

화학세계

CHEMWORLD



05
2023

<이달의 하이라이트> 세포의 세포 소기관 및 특정 세부공간에 존재하는 단백질을 근접분자 표지기술을 이용해 고해상도로 밝혀낼 수 있다.

읽기쉬운 총설

인공 지능은 소재 연구를 할 수 있을까?

이달의 하이라이트

효소화학 반응을 이용한 공간생물학(Spatial Biology) 연구

화학교육

초임 중등 과학교사를 위한 협력적 멘토링 프로그램

우수선도연구기관

KAIST 나노텍토닉스 연구단

중앙대학교 세포화학동력학 창의연구단

INTERVIEW

화학세계가 만난 화학자 | 이창규 명예교수

“앞서가는 화학회, 공식후원사와 함께 합니다”



지속적인 기술 혁신을 지향하는 **동우화인켐**은

대한민국 IT산업의 중심에 서 있습니다!

START

TOP PARTNER

CHALLENGE

 DONGWOO
FINE-CHEM

 SUMITOMO CHEMICAL

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.

케어센스®
혈당관리 솔루션



2023 대한민국 퍼스트브랜드 대상
혈당측정기 부문 12년 연속 수상



2022 올해의 브랜드 대상
혈당측정기 부문 10년 연속 수상



제43회 국가품질경영대회
국가품질혁신상 대통령표창



대한민국 No.1 혈당관리 파트너

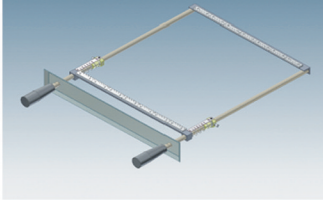
국내 시장점유율 1위
케어센스®



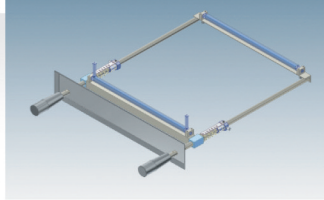
국내 LAB 시험기 선두 기업!!

- ✓ 열처리 가공으로 인한 시료의 조직 변화, 물성 변화를 미리 측정.
- ✓ Coating 용으로 병행 사용 가능. (코팅 장치 - Option)
- ✓ 사용 온도 : 25~250°C.

상하 핀 타입



종이 호일 타입



자동 배출형 건조기
[코팅 경화기]

Mini Dryer (DL-2015)

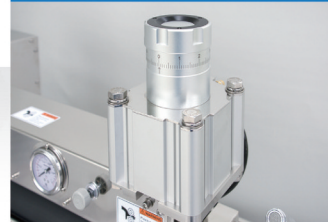
그라비아 코팅기

Gravure Coater (DL-2500GV)

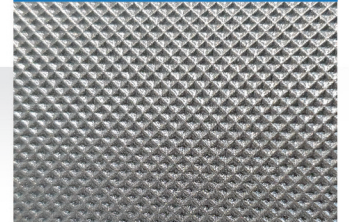


- ✓ 좌, 우측 각각 Air Cylinder의 압력 조절 가능.
- ✓ 편면 코팅가공 (Gravure Coating) 가능.
- ✓ 10사수에서 200사수 까지 가능.
- ✓ 상부와 하부 롤러간의 간격 조절, 두꺼운 시험편 (원단, 부직포 등) 사용이 가능.

롤러 간격 조절 장치



그라비아 패턴 (기본사양)



QR코드로 대림스타릿(주) 홈페이지에 접속하여 다양한 제품을 알아보세요!

Brown 일반화학 제15판

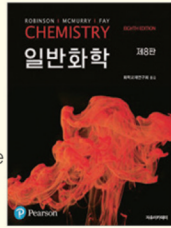


역 자: 화학교재연구회
출판년도: 2023년 쪽수: 1316쪽
ISBN: 9791158084196

원서 정보

Chemistry: The Central Science 15/e
출판년도: 2022년 쪽수: 1320쪽
ISBN: 9781292407616

McMurry 일반화학 제8판



역 자: 화학교재연구회
출판년도: 2020년 쪽수: 1200쪽
ISBN: 9791158082444

관련 서적

핵심일반화학 제8판
출판년도: 2020년 쪽수: 720쪽
ISBN: 9791158082499

Foundations of College Chemistry 16/e

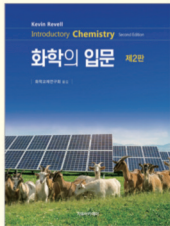


저 자: Hein 외
출판년도: 2023년 쪽수: 624쪽
ISBN: 9781119889243

관련 서적

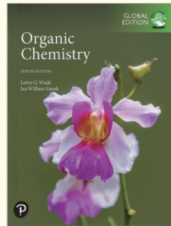
Hein 대학화학의 기초 제15판
출판년도: 2017년 쪽수: 568쪽
ISBN: 9791119881201

Revell 화학의 입문 제2판



역 자: 화학교재연구회
출판년도: 2022년
쪽 수: 556쪽
ISBN: 9791158083410

Organic Chemistry 10/e



저 자: Wade 외
출판년도: 2022년 쪽수: 1419쪽
ISBN: 9781292424255

관련 서적

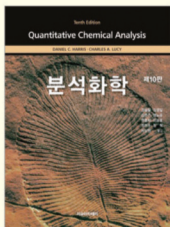
Wade 유기화학 제8판
출판년도: 2015년 쪽수: 1416쪽
ISBN: 9791158080020

합성 유기화학



저 자: 하현준
출판년도: 2023년
쪽 수: 262쪽
ISBN: 9791158084318

Harris 분석화학 제10판



역 자: 이승호 외
출판년도: 2021년 쪽수: 1092쪽
ISBN: 9791158082932

원서 정보

Quantitative Chemical Analysis 10/e
출판년도: 2020년 쪽수: 833쪽
ISBN: 9781319324506

Rouessac 현대기기분석 제9판

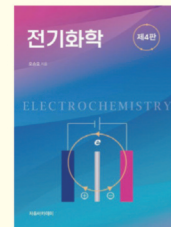


역 자: 이승호 외
출판년도: 2023년 쪽수: 572쪽
ISBN: 9791158084172

원서 정보

Chemical Analysis 3/e
출판년도: 2022년 쪽수: 624쪽
ISBN: 9781119701330

전기화학 제4판

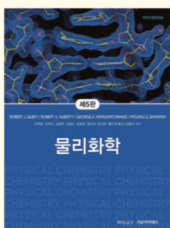


저 자: 오승모
출판년도: 2023년 쪽수: 380쪽
ISBN: 9791158084219

관련 서적

Electrochemistry 3/e
출판년도: 2020년 쪽수: 342쪽
ISBN: 9791158082765

Silbey 물리화학 제5판



역 자: 강영중 외
감 수: 정병서
출판년도: 2023년 쪽수: 960쪽
ISBN: 9791158084165

원서 정보

Physical Chemistry 5/e
출판년도: 2021년 쪽수: 928쪽
ISBN: 9780470566602

재료화학



저 자: 정찬문
출판년도: 2023년
쪽 수: 244쪽
ISBN: 9791158084493

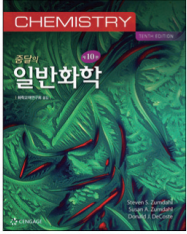
화장품 화학 개론

저 자: 김 건
쪽 수: 216쪽
출판년도: 2022년
ISBN: 9791158083281

Selinger 장바구니에 담긴 화학 제6판

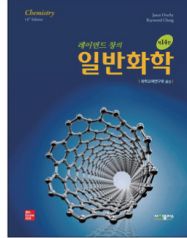
역 자: 류 설
쪽 수: 644쪽
출판년도: 2022년
ISBN: 9791158083656

중달의
일반화학 10판



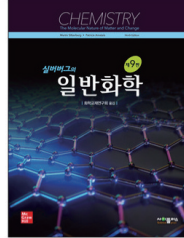
저 자: Zumdahl
판 수: 10
발 행: 2019
페 이 지: 1168
I S B N: 9788962184358

신간 레이먼드 창의
일반화학 14판



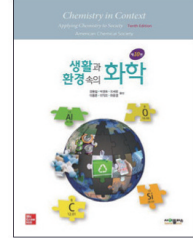
저 자: Overby, Chang
판 수: 14
발 행: 2023
페 이 지: 1080
I S B N: 9791188731343

신간 실버버그의
일반화학 9판



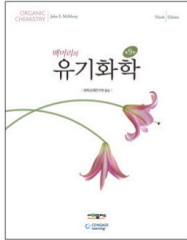
저 자: Silberberg
판 수: 9
발 행: 2023
페 이 지: 1034
I S B N: 9791188731367

생활과 환경 속의
화학 10판



저 자: ACS
판 수: 10
발 행: 2021
페 이 지: 454
I S B N: 9791188731237

맥머리
유기화학 9판



저 자: McMurry
판 수: 9
발 행: 2017
페 이 지: 1224
I S B N: 9788962184297

양자화학 입문 2판



역 자: 이종백 외
판 수: 2
발 행: 2022
페 이 지: 408
I S B N: 9791188731282

기초 표면화학



역 자: 소호원
판 수: 1
발 행: 2022
페 이 지: 300
I S B N: 9791188731275

Hart의
유기화학 13판(수정판)



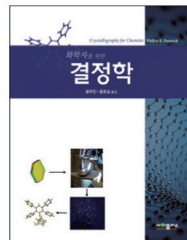
역 자: 김성식 외
판 수: 6(수정판)
발 행: 2022
페 이 지: 600
I S B N: 9788962185454

신간 나노소재화학



저 자: 김병윤 외
판 수: 1
발 행 일: 2023
I S B N: 9791188731404

신간 화학자를 위한
결정학



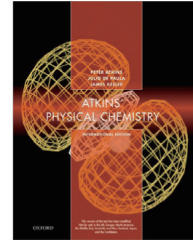
역 자: 윤우진, 윤호섭
판 수: 1
발 행 일: 2022
페 이 지: 236
I S B N: 9791188731329

신간 Biochemistry



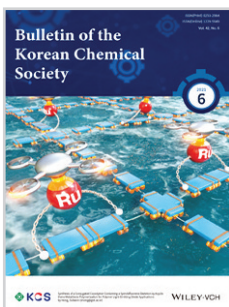
저 자: Tansey
판 수: 1
발 행 일: 2022
페 이 지: 1008
I S B N: 9781119820802

Atkins' Physical Chemistry 11/e



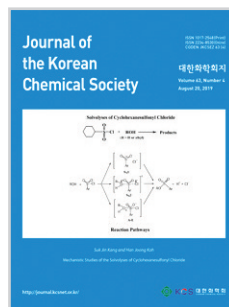
저 자: Atkins
판 수: 11
발 행 일: 2018
페 이 지: 1050
I S B N: 9780198814740

대한화학회 발간(참여) 학술지



Bulletin of the Korean Chemical Society

- 월간
- SCI 저널
- 언어: 영어



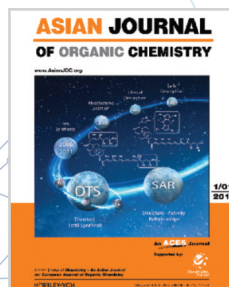
Journal of the Korean Chemical Society

- 격월 간행
- 언어: 한글, 영어



Chemistry - An Asian Journal

- 월간
- ACES와 Wiley-VCH 공동발행



Asian Journal of Organic Chemistry

- Wiley-VCH에서 발행하는 Chemistry, An Asian Journal 자매지



ChemNanoMat

- Wiley-VCH에서 발행하는 Chemistry, An Asian Journal 자매지



Physical Chemistry Chemical Physics

- 대한화학회를 포함한 18개국 화학회에서 공동 발행하는 RSC 저널

2023년 봄, 제131회 대한화학회 학술발표회, 총회 및 기기전시회를 마치고...



신석민

제53대 대한화학회 회장
서울대학교 화학부 교수

지난 4월 26일부터 28일까지 수원컨벤션센터에서 열린 제131 대한화학회 학술발표회, 총회 및 기기전시회에 참여해 주신 회원 여러분께 깊이 감사드립니다. 수원컨벤션센터를 전체 대관하여 개최된 이번 학술발표회에는 총 2,593분의 회원들께서 참석해 주셨습니다. 조민행 회원의 대한화학회 학술상 수상 기념 강연과 미국 화학회 저명 학술지 편집장인 Terry Odom 교수와 Xiaodong Chen 교수의 기조 강연을 비롯한 271개의 훌륭한 학술강연, 그리고 934개의 포스터 발표가 회원 여러분의 뜨거운 관심과 참여 덕분에 모두 성공적으로 이루어졌습니다. 특별히 여섯 분의 미국화학회 학술지 편집장들을 초청하여 미국화학회 편집장(ACS Publication Summit) 학술강연과 오찬 간담회를 통해 대한화학회 회원들과 교류하는 장도 마련하였습니다. 또한, 넓은 전시회장에서 개최된 기기전시회는 47개 업체에서 59개 부스를 운영하여 다양한 장비와 새로운 기술력을 회원들에게 선보여 성황리에 진행되었습니다.

제131회 춘계 대한화학회에는 미래 화학의 주역들을 위한 프로그램들도 내실있게 진행되었습니다. 학회 첫날 김동호 회원의 영문논문 작성법의 튜토리얼 강연과 심은지 회원의 양자화학 전자구조 계산에 대한 튜토리얼 강연은 학생회원들이 발 디딜 틈 없이 강연장을 가득 메운 가운데 성공적으로 개최되었습니다. 회원 여러분의 성원과 후원사들의 든든한 재정 지원 덕분에 이번 학술발표회에는 예년에 유료이던 튜토리얼 강연이 무료로 제공될 수 있었습니다. 또한, 학회 마지막 날 경기과학고등학교 학생들을 주 대상으로 마련한 석차욱 회원과 박한오 바이오니아 대표이사의 중·고등학생 특강도 청중들의 뜨거운 반응과 함께 잘 마무리 되었습니다. 이번 중·고등학생 특강이 앞으로 대한화학회가 미래 세대들에게 화학의 유용함과 중요성을 널리 알리는 역할을 더욱 활발하게 그리고 효과적으로 펼쳐나가기 위한 새로운 방향을 제시하는 좋은 계기가 되었기를 기대합니다.

대한화학회 총회와 평의원회, 지부장 및 분과회장 간담회에는 많은 내빈께서 참석해 자리를 빛내 주셨습니다. 29대 대한화학회 회장을 역임하신 채영복 장관님을 비롯해 정봉영 회장님, 심상철 회장님, 윤민중 회장님, 김홍석 회장님, 최종길 회장님, 하현준 회장님, 정옥상 회장님 등 전임 회장님들과 이필호 차기회장님과 평의원님들 그리고 많은 지부장님과 분과회장님들이 참석하셔서 대한화학회의 발전을 위한 고견들을 개진해 주셨습니다. 참석해 주신 내빈 여러분께 진심으로 감사드리고 개진해 주신 귀한 의견들은 대한화학회 운영에 적극 반영하여 대한화학회 실질적 발전에 기여할 수 있도록 운영위원들과 함께 노력하겠습니다.

제131회 춘계 대한화학회 총회와 학술발표회가 큰 사고 없이 성공적으로 치러질 수 있도록 참여해 주시고 뜨겁게 성원해 주신 모든 회원 분들께 이 자리를 빌려 깊이 감사드립니다. 대한화학회 공식 후원사인 (주)동우화인켄 라인호 대표이사과 올해부터 새롭게 대한화학회를 공식 후원하시는 (주)바이오니아 박한오 대표이사께도 감사를 표합니다. 그리고 이번 학술발표회를 준비하고 학술발표회 기간 내내 최선을 다해 수고해 준 운영위원들과 사무국 직원분들께 고마움을 전합니다. 앞으로도 대한화학회가 회원 여러분의 국내외 학술 활동을 적극적으로 지원하여 세계 화학계의 새로운 소통의 중심으로 성장할 수 있도록 최선의 노력을 다할 것을 약속드리며, 회원 여러분의 많은 성원을 부탁드립니다. 올해 가을 광주에서 다시 뵙고 인사드리겠습니다. 감사합니다.

운영위원 및 사무국 직원 일동을 대표하여,
대한화학회장 **신석민**

2023년 5월 광고 목차

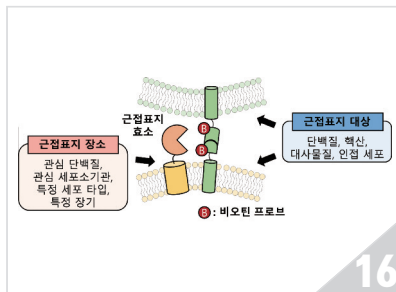
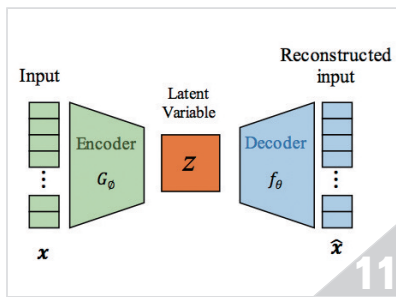
- 뒤표지 바이오니아
- 앞표지 안쪽 동우화인켈
- 뒤표지 안쪽 시마즈 사이언티픽 코리아
- p.01 아이센스
- p.02 대림스타릿(주)
- p.03 자유아카데미
- p.04 사이플러스

2023년 운영진

- 회 장 신석민
- 부 회 장 성재영(총무)
이광렬(기획)
김지환(학술)
윤재숙(홍보)
추현아(산학협력)
황성주(국제협력)
백성혜(교육)
- 실무이사 장락우(총무)
고두현(총무)
강은주(총무)
이진석(기획)
윤효재(기획)
정유성(국제협력)
남좌민(국제협력)
이윤미(학술)
김태규(학술)
성봉준(홍보)
한순규(홍보)
김정욱(홍보)
최현호(산학협력)
김준수(교육)

2023년 화학세계 편집위원회

- 위 원 장 윤재숙
- 부위원장 성봉준 김정욱 한순규
- 상임위원 김기향 이주용 홍석원
- 정원진 이원화
- 편 집 자 오민영



NEWS

- 06 2023년 봄, 제131회 대한화학회 학술발표회, 총회 및 기기전시회를 마치고...
· 신석민 대한화학회 회장
- 08 KCS 캘린더
- 09 이달의 학회
- 59 신진연구자 소개 · 이준호
- 74 월간학회소식

PAPER

- 11 읽기 쉬운 총설 | 인공 지능은 소재 연구를 할 수 있을까? · 이동선
- 16 이달의 하이라이트 | 효소화학 반응을 이용한 공간생물학(Spatial Biology) 연구 · 강영교, 이현우*

SPECIAL

- 30 우수선도연구기관 | KAIST 나노텍토닉스 연구단 · 한상우
- 37 우수선도연구기관 | 중앙대학교 세포화학동력학 창의연구단 · 성재영
- 44 INTERVIEW | 화학세계가 만난 화학자 · 이창규 명예교수
- 53 KCS 하이라이트 | 밀도 범함수 이론 계산 관련 연구 · 김현우

EDUCATION

- 24 화학 교육 | 초임 중등 과학교사를 위한 협력적 멘토링 프로그램 · 박지훈

COLUMN

- 65 화학칼럼 | 화학사 돌아보기: 돌턴 돌아보기 · 최정모
- 69 화학칼럼 | 삼국지 속의 화학 · 장홍제

TREND

- 62 우리 실험실은요! | 유기반응 및 물질개발 연구실 · 이채린
- 72 Book & App
- 75 화학만평

ADVERTISING & CAMPAIGN

- 05 대한화학회 발간(참여) 학술지
- 09 클린 인터넷을 선언합니다
- 76 지면광고 안내/회비 및 구독료 안내

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				

- 제132회 학술발표회, 총회 및 기기전시회(10월 25일~27일, 광주 김대중컨벤션센터)
- 학회상, 외부상 수상 후보자 추천 접수(5월 24일~6월 28일)
- 2023년 대한화학회 화학포스터 그리기 및 화학시화 대회
- 신청접수(4월 3일~5월 20일)/작품제출(4월 3일~5월 28일)/심사결과(6월 예정)

March

- 제131회 학술발표회, 총회 및 기기전시회(4월 26일~28일, 수원컨벤션센터)
- 사전등록(1월 2일~3월 16일)
- 기기전시회접수(1월 9일~3월 31일)
- 한국화학올림피아드 여름학교 입교대상자 접수(3월 13일~4월 9일)

April

- 제131회 학술발표회, 총회 및 기기전시회
- 현장등록(3월 17일~4월 28일)
- 한국화학올림피아드 여름학교 입교대상자 접수(3월 13일~4월 9일)
- 2023년 대한화학회 화학포스터 그리기 및 화학시화 대회
- 신청접수(4월 3일~5월 20일)/작품제출(4월 3일~5월 28일)/심사결과(6월 예정)

June

- 제132회 학술발표회, 총회 및 기기전시회
- 학회상, 외부상 수상 후보자 추천접수(5월 24일~6월 28일)
- 분과회별 심포지엄 주제확정(6월 21일)
- 사전등록(6월 22일~9월 21일)
- 한국중학생화학대회 접수(6월 19일~7월 2일)
- 한국화학올림피아드
- 여름학교 입교대상자 평가(5월 20일)
- 겨울학교 입교대상자 접수(6월 12일~7월 9일)

July

- 제132회 학술발표회, 총회 및 기기전시회
- 초록 접수(7월 14일~8월 25일)
- 사전등록(6월 22일~9월 21일)
- 화학회 창립일(7월 7일)
- 국제화학올림피아드(7월 16일~7월 25일)
- 한국화학올림피아드
- 겨울학교 입교대상자 접수(6월 12일~7월 9일)
- 여름학교(7월 30일~8월 7일)

August

- 제132회 학술발표회, 총회 및 기기전시회
- 초록 접수(7월 14일~8월 25일)
- 초록수정 및 삭제 마감(8월 31일)
- 사전등록(6월 22일~9월 21일)
- 한국화학올림피아드
- 여름학교(7월 30일~8월 11일)
- 겨울학교 입교대상자 평가(8월 26일)
- 한국중학생화학대회(8월 19일)

September

- 제132회 학술발표회, 총회 및 기기전시회
- 사전등록 마감일(9월 21일)

October

- 제132회 학술발표회, 총회 및 기기전시회(10월 25일~27일, 광주 김대중컨벤션센터)
- 화학산업의 날(10월 31일)

November

December

- 제133회 학술발표회, 총회 및 기기전시회
- 분과회별 심포지엄 주제 확정

January

- 신년교류회(1월 6일, 오후 3시)
- 제131회 학술발표회, 총회 및 기기전시회(4월 26일~28일, 수원컨벤션센터)
- 학회상 수상 후보자 추천(2022년 12월 21일~2023년 1월 25일)
- 초록접수(1월 2일~2월 16일)
- 사전등록(1월 2일~3월 16일)
- 기기전시회접수(1월 9일~3월 31일)
- 한국화학올림피아드 겨울학교(1월 2일~1월 14일)

February

- 제131회 학술발표회, 총회 및 기기전시회(4월 26일~28일, 수원컨벤션센터)
- 초록접수(1월 2일~2월 16일)
- 사전등록(1월 2일~3월 16일)
- 기기전시회접수(1월 9일~3월 31일)

CONFERENCE OF THE MONTH

2023년 5월 29일~6월 2일

International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM)

장 소 | Jeju, South Korea

안 내 | <https://csw2023.org/Awards.asp>

2023년 5월 23일~26일

19th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering

장 소 | Crete, Greece

안 내 | <https://www.iccmse.org/>

클린 인터넷을 선언합니다



화학회 회원들의 소통에 꼭 필요한 수단인 인터넷에 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 만들어가고자 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 cleankcs@kcsnet.or.kr로 연락해주시길 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 징역이나 금고 또는 2천만원 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 구제적으로 밝힌 의사에 반하여 공소를 제기할 수 없다.

형법 제309조(출판물에 의한 명예훼손)

- ① 사람을 비방할 목적으로 신문, 잡지 또는 라디오 기타 출판물에 의하여 제307조제1항의 죄를 범한 자는 3년 이하의 징역이나 금고 또는 700만원 이하의 벌금에 처한다.
- ② 제1항의 방법으로 제307조제2항의 죄를 범한 자는 7년 이하의 징역, 10년 이하의 자격정지 또는 1천500만원 이하의 벌금에 처한다.



PROJECT · V

인공지능과 화학

PART
2

인공 지능은 소재 연구를 할 수 있을까?

이동선 | 삼성전자 종합기술원
dongseon.lee@samsung.com

인공 지능은 소재 연구를 할 수 있을까?

이동선 | 삼성전자 종합기술원, dongseon.lee@samsung.com

서론

2016년 3월, 구글 딥마인드의 챌린지 매치, 이세돌 9단과 알파고의 대국이 있었고, 그로부터 불과 10년도 채 지나지 않은 2022년에는, 인공지능이 그린 그림이 콜로라도 주립 박람회 미술대회에서 우승을 차지하였다. 이러한 성과들이 우리에게 충격적으로 느껴지는 이유는, 아마 사람만이 할 수 있는 일이라고 생각한 것을 인공지능이 아주 능숙하게 수행해낼 수 있기 때문이다. 알파고의 충격적인 승리 직후 시점에 인공 지능에 의해 대체될 확률 낮을 것으로 예측했던 직업들이 바로 화가, 디자이너, 작가 등 이른바 인간만의 고유한 특성이라고 여겨져 왔던 창의성이 필요한 직업들이었다. 최근 등장한 챗GPT는 수준급의 작문 실력을 보여 주고 있으며, GPT-4는 글과 사진이라는 이형의 자료에 대해서도 능숙하게 해석하는 모습까지 보여주고 있다. 이 글에서는 다양한 인공 지능 알고리즘들이 어떻게 화학의 다양한 문제를 이해하고 풀어왔는 지 일부 사례를 살펴

보며 현재와 미래의 연구하는 모습에 대하여 논의해보려고 한다.

본론

전통적으로 새로운 소재는 설계하고 합성하고 특성을 테스트하는 일련의 시행착오 과정을 통해 개발되어 왔다. 반면에, 소재 역설계, 이른바 인버스 디자인은 우리가 원하는 특정한 물성이 나오도록 물질의 구조나 조성을 디자인하는 계산 과학과 인공지능 방법론이다. 이 접근 방식은 일반적으로 소재와 물성 사이의 관계에 대한 대량의 데이터로부터 소재 디자인에 대한 지식을 습득하고, 이를 바탕으로 특정 물성을 만족할 가능성이 높은 소재들을 도출해낸다. 인공 지능을 활용한 소재 설계는 광학 소재, 메타 물질, 신약 개발 외에도 광범위하게 이루어지고 있으며, 그 접근 방법도 전역 최적화 기법, 강화 학습, 생성형 신경망 모델 등 다양하다.



그림 1. 인공 지능을 이용한 소재 역설계의 흐름¹

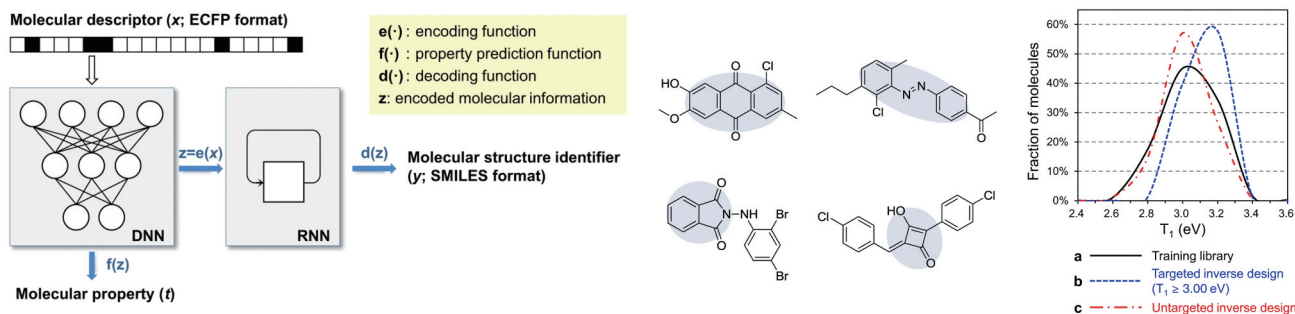


그림 2. 심층 인코더-디코더 방식의 모델의 구조와 동작. (왼쪽) 역설계 모델의 구조. (가운데) 모델이 생성한 분자들 구조의 예시. (오른쪽) 원본 및 생성된 분자들의 계산된 삼중항 에너지 분포.¹

여기서 우선적으로 생각해봐야 하는 것은 어떻게 분자를 컴퓨터가 이해할 수 있는 형태로 변환해줄 것인가 하는 것이다. 화학자로서 가장 먼저 떠오르는 것은 그래프 형태이다. 하지만 그래프 표현 방식은 다소 연산량이 높고, 또한 이를 이용한 인공지능 모델이 분자를 잘 다루게 건 비교적 최근의 일이다. 또 다른 방법은 SMILES라고 하는 문자열 표현 방식이다. 예를 들자면 에탄올은 탄소 원자 두 개와 산소 원자 하나가 이어져 있으므로 “CCO”와 같이 표현하는 방법이다. SMILES 표현은 완벽하지는 않지만 유기 분자의 경우 거의 일대일에 가깝게 분자 정보를 비교적 작은 데이터로 저장할 수 있다는 장점이 있다. 또 다른 방법으로는 분자 지문이 있다. 분자 지문은 그래프 형태로 표현된 분자들에 대하여 서로 다른 부분 그래프, 즉 분자의 부분 구조들을 벡터 형태로 표현한 것이다. 이 표현법은 원래 분자의 전체 구조에 대한 정보를 잃어버리긴 하지만, 신경망 모델이 다루기 쉬운 형태이면서도 다양한 분자 특성 예측

모델에서 준수한 성능을 보여주는 장점이 있다.

[그림 2]에는 심층 신경망 모델과 회귀 신경망 모델을 활용하여 원하는 삼중항 에너지 분포를 가지는 유기 소재를 역설계하는 방법이 표현되어 있다. 심층 신경망은 입력된 분자 지문의 물성을 예측하는 역할을 한다. 우리가 임의로 입력한 분자 지문에 대하여 예측된 물성이 목표한 물성 값을 만족한다면, 이 분자 지문을 언어 모델에 주로 사용되는 회귀 신경망 모델이 문자열인 SMILES 형태로 만들어낸다. 이렇게 만들어진 분자들 몇 가지를 보면 특정 발색단을 포함하는 등 어느 정도 화학적 개념을 학습한 것처럼 보인다. 또한 삼중항 에너지가 높은 분자를 의도적으로 생성하고자 한 시도에서도 생성된 분자의 삼중항 에너지 분포가 의도한 방향으로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

위의 예시 외에도 비교적 개념적으로 간단한 오토인코더를 활용한 방법을 살펴보고자 한다. 오토인코더는 인공 신경망 모델로서 데이터들의 특성을 추출하거나, 압축하는

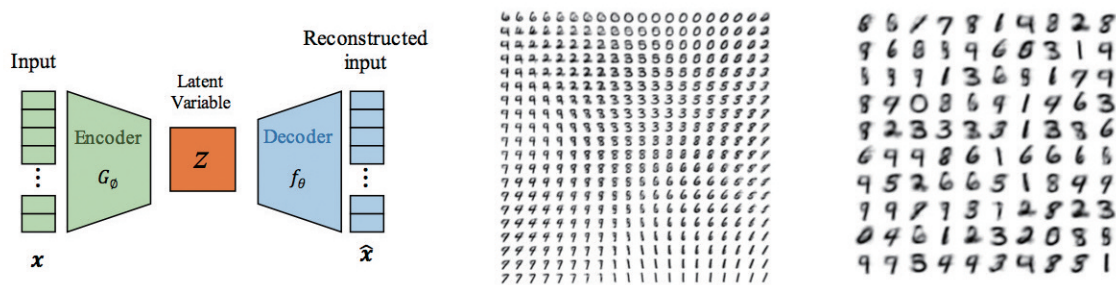


그림 3. (왼쪽) 변분 오토인코더의 구조. 코드로 표시된 부분이 잠재 공간을 의미한다. (가운데) 변분 오토인코더 모델의 2차원 잠재 공간에 학습된 MNIST 데이터. (오른쪽) 2차원 잠재 공간으로부터 디코더를 통과하여 무작위로 생성된 손글씨들.²

작업을 수행하는데 주로 활용되는 모델이다. 오토인코더는 데이터를 더 작은 차원으로 압축하는 인코더와, 압축된 데이터를 다시 원본으로 복원하는 디코더의 두 부분으로 이루어진다. 신경망 모델은 인코더를 통해 압축된 데이터가 디코더를 통해 원래대로 정확히 복원되는 정도를 높이는 방향으로 학습된다. 손으로 쓴 숫자들로 이루어진 데이터베이스인 MNIST 데이터베이스에 대하여, 손글씨를 2차원의 데이터로 압축한 뒤 다시 복원하는 모델에 대한 사례가 대표적인 예시이다. 여기서 중요한 부분은 압축된 정보가 담겨 있는, 인코더와 디코더 사이에 있는 은닉층이며, 이를 잠재 공간이라고도 한다. 오토인코더의 한 변형인 변분 오토인코더를 활용하여 MNIST 데이터베이스의 손글씨를 학습한 사례를 보면, 2차원의 잠재 공간에서 0부터 9까지의 숫자가 어떻게 분포되어 있는지를 알 수 있다. 이제 인코더를 떼어내고, 잠재공간에서 우리가 원하는 숫자가 어디 즈음 있는지 안다면, 그와 비슷한 숫자들은 잠재공간의 해당 위치 근처의 한 점에서 디코더를 통과시켜 글씨를 복원함으로써 얻어낼 수 있는 것이다.

이 과정을 똑같이 소재 설계에 똑같이 적용시켜볼 수 있다. 우리가 소재를 인공지능 모델이 이해할 수 있는 형태로 입력한 다음 오토인코더로 학습시키면 잠재 공간에는 소재의 구조적 특성에 대한 정보가 담긴다. 앞의 손 글씨 사례와 유사하게 잠재 공간의 한 점의 데이터를 골라 디코더를 통과시키면 우리가 변환한 분자의 표현식을, 즉, 그래프인

경우에는 그래프를, 문자열인 경우에는 문자열을, 분자 지문인 경우에는 분자 지문을 얻어낼 수 있다. 생성된 물질의 물성은 별도의 예측 모델이나 계산을 통하여 알아낼 수도 있고, 만일 우리가 잠재 공간이 어떤 물성과 관계가 있다는 것을 알 수 있다면 특정 지점으로부터 원하는 물성을 가지는 분자들을 생성해낼 수도 있다. 이러한 원리를 바탕으로 한 응용 기술들은 조금씩 변형되면서 지금 이 순간에도 계속 보고되고 있다.^{3,4}

인공 지능은 새로운 소재를 제안하는 것 외에 어떻게 하면 그 소재를 합성할 수 있는지에 대한 계획도 수행할 수 있다. 유기 소재를 합성하기 위한 계획을 세우는 과정 중 목적 생성물을 얻기 위해 필요한 시작 물질이 될 조각들인 반응물을 찾는 역합성 과정이 있다. 최근 몇 년간 인공지능을 이용한 역합성 연구 또한 다양한 방법으로 시도되어 왔다. 전문가가 정의한 합성 규칙 중 적절한 것을 예측하는 방법, 생성형 모델을 활용하는 방법, 강화 학습 모델을 활용하는 방법 등이 있으며, 모든 경우에 분자는 역설계의 경우와 마찬가지로 다양한 방법으로 표현된다. 여러 방법들 중 인공지능 자연어 처리 기술이 역합성에 적용된 사례를 한 번 살펴보고자 한다. 앞에서 살펴본 바와 같이 유기 분자는 SMILES라는 문자열로 표현될 수 있다. 따라서, 다음 그림의 반응 예시에서 볼 수 있듯, 반응 또한 문자열로 표현이 가능하다. 이 때, 마치 대화에서 질의 응답 과정처럼, 생성물이라는 질문에 반응물이라는 대답을 내는 과정은 곧

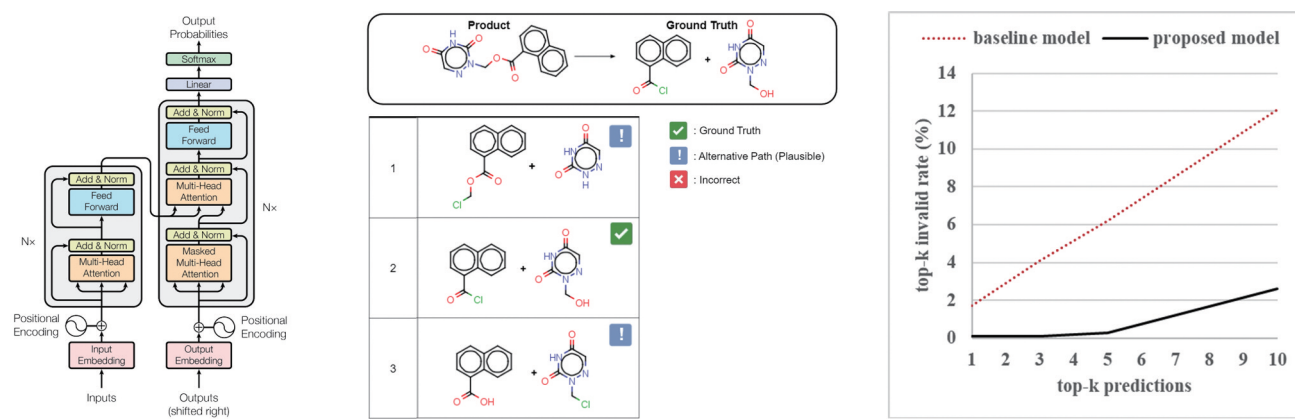


그림 4. (왼쪽) 구글이 발표한 트랜스포머의 구조.⁶ (가운데) 역방향과 정방향 반응 데이터를 모두 학습한 역합성 모델의 예측 사례. (오른쪽) 역합성 모델이 생성한 반응 경로들 중 화학적으로 불가능한 분자를 포함한 반응의 비율. 양방향 반응 데이터를 모두 학습한 모델에서 개선됨을 확인⁷

역합성을 수행한 것과 같게 된다.

문자열 표현식을 이용한 방법들 중에 주목할 만한 성취 중 하나는 2019년에 발표된 분자 트랜스포머이다.⁵ 원래 트랜스포머는 2017년에 구글이 발표한 신경망 모델로서, 문장 속 단어와 같은 서열 데이터에 숨어있는 맥락과 의미를 학습하는 자연어처리 모델이다.⁶ 이를 분자들의 반응에 대하여 앞서 언급한 바와 같은 행동을 하는 모델로 구성한 것이 분자 트랜스포머 모델이다. 다만 문자열을 활용하다 보니, 단 한 글자만 틀리더라도 화학적으로 말이 안 되는 문자열을 생성하는 문제가 발생한다. 예를 들어 에탄올은 SMILES로 “CCO”로 쓰이는데, 실수로 가운데 C를 방향족 탄소만을 지칭하는 소문자 c로 쓰게 되면 이는 화학적으로 말이 안 되는 분자가 되는 것이다. 이러한 현상을 개선하기 위해 반응을 역합성만이 아닌 정방향 데이터를 동시에 활용하여 학습한 모델이 제안되었고, 위에서 발생하던 문제들이 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있다.⁷ 여기서 인상적인 부분은 인공 지능 모델이 스스로 쓴 문자열 C가 의미하는 것이 탄소인지도 모른다는 것이다. 우리가 일련의 화학 반응에 대한 개념을 전혀 알려주지 않았음에도, 인공 지능 모델은 마치 화학적인 프로세스를 이해하고 있는 것처럼 결과를 내줄 수 있다는 것이다. 이 과정에서 모델에게 알려준 것은 SMILES라는 문자열 형태로 변환된 많은 수의 반응 데이터들 외에는 없다.

결론

지금까지 인공 지능을 통해 수행하는 연구의 한 측면들을 살펴보았다. 전반적으로 유기 소재 연구 중심으로 서술하였으나, 앞에서도 언급했듯이 화학이 다루는 다른 많은 분야에도 활발하게 적용되고 있다. 인공지능 측면에서도 본문에서 언급한 방법 외에 적대적 생성 신경망(GAN), 심층 강화 학습 등 매우 다양한 방법들이 시도되고 있다. 또한, 보고된 방법들 대부분은 코드와 함께 공개되어 인공 지능 모델을 학습하려는 데이터만 있다면 누구든지 활용해볼 수 있다는 것도 중요한 지점이다. 사실 이 부분이 인공 지능 기반 연구 속도가 굉장히 빠르게 진척되는 이유 중 하나일 것이다.

최근 인공 지능 분야에서 큰 화두 중 하나는 범용 인공

지능이다. 범용 인공 지능이란, 특정한 조건에서나 과제에만 적용 가능한 약인공지능과는 달리 여러 상황에 대하여 인간과 같이 다양한 과제를 처리할 수 있는 인공 지능을 말한다. 아직 이견은 있지만 딥마인드의 GATO나 오픈 AI의 GPT-4는 다른 형식의 데이터들 사이의 관계를 파악하거나 다양한 목적의 작업에 적용이 가능하다는 점에서 범용 인공 지능을 개발하는 길목에 있는 시도들로 보인다. 정확한 시점은 모르나, 어쩌면 온 세상의 모든 교과서의 글을 다 읽고 글과 관련된 도표와 그림도 동시에 파악하고 우리가 오랜 시간 배워온 개념을 이해하는 모델이 나올지도 모른다. 챗GPT의 등장 이후 GPT 모델을 연구 활동에 적용하는 시도 또한 보고되고 있다.^{8,9} 인공 지능 분야는 하루가 다르게 빠르게 움직이고 있다.

여기까지 읽었다면 아마 현재 인공지능이 수행하는 연구의 수준에 대하여 궁금할 지도 모르겠다. 본문에 소개한 모델들은 특정한 과제를 목적으로 만들어진 약인공지능 모델들이며, 화학 분야에서 발표되고 있는 수많은 보고들 또한 특정 목적을 잘 달성하기 위해 만들어진 모델들이다. 따라서 아직은 굉장히 좋은 계산기 수준에서 벗어나지 못한 것처럼 보이기도 한다. 인공지능 모델이 도출한 결과를 더 정확히 파악하기 위해 별도의 양자 화학적 계산이 필요할 수도 있고, 전문가의 판단이 필요하기도 하다. 하지만 적어도 현재는 연구원이 새로운 시도로 사용할 수 있는 도구로는 충분히 활용될 만한 가치가 있다고 생각한다. 궁금하다면, 그리고 가능하다면 지금이라도 공개된 코드들을 받아서 본인에게 얼마나 유용할 지 테스트해볼 수도 있다. 새로운 도구들은 시간을 아껴줄 수 있다. 손으로 계산하는 대신 계산기를 사용하는 것처럼, 논문을 찾으러 도서관을 가는 대신 자리에 앉아서 웹 검색을 하는 것처럼, 그리고 마치 이 글을 작성할 때 챗GPT를 심분 활용한 것처럼 말이다.



1. Kim, K., Kang, S., Yoo, J. *et al.* "Deep-learning-based inverse design model for intelligent discovery of organic molecules." *npj Comput. Mater.* **2018**, *4*, 67
2. Kingma, D. P., and Welling, M., Auto-Encoding Variational Bayes, **2013** DOI: 10.48550/arXiv.1312.6114
3. Wang, J., Wang, Y., and Chen, Y., "Inverse Design of Materials by Machine Learning." *Materials* **2022**, *15*, 1811
4. Sridharan, A., Goel, M., and Priyakumar, U. D., "Modern machine learning for tackling inverse problems in chemistry: molecular design to realization." *Chem. Commun.* **2022**, *58*, 5316
5. Schwaller, P., Laino, T., Gaudin, T. *et al.* "Molecular Transformer: A Model for Uncertainty-Calibrated Chemical Reaction Prediction." *ACS Cent. Sci.* **2019**, *5*(9), 1572–1583
6. Vaswani, A., Shazeer, N., Niki Parmar. *et al.* Attention Is All You Need, **2017** DOI: 10.48550/arXiv.1706.03762
7. Kim, E., Lee, D., Kwon, Y. *et al.* "Valid, Plausible, and Diverse Retrosynthesis Using Tied Two-Way Transformers with Latent Variables." *J. Chem. Inf. Model.* **2021**, *61*(1) 123–133
8. Polak, M. P., and Morgan, D., Extracting Accurate Materials Data from Research Papers with Conversational Language Models and Prompt Engineering -- Example of ChatGPT. **2023** DOI: 10.48550/arXiv.2303.05352
9. Boiko, D. A., MacKnight, and R., Gomes. G., Emergent autonomous scientific research capabilities of large language models. **2023** DOI: 10.48550/arXiv.2304.05332



이 동 선 Dongseon Lee

- 서울대학교 화학부, 학사(2003.3–2007.2)
- 서울대학교 화학부, 박사(2007.3–2013.8, 지도교수 : 석차욱)
- 삼성전자 종합기술원 전문연구원(2013.9–현재)

효소화학 반응을 이용한 공간생물학(Spatial Biology) 연구

강명균, 이현우* | 서울대학교 화학부, rheehw@snu.ac.kr

서론

사람의 몸은 하나의 세포에서부터 출발한다. 이 하나의 세포가 대략 60조의 딸세포로 분열하며 몸을 만드는 수많은 중간 단계에서 딸세포들은 정해진 “위치”에서 또 다른 딸세포를 만들며 장기 그리고 몸을 만든다. 또한 각 장기나 조직 안에서 여러 세포들은 “접촉”을 통한 세포간 교신을 하며, 그리고 각 세포안의 10,000 종류가 넘는 단백질들이 도메인 구조에 따라 분류되어 알맞은 세포내 “위치”로 이동되는 과정이 끊임없이 일어남으로써 우리의 삶을 이룬다. 생명현상의 각 layer에서 관찰할 수 있는 이러한 기막힌 공간 특이적인 생체 정보들은 하나의 세포 안에 모두 코딩되어 있는 것으로 생각할 수 있으며 이러한 생명체의 공간 정보를 탐색하는 새로운 학문을 “공간생물학(Spatial Biology)”라고 정의할 수 있다. 공간생물학을 연구할 수 있는 다양한 방법 중에 본 연구실에서 주도적으로 개발에 참여하고 있는 근접분자 표지기술(proximity labeling, PL)은 핵산 및 단백질 시퀀싱 방법과 접목될 수 있기 때문에 매우 풍부한 공간생물학 정보를 몇 번의 실험만으로도 획득할 수 있는 큰 혁신성이 있다. 이번 화학세계의 하이라이트 코너에서는 공간생물학 연구를 위한 근접분자 표지화학의 연구 현황 및 앞으로의 발전 방향에 관하여 논의하였다.

본론

1. 초고해상도 근접분자 표지기술(SR-PL) 개발

생체 공간정보에 대한 연구는 단백질 수준에서 세포생물학자 및 구조생물학자들에 의해 가장 많이 연구되어왔다. 단백질은 체내에서 세포를 구성하는 생체고분자 중 하나로 특정한 위치에서 에너지 생성, 대사물질 운반, 신호전달, 그리고 면역반응 등 중요한 역할을 수행하며 단백질-단백질 상호작용에 의해 다양한 생물학적 반응들이 일어나거나 조절된다. 단백질 상호작용 네트워크는 세포의 기능 및 생명유지에 필수적이며 이러한 상호작용이 잘못 조절될 경우 암, 신경질환을 포함한 여러 질병들을 일으키거나 세포의 노화를 촉진시킬 수 있다. 때문에 단백질 간의 상호작용을 규명하는 것은 새로운 기전을 밝혀낼 뿐만 아니라 치료제를 개발하는데 새로운 지표를 제공할 수 있다.¹

전통적으로 단백질 간 상호작용 규명 및 구획화된 단백질체를 알아내기 위한 방법으로는 상호 면역침전(co-immunoprecipitation, Co-IP)방법이 많이 사용되어왔다.² 상호 면역침전 기술은 세포를 용해(lysis) 시킨 후 항체가 붙은 비드(bead)와 섞어 항원-항체 반응을 통해 특정 단백질(항원)을 분리할 수 있으며, 낮은 농도의 세정 용액을 사용하여 항원과 상호작용 단백질의 결합을 파괴하지 않고 동시에 분리해낼 수 있다. 분리한 상호작용 단백질은 트립

신 분해 후 질량분석기로 분석하여 알아낼 수 있지만 이 기술은 세포 용해 이후의 단백질 상호작용에 의존하기 때문에 세포 소기관 막 등의 경계가 사라져 인위적인 결합이 일어날 수 있다. 반대로 일시적인 결합이나 약한 결합을 이루는 단백질의 경우에는 분리 전 세정 용액에 의해 제거된다. 또한, 불용성 항원이거나 항원에 특이적인 항체가 없는 경우 사용할 수 없다는 단점들이 존재한다.³ 이러한 한계점들을 보완하기 위해 약 10여 년 전에 근접분자 표지기술(proximity labeling, PL)이 개발되었으며 이 기술은 마치 효소가 스프레이 물질을 뿌리듯이 주변 단백질에 무작위로 비오틴 파생 물질을 공유결합으로 붙이는 스프레이 타입 단백질 변형 효소화학 반응을 이용한다. 지금까지 PL 기술을 위하여 다양한 효소들이 개발되어왔으나 생물학자들이 선호하는 두 가지 효소가 주로 사용되고 있으며 과산화효소(oxidase) 기반의 APEX⁴와 비오틴 라이게이스(biotin ligase) 기반의 BioID⁵이다. APEX는 식물에서 과산화수소를 환원시켜 항산화작용을 하는 APX라는 과산화효소의 유전자를 변형하여 활성도를 증가시켜 개발하였으며,⁶ 약 28 kDa의 분자량으로 특정 단백질의 세포 내 위치 연구에

많이 사용하는 녹색형광단백질과 비슷한 크기를 가지고 있다. APEX를 이용하면 과산화수소를 통해 비오틴 페놀(biotin-phenol, BP)을 라디칼화하여 1분이라는 빠른 시간 내에 주변의 단백질들의 표면에 있는 타이로신 잔기에 표지할(또는 비오틴화할) 수 있다[그림 1A]. BioID의 경우 대장균 안에 존재하는 비오틴 라이게이스(BirA)의 유전자를 변형하여 만들어졌으며⁵ 35 kDa의 분자량으로 APEX보다 약간 큰 분자량을 갖는다. BioID는 비오틴과 아데노신 삼인산(ATP)를 이용하여 비오틴-아데노신 일인산 에스터를 생성하는데 이 생성물의 에스터는 일차 아민의 친핵성 공격에 의해 아미드 결합을 형성하기 때문에 주변 단백질의 라이신을 비오틴화시킬 수 있다[그림 1A]. 이렇게 표지된 단백질들은 세포 용해 후 비오틴과 결합력이 강한 스트렙타비딘(streptavidin) 비드를 사용하여 면역침전으로 분리할 수 있으며 질량분석을 통해 동정할 수 있다.

APEX나 BioID를 이용한 근접분자 표지기술(PL)이 전통적인 상호 면역침전법(Co-IP) 과 가장 큰 차이를 보이는 점은 살아있는 세포에서 스프레이 반응을 진행하기 때문에 세포 용해 후에도 세포가 살아있을 때의 생리적인 공간 정

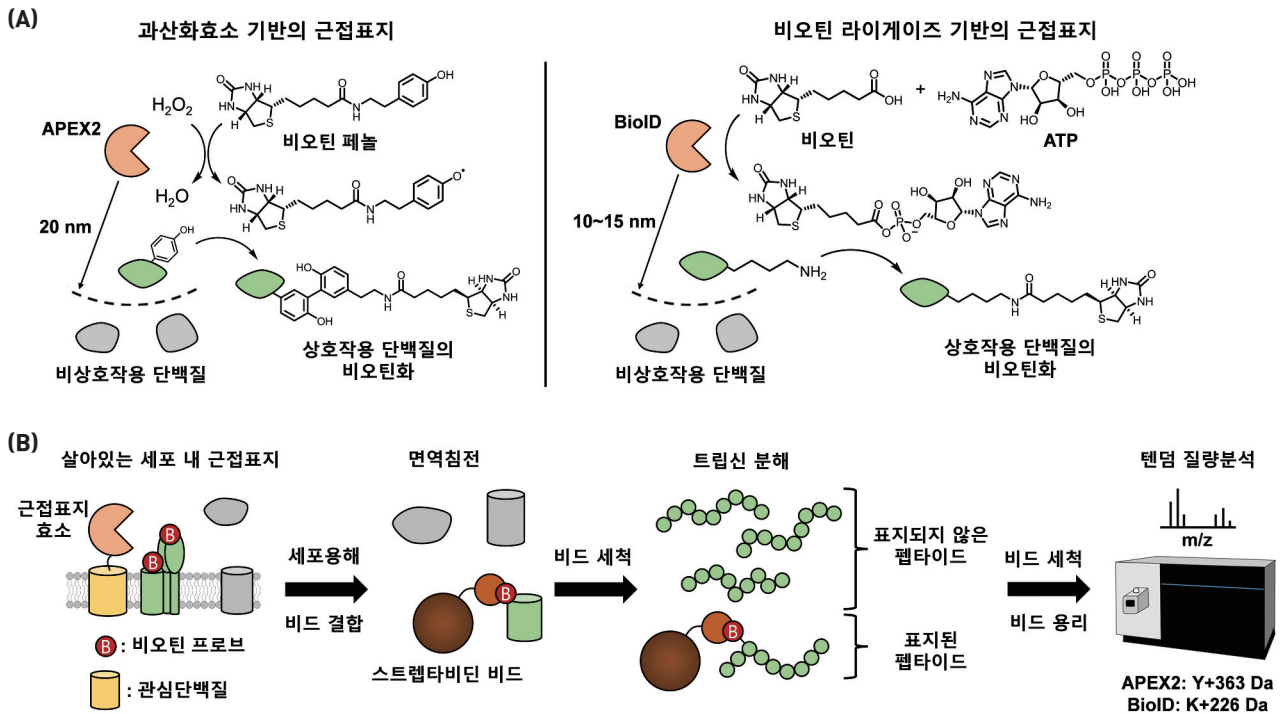


그림 1. (A) APEX와 BioID를 이용한 근접분자 표지화학 반응의 모식도와 (B) Spot-BioID를 이용한 근접분자 표지 펩타이드의 질량 분석의 모식도

보를 남길 수 있다는 점이다. 근접분자 표지기술은 처음 보고된 이후 지난 10년 동안 여러 방면에서 기술의 진보를 거듭하여 왔으며 현재는 살아있는 세포와 동물 조직에서의 공간 단백질체 정보(spatial proteomics)를 알아내는데 중요한 연구기법으로 자리잡았다. 특별히 본 연구실에서는 단백질 내 표지된 위치를 분석함으로써 근접분자 표지기술의 분석의 정확성과 공간분해능을 획기적으로 높인 초해상도 근접분자 표지기술(super-resolution proximity labeling, SR-PL)의 개발과 이를 이용한 사례에 대해 소개하고자 한다.

현재까지 많은 연구자들이 APEX 또는 BioID를 이용하여 표지된 공간단백질체 연구를 진행하여 왔으나, 대부분의 경우에는 APEX나 BioID로 비오틴화된 펩타이드만을 분석하는 것이 아닌 스트렙타비딘 비드로 분리된 단백질 전체를 분석하는 것에 초점을 맞추고 있다. 하지만 이 경우에는 비오틴화되지 않은 단백질도 다양한 이유에 의해서 마치 비오틴화 된 것처럼 여길 수 있는 오류가 있다. 이는 스트렙타비딘 비드로 면역침전 시 분자간 인력 때문에 비오틴화 되지 않은 단백질들이 비오틴화된 단백질에 붙어서 같이 분리될 수 있기 때문이다. 특별히 미토콘드리아의 경우에는 내막과 외막 단백질들이 긴밀히 연결되어 있기 때문에 미토콘드리아 기질(matrix)에서 비오틴화된 단백질을 스트렙타비딘 비드로 분리하였을 때 외막 단백질까지 같이 분리되는 경우가 빈번하게 일어난다. 또한, 세포 용해액에서만 일어나는 매우 인공적인 단백질간 결합에 의해서 전혀 생동맞은 단백질이 비오틴화된 단백질에 붙어서 스트렙타비딘 비드에 살아남아서 결국 APEX나 BioID로 표지된 공간단백질체로 인식되는 경우도 있다. 이러한 경우들을 모두 고려하면 스트렙타비딘 비드로 분리된 단백질들은 절대 비오틴화된 단백질체와 같다고 여길 수 없지만 대개의 연구자들은 분석의 편의성으로 인해 스트렙타비딘 비드로 분리된 단백질을 비오틴화 단백질체로 여기는 분석방법을 따르며 이로 인해 매우 높은 레벨의 위양성(false positive)을 포함한 낮은 해상도(low resolution)의 근접분자 표지 단백질체 정보가 얻어지게 된다.

이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구실에서는 근접분자 표지된 펩타이드만을 정확하게 분석할 수 있는 SR-PL을 BioID와 APEX에 적용하여 개발해왔다⁷⁻¹¹ 먼저, BioID에

의해 비오틴화된 단백질을 스트렙타비딘 비드와 결합시킨 뒤 트립신 분해를 통해서 표지되지 않은 펩타이드를 제거하고 비오틴화 펩타이드만 비드에 남긴 뒤 열을 가해 용리(elution)하여 분석하는 첫번째 SR-PL 기술인 Spot-BioID 방법을 개발하였다[그림 1B]. 이를 이용하여 mammalian target of rapamycin (mTOR) 단백질에서 라파마이신(rapamycin)과 결합하는 도메인(FRB)을 따로 BioID에 붙여 인간세포에 발현시킨 뒤 상호작용 단백질체를 조사하였다.⁷ 탠덤(tandem) 질량분석을 통해 비오틴화된 라이신(K+226 Da)을 조사하였고, FKBP25 단백질의 80, 86, 그리고 89번째의 라이신이 라파마이신을 처리했을 때만 비오틴화가 된 것이 관측되었다. 이 결과를 기반으로 울산과학기술원 이창욱 교수연구실과 공동연구를 진행해 FKBP25-라파마이신-FRB 복합체의 결정 구조를 얻어[그림 2A] 실제로 결합하는 것을 검증하였다.⁷

이후 Spot-BioID 기술을 이용한 추가적인 연구에서는 미토콘드리아 외막에 존재하는 단백질인 TOMM20의 C-말단에 BioID를 붙여 상호작용 단백질을 분석하였고,⁸ exonuclease 3' -5' domain containing 2 (EXD2) 단백질의 46, 221번째의 라이신이 비오틴화 된 것이 확인하였다[그림 2B]. 즉, EXD2 단백질이 미토콘드리아 외막에 존재하는 것을 의미하나 기존의 연구에서는 EXD2가 세포핵 또는 미토콘드리아 기질에 존재한다고 보고되어 있었다. EXD2 단백질의 세포 내 위치를 확인하기 위해 APEX의 활성도를 높인 APEX2를 이용한 전자현미경 이미징 방법을 사용하였으며, 이를 통해 N-말단 부분의 소수성인 1-37 아미노산 서열이 EXD2가 미토콘드리아 외막에 위치하기 위한 신호서열로 작동하는 것을 밝혀내었다.⁸ TOMM20 C-말단은 세포질로 향해 있기 때문에 EXD2의 46, 221번째 라이신도 세포질에 위치하는 것을 파악할 수 있다. 결론적으로 질량분석 및 전자현미경 이미징 결과를 통해 EXD2의 막 방향성(membrane topology)가 검증되었으며, 외부가수분해 효소(exonuclease)가 미토콘드리아 외막에서 세포질에 존재하는 DNA 또는 RNA 단일 가닥을 자를 것으로 예상된다. 이에 따라 EXD2는 세포질 핵산 분해와 관련된 미토콘드리아의 알려져 있지 않은 기능과 관련되어 있을 것으로 추측하고 있다.

위와 같이 SR-PL 방법은 막 단백질체에 적용될 경우 근

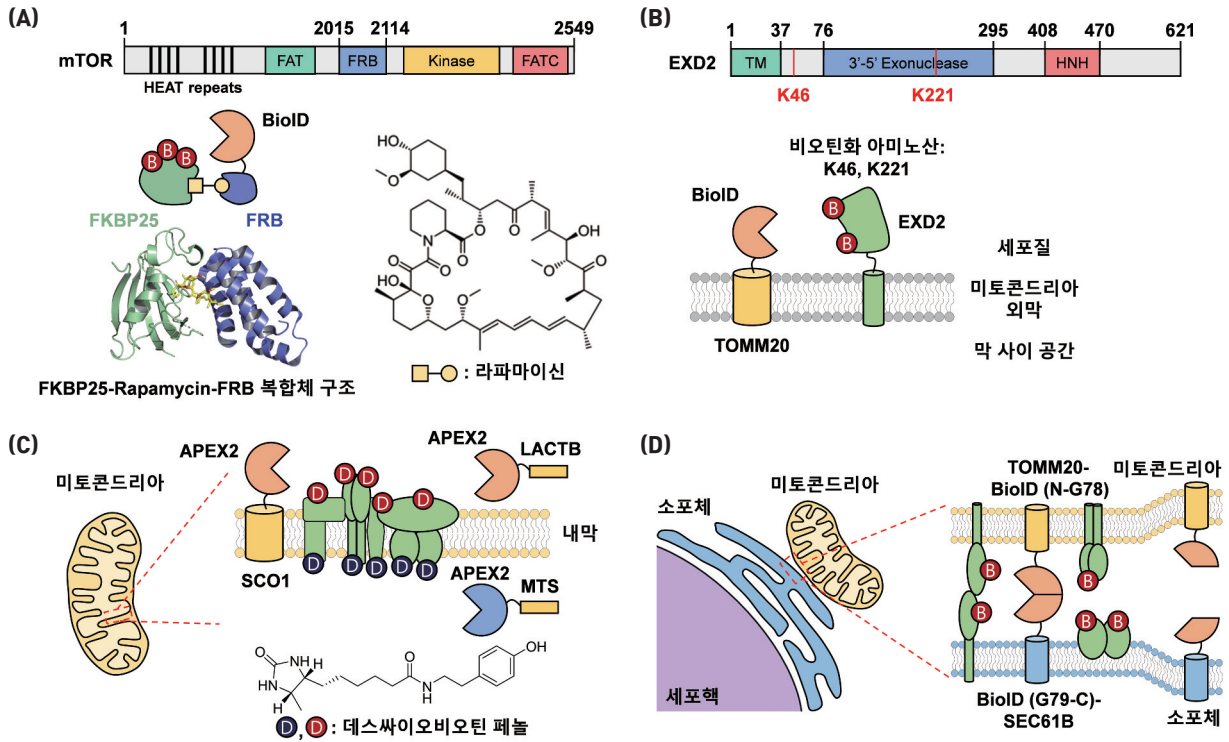


그림 2. 초고해상도 근접분자 표지기술(SR-PL)을 적용한 공간단백질체 연구의 모식도. (A) FRB의 라파마이신 의존 상호작용 단백질 분석,⁷ (B) 미토콘드리아 외막 단백질체 연구,⁸ (C) 미토콘드리아 내막 단백질의 막 방향성 조사,⁹ (D) 미토콘드리아와 소포체의 접촉 부위에 위치하는 단백질체 연구.¹⁰

접분자 표지효소에 의해 표지된 위치에 따라 단백질의 막 방향성을 결정하는데 유용하게 사용될 수 있어 본 연구실에서는 이 방법을 미토콘드리아 내막 단백질체에 적용하였다. 미토콘드리아 내막은 높은 밀도의 단백질들로 이루어져 있으며 산화적 인산화, 대사물질 합성 등 세포 내에서 중요한 생화학적 반응이 일어나는 곳이다. 이들의 막 방향을 조사하기 위하여 APEX2를 미토콘드리아의 기질(matrix)와 이중막사이 공간(IMS)에 각각 발현시켜[그림 2C], 미토콘드리아 내부 각 공간 단백질체를 표지하였다. 이때 APEX에 맞는 SR-PL 방법의 개발을 위해서 새로운 프로브인 데스싸이오비오틴 페놀(desthiobiotin-phenol, DBP)을 개발하였다.⁹ BP 경우 비오틴의 싸이오이써(thioether) 구조가 쉽게 산화가 되므로 질량분석에서 표지된 펩타이드의 신호가 약하게 나오는 반면, 황이 없는 구조의 DBP는 비오틴 산화로 인한 질량분석 신호가 감소되는 이슈를 피할 수 있다. 또한, 스트렙타비딘에 대한 데스싸이오비오틴의 결합력이 비오틴보다 상대적으로 약하기 때문에 면역침전

시 용리가 잘되어 표지된 펩타이드의 수율을 높일 수 있는 장점이 있다. APEX에 의해 발생한 DBP 라디칼은 미토콘드리아 내막을 통과할 수 없기 때문에 미토콘드리아 내막에 의해 분리된 기질과 막사이공간(IMS)에 분포하는 단백질들의 타이로신 잔기들을 특이적으로 표지할 수 있음을 확인하였으며, 두 APEX construct를 통해서 총 686개의 DBP로 표지된 타이로신(Y+331 Da)의 정보를 획득할 수 있었다. 이렇게 표지된 타이로신 잔기를 갖는 펩타이드 정보들은 약 130개의 미토콘드리아 내막 단백질과 매치가 되었으며, 이 단백질들의 막 방향을 재검증 또는 새롭게 결정 및 제안하는데 사용될 수 있었다.⁹ 또한, 본 연구실에서는 SR-PL 기술을 이용하여 미토콘드리아와 소포체의 접촉면에 특이적으로 위치하는 단백질체의 정보도 보고하였는데, 이를 표지하기 위해 BioID 효소를 두 분자로 나누어 서로 결합할 때만 작동하는 스플릿 BioID 시스템(Contact-ID로 명명)을 개발하였다.¹⁰ 4개의 조합 후보 중 N-G78/G79-C 스플릿 페어가 가장 높은 활성도를 보여 N-G78 BioID

조각은 SEC61B라는 소포체 막의 단백질의 N-말단에 연결하여 세포질로 향하게 하였고, G79-C BioID 조각은 TOMM20의 C-말단에 연결하여 미토콘드리아 외막에서 세포질로 향하게 했다. 두 단백질을 동시에 발현시킨 뒤 비오틴을 16시간 처리하여 그 동안 미토콘드리아와 소포체가 인접하는 공간안의 단백질들만 표지할 수 있었으며(그림 2D), 질량분석 후 표지된 라이신을 조사하여 두 소기관이 접촉했을 때 기능을 하는 115개의 단백질을 밝혀낼 수 있었다.¹⁰ 또한, 비오틴 표지된 Lysine 잔기(K+226 Da) 정보를 기반으로 115개의 단백질 중 85개의 막 단백질(73.9%, 85/115)의 막 방향성도 보고하였다. 이 중에 미토콘드리아-소포체 접촉 단백질로 새롭게 규명된 FKBP8이라는 단백질을 과발현시키면 미토콘드리아와 소포체의 접촉이 증가하는 것을 관측하였고 반대로 감소시키면 접촉도 줄어드는 것이 확인되어 FKBP8이 두 소기관의 접촉을 제어하는 중요한 역할을 한다는 것을 보고하였고 이러한 정보들은 현재 세포소기관 막 접촉 생화학을 연구하는 연구자들에게 중요한 리소스로 활용되고 있다.

2. 동물모델에서의 근접분자 표지기술 활용

근접분자 표지기술을 이용한 많은 연구들이 배양세포에서 실험을 진행하였으나 동물모델의 조직은 다양한 세포로

이루어져 있고 다세포 생물체에서 발생하는 복잡한 상호작용과 반응을 연구할 수 있어 생리학적으로 더 유의미하다. 특히 동물모델에서는 세포 간 상호작용 및 신호전달, 세포 외 기질의 영향과 같은 세포밖의 환경을 제공할 수 있으며, 질병 진행 및 약물 효능과 같은 복잡한 생물학적 과정을 연구할 때 배양세포에서는 확인할 수 없는 중요한 생물학 정보를 알아낼 수 있다. 이러한 차이점에 의해 실제로 미토콘드리아와 같은 세포소기관 단백질체에 관한 실험도 배양세포와 동물모델의 조직에서 실험할 때 사뭇 다른 결과를 도출할 수 있다. 현재 Human protein atlas,¹² G-TEx Portal¹³과 같은 동물모델에서 장기 별 유전자의 발현 정보를 포함한 데이터베이스들이 구축 되어있지만 이 정보는 유전자의 발현양(expression level) 및 결실 표현형(deficient phenotype)에 관한 정보들이 주를 이루고 있을 뿐, 각 유전자가 각 조직에서 발현된 단백질의 위치 및 상호작용 단백질 등의 공간생물학에 해당하는 정보는 여전히 부족하다고 볼 수 있다.

이러한 필요성에 의해 연구자들은 초파리,¹⁴ 예쁜꼬마선충,¹⁵ 쥐^{16,17}에서 근접분자 표지기술법을 적용하여 기존의 방법으로 알아내기 힘들었던 조직특이적인 공간단백질체에 관한 정보를 알아내고 있다. 특별히 조직에서 분비되는 분비단백질은 세포 안에서 생성된 후 외부로 분비되어 혈관을 통해 다양한 생화학 반응을 수행하며 장기간 커뮤니

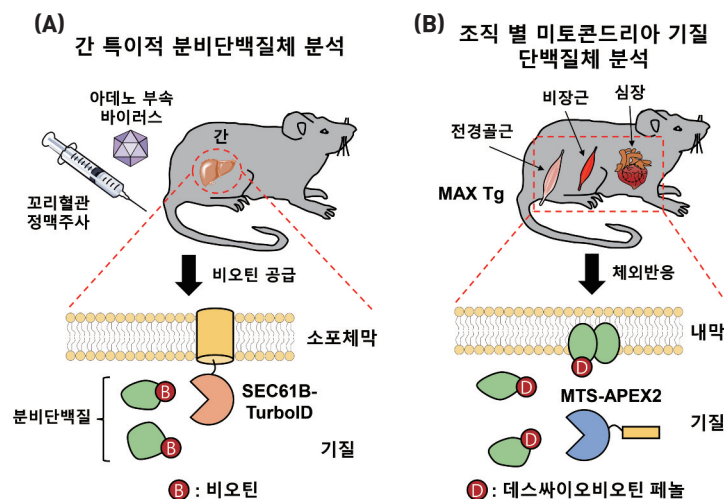


그림 3. SEC61B-BioID 쥐와 MTS-APEX 쥐를 각각 이용한 (A) 조직 특이적인 간(liver) 분비단백질체 연구¹⁶와 (B) 근육 특이적인 미토콘드리아 기질 단백질체 연구¹⁷의 모식도

케이션에 핵심적인 역할을 한다. 본 연구실에서는 조직 특이적인 분비 단백체를 밝혀내기 위해 또 다른 근접분자 표지효소인 TurboID를 SEC61B 단백질의 C-말단에 부착시켜 소포체 내강으로 향하게 하였다.¹⁶ 이 연구에서는 당시에 개발된 TurboID를 사용하였는데, BioID에 유전자 변형을 시켜 활성을 극대화하여 개량된 효소이다.¹⁸ 이 단백질을 쥐의 간에 발현시키기 위해서 쥐의 꼬리혈관에 정맥 주사를 통해 SEC61B-TurboID 유전자를 삽입한 아데노부속 바이러스를 간으로 전달하여 SEC61B-TurboID를 발현시켰으며 3일 동안 24 mg/kg의 양으로 비오틴을 공급해 표지를 진행하였다(그림 3A). 웨스턴 블랏 실험을 통하여 쥐의 간에 SEC61B-TurboID를 발현시키고 biotin을 공급하였을 때에만 쥐의 혈장에 비오틴 표지된 단백질을 관찰할 수 있었고, SR-PL 기술을 적용하여 약 50개의 간 조직의 분비단백질이 비오틴 표지된 것을 확인하였다.¹⁶ 또한 인슐린 저항성을 유발한 쥐에도 같은 실험을 진행하여 당뇨병 상황에서 간 분비 단백질이 매우 상이하게 달라짐을 역시 SR-PL 방법을 적용하여 알아낼 수 있었다.

SR-PL 방법은 쥐의 조직 별 미토콘드리아 기질 단백질을 알아내는데에도 활용되었다. 지금까지는 이를 알아내기 위해 수크로스를 이용한 기울기 원심분리법을 적용하여 미토콘드리아를 분리한 뒤 약한 세정제를 이용해 외막을 파괴하는 방법이 사용되어져 왔다. 하지만 이 방법은 많은 불순물을 포함하며 미토콘드리아 단백질이 아닌 다른 세포소기관 단백질도 혼합되는 큰 한계점이 존재한다. 이에 본 연구실에서는 쥐의 조직에 미토콘드리아 기질 특이적으로 APEX2를 발현시킬 수 있는 MTS-APEX2 유전자를 이식한 쥐(MAX-Tg 쥐)를 제작하여 조직 특이적인 미토콘드리아 기질 단백질체 맵핑 프로젝트를 시작하였다. MAX-Tg 쥐에서 심장, 전경골근, 비장근을 추출하여 SR-PL 분석을 위해 DBP와 과산화수소를 이용하여 표지한 후 분석하였으며(그림 3B) 각 근육 장기에서 193, 237, 그리고 246개의 DBP로 표지된 단백질을 발견하였다.¹⁷ 이 단백질들은 대부분 미토콘드리아 기질 단백질(88.0% 이상)이었으며, 이 중에 RTN4IP1이라 불리는 단백질은 이전 연구에서는 미토콘드리아 외막 단백질로 보고되었으나 본 연구에서는 전자현미경 기법을 이용하여 RTN4IP1이 미토콘드리아 기질에 있는 것을 증명하였다. RTN4IP1의 구조 연구를

통해 이 단백질이 미토콘드리아 기질에서 NADPH와 결합하여 퀴논 등의 전자수용체로의 전자 전달 및 Coenzyme Q 생합성에 중요한 역할을 담당하는 단백질임을 알아낼 수 있었다.

3. 광학가교반응을 이용한 근접분자 가교기술(proximity crosslinking)

근접분자 표지기술은 현재 공간단백질체 연구(Spatial Proteomics)에 활용되는 중요한 연구기법으로 자리잡았지만, APEX나 BioID가 만들어내는 비오틴 스프레이 물질의 표지 반경이 수십 나노미터에 이르기 때문에 세포소기관 수준의 단백질을 분석하는데 있어 최적화되어 있지만 많은 분자생물학자들이 관심을 갖는 단백질-단백질간 결합(interactome)을 분석하는 데에는 다소 넓은 반응 반경을 갖고 있고 이를 정확히 분석하려면 엄격한 대조군 실험들이 필요하다. 이에 따라 본 연구실에서는 APEX, BioID와 같은 스프레이 화학반응이 아닌 광학가교결합 기반의 새로운 근접분자 가교기술(proximity crosslinking)을 개발하였다.¹⁹ 광학가교결합을 일으키는 물질을 특정 단백질에 표적화시키기 위하여 할로택 단백질이 이용되었으며, 이와 공유결합을 이룰 수 있는 염화헥실(hexyl chloride) 구조를 포함한 광학가교물질(VL1)을 합성하였다. 광학가교물질로 사용된 4-azido-Nethyl-1,8-naphthalimide (AzNP)는 가시광선 영역대인 청색광을 이용해 나이트렌(nitrene)을 생성할 수 있으며 기존의 UV에 의해서 활성화되는 광학가교물질(예를 들어, 아릴아자이드, 벤조페논, 다이아지린)과 비교하여 세포 독성이 적다고 볼 수 있다(그림 4). 나이트렌은 주변 단백질과 C-H 또는 N-H 삽입을 통한 가교결합을 이룰 수 있으며 발생된 나이트렌은 여전히 할로택 단백질에 묶여있기 때문에 해당 단백질과 접촉할 수 있는 거리의 단백질과만 반응할 수 있도록 반응 설계되어있다. 이 기술을 이용하여 SARS-CoV-2 바이러스의 유전체에 암호화 되어있는 구조 단백질인 뉴클레오텍시드(N) 과 할로택 단백질을 결합시킨 N-HaloTag 단백질을 인간세포에 발현시켰을 때 이 바이러스 단백질과 결합하는 인간세포 유래 단백질을 따로 분리하여 질량 분석하였다.¹⁹ 질량분석 결과 22개의 결합 단백질이 밝혀졌으며,

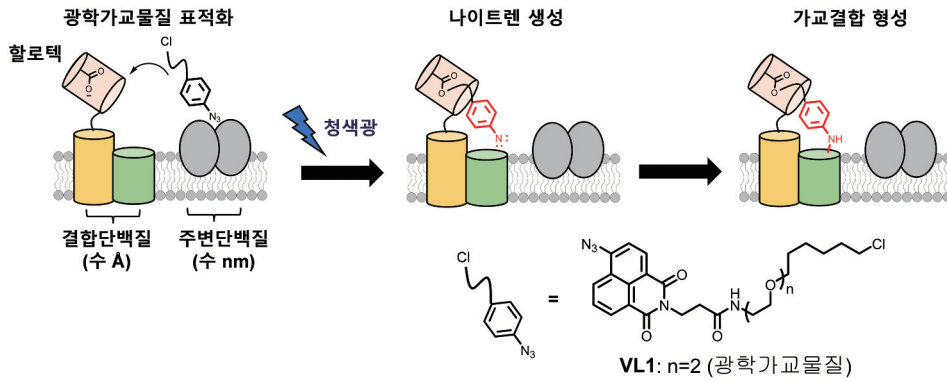


그림 4. 광학가교물질(VL1)을 이용한 근접분자 가교기술(proximity crosslinking)¹⁹의 모식도

이중 11개의 단백질이 RNA 결합 단백질이고, 이 중에 8개의 단백질이 유전자 발현을 억제해 항바이러스 기능을 갖는다고 알려진 스트레스 과립(stress granule)의 구성 단백질임을 알게 되었다. 이 결과는 사람의 세포 안의 소기관인 스트레스 과립이 SARS-CoV-2 바이러스 면역반응에 중요한 기능을 할 수 있음을 시사한다.

결론

앞으로의 전망

2002년 노벨생리학상 수상자인 Sydney Brenner는 “Progress in science depends on new techniques, new discoveries and new ideas, probably in that order”라고 언급하며, 과학의 발전에 있어 새로운 연구 기술 개발의 중요성을 강조하였다. 효소화학 반응에서 출발한 PL 기술은 현재까지 주로 단백질 및 핵산과 같은 생체고분자를 표적화 하여 연구가 진행되었으나, PL 효소를 통해 생성된 반응성이 강한 비오틴 파생 물질은 생체고분자와만 반응하는 것이 아니라 같은 공간에 존재하는 대사물질(metabolite)과도 반응할 수 있음을 본 연구실의 최근 연구를 통하여 확인하였다. 특별히 대사물질은 대부분 단분자 물질로 이루어졌기 때문에 생체고분자를 형광 이미징하는 방법(GFP 태깅, 항체 부착 등)을 적용하기가 어렵고 단분자를 분리하고 관찰하는 기술들은 생명과학의 주요 연구 분야인 단백질이나 핵산과 같은 생체고분자를 다루는 방법과 완전

히 다르기 때문에 대사체에 관한 연구는 앞으로 생물학 연구에서 많은 발전이 이루어질 수 있는 영역이라고 볼 수 있다[그림 5]. 이러한 상황에서 PL 방법을 이용한 공간대사체 맵핑을 할 수 있다면 이는 지금까지 알려져 있지 않은 대사물질의 공간생물학을 연구할 수 있는 혁신적인 연구방법이 될 수 있으며,²⁰ 이에 대한 연구는 현재 삼성미래기술 육성재단의 지원을 받고 수행하고 있다.

또한, PL 효소를 특정세포의 세포외공간에 유전적 방법으로 발현시키면 특정세포와 인접한 다른 세포막 단백질을 비오틴화 시킬 수 있으며 이러한 세포만 분리하여 단일세포를 시퀀싱하면 특정세포와 인접한 세포가 무엇인지를 알아낼 수 있는 생체 내 세포 배치 지도를 그릴 수 있는 중요한 툴이 될 수 있다.²⁰ 이처럼 PL 기술은 살아있는 세포 안의 대사체의 분포와 같은 nanoscale에서부터 동물의 조직안의 세포 네트워크와 같은 miliscale의 공간생물학 정보를 모두 알아낼 수 있는 중요한 툴이 될 것으로 예상하며

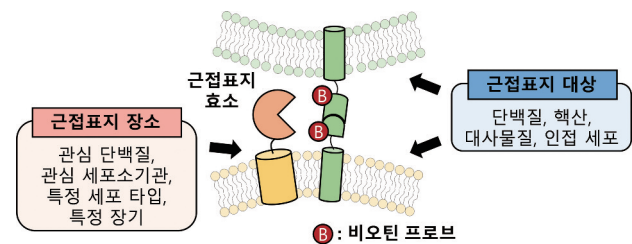


그림 5. 근접분자 표지기술을 이용한 다양한 레벨의 공간생물(Spatial Biology) 연구²⁰의 모식도

향후 10년간 PL 기술을 통해서 다양한 레벨의 풍부한 공간 생물학 정보가 축적될 것으로 내다본다[그림 5]. 또한, 이렇게 축적된 공간분자체 정보는 같은 공간 안에 존재하는 분자들간의 네트워크를 모델링하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이며 이러한 연구를 통해 각 생체내 공간에 위치한 분자들이 어떻게 서로 모이고 기능하는지에 대한 새로운 차원의 이해가 가능할 것으로 예상된다. PL 기술을 통하여

몸의 각 장기, 장기안의 서로 다른 세포타입, 그리고 그 서로 다른 세포타입 안의 각 세포소기관 별로 공간분자체 정보들이 축적되었을 때 우리는 하나의 세포 그리고 하나의 몸이라는 복잡하고 정교한 시스템이 어떻게 이루어져 있고 어떻게 기능하는지를 조금 더 분명히 이해할 수 있을 것으로 예상된다.



- Lu, H. *et al.* "Recent advances in the development of protein-protein interactions modulators: mechanisms and clinical trials." *Signal Transduct Target Ther* **2020**, 5, 213, doi:10.1038/s41392-020-00315-3.
- Phizicky, E. M. & Fields, S. "Protein-protein interactions: methods for detection and analysis." *Microbiol. Rev.* **1995**, 59, 94–123, doi:10.1128/mr.59.1.94-123.1995.
- Qin, W., Cho, K. F., Cavanagh, P. E. & Ting, A. Y. "Deciphering molecular interactions by proximity labeling." *Nat. Methods* **2021**, 18, 133–143, doi:10.1038/s41592-020-01010-5.
- Rhee, H. W. *et al.* "Proteomic mapping of mitochondria in living cells via spatially restricted enzymatic tagging." *Science* **2013**, 339, 1328–1331, doi:10.1126/science.1230593.
- Roux, K. J., Kim, D. I., Raida, M. & Burke, B. "A promiscuous biotin ligase fusion protein identifies proximal and interacting proteins in mammalian cells." *J. Cell. Biol.* **2012**, 196, 801–810, doi:10.1083/jcb.201112098.
- Martell, J. D. *et al.* "Engineered ascorbate peroxidase as a genetically encoded reporter for electron microscopy." *Nat. Biotechnol.* **2012**, 30, 1143–1148, doi:10.1038/nbt.2375.
- Lee, S. Y. *et al.* "Proximity-Directed Labeling Reveals a New Rapamycin-Induced Heterodimer of FKBP25 and FRB in Live Cells." *ACS Cent. Sci.* **2016**, 2, 506–516, doi:10.1021/acscentsci.6b00137.
- Park, J. *et al.* "The structure of human EXD2 reveals a chimeric 3' to 5' exonuclease domain that discriminates substrates via metal coordination." *Nucleic Acids Res.* **2019**, 47, 7078–7093, doi:10.1093/nar/gkz454.
- Lee, S. Y. *et al.* "Architecture Mapping of the Inner Mitochondrial Membrane Proteome by Chemical Tools in Live Cells." *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, 139, 3651–3662, doi:10.1021/jacs.6b10418.
- Kwak, C. *et al.* "Contact-ID, a tool for profiling organelle contact sites, reveals regulatory proteins of mitochondrial-associated membrane formation." *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **2020**, 117, 12109–12120, doi:10.1073/pnas.1916584117.
- Kang, M. G. & Rhee, H. W. "Molecular Spatiomics by Proximity Labeling." *Acc. Chem. Res.* **2022**, 55, 1411–1422, doi:10.1021/acs.accounts.2c00061.
- Uhlen, M. *et al.* Proteomics. "Tissue-based map of the human proteome." *Science* **2015**, 347, 1260419, doi:10.1126/science.1260419.
- Consortium, G. T. "The Genotype-Tissue Expression (GTEx) project." *Nat. Genet* **2013**, 45, 580–585, doi:10.1038/ng.2653.
- Mannix, K. M., Starble, R. M., Kaufman, R. S. & Cooley, L. "Proximity labeling reveals novel interactomes in live Drosophila tissue." *Development* **2019**, 146, doi:10.1242/dev.176644.
- Reinke, A. W., Mak, R., Troemel, E. R. & Bennett, E. J. "In vivo mapping of tissue- and subcellular-specific proteomes in Caenorhabditis elegans." *Sci. Adv.* **2017**, 3, e1602426, doi:10.1126/sciadv.1602426.
- Kim, K. E. *et al.* "Dynamic tracking and identification of tissue-specific secretory proteins in the circulation of live mice." *Nat. Commun.* **2021**, 12, 5204, doi:10.1038/s41467-021-25546-y.
- Park, I. *et al.*, doi:10.1101/2021.10.14.464368 (2021).
- Branon, T. C. *et al.* "Efficient proximity labeling in living cells and organisms with TurboID." *Nat. Biotechnol.* **2018**, 36, 880–887, doi:10.1038/nbt.4201.
- Mishra, P. K. *et al.* "A chemical tool for blue light-inducible proximity photocrosslinking in live cells." *Chem. Sci.* **2022**, 13, 955–966, doi:10.1039/d1sc04871f.
- Choi, C. R. & Rhee, H. W. "Proximity labeling: an enzymatic tool for spatial biology." *Trends Biotechnol* **2022**, 40, 145–148, doi:10.1016/j.tibtech.2021.09.008.



강명균 Myeong-Gyun Kang

- 울산과학기술원 의생명과학, 학사 (2009–2014)
- 울산과학기술원 화학과, 박사 (2014–2020, 지도교수 : 이현우, 권태혁)
- 서울대학교 화학분자공학 교육연구단, 박사 후 연구원(2020–현재, 지도교수 : 이현우)



이현우 Hyun-Woo Rhee

- 서울대학교 생명과학부/화학부, 학사 (2000–2004, 복수전공)
- 서울대학교 화학부, 박사 (2004–2009, 지도교수 : 홍종인)
- 서울대학교 화학부, 박사 후 연구원 (2009–2010, 지도교수 : 홍종인)
- MIT 화학과, 박사 후 연구원(2010–2012, 지도교수 : Alice Ting)
- 울산과학기술원 화학과, 조교수/부교수(2013–2018)
- 서울대학교 화학부, 부교수(2018–현재)

초임 중등 과학교사를 위한 협력적 멘토링 프로그램

박지훈 | 부산과학고등학교 화학교사, parkji6980@nate.com

서론

2022년 KEDI에서 실시한 교육여론조사 중 ‘학교 교육 내실화를 위해 가장 필요한 과제가 무엇인지’에 대한 질문에 전체 응답자 중 가장 많은 20.6%가 학습자의 기초학력 보장으로 응답하였으며 뒤를 이어 19.5%가 학벌주의 사회 체제 개선, 15.6%가 교원 전문성 제고를 꼽았다. 수업 방식의 다양화에 대한 응답은 9.3%로 나타났는데¹ 이는 다른 항목과는 달리 교원의 수업 전문성과 직접 연결되는 항목으로 실제로 ‘교사의 전문성과 관련된 요인’에 대한 응답은 24.9%라고 볼 수 있으며, 따라서 ‘학교 교육 내실화를 위해 가장 필요한 과제’는 교원의 전문성 신장이라고도 해석될 수 있다.

교사의 전문성 신장을 위한 여러 가지 활동 중 실질적인 멘티 교사의 수업 맥락에서 멘토 교사가 멘티 교사에게 수업 피드백을 바탕으로 멘티 교사의 교수 실행에 대한 반성 및 반성적 실천의 기회를 제공해주는 멘토링 프로그램²⁻⁷은

교수 방법을 개선하기 위한 도구로써 교사의 전문성 신장에 효과적이라는 견해에 상당한 합의가 이루어져 있다.⁸⁻¹⁰

우리나라에서도 초임 교사의 수업 전문성 향상을 도모하기 위하여 2005년도를 전후로 하여 일부 시도교육청에서 경력 교사와 초임 교사를 매칭하여 멘토링(mentoring)을 실시하고 있지만,⁴ 대부분이 단위 교육청 주도의 사업으로 이루어져, 멘토링의 효과를 담당 장학사가 선발하는 경력 교사의 전문성에 전적으로 의존하고 있다. 또한, 질 관리 시스템의 부재로 효과성 검증이 제대로 이루어지지 않아 예산 편성 여부에 따라 일회성 사업으로 끝나는 경우가 많다.

반면, 부산시교육청은 부산대학교 과학교수학습센터와 업무 협약(MOU)을 통해 2013년부터 현재까지 11년째 초임 중등 과학교사를 위한 협력적 멘토링 프로그램을 운영하고 있다. 이 글에서는 협력적 멘토링 프로그램은 일반적인 멘토링과 무엇이 다른지, 어떻게 11년 동안 프로그램을 지속할 수 있었는지 등을 이 글에서 소개하고자 한다.



일대일 멘토링

- 수업 피드백 제공
- 수업 외적 어려움 지원



협의회

- 멘토교사 협의회
- 멘티교사 협의회



세미나와 워크숍

- 최신 교수학습이론
- 학생중심수업 방법



자기 평가

- 멘토, 멘티 저널
- 자기 평가지

그림 1. 협력적 멘토링 프로그램의 구성

본 론

1. 부산광역시 교육청과 부산대학교 과학교수학습센터의 업무 협약(MOU)

협력적 멘토링 프로그램은 부산광역시 교육청과 부산대학교 과학교수학습센터의 MOU를 통해서 ‘연수’의 형태로 진행된다. 교육청은 매년 멘토링 연수 예산을 지원하고, 멘티 교사를 모집하며, 참여하는 멘토 및 멘티 교사에게 60 시간의 연수 시간을 인정해준다. 부산대학교 과학교수학습센터는 훈련된 멘토 교사를 제공하고, 연구를 통해 개발된 프로그램을 바탕으로 협력적 멘토링 프로그램을 운영하는 역할을 담당한다. 과학교수학습센터 내 멘토링 운영팀은 총 6명으로 과학교수학습센터 장(과학교육학 교수)을 중심으로 과학교육 박사 출신 교장인 과학교육전문가 1명, 과학교육 박사 출신 멘토 교사 2명, 과학교육 석사 출신 멘토 교사 2명으로 구성되어 있다. 멘토링 연수는 매년 4월~12월까지 약 10개월간 진행되며 2013년 28명을 시작으로 2022년 44명까지 총 308명이 멘토링 연수를 이수하였다.

2. 협력적 멘토링 프로그램의 구성

협력적 멘토링 프로그램은 장기간에 걸쳐 실제 수업의 맥락에서 멘토 교사와 멘티 교사가 상호 협력적인 관계 형성을 통하여 멘티 교사에게 반성적 사고와 실천을 할 기회를 제공함으로써 초임 중등 과학교사의 수업 전문성을 향상시키는 프로그램으로,¹¹ ‘의사소통기술(Communication Skill)’, ‘교과교육지식(PCK)’, ‘반성적 사고(Reflective

Thinking)’, ‘반성적 실천(Reflective Practice)’을 개념 요소로 하는, ‘일대일 멘토링’, ‘멘토 협의회’, ‘멘티 협의회’, ‘워크숍 및 세미나’의 4가지 활동으로 구성되었다.

2.1. 일대일 멘토링

협력적 멘토링 프로그램에서 가장 중심이 되는 활동으로 멘토 교사가 멘티 교사의 수업을 분석 후 일대일 멘토링을 통하여 수업 피드백을 제공하는 활동이다. 일대일 멘토링 대화를 통하여 멘티 교사는 자신의 수업에 대하여 반성의 기회를 가지며,¹² 멘토 교사로부터 수업 피드백을 받는다. 멘티 교사는 자신의 수업을 촬영한 뒤 멘티 저널과 수업 지도안, 자기 평가를 시스템에 업로드하며 이를 활용하여 멘토 교사는 멘티 교사의 수업 분석을 한 뒤 일대일 멘토링을 실시한다. 일대일 멘토링이 시작되기 전 멘토 교사는 멘토 협의회 및 세미나에서 일대일 멘토링과 관련된 교육을 받는다. 자세한 내용은 아래의 멘토 교사 지원 프로그램 항목에 자세히 기술되어 있다.

2.2. 협의회

선행 연구에서 멘토 협의회는 어려웠던 감정의 교류를 통하여 멘토 교사의 불안감을 해소시켜 주었으며, 효과적인 멘토링 방법에 대한 공유 등으로 멘토 교사의 적응과 전문성 신장에 큰 도움을 주는 것으로 나타났다.^{13,14} 이에 따라 협력적 멘토링 프로그램에서는 멘토 협의회를 강화하고 내용을 구체화하여 멘토 교사에게 실질적인 도움이 되도록 하였다. 자세한 내용은 멘토 교사 지원 프로그램 항목에 자세히 기술되어 있다. 멘토 교사와 마찬가지로 멘티 교사들은 자신이 겪고 있는 문제점을 함께 공유하고 그들로부터

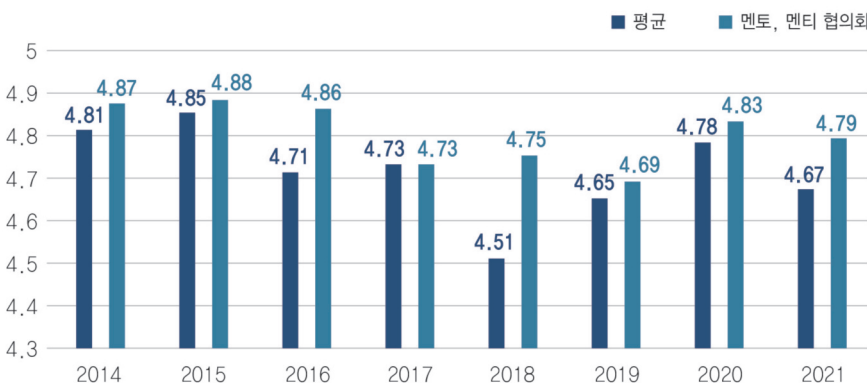


그림 2. 협력적 멘토링 사후 만족도 조사

표 1. 2022년 협력적 멘토링 Workshop 주제

Workshop	차시	내용
Argument Based Inquiry(ABI) 수업	1 차시	ABI 소개 및 적용 사례
	2 차시	ABI 수업자료 개발 및 논의
모델링	1 차시	과학교육에서 모델과 모델링
	2 차시	모델링을 이용한 수업자료 개발 및 논의
비형식 과학교육	1 차시	과학교육을 위한 과학관의 역할
	2 차시	과학관 활용 수업자료 개발 및 논의
미래 교육과 에듀테크	1 차시	과학교육에서 메타버스의 활용
	2 차시	메타버스를 이용한 수업자료 개발 및 논의
과학의 본성	1 차시	과학을 통한 과학의 본성 교육
	2 차시	과학의 본성 수업자료 개발 및 논의



그림 3. (a) 과학의 본성 Workshop 모습
(b) 과학관 활용 수업(국립 부산 과학관 견학) Workshop 모습

지지와 공감을 받을 때 초임 교사로서 느끼는 부담감이나 좌절감을 덜 수 있는 것으로 나타났다.¹⁵ 이에 따라 협력적 멘토링 프로그램에서 멘티 협의회는 초임 교사 간의 교류의 장이 될 수 있도록 운영하였다. 실제로 멘토/멘티 협의회에 대한 만족도는 다른 세부 활동과 비교하여 가장 높게 나타났다.

2.3. 세미나와 워크숍

세미나와 워크숍에서는 과학교육전문가들이 협력적 멘토링 프로그램에 참여하는 멘티 교사와 멘토 교사에게 수업 전문성 신장을 위해서 제공하는 활동으로 과학교수학습 이론, 학생 중심 수업 모형의 적용 등을 필수 구성요소로 하여 이를 습득할 수 있도록 도움을 준다. 멘토링과 관련된 선행 연구에서 멘토 교사는 멘티 교사의 반성적 실천을 촉진하는 멘토링을 할 때 멘토링 효과가 큰 것으로 나타났다.¹⁶ 따라서 협력적 멘토링에서는 세미나와 워크숍을 1개

주제당 2차시로 구성하여 2차시에는 멘토 교사와 멘티 교사가 1차시에 배운 내용을 활용하여 멘티 교사의 수업자료를 공동으로 개발하는 기회를 제공함으로써 멘토 교사의 멘토링을 지원함과 함께 멘티 교사의 반성적 실천을 촉진하고자 하였다.

2.4. 자기 평가

협력적 멘토링에서 멘티 교사의 반성적 사고의 기회를 제공하기 위한 활동으로 멘티 교사의 수업 녹화, 멘티 저널 작성, 자기 평가지 작성 등의 활동을 통하여 이루어진다. 멘토링 프로그램에서 초임 교사에게 자신의 수업에 대한 반성의 기회와 이를 내면화할 수 있는 환경을 조성하는 것이 중요하다.¹⁷ 또한, 멘토링 프로그램에서 제공한 반성적 사고의 경험을 통하여 전문성 개발을 위한 실천 능력을 기를 수 있다.¹⁸

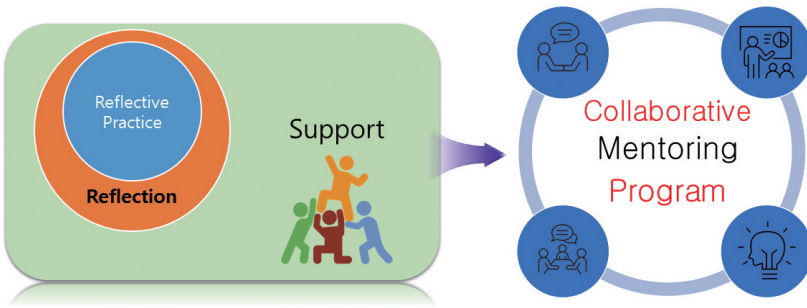


그림 4. 협력적 멘토링 프로그램의 방향성

3. 멘토 교사 지원 프로그램

멘티 교사의 반성적 실천은 반성적 사고를 기반으로 하며, 멘토 교사는 이러한 반성적 사고와 실천이 잘 일어날 수 있도록 멘토링을 진행해야 한다.¹⁶ 그러나 멘토 교사로서의 전문성은 교사로서의 전문성과는 구별되므로,^{19, 20} 경력 교사들을 멘토 교사로 선발하여 이들의 전문성에만 전적으로 의존하는 기존 멘토링은 그 효과에 한계가 있을 수밖에 없다. 따라서 효과적인 멘토링을 위해서 협력적 멘토링 프로그램은 멘토 교사를 지원하는 다양한 프로그램을 함께 운영하고 있다.

3.1. 정량화된 수업 분석 자료 제공

멘티 교사는 멘토 교사와의 멘토링을 위해 자신의 수업 영상을 총 5차례 시스템에 업로드한다. 멘티 교사의 수업 영상은 1차적으로 멘토 교사의 일대일 멘토링을 위해서 사용되며, 이와 함께 멘토링 운영팀은 별도로 모든 멘티 교사의 수업을 관찰하여 RTOP 분석을 실시한다. RTOP(The Reformed Teaching Observation Protocol-ACEPT)은 ACEPT(The Arizona Collaborative for Excellence in

the Preparation of Teachers)의 EFG(The Evaluation Facilitation Group)에서 개발한 구성주의 이론에 바탕을 둔 수업 관찰 도구로²¹ 이를 통하여 멘티 교사의 구성주의적 수업 변화 정도를 확인할 수 있다. RTOP은 수업의 5가지 영역의 25문항으로 구성되어 있으며, 이를 연관 있는 영역으로 구분하여 그룹 1에서 그룹 7까지 재분류하여 점수를 도출한다. 그룹 1은 학생의 다양한 탐구활동을 강화하는 측면, 그룹 2는 기본적·통합적 개념이해를 고려하는 측면, 그룹 3은 학생의 선지식과 사고, 논의 등 학생에 의한 문제 해결을 강조하는 측면, 그룹 4는 사회적 합의에 의한 지식구성이 가능한 학습공동체를 구현하는 측면, 그룹 5는 학생 중심의 교실 담화 재구성 측면, 그룹 6은 수업내용에 대한 교사의 명확한 이해 측면, 그룹 7은 교사의 인내심 측면을 나타낸다. 멘토링 운영팀은 분석된 RTOP 데이터를 멘토 교사에게 제공하여 멘토 교사가 효과적으로 일대일 멘토링을 할 수 있도록 지원한다. 이와 함께 멘티 교사의 RTOP 변화가 없거나 부정적일 때 멘토링 운영팀에서 해당 멘토링 팀의 활동을 점검하고 멘토 교사 및 멘티 교사와의 인터뷰를 통해 정상적인 멘토링이 운영될 수 있도록 지원하는 역할을 함께 수행하게 된다.

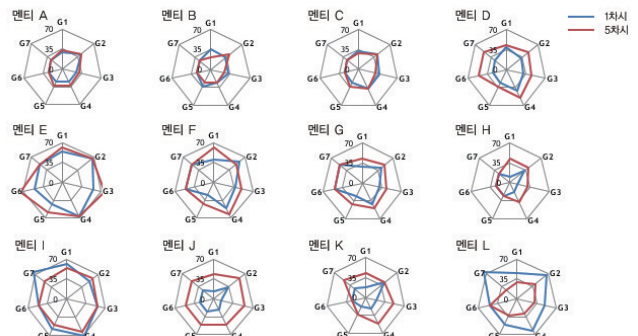
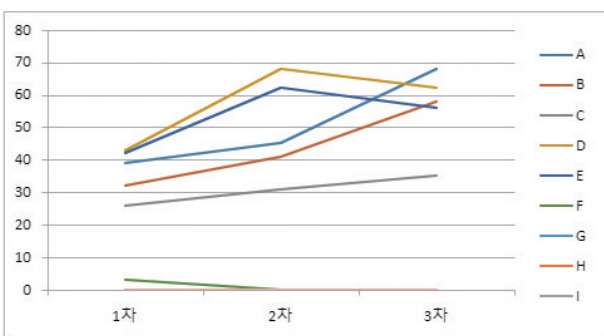


그림 5. (a) 멘티 교사 RTOP 총점 분석 (b) 멘티 교사 RTOP Group 별 분석

3.2. 멘토 협의회

멘토링 프로그램의 소개에서 언급하였다시피, 멘토 협의회에서 멘토 교사들은 서로의 감정의 교류를 통하여 멘토 교사의 불안감을 해소하며, 효과적인 멘토링 방법에 대한 공유 등을 통하여 멘토 교사로서의 전문성을 키워나간다. 1차시에는 경력 멘토들의 멘토링 경험을 논의하고, 특히 신규 멘토들이 어려워하는 멘티 교사와의 래포 형성에 방법에 대하여 의견을 공유한다. 2차시에는 멘티의 수업을 어떠한 관점에서 분석해야 하는지, 무엇을 분석해야 하는지

표 2. 멘토 협의회 내용

차시	내용
1	- 자기소개 - 경력 멘토의 멘토링 경험 논의 - 멘티 교사와의 래포 형성을 위한 방법 논의
2	- 좋은 수업에 대한 논의 - 수업 분석 방법에 대한 논의 - 멘토링 관점 논의 - 멘티 수업 동영상 시청 및 분석(실습)
3	- 자신의 멘티의 특징 및 멘티와의 갈등 사례 발표 - RTOP 기반 멘티 수업 동영상 시청 및 분석(실습/수업 계획 및 실행)
4	- 멘티 교사와의 갈등 극복 사례 발표 - 멘토링 프로그램에 대한 논의 - RTOP 기반 멘티 수업 동영상 시청 및 분석(실습/교과 내용)
4	- 멘티 교사 수업 변화 사례 발표 / 멘토 교사 수업 개선 계획 - RTOP 기반 멘티 수업 동영상 시청 및 분석(실습/의사소통, 상호작용)
6	- 멘토 교사 수업 개선 실행 사례 발표 - RTOP 기반 멘티 수업 동영상 시청 및 분석(실습/학생 및 교사 관계)
7	- 멘토링 정리

등에 대한 의견을 공유하며, 멘티 교사의 sample 수업 동영상 함께 시청한 뒤 수업 분석 실습을 진행한다. 3차시는 멘토링이 1회 진행된 후에 실시되며 이때 멘토링을 진행하면서 어려웠던 점 등에 관하여 이야기하고 해결 방법을 함께 모색하는 시간을 가진다. 또한, 멘토 교사가 요청하면 자신의 멘티 수업 영상을 모든 멘토가 함께 시청한 뒤 분석하는 시간을 가지기도 한다. 자세한 내용은 [표 2]와 같다.

3.3. 초임 멘토 교사를 위한 멘토링 속 멘토링

초임 멘토 교사들의 경우 멘토링 초반 멘토로서의 전문성 부족으로 인해 겪은 낮은 자신감을 나타내고, 멘티 교사와의 정서적 유대 관계 형성을 어려워하는 등 일대일 멘토링에서 많은 어려움을 겪는 것으로 나타났다.²² 따라서 협력적 멘토링 프로그램에서는 이러한 초임 멘토 교사들을 위한 멘토링 속 멘토링을 별도로 운영하고 있다. 멘토링 운영팀 교사는 초임 멘토 교사의 멘토가 되어 멘토링 진행과정에서의 어려운 점, 멘티와의 관계 설정 등 멘토링 전반에 걸친 어려움을 함께 논의하고 지원하는 역할을 수행한다.

결론

여러 선행 연구를 볼 때 초임 멘토 교사들은 많은 어려움을 겪고 있는 것으로 나타났으며, 이에 초임 멘토에 대한 지원의 필요성이 언급되었다.^{11,13,22,23} 초임 멘토 교사들은 멘티 교사와의 관계 설정에 어려움을 겪었으며,^{14,23} 멘토 교사로서의 전문성 부재로 좌절감을 느꼈고,¹³ 이는 곧 멘토링 질 저하로 이어졌다.²² 멘토 교사로서의 전문성은 교사로서의 전문성과는 구별되므로 좋은 교사가 좋은 멘토 교사를 의미하는 것은 아니다.^{19,20} 따라서 효과적인 멘토링



그림 6. (a) 멘토 협의회 모습 (b) 샘플 수업 분석 모습

을 위해서는 멘토 교육 프로그램과 함께 멘토 교사를 지원할 수 있는 지원 체제가 잘 구축되어야 한다.

이러한 측면에서 협력적 멘토링 프로그램은 멘토링의 모든 짐을 멘토 교사에게 지우고 멘토 교사가 혼자 이끌어가게 하는 것이 아니라 멘토링 프로그램에 멘토 교사를 참여시켜 멘토 교사 역시도 프로그램의 구성원으로서 성장하고 발전할 수 있도록 지원하는 프로그램이다. 따라서 특정 개인의

능력에만 의존하기보다는 전 구성원들의 협력관계를 바탕으로 프로그램을 이끌어가면서 발전을 이루어나간다. 또한, 연구를 기반으로 매년 프로그램을 보완하고 효과성을 검증하여 프로그램 자체를 발전시켜 나가고 있다. 이러한 협력적 멘토링의 특징들이 11년이라는 기간 동안 프로그램을 지속해서 운영할 수 있는 원동력이 되었다고 생각한다.



1. 권순형, 도재우, 민윤경, 양희준, 이강주, 이쌍철, 이정우, 이희연. 교육여론조사 (보고서 번호: RR 2022-15); 한국교육개발원: 충북, 2022; pp 123-124.
2. Bradbury, L. U. "Educative mentoring: Promoting reform-based science teaching through mentoring relationships." *Science Education*. **2010**, 94(6), 1049-1071.
3. Go, M., & Nam, J. "The Change in Beginning Science Teacher's Reflective Practice in their Teaching Performance through Collaborative Mentoring." *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*. **2013**, 33(1), 94-113.
4. Go, M., Lee, S., Choi, J., & Nam, J. "The Effect of Cooperative Mentoring on Beginning Science Teacher's Reflective Practice." *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*. **2009**, 29(5), 564-579.
5. Kwak, Y. "Research on the Changes of Beginning Science Teacher's Teaching through a Mentoring Program." *Journal of the Korean earth science society*. **2010**, 31(4), 403-417.
6. Kwak, Y. "Research on the effectiveness of the mentoring system to support beginning science teachers." *Journal of the Korean Association for Science Education*. **2011**, 31(1), 1-13.
7. Park, H., Seong, S., & Jeong, D. "The Effect of Mentoring on Beginning Chemistry Teacher's Teaching Practice." *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*. **2011**, 31(8), 1055-1076.
8. Guskey, T. R. "Results-oriented professional development: In search of an optimal mix of effective practices." *Journal of Staff Development*. **1994**, 15(4), 42-50.
9. O'Conner, C. L., Ertmer, P. A. Today's Coaches Prepare Tomorrow's Mentor: Sustaining the Results of Professional Development; ERIC Document Reproduction Service No. ED 482 676, 2003.
10. U.S. Department of Education. Schools and School Districts Recognized for Outstanding Professional Development. U.S. Department of Education Press Release, September 18, 2000. Retrieved February 21, 2003, from <http://www.ed.gov/PressReleases/09-2000/0918.html>.
11. Nam, J., Ko, M., Lee, S., Ko, M., & Sung, H. "Development of Mentoring Program Model for In-service Science Teacher Education." *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*. **2012**, 32(10), 1613-1626.
12. Abell, S. K., Dillon, D. R., Hopkins, C. J., McInerney, W. D., & O'Brien, D. G. "Somebody to count on": Mentor/intern relationships in a beginning teacher internship program." *Teaching and Teacher Education*. **1995**, 11(2), 173-188.
13. Bullough Jr, R. V. "Being and becoming a mentor: School-based teacher educators and teacher educator identity." *Teaching and teacher education*. **2005**, 21(2), 143-155.
14. Aspfors, J., & Fransson, G. "Research on mentor education for mentors of newly qualified teachers: A qualitative meta-synthesis." *Teaching and teacher education*. **2015**, 48, 75-86.
15. Friedrichsen, P., Chval, K. B., & Teuscher, D. "Strategies and sources of support for beginning teachers of science and mathematics." *School Science and Mathematics*. **2007**, 107(5), 169-181.
16. Lee, S., Go, M., Nam J., Lee, S. "Investigation of a Mentor-Teacher Qualification Standard through the Analysis of Interaction in Mentoring Conversations." *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*. **2016**, 36(6), 877-893.
17. Carr, W., Kemmis, S. *Becoming Critical: Education, Knowledge, and Action Research*; Falmer Press: London, 1986.
18. Lord, P., Atkinson, M., & Mitchell, H. *Mentoring and coaching for professionals: A study of the research evidence. Variations*, **2008**, 1(4).
19. Johnson, S. M. *Finders and Keepers: Helping New Teachers Survive and Thrive in Our Schools*; Jossey-Bass: San Francisco, 2004.
20. Smith, T. M., & Ingersoll, R. M. "What are the effects of induction and mentoring on beginning teacher turnover?" *American Educational Research Journal*. **2004**, 41(3), 681-714.
21. Piburn, M., Sawada, D. *Reformed Teaching Observation Protocol (RTOP) Training Guide; ACEPT Technical Report No. IN00-3; Arizona Collaborative for Excellence in the Preparation of Teachers: Tempe, AZ, 2001.*
22. Choi, S., Kwon, J., & Nam, J. "An Analysis on Mentor Teacher's Difficulties during Collaborative Mentoring Program." *Journal of the Korean Chemical Society*. **2014**, 58(6), 638-648.
23. Jung, M., Lee, S., & Nam, J. "The Effect of Mentoring on Beginning Science Teacher's Perception Change in Their Teaching Performance." *Journal of the Korean Chemical Society*. **2013**, 57(6), 778-788.



박지훈 Park Jihun

- 부산대학교 교육대학원 화학교육전공, 석사(2012.3-2015.2, 지도교수 : 남정희)
- 부산대학교 대학원 과학교육학과 화학교육학전공, 박사(2015.3-2018.8, 지도교수 : 남정희)
- 부산광역시 교육청 교사(2011.3-현재)
- 현재 부산과학고등학교 근무



KAIST 나노텍토닉스 연구단

정교한 나노 구조 제어를 통한 새로운 나노시스템 구현 개발

KAIST 나노텍토닉스 연구단(연구단장: KAIST 화학과 한상우 교수)은 나노구조를 빌딩블록으로 하여 나노구조 간 계층적 조립을 통해 전례 없던 다차원 하이브리드 나노구조체를 구현하는 것을 목표로 하고 있다. 이를 위해 나노구조 단위체의 형상 및 조성을 조절하고 나노구조 간 결합을 제어하는 인자를 발굴해내고자 한다. 이를 통해 새롭게 구현된 하이브리드 나노구조체들이 지니는 독특한 물리화학적 특성을 규명하고 광·전기 에너지 소재로의 응용 가능성을 탐구하고 있다[그림 1]. 본 연구단에서 최근 수행하고 있는 연구 주제들에 대해 간략하게 소개하고자 한다.

Project

1

플라즈모닉 금 나노구조-반도체 하이브리드 광촉매

표면 플라즈몬 공명 현상(localized surface plasmon resonance, LSPR)이란 금속 나노구조 표면의

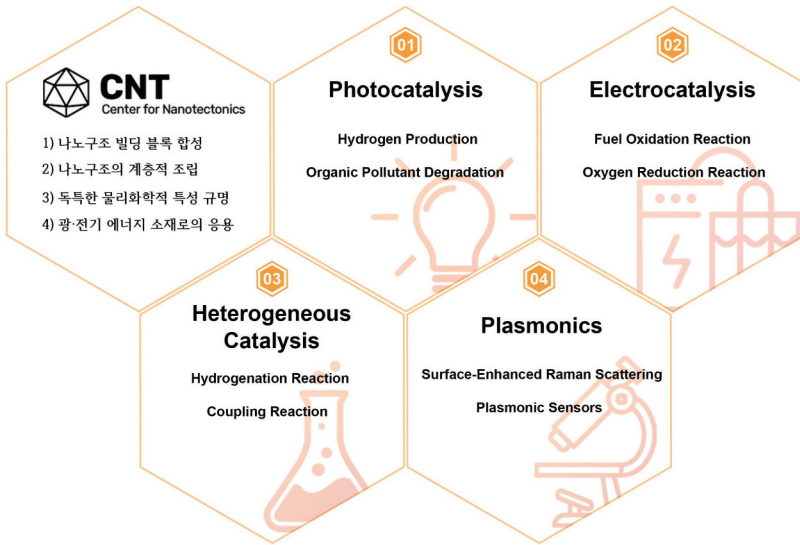


그림 1. KAIST 나노텍토닉스 연구단의 연구 추진 체계 및 연구 분야

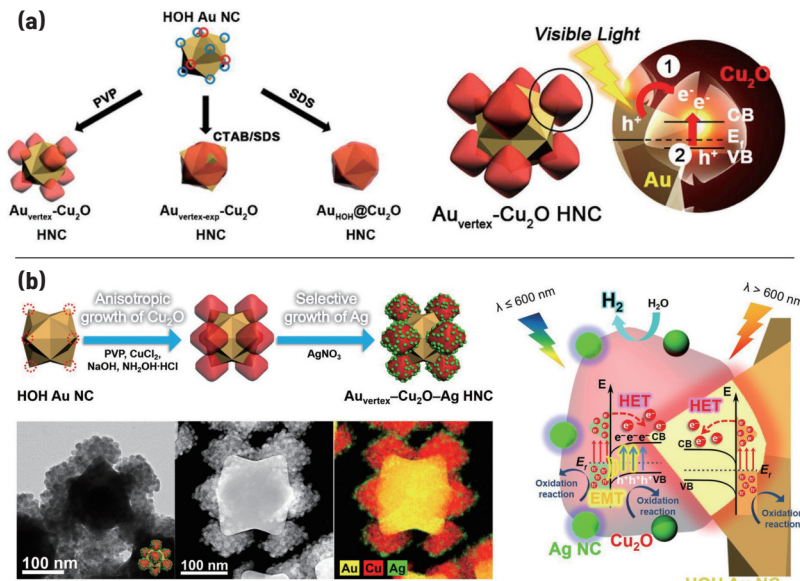


그림 2. (a) 육방팔면체 금 나노입자의 꼭짓점 위치에 선택적으로 산화구리(II)를 성장시키는 합성법[J. Am. Chem. Soc. 2016, 138, 15766-15773]. (b) 다양한 플라즈몬 전달 메커니즘이 동시에 작동하는 광촉매[J. Mater. Chem. A 2023, 11, 1343-1350].

자유 전자들이 외부 전자기장에 의해 집단적으로 진동하는 현상으로 높은 에너지를 가지는 핫 전자를 형성하거나 금속 나노구조 표면에 증강된 전자기장을 유도하게 된다. 금 나노구조는 가시광선 영역에서 플라즈몬 효과를 갖는 대표적인 물질로써, 이를 반도체와 결합하여 플라즈몬 금 나노구조-반도체 하이브리드 광촉매를 구현하게 되면 금 나노구조로부터 반도체로의 다양한 플라즈몬 에너지 전달이 가능해 광촉매의 효율을 비약적으로 향상시킬 수 있다.

본 연구단은 표면에 많은 꼭짓점을 갖는 육방팔면체(hexoctahedron) 금 나노결정을 합성하고 나노결정의 꼭짓점 위치에서 증폭된 전자기장이 형성된다는 것을 규명하였는데[J. Am. Chem. Soc. 2012], 이 육방팔면체 금 나노결정의 표면 리간드를 제어해서 꼭짓점 위치에 선택적으로 산화구리(II)를 성장시키는 합성 방법을 개발하였다[J. Am. Chem. Soc. 2016, 그림 2a]. 합성된 육방팔면체 금 나노결정-산화구리(II) 하이브리드 나노구조체를 광촉매 수소 생성 반응에 적용해본 결과, 금 나노결정의 꼭짓점에서 증폭된 전자기장으로 인해 풍부하게 형성된 핫 전자들이 산화구리(II)로 전달되는 메커니즘을 통해 향상된 광촉매 활성을 지님을 규명하였다. 또한, 금 나노결정과 상이한 플라즈몬 효과를

지니는 은 나노입자를 산화구리(II) 표면 위에 추가적으로 성장시킴으로써 다양한 플라즈몬 전달 메커니즘이 동시에 작동하는 광촉매를 개발하여 넓은 파장 영역대에서 향상된 광촉매 활성을 얻을 수 있었다[J. Mater. Chem. A 2023, 그림 2b].

한편, 활성 표면적이 넓고 전도도가 뛰어난 물질을 반도체에 추가적으로 도입하게 되면, 반도체 표면에서

들뜬 전자들의 반응물로의 전달을 용이하게 함으로서 반도체의 수소 생성 반응에 대한 광촉매 활성을 더욱 촉진시킬 수 있다. 본 연구단은 정교한 나노구조 제어를 통해서 플라즈몬 금 나노결정-반도체 하이브리드 광촉매에 수 나노미터 두께의 이황화몰리브덴(MoS₂) 나노시트를 도입하거나[J. Mater. Chem. A 2018, 그림 3a], 그래핀을 도입하였고[J. Mater. Chem. A 2019, 그림 3b], 이를 통해 기존 하이브리드 광촉매 대비 뛰어난 광촉매 활성을 얻을 수 있었다.

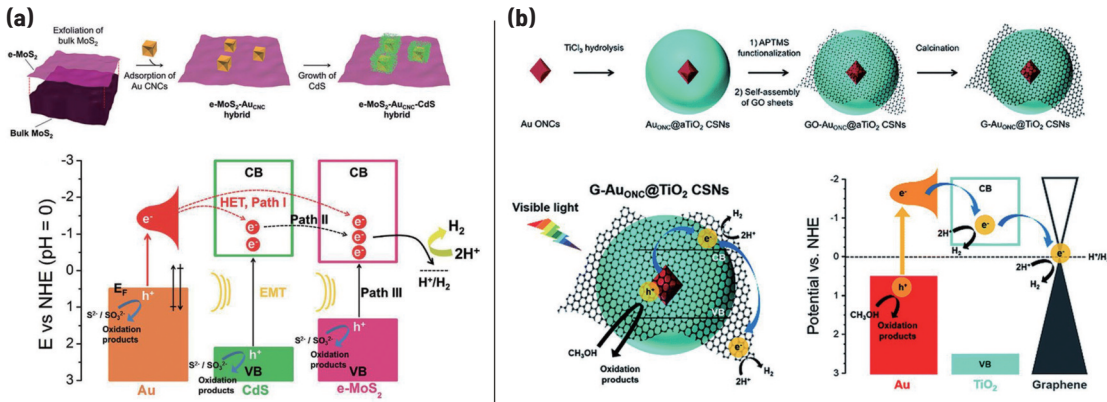


그림 3. 플라즈몬 금 나노결정-반도체 하이브리드 광촉매에 (a) 이황화몰리브덴 나노시트[J. Mater. Chem. A 2018, 6, 13225-13235] 또는 (b) 그래핀을 도입하여[J. Mater. Chem. A 2019, 7, 15831-15840] 증강된 광촉매 활성이 유도된 광촉매 시스템.

Project 2 나노갭을 갖는 플라즈몬 금 나노구조

금 나노구조의 표면 플라즈몬 공명 현상은 구조나 주변 환경, 배열 등에 의해서 그 특성이 조절될 수 있는데, 특히 금 나노구조 간 간격을 수 나노미터 수준으로 매우 짧게 조절하게 되면 그 사이 간격에서 개별 나노구조가 형성하는 전자기장에 비해 매우 증강된 전자기장 증폭 효과를 얻을 수 있다. 따라서 정교한 구조 제어를 통해서 나노갭을 풍부하게 지닌 금 나노구조는 표면증강 라만 산란(surface-enhanced Raman scattering, SERS) 또는 플라즈몬 광촉매 등에 효과적으로 응용될 수 있다.

본 연구단은 은 나노프리즘을 주형으로 하고 금 전구체와의 갈바닉 치환 반응을 제어하여 풍부한 나노갭을

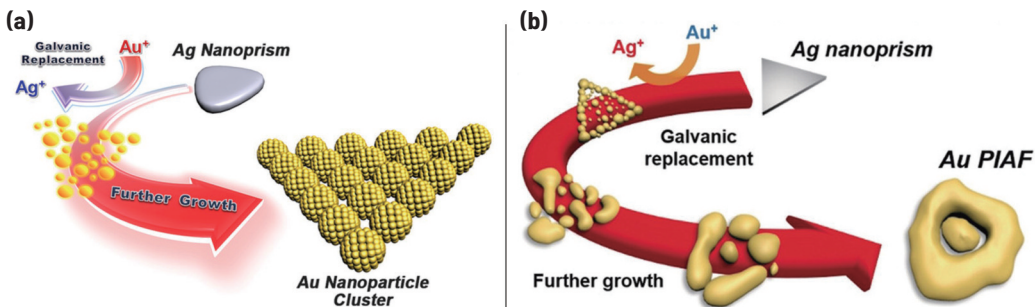


그림 4. 풍부한 나노갭을 지닌 플라즈몬 금속 나노구조체: (a) 금 나노입자 클러스터[Chem. Commun. 2015, 51, 8793-8796] 및 (b) 프레임 속 금 나노입자 구조[Angew. Chem. Int. Ed. 2019, 58, 15890-15894].

지닌 금 나노입자 클러스터(nanoparticle cluster, NPC)를 합성하였고, 뛰어난 표면증강 라만 산란 활성을 갖는 것을 보고하였다[*Chem. Commun.* 2015, 그림 4a]. 또한, 반응 온도를 낮춰 갈바닉 치환 반응과 환원 반응의 속도를 정교하게 조절하였을 때, 금 나노프레임 내부에 금 나노입자를 포함하는 독특한 구조(particle-in-a-frame, PIAF)를 얻어낼 수 있었고, 내부의 풍부한 나노갭으로 인해 증강된 표면증강 라만 산란 활성을 나타내는 것을 확인하였다[*Angew. Chem. Int. Ed.* 2019, 그림 4b].

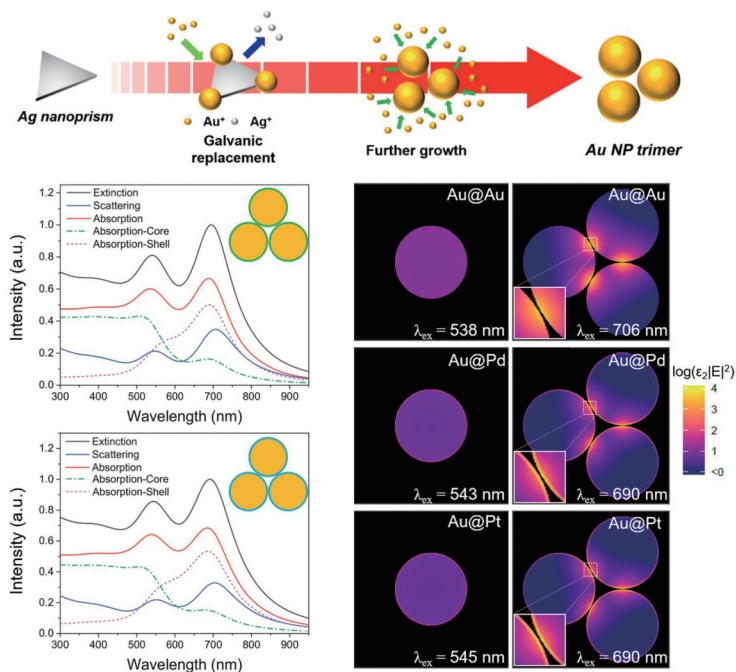


그림 5. 표면에 촉매 물질이 도입된 금 나노입자 클러스터의 합성 모식도와 플라즈몬 특성[*ACS Energy Lett.* 2020, 5, 3881–3890].

더 나아가, 금 나노입자 클러스터 표면에 촉매 활성을 지닌 팔라듐 혹은 백금을 도입하였을 때, 나노갭에서 형성된 강력한 플라즈몬 에너지 전달로 인해 향상된 광-증강 촉매 활성을 지님을 확인하였고 [Small 2017], 나노갭에서 증강된 플라즈몬 효과 뿐만 아니라 촉매 활성을 지닌 표면에서의 빛 흡수 효율이 향상되어 촉매 활성이 증강됨을 유한-차분 시간-영역(finite-difference time-domain, FDTD) 시뮬레이션을 통해서 규명하였다[*ACS Energy Lett.* 2020, 그림 5].

이러한 플라즈몬 금 나노구조를 반도체에 도입하여 광촉매에 응용한 연구 결과들과 금 나노구조에 풍부한 나노갭을 유도하는 독창적인 합성법에 관한 최근 연구 결과들은 『*Acc. Chem. Res.*』에 리뷰 논문으로 발표되었다[*Acc. Chem. Res.* 2022].

Project

3

구조와 성분이 제어된 백금-기반 전기화학 촉매 개발

본 연구단은 백금-기반 나노구조체의 구조 및 성분의 정교한 제어 기술을 확보하고 나노 구조체의 구조와 촉매 활성에 관한 근본적인 이해를 통해 전기화학적 촉매 활성을 극대화하고자 하며 궁극적으로는 상용 가능한 연료전지 촉매의 개발을 목표로 하고 있다. 특히 백금-기반 나노구조체에 친산소성 금속들을 추가적으로 도입하여 다중금속 성분 나노구조체를 합성하는 것은 백금의 표면 전자구조를 제어할 수 있게 해 반응물의 흡·탈착을 용이하게 하거나 반응의 중간체를 백금 표면에서 손쉽게 탈착하게 하여 전기화학적 촉매 활성을 향상시킬 수 있는 효과적인 전략이다. 본 연구단은 삼중 합금 성분을 지니면서도 수 나노미터 두께를 갖는 나노시트 구조를 일산화탄소로 포화된 용액을 이용하여 성공적으로 합성하였고, 합성된 나노시트는 다중 합금 성분 및 넓은 표면적으로 인해 전기화학적 에탄올 산화반응에 있어 탁월한 촉매 활성을 지님을 확인하였다[*Angew. Chem. Int. Ed.* 2016]. 또한, 용액 속의 히드라진 농도의 제어를 통해 환원속도를 적

절하게 조절하게 되면 삼중 합금 금속 나노구조체의 성분을 체계적으로 조절할 수 있음을 밝혀냈으며[ACS Appl. Mater. Interfaces 2019, 그림 6a], 용액 속의 염화 세트리모늄(cetyltrimethylammonium chloride, CTAC)의 농도를 정교하게 제어하게 되면 삼중 합금 성분을 지니면서 중공 구조를 갖는 나노구조체의 중공도를 체계적으로 조절할 수 있음을 확인하였다[ACS Appl. Mater. Interfaces 2021, 그림 6b].

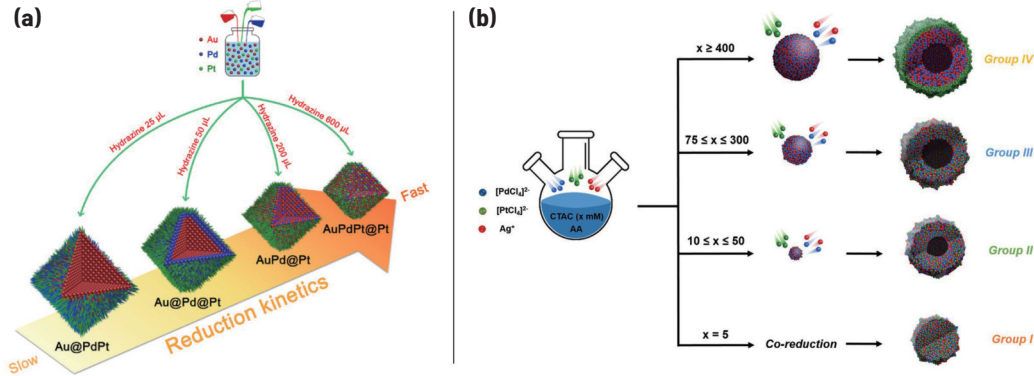


그림 6. 삼중 합금 금속 나노구조체의 구조와 성분을 제어하는 기술[ACS Appl. Mater. Interfaces 2019, 11, 25901–25908; ACS Appl. Mater. Interfaces 2021, 13, 45538–45546].

이외에도 본 연구단은 백금-기반 나노구조체의 정교한 구조 제어를 통해서 촉매 구조가 전기화학 활성에 미치는 영향에 대한 근본적인 이해를 하고자 하였다. 백금의 환원 속도를 제어하여 {110} 결정면으로 둘러싸인 사방십이면체(rhombic dodecahedron) 팔라듐 나노결정 표면 위에 백금을 두께별로 성장시켜 백금의

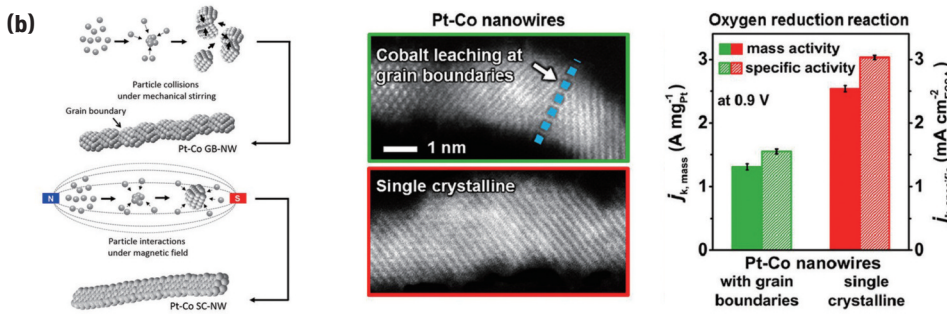
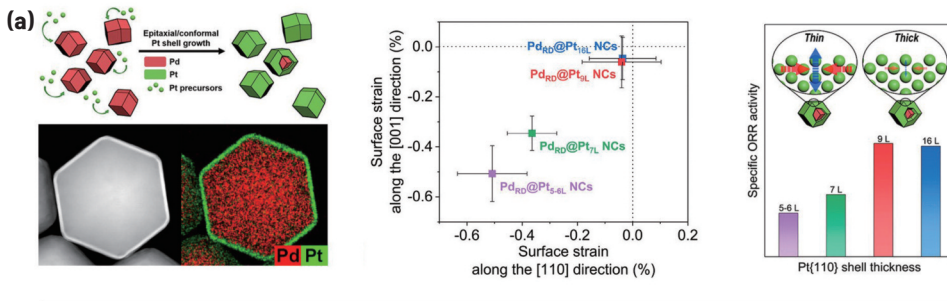


그림 7. 백금-기반 나노구조체에서 (a) 표면 변형효과[Nano Lett. 2022, 22, 9115–9121] 및 (b) 표면 결합[ACS Catal. 2022, 12, 3516–3523]이 전기화학적 산소 환원 반응에 미치는 영향.

{110} 결정면에서의 표면 변형 효과와 촉매 활성 간의 상관관계를 정량적으로 분석하였으며[Nano Lett. 2022, 그림 7a], 자성을 띠는 코발트 원소가 도입된 백금-코발트 이중 합금 나노와이어 구조에서의 표면 결합 정도를 강력한 외부 자기장으로 조절하여 표면 결합이 전기화학 활성화에 미치는 영향을 탐구하였다[ACS Catal. 2022, 그림 7b].

Project

4

정교하게 구조가 제어가 된 불균일계 촉매 개발

본 연구단은 정교하게 구조가 제어된 나노결정의 불균일계 촉매로서의 응용 가능성을 모색하고 있다. 연구단은 조성이 조절 가능한 팔라듐-은 이중합금 정팔면체 나노결정을 합성하고, 표면에 팔라듐을 원자 층 단위로 제어하면서 적층하여 두께가 조절 가능한 코어-셸 나노결정을 성공적으로 합성하였다. 원자 층 단위의 팔라듐 셸의 두께 조절에 따라 리간드 효과와 표면 격자 변형효과가 미세하게 제어되는데 셸 두께에 따른 나노결정의 촉매 특성을 고찰해본 결과, 팔라듐 셸 1.1층을 가진 나노결정이 불균일계 촉매를 이용한 액상 포름산 분해를 통한 수소생산 반응에서 세계 최고의 활성을 보였다[ACS Catal. 2019, 그림 8a].

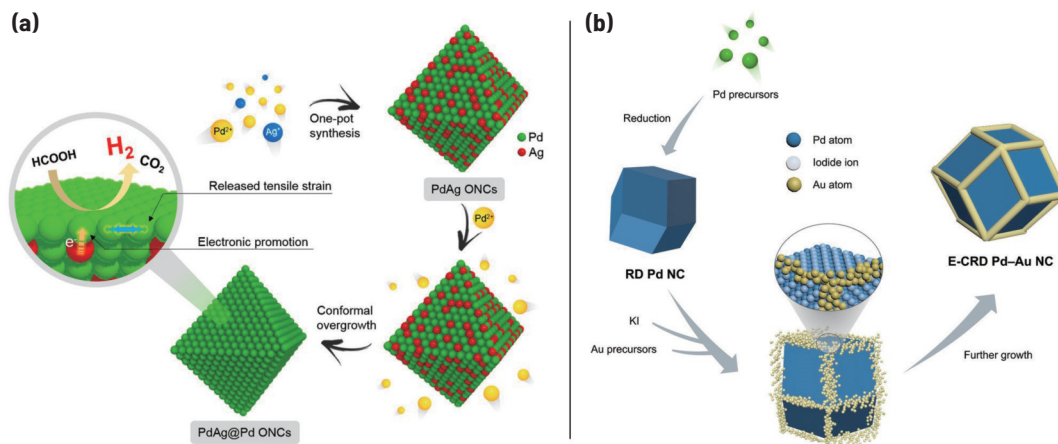


그림 8. (a) 원자 층 두께의 팔라듐 셸을 갖는 팔라듐-은 이중합금 정팔면체 나노결정[ACS Catal. 2019, 9, 819–826]. (b) 팔라듐 사방십이면체 나노결정의 가장자리에만 위치 선택적으로 금을 성장시키는 기술[Angew. Chem. Int. Ed. 2022, 61, e2022029].

또한, 본 연구진은 뛰어난 불균일계 촉매 활성을 지니는 나노구조체를 개발하기 위하여 나노입자 표면의 테라스와 가장자리 원자들의 촉매 특성을 직접 분리하여 이해할 수 있는 독창적인 플랫폼을 개발하였다. 먼저, {110} 결정면으로 둘러싸인 사방십이면체 모양의 팔라듐 나노결정을 합성한 뒤, 나노입자의 가장자리에만 촉매 활성이 없는 금속인 금을 위치 선택적으로 성장시켰다. 가장자리에만 위치 선택적으로 금이 성장한 나노입자의 촉매 활성은 오로지 테라스 팔라듐 원자에서만 오게 되고, 사방십이면체 팔라듐 나노결정과의 촉매 활성 비교를 통해 테라스와 가장자리 원자의 촉매 활성을 분리하여 파악할 수 있게 된다. 이를 이용하여 알카이놀 수소화 반응과 스즈키-미야우라 반응의 촉매 활성을 조사해본 결과 두 반응 모두에서 가장자리 원자

들이 테라스 원자들에 비해 뛰어난 촉매 활성을 지님을 확인하였다[*Angew. Chem. Int. Ed.* 2022, 그림 8b].

한편, 본 연구단은 기초과학연구원(IBS) 분자 활성 촉매반응 연구단의 백무현 KAIST 화학과 교수 연구팀과의 공동연구를 통해 전압을 가하는 것만으로 하나의 작용기를 가진 분자의 전기적 성질(electro-inductive effect)을 자유자재로 조절할 수 있는 새로운 방법을 제시하였는데[*Science* 2020, 그림 9], 이를 불균일계 촉매에 적용하여 촉매 활성을 조절하는 연구를 추진 중에 있다.

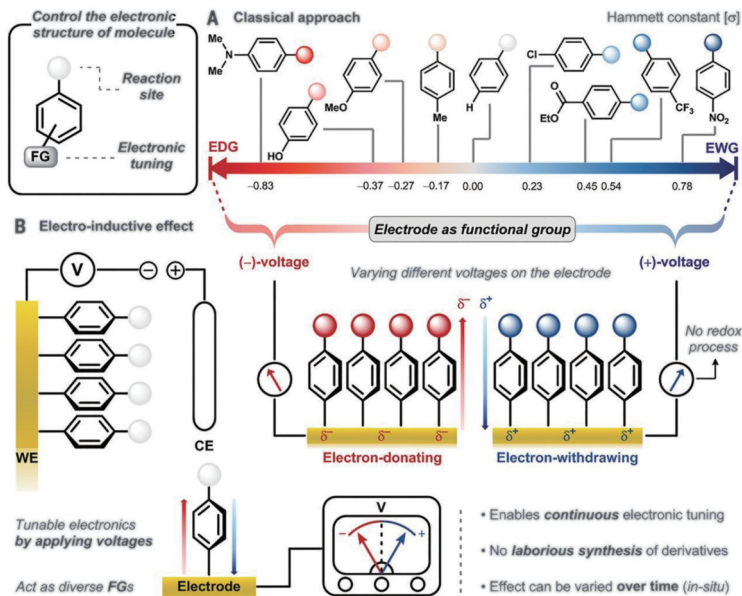


그림 9. 전극으로 분자의 전기적 성질을 조절하는 방법[*Science* 2020, 370, 214–219].

About

KAIST KAIST
나노텍토닉스 연구단



한상우 연구단장
KAIST 화학과 교수

연구단을 이끌고 있는 한상우 KAIST 교수는 서울대학교 화학과에서 학부(1995년)를 졸업하고 동 대학원에서 물리화학 전공으로 석사(1997년) 및 박사(2000년) 학위를 취득하였다. 이후 서울대학교 분자촉매연구센터(2000–2002년) 및 노스웨스턴 대학(2002–2004년)에서 박사 후 연구원으로 근무하다 2004년 경상대학교 화학과 교수로 국내 연구 활동을 시작하였다. 2009년 KAIST 화학과로 이직하여 현재 교수로 재직 중에 있다. 2015년부터 창의연구지원사업에 선정되어 나노텍토닉스 연구단을 이끌면서 이전에 시도되지 못했던 전혀 새로운 나노구조를 구현하고 이러한 나노 스케일 시스템에서 일어나는 광-전기 거동 현상 규명에 대한 연구를 진행하고 있다. 우수한 연구업적을 기반으로 2010년 대한화학회 재료화학분과 ‘우수연구자상’, 2014년 대한화학회 물리화학분과 ‘젊은물리화학자상’, 2017년 대한화학회 ‘Sigma-Aldrich 화학자상’을 수상하였으며, 2011년 백금-기반 산소환원 촉매개발 연구가 교육과학기술부 기초연구 우수성과로 선정되기도 하였다. 현재 『*Solid State Sciences*』 부편집장으로 활동하고 있다.

연구단에는 연구 책임자 한상우 교수를 포함한 박사 후 연구원 1명, 석·박사 통합 과정 9명, 석사 과정 2명 등 총 13명이 연구에 매진하고 있으며, 연구단에서 배출된 신진 연구자들은 학계 및 정부출연연구소, 산업계 등에 다양하게 진출해 있다.



세포화학동력학
창의연구단

서울특별시 동작구 흑석로 84, 중앙대학교
수리과학관(104관) 405-406호

☎ 02) 820-5240

✉ jaeyoung@cau.ac.kr

🔍 <http://cdlc.cau.ac.kr>

중앙대학교 세포화학동력학 창의연구단



세포 내 화학반응과 분자수송 동력학이 세포 기능과 거동에 미치는 영향의 정량적 이해

생명체가 어떻게 생체 내에서 일어나는 개별 화학 반응들의 근본적인 불확실성과 세포 환경의 불균일성을 극복하고 각종 생명 기능의 발현과 유지에 필요한 질서를 구현해 내는지는 아직도 신비로운 수수께끼로 남아있다. 생명체가 생명 기능을 정상적으로 발현하고 유지하기 위해서는 생체 내 효소 반응 네트워크들을 통해 생성되는 생 고분자들의 개수와 생성 및 소멸 시간의 통계적 요동을 일정한 범위 내로 유지해야 하는데 이에 실패할 경우 그 생명체는 질병이 발생하거나 생명 기능이 정지하게 된다. 생명체가 생체기능 발현과 유지에 필요한 생체분자 농도와 반응시간 조절을 어떤 반응과정들을 통해 얼마나 정확하게 구현할 수 있는지, 더 나아가 각종 외부 자극들이 생체 내 생 고분자들의 농도 및 생성과 소멸 동력학을 어떻게 변화시키는지를 정량적으로 이해하고 예측하는 것은 현대 과학의 중요한 목표 중 하나이다.

세포화학동력학 창의연구단(단장: 중앙대학교 화학과 성재영 교수)은 살아 있는 세포와 같은 복잡계에서 일어나는 다단계 효소 반응 및 활성/비활성 분자 수송 과정들과 이 과정들이 구성하는 세포 내 각종 네트워크들의 확률적 동력학을 정량적으로 기술하기 위해 “세포화학동력학”이라는 새로운 학문 분야를 개척하고 있다. 세포

내에서 일어나는 화학반응들의 반응 속도 계수는 복잡한 세포 환경에 따라 변화하는 확률변수이기 때문에 반응 속도 계수가 상수이거나 시간에 따라 변화하더라도 한가지 값만을 가진다고 가정하는 기존 화학반응 속도론으로는 정확한 기술이 어렵다. 또 세포 내 고분자들의 수송 동력학 역시 불균일한 세포 환경으로 인해 균일한 환경에서 일어나는 분자 수송 동력학과는 큰 차이를 보이게 된다. 세포화학동력학 연구단은 이와 같은 생체 내 화학 반응 속도와 분자 수송 동력학을 효과적으로 정확하게 기술할 수 있는 새로운 모델과 이론을 제시하고 이에 기반해 세포 내 화학 반응 및 분자수송 동력학 과정들의 네트워크로 구현되는 유전자 발현과 신호전달 과정들의 동력학 실험 결과들을 정량적으로 설명해 내는 연구를 수행하고 있다. 우리나라에서 처음 시작된 세포화학동력학은 궁극적으로 각종 생명현상을 물리와 화학 법칙들에 기반하여 정량적으로 이해하고 더 나아가 새로운 생명체를 디자인하고자 하는 현대 과학의 목표 달성을 위해 필요한 새 학문 분야이다.

세포화학동력학에서 개발된 반응 속도 모델과 이론들은 세포 내 생 고분자 및 대사물질들의 화학반응 및 분자 수송 현상을 기술하는 데에만 국한되지 않고 다양한 시스템에서 일어나는 일반적 생성·소멸 과정에도 적용될 수 있다. 최근 기존 이론들로 설명되지 않던 복잡한 나노 시스템에서의 나노입자 생성 동력학이나 나노입자 수송 및 융합 반응 동력학을 정량적으로 설명하여 나노 재료 분야 발전에도 기여하기 시작하였다.



그림 1. 세포화학동력학 창의연구단 주요 연구 분야

Project 1 세포화학동력학

생명현상을 발현하고 유지하는데 필요한 세포 내 화학 반응들은 그 반응속도 계수가 세포마다 다르고 시간에 따라서도 역동적으로 변화하는 복잡한 확률과정이다. 예를 들어 유전자 발현과정의 경우, 세포의 유전자 발현 조절 상태, 유전자 복사체 개수, 세포 주기, 세포 영양 상태 등 수 많은 환경변수에 따라 유전자 발현과정을

구성하는 화학 반응들의 속도가 달라지는데, 이 세포 환경변수들의 값이 세포마다 다르고 시간에 따라 요동치는 확률변수이기 때문에 이에 의존하는 반응속도 계수 역시 확률변수이다. 기존 시스템 생물학 분야에서 주로 사용되고 있는 이론인 고전 화학반응 속도론이나 마스터 방정식은 속도상수 개념에 기초하고 있기 때문에 반응 속도 계수가 동적인 확률 변수인 세포 내 화학반응의 경우 정확한 기술이 불가능하다. 세포 내 화학적 요동을 정량적으로 이해하기 위해서는 기존 접근법의 한계를 극복할 수 있는 새로운 반응 속도 모델과 이 모델에 기초해 반응 속도를 기술할 수 있는 새로운 반응속도 이론 개발이 요구된다. 본 연구단은 2015년 『Physical Review X』에 반응속도 계수가 세포 환경에 따라 확률적으로 요동치는 “역동적 반응과정(vibrant reaction process)” 개념을 제안하였다. 2018년에는 이 연구를 발전시켜 세포 내 일반적인 생성-소멸 과정을 거치는 분자들의 농도 평균과 분산의 시간에 따른 변화를 정확하게 기술할 수 있는 “화학 요동 법칙(Chemical Fluctuation Theorem)”을 『Nature Communications』에 발표하였다. 이 화학 요동 법칙을 사용하여 유전적으로 동일한 세포들의 mRNA 및 단백질 개수 조절 능력이 유전자 종류나 화학적 환경변화에 따라 변화하는 정도를 측정할 수 있는 다양한 실험 결과들을 정량적으로 설명하는 데 세계 최초로 성공한 바 있다. 최근 화학 요동 법칙을 확장하여 전사 유도나 항생제 스트레스와 같은 외부 자극에 따라 촉발되는 세포 내 유전자 발현량 및 발현량 요동의 시간에 따른 변화를 측정할 수 있는 다양한 실험 결과들도 일관되게 정량적으로 설명하는 데 성공하였다. 이 문제는 오랫동안 해결되지 않고 있던 난제로서 외부 자극에 따른 세포 반응을 정량적으로 설명하는 구체적인 모델과 이론을 최초로 제시한 만큼 다양한 관련 분야 실험 연구자들에게 널리 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.

이 외에도 한 균주의 대사산물이 다른 균주의 성장을 위한 영양분으로 작용하거나, 반대로 성장을 억제하는 등 균주 간의 다양한 상호작용이 존재하는 미생물 개체군의 도수 분포 동력학에 대한 포항공대 화학공학과

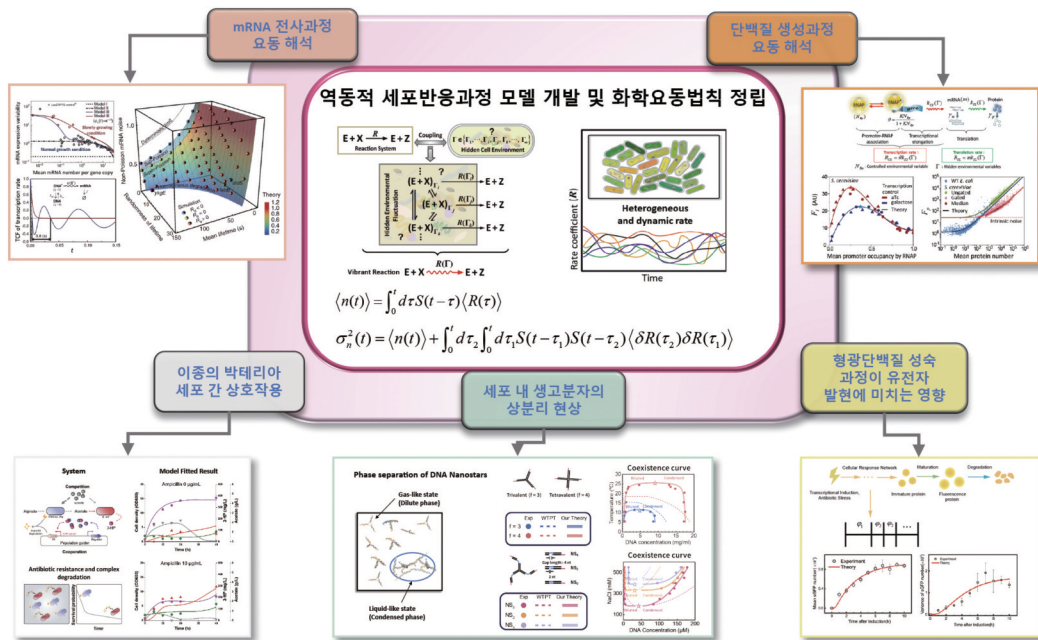


그림 2. 세포화학동력학 분야를 대표하는 화학요동법칙 방정식과 관련 연구들

정규열 교수 그룹과의 공동연구도 성공적으로 진행되어 그 첫 결과가 2022년 『Nature Communications』에 출판되었다. 기존에 미생물 개체군 분석을 위해 사용되는 모노드 방정식(Monod equation)은 하나의 균주를 제한된 영양분 하에서 배양하는 경우에만 적용할 수 있고 여러 미생물 집단이 상호작용하는 복잡한 시스템에 대해서는 적용하기 어렵다. 이 연구에서는 기존 모노드 방정식 접근법의 한계를 극복하고 미생물 개체군 내 각 균주들 및 대사산물들 농도의 시간에 따른 변화를 정량적으로 설명할 수 있음을 보였다. 이외에도 최근 세포 내 생 고분자들의 상 분리 현상을 설명하기 위해 통계열역학적 이론을 정립하는 연구도 이루어지고 있다.

Project

2

복잡계 내 분자 수송 동력학

세포화학동력학 창의연구단은 세포화학동력학 연구와 함께 세포 내를 포함하는 복잡계 분자 수송 동력학을 정립하는 연구도 함께 진행해 왔다. 최근 현대 통계물리학 난제 중 하나인 복잡계 분자 열운동을 정확하게 기술할 수 있는 새로운 수송방정식을 얻어내고 그 해를 제시하였다. 이 해는 기존의 브라운 운동 이론이나 연속시간 운동자 모델에 기반한 근대 열운동 이론으로 설명할 수 없었던 과냉각된 물이나 인지질 튜브를 따라 움직이는 콜로이드 입자를 포함하는 다양한 복잡계 열운동을 최초로 정확하게 설명해 내었다. 이 연구 결과는 서울대학교 이상엽 교수 그룹, 이화여대 김준수 교수 그룹, 서강대학교 성봉준 교수 그룹과 공동연구로 진행되었으며 2019년 『미국 학술원보(Proceedings of the National Academy of Sciences)』에 “Transport Dynamics of Complex Fluids”라는 제목으로 발표되었다.

수동적 열운동 이외에 세포 내 주요 수송 메커니즘인 모터 단백질의 활성 수송(Active Transport) 동력학에 대한 연구도 광주과학기술원 이강택 교수 그룹과의 공동연구로 이루어졌다. 이강택 교수 그룹에서 업컨버팅 나노입자(Upconverting Nanoparticle, UCNP)를 사용하여 관찰한 신경세포 내 모터 단백질(키네신, 다이네인)-소포체 복합체의 활성 수송 실험 결과는 그동안 제안되어 온 단순한 활성 수송 이론들로는 쉽게 설명되지 않는다. 세포화학동력학 연구단은 모터 단백질들의 ATP 가수분해 횟수와 모터 단백질의 이동 거리를 연관시키되 단백질 복합체 상태에 따라 단방향 운동과 양방향 운동이 번갈아 일어나는 수송 모델을 사용하여 이강택 교수 그룹에서 관찰한 모터 단백질-소포체 복합체의 이동 거리 분포, 특정 거리 이동 시간 등 다양한 실험 결과를 일관되게 정량적으로 설명하고 예측할 수 있었다. 이 연구결과에 따르면 분자 모터 복합체들은 단방향 운동을 하는 상태에 2% 밖에 머물지 않지만, 단방향 운동의 속도가 빨라 양방향 운동만을 하는 열운동에 비해 그 이동 거리 분포가 정규분포에서 크게 벗어난다. 그 정도가 시간에 따라 변화하는 양상을 분석하여 모터 단백질 단방향 및 양방향 운동 상태들의 지속시간도 얻어 낼 수 있었다. 이 연구 결과는 2019년 『Journal of Physical Chemistry Letters』에 출판되었다.

최근 이 신경세포 내 활성 수송과 관련 후속 연구가 진행되고 있다. 현재까지 타우 단백질의 과인산화가 신경세포에 미치는 생리학적 결과에 대한 논문이 다수 발표되었지만, 타우 단백질의 과인산화가 모터 단백질-소포체 복합체의 수송역학에 미치는 영향은 해당 분야에서 Open question임에도 불구하고 그동안 밝혀진 바가 없다. 세포화학동력학 연구단은 이강택 교수 그룹과의 공동연구를 통해 모터단백질-소포체 복합체가 정상세포에서는

초확산 현상을 보이는 반면 약물 처리를 통해 타우 단백질의 과인산화가 유도된 조건 하에서는 초확산이 이루어지지 않는다는 사실과 타우 단백질 과인산화가 미세소관의 구조적 안정성을 떨어뜨려 미세소관 상 모터 단백질들의 단일방향 활성 운동을 크게 제한한다는 사실을 밝혔다. 타우 단백질의 과인산화에 의한 모터 단백질-소포체 복합체의 수송 동력학의 변화는 치매와 같은 퇴행성 뇌질환의 새로운 병리기작을 제시하는 것으로 병리학적으로도 중요한 의미를 가지는 결과이다.

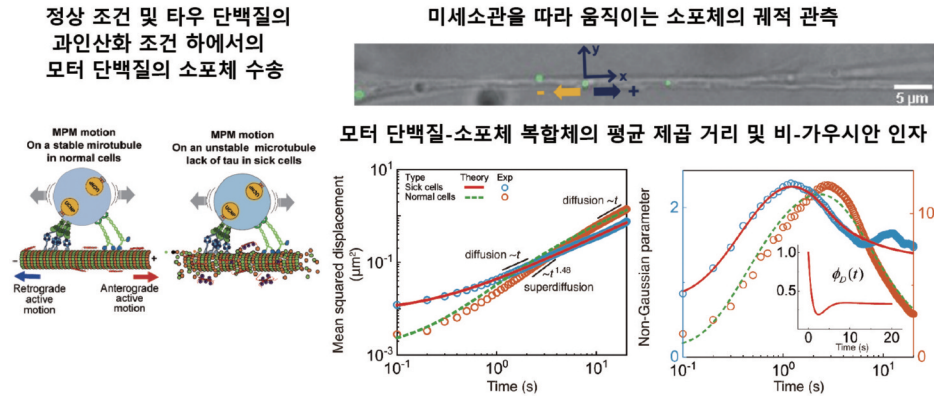


그림 3. 다양한 조건에서 모터 단백질-소포체 복합체의 활성 수송역학을 이론으로 해석한 결과

Project 3 나노입자 관련 재료과학

근년 세포화학동력학 창의연구단은 세포화학동력학 개발과정에서 축적된 복잡계 동력학 연구 경험을 활용하여 나노 시스템에서 일어나는 화학반응들의 동력학 연구도 수행하였다. 마이크로미터 크기 혹은 그 이상의 콜로이드 입자들이 균일한 액체에서 보이는 열운동과 응집반응은 각각 아인슈타인의 브라운 운동 이론과 스몰루호프스키의 확산지배 반응 이론으로 잘 설명될 수 있다. 그러나 서울대학교 화학공학과 박정원 교수 그룹에서 관찰한 그래핀 층 사이에 갇힌 액상 주머니 내 수 나노미터 정도 크기의 초미세 나노입자들의 열운동 및 응집반응은

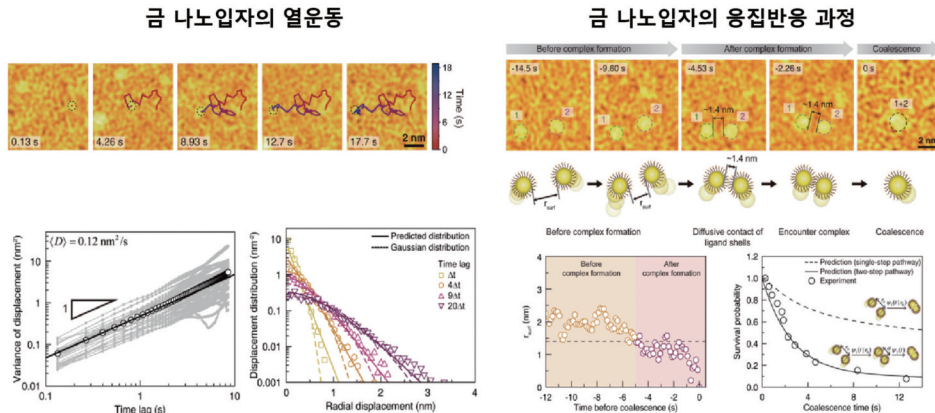


그림 4. 그래핀 액상 용기 내 금 나노입자의 열운동과 응집반응 과정을 새롭게 개발된 나노입자 수송 및 반응동력학 이론으로 해석하고 예측한 결과

기존의 확산지배 반응속도 이론으로 설명할 수 없었다. 본 연구단은 이를 설명하기 위해 역동적으로 변화하는 불균일한 액체 혹은 고체 환경 하에서의 열운동을 수행하며 결합반응을 하는 입자들의 반응을 정량적으로 기술할 수 있는 이론을 개발하였다. 이 이론은 세계 최초로 수 나노미터 크기의 초미세 금 나노입자들의 액체상 열운동과 응집 결합반응 동력학을 정량적으로 설명할 수 있었다. 해당 연구는 2021년 『Science Advances』에 출판되었다.

한편 코넬 대학 팡첸(Peng Chen) 교수 그룹과의 공동연구로 나노입자 촉매 시스템에서 일어나는 반응을 기술하는 확률적 반응 동력학도 정립하였다. 이로부터 이 나노 촉매 분야에서 난제이던 나노 촉매 특정 영역에 존재하는 촉매 자리(catalytic site) 수를 해당 나노 촉매 영역에서 생성되는 분자들의 개수 통계로부터 얻어 낼 수 있는 새로운 방법과 이를 측정할 수 있는 새로운 실험 관찰량을 제시하였다. 이 연구 결과는 2021년 『Physical Review Letters』에 발표된 바 있다. 최근 서울대학교 나노입자 IBS 연구단 현택환 교수, 박정원 교수 그룹과 공동 연구를 수행하여 이 실험 그룹에서 액체상 전자투과현미경으로 관찰한 나노입자 크기 성장 궤적 실험 결과들을 평형 및 비평형 통계역학과 확산지배 반응속도 이론을 결합하여 세계 최초로 정량적으로 설명하는 데 성공하였다.

현재 후속 연구를 통해 100년 이상 베일에 가려있던 나노입자 핵 생성 메커니즘을 규명하고 액체상 전자투과현미경 실험에서 조절할 수 없는 단량체 유입속도가 생성되는 결정핵 크기 분포와 결정핵들이 큰 결정으로 상전이를 일으키는 시간에 미치는 영향을 정량적으로 예측하는 연구를 수행하고 있다.

새로운 이론

$$J_n(t) = k_n^d \left(e^{-\beta[\mu_n^s - \mu_1(t)]} \rho_{n-1}(t) - \rho_n(t) \right)$$

$$\mu_n^s = \mu_\infty^s + \frac{c_1}{r_n} + \frac{c_2}{r_n^2} - \frac{4 + \alpha}{r_n^3}$$

$$\mu_1(t) = \mu_{1,\infty} + k_B T \ln \left[\rho_1(t) / \rho_{1,\infty} \right]$$

나노입자의 성장동력학

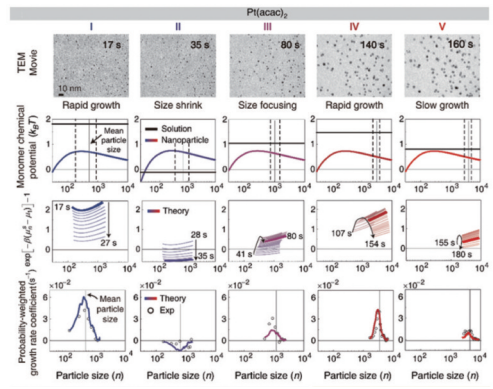
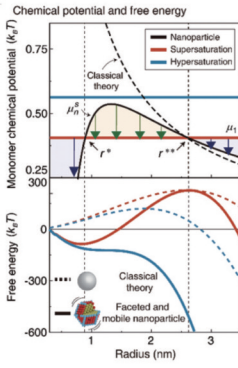
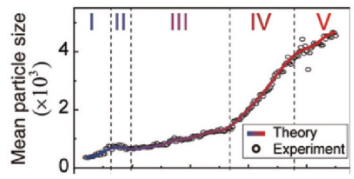
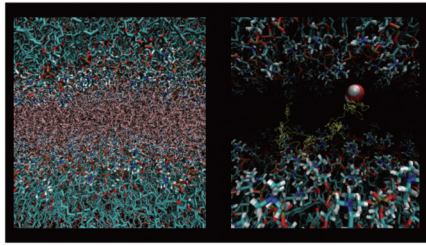


그림 5. 용액 상에서의 나노입자 성장 동력학을 정량적으로 이해할 수 있는 새로운 모델 및 그 해석 결과

Project 4 분자 동력학 전산모사 및 인공지능 기술활용

본 연구단에서 진행되는 연구는 대부분 실험을 통해 직접 관찰된 복잡계 반응 동력학에 대한 정량적 이해를 가능케 하는 모델과 이론의 수립에 중점을 두고 있지만 분자동력학 전산모사나 인공지능 기술 역시 최근 연구에 활용하고 있다.

인지질 세포막 근처의 계면 물 분자의 운동



질병에 대응하는 환자별 맞춤 치료법 제안

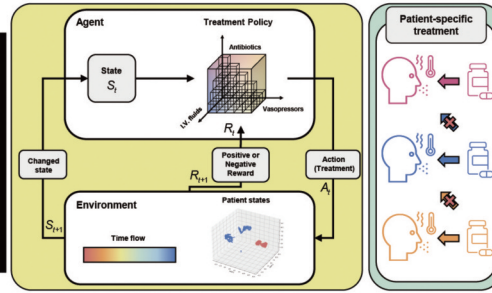


그림 6. 연구단에서 진행하고 있는 분자 동력학 전산모사 시스템과 인공지능 활용 연구 개요

고려대학교 분자 분광학 및 동력학 IBS 연구단 조민행 교수 그룹과의 공동연구로 인지질 세포막에 의해 나노미터 수준으로 제한된 환경에서 물분자들의 비정규 열운동을 분자동력학 전산모사 실험을 통해 조사하고 생체 내 제약된 공간 내 물분자들의 비정규 열운동이 따르는 수송방정식을 제안하였다. 이 새로운 수송방정식의 해는 분자동력학 전산 모사로 얻어낸 다양한 실험 결과들을 일관되게 정량적으로 설명할 수 있는 것으로 드러났다.

최근 기계학습 혹은 인공지능 기술이 여러 학문 기술 분야에 걸쳐 혁신을 일으키고 있다. 본 연구단은 복잡계 화학동력학 기초연구와 딥러닝 기반의 인공지능 연구를 융합하여 질병 조기 진단 모듈 및 점수체계, 환자 상태의 동적 변화를 기술할 수 있는 새로운 알고리즘과 최적화된 치료방법을 개발 및 제안할 수 있는 의약학 산업 응용연구도 수행하고 있다.

About



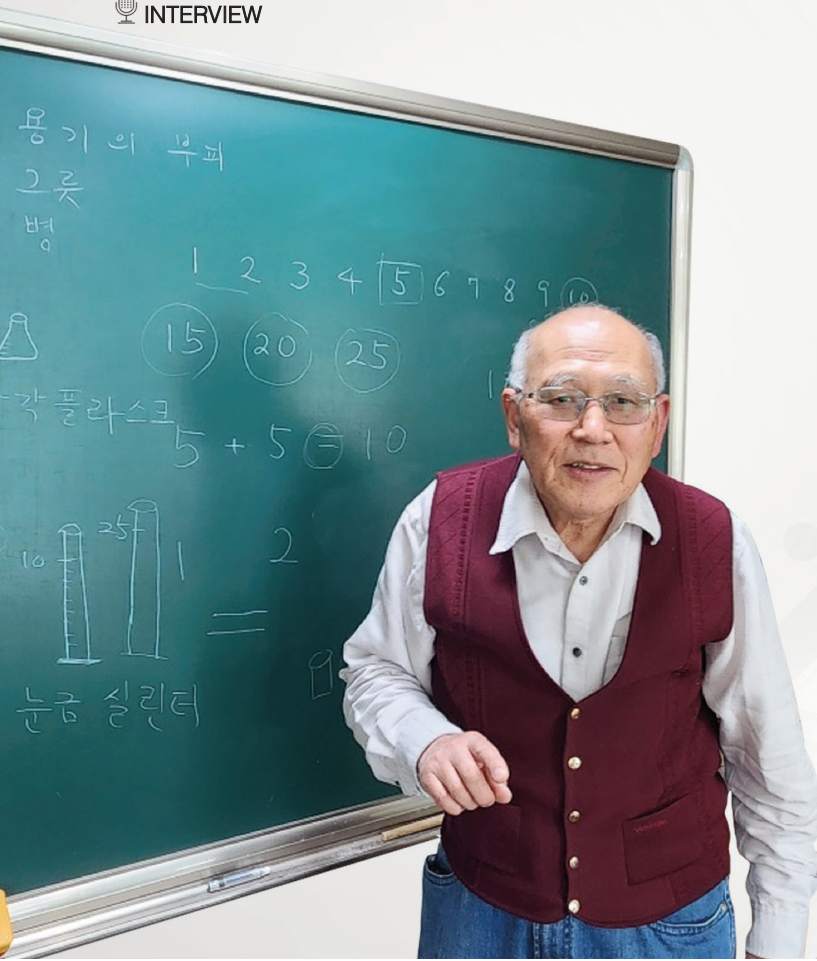
중앙대학교
세포화학동력학 창의연구단



성재영 연구단장
중앙대학교 화학과

“중앙대학교 화학과 세포화학동력학 창의연구단은 생명체가 생체기능 발현과 유지에 필요한 생체분자 농도와 반응시간 조절을 어떤 반응과정들을 통해 얼마나 정확하게 구현할 수 있는지, 더 나아가 각종 외부 자극들이 생명체 내 생 고분자들의 농도 및 생성과 소멸 동력학을 어떻게 변화시키는지를 정량적으로 설명하고 예측할 수 있는 정확한 세포 모델을 화학반응 네트워크차원에서 수립하고 이를 기반으로 정밀의학 및 의약학 산업 발전에 기여하고자 합니다.” 연구단을 이끌고 있는 성재영 교수는 서울대학교 화학과를 졸업하고, 동 대학원에서 스몰루호프스키의 비가역확산지배 반응 속도 이론을 가역 확산지배 반응으로 적용범위를 넓히는 연구를 수행하여 박사 학위를 취득하였다. 그 후, MIT 화학과에서 박사 후 연구원으로 근무하며 생명현상을 세포 내 화학

반응 네트워크 차원에서 정량적으로 이해하려는 시스템 생물학에 관심을 가지기 시작했다. 2004년 중앙대학교 화학과 교수로 부임한 이후 해당 연구를 본격적으로 수행해 왔고, 활발한 연구 활동을 통해 학문적으로 뛰어난 성과들을 거두어왔다. 그 연구 성과를 인정받아 2015년 12월부터 과학기술정보통신부 산하 한국연구재단의 개인기초 과제인 리더연구자(창의적 연구) 지원사업을 수주하여 수행하고 있으며, 2015년 대한화학회 제1호 ‘신국조 학술상’, 2017년 국제 통계물리학회 SigmaPhi에서 ‘최우수 발표상’, 2021년 ‘입재물리화학상’을 수상한 바 있다. 현재 연구단에는 연구책임자 성재영 교수를 포함하여 김지현 부교수, 박사 후 연구원 2명, 박사 과정 3명, 석·박사 통합 과정 6명 등 총 13명이 세포화학동력학 분야와 복잡계 화학동력학 및 통계열역학 분야를 개척하고 있다.



화학세계가 만난 화학자 ⑩

“인생은
내가 받은
은혜를 갚아가는
과정이다”



〈화학세계가 만난 화학자〉에서는 대한민국 화학계에 공헌한 화학자와의 인터뷰를 소개해 드리고 있습니다. 이번 호에 모신 이창규 강원대학교 명예교수님께서서는 재임 기간 강원대학교에서 유기화학 분야의 연구와 교육에 크게 공헌하셨습니다. 특히 헤테로고리 합성 분야와 탄수화물의 구조결정 분야에서 활발한 연구를 하셨습니다. 정년 퇴임하신 2012년 8월 이후에는 고향인 강원도 원주시 부론면에서 어린 학생들을 위한 무료과학교실을 운영하고 계십니다. 한 편의 영화로 찍어도 손색이 없을 것 같은 감동적인 스토리를 들려주신 이창규 교수님의 인생에 대한 인터뷰를 소개합니다.

[모더레이터: 한순규 교수 (KAIST 화학과)]

1. 교수님께서서는 1947년 지금 계신 강원도 원주의 부론면에서 태어나셨습니다. 아주 오랜 시간이 지나긴 했지만, 교수님의 유년 시절에 대해서 알려주실 수 있을까요?

저는 6·25 전쟁 중 다섯 살(만 4살) 때 넘어져서 오른쪽 무릎을 다쳐 거의 집안에서만 있었고 걸지를 못해서 초등학교 1,2학년은 학교에 다니지 않았고 3학년 한두 달 다니고 4학년부터는 왼쪽 다리가 성장해서 몸을 지탱 해주어 몹시 절면서 4,5,6학년을 다녔습니다. 5학년 1학기까지는 집과 학교가 가까워서 걸어 다니는 것이 그런대로 문제는 없었지만 5학년 여름에 학교에서 약 1.6 km 떨어진 윗동네로 이사를 하였기에 학교에 다니는 것이 좀 힘들었습니다. 참 고맙게도 동네 어른들이 제가 논두렁 길을 걸어오는 것을 보시고는 학교까지 업어다 주시곤

했습니다. 그렇게 동네 어른들의 등에 업혀서 등교를 할 때 그 등이 어찌나 따뜻했는지 모릅니다. 그리고 이 은혜는 꼭 갚아야지 하는 생각을 했던 것 같습니다. 그런 분을 만나는 날은 등교가 쉬웠지만 그렇지 못한 날에는 무릎 통증을 참으면서 걸어야 했습니다.

당시 부론에는 버스가 저녁때 원주에서 와서 아침 일찍 돌아가면 온종일 어떤 교통수단도 없었고 원주까지 80리를 걸어서 가야 하는데 어떤 의료상의 치료는 받을 수가 없었고 무당이 굿을 하는 것이 유일한 치료였지요.

6학년 여름방학 때 서울에서 고모님과 고종사촌 형이 오셔서 형에게 “나도 서울에 가서 학교에 다닐 수 없나?”라고 물었던 것이 우여곡절 끝에 중학교를 서울로 진학하게 된 계기가 되었습니다. 중학교 입학시험에 체력장을 보는데 저는 아무것도 할 수 없는 데다가 시골에서 배운 것이 별로 없었기에 1차는 떨어졌고, 형이 2차로 경신중학교를 지원하도록 해주었습니다. 이 학교는 Underwood 선교사가 세운 학교인데 저 같은 장애인들을 많이 입학시켜주었습니다. 학교가 큰 아량을 베풀어주어 저를 합격시켜주었다고 생각합니다.

당시 할머니께서 서울에 오셔서 저를 돌보시면서 학교까지 가방을 들어다 주셨는데 3학년 봄 돌아가셨습니다. 그 후로는 혼자서 아픔을 참으며 학교에 다녔습니다. 중학교를 졸업하고 경신고등학교 시험에 합격은 했지만 아버지의 반대로 고등학교 진학을 못하고 시골에서 1년간 어머니께서 하시는 농사일을 거들면서 지냈습니다. 그 해가 5·16 군사 정변이 일어난 다음 해였는데 극심한 가뭄으로 흉년이 들어서 가을 추수를 하고 방앗간에서 벼를 찧어 빗을 갠고 나니까 다시 먹을 식량을 위해 이자가 50퍼센트인 장리 쌀을 빌려야 했습니다. 어린 마음에 농사를 지어서는 가난의 굴레를 벗어나기가 어렵다는 생각을 하고 다시 서울로 가서 경신고등학교를 찾아가셨습니다. 당시 중고등학교를 선생님들이 함께 가르치셨기 때문에 제가 다시 공부할 수 있도록 입학을 시켜주셨습니다.

중학교 졸업 후 1년 동안 제가 학교에 다니지 않은 것을 보시고 선생님들께서 저의 집안 사정이 좋지 않은 것을 짐작하셨던 것 같습니다. 그래서 제가 입학한 후 얼마 지나지 않아 학교에서 전무후무한 “장학생 선발고사” 제도를 시행하였습니다. 3달에 한 번씩 다섯 과목(국어, 영어, 수학, 과학, 사회)시험을 봐서 성적이 우수하면 등록금을 면제해주는 제도였습니다. 이 장학금을 받으려고 고1 때 아주 열심히 공부했습니다. 평균 90점 이상을 받았고 고1 시절 2, 3, 4분기 동안은 등록금을 면제받았습니다. 고2 때부터는 교과과정이 어려워지더군요. 그래서 평균 80점 이상을 받아서 등록금의 반액을 면제받았습니다. 고3 때는 시험이 더 어려워져서 평균이 70점 정도로 등록금 면제는 받지 못했습니다. 졸업 후 아주 오랜 세월이 지나 안 사실인데, 제가 졸업한 후에 “장학생 선발고사” 제도는 시행되지 않았더군요. 지금도 경신학교에는 고마운 마음이 큼니다.

2. 교수님께서 1971년 연세대학교에서 화학과 이학사를 취득하셨습니다. 특별히 화학을 전공으로 정하신 이유나 있으셨나요?

고3 졸업 무렵 대학 입시를 딱 한 번만 봐서 합격하고 고향에 내려가 다시 농사를 짓는다면 고개를 들고 다닐 수는 있을 거라는 생각을 했습니다. 어차피 대학에 갈 형편은 못되었으니까요. 그래서 담임 선생님께 사정을 말씀드리고 제가 합격할만한 대학과 학과를 하나만 짚어달라고 했더니 화학전공이시던 그 선생님께서 “너 연세대 화학과 가면 붙어.”라고 말씀하셨습니다. 그래서 그분의 조언대로 연세대 화학과에 지원하였고 그분의 예측대로 합격한 것이 제가 화학을 평생 하게 된 까닭입니다.

저의 대학생활도 순탄하지만은 않았습니. 당장 아버지께서는 제가 대학에 다니는 것을 반대하셨습니다. 아버지의 반대를 무릅쓰고 당시 어느 정도 경제적으로 넉넉하셨던 큰아버지의 도움으로 연세대학교 화학과에 등록할 수 있었습니다. 하지만, 학교에 다니다 보니 무릎이 건널 수 없을 정도로 아파왔습니다. 어머니께서 서울로 오셔서 그 때 처음으로 서울대학교 병원에서 “결핵성 관절염”이라는 진단을 받았습니다. 지금은 약을 먹고 쉽게 낫는 병

이었지만 그 당시 저의 관절은 이미 많이 손상된 상태였습니다. 그저 통증 없이 걸을 수만 있기 위해 수술을 받았고, 그 이후 무릎을 굽혔다 폼다 할 수 없게 되었습니다. 수술한 날이 아직도 생생히 기억나네요. 1966년 5월 5일 어린이날이었습니다. 수술 후 요양을 하고 1967년 봄학기에 연세대학교에 복학하였습니다. 그래서 67학번 입학생들과 4년을 같이 다녔습니다.

3. 교수님께서 1976년 University of Minnesota에서 유기화학 박사학위를 받으셨습니다. 당시 유학생생활에서 힘들었던 일, 미국생활 중 새로이 배우신 점 등이 있으셨나요?

제가 미국 유학을 간 것은 무슨 청운의 꿈을 가슴에 품고 소위 말하는 ‘유학 장도’에 오른 것이 전혀 아닙니다. 대학 4학년 초부터 취직을 하려고 공고가 나는 회사마다 입사원서를 내고 필기시험과 면접을 보러 참 많은 곳을 찾아갔었습니다. 그 당시 우리 사회의 장애인에 대한 인식은 한마디로 ‘사람이 아닌 사람’이었습니다. 필기시험에 합격했으니 면접을 보러 오라고 해서 가면 제가 병역면제를 받은 이유를 물었고 무릎을 구부리지 못한다고 하면 그 것으로 면접은 끝이고 불합격 통지조차 해주지 않았습니다. 이런 형편을 아신 연세대 화학과 은사님들께서 저를 취직시키려고 졸업생들에게 부탁하시기도 했지만 취업이 어려울 거라는 것을 아시고 결국 대학원에 진학하라고 말씀하셨습니다.

1971년 3월에 연세대학교 화학과 대학원에 입학하였는데 지금은 작고하신 한치선 교수님께서 저를 연구실로 호출하였습니다. 그 자리에서 “지금의 대한민국은 너를 필요로 하지 않는다. 유학을 가라” 하셨습니다. 교수님 오피스를 나와서 빈 강의실에 앉아 참 많이 울었던 기억이 납니다. 어쨌든 그때부터 TOEFL과 GRE시험 준비를 했고 1971년 가을에 미국 대학원에 지원하였고, 1972년 8월에 유학을 가게 되었습니다.

당시 유학생이 환전해서 가져갈 수 있는 달러는 100불이었습니다. 정말 하나님의 도움으로 미국에 도착한 그날 International Student Center에서 host family로 Lidfors(Arnold and Marian) 가정을 배정해 주었는데 그분들의 가정에서 6주간 머물면서 오리엔테이션에 참가하였고 기숙사가 여는 날 그분들이 저를 기숙사로 데려다 주었고, 추수감사절, 성탄절, 부활절, 등 기숙사에서 식당을 달을 때마다 저를 데려다가 그분들 가정에서 지내도록 해주셨습니다. 이분들과의 교류는 제가 귀국한 후에도 계속되었는데 Arnold는 2017년 9월에, Marian은 2022년 5월에 돌아가셨습니다. 그분들의 아들과는 지금도 소식을 나누고 있습니다.

University of Minnesota 화학과에는 1940년경에 제정된 Lee Irvin Smith Award가 있습니다. 유기화학을 전공하는 고년 차 대학원생 중 가장 모범이 되는 한 사람을 2년 차 이상의 대학원생들이 사전투표로 선정하고 매년 5월 초에 가장 큰 친교 행사인 490 Party(490호는 미네소타 대학 화학과에서 가장 큰 실험실)에서 시상식이 이루어집니다. 저는 졸업하기 전인 1976년에 이 파티에서 이 상을 수상하게 되었습니다. 수상자에게는 은색 비커가 부상으로 주어지는데 거기에는 다음과 같은 수상 이유가 적혀 있었습니다.

“In recognition of high ability and leadership in the field of organic



Host family인 Marian과 Arnold Lidfors 부부.



Host family 가족들이 제가 유학을 마치고 떠나던 날(1977년 2월) 가족 만찬을 하던 모습(왼쪽부터 어머니인 Marian, 둘째 아들 Bill, 아버지인 Arnold, 큰 아들 Bob, 며느리 Barbara, 손녀 Jessica)

chemistry during his years as a graduate student at the University of Minnesota.”

생각해보면 대학원 시절 저의 실험실뿐 아니라 다른 실험실에서도 학생들이 궁금한 것이 있으면 저에게 자주 물어보았는데 그때마다 어떻게든 그들에게 도움을 주려고 노력했던 모습이 그들에게 “leadership”으로 비쳤던 모양입니다. 이날 수상 소감으로 “나는 많이 부족하지만 여러분이 나를 사랑해주었기 때문에 지금 이 자리에 있을 수 있었다. 한국에 돌아가서 이 컵에 담긴 사랑을 한국 학생들에게 나누어주겠다”라고 말했습니다.

유년, 청소년, 대학생 시절, 그리고 유학을 가기 전까지 저는 우리나라에서 어머니와 형제 자매들 외 누구로부터도 사랑은커녕 사람 취급도 받기 어려운 존재라는 생각을 늘 했었는데 host family와 미국 학생들로부터 사랑을 받고 있다는 것을 깨달으면서 저의 자신에 대한 관념이 조금씩 바뀌기 시작했고 저도 이들에게서 받은 사랑을 내 나라의 학생들과 이웃들에게 나눠주어야 한다는 신념이 가슴에 싹터서 자리하게 되었습니다. 그것이 제가 유학을 해서 얻은 가장 큰 수확이라고 늘 생각하고 있습니다.



지도 교수님이신 Wayland E. Noland 교수님(정면을 보시는 분)과 대학원생 모습



‘Lee Irvin Smith Award’ 부상으로 받은 컵

4. 교수님의 인생에서 가장 많은 영향을 미쳤던 분은 누구셨나요?

평생을 장애인으로 사는 아들에 대해서 ‘당신 전생의 죄로 말미암아 자식이 병신이 되었다’고 한숨을 늘 쉬셨던 어머니, 그 눈물을 잊을 수 없고, 그래서 어머니에게 그리고 누님과 동생들에게 부끄럽지 않은 삶을 살아가리라 늘 자신을 돌아보게 되었습니다.

5. 교수님께서 강원대학교에 부임하시게 된 스토리를 알려주실 수 있을까요?

제가 강원대학교 몸담게 된 이야기를 하려면 아내를 만났던 이야기부터 해야겠네요. 경신고등학교 1학년 재학 중인 어느 봄날 학교 전체가 창경궁으로 사생대회를 나갔을 때였습니다. 그곳에서 어느 시각장애인이 하모니카를 부는 모습을 봤습니다. 그 옆에 아이를 포대기로 싸서 엷은 여인이 벽을 바라보고 서서 그 음에 맞춰 노래를 부르는 것이었습니다. 아마도 수치심 때문이었을 것입니다. 다리를 몹시 절었던 저는 그때 결혼하지 않겠다는 결심을 하게 되었습니다. 저의 배우자에게 저의 장애로 인한 어려움과 수치심을 짐 지우고 싶지 않았고 그래서 안 된다고 생각했습니다. 이러한 저의 생각은 1977년 미국에서 박사 학위와 포스닥을 마치고 연세대학교 화학과 조교수로 임용되어서도 마찬가지였습니다. 아버지와 어머니에게 저의 그러한 생각을 말씀드렸고 이해를 구했습니다. 그런데 종종 어머니가 혼자서 통곡하시는 것을 듣게 되었습니다. 당신 전생의 죄로 제가 병신이 된 것이고 그 때문에 결혼도 안 한다며 우시는데 마음이 참으로 아팠습니다.

1977년 연세대학교에서 대학원 강의를 하는데 이화여자대학교 재학 중이던 당시 제 아내(한인숙 강원대학교 과학교육학부 명예교수) 제 수업을 들었습니다. 학부 졸업 후 교사 생활도 2년 반 동안 했던 당시 제 아내의 수업을 들으면서 유학을 가고 싶다는 뜻도 말했습니다. 특히 연구와 관련하여 저에게 많은 것을 물어보았고 저는 아는 대로 설명을 해주었습니다. 그렇게 대화를 많이 나누다 보니 데이트도 하게 되었습니다. 서로의 마음을 확인하고 조심스럽게 아내에게 프러포즈를 했고 아내는 받아주었습니다. 하지만 장인 장모님의 반대가 아주 심했습니다.

니다. 장애인인 저를 사위로 받아들이기가 쉽지 않았을 겁니다. 부모님들이 반대하는 결혼을 하는 것이 옳은지 갈등도 많았지만 저와 아내는 결혼하기로 결심을 했고, 마침 어머니의 회갑 날짜에 맞춰서, 1979년 2월에 연세대학교 채플에서 오전 11시에 결혼식을 하고, 12시에 어머니 회갑연을 겸한 결혼 피로연을 하였습니다. 당시 하객으로 KAIST의 심상철 교수님도 오셔서 축하해주신 기억이 선명합니다.

결혼 1년 후인 1980년 1월 저는 Vince 교수님의 초청으로 미네소타 대학교 약학과 연구원 신분으로 입신한 아내와 함께 미국에 갔습니다. 아내는 그해 5월 출산을 했고 9월부터 화학과 대학원에 입학하게 되어 물리유기화학을 전공하였습니다(지도 교수: Maurice Kreevoy). 그 후 제가 먼저 1982년에 강원대학교 화학과에 임용되었고 아내는 1984년 8월에 박사 학위를 받고 강원대학교 과학교육학부에 부임하게 되었습니다.

결혼 후 연구원 신분으로 다시 Vince 연구실에 갔을 때(1980년) 큰아이를 낳고 차 없이 살면서 아기 기저귀와 생필품을 사서 stroller에다 매고 back pack에 담아 운반하던 시절의 사진으로, stroller는 미국 교회 친구들이 1980년 4월 종려 주일 날 baby shower party를 전 교회적으로 열어서 아기에게 필요한 모든 용품을 마련해 준 것 중 하나입니다. 이런 이웃을 따듯한 사랑을 받아본 아내가 파티 내내 눈물을 쏟았던 기억은 지금도 부활절 무렵이 되면 떠오르면서 우리가 무엇을 해야 하는지를 일깨워 줍니다.



■ Postdoc 연구시절 그룹 사진으로 맨 왼쪽 넥타이 맨 분이 Robert Vince 교수님. 오른쪽에서 두 번째 분이 이창규 교수님.



■ 미네소타 대학교 연구원 시절, 큰 아이와 이창규 교수님

6. 재임 기간에 강원대학교에서 수행하신 연구내용을 간단히 말씀해주시 수 있을까요?

Five-membered heterocyclic compounds의 방향성과 반응성, 그리고 1987년과 1993년에 방문교수로 다시 University of Minnesota에 갔을 때 새로이 배우게 된 다당류의 구조 결정에 관한 연구를 주로 수행하였고, 1997년에 강원대학교 공동실험실습관에 400 MHz NMR기기가 도입되어 기기담당 교수 임무를 맡게 되어 대학 전체의 이공계 전공 연구자들에게 이 기기의 활용도를 증대시키기 위해 많은 노력을 했습니다. 우선 기기 사용빈도를 높이기 위해서 그 동안 제가 합성했던 물질들의 NMR 스펙트럼 특징을 분석하여 이론적인 설명을 제시하는 논문들을 여러 편 발표하기도 하였습니다.

7. 교수님께서 강원대학교에서 재임하시면서 혹은 그 이후에도 갖고 계신 교육 철학이 있으신가요?

대학 교육이란 천재를 뽑아서 조금 더 나은 천재로 만드는 것이 아니라 그저 보통이거나 그보다도 못한 수준의 학생들을 잘 가르쳐서 사회의 일원으로서 가슴을 펴고 당당하게 살면서 사회에 기여하는 인재를 만드는 것이라고 늘 생각했고 그러기 위해 저의 모든 것을 쏟아 붓겠다고 다짐하면서 강의와 연구를 했습니다.

1982년 제가 처음에 강원대에 부임했을 때는 강원대학교에 대한 사회적인 인식이 지금보다도 매우 낮았습니다. 학생들도 학교에 대한 자부심이 낮았습니다. 많은 이유로 고민하고 방황하는 학생들을 보면서 저는 재직하는 동안 온 힘을 쏟아 강원대를 명문대로 만들어 학생들이 가슴을 펴고 학교에 다니게 하겠다고 다짐하였습니다. 부임 초기 학생들에게 부족한 것이 무엇인지 살펴보니 영어 실력이었습니다. 그래서 영어 0교시 프로그램을 만들었습니다. 화학과뿐 아니라 누구든 영어 공부를 하고 싶은 학생들에게 아침 일찍 영어를 가르쳤습니다. 혹독했던 저의

영어 0교수 수업 3년 반 코스에서 끝까지 살아남은 학생이 5명이었는데 그중 2명이 교수가 되었습니다.

학과에서 실험을 할 수 있는 여건을 만들기 위해서 제가 갖고 있던 미국의 인적 네트워크를 활용하여 미국에서 쓰지 않는 실험 기기를 강원대로 보내달라고 부탁을 하였습니다. 그렇게 해서 실험 여건을 마련하려고 애를 썼습니다. 또한 아내인 한인숙 교수가 강원대학교에 부임한 후에는 한 명의 월급은 가족이 생활하는 데 쓰지만 한 명의 월급은 연구비로 쓰기로 하였습니다. 그렇게 해서 1987년 우리가 1년간의 연구 출장을 마치고 1988년 2월에 귀국하면서 미국에서 2만 6,000달러 상당의 실험 기기를 들여왔고, 1993년과 2000년에도 함께 1년씩 연구 출장을 한 후 사비로 연구기기를 구입해서 강원대에 기부채납 형식으로 도입했습니다.

제가 미국에서 유학하던 시절 화학과 유기화학 세미나 보조원으로 George Olah 교수님을(1994년 노벨 화학상 수상) 뵈는 적이 있습니다. 그분의 통찰력과 위대함이 인상 깊게 남았습니다. 그때 제가 받았던 학문적인 충격을 강원대 학생도 받으면 좋겠다는 생각을 하게 되었고, 1995년부터 헤테로고리 화합물의 화학 심포지엄을 시작하게 되었습니다. 강원도 학생들이 우리나라 최고의 유기화학자들을 만날 수 있는 기회를 제공하고, 한편으로는 강원대 학생들에게 프라이드를 심어주고자 했습니다. 헤테로고리 화합물의 화학 심포지엄은 지금까지도 잘 진행되고 있는데 현재는 이필호 교수님이 심포지엄 운영을 위해서 큰 수고를 해주고 있습니다. 생각해보면 심포지엄 운영 초창기에 교수님들을 연사로 초청하면 모두 흔쾌히 수락해주셨습니다. 너무나도 감사한 일이지요. 그 당시 변변한 연사비도 드리지 못하는 상황이었습니다. 오시는 연사님들께 저희 집에서 아내가 아메리칸 스타일의 조식을 대접하곤 했습니다. 심포지엄과 관련된 많은 에피소드가 있지만 KAIST의 심상철 교수님을 초청하여 강연도 듣고, 조식도 대접하였는데 몇 달 후 심 교수님께서 암으로 돌아가신 것을 알게 되었습니다. 초청 당시 저는 교수님의 암 투병 사실을 전혀 알지 못했는데 말기 암을 앓고 계셨음에도 심 교수님은 저의 초청을 수락하신 것이었습니다. 지금도 생각하면 가슴이 울컥합니다. 이렇듯 동료 화학인들로부터 저는 정말 너무도 많은 은혜를 입었다고 생각합니다.

8. 교수님께서 2012년 강원대학교 화학과 정년퇴임 후 고향인 원주시 부론으로 돌아오신 후 무료과학교실인 “지혜탐구창고”를 여시고 지금까지 운영하고 계십니다. “지혜탐구창고”에 대해 설명해주실 수 있을까요? “지혜탐구창고”를 여신 취지는 무엇이었나요?

앞서 저의 어린 시절 얘기에서 말씀드렸듯이 저를 업어서 학교에 데려다 주신 분들의 등에서 저는 늘 그분들의 등이 참 따듯하다고 느꼈습니다. 그리고 그분들에게 입은 은혜를 언젠가는 꼭 갚으리라 생각을 했었습니다. 그러다가 1993년 8월에 아버지께서 세상을 떠나셨는데 제가 태어난 집을 제 명의로 이미 이전에 놓으신 것을 알게 되었습니다. 이 집에도 과학실을 지어서 저에게 등을 내주셨던 분들의 손자 손녀들에게 과학을 가르쳐주는 것으로 그분들에게 마음에 진 빚을 극히 조금이라도 갚으리라 생각하였습니다. 그래서 정년을 하고 고향으로 내려와 준비를 하고 외양간, 돼지우리, 창고 등을 헐어내고 그 자리에 새 건물을 짓고 기구를 갖추고 해서 2013년 6월에 개원을 하였습니다.

물론 어린이나 부모들 또 지역 주민들에게 어떤 부담도 주지 않겠다는 것이 처음부터 정한 방침이었습니다. 대상은 이곳의 어린이집과 제가 졸업한 부론초등학교 학생들이지만 인근 문막과 원주 등지에서 소문을 듣고 연락하고 찾아오는 어린이들도 있습니다.



강원도 부론면에 위치한 어린이무료과학교실 “지혜탐구창고”

우리 과학실에서는 선행학습을 하지 않습니다. 어린이들이 사물을 보고 신비하고 아름답다고 느끼고 사물을 말이나 숫자로 표현하고 싶어하는 습관을 심어주고 의지를 일깨워 주는 것이 모든 실험 지도의 목표입니다. 그래서 기체, 액체, 고체를 주제로 하는 체계적인 실험을 실시합니다.

9. “지혜탐구창고”와 함께 “지혜탐구사랑방”도 만드셨는데 이에 대해서 설명해주시실 수 있을까요?

사랑방은 제가 어렸을 적에 농사지며 일꾼들과 함께 새끼를 꼬거나 농기구를 손질하면서 사랑방에 둘러앉아 밤늦게까지 이야기하며 놀던 추억을 되살리고 싶어서 꾸민 것인데 농사짓는 방법이 예전과는 너무도 다르기에 독서를 통하여 인성을 기르는 방법으로 새롭게 시도해 보려고 일단은 독서실로 꾸몄습니다. 제가 그동안 모았던 화학과는 관련이 없는, 그러나 과학 일반에 대한 참고서, 소설, 시, 영문 책자, 등 약 3천 권의 책을 구비하고 있습니다.

요즘 농촌의 인구가 급감하다 보니, 그리고 스마트폰과 인터넷, TV, 등 시간을 보낼 방편들이 너무 많으니까 사랑방을 이용하는 사람은 극히 적습니다.

10. “지혜탐구창고”와 “지혜탐구사랑방”을 운영하시면서 어려운 점도 많이 있었을 것이라 예상됩니다. 어떤 어려움이 있고 어떻게 해결을 해오셨는지 알려주시실 수 있을까요? 과학교실을 운영하시면서 가장 보람된 때가 언제인가요?

처음에는 과학 실험을 한다고 하니깐 혹시 독극물 같은 시약을 써서 공기나 하수도를 오염시키지 않을까 하는 눈초리로 바라보는 사람들이 있었습니다. 처음부터 우리는 ‘시약을 전혀 쓰지 않고, 액체는 물, 식초, 소주, 기름 같은 것만 사용하고 고체는 소금, 설탕, 소다, 모래만 사용한다고 공지를 했습니다. 실제로 그렇게 했고 지금은 누구도 우리 과학실에서 위험한 실험을 한다고 생각하지 않습니다.

어린이집 아동들은 대개 만 6세인데 이들이 돌아가서 “고체”, “액체” 그런 말을 크게 떠드는 것을 본 어린이집 원장이 “너무 놀랐다”는 얘기를 저에게 했을 때 무엇인가 이뤄지고 있다는 생각이 들며 과학실을 연 것을 참 잘했다는 생각을 했습니다.

최근 코로나 사태가 좀 잠잠해지면서 어린이들을 데리고 온 한 어린이집 원장이 아이들에게 실험복을 입혀서 온 것은 정말 뜻밖이었지만 과학실험에 임하는 마음가짐을 일반인들이 생각할 수 있도록 우리 과학실이 동기유발을 시켰다는 점에서 큰 의미가 있다고 확신합니다. 우리 과학자들이 사회에다 과학의 의미를 일깨워주는 무엇이라도 찾아서 행동으로 옮겨야 한다는 것이 저의 신념입니다.

매 학기 말에는 중강파티를 합니다. 학부모도 모두 오도록 초대합니다. 아무래도 시골이다 보니 어린이들에게 좀 새로운 음식을 맛보게 하자고 아내가 직접 정성을 들여서 음식 준비를 합니다. 어린이들이 무척 좋아하는 모습을 보면 여러 가지 의미로 보람을 느낍니다.

우리나라의 낮은 출산율이 큰 사회적 문제가 되고 있는데 제가 있는 부론면에서도 이를 피부로 느끼고 있습니다. 제가 어렸을 때만 하더라도 부론면에 초등학교가 5개가 있었는데 지금은 부론 초등학교 하나밖에 남지 않았고



이창규 교수님이 어린이들에게 과학실험 수업을 진행하는 모습

그나마도 전교생이 30명입니다. 전교생 30명 중 다문화 가정 학생이 50~60% 정도를 차지합니다. 이 학생들의 경우 국어 실력이 조금 뒤처지는 것을 느낍니다. 초등학생 과학교실은 방과 후 활동으로 진행하다 보니 집이 근처에 있어 통학버스를 타지 않는 학생들이 주로 참여합니다. 과학교실 후 학생들이 귀가할 수 있는 수단이 있으면 좋겠는데 그런 여건이 되지 않아 과학교실에 참여하지 못하는 학생들을 보면서 안타까운 마음이 들 때가 있습니다.

11. 교수님의 아내 한인숙 교수(강원대학교 과학교육학부 명예교수)님도 같은 유기화학자로서 교수님의 든든한 동반자로 함께 하셨습니다. 정년퇴임 후 굉장히 의미 있는 사회환원 활동을 하고 계시는데, 이를 위해서는 교수님의 의지뿐 아니라 가족의 동의와 지지가 있어야 했을 것으로 생각합니다. 이 부분에 대해서 알려주실 수 있을까요?

저의 아내인 한인숙 교수는 제가 정년 후 귀향해서 과학실을 짓고 동네 어린이들에게 과학을 가르치면서 여생을 보낼 거라는 뜻을 적극적으로 공감하며 지원해 주었습니다. 정말 다행히도 우리 부부는 전공도 유기화학이라 서로 무엇을 필요로 하는지 잘 통하기 때문에 대화가 쉽게 이뤄집니다. 과학실에 필요한 것은 항상 아내가 구입해서 공급해 줍니다. 저희는 아들만 둘이 있고 다 결혼해서 가정을 가지고 있는데 제가 하는 일에 무척 긍지를 느끼며 응원해 줍니다.

12. 정년퇴임을 앞둔 화학분야 교수님 중 그 이후의 삶에 대해서 기대 및 걱정이 있는 분들이 많이 계십니다. 이분들에게 해주실 말씀 있으실까요? 그리고 끝으로 회원분들에게 해주시고 싶으신 말씀 있으신가요?

앞에서도 이야기했듯이 저는 많은 분들로부터 은혜를 입었고 정년퇴임 후에는 그것을 갚고자 노력하고 있습니다. 현재 운영하고 있는 과학교실이 그 일환인 것은 이미 말씀드렸습니다. 한편으로는 과학교실을 통해서 어린 세대가 과학에 대해서 관심을 갖게 된다면 이는 또한 동료 화학자로부터 받은 고마움을 갚은 길이라 생각하고 있습니다. 지금은 지난 10년 동안 아이들을 지도한 내용을 바탕으로 어린이 실험 책인 『지혜탐구창고에서 생긴 일』을 출판하려고 합니다. 몇몇 출판사에 연락하였는데 큰 관심을 받지 못한 상황을 포항공대 박재욱 교수님과 서강대 이덕형 교수님께서 들으시고는 각각 1,000만 원씩 지원을 해주시겠다고 하셔서 출판을 추진할 수 있게 되었습니다. 참으로 이루 말할 수 없이 고맙고 가슴 벅찬 일입니다. 이 실험 책은 어린이가 부모와 함께 식탁, 부엌, 화장실, 등 아무 데서라도 과학실험을 할 수 있도록 편지를 하였습니다. 어린이들이 아주 일찍부터 과학에 관심을 가지도록 하며 스마트폰에 어른이고 아이들이고 깊이 빠져 있는 가정의 분위기를 과학실험을 소재로 하여 대화하는 분위기로 바꿀 수 있는 자료를 많이 수록하였습니다. 지금 과학이 그리 호감이 가지 않는 우리 사회에다 어쩌면 제가 내놓을 수 있는 마지막 정성이라고 생각하며 심혈을 기울였다고 하겠습니다.

저는 1989년 초에 Solomons가 쓴 『Organic Chemistry, 4th Ed.』의 번역 의뢰를 받았습니다. 저와 아내 둘이서 1년간 작업을 하여 1990년에 번역본이 나왔습니다. 당시 인세로 350만 원을 받았는데 그때 교수 월급이 100만 원이었던 점을 감안하면 꽤 큰돈이었습니다. 저는 이 돈을 어떻게 의미 있게 쓸까 하다가 절반은 큰아이의 피아노 구입에 썼고 그리고 절반은 미국 유학시절 저를 도와주셨던 Arnold와 Marian의 아들 Bob이 아프리카에서 선교 활동을 하고 있다는 이야기를 듣고 Bob에게 선교 후원금으로 인세를 보냈습니다. 그때 Bob은 마침 원주민 목회자들의 연수 프로그램을 계획하면서 1주일의 식대를 마련하기 위해 기도하는 중이었는데 자기의 기도를 하나님께서 들어주었다며 감사해 하는 편지를 보내왔습니다. 그 뒤로도 12판의 번역판이 나오기까지 인세가 나올 때마다 지난 30년 동안 Bob에게 선교 후원금을 보냈습니다. 2019년에는 Bob이 선교 활동을 은퇴해서 인세를 어떻게 쓸까 고

민하던 중 저의 대학교 입학금을 내주셨던 큰아버지의 손자(사촌 형님의 큰아들)가 캄보디아에서 선교사로 활동하고 있다는 이야기를 듣고 최근 2년간 받은 인세를 모두 그에게 후원금으로 보냈습니다. 그렇지만 “너의 할아버지에게 받은 은혜를 갚는 것이다.”라고는 아직 말해주지 않았습니다.

앞에서 말씀드린 바와 같이 경신학교는 제가 중·고등학교 교육을 받을 수 있게 해준 고마운 곳입니다. 장학금을 받아 등록금이 해결되었을 때 언젠가는 이 학교에 진 빚을 갚으리라 생각을 했었고 이따금 그 생각이 떠오르는 했지만 무려 33년이 지나서야 실천하는 계기가 생겼습니다. 2000년에 저와 아내가 다시 미네소타로 연구 출장을 갈 계획을 세웠는데 우리 나이가 이미 50세를 넘어서인지 미국에서 스폰서를 구하기가 쉽지 않았습니다. 그러던 중 한 교수님으로부터 우리를 1년간 연구원으로 지원하겠다는 이메일을 받게 되었습니다. 제가 어떻게 여기까지 왔나 하는 생각에 이르자 문득 경신고등학교 장학생 선발고사와 함께 그때 마음속에 약속했던 빚 갚기가 떠올랐습니다. 아내에게 처음으로 저의 어두웠던 고교 시절 얘기를 하며 혹시 미국에 가서 무슨 사고라도 생기면 그 약속을 영영 지키지 못할지도 모르겠다고 하였습니다. 아내가 바로 은행에 가서 1,000만 원짜리 수표를 한 장 만들어 왔습니다. 그것을 가지고 1999년 5월 14일, 바로 스승의 날 전날 모교를 찾아갔습니다. 저를 처음 보는 교장선생님께 “빚을 좀 갚으러 왔습니다”고 말을 꺼내며 옛날이야기를 했습니다. 교장 선생님은 “저의 기도를 하나님께서 들어주셨다”고 하시며 두 장의 A4 용지를 제게 보여주셨는데 한 장에는 당시 IMF 사태로 등록금이 밀려 퇴학당할 학생들의 명단과 분기 수가 뼈곡하게 적혀 있었고 다른 장에는 스승의 날을 맞아 올해는 선생님들이 학생들에게 선물하는 행사로 꾸며보자며 등록금 찬조 금액을 적도록 한 내용이었습니다. 그런데 그 정도로는 단 몇 명의 등록금도 해결하기 어렵기에 하나님께 기도를 해 왔다는 것이었습니다. 그러면서 “교수님이 주신 금액을 어떻게 쓸까요?”하고 제게 물으셨습니다. “모두 학생들이 퇴학당하지 않도록 등록금을 내 주세요. 그런데 시험은 보지 마시고요.”

한 3주 후 교장 선생님이 저희 집으로 전화를 하셨는데 아내가 받았습니다. 아내에게 감사하다는 말씀을 몇 번이고 하신 후 아내가 전화를 제게 넘겨주었습니다. “교수님, 오늘부로 우리 학교에 등록금을 단 1기분이라도 밀린 학생은 없습니다.” “아니, 그게 어떻게 가능합니까? IMF로 인해 많은 가정이 어렵다고 하셨는데, 제가 드린 금액으로는 어림도 없을 텐데요.” “교수님, ‘오병 이어’의 기적 이야기를 기억하시지요? 교수님이 가시고 그날 종례 시간에 “33년 전 선배 교사들이 다리를 뭍서 절던 한 학생을 도와준 일이 있었는데 그 학생이 교수가 되어 찾아와 후배들에게 장학금을 내놓았다”고 했더니 교사들이 더 많은 금액을 약속하고 하여 이런 기적이 일어났습니다.” 지금 생각해보면 씨를 뿌리는 사람이 있으면 반드시 누군가는 결실을 거두게 된다는 진리를 제가 늦게라도 깨달을 수 있게 된 것을 감사하며 남은 생을 살아가리라 머리를 숙이게 됩니다.

정년을 앞둔 모든 교수님 박사님들께서는 20대 초반에 대학에 입학하여 화학을 공부해서 평생 연구하고 가르친 결과는 머릿속에 엄청난 지식과 지혜로 남아 있을 것입니다. 그것을 어떤 방법으로든 사회에 또 다른 형태로 환원하는 활동을 계획하고 실천하시면 필경 우리 사회는 더욱 건강하고 밝은 모습으로 조금씩 발전해 갈 거라고 믿습니다.

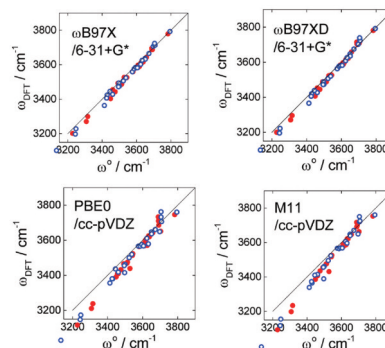
이번 호에는 지난 1년(2022-2023)간 『JKCS』와 『BKCS』에 소개된 밀도 범함수 이론(Density Functional Theory, DFT) 계산과 관련 연구 논문을 소개합니다. 회원분들의 많은 관심 부탁드립니다.

글 김현우(광주과학기술원 화학과 조교수, hwk@gist.ac.kr)

충북대학교 양민오 교수 연구팀에서 응축상 물 분자의 진동수 계산을 위한 전자밀도 범함수와 기저 함수 집합을 비교하여 ω B97X(D)/6-31+G*가 비교한 방법 중에서 가장 정확한 것을 확인했습니다. [2023년 2월호, DOI: 10.5012/jkcs.2023.67.1.13]

Assessing Density Functional Theories to Compute the OH Stretching Frequencies of Water Molecules in Condensed Phases

We evaluate electron density functional theories for the computation of 0-1 and 1-2 transition energies of local OH stretching motion of water molecules in condensed phases. By examining thirteen density functionals and nine sets of basis functions, it was found that the optimal combination that predicts the transition energies highly correlated with those calculated by the coupled cluster theory, CCSD(T), is the hybrid density functional theory developed by Head-Gordon group, ω B97X(D)/6-31+G*.



창원대학교 이민주 교수 연구팀에서 DFT 연구로 CO₂와 H₂O의 중성 금속과 금속 이온에 대한 흡착 안정도를 비교하여 보고하였습니다. [2022년 10월호, DOI: 10.5012/jkcs.2022.66.5.416]

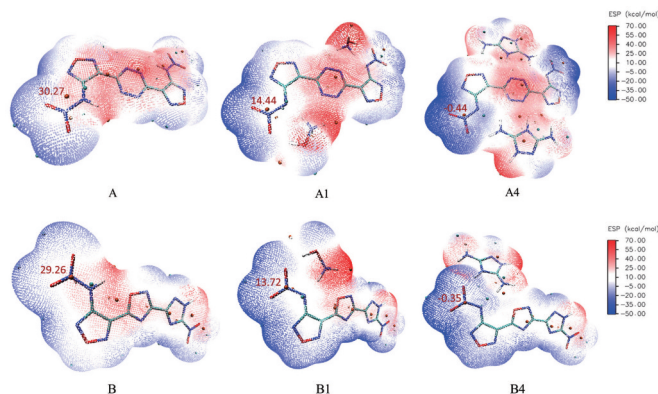
Adsorption of CO₂ and H₂O on Neutral Metals and Their Ions: A DFT Study

	Ni ²⁺ + CO ₂ complex	Cu ²⁺ + CO ₂ complex	Zn ²⁺ + CO ₂ complex	Ni ²⁺ + H ₂ O complex	Cu ²⁺ + H ₂ O complex	Zn ²⁺ + H ₂ O complex
Structural feature						
	C _{2v}	C _{2v}	C _{2v}	C _s	C _s	C _s
$r_{M-C}^{2+CO_2}$	2.237	2.125	2.201	1.964	1.841	1.860
$r_{CO,OH}$	1.174	1.175	1.175	0.979	0.987	0.979
$\angle M^{2+}CO_2$	78.9	80.7	81.3	121.6	121.3	125.4
$\angle_{OCO,HOH}$	157.8	161.5	162.5	108.6	107.7	109.2
ΔH^{**}	-192.4	-187.7	-133.1	-441.3	-519.8	-427.3
ΔG^{**}	-151.8	-146.8	-93.1	-402.5	-479.5	-389.3
$-T\Delta S^{**}$	40.6	40.9	40.1	38.9	40.3	38.0

한남대학교 김승준 교수 연구팀에서 질소가 풍부한 헤테로 고리화합물에 기초한 음이온과 질소를 포함하는 양이온과의 이온 결합으로 생성된 염에 대해서 열역학적 안정성, 밀도, 폭발 성능 등을 DFT 계산으로 보고하였습니다. [2022년 6월호, DOI: 10.5012/jkcs.2022.66.3.185]

Computational Study of Energetic Salts Based on the Combination of Nitrogen-rich Heterocycles

The theoretical investigation has been performed to predict thermodynamic stability, density, detonation velocity, and detonation pressure of energetic salts produced by pairing of nitrogen-rich anions (tetrazine, oxadiazole etc.) and cations (NH_3OH^+ , NH_2NH_3^+ , CH_9N_6^+ , $\text{C}_2\text{H}_6\text{N}_5^+$). All possible geometries and the binding energy for the trigger bond of energetic salts have been optimized at the B3LYP/cc-pVDZ level of theory. The detonation velocity and detonation pressure have been calculated using Kamlet-Jacobs equation, while enthalpy has been predicted at the G2MP2 level of theory. The predicted results reveal that the energetic salts including small sized NH_3OH^+ (1) and NH_2NH_3^+ (2) cations increase detonation property. And also the energetic salts including more amino group (-NH₂) such as CH_9N_6^+ (3) cation increase thermodynamic stability. These results provide basic information for the development the high energy density materials (HEDMs).

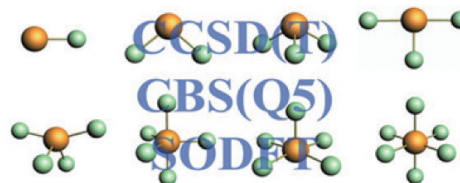


가톨릭대학교 김중한 교수 연구팀에서 SbX_n ($X = \text{F}$ and Cl , $n = 1-5$)과 SbX_n^- ($X = \text{F}$ and Cl , $n = 1-6$)의 특성을 높은 수준의 순이론적 방법과 DFT 계산으로 연구하여 보고하였습니다. [2022년 7월호, DOI: 10.1002/bkcs.12541]

Theoretical study on molecular properties of SbX_n ($X = \text{F}$ and Cl , $n = 1-5$) and SbX_n^- ($X = \text{F}$ and Cl , $n = 1-6$) including spin-orbit coupling

High-level ab initio and density functional theory (DFT) calculations were performed to calculate the molecular properties of SbX_n ($X = \text{F}$ and Cl , $n = 1-5$) and SbX_n^- ($X = \text{F}$ and Cl , $n = 1-6$), such as molecular structure, vibrational frequency, electron affinity (EA), and bond dissociation energy (BDE).

The spin-orbit (SO) effect on the molecular properties was investigated using the SODFT method. The bond lengths optimized by the coupled-cluster singles and doubles with perturbative triples method are in good agreement with the experimental values. The calculated vibrational frequencies agreed reasonably well with

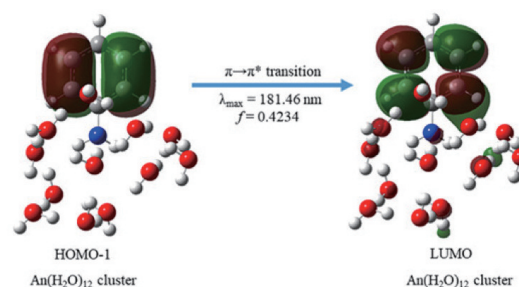


the available experimental values except for those of SbX_4^- ($X = \text{F}$ and Cl) because the polar solvent affected the experimental results. SbX_3 and SbX_4^- ($X = \text{F}$ and Cl), whose Sb oxidation states are +3, exhibit substantial EAs and BDEs, respectively. The SO effect on SbX^- and SbX_2^- ($X = \text{F}$ and Cl) was considerable.

경희대학교 박승민 교수 연구팀에서 aniline(H_2O)_n를 DFT와 TD-DFT를 통해서 계산하고 수소 결합의 구조 재배열과 들뜬 상태 특성을 보고하였습니다. [2022년 7월호, DOI: 10.1002/bkcs.12543]

Rearrangement of aniline(H_2O)_n ($n = 0-12$) clusters upon photoionization and their excited state properties: Density functional theory and time-dependent density functional theory study

We have studied H-bonded structural rearrangement in the S_0 , S_1 , and D_0 states of neutral and cationic aniline⁺ (H_2O)_n ($n = 0-12$) clusters by adopting density functional (DFT) and time-dependent DFT (TD-DFT) theory. DFT-calculated structural rearrangement energies (SRE) increased sharply for $n = 1, 2$, remained nearly the same until $n = 9$, and increased again from $n = 10$ to larger clusters. This indicates that the intramolecular vibrational modes play a central role in the rearrangement energy. On the other hand, DFT-calculated thermochemical data confirmed that there is no significant change in enthalpy (H), Gibb's free energy (G), and entropy (S) for neutral and ionized clusters. The maximum UV absorption wavelength, λ_{max} red-shifted gradually with the increase of cluster size with respect to aniline as the hydration reduces the excitation energies. On the other hand, there was no significant change in the highest occupied molecular orbital (HOMO)-lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) energy gap.

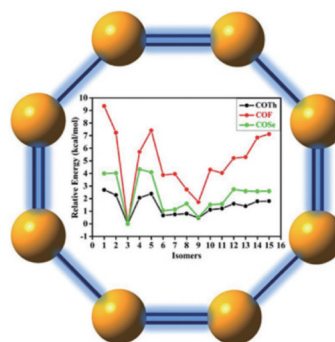


부산대학교 장준경 교수 연구팀이 공동 연구로 사이클로옥타테트라엔(COT) 고리를 갖는 시스템에 대한 DFT와 TD-DFT 연구로 구조-특성 관계를 보고하였습니다. [2022년 7월호, DOI: 10.1002/bkcs.12573]

Density functional theory and time-dependent density functional theory studies on optoelectronic properties of fused heterocycles with cyclooctatetraene

We establish a structure-property relation for the system having a cyclooctatetraene (COT) ring fused with four five-membered heterocyclic rings. The two five-membered heterocycles selected are furan and selenophene and their fused structure with COT is known as cyclooctatetrafuran (COF) and cyclooctatetrase-

lenophene (COSe), respectively. We found 15 geometrical isomers of each COF and COSe and their structural stability and optoelectronic properties have been evaluated by quantum chemical simulations. The density functional theory (DFT) and time-dependent DFT simulations were employed for a systematic review of all isomers. Electronic excitations, hole reorganization energies, electron reorganization energies, ionization potentials, and electron affinities, of all the isomers, were reported. Based on our comparative study, it is shown that one of the isomers is suggested as a better charge transport material.

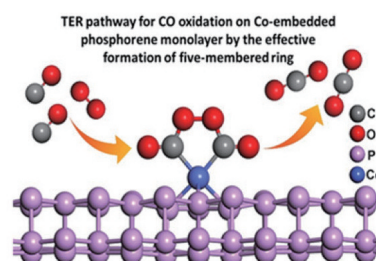


울산대학교 정재훈 교수 연구팀에서 단일 원자 코발트 촉매에서 두 개의 CO 분자와 한 개의 O₂ 분자의 반응을 DFT 계산을 이용해 보고하였습니다. [2022년 11월호, DOI: 10.1002/bkcs.12613]

Termolecular Eley–Rideal pathway for efficient CO oxidation on phosphorene-supported single-atom cobalt catalyst

Density functional theory calculations are conducted to examine the oxidation of CO on a single Co atom anchored on a two-dimensional phosphorene monolayer (Co@Pn). The stability of the Co adatom on the Pn monolayer was revealed by ab initio molecular dynamics simulations. Three plausible pathways for CO oxidation over Co@Pn were explored: Langmuir–Hinshelwood (LH), Eley–Rideal (ER), and the recently proposed termolecular Eley–Rideal (TER) mechanisms.

The TER pathway has a relatively lower energy barrier for the rate-determining step (0.55) than those of the LH (0.81) and ER (0.70 eV) pathways. The efficiency of TER pathway can be interpreted by CO-promoted O₂ activation via the effective formation of a five-membered ring composed of two CO and one O₂ molecules. The results open a new avenue for developing phosphorene-supported non-noble transition metal single-atom catalysts for various catalytic application.

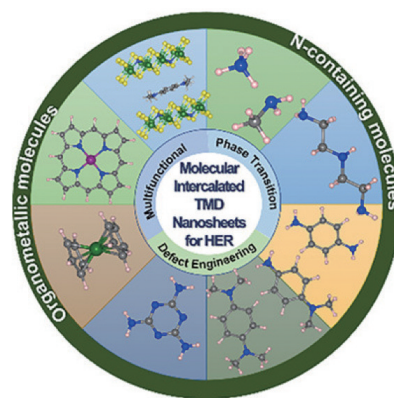


고려대학교 박경희 교수 연구팀에서 다양한 분자가 삽입된 전이 금속 디칼코게나이드(TMD)에서 일어나는 수소 생산 반응에 대한 최근 연구를 DFT 계산을 포함해 검토하고 보고하였습니다. [2022년 7월호, DOI: 10.1002/bkcs.12626]

Molecular intercalation of transition metal dichalcogenide nanosheets to enhance electrocatalytic activity toward hydrogen evolution reaction

The novel two-dimensional nanostructures of transition metal dichalcogenides (TMDs) have motivated exten-

sive studies on the control of electronic structures via sandwiching of foreign species. Herein, we review our recent works on TMD nanosheets that intercalated with various molecules (i.e., amine, cobaltocene, porphyrin, phthalocyanine, etc.). They were mainly synthesized by a one-step solvothermal reaction. The intercalation expanded the interlayer spacing significantly and induced the phase conversion from semiconducting 2H to metallic 1T' (distorted 1T), accompanied by the charge transfer from the intercalants to the TMDs. The intercalated TMD nanosheets exhibit excellent catalytic performance in water-splitting hydrogen evolution reaction (HER). First-principles calculations suggest that the 2H-1T' phase transition via intercalation can be driven by a significant charge transfer to TMD. The intercalation increased carrier concentration, which leads to enhanced catalytic performance. The present work illustrates how the intercalation of molecules can stabilize the metastable 1T' phase and effectively enhance the HER performance.

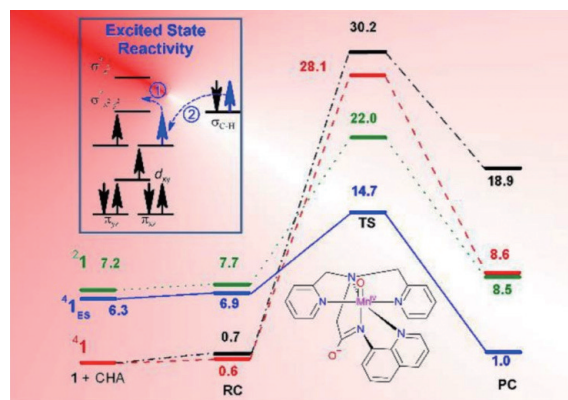


전북대학교 조경빈 교수 연구팀에서 C-H 활성화 반응과 관련된 음전하를 가진 리간드가 있는 Mn^{IV}O 종을 DFT 계산으로 보고하였습니다.

[DOI: 10.1002/bkcs.12695]

Calculating the excited state reactivity of a manganese(IV)-oxo species with a negatively charged ligand

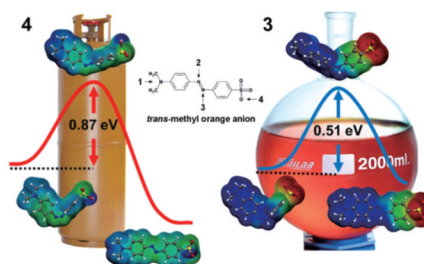
It was previously found that Mn^{IV}O species with neutral ligands perform C-H activation reactions through an “excited state reactivity” (ESR), where a valence electron in the Mn^{IV}O moiety is spontaneously excited to a higher orbital to create a more potent reactant. We extend this to a Mn^{IV}O compound with a negatively charged ligand ([Mn^{IV}(O)(DPAQ)]⁺), which we investigate with density functional theory. It is found that ESR are indeed preferable even in this case, and that the ligand charge may only have an indirect effect on ESR. Instead, ligand rigidity is proposed to affect the ESR rate more directly. In addition, an example of a new β -electron transfer pathway was found, where three key orbitals mix to deliver the incoming electron to its final orbital position. This study supports the notion that ESR may be more common in C-H activation reactions of Mn^{IV}O compounds than what is so far known.



경기대학교 김동욱 교수 연구팀에서 메틸 오렌지(MO) 및 양성자화 유도체를 DFT 수준에서 연구하고 수용액에서의 흡수 스펙트럼을 시뮬레이션과 이성질체화에 대한 활성화 에너지 장벽 등을 보고하였습니다. [DOI: 10.1002/bkcs.12682]

Effects of the protonation and the polar solvation on the molecular properties of methyl orange: A density functional theory study

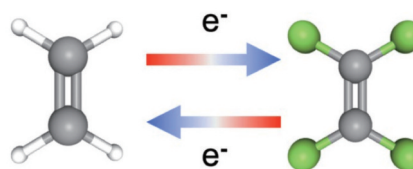
Methyl orange (MO) and its protonated derivatives were investigated at the density functional theory (DFT) level using CAM-B3LYP functional and 6-311+G(d,p) basis sets; their absorption spectra in aqueous solution were simulated, their relative stabilities in both the gas phase and the polar solutions were calculated, and the activation energy barrier for the *cis*-to-*trans* isomerization in both phases were computed. Except the protonation at the amino group, all the protonated isomers show a bathochromic shift of the most intense absorption peak. In the gas phase, the sulfonate unit turns out to be the most favorable proton acceptor. In the polar solutions, however, azo groups are more effective to accept the proton. The protonation at the azo N atom next to the phenyl- sulfonate group significantly reduces the energy barrier for the *cis*-to-*trans* conversion in the aqueous solution, which suggests a swift conversion in the ground state.



인천대학교 김형준 교수 연구팀에서 에틸렌 및 테트라플루오로에틸렌에서 전자 이동을 DFT로 계산하고 M06-HF 범함수와 제한된 (constrained) DFT를 전자 이동 상태 계산에 쓰는 것을 제안하였습니다. [DOI: 10.1002/bkcs.12711]

Constrained density functional theory calculations for estimation of forward and backward intermolecular charge transfer energy

Charge transfer (CT) in donor-acceptor complexes can occur in two directions: from donor to acceptor (forward CT, CTF) and from acceptor to donor (backward CT, CTB). For an ethylene and tetrafluoroethylene model system, coupled cluster calculations predict that CTF is more stable than CTB. Meanwhile, density functional theory (DFT) and time-dependent DFT (TDDFT) employing B3LYP functional show a different CT state order depending on the Hartree-Fock exchange (HFX) contribution. The impact of basis sets as a possible cause to induce such unreasonable CT state reverse along with the increase of HFX was investigated. The physical origin of CT state reversal is examined in terms of molecular orbital energy. We analyzed two additional molecular pairs that feature CT state reversal along with the amount of HFX in B3LYP functional. Despite the reduced gap, we suggest constrained DFT using M06-HF functional as an effective approach to estimate two CT state energies on equal footing.





이준호 Joon-Ho Lee

한국화학연구원 친환경신물질연구센터 선임연구원

jh_k@kricr.re.kr

<https://sites.google.com/view/ecosyn>

소개글

이준호 박사는 유기화학 연구 분야 중에 천연물 전합성 연구를 수행해왔다. 2-pyrone의 intramolecular Diels-Alder 반응을 이용하여 Asymmetric한 천연물들을 합성하는 연구를 했다. 그 후, 여러 유기 반응을 거쳐 합성된 화합물이 실제로 적용되는 연구 분야에 높은 관심이 있어 항생제 개발과 항암제 개발 연구를 수행하면서 약물 설계 및 합성 연구를 진행했다. 현재는 식량으로 쓰이는 주요 작물에 영향을 끼치는 다양한 병해충 또는 잡초를 방제할 수 있는 작물보호제를 개발하는 연구를 수행하고 있다. 범용 살균제, 화상병균 억제제 개발 그리고 타겟 기반 살균제 개발을 대표적으로 연구를 진행하고 있다. 또한, 내성 문제가 대두되는 균류에 대해 siderophore를 이용한 약물 개발 연구도 수행 중이다.

주요연구분야

- 유기화학(Organic Chemistry)
- 천연물 전합성(Total Synthesis of Natural Products)
- 작물보호제 개발(Crop Protection Agent Development)
- 저분자 약물 구조 설계 및 합성(Small Molecule Drug Design & Synthesis)
- 살균제 개발(Fungicide Development)

대표논문

1. Kyoung Jin Choi, **Joon-Ho Lee**, Sung Bum Park, Yoon-Ju Na, Won Hoon Jung, Hyuk Lee* Ki Young Kim* velopment of in vitro three-dimensional drug screening system for obesity-related metabolic syndrome." *Journal of Pharmacological Science* **2022**, 148, 377-386.
2. Hyung-Joon Kang, **Joon-Ho Lee**, Dong-Hyun Kim, and Cheon-Gyu Cho*. "Imidazole-Selective Alkyne Hydroamination under Physiological Conditions", *Org. Lett.* **2020**, 19, 7588-7593
3. **Joon-Ho Lee** and Cheon-Gyu Cho*. "H-bonding Mediated Asymmetric Intramolecular Diels-Alder Reaction in the Formal Synthesis of (+)-Aplykurodinone-1." *Org. Lett.* **2018**, 22, 7312-7316.
4. Joo-Young Kim, Chang-Heon Shul, **Joon-Ho Lee** and Cheon-Gyu Cho*. "Directed Fischer Indolization as an Approach to the Total Syntheses of (+)-Aspidospermidine and (-)-Tabersonine", *Org. Lett.* **2017**, 19, 6168-6171.
5. **Joon-Ho Lee** and Cheon-Gyu Cho*. "Total Synthesis of (-)-Neocosmosin A via Intramolecular Diels-Alder Reaction of 2-Pyrone". *Org. Lett.* **2016**, 18, 5126-5129.

- 한양대학교 화학과, 학사(2010.3-2014.8)
- 한양대학교 화학과, 박사 (2015.3-2020.2, 지도교수 : 조천규)
- 한국화학연구원 감염병치료제연구센터, 박사 후 연구원(2020.5-2021.9, 지도박사 : 이 혁)
- 한국화학연구원 친환경신물질연구센터, 선임연구원(2021.10-현재)

「Bulletin of the Korean Chemical Society」

논문 투고 시스템 안내 (ScholarOne Manuscripts)

대한화학회가 발간하는 우리 화학회의 얼굴이자 우리 화학인의 학술지인

「Bulletin of the Korean Chemical Society」 (이하 Bulletin지)의 재도약을 도모하고자
본회 운영위원회와 학술지간행위원회 Bulletin지 편집장은 Bulletin지의 논문 투고 시스템을
스칼라원 논문투고시스템(ScholarOne Manuscripts)으로 변경하기로 하였습니다.

이에 논문 투고 시스템 접속 방법을 별첨으로 안내드리오니 모든 회원들께서는
Bulletin지의 재도약을 위한 활동에 동참하여 주시기 바랍니다.

대한화학회 회장 신석민

대한화학회 학술지간행위원회 Bulletin지 편집장 남원우

1. BKCS 논문 투고 시스템 접속

* 아래 방법 중 택 1

A. <https://mc.manuscriptcentral.com/bkcs>로 바로 접속

B. http://new.kcsnet.or.kr/pub_bkcs 접속 후 On-line Submission 클릭

C. <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/12295949> 접속 후 우측 상단의 Submit an Article 클릭



A

B

C

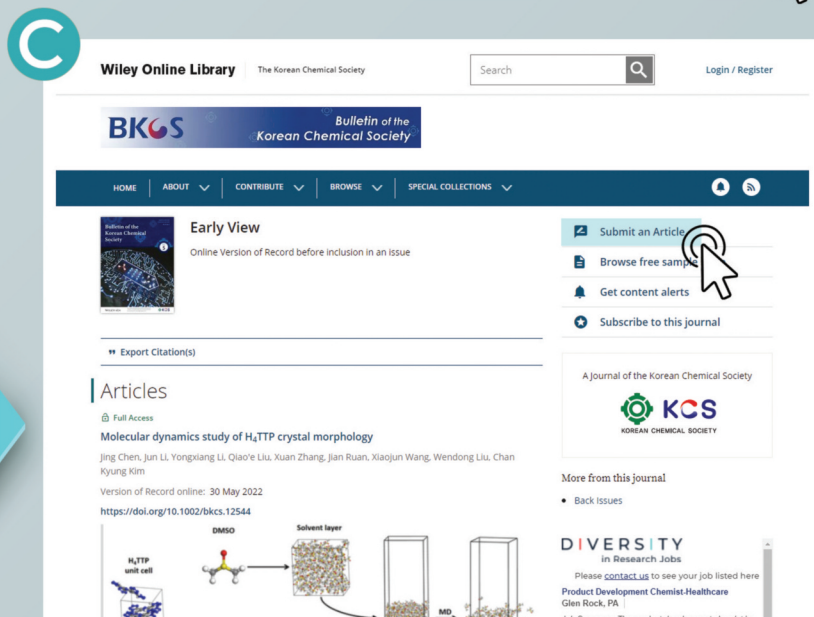
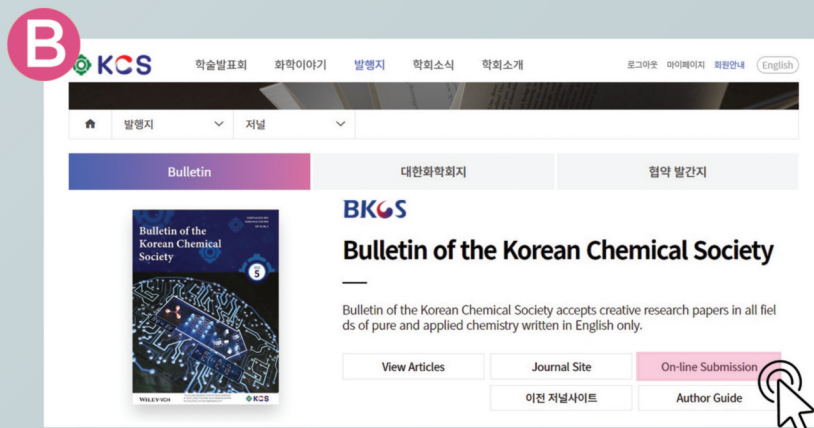
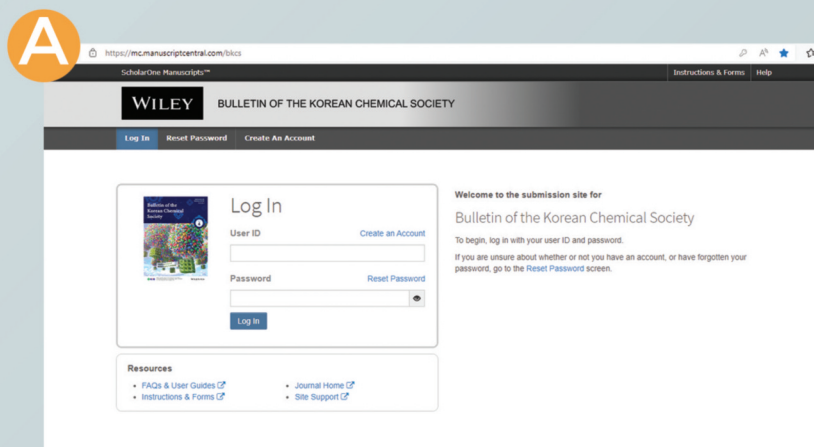
2. 계정 개설 후 로그인

- 계정 개설 필수
- 계정 개설 시 입력한 메인 이메일 주소와 비번으로 접속하여 논문 투고
- ScholarOne Manuscripts의 Author Guide를 참고하여 순서대로 진행

* 외국인 심사위원은 점차적으로 늘릴 예정입니다.

* 논문 투고에 어려움이 있으실 경우 아래로 문의하여 주십시오.

e-mail: bkcs@kcsnet.or.kr / office: 02)953-2095



<https://mc.manuscriptcentral.com/bkcs>로 바로 접속

http://new.kcsnet.or.kr/pub_bkcs 접속 후
On-line Submission 클릭

<https://onlinelibrary.wiley.com/journal/12295949> 접속 후 우측
상단의 Submit an Article 클릭

우리 실험실은요!

우리 실험실은요!

경희대학교
KYUNG HEE UNIVERSITY

유기반응 및 물질개발 연구실

(Organic Reactions & Materials Development Lab)

글 | 이재린(경희대학교 이과대학 화학과,
crlee1115@khu.ac.kr)

우리는 전이금속을 사랑해

저희 연구실은 2013년 9월 부산대학교에서 시작하여 2023년 3월 경희대학교로 이전하였고, 현재 박사 4명과 석사 1명으로 구성된 '지금은' 소규모의 연구실입니다. 저희 지도교수님이신 주정민 교수님은 강의를 잘하시기로 유명하셔서, 진로를 고민하던 시기에 교수님의 강의를 듣고 감명받아 대학원에 진학하기로 결정한 선배님들이 많습니다. 작년에 교수님께서 연구년으로 미국에 다녀오시고 선배님들이 졸업하시면서 잠시 적은 인원이 되었지만, 새로운 신입생들이 많이 들어오리라 기대하고 있습니다.

저희 연구실은 새로운 물질을 개발하기 위해 기존에 알려지지 않은 반응 경로를 개척하는 연구를 합니다. 전통 유기합성 반응의 한계점을 극복하기 위해 유기금속을

사용한 반응에 관심을 두고 있습니다. 유기금속을 사용하면 새로운 반응성을 볼 수 있고 결과적으로 전혀 새로운 분자를 만들 수 있는 점이 굉장히 매력적입니다. 특히 유기금속촉매를 이용하여 C-H 활성화 반응을 수행하여 탄소-탄소 간의 새로운 결합을 효율적으로 형성할 수 있도록 연구 중입니다. 다양한 헤테로고리의 원하는 자리에 선택적으로 C-H 결합을 활성화하는 일을 주로 진행하고 있으며, 여러 종류의 리간드를 개발하여 반응에 적용시키는 연구도 함께 진행하고 있습니다.

저희 연구실은 유기화학 연구뿐만 아니라 전기화학 연구도 진행하고 있습니다. 배터리 안에 들어가는 유기화합물을 디자인하고 합성하여 배터리의 성능을 향상시키거나, 전기 에너지를 직접 사용하여 유기 반응을 수행하기

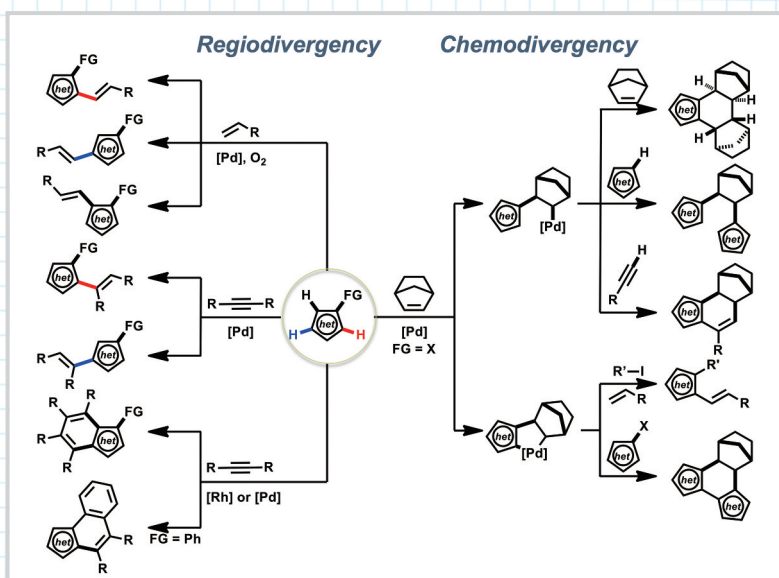


그림 1. 헤테로고리의 C-H 활성화 연구

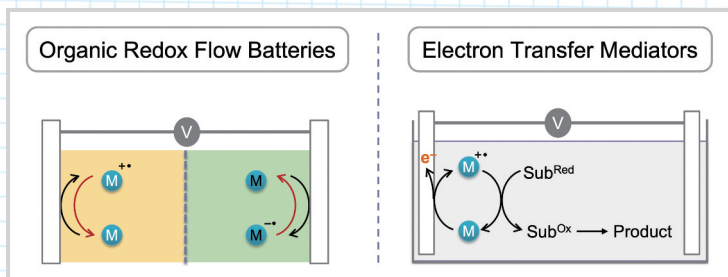


그림 2. 전기 유기화학 연구

도 합니다. 현재는 부산대학교와 KAIST의 연구실들과 공동연구를 진행 중이고, 저희 연구실에서는 전자전달 매개체를 다양하게 만들어내는 일을 중점적으로 하고 있습니다. 이렇듯 저희 연구실은 한 분야에 국한되지 않은 다양한 일을 수행하고 있기 때문에, 저처럼 해보고 싶은 게 많거나 진로가 확실하지 않은 친구들이 여러 경험을 할 수 있는 곳이기도 합니다.

— 더 넓은 세상으로 —

저희 교수님은 저희가 새로운 것을 배우는 것에 대해서 긍정적으로 여기시고, 항상 적극적으로 지원해 주십니다. 특히 학생이 원한다면 해외 파견을 적극적으로 추천해 주시며, 해외에서 새로운 연구를 해보고 다양한 경험을 쌓을 기회를 제공해 주십니다. 실제로 본인이 배워보고 싶었던 분야의 연구실에 직접 연락하여 현재 3개월간 미국으로 파견을 간 선배님도 있습니다. 이때 교수

님께서는 비용부터 적응까지 세세하게 신경을 써 주셨습니다. 이처럼 본인이 정말 해보고 싶은 연구가 있거나 가고 싶은 연구실이 있다면 학기 중간에 파견을 보내주기도 하시고, 졸업 후에도 더 배우고 싶은 분야가 있다면 국책 연구소에 단기 파견을 보내주시기도 하십니다. 그만큼 학생들의 배움과 도전에 진심이 가득한 분이십니다.

저희 연구실은 구성원들의 견문을 넓히고 여러 경험을 하기 위해 매년 다양한 학회에 참석합니다. 적어도 1년에 한두 번은 꼭 국내 학회에 참석하는데요, 특히 제주도에 학회가 열리면 교수님께서 저희끼리 놀기도 하고 휴식도 취하라고 최대한 참여할 수 있도록 배려해 주십니다. 학회에 참석하면 다양한 연구분야를 접하는 재미도 있지만 끝나고 나면 근처의 유명한 맛집이나 카페를 찾아다니고 새벽까지 구성원들과 보드게임을 하며 시간을 보내기도 합니다. 후에 “그때 재밌었지” 하며 함께 추억을 회상하기도 한답니다.

또한, 교수님께서 저희의 학위 과정 동안 최소 한 번은 해외 학회에 보내주시려고 노력하십니다. 저명한 유기화학자들이 참석하는 학회에서 포스터 발표를 하고 남은 시간에는 근처 연구소 방문 등 교류 활동을 포함한 다양한 활동에 지원을 아끼지 않으십니다. 교수님께서 미국으로 연구년을 가셨을 때 코로나로 인해 국내나 해외 학회에 참석하기 어려웠던 시기가 있었는데, 저희가



2022.6 해외학회: 미국 San Diego, the 47th National Organic Chemistry Symposium



2018.4 대한화학회 제주

📡 우리 실험실은요!

오래 동안 아무 데도 못 가서 아쉬웠을 거라며 연구실 구성원들 모두 미국으로 초대해 주시기도 했습니다. 약 10일 동안 미국 서부에 머물면서 학회도 참석하고, 새로운 연구자들을 만나기도 했고, 교수님과 식재료를 사서 홈파티를 열기도 했습니다. 직접 불 붙여서 스테이크를 굽고 와인도 마시면서 밤새 수다 떨고 재밌게 놀았던 기억이 생생합니다. 몇 개월 동안 노트북 속 줌 화면으로만 교수님을 뵈다가 미국이라는 낯선 땅에서 만나 보니 반갑기도 했고, 함께 시간을 보낸 것이 잊지 못할 추억으로 남아있어서 아직까지도 문득문득 떠오르곤 합니다.

📖 지금 만나러 갑니다

저희 연구실은 매년 5월 특별한 행사를 진행합니다. 바로 연구실 선배님들과 직접 교류할 수 있는 홈커밍데이인데요. 매년 스승의 날 근처에 졸업하신 선배님들이 방문하셔서 다 같이 식사를 하며 이야기를 나누는 시간을 가집니다. 이런 자리를 통해 취업 준비를 위한 조언, 취직한 선배들의 성공담, 회사 생활 이야기를 듣기도 하고 과거 연구실에서 있었던 일들, 교수님과 관련된 재밌었던 일화 들을 이야기하다 보면 하루가 순식간에 지나갑니다.

직접 대면하기 어려웠던 코로나 시기에는 개더타운이라는 메타버스 플랫폼을 시도하기도 했습니다. 연구실처럼 방을 꾸미고 각자의 캐릭터도 마음대로 꾸며서 화상으로 대화를 나눌 수 있었습니다. 시기가 시기인지라 안타깝게 행사를 취소하게 될 수도 있었는데, 오히려 이를 기회로 좀 더 색다르게 만나본 경험이었습니다. 올해 5월에도 변함없이 홈커밍데이 행사를 진행할 예정인데 코로나 시기 이후 처음으로 대면으로 모이는 자리이기도 하고, 교수님께서 강단에 오르신 지 10주년 이 된 기념으로 더 재밌고 성대하게 행사를 열 계획입니다.

👥 너희들이 잘 됐으면 좋겠어

저희 교수님께서도 궁금한 점이 있거나 전달할 내용이 있으시면 항상 “안녕~”이라고 하시며 직접 학생들 오피스에 찾아오십니다. 저희가 교수님 오피스를 방문하는 것보다 더 자주 찾아오시는데, 그만큼 저희가 하고 있는 일에 많은 애



2019.8 홈커밍데이 행사(코로나 전)



2021.8 개더타운

정과 관심을 가져 주시고 필요한 질문과 조언을 해주시기도 합니다. 교수이기에 앞서 한 명의 화학자 및 연구자로서 때로는 상냥하고 때로는 날카롭게 연구에 대해 지도해 주시는 것을 보며 저희도 화학자로서의 꿈을 키워 나가고 있습니다. 경희대학교에서 새로운 도약을 준비하고 있는 저희 연구실은 개선된 환경에서 더 넓은 세상을 향해 나아가고자 노력하고 있습니다. 앞으로의 모든 발자취가 훗날 저희 연구실이 더욱 성장하는 발판이 되기를 바라며 글을 마치도록 하겠습니다.

“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.

특히 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 화학회 오민영 선생님 (myoh@kcsnet.or.kr) 또는 코너 담당 편집위원이신 김정욱 교수님(jwkim@gist.ac.kr)께 보내주시면 감사하겠습니다.

화학사 돌아보기

Part.12

돌턴
돌아보기최정모 | 부산대학교 화학과,
jeongmochoi@pusan.ac.kr

존 돌턴(John Dalton, 1766-1844)은 근대 원자설을 처음 제시한 화학자로 잘 알려져 있습니다. 그래서 돌턴의 이름은 중고등학교 화학 시간에도, 대학교 일반화학 시간에도 자주 언급됩니다. 제가 확인할 수 있는 일반화학 교재들은 전부 입을 모아 돌턴이 최초로 근대 원자설을 제시했으며, 그 내용은 대략 다음과 같다고 설명합니다. ① 물질은 나눌 수 없는 원자로 이루어져 있다. ② 주어진 화학 원소의 원자들은 질량과 모든 다른 성질들이 똑같다. ③ 다른 화학 원소들은 서로 다른 원자들로 이루어져 있다. 특히 다른 원자들은 질량이 서로 다르다. ④ 원자들은 파괴되지 않으며 화학 반응 중에도 그 주체는 보존된다. ⑤ 원소들의 원자들은 서로 정수비로 결합하여 화합물을 만든다.¹ 그래서 우리는 돌턴이 원자라는 개념을 근대 화학자 중에서 최초로 떠올렸다고 생각하기 쉽습니다. 이러한 설명은 역사적으로 얼마나

정확한 설명일까요? 오늘 글에서는 돌턴 당시의 역사적 맥락을 고려하여 돌턴의 작업을 다시 한번 평가해 보도록 하겠습니다.²

사실 원자라는 개념은 18세기 말의 과학자들에게 낯선 개념이 아니었습니다. 뉴턴이 『광학(Opticks)』에서 “모든 물체들은 단단한 입자들로 구성되어 있는 것처럼 보인다.”라고 선언한 이래, 뉴턴의 전통을 충실히 따르고 있던 물리학자들³은 단위 입자의 개념을 도입하여 여러 물질의 성질을 설명하려고 시도하였습니다. 뉴턴 자신이 기체 입자들 사이의 반발력이 입자간 거리에 반비례한다면 압력과 부피는 반비례한다는 것(보일의 법칙)을 증명한 바 있었고, 이에 따라 18세기 물리학자들이 바라보는 기체는 눈에 보이지 않는 작은 입자들이 서로 밀쳐내고 있는 물질이었습니다. 뉴턴의 기본 입자 개념은 화학자들에게도 깊은 영향을 주었습니다.

1. 제가 살펴본 책들은 다음과 같습니다. 항목의 개수나 각 문장의 길이는 책마다 조금씩 다르지만, 내용은 대동소이합니다. 본문에는 옥스토비 일반화학 책의 설명을 수록하였습니다. 『옥스토비의 일반화학』, 제7판, Cengage(2020), p. 12; 『레이먼드 창 의 일반화학』, 제12판, 사이플러스(2020), p. 66; 『쥘달의 일반화학』, 제10판, Cengage(2020), p. 47; 『실버버그의 일반화학』, 제8판, 사이플러스(2019), p. 68; 『마스터톤의 일반화학』, 제8판, Cengage(2019), pp. 26-27.

2. 이 내용은 다음 글들에서 큰 도움을 받았습니다. Alan J. Rocke, "In Search of El Dorado: John Dalton and the Origins of the Atomic Theory," *Social Research* 72, 125-158 (2005); Arnold W. Thackray, "The Emergence of Dalton's Chemical Atomic Theory: 1801-08," *The British Journal for the History of Science* 3, 1-23 (1966).

다만 화학자들에게는 “친화력”이라는 다른 전통도 있었기에, 두 개념을 잘 조화시키는 것이 어려운 문제였죠. 개별 입자에 작용하는 친화력을 수식으로 써내려고 하는 시도들은 전부 실패로 돌아갔고, 친화력과 척력이 단위 입자에 각기 어떻게 작용하는지는 여전히 수수께끼였습니다. 그러나 두 종류의 입자가 서로 친화력으로 들러붙어 새로운 단위 입자를 만든다는 사실은 당시 화학자들에게 익숙한 생각이었습니다. 그래서 지난 글에서 살펴본 베르톨레 같은 사람은 화학적 친화력과 척력의 평형을 통해 화학 반응을 이해하고자 했고, 수식을 사용하는 대신 적당한 정성적 설명으로 기본적인 설명을 제시하려 하였습니다.

이 단위 입자는 18세기 당시에 이미 우리에게 익숙한 이름으로 불리고 있었습니다. 그런데 흥미롭게도 영어로는 이 입자를 atom이라 불렀고, 프랑스어로는 이 입자를 molecule이라 불렀죠. 그래서 예를 들어 라부아지에의 저작에 나온 “molecules ... qui composent les corps”라는 문장은 영어 번역에서 “atoms of which matter is composed”로 번역되었습니다.⁴ 심지어 원자-분자 개념에 큰 기여를 한 돌턴과 아보가드로(Amedeo Avogadro, 1776-1856) 같은 사람들도 두 단어를 혼용하였고, 현재처럼 두 단어를 명확하게 구분해서 쓰기까지는 몇십 년이 걸렸습니다.⁵ 이 글에서는 혼동을 막기 위해 이 단위 입자를 그냥 “입자”라는 용어로 통일해서 부르겠습니다.

돌턴은 영국 컴벌랜드 지역의 가난한 퀘이커 집안에서 태어났습니다. 그는 열 살 즈음부터 가정교사를 하면서 돈을 벌어야 했고, 15살이 되어 지역의 퀘이커 학교에 들어가 공부하는 한편 조교로 일했습니다. 몇 년이 지나 돌턴은 그 학교의 교장이 되었고, 교장 일을 보면서 스스로 과학을 공부했습니다. 돌턴이 활동했던 퀘이커 커뮤니티는 학문, 특히 수학과 자연철학(물리학)에 큰 가치를 두는 문화를 가지고 있었습니다. 돌턴은 이러한 배경 속에서 기상학과 기체 물리학에 관심을 갖게 됩니다. (이 당시의 돌턴은 화학에 크게 관심이 없었습니다.) 돌턴의 첫 번째 저서는 1793년 발행된

『기상학적 관찰과 소논문(Meteorological Observations and Essays)』으로, 이 책에서 돌턴은 본인이 관찰한 기상학적 현상들을 보고하고 있으며, 또한 스스로 다양한 기체를 가지고 실험한 내용을 기반으로 여러 기상학적 현상들을 설명합니다. 돌턴은 뉴턴 역학의 전통을 따라 기체를 서로 반발하는 단위 입자들로 구성된 것으로 보았고, 이를 이용해 기체의 성질을 설명하였습니다.

1793년부터 돌턴은 맨체스터의 비국교도 학교에서 수학과 자연철학을 가르치는 교수로 일하기 시작했습니다. 그는 수학, 자연철학과 더불어 화학을 가르쳐야 했고, 여기서 최신 화학 문헌들을 접할 수 있었던 것으로 보입니다. 그러나 여전히 돌턴의 관심사는 기체 분자들의 움직임을 설명하는 것이었습니다. 그는 1799년 연구할 시간을 얻기 위해 교수 자리를 내려놓고, 기체에 대한 실험을 본격적으로 수행하기 시작합니다.⁶ 그의 연구에는 좋은 조연자가 있었는데, 바로 맨체스터에서 사귀 친구인 윌리엄 헨리(William Henry, 1774-1836)였습니다. 헨리는 에든버러에서 의학을 공부하던 중 기체 화학자 조지프 블랙(Joseph Black)의 수업을 듣고 화학에 관심을 갖게 되었고, 이후 기체 화학을 연구하고 있었습니다.

돌턴은 자신의 기체 연구를 종합하여 1801년 논문으로 공개합니다. 이 논문에서 돌턴은 현재 “돌턴의 부분 압력 법칙”으로 알려진 법칙을 처음으로 발표하죠. “두 종류의 기체가 섞여 있을 때 각 기체 입자 사이에는 상호 반발력이 존재하지 않는다. (...) 그 결과 각 입자에 가해지는 압력 혹은 무게는 오직 자기 자신과 같은 입자들로부터 기인하는 것뿐이다.” 여기서 주목할 점은 돌턴의 압력 개념이 오늘날과는 조금 달랐다는 것입니다. 돌턴은 뉴턴이 제시한 개념을 기반으로 기체의 압력을 이해했고, 기체 입자들이 서로 반발하고 있기 때문에 압력이 발생한다고 생각했습니다. 그런데 두 종류의 기체 입자를 섞었을 때 그들 사이에 서로 반발력이 존재한다면 같은 종류의 입자간 압력에 더하여 상호 반발력으로 인한 압력까지 발생하게 됩니다. 이는 실험 결과

3. 당시의 용어로는 “자연철학자들”입니다.

4. Mi Gyung Kim, “The Layers of Chemical Language, I: Constitution of Bodies v. Structure of Matter,” *Hist. Sci.* **30**, 74 (1992).

5. Mi Gyung Kim, “The Layers of Chemical Language, II: Stabilizing Atoms and Molecules in the Practice of Organic Chemistry,” *Hist. Sci.* **30**, 397-437 (1992).

6. 생계를 위해서는 개인 교사로 일했습니다.

에서 벗어나는 것처럼 보였기 때문에 돌턴은 다른 종류의 기체 입자들끼리는 반발하지 않는다고 설명했던 것입니다.

돌턴의 논문은 영국 과학계에서 큰 흥미를 끌었습니다. 험프리 데이비, 토머스 톰슨(Thomas Thomson, 1773-1852) 등 젊은 화학자들이 돌턴의 논문을 열심히 읽었고, 또한 비판했습니다. 돌턴은 순수하게 뉴턴의 전통을 따라 반발력만 가지고 기체의 성질을 설명했죠. 화학자들은 이러한 설명을 받아들일 수 없었습니다. 분명히 입자들 사이에는 친화력이라는 특별한 인력이 존재하는 것 같은데, 어떻게 반발력만 가지고 입자들의 성질을 설명한다는 말입니까? 심지어 친구였던 헨리조차 돌턴의 이론에 동의할 수 없었습니다.

돌턴은 이 공격을 막아내기 위해 이산화 탄소의 용해 과정을 연구했고, 1802년 기체가 화학적 친화력이 아니라 기체의 압력에 의해 물에 용해된다는 관찰 결과를 발표합니다. 헨리는 이 결과에 자극을 받아 용해 과정에 대한 실험을 수행하기 시작했고, 돌턴이 찾지 못했던 법칙을 찾아낼 수 있었습니다. “기체가 두 배, 세 배로 압축되면 일반적인 대기압에서 용해되는 부피의 두 배, 세 배가 용해된다.” 오늘날의 용어로 하자면 증기압과 용해도가 비례한다는 법칙이죠. 네, 바로 그 “헨리의 법칙”입니다.⁷ 돌턴은 이 결과에 크게 기뻐하며 이것이 기체 입자들이 화학적 친화력과 상관없이 물에 용해된다는 방증이라고 여겼습니다. 헨리 역시 그 설명에 설득되었습니다.

하지만 돌턴 스스로가 자신의 설명에 100% 만족할 수 없었습니다. 기체의 종류에 따라 용해도가 달라졌기 때문입니다.⁸ 고민하던 돌턴은 입자들의 “상대적 무게”에 따라 서로 다른 반발력이 작용하는 것이 아닌가 하는 생각에 도달하게 됩니다. 돌턴은 1803년부터 실험적으로 이 무게를 결정하려고 시도하였고, 이 시기부터 여러 기본 입자가 결합해서 만들어진 입자들이 존재한다는 가설(이하 “원자설”)을 탐구하기 시작했습니다.⁹ 하지만 여전히 돌턴의 주된 관심사는 사방에서 끊임없이 밀려오는 공격으로부터 자신의 기체 이론을 방어하는 것이었습니다. 당시 화학계에서 헨리를 제외

한 모든 화학자들은 돌턴의 이론을 의심스럽게 생각했고, 논문과 책으로 날카로운 비판을 날리고 있었습니다. 돌턴은 기체 이론을 변호하는 글을 바쁘게 쓰는 짬짬이 원자설에 대한 연구를 수행했죠.

1805년 돌턴은 자신의 기체 이론을 개정하는데 성공합니다. 그는 서로 다른 종류의 기체 입자들이 서로 다른 크기를 가지고 있다고 가정하고, 수소 입자의 크기를 기준으로 여러 입자들의 크기를 표로 만들어 보았습니다. 이렇게 되면 서로 다른 기체 입자들이 다른 성질을 갖는 것을 설명할 수 있습니다. 이후 돌턴은 입자들의 “무게”와 “크기”라는 개념을 두고 많은 고민을 합니다. 이들을 어떻게 측정할 수 있을까요? 그의 이러한 고민은 몇 년간 숙성되어 마침내 1808년 발간된 『화학 철학의 새 체계(New System of Chemical Philosophy)』에서 완성된 답을 주게 됩니다.

사실 『화학 철학의 새 체계』는 원자설에 관한 책이 아닙니다.¹⁰ 1부(1808년 발간)의 대부분은 열의 효과와 기체, 액체, 고체의 성질을 다루고 있고, 2부(1810년 발간)에서는 무기 화합물들에 대한 설명을 수록하고 있습니다. 원자설은 1부 마지막에 “화학적 합성에 관하여(On Chemical Synthesis)”라는 장에 간신히 등장합니다.¹¹ 그것도 우리가 일반화학 책에서 보는 식으로 깔끔하게 정리된 설명이 아니라 어떻게 단순 입자(원자)들이 조합되어 복합 입자(분자)들을 만들어내는지, 그리고 어떻게 그 원리를 이용해 단순 입자들의 무게를 결정할 수 있는지에 대한 논의입니다. 당시의 화학 지식로는 두 물질이 반응할 때 그 단위 입자들이 어떤 비율로 반응하는지는 알 수 없었기 때문에, 돌턴은 가장 단순한 비율을 가정합니다. 예를 들어 물 입자는 수소 입자와 산소 입자가 1:1의 비율로 결합하여 만들어지고, 암모니아 입자는 수소 입자와 질소 입자가 1:1의 비율로 결합하여 만들어진다는 것이었죠. 물의 조성이 산소 약 85%와 수소 약 15%라는 것을 밝혀 놓았으니, 해당 비율을 적용하면 산소 입자와 수소 입자의 무게비는 약 7:1이 됩니다. 이 “단순한 비율” 가정이 우리에게서 어색하게 보일 수 있지만 돌턴에

7. John J. Carroll, “Henry’s Law: A Historical Law,” *Journal of Chemical Education* **70**: 91-92 (1993).

8. 오늘날의 용어로 하자면 헨리 상수가 분자마다 다르다는 이야기입니다.

9. 그래서 어떤 사람들은 돌턴의 원자설이 최초로 그의 연구 노트에 등장하는 1803년 9월 6일을 근대 원자설의 탄생일로 보기도 합니다.

10. Philip Ball, “In Retrospect: A New System of Chemical Philosophy,” *Nature* **537**: 32-33 (2016).

11. John Dalton, *A New System of Chemical Philosophy*, Vol. 1(1808), pp. 211-216.

게는 자연스러운 것이었습니다. 같은 종류의 기체 입자들은 서로 반발하는 성질을 가지고 있기 때문에 같은 종류의 입자들이 서로 결합하는 상황은 최소한으로 만드는 것이 유리할 테니까요.¹² 『화학 철학의 새 체계』는 즉각 많은 관심을 끌었습니다. 그런데 우리의 상상과는 달리, 이 책이 “원자”라는 개념을 처음으로 제시했기 때문에 관심을 끌었던 게 아니었습니다. 앞서 설명했던 바와 같이, 당시 화학자들은 이미 물질이 단위 입자로 구성되어 있고, 동일한 종류의 단위 입자들은 동일한 성질을 가지고 있다는 데 동의할 뿐 아니라, 단순 입자들이 결합하여 복합 입자를 이룬다는 그림도 가지고 있었습니다. 심지어 지난 글에서 살펴본 것처럼 일정 성분비의 법칙도 널리 받아들여지고 있었습니다. 따라서 우리가 일반화학 시간에 배우는 “돌턴의 원자설”은 사실 19세기 초 화학자들에게는 당연한 이야기였던 것이죠. 돌턴의 창의적인 기여는, 최대도 단순한 결합비라는 (지금의 눈으로 보면 틀린) 가정을 도입하여 각 단순 입자들의 원자량을 상대적으로 결정할 수 있다는 것을 보인 데에 있었습니다. 데이비는 이렇게 평가하였습니다. “돌턴 씨가 원자들을 배치하고 결합하고 저울질하고 측정하고 계산한 창의성과 재능을 칭송하지 않는 것은 불가능하다.”¹³

어쩌면 돌턴은 본질적으로 화학자가 아니었기 때문에 이런 대담한 시도를 할 수 있었는지도 모릅니다. 당시 화학자들은 화학 원소의 수가 점차 늘어나는 것을 지켜보면서 (1812년에 이르면 약 33개) 진정한 “단위 입자”가 존재할 수 있는가에 대한 의구심을 품고 있었습니다. 또한 원자설이 쓸모 있는 화학 이론이 되려면 단위 입자들 사이의 반응비를 정확히 알고 있어야 합니다. 당시에 알려져 있던 것은 당량(equivalent) 뿐이었습니다. 반응비를 알 수 없다면 어떻게 정확한 원자량을 구할 수 있을까요? 따라서 그 어떤 화학자도 돌턴과 같은 시도를 감행하지 못했습니다. 돌턴은 일반적인 화학자라면 상상하지 못할 과감한 시도로 이러한

문제를 돌파해 버렸던 것입니다.

오늘 글을 마치기 전에 돌턴에 관한 역사학 논쟁을 한 가지 소개하고자 합니다. 과학사학계에서는 돌턴이 정확히 어디에서 원자설의 아이디어를 얻었는가를 두고 오랫동안 논쟁을 해왔습니다.¹⁴ 돌턴 자신이 세 가지의 기원을 언급하고 돌턴의 주위 사람들도 여러 가지 기원을 제시하는데, 그 기원이 서로 상충한다는 문제가 있습니다. 또한 돌턴의 논문들은 돌턴이 서기로 있던 학회에 몇 년간 비공개 상태로 보관되어 있었습니다. 그 이야기는 공개되기 전까지 돌턴이 그 내용을 수정하는 게 가능했다는 의미가 됩니다. 따라서 사료들끼리 서로 충돌하는 경우 어느 것을 받아들여야 할지 판단하기 어렵죠. 여전히 이 문제는 깔끔하게 해결되지 않았고, 여러 사람이 계속해서 새로운 사료를 들이밀면서 새로운 기원을 제시하고 있습니다.¹⁵ 이 논쟁이 끝나지 않는 것은, 근대 화학의 주춧돌 중 하나인 원자설의 뿌리를 정확히 밝혀낸다는 게 매력적인 작업이기 때문인지도 모르겠네요.¹⁶



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, 박사 후 연구원(2016.8-2019.4, 지도교수 : Rohit V. Pappu)
- 한국과학기술원 자연과학연구소, 연구조교수(2019.6-2020.8)
- 부산대학교 화학과, 조교수(2020.9-현재)

12. Alan J. Rocke, "Atoms and Equivalents: The Early Development of the Chemical Atomic Theory," *Historical Studies in the Physical Sciences* **9**: 225-263 (1978).

13. 앞의 글, 237쪽에서 재인용.

14. Leonard K. Nash, "The Origin of Dalton's Chemical Atomic Theory," *Isis* **47**: 101-116 (1956).

15. 최근에는 아마추어 과학사학자들도 이 논쟁에 뛰어들었습니다. 일례로 다음과 같은 논문들이 있습니다. Herbert T. Pratt, "A Letter Signed: The Very Beginning of Dalton's Atomic Theory," *Ambix* **57**: 301-310 (2010); Mark I. Grossman, "John Dalton's 'Aha' Moment: the Origin of the Chemical Atomic Theory," *Ambix* **68**: 49-71 (2021)

16. 이 글에서는 현재 시점에서 가장 널리 받아들여지는 설명을 채택하였습니다.

삼국지 속의 화학

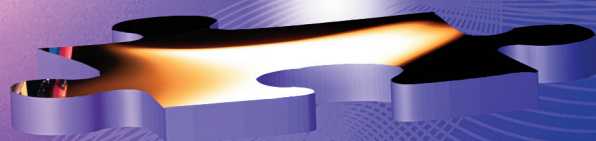
장흥제 | 광운대학교 화학과,
hjang@kw.ac.kr



세상에는 어마어마하게 많은 양이 판매되고, 또 많은 사람들에게 사랑받으며 오랜 시간 읽혀 온 책들이 많다. 역사상 가장 많이 판매된 서적이라는 「성경」을 시작으로 「햄릿」, 「맥베스」 등의 4대 비극과 「베니스의 상인」, 「한여름밤의 꿈」을 비롯한 5대 희극, 그리고 여기 포함되지 못하는 가장 유명한 「로미오와 줄리엣」까지 수없이 많은 명작을 남긴 셰익스피어의 책들이 뒤를 잇는다. 애거서 크리스티나 코난 도일, 현대로 오면 칼 세이건, 베르나르 베르베르, 무라카미 하루키, 제레드 다이아몬드 등 세계적으로 거대한 인기를 끌었던 책들은 다양하다. 그리고 우리나라의 많은 청소년들 심지어 성인들까지도 한 번쯤은 읽어보았거나 최소한 등장 인물들의 이름과 대략적인 관계라도 알고 있는 책이 있다. 바로 「삼국지(三國志)」다.

삼국지 최고의 악역, 동탁

삼국지가 실제 역사를 얼마나 반영했는가를 떠나 중국의 긴 역사 속 한 지점에서 삼국지는 시작된다. 후한(後漢) 말 영제(靈帝) 때 정권을 잡아 자신들의 입맛대로 조정을 망가뜨린 십상시의 난과 황건적의 난을 시작으로 군웅할거의 시



대를 통해 위(魏), 촉(蜀), 오(吳)의 천하 삼분의 시기, 그리고 서진에 의해 통일된 3세기 후반까지의 이야기를 다룬다. 수많은 장수와 지략가, 배반과 역모를 일으킨 자들이 출현하지만, 삼국지 이야기를 통틀어 가장 확고한 악역은 한 명으로 의견이 모인다. 워낙에 유비 헌덕(劉備 玄德)을 중심으로 오호대장군, 와룡과 봉추, 강유, 그리고 간손미 삼총사(게임 상에서 어중간한 능력치로 애매한 활용도를 갖는 간웅, 손건, 미축의 별칭)까지 시대적이고 도의적인 측면에서 촉나라에 몰입하기 쉬운 분위기상 과감하고 냉혹하며 능력 주의적인 위나라의 조조 맹덕(曹操 孟德)을 대적자의 위치에 선 악인으로 생각하기 쉽다. 하지만 삼국지 이야기 초반에 등장하는 맹장이었으나 권력의 중심에 섬에 따라 폭군의 면모를 드러낸 동탁 중영(董卓 仲英) 앞에서는 악인의 위엄이 바랜다.

인물들을 미화해 표현하는 와중에도 동탁은 살찌고 탐욕스러운 모습으로 그려지곤 한다. 그 때문에 동탁에게 매력을 느끼는 사람은 매우 흔하지 않지만, 동탁을 보좌하던 인물들의 능력과 관계가 출중해 기억에 남는다. 장수 화웅과 장료, 그리고 책사인 가후와 이유, 그리고 삼국지 최강의 무장인 여포와 세상을 흔들 미녀였다는 초선까지.

하지만 나를 비롯한 많은 사람의 기억에 남는 것은 동탁의 죽음과 그 이후일 것이다. 동탁의 죽음으로 본격적인 삼국지의 이야기가 펼쳐짐과 동시에 폭정을 일삼던 악인의 죽음 이후를 묘사한 다음과 같은 설명 때문이기도 하다.

‘생전에 남달리 몸이 비대하던 동탁은 죽은 송장도 유난히 크고 기름져 군사들이 그의 배꼽에 심지를 박아 불을 켜서 등(燈)을 만들었다.’

사람의 배에 심지를 꽂아 등으로 사용하는 것은 가장 기초적인 화학 반응인 연소로 귀결되는 흥미롭고도 매력적인 장면이 아닐까?

심지 효과와 자연발화

초가 타오르는 과정은 학창시절 간략하게나마 배우는 내용이다. 촛불은 그을음 나노입자들이 가득해 불꽃이지만 벽면에 그림자가 맺힌다는 사실이나, 초의 가장 안쪽이 푸른 것은 온도 때문이 아닌 탄소 연료에서 생성된 CH* 라디칼의 화학 발광(chemiluminescence) 때문이라는 사실까지는 아니어도, 적어도 액화된 파라핀이 심지를 타고 올라가 연소가 지속된다는 정도는 들어보았을 것이다.

인체의 자연발화(spontaneous human combustion)라는 풀리지 않고 검증되지도 않은 현대 미스터리를 과학적으로 설명해보려는 시도도 심지의 타오름을 이야기하는 「심지 효과(wick effect)」로 시작된다. 인체에 열이 가해지며 점차 체내의 지방이 녹아 심지처럼 옷감을 타고 올라 불이 지속된다는 것이다. 인체가 곧 심지가 되는 셈이다. 하지만



▲ 촛불은 연소 반응을 통해 시간을 측정하는 데도 사용된다

▶ 삼국지 속 최고의 악역, 동탁

정말 이런 단순한 접근만으로 소위 <동탁 등불>이 설명될 수 있을지는 의문이다. 체내의 지방은 충분할 것이지, 타오름이 지속될 수 있을지, 지방의 액화가 단순히 낮은 녹는점을 갖는 파라핀처럼 심지 근처 불꽃에서 퍼지는 열 만으로 가능할 것인지.

물론 정확하진 않더라도 재미삼아 하나씩 추측하고 계산할 수 있다. 과학자들이 꽤나 좋아하는 ‘이래서 이과란...’의 방식으로 말이다.

동탁 연료의 잠재적 에너지량

동탁은 비대한 몸으로 그려지지만 실제로 어느 정도인지 알기 어렵다. 동탁의 키에 대해서도 간헐적인 정보만이 남아있을 뿐 추측이 어렵다. 삼국지 연의(演義)와 정사(正史)에서 각각 다르게 표현되곤 하지만 유비, 장비, 조운, 제갈량은 8척으로, 관우는 9척, 그리고 조조는 7척의 키고 묘사된다. 한 척은 보통 30 cm 내외라 하지만 단위의 기준도 시대에 따라 달랐다. 후한시대의 한 척은 23.7 cm였으며 조선 시대에는 31.1 cm였다. 그나마 동탁의 신장을 묘사한 한 2차 창작 게임(삼국무쌍)을 기준한다면 6척으로 일컬어지는 동탁의 키는 후한말 기준 최소 142.2 cm이며 조선 시대 기준 최대 189.6 cm의 범위 안에 있을 것이다.

신장으로부터 체지방의 질량의 계산도 가능하다. 체질량 지수(body mass index, BMI)로 간단한 추산이 가능하며, 후한서 동탁열전에 쓰여진 「체가 작고 똥똥하다」는 묘사와 삼국지연의의 「몸이 비대해서 오래 앉아있지 못하고 드러누웠다」라는 표현은 우리 상상보다 동탁의 BMI가 높을 것을 의미한다. 동탁이 매우 극심한 비만이라 가정해 BMI 100으로 판단한다면, 동탁의 체중은 최소 202.2 kg에서 최대 359.5 kg의 범위에 들게 된다. 앞선 키의 범위를 고려했을 때 말이다.

몇 가지 보편적으로 알려진 통계적 수치들을 통해 조금 더 유용한 정보로 접근할 수 있다. 첫째, 일반적으로 골격근량은 평균적으로 체중의 35%에 해당한다. 둘째, 골격근량은 전체 근육량의 57.7% 수준이다. 셋째, 근육은 단백질과 수분으로 이루어져 있으며 이는 불에 쉽게 타오를 수 없으니, 체중에서 근육량을 제외해 지방의 무게만을 구해볼 수 있다. 넷째, 지방은 g당 9 kcal의 열량을 보유하고 있다. 이 모든 과정은 동탁 등불의 열량이 2.9~5.3 MJ에 달한다는

것을 보여준다.

동탁 등불은 얼마나 오래 탈까?

문헌에 따라 불을 붙인 동탁 등불은 3일 가량 타올랐다고도 하고 무려 50일이나 꺼지지 않았다고도 한다. 다음과 같은 표현을 통해 본다면 잠시 동안이 아닌 꽤나 오랜 시간동안 동탁 등불은 꺼지지 않았어야만 한다.

‘불인 불은 이글이글 기름이 끓으며 며칠 밤을 두고 왔다. 지나가는 사람마다 동탁의 시체를 발로 짓밟고 머리를 걷어차지 않는 사람이 없었다.’

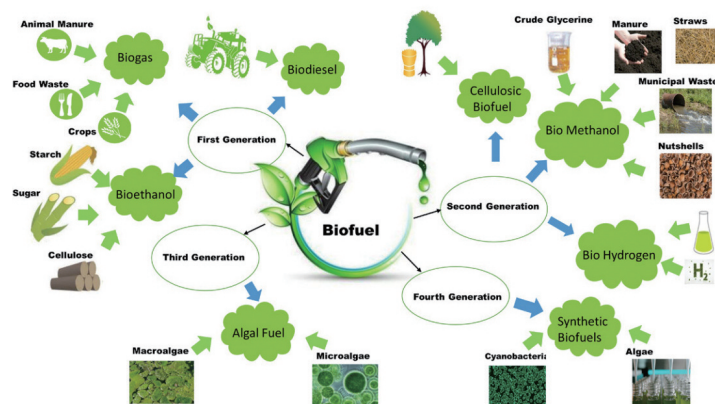
동탁 연료의 열량은 에너지법 시행규칙 제5조 제1항 관련 환산 기준을 통해 무려 66.0 kg의 등유나 70.8 kg의 휘발유, 혹은 87.6 kg의 파라핀과 같은 양인 것을 알 수 있다. 이 정도면 만에 하나의 사태에서 인간을 연료로 사용하는 것도 나쁘지 않은 모양새다. 우리가 필요한 것은 타오르는 시간이니 일반적으로 사용되는 350 g 중량의 초를 기준으로 열량을 계산하자. 동탁은 최소 250개만큼, 그리고 최대 444개 만큼의 초와 같다.

시계가 없던 과거에는 초가 시간을 재는 도구로 사용되기도 했다. 350 g의 초는 60시간 동안 연소 가능해 가장 대표적인 단위로 사용되었다. 임의로 최소동탁시간과 최대동탁시간을 도출한다면 하나의 동탁 연료 단위는 625일에서 1110일이라는 어마어마한 시간동안 연소한다. 곧 동탁 등불은 ‘이론상’ 가능한 셈이다.

동탁은 바이오디젤화 되었을 것이다

여기서 작은 문제가 하나 발생한다. 동탁의 체내에 있는 지방이 심지 효과를 통해 지속적으로 액화 연료로 변환되기에는 인체의 지방은 다양한 부위에 분포되어 있다는 한정조건이 생겨난다. 동탁의 배에 심지를 꽂았다 쓰였으니 배에 쌓인 두툼한 복부 지방은 유용한 연료겠지만, 팔과 다리, 등 부위의 지방은 사용될 수 없는 지방으로 분류된다.

이 문제는 의외로 간단히 해결될 수 있는데, 동탁이 장시간 동안 방치되고 있다는 것과, 길을 지나가는 사람들이 걷어차거나 무언가를 뿌리는 등 훼손을 일삼았다는 것이다. 일련의 과정들이 동탁 체내 동물성 지방을 바이오디젤(biodiesel)



▲ 동탁도 바이오디젤이었을 수 있다

로 변환시켰다면 모든 문제가 해결된다. 연료에 유동성이 생겨나며 체내 수분에 비해 비중이 낮은 바이오디젤은 심지에 가까운 복부로 상분리를 통해 모이게 된다. 보편적으로 트리아실글리세라이드(triacylglyceride)와 같은 지방질에 알코올과 강한 염기를 처리하면 지방산 에스터와 글리세린(glycerin)으로 분리되는데 이 과정이 바이오디젤의 형성에 속한다. 정확히는 알코올과 에스터 결합을 통해 형성되는 지방산 에스터가 연료다. 동탁 등불에 알코올이나 잿불을 뿌리며 걷어차 교반을 시키는 모든 행위들이 동탁 바이오디젤로 변환시킨 셈이다.

삼국지에 서술된 하나의 사건에 대한 짧은 문구로부터 우리는 과학적 사고 혹은 이과적 감성으로 가능성의 추론과 문제의 해결까지 도달할 수 있다. 이 모든 내용이 진실일지 여부가 과연 중요할까? 조금은 잔인하지만 언젠가 실제로 사용될 지식이 될 수도 있고, 바이오디젤화 반응에 대해서도 이야기해 볼 수 있으며, 모두가 관심갖는 친환경 에너지의 활용에 대한 제안까지 가능하니 삼국지는 또 하나의 교훈을 남긴 셈이다. ⚙️



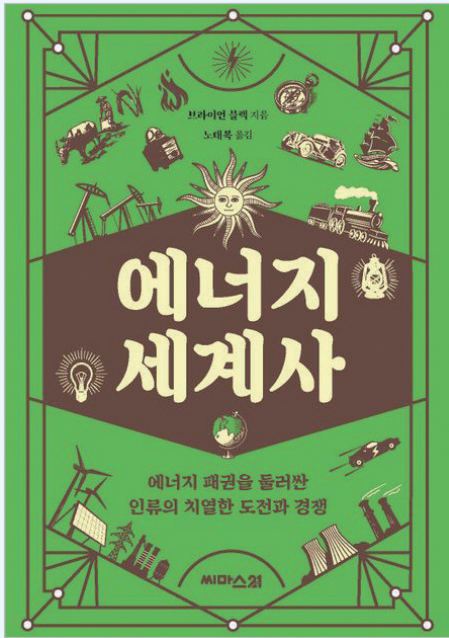
장흥제 Hongje Jang

- KAIST 화학과, 학사(2004.3 - 2008.2)
- KAIST 화학과, 박사 (2008.3 - 2013.8, 지도교수 : 한상우)
- 서울대학교 화학과 박사 후 연구원 (2013.9 - 2015.1, 지도교수 : 민달희)

- Georgia Institute of Technology, Department of Chemistry and Biochemistry 박사 후 연구원 (2015.1 - 2016.1, 지도교수 : Mostafa A. El-Sayed)
- 광운대학교 화학과 부교수(2016.3 - 현재)

에너지 세계사

브라이언 블랙 글 | 노태복 번역 | 씨마스21 |
2023.4.10 출간
ISBN 9791197808890



목 차

PART 1. 에너지로 본 인간의 연대기

Chapter 1. 태초에 태양이 있었다

PART 2. 에너지 전환이 가져온 동서양의 만남

Chapter 2. 풍력 에너지와 대항해시대

Chapter 3. 화석연료, 산업화의 시대를 열다

Chapter 4. 에너지 대중화의 시대가 열린다

PART 3. 에너지 전쟁의 시대

Chapter 5. 검은 황금, 석유 시대의 빛과 그림자

Chapter 6. 두 얼굴의 에너지

Chapter 7. 가진 자 vs. 갖지 못한 자

PART 4. 지속 가능한 에너지 시대를 위해

Chapter 8. 에너지 전환을 위한 노력과 논쟁들

책 소개

지금 세계는 에너지를 둘러싼 치열한 전쟁이 벌어지고 있다. 2022년 2월 발발한 러시아-우크라이나 전쟁은 전 세계적으로 에너지 위기 상황을 가져왔고, 남극과 북극의 화석연료를 둘러싼 세계 각국의 눈치 싸움도 계속되고 있다. 한편 20세기 내내 갈등을 거듭하던 사우디아라비아와 이란이 관계 정상화에 나서며 중동 지역의 판도도 급변하고 있다. 게다가 중국은 아랍에미리트에서 수입한 액화천연가스(LNG)를 위안화로 결제하고, 러시아산 에너지 구매를 확대하기로 하며 미국의 신경을 긁고 있다. 이와 동시에 유럽연합에서는 2035년부터 내연기관 차량을 판매 금지하는 법안에 최종 합의하는 등 화석연료에서 탈피하려는 움직임도 본격화하고 있다.

오늘날 에너지는 곧 국가의 생존을 위한 가장 중요한 요소가 되었고, 에너지를 둘러싼 국제 정세는 시시각각 변화하고 있다. 이런 변화는 우리의 삶에 어떤 영향을 미치고, 인류의 미래를 어떻게 바꾸어놓을 것인가? 그리고 지속 가능한 미래를 위해 인류의 에너지 사용은 어떤 방향으로 나아가야 하는가? 인간 역사와 환경의 상호관계를 연구해온 저자 브라이언 블랙은 이 책에서 인류의 에너지 사용에 획기적인 전환이 이루어진 순간마다 그 사회와 인류 역사 전체에 어떤 변화가 일어났으며, 그 결과 인간의 생활이 어떻게 바뀌었는지를 생동감 넘치게 그려낸다.

저자 소개

브라이언 블랙: 펜실베이니아주립대학교 알투나캠퍼스 역사 및 환경 연구교수. 인간이 에너지를 얻고 사용하는 방식과 인류의 역사를 어떻게 변화시켰으며 지구 환경에 미치는 어떤 영향을 미쳤는지에 대해 관심을 가지고 연구해왔다. 이 책은 그가 오랜 시간 동안 연구해온 에너지를 중심으로 수천 년 인류의 역사를 재구성하며 인류사와 에너지의 미래에 대한 새로운 시각을 제시했다는 평가를 받았다. <펜실베이니아 히스토리>의 편집장을 역임했으며, <저널 오스 이코노믹 히스토리>, <게티스버그 리뷰>, 계간 군사저널 <HMQ>의 편집진으로 활동했다. 저서로는 『미국 최초의 석유 붐의 풍경』, 『세계 역사의 현실』, 등이 있다. 현재는 20세기 석유의 역사와 그 소비 방식에 관심을 가지고 연구하고 있다.

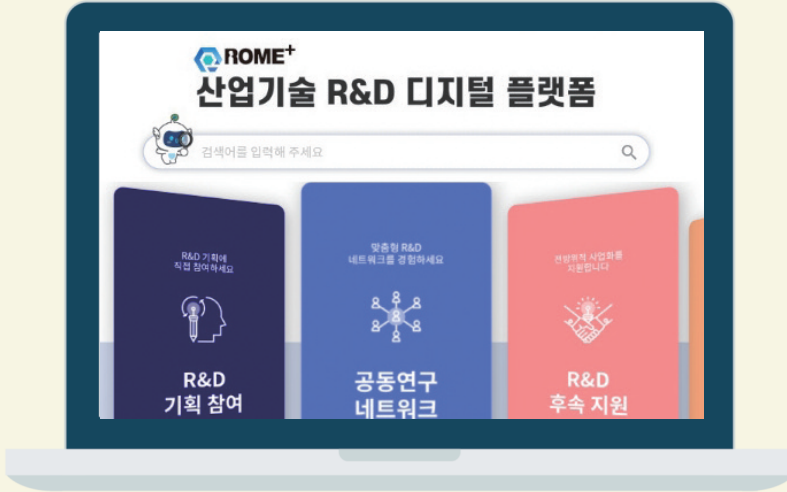
역자 소개

노태복: 한양대학교 전자공학과를 졸업했다. 환경과 생명운동 관련 시민 단체에서 해외교류 업무를 하던 중 번역의 길로 들어섰다. 과학과 인문의 경계에서 즐겁게 노니는 책들 그리고 생태적 감수성을 일깨우는 책들에 관심이 많다. 옮긴 책으로 『수학의 쓸모』, 『위험한 숫자들』, 『다크 데이터』, 『아인슈타인이 피델과 함께 걸을 때』, 『혐오의 과학』, 『서양과학사상사』, 『생각하는 기계』 등이 있다.



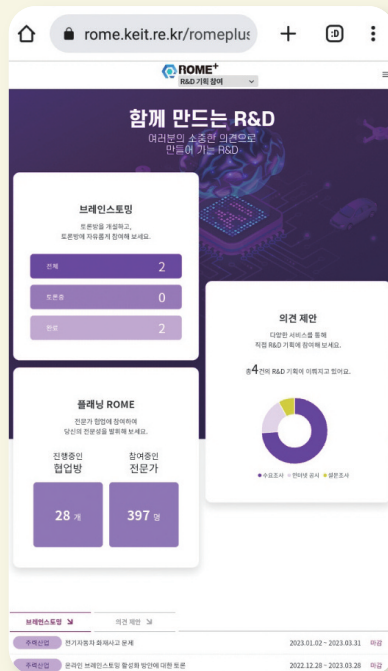
ROME+

(<https://rome.keit.re.kr/romeplus/>)



플랫폼 소개

이번 5월 호에는 한국산업기술평가관리원(KEIT)에서 지원하는 ROME+(R&D Open info. Market for research Efficiency) 플랫폼을 소개하고자 합니다. 대한화학회 회원들은 대부분 한국연구재단을 통해서 다양한 형태로 연구비를 지원받고 있습니다. 하지만, 회원들의 연구 수준이 높아지고 연구자의 수 또한 증가하면서, 연구과제에 선정되어 안정적인 연구비를 확보하기가 쉽지 않은 것도 사실입니다. 따라서, 연구 과제에 관한 정보를 다양한 곳에서 얻는다면, 연구자들에게 큰 도움이 될 것으로 생각합니다. ROME+ 플랫폼은 연구자의 관심 키워드에 대한 특허, 논문, 국가 R&D 지원 정보, 관련 연구자 정보 등을 실시간으로 연관 분석하여 사회망 분석 형태로 제시해 줍니다. 이를 통해, 연구자들이 기술 동향 분석이나, 연구 개발 기획 과제, 공동 연구자 탐색 등을 효과적으로 할 수 있을 것으로 기대됩니다. ROME+ 플랫폼이 회원 여러분의 연구 활동에 도움이 될 수 있으면 하는 바람으로 소개합니다.



>>> 운영위원회

4월 운영위원회

2023년 4월 7일에는 제5차 운영위원회가 개최되었다. 먼저 3월 24일에 개최된 이사회 논의 결과를 공유하였고, 춘계 학술발표회의 총회자료집 내용을 검토하였다. 기금위원회에서 결정하여 한국과학기술단체 총연합회에 “상생하는 후원” 3억 원을 대차한 내용을 보고 3호 안건으로 추가하기로 하였다. 홍보 분과에서는 화학세계의 하반기 우수선도 연구기관 추천을 요청하였다. 국제협력 분과에서는 ACS Publications Summit 진행 상황을 공유하였는데, 최근 성 평등(gender equality)을 중요시하는 세계적 흐름에 따라 여성과학자의 참여를 적극적으로 확대할 필요가 있음을 강조하였다. 추계 학술발표회에서 진행될 KCS-RSC joint 심포지엄의 Energy science 관련 연사로, J. Mater. Chem. C와 Mater. Adv. 에디터인 Natalie Stingelin, 조지아공대 교수가 참석할 예정이며, 성 평등 이슈에 대한 패널 토론을 위해 대한화학회 여성위원회 위원장과 연사 섭외 등의 논의를 진행하기로 하였다. 교육 분과에서는 과학의 달 포스터 및 시화 작품을 접수하고 있으며, 수상작은 추계학술발표회에서 전시하기로 하였다. 이후 사무국에서 춘계학술발표회의 최종 진행 시나리오를 준비하여 발표하였고, 평의회, 총회, 특별 심포지엄 및 분과 심포지엄의 진행 상황을 최종 점검하였다.

4월 14일에는 제6차 운영위원회가 대면과 비대면 하이브리드 회의로 진행되었다. 대한화학회 웹사이트 개편을 위해 견적서를 검토하였고, 반응형 웹 제작을 통해 모바일 기기에서도 동일 화면 및 콘텐츠를 제공할 수 있는 시스템을 구축하기로 하였으며, 차기 회장단과 최종 논의 후 진행하기로 하였다. 물리화학분과회에서 분과회 홈페이지 구축을 위해 대한화학회 홈페이지와 동일한 형식의 도메인 사용을 요청하였으며, phychem.kcsnet.or.kr을 물리화학분과회의 홈페이지 주소로 사용케 하는 것을 검토하고 승인하였다. 화학세계 온라인 화 사업을 맡고 있는 기획 분과에서는 3월호 화학세계 파일과 편집본을 홈페이지 제작업체에 전달하여 기본 템플릿을 구성하도록 요청하였음을 공유하였다. 학술 분과에서는 춘계 학술발표회 심포지엄 장소에 대한 스크린 세팅 사항을 최종 결정하였고, 전기화학분과가 사용할 205, 206호 통합 회의실에는 85인치 TV모니터 2대를 추가 설치하는 것으로 확정하였다. 이외 다른 통합 회의실의 스크린 사용 위치는 4월 25일 화요일 현장 확인 후 결정하기로 하였다. 홍보 분과에서는

바이오니아와 인투셀 원고가 게재된 화학세계 4월호를 업체에 추가 발송하기로 결정하였다. ‘ACS publications summit 심포지엄’ 연사들의 일정을 공유하고, 함께 참석하는 ACS 아시아 오피스 담당자들의 등록을 면제 처리하기로 하였다. ACS 심포지엄의 웨비나 송출을 위한 업체 견적 비교를 통해 SY MICE 업체로 결정하였다. 동우화인켐 심포지엄은 예년과 같이 5~7월에 연사 3명을 섭외하여 온라인 심포지엄으로 진행하기로 하였고, 한국화학연구원 조성근 박사, 서울대학교 김경택 교수 외 반도체 AI 관련 연사 1인을 추가 섭외하는 것으로 결정하였다. 2023년 7월 터키에서 열리는 19th Asian Chemical Congress, 8월에 네덜란드에서 열리는 IUPAC General Assembly(IUPAC CHAINS 2023)에 참석할 대표단을 논의하였다. 2024년 1월에 열릴 BOWEI research conference (BRC-4)는 “The Magic of Synthesis – New Frontiers of Molecular Architecture”의 주제로 진행될 예정으로, 윤재숙 홍보부회장과 강은주 총무실무이사가 논의하여 KCS 대표단을 구성하기로 하였다.

>>> 부 고

- 2023.4.24 장두전(서울대학교 화학부 명예교수) 회원 부친상
- 2023.4.13 이순보(성균관대학교 화학과 명예교수, 대한화학회 제38대 회장) 회원 모친상
- 2023.4.11 정희일(한양대학교 화학과) 회원 빙부상
- 2023.4.4 Jacopo Tessarolo(전남대학교 화학과) 회원 모친상
- 2023.4.3 홍창섭(고려대학교 화학과) 회원 빙부상

>>> 신입회원

강성은	대구경북첨단의료산업진흥재단	정희원
김소영	대구경북첨단의료산업진흥재단	정희원
김희주	강릉원주대학교	학생회원
박한결	강릉원주대학교	학생회원
양지윤	공주대학교	학생회원
이도현	성균관대학교	학생회원
이문구	강릉원주대학교	학생회원
이준기	엔비스아나 주식회사	정회원
전원희	한국화학연구원	정회원
정유진	성균관대학교	학생회원
주연지	공주대학교	학생회원
하창수	아주대학교	학생회원
한현수	전북대학교	학생회원
황석윤	성균관대학교	학생회원
황중하	한국에너지공과대학교	학생회원

코로나19 대유행과 함께 증가한 대기 중 미세플라스틱

- 미세플라스틱을 새로운 대기오염물질로 관리해야 함을 시사하다



지면광고 안내

화학세계

- 광고 마감일 : 전월 10일 까지 (매월 1일 발간)
- 원고 마감일 : 전월 5일 까지
- 광고 크기
가로 210mm, 세로 270mm(바탕색이 있을경우 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	칼라
지면광고	내지	1,000,000~5,000,000 원	칼라
웹사이트	배너	100,000 원	칼라

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

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

회비 및 구독료 안내

1. 모든 회원에게는 『화학세계』가 무료로 배포됩니다.
2. 이에 회원 제위께서는 회비 및 구독료를 납부하시어 본회 각종 간행물을 중단없이 받아보시기 바랍니다.

2023년도 본회 회비 및 각종 간행물의 구독료는 다음과 같습니다.

(단위: 원)

구분	종신회원	정회원	교육회원	학생회원
회원기간	2023.1.1~2023.12.31			
연회비	1,400,000 (가입 당시 정회원 연회비의 20년치)	70,000	50,000	50,000
회지 · Bulletin지	30,000	30,000	30,000	15,000
분과회비	공업, 화학교육, 환경 : 10,000원			
	고분자 : 20,000원			
	무기, 분석, 생명, 유기, 의약, 재료, 전기 : 30,000원			
	물리 : 50,000원			
책 발송 안내	<ul style="list-style-type: none"> • 정·교육회원의 '화학세계' 및 '유료 구독 학술지' 등은 회비 및 구독료 납부 월의 다음 달부터 1년간 발송됩니다. • 학생회원에게는 회원으로 가입한 해당 연도 동안 '화학세계'가 발송됩니다. 단, 유료 구독학술지는 납부 월의 다음 달부터 1년간 발송됩니다. ※학생회원에게는 재학 중인 학교로만 보내드립니다. 			

■ 회비납부 관련문의

- 전화 : 02-953-2095
- 팩스 : 02-953-2093
- 전자우편 : member@kcsnet.or.kr
- ※ 회비납부 기간 : 1월 2일~11월 30일
- ※ 지로용지는 별도로 발송하지 않습니다.

- 납부방법 : 홈페이지에서 회원확인 / 회비납부 / 영수증 출력 등을 할 수 있습니다.

회원확인 → ID 변경 → 회원 로그인 → 결제 및 영수증 출력



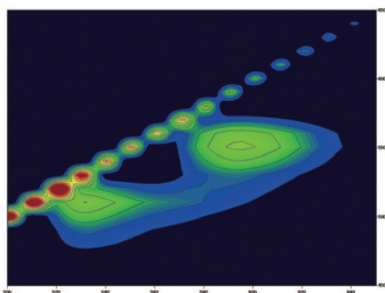
Spectrofluorophotometer RF-6000

High-Speed 3D Measurements

Measuring Fluorescent Dyes for DNA Detection

A 3D fluorescence spectrum of DNA was measured by making the DNA fluoresce using fluorescent dye-labeled probes.

In combination with the 60,000 nm/sec maximum measurement speed, the system was able to measure all regions of the 3D fluorescence spectrum very quickly.

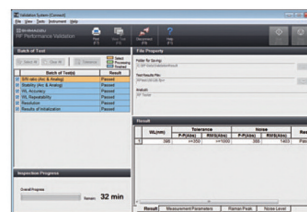


Maintenance-Free Operation

Checking System Functionality Easily Using the Validation Program

The system supports performance validation in accordance with procedures specified in JIS K 0120 General rules for fluorometric analysis.

It includes a Xenon lamp with a 2000-hour life, which is about four times longer than the previous Shimadzu model. Consequently, it allows significantly lower running costs and eliminates the trouble of making adjustments after lamp replacement.



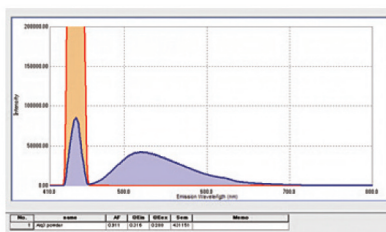
Dramatically Higher Sensitivity and a Wider Range of Applications

Quantum Yield and Quantum Efficiency Measurement

Evaluating the Luminous Efficiency of Solid-State Semiconductor Materials

A 100 mm diameter spectralon integrating sphere and dedicated holder were used to measure the fluorescence quantum efficiency of a solid-state semiconductor material tris (8-hydroxyquinolino) aluminum.

Using the quantum efficiency measurement application for LabSolutions RF software allows you to determine the fluorescence quantum efficiency easily using intuitive operations.

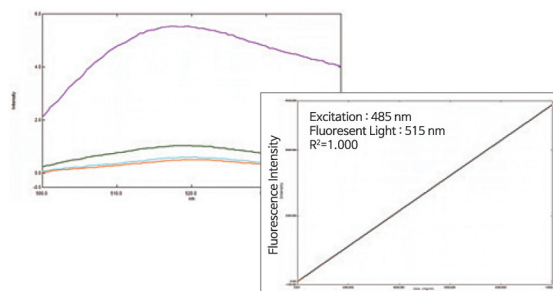


High-Sensitivity Analysis

Quantitative Measurement of Fluorescein

In this example, the RF-6000 system was used to measure fluorescein.

Due to the over 6-digit wide dynamic range, from 10^{-13} to 10^{-7} , a fluorescence spectrum could be measured from only 100 fmol/L (1×10^{-13} mol/L) of fluorescein, while also maintaining high quantitative capabilities.



BIONEER

Life Science Total Solution

바이오니아는

끊임 없는 연구개발을 통해
장비, 키트, 서비스를 독자적으로
공급하고 있으며

생명과학 분야의

Total Solution을

제공합니다.

Our Services

- DNA/RNA Amplification
- DNA/RNA Extraction
- Protein Synthesis
- CRISPR
- Sequencing
- Gene expression analysis
- RNAi

www.bioneer.co.kr



BIONEER
Innovation • Value • Discovery