 달라지고, 응답을 바꾸려면 구조를 다시 설계해야 한다”는 사고는 이후 구조-물성 상관관계를 정밀화하는 연구로 자연스럽게 확장되었다.

박사학위 후 그는 미국 뉴욕주립대학교 버펄로 캠퍼스(State University of New York at Buffalo) 화학과 Photonics Research Lab에서 박사후 연구원으로 근무하며 비선형 광학 고분자 기반 광스위치와 광메모리 연구에 참여하였다. 이 과정에서 전자공학·광학·물리·재료 분야 연구자들과의 협업을 통해 학문 간 경계를 넘는 융합 연구의 중요성을 체득하였으며, 이러한 경험은 귀국 이후 유기전자·광전자소자, 디스플레이, 그리고 계산 및 데이터 기반 소재 설계로 이어지는 연구 확장의 밑바탕이 되었다.

1992년 귀국한 그는 한국과학기술연구원(KIST) 고분자설계연구실 선임연구원으로 재직하며 광기능성 유기소재와 유기반도체 연구를 본격적으로 추진하였고, 국내 초기의 고분자 전계발광 다이오드 관련 국책과제도 수행하였다. 또한 한국고분자학회에서 ‘분자전자(molecular electronics)’ 연구의 중요성을 선도적으로 제기하며 분자전자 부문위원회 출범에 기여하였다. 1995년 경희대학교 교수로 부임한 이후에는 광기능성 고분자연구실을 운영

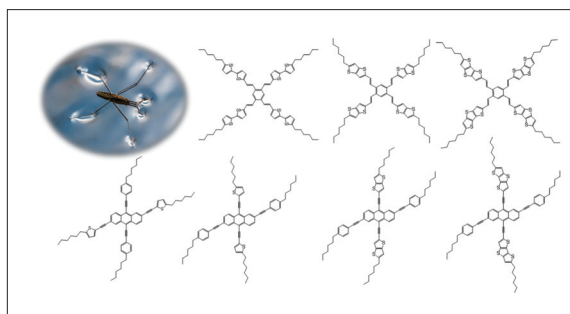
하며 학문 후속세대 양성과 학제 간 융합 연구를 이끌었다. 이 시기에는 University of Washington 화학과에서 연구전담 교원으로 약 3년간 재직하며 유기 광전자 재료 연구도 수행하였다. 또한 정보디스플레이재료센터장으로서 G7 선도기술개발사업과 IMT-2000 사업 등을 수행하고, 삼성전자와의 AMLCD 공동연구를 통해 LCD 부품 소재 국산화의 기반을 마련하였다. 해외 의존도가 높던 시기에 그는 학계-산업계-연구소를 연결해 '소재 자립'이라는 문제의식을 공유하고 공동연구를 추진함으로써 이후 한국 디스플레이 산업 도약의 토대를 다졌다.

2005년 고려대학교 화학과로 옮긴 뒤 기능성고분자연구실(FPL)을 이끌며 첨단재료화학연구센터장, 기초과학연구원장, 이공분야 대학중점연구소 소장, BK21 화학인재양성사업단장 등을 역임하며 연구와 교육의 지평을 확장해 왔다. 2015년부터는 LG 디스플레이-고려대 산학협력센터장으로서 실무형 과제와 도전적 탐색 연구를 병행하는 산학협력 플랫폼을 구축하여 기업과 대학이 함께 성장하는 선순환 구조를 마련하였다. 또한 총무처장, 기획예산처장, 감사실장, 미래전략실장 등 대학 본부의 주요 보직을 맡아 연구 기반 확충과 대학 행정 혁신에도 기여하였다.

연구의 혁신— π 전자 제어로 여는 유기반도체와 그의 응용

최동훈 교수님의 연구는 'π전자 제어'라는 일관된 축 위에서 전개되어 왔다. 초기에는 PVDF 등 압전성 고분자 연구를 통해 유기물이 전기·힘·온도 자극에 능동적으로 반응할 수 있음을 제시하였고(1987), 1990년대에는 전기장에 의해 매질의 굴절률을 가역적으로 변조하는 고분자 전기광학 소재와 아조벤젠 함유 고분자의 광유도 분자 재배열 현상을 체계적으로 규명하며 전기와 빛으로 π전자계를 제어하는 방법론을 확립하였다. 이어 아조벤젠 고분자를 활용해 액정 분자를 '빛으로 제어 가능한 메모리 소자'에 적용하는 개념을 Advanced Materials (2000)에 발표함으로써, 광자극에 따라 저장과 읽기 특성이 변화하는 유기 소자의 가능성을 제시하였다.

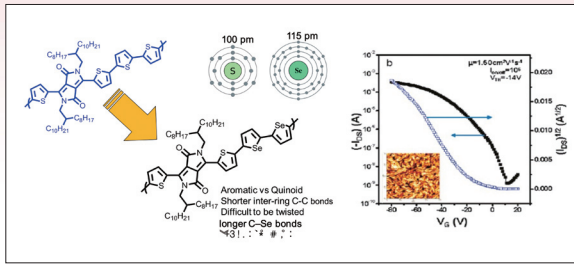
이후 유기반도체 분야에서는 분자 간 상호작용을 정밀하게 조절하여 전하 이동 경로와 에너지 준위를 설계하는 새로운 접근을 개척하였다. 특히 규칙적 적층 구조를 유도하고 전하 이동을 극대화하기 위한 분자 설계에서 water strider(소금쟁이)의 형태에서 영감을 얻은 이차원 확장형 공액 구조를 고안·합성하였다. 이러한 분자들은 강한 π - π 상호작용과 방향성 있는 자기조직을 통해 효율적인 전하 수송 경로를 형성하도록 설계되었다. 이를 바탕으로 고품질 박막과 단결정을 구현하고 유기 전계효과 박막 트랜지스터(Organic Field-Effect Transistor, OFET)를 제작하여 높은 전하 이동도를 달성하였으며, 이러한 성과는 분자 구조-집합체 형성-박막 미세구조-소자 물성 간 상관관계를 체계적으로 규명한 연구로 다수의 학술 논문을 통해 발표되었다.



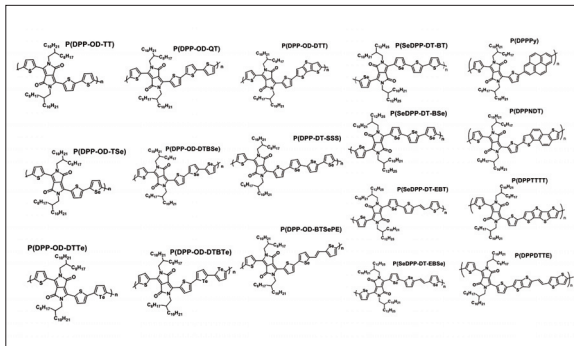
■ 소금쟁이 다리 구조를 모사한 2D 확장 공액 분자

2011년에는 전하 이동도 $1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 를 상회하는 고분자 반도체를 Journal of the American Chemical Society에 보고하며 당시 '한계'로 여겨지던 성능 장벽을 돌파하였다. 이어 J-aggregate 단결정 유기 트랜지스터(Advanced Materials, 2011)와 단결정 광메모리(Advanced Materials, 2012)를 잇달아 발표하며 결정성 유기소자의 가능성을 확장하였다. 이러한 소자들은 단결정 내부에서 광흡수-전하 분리-전하 저장이 유기적으로 연계되는 구조를 구현함으로써, 유기재료가 단순한 박막 기반 소자를 넘어 정렬된 결정성 플랫폼으로 발전할 수 있음을 실증하였다.

그는 2013년 Advanced Materials와 ACS Nano에 발표한 연구를 통해 단일 유기 나노선 기반 전자소자를 구현하였다.

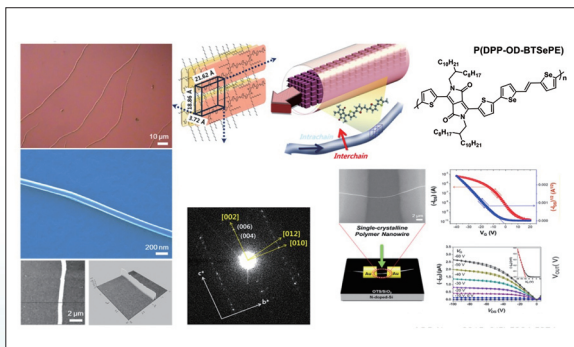


■ 셀레노펜 도입에 따른 DPP고분자의 저밴드갭 고이동도 전하수송 특성



■ OFET용 DPP 기반 공액 고분자의 구조 설계 예시

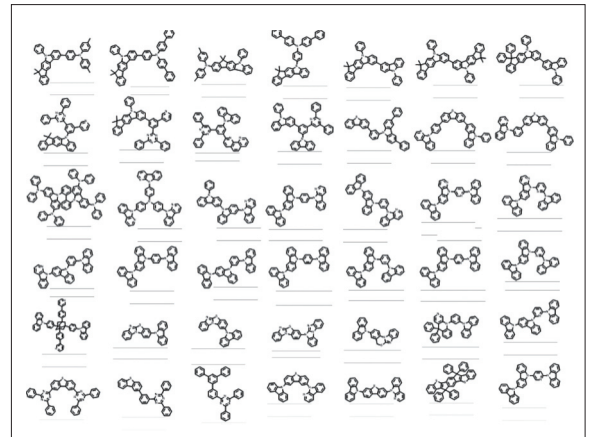
20~50 nm 크기의 유기반도체 나노선을 능동층으로 적용하여 $5.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 이상의 높은 전하 이동도를 달성함으로써 고성능 트랜지스터의 가능성을 입증하였다. 용액 공정에서 고분자 사슬의 자기조립을 정밀하게 제어하여 높은 결정성을 갖는 나노선을 형성하고, 연속적인 π - π 적층 구조가 효과적인 전하 수송 경로로 작동하도록 설계하였다. 또한 전극 및 계면 공학을 병행하여 접촉 저항과 계면 트랩을 최소화함으로써 소자의 전기적 성능과 안정성을 동시에 향상시켰다.



■ DPP 기반 공액 고분자의 단결정 나노선 형성 및 이를 활용한 전계효과 트랜지스터 소자 구현 예

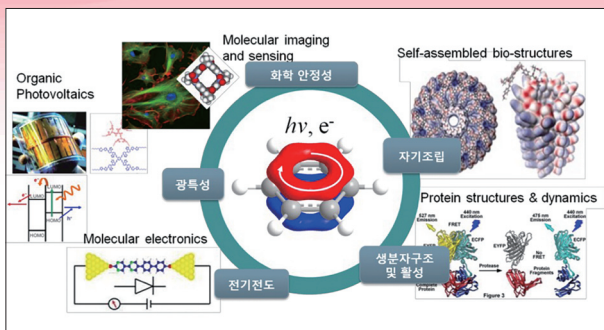
OLED 연구에서 최동훈 교수님은 산학협동 연구를 통해 호스트-발광체 간 전자구조 정합 설계를 지속적으로 고도화해 왔다. 특히 2010년대 중반 인광 및 TADF OLED가 본격적으로 부상한 이후에는 기존 호스트가 지닌 구조적 한계에 주목하였다. 이를 극복하기 위해 방향족 및 헤테로방향족 고리를 기반으로 다양한 호스트 분자를 설계하고, 전하 수송 특성이 서로 다른 유기 저분자 및 고분자 계열의 호스트와 정공수송 물질을 폭넓게 합성하였다.

또한 이들 소재의 전자구조, 전하 이동 특성, 열적·형태학적 안정성을 체계적으로 규명하는 한편 실제 OLED 소자에 적용하여 발광 효율과 구동 안정성 간의 상관관계를 정밀하게 분석하였다. 그 결과 호스트 분자의 구조적 요소가 박막 형성, 여기자 거동, 나아가 소자 성능과 긴밀하게 연결되어 있음을 입체적으로 이해하는 연구 기반을 확립하였다.



■ 방향족-헤테로고리 구조를 포함하는 OLED용 호스트 분자 설계 및 합성 사례

그는 p형·n형 호스트 혼합 기반 이성분계 엑시플렉스가 공정·온도·농도 변화에 민감하여 발광 특성과 수명이 쉽게 변동하고, 박막 상분리와 국소 집합체 형성으로 재현성이 저하될 수 있다는 구조적 한계를 통찰하였다. 이를 극복하기 위해 '한 분자 안의 통합'이라는 개념의 단일분자 엑시플렉스 호스트를 제안하였으며, 2025년 Advanced Functional Materials에 보고한 Two-in-One(TIO) 분자를 통해 용액공정 TADF OLED에서 높은 효율과



■ 이공분야 대학중점연구소지원사업의 연구 목표 및 비전과 2010년도 연구소 개소식 기념사진

우수한 구동 안정성을 동시에 구현하였다. 도너-억셉터의 상대적 배열을 분자 내부에 정밀하게 고정함으로써 엑시플렉스 형성 분포를 제어하고 비방사 소멸을 억제하였으며, 입체 구조 설계를 통해 열적 안정성과 박막의 균질성도 향상시켰다.

최 교수님의 연구가 던지는 핵심 메시지는 ‘분자 상호작용은 양날의 검’이라는 인식이다. 그는 Molecular Interactions in Organic Electronics: Pros and Cons라는 문제의식 아래, 상호작용을 강화하는 설계와 이를 정밀하게 제어하는 설계를 병행해 왔다. 이러한 접근을 통해 고이동도·고효율·장수명이라는 상충하기 쉬운 목표를 동시에 추구할 수 있음을 보여주었다. 이처럼 기초와 응용, 학문과 산업, 실험과 계산을 유기적으로 연결하는 연구를 통해 그의 성과는 한국이 디스플레이 및 유기전자 분야의 선도국으로 자리매김하는 데 중요한 기반이 되었다.

학문적 영향과 산업적 기여, 그리고 교육

최 교수님의 연구는 학문과 산업 양측에서 높은 평가를 받았

으며, 유기반도체·유기 트랜지스터·유기 태양전지·OLED·센서·SI 기반 소재 설계에 이르기까지 유기전자 전 분야에 걸쳐 의미 있는 영향을 남겼다. 2010년부터는 “ π -전자 제어를 통한 신기능성 분자체 연구”를 주제로 교육부 지원 「이공분야 대학중점 연구소지원사업」을 수행하며 연구 인프라 구축과 학문 후속세대 양성에 힘써왔다. 또한 유기반도체 나노구조체 연구 관련 개인 도약과제를 추진하였으며, 2019년에는 3단계 9년에 걸친 연구 성과를 인정받아 후속 과제로 선정되었다. 이후 “ π -전자 기반 에너지·환경 혁신소재 연구”를 2025년까지 지속적으로 운영하며 연구의 심화와 확장을 이끌었다.

2015년 고려대학교에 LG디스플레이 산학협력센터를 설립하여 산업 현장의 기술 수요를 반영한 실무형 산학협력 과제와 중장기 기술 발굴을 위한 탐색 연구 인큐베이션 과제를 다수 기획·주도해 왔다. 이 과정에서 OLED 소자·소재 분야를 중심으로 다양한 전공의 교수진과 연구자들이 참여하는 융합형 협력 체계를 구축하고, 기초 연구 성과가 실제 산업 적용으로 이어질 수 있도록



■ 2015년 개소한 LG디스플레이-고려대학교 산학협력 협약식 및 센터 현판식 기념 사진



■ (좌)2005년 고려대학교 주관 제11회 Asian Chemical Congress 개최 기념 단체 사진 (우)아시아고분자연합회(FAPS) 이사회(2026)

체계적인 연구 흐름을 마련하였다. 특히 기업-대학 간 공동 연구 주제 발굴, 단계별 기술 검증, 후속 과제 확장으로 이어지는 전주 기 협력 모델을 운영함으로써 산학협력의 실질적 성과 창출과 연구 생태계 확장에 기여해 왔다.

국제 학술 리더십과 교육 철학의 실천

최 교수는 대한화학회 부회장(2010), 고분자화학 분과회장(2019), 한국고분자학회 이사 및 Macromolecular Research 편집위원장(2015-2017), 미국화학회(ACS) 고분자화학 분과 회장(2018), 한국지부장(2021), 아시아고분자연합회(FAPS) 이사회 위원(2019~현재) 등 국내외 주요 학술단체의 핵심 보직을 맡아 국제 학술 네트워크 구축과 학문 교류 활성화에 중추적 역할을 수행해 왔다.

특히 2005년 고려대학교 전 캠퍼스를 활용해 개최한 Asian Chemical Congress는 한국 화학 연구의 국제적 위상을 집약적으로 보여준 상징적 행사로 평가되며, 그는 이를 통해 국제 학술 교류의 가치와 확장 가능성을 직접 체감한 뜻깊은 경험으로 회고하고 있다.

국제 학회 현장에서 그는 한국 연구자들의 세션을 적극적으로 기획 지원하며, 특히 젊은 연구자들이 해외 석학들과 직접 토론하고 교류할 수 있는 장을 마련하는 데 힘써왔다. ACS Korea Chap-

ter 의장 재임 기간에는 국제 공동 심포지엄과 젊은 연구자 포럼을 기획·운영하여 국내 대학원생과 신진 연구자들이 세계적 연구자들과 같은 무대에서 연구 성과를 발표하고 논의할 수 있는 기반을 구축하였다.

π -전자 기반 기능성 소재 설계, 고성능 화학소재의 구조-물성 상관관계, 차세대 산업 응용 가능 소재 등을 주제로 한 심층 학술 교류는 공동 연구 기획과 인적 교류의 확대로 이어졌다. 또한 Jilin-Korea-Waseda University Alliance Symposium의 대표로 활동하며 한·중·일 3국 간 지속적인 학술 교류를 이끌었고, Monash University, VAST, KU Leuven, Technion, University of Siegen 등과의 협력을 통해 장기적인 국제 연구 네트워크를 구축하였다. 이러한 노력은 한국 화학·고분자 연구의 국제적 위상 제고와 차세대 연구자들의 글로벌 진출에 실질적으로 기여해 왔다.

그는 무엇보다 '교육자'로서의 역할을 학자의 가장 중요한 사명으로 여겨왔다. 지금까지 90여 명의 석·박사를 배출했으며, 이들 제자들은 국내외 대학과 연구기관, 기업 현장에서 핵심 연구원과 연구책임자, 기업 대표로 성장해 각자의 분야를 이끌고 있다. 정년기념강연에 함께한 제자들의 모습은 연구 성과를 넘어 사람을 길러낸 그의 학문 여정이 맺은 가장 분명한 결실을 상징적으로 보여준다.

“과학의 목적은 결과가 아니라 깨달음”이라는 그의 철학은 실패조차 통찰로 전환하는 교육관을 담고 있다. 그는 그룹 세미나에



■ 제11회 Jilin-Korea-Waseda Alliance Annual Symposium 기념 단체 사진(2022)

서 미완의 데이터까지 공유하며 논리의 타당성과 재현성을 철저히 점검했고, 정답을 맞히는 능력보다 '왜 그런가'를 끝까지 탐구하는 끈기를 강조하며 제자들이 스스로 사고하고 성장하는 연구자로 서도록 이끌어 왔다.

제자들이 기억하는 FPL

최동훈 교수의 연구실은 엄격한 연구 기준과 치열한 토론, 그리고 스스로 답을 찾도록 이끄는 지도 방식으로 많은 제자들에게 깊은

인상을 남겼다. 제자들은 연구실에서의 시간을 단순한 학위 과정이 아니라 연구자로서의 태도와 삶의 자세를 배우는 중요한 성장의 시기로 기억하고 있다.

강석훈 수석연구원은 "연구실의 불이 꺼지지 않던 밤들과 열정적인 연구의 시간은 지금도 깊은 기억으로 남아 있습니다. 사회에 나와 어려움을 겪을 때마다 연구실에서 배웠던 도전 정신을 떠올리며 다시 힘을 얻곤 합니다."라고 회상한다. 김윤선 책임연구원은 "밤늦게까지 이어지던 토론 속에서 교수님의 탐구정신과 연구



■ 총회 및 학술발표회 제자들과 함께한 기념 사진

에 대한 열정을 가까이에서 배울 수 있었고, 그 경험은 지금도 연구를 이어가는 데 큰 힘이 되고 있습니다.”라고 말한다. 엄현아 수석연구원은 연구실 생활을 통해 “성과의 보람과 인고의 시간을 함께 경험하며 연구자로서뿐 아니라 한 사람으로서도 성장할 수 있었다”고 회고한다. 김형중 책임연구원은 “연구 주제를 스스로 고민하고 끝까지 완성하도록 이끌어 주신 지도 방식 속에서 연구자로서의 책임감과 협업의 의미를 배울 수 있었다”고 말한다. 박수홍 책임연구원 역시 “실험과 토론을 통해 문제를 해결해 나가는 과정에서 끈기와 책임감, 다양한 학문적 시각을 배울 수 있었다”고 이야기한다. 권나연 책임연구원은 “첫 논문을 완성하던 순간이 연구자로서 하나의 큰 여정을 마무리한 뜻깊은 기억이었다”고 말한다. 김채영 선임연구원은 “스스로 실험을 계획하고 수행했던 경험이 회사 생활에서도 큰 도움이 되었다”고 회고한다. 정성훈 선임연구원은 “실패를 거듭하더라도 목표를 향해 꾸준히 나아가는 연구자의 태도를 배웠다”고 말한다. 강민지 선임연구원은 “스스로 생각하고 답을 찾도록 이끌어 주신 가르침이 사회에서도 문제를 해결하는 힘이 되고 있다”고 이야기한다.

이처럼 많은 제자들은 연구실에서의 경험을 통해 연구자의 책임

감과 스스로 사고하는 태도를 배울 수 있었다고 공통적으로 말한다.

맺음말

최동훈 교수는 기초과학에 대한 깊이 있는 탐구와 산업적 실용화를 동시에 이루어낸 과학자로, 연구 성과와 인품을 함께 쌓아온 인물로 평가받는다. 그가 이끌어 온 연구 공동체는 OLED와 친환경 경 기능성 소재 설계 등 첨단 연구의 거점이자, 스스로 사고하고 책임지는 연구자를 길러내는 교육의 장으로 자리매김해 왔다. 정년퇴임 기념강연에서 제자들과 함께한 모습은 이러한 연구와 교육의 여정을 상징적으로 보여준다.

그는 지금도 연구실에서 새로운 분자를 구상하고 학생들과 토론하며, 과학적으로 의미 있는 질문을 끊임없이 탐구하고 있다. ‘대한민국을 빛낸 화학자’라는 표현이 과장이 아닌 차분한 사실에 가깝게 느껴지는 이유가 바로 여기에 있다.

글 삼성디스플레이 연구원

강석훈, 김윤선, 엄현아, 김형중, 박수홍

권나연, 김채영, 정성훈, 강민지



■ 제자들과 함께한 정년퇴임 기념강연 단체 사진



화학자의 숙면법

이석현 지음 |
태학사 2021. 5. 10. 출간 |
ISBN 9791190727693



목차

들어가기

- 1부 몸은 마음으로, 마음은 몸으로
 - 1장 평온한 일상을 위한 몸과 마음 발가꾸기
 - 2장 강박과 두려움으로부터 자유로워지기
 - 3장 삶의 의욕과 참된 기쁨 찾아가기

2부 건강의 터 가꾸기

- 1장 건강의 터: 뇌 신경가소성의 지역, 화학적 연결
- 2장 건강의 관문: 신경전달물질로 풀어보는 스트레스

3부 면로역정(眠路歷程)

- 1장 나의 수면 패턴과 불면 경험
- 2장 소설 『손자병법』을 다시 읽으며 세운 숙면 전략
- 3장 수면위생과 숙면

책 소개

몸과 마음이 함께 싸워 온 ‘숙면 분투기’를 담은 『화학자의 숙면법』은 불면을 단순한 심리 문제가 아닌 몸과 마음, 그리고 환경이 얽힌 복합적인 현상으로 바라본다. 저자는 뇌 가소성과 신경전달물질 등 화학적 원리를 바탕으로, 심신의 균형을 회복하는 과정을 자신의 체험과 함께 풀어낸다. 이 책은 ‘움직이고, 헤아리고, 쉬라’는 실천을 통해 불면을 극복할 수 있음을 강조하며, 스트레스와 감정의 흐름을 전환하는 것이 근본적 해결의 출발점임을 제시한다. 또한 수면리듬, 식습관, 체온 조절, 마음 비우기 등 구체적인 숙면 전략을 통해 일상에서 적용 가능한 해법을 제안한다. 몸과 마음, 그리고 환경의 조화를 통해 자연스럽게 잠을 회복하는 길을 안내하는 이 책은, 불면으로 고민하는 이들에게 실질적인 통찰과 위로를 전한다.

저자 소개

이석현: 서울대학교 화학과를 졸업하고, 한국과학원 ‘화학 및 화학공학과’를 졸업했다. 프랑스로 유학하여 스트라스부르 [대학 ‘고분자 전문화 에콜(EAHP)’에서 플라스틱 엔지니어 학위(Diplôme d’Ingénieur)]를, 이어서 루이파스퇴르 대학에서 고분자 과학 분야 이학국가박사학위(Diplôme de Docteur d’État)를 받았다. 미국 코네티컷 대학교에서 연구했으며, 아주대학교 응용화학생명공학과 교수를 지내고 현재 아주대 명예교수로 있다. 고분자 구조와 형태, 블록공중합체, 액정중합체, 전도성 고분자 분야에 관한 다수의 학술논문 및 특허가 있다. 저서로 『고분자의 구조와 형태학』(민음사, 1992), 『젊은 고분자 예술이다』(태학사, 2021)이 있다.

KCS GALLERY



도르소두로, 베네치아-이탈리아(65.1 X 50cm, Oil on canvas, 2026)

이종묵 회원(이화여자대학교 화학나노과학과 명예교수) 作

화학만평

그림. 한진욱

♪ ♪
We're going up ↑
up ↑
up ↑
up ↑
5.968
5.146
4.577
인용
논문수

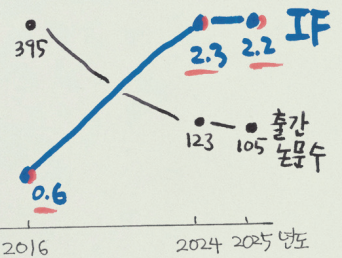
화학만평

"BKCS 최다피인용"
덕성여대 신정철 교수님
축하드립니다.



$$IF(2024) = \frac{\text{인용논문수}(2024)(\text{아래논문중})}{\text{출간논문수}(2022, 2023)}$$

51.3
38.6
43.0
채택률 (%)



123
105
출간
논문수

uHam

부고

2026.4.3	이충균(충남대학교 화학과) 회원	빙부상
2026.3.24	이용섭(경희대학교 약학과) 회원	부친상
2026.3.22	배세원(공주대학교 화학과) 회원	모친상
2026.3.19	임용범(연세대학교 신소재공학과) 회원	빙부상

지부·분과회

인천지부

- 행사명: 2026년도 춘계 학술대회
- 개최기간: 2026년 5월 19일(화)
- 개최장소: 인천대학교
- 주최: 대한화학회 인천지부
- 담당자: 조창범 교수
(인하대학교, jochangbum@inha.ac.kr)
- 참석인원: 40명
- 발표편수: 신진 연구 책임자 2건
- 내용: 신입 교원들의 연구 소개 발표 및 최신 화학관련 연구 동향 교류

광주/전남지부, 전북지부

- 행사명: 제 27회 대한화학회 광주전남전북 연합 학술대회
- 개최기간: 2026년 5월 28일(목)~29일(금)
- 개최장소: 국립군산대학교
- 주최: 대한화학회 전북지부
- 후원: RISE 인력양성사업단, 이차전지부트캠프 인력양성사업단, 전북 지역에너지 클러스터 인재양성사업단
- 담당자: 이효준 교수
(국립군산대학교, lee.hyojun@kunsan.ac.kr)
- 참석인원: 150~200명 예상
- 발표편수: 7인 구두발표, 포스터발표 100건 수준
- 내용: 광주, 전남, 전북 지역의 화학인들이 모여 진행 중인 연구 결과를 공유, 최신 연구 동향을 파악, 학문적 교류를 할 수 있는 화학 학회

경기지부

- 행사명: 2026 경기지부 춘계 심포지엄
- 개최기간: 2026년 5월 28일(목), 오후 3시
- 개최장소: 명지대학교 자연캠퍼스 명진홀
- 주최: 대한화학회 경기지부 / 주관: 명지대학교 화학과
- 담당자: 김수연 교수(명지대학교, skim@mju.ac.kr)

김도희 교수(경기대학교, dohee@kyonggi.ac.kr)

- 참석인원: 70명
- 발표편수: 교수 구두발표 4편
- 내용: 발표 연사 (김민 교수(경희대학교), 진은지 교수(아주대학교), 김도윤 교수(한국외국어대학교), 안태양 교수(가천대학교))

신입회원

강정훈	한림대학교	학부생회원
김경호	한림대학교	정회원
김선돌	단국대학교	정회원
김현진	제주대학교	학부생회원
남은진	한림대학교	학부생회원
박기원	길원여자고등학교	교육회원
박서이	이화여자대학교	학부생회원
박형빈	경희대학교	학생회원
백수연	제주대학교	학부생회원
양진성	연세대학교	학부생회원
유경민	한양대학교	학생회원
유하늘	이화여자대학교	학부생회원
이은서	이화여자대학교	학생회원
임재인	건국대학교	학부생회원
정현지	이화여자대학교	학부생회원
한봉환	연세대학교	정회원
허환승	전북대학교	학생회원
Nguyen Thi Hoa	KAIST	정회원
Patil rahul daga	숙명여자대학교	정회원
Qinshuheng	이화여자대학교	정회원
Otoufat Tohid	서울과학기술대학교	학생회원
Rajaka Lingayya	고려대학교	교육회원
Samarathunge Janathi Chamodi Warushika	경상국립대학교	학생회원
Shabpiray Mohammad	한국화학연구원	학생회원
Shetty Sandesh Vishwanath	한국화학연구원	학생회원
Singh Ovender	부산국립대학교	정회원
Syed Azeem Abbas	한국화학연구원	정회원
Tejasvinee Shrikrishna Bhat	Shivaji University	정회원
Thonse saniya	한국화학연구원	학생회원
Yang Yongkang	서울대학교	정회원
YuanYuan Zhao	이화여자대학교	정회원

2026년 대한화학회 화학교육분과회 세미나 및 총회 후기

2026년 2월 9일, 대한화학회 화학교육분과회 학술발표회 및 총회가 서울대학교에서 개최되었다. 이른 봄 추위가 채 가시지 않은 날씨였지만, 화학교육에 대한 뜨거운 열정으로 전국 각지에서 분과 회원들이 함께 자리하였다. 서울, 경기 지역은 물론 지방에서도 많은 분들이 참석하여 화학교육의 현재와 미래를 함께 논의하는 의미 있는 시간이 되었다.

오후 2시, 등록과 함께 시작된 이번 세미나는 두 편의 주제 발표로 구성되었다. 첫 번째 발표는 서울대학교 김혜린 박사의 ‘맥락화된 과학의 본성(NOS) 수업에서 나타난 예비화학교사의 NOS-PCK에 대한 이해 및 실행 분석’이었다. 김 박사는 예비 화학교사들이 과학의 본성을 어떻게 이해하고 교수 내용 지식(PCK)으로 전환하여 실행하는지를 체계적으로 분석하였다. 특히 맥락화된 수업 설계가 예비교사의 NOS 이해를 심화시키는 데 효과적이라는 점을 강조하며, 교사교육 단계에서부터 과학의 본성에 대한 체계적 교육이 필요함을 역설하였다.

이어진 두 번째 발표에서는 서울교육대학교 이정운 박사가 ‘초등 과학 탐구 수업에서 교사의 컨티전트 스케폴딩 실행 구조와 조절 양상 탐색’을 주제로 발표하였다. 이 박사는 초등 과학 탐구 수업에서 교사가 학생의 학습 상황에 즉각적으로 반응하며 제공하는 비계(scaffolding)의 유형과 조절 과정을 심층적으로 분석하였다. 이를 통해 교사의 즉각적 판단과 지원이 학생의 탐구 능력 신장에 중요한 역할을 한다는 점을 실증적으로 보여주었다. 두 발표 모두 화학교육의 질적 향상을 위한 교사 전문성 신장이라는 핵심 주제를 다루며, 참석자들로부터 큰 호응을 얻었다.

발표 사이의 짧은 휴식 시간에는 참석자들이 발표 내용에 대해 자유롭게 의견을 나누고 질문을 주고받으며 학술적 교류를 이어갔다. 이후 진행된 ‘여상인 교수님과 대화’ 시간은 이번 행사의 특별한 순서였다. 오랜 기간 화학교육 연구와 현장 교육에 헌신해 오신 여상인 교수님과 함께 화학교육의 과거를 회고하고 현재의 과제를 짚어 보며 미래의 방향을 모색하는 귀한 시간이었다. 여 교수님께서 화학교육 연구자이자 교육자로서의 경험을 진솔하게 나누시며, 특히 현장과 연구의 유기적 연결, 교사 공동체의 중요성, 그리고 학생 중심 화학교육의 필요성을 강조하셨다. 참석자들은 선배 연구자의 통찰과 경험을 통해 화학교육자로서의 소명과 책임을 다시 한번 되새기는 계기가 되었다.

잠시 휴식을 가진 후 오후 4시 10분부터는 화학교육분과회 총회가 진행되었다. 총회에는 대한화학회 회장님께서 함께 자리해주셔서 더욱 뜻깊은 자리를 만들 수 있었다. 2025년 분과 활동 결과 보고와 함께 2026년 주요 사업 계획이 공유되었으며, 4월 춘계학술대회와 10월 추계학술대회 일정이 안내되었다. 또한 대한화학회 내 화학교육 관련 업무의 성격을 명확히 하여 조직 간 역할 중복을 방지하고 효율성을 높이고자 교육부회장단, 화학교육 위원회, 분과회 조직 및 업무 조정에 대해서도 논의하였다.

한편, 총회에서는 JKCS의 SCI 등재 추진에 관한 안건도 논의되었다. 이는 대한화학회 본회 차원에서 추진 중인



사안으로, 화학교육분과의 연구 환경과 저널 투고 기회에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 중요한 사안이었다. 찬성과 반대 의견이 모두 제시되었으며, 특히 화학교육의 학문적 특성, 현장과의 소통 필요성, 저널 내 분야 배제 가능성 등 다양한 쟁점이 심도 있게 논의되었다. 총회에서는 이 사안의 중요성을 인식하고 전체 회원을 대상으로 의견을 수렴한 후 분과의 공식 입장을 정리하기로 결정하였다.

알차고 의미 있었던 학술발표회와 총회는 저녁 시간으로 이어지는 회원 간 교류의 시간으로 마무리되었다. 세미나장을 벗어나 보다 편안한 분위기에서 나는 진솔한 대화는 학술적 논의 못지않게 소중한 시간이었다. 선후배 연구자, 현장 교사, 대학원생들이 한데 어우러져 화학교육에 대한 고민과 열정을 나누며 서로를 격려하고 응원하는 모습에서 화학교육 공동체의 따뜻한 연대를 확인할 수 있었다.

최근 학교 현장에서는 화학 선택 학생 수의 급격한 감소, 화학 교사 임용 축소 등 화학교육의 위기를 우려하는 목소리가 높다. 이러한 상황에서 화학교육분과의 역할은 더욱 중요해지고 있다. 연구자, 교사, 학생이 함께 소통하고 협력하며 화학교육의 가치를 되살리고 미래를 준비하는 것이야말로 화학교육분과가 나아가야 할 방향일 것이다. 화학교육분과가 한국 화학교육의 중심이자 든든한 버팀목이 되기를 기대해 본다.

2026년 대한화학회 화학교육분과 총무간사 김민환, 회장 권혁순

지면광고 안내

화학세계

- 광고 마감일 : 전월 10일까지(매월 1일 발간)
- 원고 마감일 : 전월 5일까지
- 광고 크기
가로 210mm, 세로 270mm(바탕색이 있을 경우 상하좌우 여백 3mm씩 추가[216mm*276mm], 해상도 300dpi 이상)
- 광고 파일 보내실 곳 : 웹하드 <http://www.webhard.co.kr>

구분		단가	비고
화학세계	표지	10,000,000 원	컬러
지면광고	내지	1,000,000~5,000,000 원	컬러
웹사이트	배너	100,000 원	컬러

※내지 및 배너 6개월 이상 광고 예약 시 별도 협의 요청 바랍니다.
 ※화학세계에 광고 게재 시 1개월 동안 대한화학회 홈페이지에서 업체명과 URL을 홍보해드립니다.

광고의뢰 및 문의 : 대한화학회 사무국(office@kchem.org)
 서울 성북구 안암로 119 한국화학회관 4층 (02856) / 전화 : 02-953-2095 / 팩스 : 02-953-2093

회비 안내

2026년도 본회 회비는 다음과 같습니다.

(단위: 원)

구분	중신회원	정회원	교육회원	학생회원	학부생회원
회원기간	2026.1.1~2026.12.31				
연회비	1,400,000 (가입 당시 정회원 연회비의 20년차)	70,000	50,000	50,000	10,000
분과회비	공업, 환경 : 10,000원				
	고분자, 화학교육, 물리 : 20,000원				
	무기, 분석, 생명, 유기, 의약, 재료, 전기 : 30,000원				

- 회비납부 관련문의
 - 전화 : 02-953-2095, 팩스 : 02-953-2093, 전자우편 : member@kchem.org
 - ※ 회비납부 기간 : 1월 2일~11월 30일
 - ※ 지로용지는 별도로 발송하지 않습니다.
 - 납부방법 : 홈페이지에서 회원확인 / 회비납부 / 영수증 출력 등을 할 수 있습니다.

회원확인 → ID 변경 → 회원로그인 → 결제 및 영수증 출력

부고공지안내

대한화학회 회원 대상 '부고 공지' 방법을 안내드립니다.

아래 내용을 참조하셔서,

공지에 필요한 내용(3번, 공지내용)을 대한화학회에 이메일로 발송해주시시오.

회원 여러분들께 이메일로 공지해 드립니다.

단, 회원 별세, 부(모)친상, 조부(모)상, 시부(모)상, 빙부(모)상, 배우자상, 형제/자매상, 자녀상에 한합니다.

1. 신청 자격

대상자가 대한화학회 회원일 경우

2. 신청 방법

이메일(office@kchem.org)로 신청
※ 휴일에도 이메일로 신청하십시오.

3. 공지 내용

- ① 빈소 ② 발인일 ③ 장지
- ④ 연락처(성명과 연락처 필수)

클린 인터넷을

선언합니다



화학회 회원들의 소통에 꼭 필요한 수단인 인터넷에서 심각한 문제가 나타나고 있습니다. 화학회는 '정보통신망 이용촉진 및 정보보호 등에 관한 법률' 제70조(벌칙) 및 '형법' 제309조(출판물에 의한 명예훼손)를 준수하여 건강하고 깨끗한 인터넷 문화를 만들어 나가고자 합니다.

- 회원의 개인 정보 보호를 위해 적극적으로 노력합니다.
- 불법 정보나 영리성 광고의 유통을 막기 위해 노력합니다.
- 회원의 사생활을 침해하거나 명예를 훼손하는 정보의 유통을 엄격하게 금지합니다.

※ 관련법에 어긋나는 사례를 발견하시면 화학회의 office@kchem.org로 연락주시길 바랍니다.

'정보통신망 이용촉진 및 정보보호 등에 관한 법률' 제70조(벌칙)

- ① 사람을 비방할 목적으로 정보통신망을 통하여 공공연하게 사실을 드러내어 다른 사람의 명예를 훼손한 자는 3년 이하의 징역 또는 3천만원 이하의 벌금에 처한다.
- ② 사람을 비방할 목적으로 정보통신망을 통하여 공공연하게 거짓의 사실을 드러내어 다른 사람의 명예를 훼손한 자는 7년 이하의 징역, 10년 이하의 자격정지 또는 5천만원 이하의 벌금에 처한다.
- ③ 제1항과 제2항의 죄는 피해자가 구체적으로 밝힌 의사에 반하여 공소를 제기할 수 없다.

형법 제309조(출판물에 의한 명예훼손)

- ① 사람을 비방할 목적으로 신문, 잡지 또는 라디오 기타 출판물에 의하여 제307조 제1항의 죄를 범한 자는 3년 이하의 징역이나 금고 또는 700만원 이하의 벌금에 처한다.
- ② 제1항의 방법으로 제307조 제2항의 죄를 범한 자는 7년 이하의 징역, 10년 이하의 자격정지 또는 1천500만원 이하의 벌금에 처한다.



강력한 산화제, 질산 (HNO₃)!

유기물 접촉 시 화재, 금속 부식 시 유독 가스 발생.



대상: 도금, 반도체 공정 및 화학 연구실



목적: 유기물 반응 및 금속 부식에 의한 화재·폭발 예방

절대 방심하지 말아야 할 3가지 (DON'T)



1. 유기물 근처에 방치하지 마라!
(종이, 나무, 알코올 등과 접촉 시 자가 발화 화재 발생)



2. 금속 용기에 보관하지 마라!
(금속(철, 알루미늄 등)을 부식시켜 유독 가스 발생)



3. 밀폐된 곳에서 취급하지 마라!
(부식 및 산화 반응으로 인해 유독 가스(NO₂) 발생)

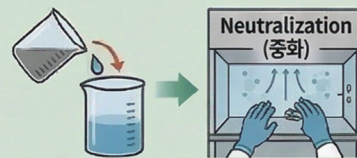
반드시 지켜야 할 3가지 (DO)



1. 전용 보관함에 분리 보관!
(내산성 보관함에 보관하고, 유기물 및 환원제와 격리)



2. 폼 후드에서 취급!
(유독 가스를 효과적으로 배출하는 환기 시설 내에서 작업)



3. 중화 후 폐기!
(염기성 용액(소다회 등)으로 천천히 중화시켜 폐기, 흡 후드 필수)

⚠️ 사고 발생 시 대처 방법 (Emergency Response)

화재 시



화재 시: 다량의 물로 신속하게 냉각 및 소화.
(D급 소화기 불필요, 소량 유출 시 모래 or 흡착제 사용 후 폐기)

피부 접촉 시



피부 접촉 시:
오염된 피부 즉시 제거 후,
15분 이상 다량의 흐르는 물로 세척, 화상 치료.



질산은 유기물과 상극입니다. 철저한 격리와 환기가 안전의 시작입니다.



매 순간
자신있게



케어센스® 에어 연속혈당측정시스템

케어센스 에어는 한 번의 혈당측정 센서 착용으로, 15일 간 실시간 혈당 모니터링이 가능합니다.
앱과 함께 사용하여 체계적으로 혈당을 관리하고 의료진 및 보호자와 데이터를 공유할 수 있습니다.

지속적인 기술 혁신을 지향하는 **동우화인켐**은

대한민국 IT산업의 중심에 서 있습니다!

START

TOP PARTNER

CHALLENGE

5G

디스플레이 전자 재료 및 화학 분야의
GLOBAL COMPANY

동우화인켐은 LCD, OLED 등의 필수 소재인 편광필름과 컬러필터, 터치센서, 고순도 첨단 프로세스 케미컬 등의 원천기술을 확보하고 있으며, 이를 통해 보다 나은 미래를 열어가고 있습니다.

동우화인켐은 글로벌 화학회사인 스미토모화학의 자회사이며, 핵심기술을 보유한 매출 2조원의 대기업으로서, 정보전자소재의 글로벌 리더로 성장하고 있습니다.

지속적인 연구개발과 체계적인 설비투자를 통해 차별화된 품질과 서비스를 제공하고, 회사 창립시부터 지켜온 이념인 윤리경영과 사회공헌을 바탕으로 업계 최고의 파트너, 동우화인켐으로 인정받겠습니다.