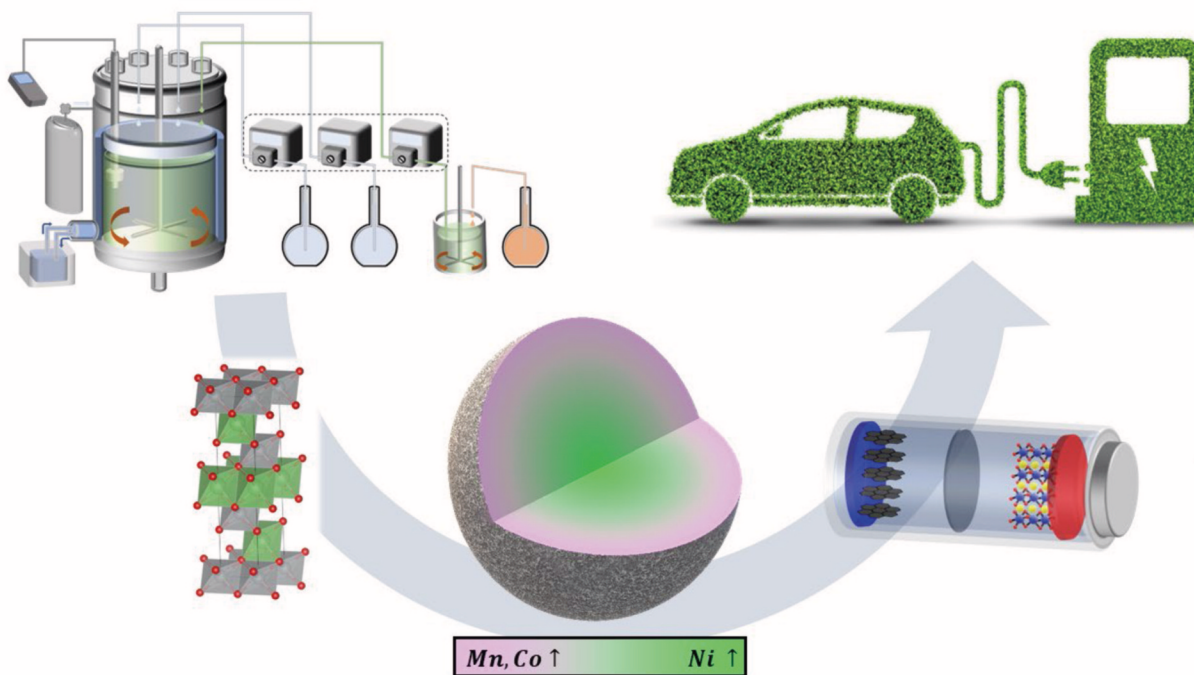


CODEN HWSEEX 63(08) ISSN 1225-004X

화학세계

CHEMWORLD



08
2023

<이달의 하이라이트> 농도구배의 설계, 합성, 고도분석을 통한 고용량-고안정성 하이니켈 양극재의 개발 및 전기차 산업에의 적용

읽기쉬운 총설

폴리올레핀의 화학적 재활용을 위한 촉매적, 합성적 방법 개발
지각에 풍부한 전이금속을 활용한 분자 발광체: 최신 연구 동향

이달의 하이라이트

리튬이온전지용 하이니켈 양극재 내부의 전이금속 농도구배 구현 및
정량 방법

화학교육

피어난 식물들, 숨겨진 이야기

우수선도연구기관

경북대학교 질량분석융복합연구센터

“앞서가는 화학회, 공식후원사와 함께 합니다”

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

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®



3D프린터 보관장



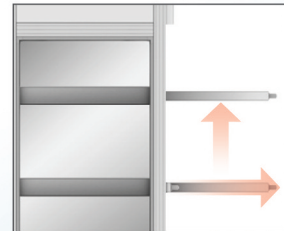
프레임

내화학성 · 내마모성 · 내식성 등이 매우 우수한 T5 계열 알루미늄 프로파일 적용



컨트롤부

1.5인치 OLED 모니터와 터치 방식의 직관적인 컨트롤 적용



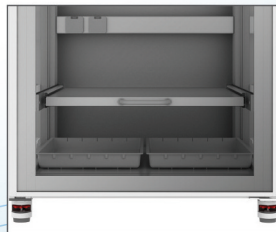
선반

사용자의 편의에 따른 높낮이 조절과 슬라이딩 방식 입출입 설계



유틸리티

220V-2구와 LAN 포트 2구가 기본으로 장착되어있으며 추가장착 및 변경 가능



하부 수납공간

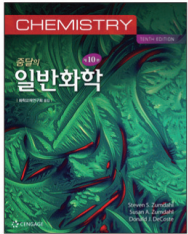
하부 수납공간에 PP재질의 선반을 기본 제공하며 필라멘트 등 보관 가능



공간활용

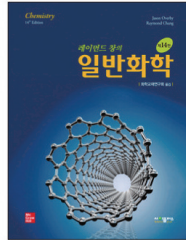
워크테이블 (풋베이스 / 캐스터 타입)을 추가하여 4대의 프린터 보관 가능

중달의
일반화학 10판



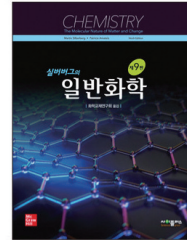
저 자 : Zumdahl
판 수 : 10
발 행 : 2019
페 이 지 : 1168
I S B N : 9788962184358

신간 레이먼드 창외
일반화학 14판



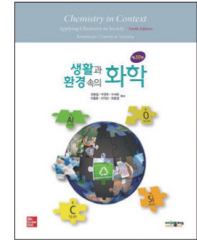
저 자 : Overby, Chang
판 수 : 14
발 행 : 2023
페 이 지 : 1080
I S B N : 9791188731343

신간 실버버그의
일반화학 9판



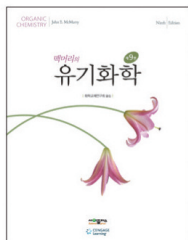
저 자 : Silberberg
판 수 : 9
발 행 : 2023
페 이 지 : 1034
I S B N : 9791188731367

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



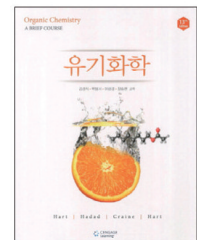
역 자 : 이종백 외
판 수 : 2
발 행 : 2022
페 이 지 : 408
I S B N : 9791188731282

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 : 이광렬 외
판 수 : 1
발 행 일 : 2023
페 이 지 : 376
I S B N : 9791188731404

신간 화학자를 위한
결정학



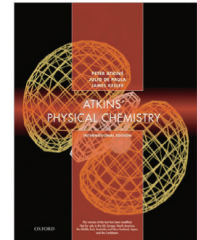
역 자 : 윤우진, 윤호섭
판 수 : 1
발 행 일 : 2022
페 이 지 : 236
I S B N : 9791188731329

신간 Biochemistry



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

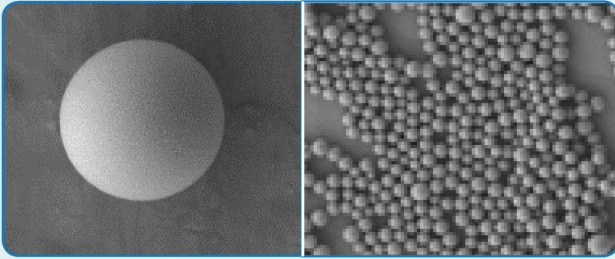
Atkins' Physical Chemistry 11/e



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

실리카겔

MS.Gel: Chromatography용 구형(Spherical) 실리카겔



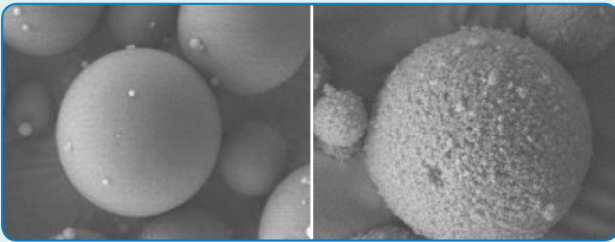
종류

Derivatization type : C18, C8, NH2, bare silica gel, etc
Mean Particle Size : 1.6 μ m, 3 μ m, 5 μ m, 10 μ m, 30 μ m,
50 μ m, 100 μ m, 200 μ m
Mean Pore Size : 6nm, 8nm, 10nm, 12nm, 15nm,
20nm, 30nm

장점

좁은 입도분포 / 채널링 최소화 / PACKING 용이성 / 좋은 분리능 / 차압 개선 / Peak Tailing 최소화 / 긴 수명

SUNSPHERE



특성

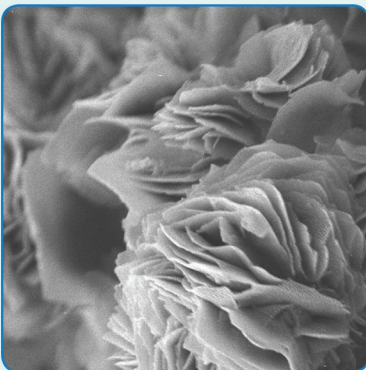
Porous / High Specific surface area
Good dispersibility / Anti-blocking effect
Heat insulation, Matting / Odor removal

적용

화장품 / 필름 / Catalyst-support / 자동차·건물용 도료



SUNLOVELY

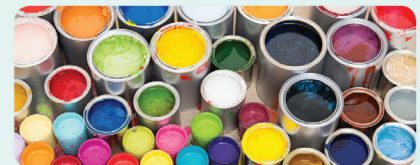


특성

Petal shape particle / Hard property
Light scattering / Flame retardancy
Hydrophilicity / Rust Resistance

적용

난연제용 페인트 / 자동차용 페인트
건축용 페인트 / 바닥제 페인트



Silica Fillers

특성

Good Anti-Glare effect / Good Dispersibility

적용

필름 등

CONTENTS

2023년 8월 광고 목차

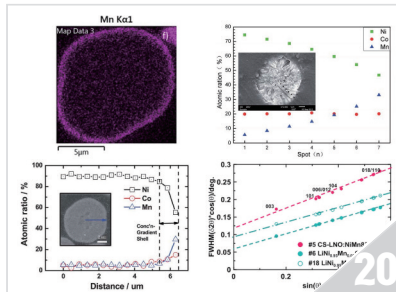
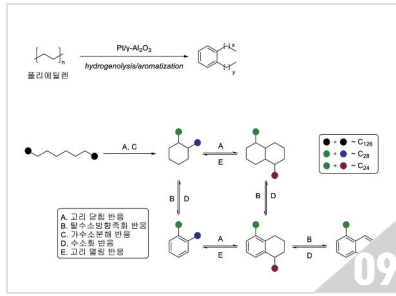
- 뒤표지 동우화인켐
- 앞표지 안쪽 바이오니아
- 뒤표지 안쪽 시마즈 사이언티픽 코리아
- p.01 아이센스
- p.02 삼인싸이언스(주)
- p.03 사이플러스
- p.04 (주)오티시

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



KTHI 경북대학교
질량분석융복합연구센터
Mass Spectrometry Convergence Research Center(MSCRC)

“물질은 질량을 가진다 고로 존재한다
- 자연에 존재하는 유기 화합물을 탐구하다”



화학사 돌아보기
Part 14
베르셀리우스의
시대

NEWS

- 06 KCS 캘린더
- 59 신진연구자 소개 · 김중구
- 76 2023년 대한화학회화학포스터 그리기 및 화학시화 대회 수상작
- 81 월간학회소식

PAPER

- 09 읽기 쉬운 총설 | 폴리올레핀의 화학적 재활용을 위한 촉매적, 합성적 방법 개발 · 이정우, 정민준, 홍순혁*
- 15 읽기 쉬운 총설 | 시각에 풍부한 전이금속을 활용한 분자 발광체: 최신 연구 동향 · 박운수
- 20 이달의 하이라이트 | 리튬이온전지용 하이니켈 양극재 내부의 전이금속 농도 구배 구현 및 정량 방법 · 홍정기, 김기욱, 옥영인, 정태호, 유현덕*

SPECIAL

- 36 우수선도연구기관 | 경북대학교 질량분석융복합연구센터 · 김성환
- 43 KCS 하이라이트 | Anticoagulant 및 Antiplatelet Aggregation 관련 연구 · 이원화
- 52 INTERVIEW | 화학세계가 만난 화학자 · 윤경병 교수

EDUCATION

- 29 화학 교육 | 피어난 식물들, 숨겨진 이야기 · 홍영식

COLUMN

- 62 화학칼럼 | 화학사 돌아보기 ④: 베르셀리우스의 시대 · 최정모

TREND

- 60 우리 실험실은요! | 양자 화학 시뮬레이션 연구실(Quantum Chemical Simulation Lab) · 한다빈
- 79 Book & App
- 82 화학만평

132nd GENERAL MEETING

- 66 심포지엄 및 구두발표 주제, 조직책임자
- 68 연회비 및 참가비 안내
- 69 심포지엄 및 구두발표 주제 요약문

ADVERTISING & CAMPAIGN

- 07 클린 인터넷을 선언합니다
- 83 대한화학회장상, 외부단체협찬상
- 84 지면광고 안내/회비 및 구독료 안내

AUGUST

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	31		

- 제132회 학술발표회, 총회 및 기기전시회
- 초록접수(7월 14일~8월 25일) / 사전등록(6월 22일~9월 21일)
- 한국화학올림피아드
- 여름학교(7월 30일~8월 7일)
- 겨울학교 입교대상자 평가(8월 26일)
- 한국중학생화학대회(8월 19일)

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)

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)

May

- 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)

June

- 제132회 학술발표회, 총회 및 기기전시회
- 학회상, 외부상 수상 후보자 추천 접수
(5월 24일~6월 28일)
- 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
- 초록접수(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)

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

CONFERENCE OF THE MONTH

2023년 8월 20일~25일

49th IUPAC World Chemistry Congress

장 소 | Hague, Netherlands
안 내 | <https://iupac2023.org/>

2023년 8월 28일~31일

36th European Conference on Surface Science (ECOSS 36)

장 소 | Lodz, Poland
안 내 | <https://www.ecoss36.uni.lodz.pl/>

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 · VII

지속가능한 사회를 위한 화학

PART
3

폴리올레핀의 화학적 재활용을 위한 촉매적, 합성적 방법 개발

이정우, 정민준, 홍순혁* | KAIST 화학과
soonhyeok.hong@kaist.ac.kr

PART
4

지각에 풍부한 전이금속을 활용한 분자 발광체 : 최신 연구 동향

박윤수 | KAIST 화학과, yoonsu.park@kaist.ac.kr

폴리올레핀의 화학적 재활용을 위한 촉매적, 합성적 방법 개발

이정우, 정민준, 홍순혁* | KAIST 화학과, soonhyeok.hong@kaist.ac.kr

서론

플라스틱 공해는 전 지구적인 문제로, 이미 일상생활에서 다양한 플라스틱 폐기물의 심각성을 접할 수 있다. 플라스틱은 전세계적으로 2019년 기준 연간 4.6억 톤 생산되고 있으며, 그 생산량은 매년 증가하고 있다. 연간 원유 생산의 대략 20% 정도가 플라스틱 생산에 활용됨이 추정되고 있으며, 글로벌 플라스틱 생산량은 2001년부터 2020년까지 무려 200배 이상 증가하였다. 플라스틱 생산-사용량은 이렇듯 계속 증가하고 있지만, 강한 내구성을 지닌 플라스틱 재활용률은 전세계적으로 20% 정도에 미치지 못하고 있으며, 낮은 분해성으로 생태계에 축적되어 지속적인 환경 및 보건 문제로 이어지고 있다.^{1,2}

플라스틱 분해 및 재활용의 중요성은 일상 영역에서 이미 중대한 문제로 대두되었고, 다양한 학문 분야 및 산업에서 플라스틱 분해 및 재활용 연구가 진행 중이다. 플라스틱 재활용 문제 해결을 위해 고전적으로는 기계적(mechanical) 재활용 방법이나 연소하여 연료로 사용하는 고열-소각(incineration) 방법이 있지만, 일반적으로는 원래 플라스틱에 비해 가치가 낮은 저질의 플라스틱으로 변형되고, 열에너지 변환 효율 역시 낮은 편으로, 혁신적인 화학적 재활용 방법이 시급히 요구된다.^{3,4}

범용성 고분자 중 활용도가 50% 이상일 정도로 가장 큰 비중을 차지하는, 탄화수소 기반 폴리올레핀 계열 PE/PP 고분자들의 화학적 재활용은 그들의 높은 활용도로 인해 절실히 요구되지만, 일반적으로 안정한 C-C, C-H 결합으로 이루어져, 선택적 고부가가치 화합물로의 화학적 재

활용 방법은 현재 매우 제한적이다. 대표적으로 사용되는 열분해의 경우, 다양한 길이의 탄화수소 혼합물로 분해되어 재생연료로 사용할 수 있지만, 고부가가치를 창출하는 화합물로 전환하는데 현재 근본적인 어려움이 있다.

현재 선도 촉매 및 합성 연구 그룹들에서는 PE의 직접적 작용기 도입을 통한 폴리올레핀 성질 개선 및 PE의 선택적 분해 방법 등의 선도적 연구를 수행하고 있으며, 기초적 학문적 접근과 동시에 실용성을 추구하며 진일보한 진전을 보이고 있다. 본 총설에서는 화학적으로 정교한 시약 및 촉매 반응을 디자인 적용하여, 폴리올레핀의 물성을 업그레이드하거나, 단일 화합물로 분해하는 선도적인 두 방법에 대해 소개하고자 한다.

본론

1. 폴리올레핀의 업사이클링: 다이아지린(diazirine) C-H 반응 활용

폴리올레핀의 업사이클링을 위한 다양한 노력이 행해지고 있다. 그 중, C-H 활성화 반응을 활용한, 다이아지린을 작용기가 있는 가교 연결자로 활용한 업사이클 방법에 대해 소개하고자 한다.

가교 연결자는 고분자 물질에 첨가되어 고분자 사슬 사이에 가교 결합을 형성한다. 따라서 열가소성 고분자에 가교 연결자를 첨가하면 열경화성 고분자로 바뀌고 열에 강하고 충격에 대한 저항성이 좋아지는 등 물성이 바뀌게 된다. 예를 들면, 가교 결합된 폴리에틸렌의 경우 의료 기기나 절연

전선, 부식성 액체의 용기로 사용이 가능하다.

가교 결합을 하기 위해 가장 많이 쓰이는 방법으로는 결합에 필요한 작용기가 포함된 단량체를 사용하여 공중합체를 만드는 방법이 있다. 하지만, 폴리올레핀의 경우 가교 결합에 활용할 수 있는 작용기가 없어 공중합체가 아닌 다른 방법을 사용해야 한다. 폴리에틸렌의 경우 높은 에너지를 주어 라디칼을 형성하는 방법으로 가교 결합을 만들 수 있다. 하지만 폴리프로필렌 같은 경우, 가교 결합을 할 때 C-H 사이의 결합(~400 kJ/mol)을 끊고 생성된 라디칼이 베타-절단으로 다시 C-C 결합(~350 kJ/mol)을 자르는 것을 더 선호하기 때문에 고분자 분해 및 결합의 선택성을 조절하기 어렵다.

캐나다 Victoria 대학의 Jeremy Wulff 연구팀은 카벤과 C-H 결합이 직접 반응한다는 점에 착안하여 3-삼플루오르메틸-3-수소-다이아지린에 열이나 빛을 가해 카벤을 만들고 이를 가교 연결자로 활용하는 방법을 연구하였다.⁵ 다이아지린을 이용한 가교 연결자는 이전에도 있었지만 이는 약한 C-H 결합을 갖는 고분자 또는 작용기가 많은 물질에 사용되었다. 하지만 폴리올레핀 같은 경우 이에 해당하지 않기에 연구팀에서는 이를 보완하면서 휘발성

과 폭발의 위험성이 없는 2개의 다이아지린을 활용한 가교 연결자를 합성하였다[그림 1].⁵ 이렇게 만들어진 비스-다이아지린 가교 연결자는 쉽게 활성화되며(100 °C 이상의 열 또는 약 350 nm 파장의 빛), 폴리올레핀 고분자의 안정한 C-H 결합과 반응해서 가교 결합을 형성할 수 있다.

최근에는 위의 가교 연결자를 응용하여 재 가교 결합이 가능한 열경화성 고분자를 합성하는 연구가 진행되었다 [그림 2].⁶ 이전의 비스-다이아지린 가교 연결자의 사슬 중간에 절단이 가능한 작용기(카보네이트, 실릴 에터)를 도입하면 똑같이 가교 결합을 통해 열경화성 고분자를 만들 수 있으며 NaOH 또는 HCl로 추가적인 절단 반응과정을 통해 다시 열가소성 고분자를 만들 수 있다. 이때, 말단의 하이드록시(-OH) 작용기에 다이아지린이 포함된 벤질 브로마이드를 추가하면 가교 연결자를 다시 만들 수 있고 이를 통해 열경화성 고분자가 재합성이 가능하다. 이러한 반응의 가역성은 고분자의 화학적 재활용의 기본 개념으로 활용된다.

앞에서 설명한 다이아지린 가교 연결자는 한가지의 고분자에 적용하여 업사이클링을 하였지만 실제 플라스틱을 재 활용하는 과정에서는 여러 가지 고분자가 섞여 있다. 각각

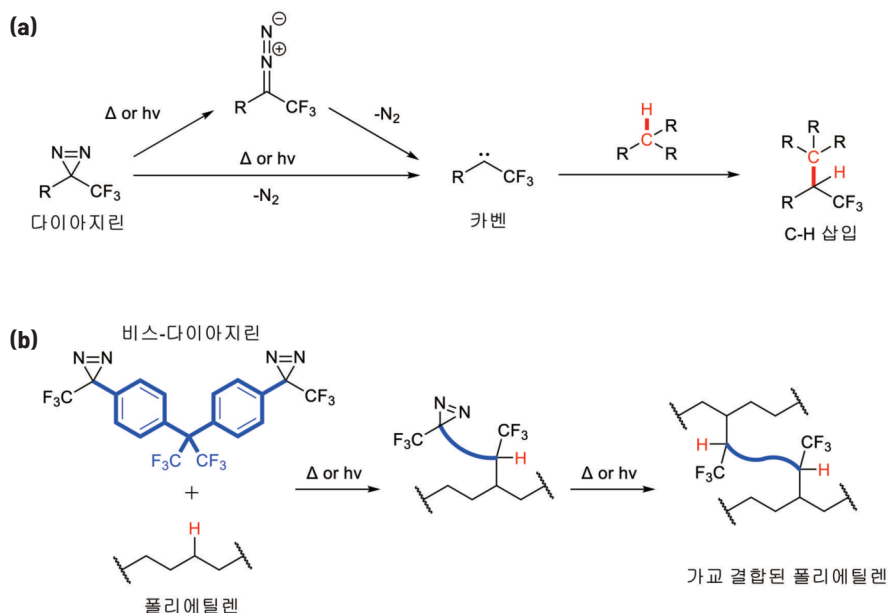


그림 1. (a) 다이아지린의 카벤 형성 및 C-H 결합 삽입 메커니즘, (b) Wulff 연구팀에서 합성한 비스-다이아지린 가교 연결자와 가교 결합 메커니즘⁵

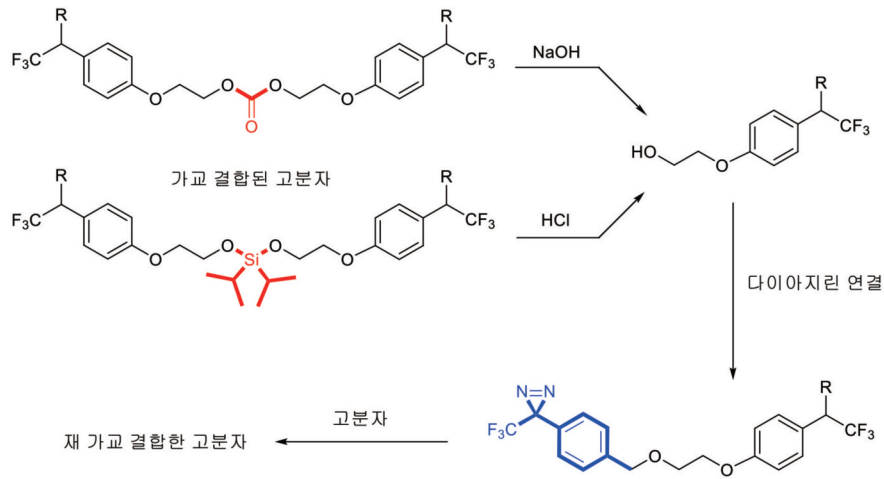


그림 2. Wulff 연구팀의 카보네이트와 실릴 에터가 첨가된 다이아지린을 이용한 재 가교 결합 반응 메커니즘⁶

의 고분자는 종류에 따라 물성이 다르기 때문에 섞이지 않는 경우가 많으며 이는 재활용된 플라스틱의 품질을 낮추게 된다. 2023년 4월, 미국 Colorado Fort Collins 주립 대학의 Eugene Chen 연구팀에서는 이러한 문제를 가교 연결자를 절단이나 동적 교환이 일어날 수 있게 하여 해결하였다[그림 3].⁷ 연구팀은 세 가지의 가교 연결자를 설계하였고, 각각 가역적으로 가교 연결자 사이에 [그림 3]과 같은 가역반응이 일어날 수 있다. 이 중 산무수물 교환을 사용한 가교 연결자가 가장 좋은 안정성을 보여주었다.

기존의 가교 연결자의 경우는 결합 시에 양끝이 고정되어 섞인 고분자가 잘 혼합되지 않지만, 새로 만들어진 가교 연결자는 동적이기 때문에 섞이지 않는 고분자 사이를 잘 혼합하여 재활용 시 물성에 손상이 없게 만들 수 있다. 이는 다양하게 섞인 고분자와 실생활에 사용하는 플라스틱에서도 가교 연결자에 의한 혼합을 가능하게 하여 실제 플라스틱 업사이클링에 적용이 가능할 수 있다는 점에서 큰 의미가 있다.

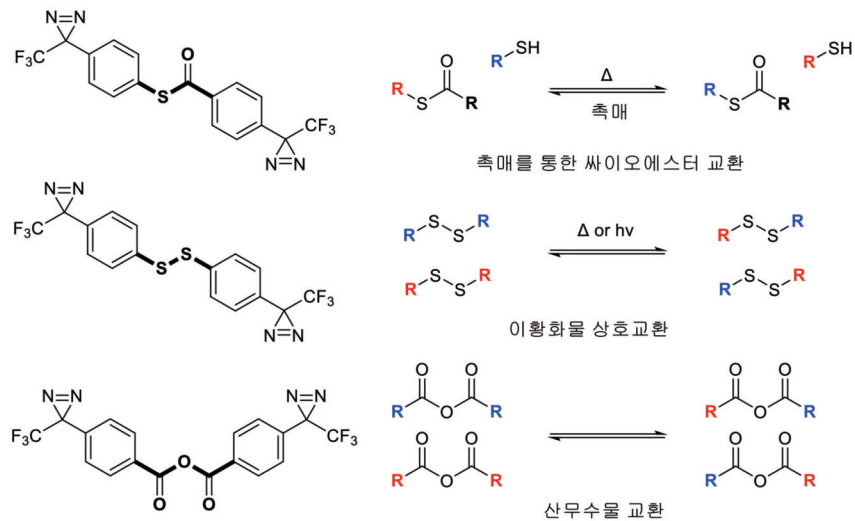


그림 3. Chen 연구팀의 동적으로 가교 결합이 가능한 가교 연결자와 메커니즘⁷

2. 폴리올레핀의 선택적 분해 반응 전략 개발

현재 폴리올레핀의 화학적 재활용은 대부분 열분해를 통해 진행된다. 열분해는 400 °C 이상의 고온에서 이루어지기 때문에 공정에 많은 에너지가 필요하고, 단일 생성물이 아닌 여러 종류의 탄화수소 혼합물을 생성해 추가적인 분리 단계가 필요하다. 따라서 폴리올레핀을 더 온화한 조건에서 가치 있는 물질로 분해하는 연구가 진행되고 있다. 그 중, 알려진 촉매 반응들을 활용하여 폴리올레핀을 가치 있는 원료 물질로 선택적으로 분해하여 재활용하고자 하는 최근 연구들을 소개하고자 한다.

미국 UC Santa Barbara 대학의 Susannah Scott 교수는 폴리에틸렌을 알킬 치환 방향족 화합물로 분해하기 위해 산화알루미늄에 도포된 백금 촉매를 이용하였다(그림 4).⁸ 폴리에틸렌은 가수소 분해에 의해 짧은 길이의 사슬로 절단되고, 절단된 사슬은 방향족화를 통해 방향족 화합물을 형성된다. 기존의 방향족 화합물 합성은 높은 온도가 필요해 반응의 조절이 힘들고 다양한 부산물이 함께 형성되었다. 하지만 발열반응인 가수소분해와 흡열반응인 방향족화 반응을 함께 사용하였기에 기존보다 100 °C 이상 낮은 온도에서 반응이 진행된다. 또한, 가수소분해가 진행되어 사슬의 길이가 짧아질수록 탈수소방향족화의 반응속도가

빨라 알킬 사슬의 길이가 일정 범위 내로 유지된다. 이 반응은 폴리에틸렌의 밀도와 분자량에 관계없이 높은 수득률을 얻기 때문에, 다양한 종류의 폴리에틸렌을 동일한 조건에서 가치 있는 방향족 화합물로 변환할 수 있을 것으로 기대된다.

폴리올레핀을 분해한 후 추가적인 분리 과정 없이 재활용하기 위해서는 단일 생성물이 형성되어야 한다. 폴리에틸렌은 동일한 탄소-탄소결합으로만 구성되어 선택적인 반응이 어렵기 때문에 단일 생성물을 형성하기 어려웠다. 미국 UC Berkeley 대학의 John Hartwig 교수 연구팀과 Susannah Scott & Damien Guironnet 연구팀은 독립적으로 폴리에틸렌을 단일 프로필렌으로 분해하기 위해 탈수소화 반응과 이성질화-에테놀리시스 반응을 활용하였다(그림 5).⁹ 포화된 폴리에틸렌은 이리듐 촉매를 이용한 탈수소 반응을 통해 일부가 불포화된 폴리에틸렌으로 전환된다. 불포화된 폴리에틸렌은 루테튬 촉매와 에틸렌에 의해 말단 알켄 두 개로 절단되고, 각 말단 알켄은 백금 촉매에 의해 이성질화가 일어난다. 이성질화를 통해 형성된 내부 알켄은 다시 루테튬 촉매와 에틸렌에 의한 에테놀리시스 반응을 통해 프로필렌과 말단 알켄을 각각 형성한다. 말단 알켄은 계속되는 순환 과정을 거쳐 모두 프로필렌으로 분해된다. 루테튬 촉매와 백금 촉매의 조합은 이성질화된 알

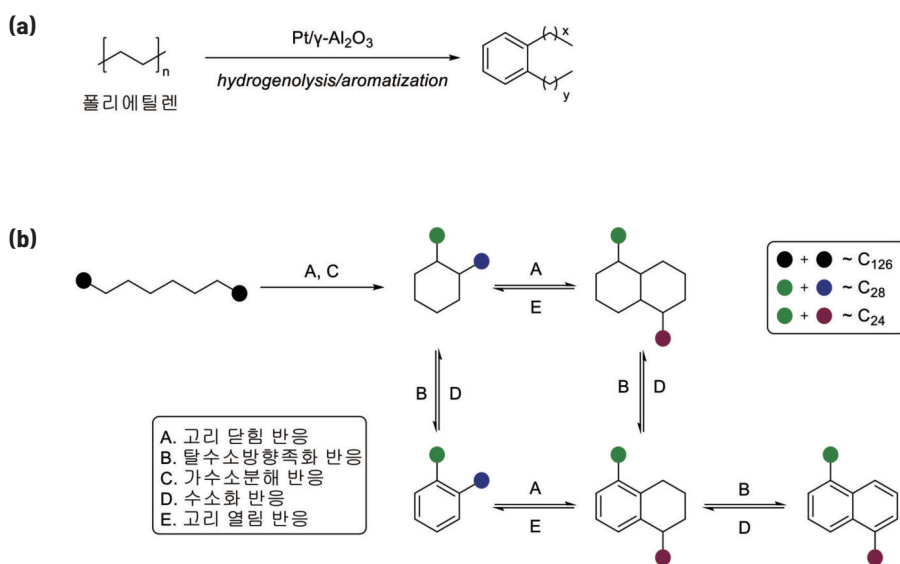


그림 4. (a) 폴리에틸렌 분해를 통한 알킬 치환 방향족 화합물 합성, (b) 폴리에틸렌에서 알킬 치환 방향족으로의 전환 메커니즘⁸

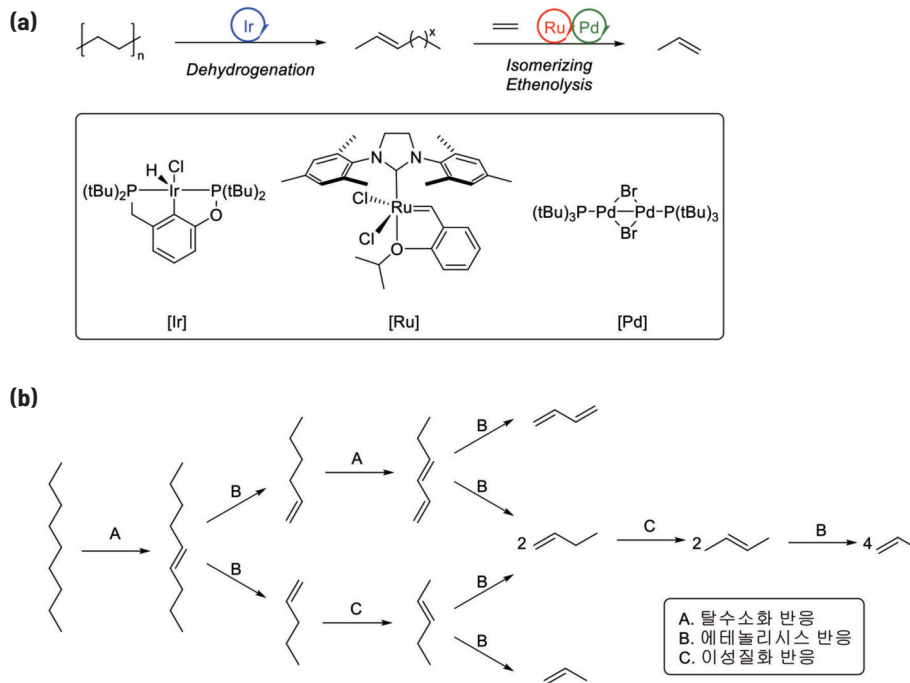


그림 5. (a) 폴리에틸렌 분해를 통한 프로필렌 합성, (b) 포화 탄화수소 전환 메커니즘^{9,10}

켄에 대해 높은 선택성을 보이고, 만약 이성질화가 일어나지 않은 말단 알켄에서 에테놀리시스 반응이 일어나더라도 에틸렌과 함께 동일한 말단 알켄이 형성되기 때문에 반응에 큰 영향을 주지 않는다. 이 과정을 통해 높은 프로필렌 수득률을 얻었으며, 시판되는 고밀도/저밀도 폴리에틸렌에 실험하였을 때도 모두 일정 이상의 수득률을 보였다. 반응 후에는 에틸렌과 프로필렌이 남게 되는데, 이 두 물질은 다양한 방법을 이용해 분리할 수 있다. 또한, 이 연구에서 사용한 알켄 이중결합복분해와 이성질화 반응들은 산업에서 광범위하게 사용되고 있기에, 실제 공정 규모에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

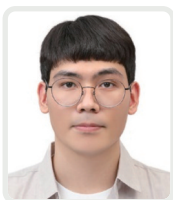
결론

본 총설에서는 폴리올레핀을 화학적으로 재활용하는 선도적인 최근 연구의 큰 두 가지 방향을 소개하였다. 한 방향은 폴레올레핀 자체의 물성을 업그레이드하여 재활용하는 방법이고, 다른 방향은 폴리올레핀을 분해하여, 재활용이 가능한 단량체 원료 물질 혹은 부가가치 화합물로 전환

하는 방법이다. 플라스틱 재활용은 사회-경제적 이슈들이 얽혀져 있는 문제로, 폐플라스틱 수집 및 분류의 경제성 및 주체 등과 같은 현실적인 문제들이 함께 해결되어야 하며, 과학-기술적 측면에서도 개발된 화학적인 방법을 실생활에 활용하기 위해서는 실용성 및 경제성 측면에서 보다 깊은 연구가 진행되어야 한다. 현재 선택성 없이 에너지를 가하여 다양한 탄화수소 형태로 분해하는 방법이 위주인 범용성 플라스틱 분해 및 재활용의 난제를, 기초 화학적 관점에서 접근하여 제어된 화학적 방법으로 도입하여, 플라스틱을 고부가가치 화합물로 업사이클링할 수 있는 방법이 개발된다면, 지속가능한 미래사회 구현을 위한 혁신적인 원천기술을 제공할 것이다. 국내에서도 관련 연구가 활발히 진행되어, 플라스틱 공해 문제를 해결하는 다양한 화학적 방법들이 개발되길 기대해본다.

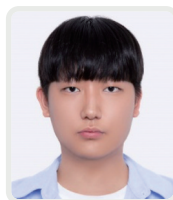


1. Chu, M.; Liu, Y.; Lou, X.; Zhang, Q.; Chen, J. "Rational design of chemical catalysis for plastic recycling." *ACS Catal.* **2022**, *12*, 4659.
2. Geyer, R.; Jambeck, J. R.; Law, K. L. "Production, use, and fate of all plastics ever made." *Sci. Adv.* **2017**, *3*, e1700782.
3. Shi, C.; Reilly, L. T.; Phani Kumar, V. S.; Coile, M. W.; Nicholson, S. R.; Broadbelt, L. J.; Beckham, G. T.; Chen, E. Y.-X. "Design principles for intrinsically circular polymers with tunable properties." *Chem* **2021**, *7*, 2896.
4. Choi, K.; Hong, S. H. "Chemically recyclable oxygen-protective polymers developed by ring-opening metathesis homopolymerization of cyclohexene derivatives." *Chem* **2023**, DOI:10.1016/j.chempr.2023.05.038.
5. Lepage, M.; Simhadri, C.; Liu, C.; Takaffoli, M.; Bi, L.; Crawford, B.; Milani, A. S.; Wulff, J. E. "A broadly applicable cross-linker for aliphatic polymers containing C-H bonds." *Science* **2019**, *366*, 875.
6. Bi, L.; Godwin, B.; Baran, M. J.; Nazir, R.; Wulff, J. E. "A cleavable crosslinking Strategy for Commodity Polymer Functionalization and Generation of Reprocessable Thermosets." *Angew. Chem. Int. Ed.* **2023**, e202304708.
7. Clarke, R. W.; Sandmeier, T.; Franklin, K. A.; Reich, D.; Zhang, X.; Vengallur, N.; Patra, T. K.; Tannenbaum, R. J.; Adhikari, S.; Kumar, S. K.; Robis, T.; Chen, E. Y.-X. "Dynamic crosslinking compatibilizes immiscible mixed plastics." *Nature* **2023**, *616*, 731.
8. Zhang, F.; Zeng, M.; Yappert, R. D.; Sun, J.; Lee, Y.-H.; LaPointe, A. M.; Peters, B.; Abu-Omar M. M.; Scott, S. L. "Polyethylene upcycling to long-chain alkylaromatics by tandem hydrogenolysis/aromatization." *Science* **2020**, *370*, 437.
9. Conk, R. J.; Hanna, S.; Shi, J. X.; Yang, J.; Ciccio, N. R.; Qi, L.; Bloomer, B. J.; Heuvel, S.; Wills, T.; Su, J.; Bell, A. T.; Hartwig, J. F. "Catalytic deconstruction of waste polyethylene with ethylene to form propylene." *Science* **2022**, *377*, 1561.
10. Wang, N. M.; Strong, G.; DaSilva, V.; Gao, L.; Huacuja, R.; Konstantinov, I. A.; Rosen, M. S.; Nett, A. J.; Ewart, S.; Geyer, R.; Scott, S.L.; Guironnet, D. "Chemical recycling of polyethylene by tandem catalytic conversion to propylene." *J. Am. Chem. Soc.* **2022**, *144*, 18526.



이 정 우 Jeongwoo Lee

- 고려대학교 화공생명공학과/화학과, 학사 (2017.3-2023.2, 이중전공)
- KAIST 화학과, 석·박통합과정 (2023.3-현재, 지도교수 : 홍순혁)



정 민 준 Minjun Chung

- GIST 화학과, 학사(2019.3-2023.2)
- KAIST 화학과, 석·박통합과정 (2023.3-현재, 지도교수 : 홍순혁)



홍 순 혁 Soon Hyeok Hong

- 서울대학교 화학과, 학사 석사(1992.3-1999.2, 지도교수 : 정영근)
- CALTECH 화학과, 박사(2002.7-2007.6, 지도교수 : Robert H. Grubbs)
- 공군사관학교 화학과, 교수요원(1999.7-2002.6)
- 싱가포르 난양이공대학 화학과, 조교수(2009.9-2011.7)
- 서울대학교 화학과, 조/부교수(2011.8-2019.1)
- KAIST 화학과, 부/정교수(2019.2-현재)

지각에 풍부한 전이금속을 활용한 분자 발광체 : 최신 연구 동향

박윤수 | KAIST 화학과, yoonsu.park@kaist.ac.kr

서론

화학 기반 공정 및 재료의 지속가능성은 미래 산업의 핵심 키워드로 대두되고 있다. 생산 과정에서 사용되는 화학물, 재료 및 촉매 등이 경제적인 뿐 아니라 환경 친화적이고, 원료의 고갈 염려 없이 공급할 수 있는지가 중요한 화두로 떠오른다. 오늘 소개할 발광체 및 광촉매 관련 산업도 마찬가지다. 분자 발광체는 디스플레이 산업을 비롯해 광촉매 반응의 핵심 물질로 상업적 및 학문적 관심을 받고 있다. 특히, 전이금속 착화합물을 기반으로 한 발광체는 리간드의 특성에 따라 광물리적, 광화학적 특성을 제어할 수 있어 지난 수 십년간 광범위한 연구가 수행되었다.¹ 대표적인 전이금속 기반 분자 발광체는 백금(Platinum, Pt), 이리듐(Iridium, Ir), 루테늄(Ruthenium, Ru) 등의 귀금속 기반 화합물을 중심으로 개발되었다. 고질량 원자(Heavy atom)에서 관찰되는 스핀-궤도 상호작용(Spin-orbit coupling)에 기반한 높은 계간 전이(Intersystem crossing, ISC) 효율로 다양한 색을 발광하는 화합물이 개발되어 왔다. 상온 혹은 그보다 높은 온도에서도 긴 발광 상태 수명(Lifetime)을 보여, 최근에는 유기 광화학 분야에서 도전적인 결합 형성을 매개하는 광감제(Photosensitizer), 광산화제(Photooxidant), 혹은 광환원제(Photoreductant) 로 활용되고 있다.²

광범위하게 수행된 연구와 실제 상업화된 예시에도 불구하고, 귀금속 원소를 기반으로 한 발광체는 지속가능성 측면에서 치명적인 한계점을 갖는다. CRC Handbook에서 발광한 귀금속의 지각 매장량을 살펴보면, 백금, 이리듐, 루테늄은 ppb 수준의 극미량이 존재할 것으로 추정되었다[표

1].⁴ 따라서, 귀금속 기반의 발광 재료 물질 및 광촉매를 대체할 수 있는 지속가능한 대안이 요구되고 있다. 이러한 관점에서, 제 1주기 전이금속은 귀금속에 비해 적게는 수 만 배에서 천만배 이상 풍부하게 존재한다. [표 1]에 나타난 것처럼, 철(Iron, Fe)과 타이타늄(Titanium, Ti)은 지각 내에 가장 풍부한 전이금속 원소이고, 망간(Manganese, Mn)과 지르코늄(Zirconium, Zr)이 그 뒤를 잇는다. 따라서, 지각에 풍부한 제 1주기 전이금속 복합체를 활용해 발광체를 디자인 한다면, 시판되고 있는 귀금속 기반 발광체를 대체하는 지속가능한 대안을 제시할 수 있다.³

표 1. 지각에 존재하는 전이금속 원소의 매장량 추정치.⁴

전이금속 원소	지각 매장량 (ppm)
철(Fe)	56,300
타이타늄(Ti)	5,650
망간(Mn)	950
지르코늄(Zr)	165
백금(Pt)	0.005
이리듐(Ir)	0.001
루테늄(Ru)	0.001

본 총설에서는 지각에 풍부한 전이금속을 기반으로 한 발광체의 대표적인 예시를 소개한다. 특히, 철, 망간, 지르코늄을 활용한 발광체의 작동 원리를 알아보고, 말미에는 이러한 발광체를 새로운 유기 합성 반응에 성공적으로 적용한 사례를 소개한다.

본 론

1. 철 및 망간 금속 기반 분자 발광체

철과 망간은 각각 원소 주기율표의 제 8족, 제 7족에 위치한 원소로 3d 오비탈에 전자가 부분적으로 점유되어 있다. 최외각 d 전자는 가시광선 영역의 빛을 흡수하여 d-d 전자 전이를 하는데, 이를 통해 생성된 들뜬 상태를 금속 중심 전자 전이(MC, Metal-centered transition)라고 한다. 일반적으로 제 1주기 전이금속 복합체는 약한 리간드장 갈라짐에 의해 금속 중심의 들뜬 상태는 바닥 상태로 빠르게 열적 이완(Thermal relaxation)되는 특성을 가지고 있다. 결과적으로, 들뜬 MC 상태의 수명은 짧아지고 발광 현상 역시 쉽게 관찰되지 않는다. 따라서, 철 혹은 망간 기반의 배위 화합물이 발광을 띠게 하기 위해선 앞서 언급한 1주기 금속 원소의 근본적인 한계를 극복할 수 있는 리간드 고안이 필수적이라고 여겨졌다.

초기의 사례들은 금속 중심과 리간드의 입체적 및 전자적 상호작용을 극대화하여 바닥 상태로의 이완 지연을 꾀했다. 최초의 철 기반 분자 발광체는 2017년 스웨덴에 위치한 Lund 대학교의 Wärnmark 교수 연구팀에 의해 개발되었다(그림 1, **Fe1**).⁵ 분자 설계를 통해 리간드의 오비탈과 철의 d_{22} 및 $d_{x^2-y^2}$ 오비탈 간의 겹침을 늘리고, 반결합성 e_g 오비탈의 에너지를 증가시킴으로써 들뜬 MC 상태로의 이완을 방지하고자 하였다. 구체적으로, σ -주계 및 π -받개로 역할하는 *N*-헤테로고리 카벤(*N*-Heterocyclic carbene, NHC) 기반의 btz 리간드(btz = 3,3'-dimethyl-1,1'-bis-(*p*-tolyl)-4,4'-bis(1,2,3-triazol-5-ylidene))를 활용한

산화수 +3 가의 양이온성 유기 금속 복합체 **Fe1**를 합성했다. 세 개의 양이온성 NHC 리간드가 배위하여 저스핀 Fe(III) d^5 전자 구조를 확보할 수 있었고, 이를 기반으로 가시광선 흡수 하의 리간드-금속 전하 이동(Ligand-to-Metal Charge Transfer, LMCT)를 통한 최초의 상온, 용액상 발광을 관찰했다. 계간 전이를 거치지 않고 생성된 LMCT 기반 들뜬 상태는 약 100 ps의 수명을 갖는 것으로 측정되었다. 상세한 광물리적 특성은 [표 2]에 나타내었다.

곧이어 Wärnmark 교수 연구팀은 세자리 NHC 리간드를 포함한 차세대 발광체 **Fe2**를 보고했다(그림 1).⁶ **Fe2** 복합체는 Scorpionate 구조를 갖는 총 여섯 개의 NHC 배위자와 두 개의 음이온성 붕소 그룹(borate)을 통해 금속 중심을 안정화 하도록 설계되었다. 그 결과, **Fe2**는 상온의 유기 용액 상에서 기존 **Fe1** 대비 20배 향상된 수명 효율과 함께(약 2 ns), 붉은 빛의 강한 발광이 관찰되었다. 발광을 야기하는 들뜬 상태는 **Fe1**과 유사하게 LMCT에서 기인한 것으로 결정되었고, 발광 양자 효율은 2%로(Φ_{em} , 표 2) **Fe1**에 비해 향상된 특성들을 나타냈다. 특히, **Fe2**는 널리 사용되고 있는 발광체인 $[Ru(bpy)_3]^{2+}$ (bpy = 2,2'-bipyridyl) 보다 우수한 광안정성을 보였다. 주목할만한 점은 **Fe2**의 들뜬 상태가 산화적 및 환원적 분자간 전자 이동(Intermolecular electron transfer)이 모두 가능하다는 것이다. 상온, 용액상 가시광선 조사 조건에서 Methylviologen과 반응하여 **Fe2**의 산화반응이 관찰되었고, 전자 주계 다이페닐아민(Diphenylamine)과의 반응에서 환원 속도에 근접하는 빠른 환원적 소멸(Reductive quenching)이 관찰되었다. 특히, 다이메틸아민(Dimethylamine)과의 소멸 속도는 $[Ru(bpy)_3]^{2+}$ 의 두 배 이상 빠르다고 관찰되어, 귀금속 기반 발광체를

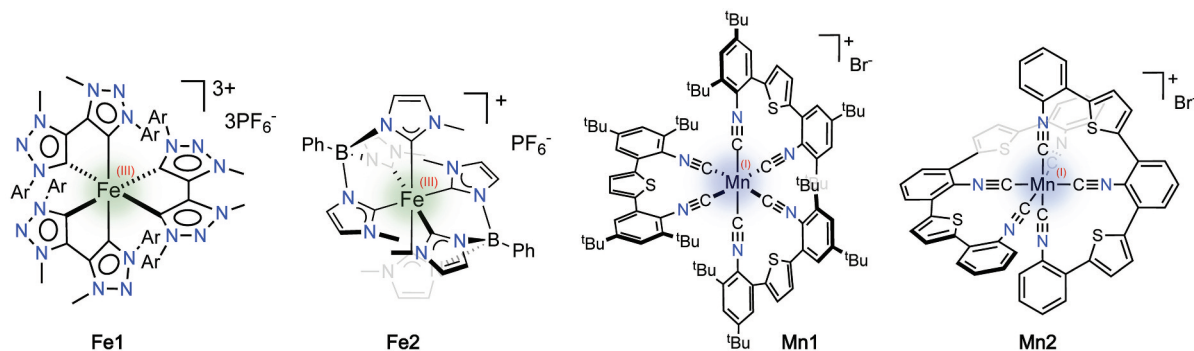


그림 1. 철 및 망간을 활용한 분자 발광체.

표 2. 철, 망간, 타이타늄, 지르코늄 기반 금속 복합체의 상온, 용액상 광물리적 성질

Complex	Fe1	Fe2	Mn1	Mn2	Ti1	Ti2	Zr1	Zr2	Zr3
λ_{em} (nm)	600	655	~500	~500	n.d.	n.d.	485	594	581
τ (ns)	0.10	1.96	0.74 ^a	1.73 ^a	n.d.	n.d.	2.3 ^a	325 μ s	350 μ s
Φ_{em} (%)	0.03	2.1	0.05	0.03	n.d.	n.d.	0.08	0.08	0.45

^aAveraged value. n.d., Not detected. Retrieved from references (5), (6), (8), (9), (10), and (12).

능가하는 광화학적 특성을 확인했다. 최근에는 중성의 철(II) 분자 복합체를 이용한 근적외선 발광체(Near infrared)가 보고되는 등 관련 분야 연구가 활발하게 진행되고 있다.⁷

최초의 망간 기반 상온 분자 발광체는 2021년 스위스 Basel 대학교의 Wenger 교수 연구팀이 보고하였다.⁸ 망간 또한 철과 유사하게 d 오비탈 내의 전자가 부분적으로 점유되어 있기 때문에 리간드 장의 정교한 조절이 상온 발광 현상에 필수적이다. Wenger 교수 연구팀은 isocyanide 기반 두 자리 혹은 세 자리 배위자를 개발해 산화수 +1의 Mn(I) 복합체를 합성했다(그림 1). 두 화합물 Mn1 및 Mn2 모두 400 nm 부근의 흡광에 의거해 노란색 고체로 얻어졌고, 이를 유기 용매에 희석시킨 용액은 상온에서 각각 0.05%, 0.03%의 발광 양자 효율을 보였다. 순간 흡광 분광법(Transient absorption spectroscopy) 및 분광 전기 화학 분석법(Spectro-electrochemistry)을 활용한 측정을 통해 망간 화합물의 상온 발광 현상은 금속-리간드 전하 이동(Metal-

to-ligand charge transfer, MLCT)에 기반함을 확인했다. 이와 같은 실험 결과는 d⁶ 전자 배치를 갖는 1주기 전이금속 복합체 중 최초로 MLCT 발광 상태를 만들었다는 점에서 큰 의미를 갖는다. 비록 발광 상태의 들뜬 상태 수명은 수 나노초에 불과했지만[표 2], *trans*-stilbene이 *cis*-stilbene으로 전환되는 광이성질화 반응의 광촉매로 작용할 수 있음을 확인해 추후 유기 합성 반응으로의 응용 가능성을 확인했다.

2. 타이타늄 및 지르코늄 금속 기반 분자 발광체

제4족 원소인 타이타늄과 지르코늄은 대표적인 전전이금속(Early transition metal) 원소로, 고분자 및 유기 합성에 중요한 촉매로 사용되고 있다. 지각 매장량 또한 상당한데, 타이타늄은 철 금속의 뒤를 이어 지각에 두번째로 많이 매장되어 있는 전이금속이고, 지르코늄은 그 뒤를 잇는다[표 1]. 따라서, 전전이금속 복합체를 활용한 유기 화학 반응이나, 대량 생산 공정은 기존의 귀금속 기반 산업을 대체할 수 있는 지속가능한 대안으로 떠오르고 있다.

타이타늄과 지르코늄은 앞서 논의한 후전이금속 화합물과 확연하게 다른 전자 구조를 가진다. 온화한 조건에서 타이타늄과 지르코늄의 가장 안정한 산화 상태는 +4로, d⁰ 상태가 되어, 앞서 철과 망간의 예시에서 논의한 d-d 전자 전이가 일어나지 않는다. 대신, 전자가 풍부한 리간드가 빛 에너지를 흡수하여, d⁰ 금속 중심의 d 오비탈로 LMCT가 일어날 수 있다. 이러한 전자적 특성에 기반해, 다양한 타이타늄(IV) 및 지르코늄(IV) 화합물은 자외선 및 가시광선 영역에서 LMCT 기반의 흡광 전이 모드를 갖는다고 알려져 있다.

반면, 발광 현상에 있어 타이타늄과 지르코늄 화합물은

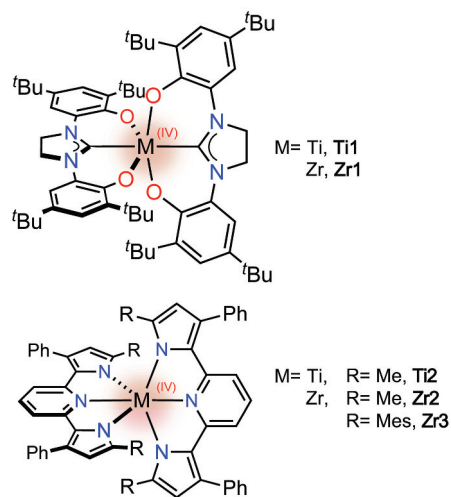


그림 2. 타이타늄 및 지르코늄을 활용한 분자 복합체

정반대의 특성을 보인다. 지르코늄 화합물은 LMCT를 통해 생성된 들뜬 상태에서부터 강한 발광이 일어나지만, 타이타늄을 중심 금속으로 활용한 화합물은 상온, 용액상의 발광이 관찰된 예가 거의 없다. 이와 같은 발광성 차이는 다양한 시스템에서 일관되게 관찰되었다. 2014년 프랑스 CNRS의 Dargorne 교수 연구팀은 NHC 및 산소 음이온 기반 삼배위 리간드를 활용해 최초로 지르코늄(IV) 기반 발광 현상을 보고했다(그림 2).⁹ 강한 σ -주계 배위자를 포함한 복합체 **Zr1**을 합성해 자외선/가시광선 영역에서의 LMCT 전이를 촉진시킬 수 있었고, 310 nm 빛 조사 하에 485 nm 부근 발광이 관찰되었다($\Phi_{em}=0.08$, 표 2). 동일한 리간드를 활용한 타이타늄 시스템 **Ti1** 또한 합성에 성공했는데, 배위 구조가 동일함에도 불구하고 발광 현상은 관찰되지 않았다.

이후 2016년, 미국 West Virginia 대학교의 Milsmann 교수 연구팀은 2,6-bis(pyrrolyl)pyridine 기반의 리간드를 포함한 타이타늄 **Ti2** 및 지르코늄 **Zr2** 복합체를 발표했다.¹⁰ 두 화합물 모두 가시광선 영역에서의 강한 흡광이 관찰되었고, TD-DFT(Time-dependent Density Functional Theory) 계산을 통해 해당 전이가 LMCT 특성을 나타낸다고 보고하였다. 흥미롭게도, 해당 리간드 시스템 역시 타이타늄 화합물에서는 발광 현상이 전혀 관찰되지 않았지만, 지르코늄 복합체 **Zr2**에서 강한 분홍색의 발광이 관찰되었다.¹¹ 2020년, Milsmann 교수 연구팀은 1세대 발광체

Zr2의 구조를 계량해 차세대 발광체 **Zr3**를 개발했다.¹² 기존 리간드에 위치했던 메틸기를 입체적 방해가 큰 Mesityl 작용기로 치환함으로써 다양한 분자 특성의 향상을 확인했다. **Zr2**에 비해 비약적으로 향상된 열 안정성과 강산에 대한 저항성은 Mesityl 그룹이 제공하는 입체적 보호 때문으로 추측되었다. 특히, **Zr3**의 상온, 용액 상 발광 양자 효율은 0.45로 측정되어 **Zr2** 대비 약 6배 높은 광물리적 성질을 보였다. 저온(-120 °C)에서 측정된 발광 특성을 통해 해당 복합체는 TADF(Thermally-activated Delayed Fluorescence) 현상을 보였다.

3. 지각에 풍부한 전이 금속 발광체를 활용한 유기 화학 반응의 개발

소개한 새로운 발광체들은 귀금속 기반의 발광체가 필요했던 유기 합성 반응의 차세대 광촉매로써 응용 가능성이 확인되었다. 2022년 경희대학교 강은주 교수, 이화여자대학교 유영민 교수 연구팀은 LMCT 기반의 철 기반 분자 발광체 **Fe1**을 활용하여 초록 빛 조사 조건에서의 [4+2] 고리화 첨가 반응을 개발했다(그림 3a).¹³ **Fe1**의 들뜬 상태가 강한 산화제로 작용할 수 있음에 기반하여, 전자가 풍부한 스타이렌(Styrene)과 다양한 다이엔(Diene) 사이의 라디칼 고리화 반응에 성공했다. 특히, 소량의 $\text{NaBAR}_4^{\text{F}}$ ($\text{BAR}_4^{\text{F}}=$

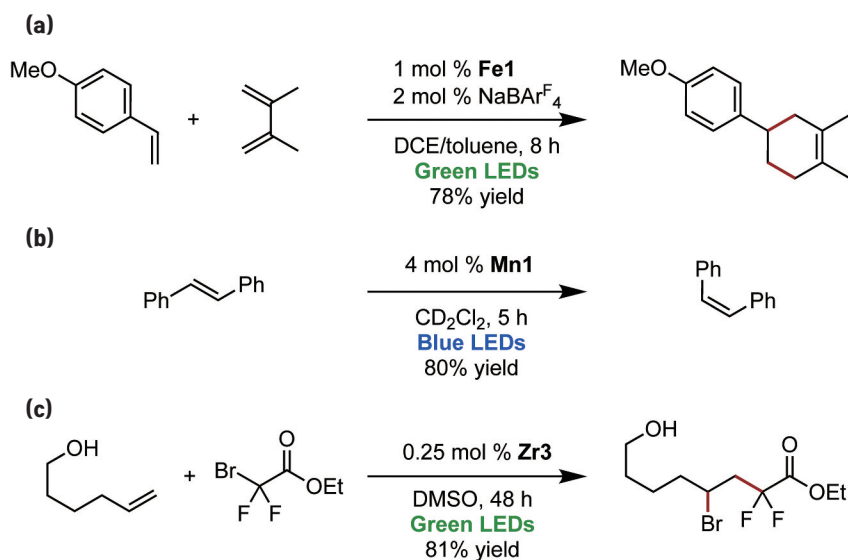


그림 3. 철, 망간, 지르코늄 기반 발광체를 활용한 유기 화학 반응

tetrakis[3,5-bis(trifluoromethyl)phenyl] borate)를 첨가했을 때 반응성이 향상되었는데, 이는 양전하를 가진 철 착화합물을 안정화시킬 수 있기 때문이다. 반응의 양자 수율은 0.49로 측정되어, 높은 효율성을 보임이 확인되었다.

망간 발광체를 활용한 광유기화학은 상대적으로 신생 분야이다. Wenger 연구팀에서는 기질이 없는 조건에서 푸른 LED를 조사할 때 Mn2가 Mn1보다 빠르게 광분해됨을 관찰했다. 연구팀에서는 trans-stilbene의 반열역학적(Contra-thermodynamic) 이성질화 반응을 보고했다 [그림 3b].⁸ Mn1의 광 안정성을 기반으로, 열역학적으로 안정한 trans 이성질체를 푸른 빛 조사 하에 불안정한 cis 형태로 전환할 수 있었다. 2020년, Milsmann 연구팀은 강한 발광을 가지면서, 안정성이 뛰어난 지르코늄 착화합물 Zr3를 탄소-탄소 결합 형성 반응의 광촉매로 활용했다.¹² 주목할 만한 점은, Zr3의 열 및 강산에 대한 안정성을 토대로 삼아 1세대 발광체 Zr2로는 불가능했던 폭넓은 반응성을 확보했다는 것이다. 들뜬 상태의 산화적 퀘칭(Quenching)

뿐만 아니라, 환원적 퀘칭까지 가능함을 확인해 차세대 산화 환원 광촉매(Photoredox catalysis)로써 잠재력을 확인했다.

결론

지각에 풍부한 전이금속을 활용한 발광체는 비교적 최근부터 활발한 연구가 시작된 신생 연구 분야로 다양한 확장 연구가 가능하다. 새로운 리간드의 도입을 통해 발광 효율을 비약적으로 향상시키거나, 신규한 디자인 원리를 구축하여 중심 금속의 본질적 한계를 넘어선 발광체를 구현하는 등 무궁무진한 발전 가능성이 있다. 성공적인 개발을 통해 기존에 보편적으로 사용되었던 귀금속 기반 복합체를 대체하는 것은 물론, 궁극적으로는 제 1주기 전이금속의 독특한 특성에 기반한 독보적인 디스플레이 발광 물질 혹은 전례 없는 광유기 합성 반응의 개발도 가능할 것이다. 분자 제어에 기반한 기초 과학적 연구가 발광체 및 광촉매 산업의 패러다임을 재정립하기를 기대해본다.



1. J. M. Ha, S. H. Hur, A. Pathak, J.-E. Jeong, H. Y. Woo, *NPG Asia Materials* **2021**, *13*, 53.
2. (a) C. K. Prier, D. A. Rankic, D. W. C. MacMillan, *Chem. Rev.* **2013**, *11*, 5322. (b) J. Twilton, C. Le, P. Zhang, M. H. Shaw, R. W. Evans, D. W. C. MacMillan, *Nat. Chem. Rev.* **2017**, *1*, 0052.
3. (a) C. Wegeberg, O. S. Wenger, *JACS Au* **2021**, *1*, 1860. (b) L. H. M. de Groot, A. Ilic, J. Schwarz, K. Wärnmark, *J. Am. Chem. Soc.* **2023**, *145*, 9369.
4. Abundance of elements in the earth's crust and in the sea, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 97th edition (2016–2017), 14.
5. P. Chábera *et al.* *Nature* **2017**, *543*, 695.
6. K. S. Kjær *et al.* *Science* **2019**, *363*, 249.
7. W. Leis, M. A. Argüello Cordero, S. Lochbrunner, H. Schubert, A. Berkefeld,

- J. Am. Chem. Soc.* **2022**, *144*, 1169.
8. P. Herr, C. Kerzig, C. B. Larsen, D. Haussinger, O. S. Wenger, *Nat. Chem.* **2021**, *13*, 956.
9. C. Romain, S. Choua, J.-P. Collin, M. Heinrich, C. Bailly, L. Karmazin-Brelot, S. Bellemin-Laponnaz, S. Dargone, *Inorg. Chem.* **2014**, *53*, 7371.
10. Y. Zhang, J. L. Petersen, C. Milsmann, *J. Am. Chem. Soc.* **2016**, *138*, 13115.
11. Y. Zhang, T. S. Lee, J. L. Petersen, C. Milsmann, *J. Am. Chem. Soc.* **2018**, *140*, 5934.
12. Y. Zhang, T. S. Lee, J. M. Favale, D. C. Leary, J. L. Petersen, G. D. Scholes, F. N. Castellano, C. Milsmann, *Nat. Chem.* **2020**, *12*, 345.
13. Y. J. Jang, H. An, S. Choi, J. Hong, S. H. Lee, K.-H. Ahn, Y. You, E. J. Kang, *Org. Lett.* **2022**, *24*, 4479.



박윤수 Yoonsu Park

- 한국과학기술원 화학과, 학사(2010.2–2014.2)
- 한국과학기술원 화학과, 박사(2014.3–2019.2, 지도교수 : 장석복)
- 유타대학교 화학과, 방문연구원(2017.1–3, 지도교수 : Matthew S. Sigman)
- 기초과학연구원, 연구위원(2019.3–9)
- 프린스턴대학교 화학과, 박사 후 연구원(2019.10–2021.11, 지도교수 : Paul J. Chirik)
- 한국과학기술원 화학과, 조교수(2022.1–현재)

리튬이온전지용 하이니켈 양극재 내부의 전이금속 농도구배 구현 및 정량 방법

홍정기, 김기욱, 옥영인, 정태호, 유현덕* | 부산대학교 화학과, hyundeog.yoo@pusan.ac.kr

서론

급격한 인구 증가와 경제 발전에 따라 전 세계적으로 에너지 수요는 꾸준히 증가하고 있다. 현재까지 대표적인 에너지원으로 사용되고 있는 화석연료가 환경오염 및 기후 변화의 원인으로 지목받으면서, 지속 가능한 대체 에너지원이 요구되고 있다. 이에 따라 태양광, 풍력, 조력 등의 신재생 에너지를 전기에너지로 동력화(harnessing)하고 이를 저장(storage)하여 적재적소 및 적시에 활용할 수 있는 에너지 변환/저장 장치에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그중 전기화학 에너지 저장 장치는 가장 활용성이 뛰어난 전기에너지와 가장 에너지 밀도가 높은 화학에너지의 장점이 결합되어, 신재생 에너지의 변환/저장에 있어서 중추적인 역할을 하고 있다. 1859년 최초로 충전이 가능한 이차전지인 납축전지가 발명된 이후 발전을 거듭하여, 현재는 작동 전압과 에너지 밀도가 극대화된 리튬이온전지가 휴대용 전자기기, 전기 자동차, 에너지 저장 시스템(ESS) 등 다양한 분야에 사용되고 있다.

리튬이온전지는 크게 양극, 음극, 분리막, 전해질로 구성되는데, 그중에서도 양극을 구성하는 양극활물질은 이차전지의 성능과 안전성을 결정하는 중요한 요소 중 하나이다. 초기에는 대량 합성 및 품질 관리의 용이함으로 인하여, 층상구조를 가지는 리튬코발트산화물(LiCoO_2 , LCO)이 양극 활물질로 각광을 받았다. 하지만 주원료인 코발트의 지적

학적 제한성으로 인해 공급이 불안정하고 가격이 높으며, 구조적 한계로 인하여 이론 용량(274 mAh/g)의 절반 수준만을 사용할 수밖에 없다는 단점을 가지고 있다. 이를 대체하기 위해 층상 구조 내 전이금속 층에 Ni, Co, Mn이 혼재된 리튬 전이금속 산화물이 주목받았고, 이를 일명 NCM 또는 NMC 양극재라고 한다. 세 전이금속 중 니켈만이 유일하게 +2가에서 +4가까지 산화·환원될 수 있어 리튬이온의 가용량을 늘려 용량을 높일 수 있다. 이는 곧 전기자동차 측면에서 볼 때 한번 충전으로 갈 수 있는 거리가 길어짐을 의미한다. 그래서 니켈의 비중을 70% 이상으로 높은 하이니켈 NCM 양극재가 활발히 연구되었지만, 그와 동시에 여러 단점도 발견되었다. 높은 니켈 비중은 Ni^{2+} 와 Li^+ 이온 간 양이온 혼합(cation mixing)과, 불안정한 Ni^{4+} 이온의 발생을 유발해 층상 구조의 붕괴, 전해질과의 부반응, 두꺼운 표면 피막 형성 및 암염구조(NiO)로의 상변이 등의 부작용을 가져오게 된다.

니켈의 비중을 높임에 따른 여러 부작용을 해결하기 위한 방안 중 하나로서, 입자 내 중심부와 표면의 전이금속 간 조성 변화를 주는, 일명 농도구배(concentration-gradient 또는 compositional gradation) 전략이 개발되어 왔다[그림 1]. 농도구배형 양극재는 니켈을 중심부에 밀집시키고, 표면에는 망간 및 코발트의 함량을 높인 형태이다. 이를 통해 전체적인 니켈의 함량을 높여 용량을 향상시키고 동시에 전해질과의 부반응은 최소화할 수 있다. 이러한 구조적

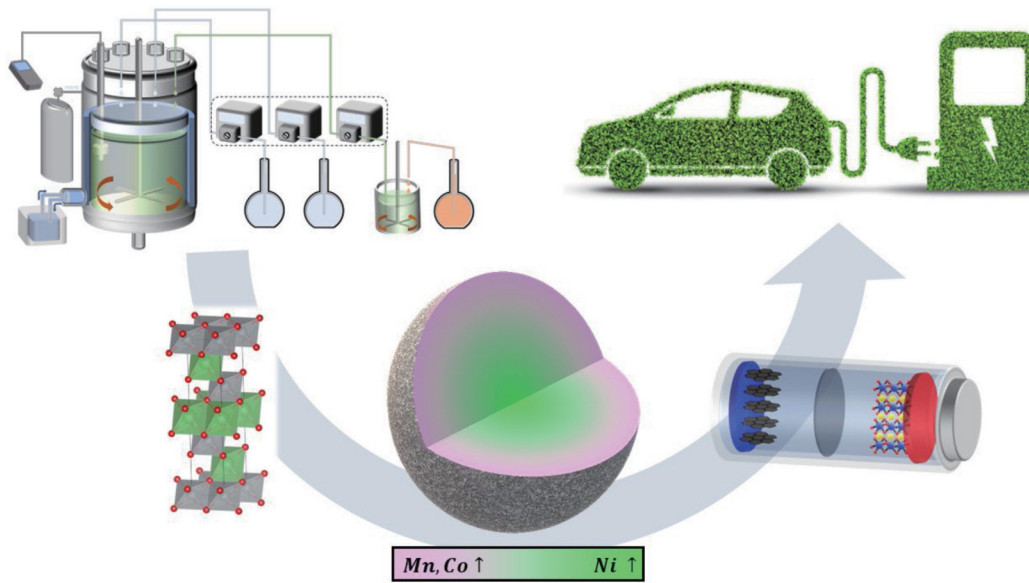


그림 1. 공침 과정에서 입자 중심부는 니켈, 외곽은 망간이 고함량으로 배치되는 농도구배를 형성 시킴으로써 열적/전기화학적/구조적 안정성이 개선된 양극재를 합성하여, 고안정성 배터리에 적용 하는 과정.

개선은 용량 유지율 및 열적/전기화학적/구조적 안정성을 향상시키며 리튬 이온의 확산속도를 개선하는 등 여러 장점을 가져온다. 이에 본 총설에서는 농도구배형 하이니켈 양극재의 개발 현황, 농도구배 구현/정량 방법, 기술적 난점, 그리고 전망을 살펴보고자 한다.

본 론

1. 농도구배형 하이니켈 양극재의 개발 현황

2005년 한양대학교 연구진에 의해 중심부의 하이니켈 $\text{Li}[\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}]\text{O}_2$ 양극재를 $\text{Li}[\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}]\text{O}_2$ 로 감싸는, 코어-셸 구조의 양극재가 발표되었다.¹ 동 연구진은 2009년에 코어와 셸 간 경계의 전이금속 함량 변화 정도를 완만하게 설정하여 구조적 불일치를 줄여 보다 안정적인 작동이 가능한 소재를 발표하였다.² 입자 내부의 전이금속 간 농도 변화가 점진적으로 이루어지는 것이 유리하다는 상기 연구 결과를 토대로, 기존처럼 코어와 셸로 구분되어 있는 것이 아닌, 입자내 농도 기울기가 연속적으로 형성되는 전역-농도구배(full concentration-gradient) 컨셉이 도입되었다.³ 최근에는 단순한 패턴의 농도구배를 넘어 최적의 농도

구배를 구현하는 것이 농도구배형 양극재가 가진 여러 과제 중 하나이다. 한 예로서 입자 내 기울기를 중심부에선 완만하게, 외곽에서는 급격하게 설정하면서 니켈의 함량을 보다 높이는 일명 two-slope 전략이 도입되었다.⁴ 또한 표면에 코발트의 함량을 높인 농도구배가 망간함량이 높은 농도구배 대비 기계적 유연성이 뛰어나 구조적 안정성 및 전기화학적 성능 향상에 효과적이라는 연구결과가 발표되기도 하였다.⁵

농도구배 이외에 하이니켈 양극재의 성능을 향상시키기 위한 전략으로는 대표적으로 도핑과 코팅이 있다. 하지만 추가적인 원소의 도핑은 초기 용량 저하의 원인이 될 수 있고, 코팅은 계면의 저항 증가로 이어질 수 있다. 이에 반해 농도구배는 세 가지의 전이금속을 함유한 NCM 양극재의 특성을 적극적으로 활용한 유용한 전략이다. 즉, 도핑이나 코팅 등 추가 공정 및 재료의 도입이 없이도, 양극재의 환경에 따라 전이금속간 비율을 달리하는 농도구배 방법을 통해 생산 비용 증가를 최소화하면서도 용량과 안정성을 동시에 확보할 수 있다. 또한 추가적인 도핑이나 코팅을 통해 농도구배형 양극재의 안정성과 성능을 더욱 효과적으로 향상시킬 수 있다.

이처럼 농도구배형 양극재가 보여준 전기화학적/열적/

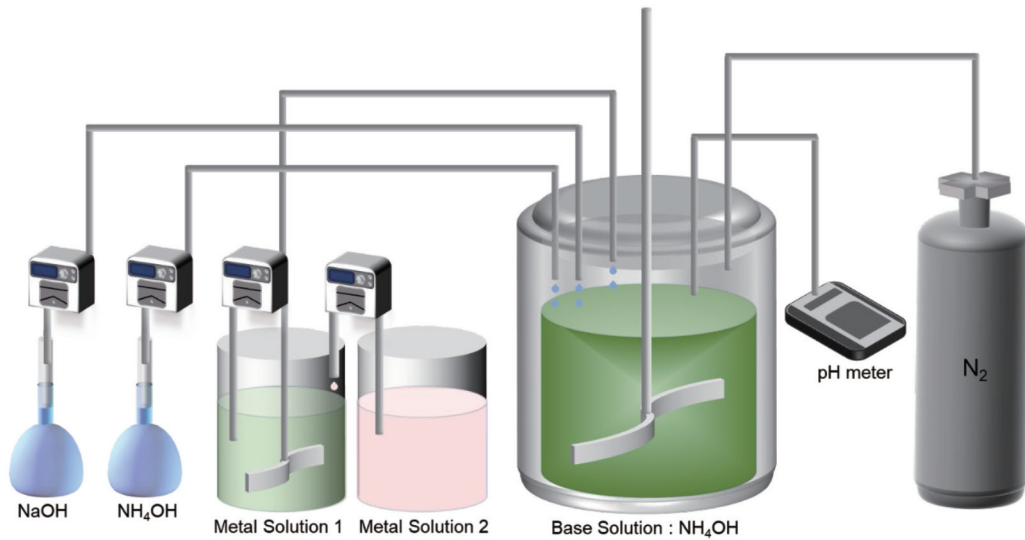


그림 2. 하이니켈 및 로우니켈 조성의 전이금속 용액을 사용하여 농도구배를 구현하는 전구체 공침 과정의 개념도.

구조적 안정성은 전 세계적인 주목을 받기에 충분했다. 특히 많은 전기 자동차에 농도구배형 양극재를 사용한 배터리가 사용되면서 향상된 안정성을 입증하고 있다. 구체적으로 농도구배형 하이니켈 양극재는 기아차의 니로 EV와 PHEV모델, EV6, 현대차의 유럽형 코나 EV 등 국내기업이 제조한 전기차뿐만 아니라, 베이징자동차그룹(BAIC) 산하에 있는 아크폭스의 마크5에도 적용된 바 있다. 그러나 농도구배 구현을 위해 추가적인 수조(tank)의 도입이 필요한 농도구배형 하이니켈 양극재의 특성상, 일반 하이니켈 양극재에 비해 생산 비용이 다소 높을 수밖에 없어, 앞으로의 지속적인 적용에 걸림돌이 되고 있다. 무엇보다 전기차의 가격 경쟁력이 더욱 중요해지면서 최근 일부 국내 산업계에서는 농도구배형 양극재 생산을 잠정 중단하는 추세 또한 보이고 있다. 이러한 가운데 앞으로도 농도구배형 양극재가 경쟁력을 갖기 위해서는 기존 양극재 대비 차별화된 안정성을 구현할 수 있도록 합성 및 분석에 있어서의 지속적인 혁신이 필요한 상황이다.

2. 하이니켈 양극재 입자 내부의 농도구배 구현방법

하이니켈 양극재는 공동침전(Co-precipitation)을 통해 만들어진 전이금속 수산화물 전구체($M(OH)_2$, $M=Ni, Co, Mn$)를 몰비 기준 1.01~1.05배 과량의 수산화리튬수산화물

($LiOH \cdot H_2O$)과 함께 섞어준 후, 산소 분위기에서 700~800 °C 열처리를 거쳐 리튬 금속 산화물($LiMO_2$) 형태로 합성된다. 위 과정에서 가장 먼저 진행되는 공동침전, 또는 공침 반응이란 온도와 pH가 조절된 배치 반응기(Batch Reactor)나 연속 교반 탱크 반응기(Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)에 전이금속이온 혼합 용액, 수산화나트륨(NaOH)용액, 그리고 수산화암모늄(NH_4OH)용액을 공급해 줌으로써 이루어진다[그림 2]. 이때 NCM 양극재(Lithium nickel manganese cobalt oxide, $LiNi_{1-x-y}Co_xMn_yO_2$)를 합성하기 위해서는 니켈, 코발트, 망간의 세 가지 전이금속 수화물($NiSO_4 \cdot 6H_2O$, $CoSO_4 \cdot 7H_2O$, $MnSO_4 \cdot 5H_2O$)을 증류수에 녹인 혼합 용액을 이용한다. NaOH 용액은 전이금속을 수산화물로 침전시키기 위해 필수적으로 들어가야 하는 요소이며, 전이금속 대비 대략 2배의 몰비로 투입된다. 이때 pH가 너무 낮으면 침전이 일어나지 않고, 반대로 pH가 너무 높으면 침전 속도가 너무 빨라 불규칙한 형태의 매우 작은 입자들이 얻어져 효과적인 전극 형성이 어려워진다.⁶ 또한 $Mn(OH)_2$ 의 경우 $Ni(OH)_2$ 나 $Co(OH)_2$ 에 비해 용해도곱 상수가 $10^2 \sim 10^3$ 배 정도 차이를 보여 효과적인 공동 침전에 어려움이 있다. 수산화암모늄(NH_4OH)용액은 전이금속이온과 착화합물을 형성한 후 수산화이온과의 교환반응을 통해 침전이 이루어지기 때문에, 전이금속이온들의 전체적인 침전 반응 속도

를 늦춤으로써 효과적인 공동 침전이 이뤄지도록 하며, 나아가 용해-재결정을 통한 오스트발트-라이프닝으로 구형의 2차 입자가 충분히 성장하도록 도와주는 역할을 한다.⁷

양극재 내부의 농도구배를 구현하기 위한 방법은 다른 아닌 공침 반응 과정에서 전이금속의 비율을 실시간으로 조절하는 것이다. 구체적으로 니켈 비율이 서로 다른 전이금속 혼합 용액 두 개를 이용하여 농도구배를 구현할 수 있다. 먼저 세 가지 전이금속 중 니켈($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)의 비율이 다른 두 전이금속(코발트, 망간)에 비해 높은 용액(하이-니켈 용액)을 만든다. 다음으로 코발트($\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)와 망간($\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)의 비율이 니켈에 비해 높은 용액(로우-니켈 용액)을 만든다. 먼저 탱크 1(혼합탱크)에 하이-니켈 용액을 채워준 후, 탱크 2에 담긴 로우-니켈 용액을 서서히 탱크 1에 공급하며 교반해 준다. 이에 따라 탱크 1 내의 니켈 비율은 점점 낮아지게 되며, 이를 반응기(reactor)에 유입하여 침전시키면 중심부에서 표면으로 갈수록 니켈의 비율이 낮아지고 코발트와 망간의 비율은 높아지는 전구체를 얻을 수 있다.² 농도구배에 영향을 끼치는 농도구배 조절인자는 용액 내 전이금속이온의 비율, 탱크 1 및 반응기(reactor)로 용액이 투입되는 유속, 각 용액의 농도/조성, 공침 반응 시간 등 다양하다.^{8,9} 이때 전구체 내의 농도구배를 화학 양론적으로 예측하기 위한 질량보존식은 농도, 부피, 유량, 시간에 따른 미분방정식으로 나타나며, 유량이 일정할 경우 미분방정식의 해석적인 풀이가 가능하여 시간에 대한 함수로 나타낼 수 있다.¹⁰ 위와 같은 질량보존식이 문헌상에 직접적으로 나타난 예는 드물지만, 농도구배 양극재를 합성하는 연구자들은 본질적으로 동일한 형태의 질량 보존식을 해석적 또는 수치해석적으로 풀어 농도구배 정도를 예측해 왔다. 나아가, 로우-니켈 용액을 하나 더 사용할 경우, 농도 기울기가 2개 나타나는 양극재 또한 얻을 수 있다.⁴

3. 양극재 입자 내부의 전이금속 농도구배 정량 방법

양극재 내부의 전이 금속 농도구배를 정량 분석하기 위해 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)와 EPMA(Electron Probe Micro-Analysis) 분석을 사용할 수 있다. EDS와 EPMA는 초점을 맞춘 전자빔으로 샘플의 표면을

스캔한 뒤, 빔과 시료의 상호작용으로 발생하는 X-선 신호를 통해 성분을 분석하는 분석법이다. 원자 내의 전자를 여기시키기 위해 필요한 임계전압 이상으로 전자빔의 전압을 가속시키면, 각 원소에 있는 전자가 여기 후 다시 안정화되면서 원자마다 고유한 에너지를 갖는 X-선을 방출하게 되는데 이를 X-선 형광이라고 한다.¹¹ EDS는 X-선 형광 광자 하나가 반도체 검출기에 닿으면 전자-홀 쌍이 형성되는 원리를 이용하며, 이때 형성되는 전자-홀 쌍의 개수는 X-선 형광의 에너지에 비례하므로 전자-홀 쌍에 의한 전하량을 측정하면 X-선 형광 광자 하나의 에너지를 측정할 수 있으며, 이때 동일한 에너지를 갖는 광자 별로 개수를 측정하면 시료 내에 어떤 원소가 얼마나 있는지 빠르게 검출할 수 있다. EDS는 원자 번호가 5 이상인 원소부터 측정이 가능하며 원자 번호가 8 (산소)보다 작은 경우 정량 분석이 어렵다. 반면 EPMA는 원천적으로 X-선 형광을 파장 별로 분석하여 그 세기를 측정하는 WDS(wavelength dispersive spectroscopy) 방식으로 측정이 이루어진다. WDS는 X-선 형광이 단결정에서 회절할 때 브래그 법칙에 따라 파장 별로 특정 각도에서 보강 간섭을 하는 원리를 이용하여, 파장 별로 분리된 X-선 형광의 세기를 측정하는 방법이다. 여러 파장이 섞여 있는 X-선 형광이 발생시키는 펄스 신호를 분석하는 EDS에 비해, WDS는 월등히 뛰어난 X-선 에너지 분해능과 낮은 검출 한계를 가지는 정량 분석 방법이다. 나아가 WDS는 탄소와 같은 가벼운 원소의 측정이 가능하여 보다 다양한 소재의 분석이 가능하다.

이러한 EPMA, EDS를 이용하여 원소 매핑 및 라인 스캔을 진행할 수 있다. 이를 위해 먼저 분석하고자 하는 입자를 이온-밀링 또는 FIB(focused ion beam) 방법으로 깎아 단면을 드러내어 준다. 원소 매핑은 원하는 영역의 각 지점에 대해 각각의 원소들이 나타내는 신호 및 그 세기를 색깔별로 나타내는 방법이다. 농도구배형 NCM 양극재의 경우 Ni, Co, Mn이 활물질의 표면과 내부 중 어느 곳에 더 많이 존재하는지를 측정해 농도구배를 시각적으로 파악할 수 있다[그림 3a]. 그러나 매핑 분석의 경우 2차원 영역에서 많은 데이터를 얻어야 하기 때문에 분석 시간 대비 데이터의 정밀도가 떨어지는 단점이 있다. 이에 비해 라인 스캔의 경우 활물질의 표면에서부터 내부를 관통하는 라인을

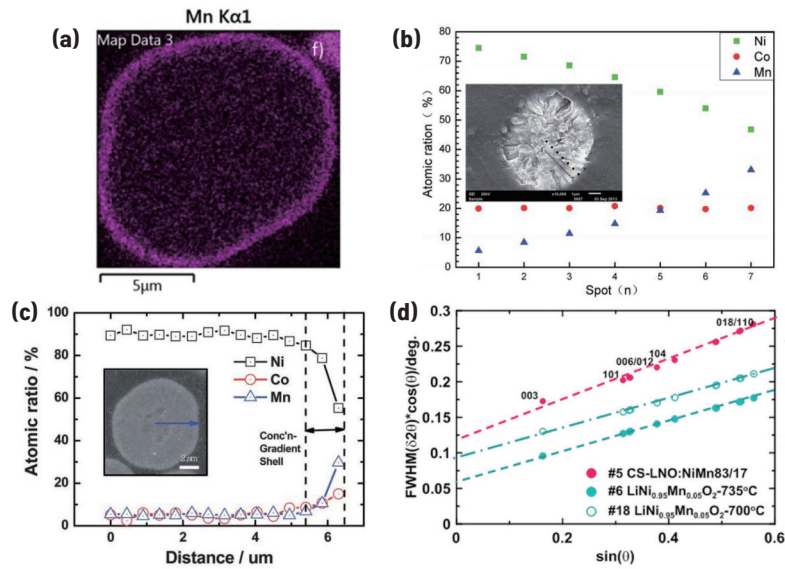


그림 3. (a) 코어-셸 소재의 EDS 매핑 결과.¹⁴ (b) 단면에서의 EDS 라인스캔 분석.²⁰ (c) 단면에서의 EPMA 라인스캔 분석.²¹ (d) 코어-셸(CS) 및 일 반소재를 비교하는 Williamson-Hall 도시.¹⁴

지정해 반지름 방향으로의 Ni, Co, Mn의 농도 변화를 보다 정량적으로 측정할 수 있다[그림 3b]. 특히 EPMA는 WDS 방식으로 측정이 이루어지기 때문에 일반적인 주사전자현미경(SEM)에 장착된 EDS에 비해 훨씬 정밀하게 원소를 정량할 수 있다[그림 3c]. 그러나 EPMA의 경우 측정에 앞서 이온 밀링이나 FIB를 이용하여 샘플을 얇은 디스크 형태로 준비해야 하는 까다로움이 있다. 이러한 EPMA와 EDS 매핑 및 라인스캔 분석은 하나의 단면에서 이루어지는 것이기 때문에 입자의 전체적인 농도구배를 정량하는데 있어 근본적인 한계가 있다.

좀 더 전체적인 차원에서 농도구배를 정량할 수 있는 방법으로서 X-선 회절(XRD) 피크의 반치폭(full width at half-maxima, FWHM) 값을 이용할 수 있다. X-선의 경우 벌크 물질의 내부 구조를 알 수 있을 정도로 에너지가 크기 때문에 단층촬영(토포그래피) 등 다양한 분야에서 사용되고 있다.¹² XRD 분석은 X-선이 결정에서 회절하는 특성을 이용하여 회절 패턴을 통해 결정의 구조를 파악할 수 있는 분석법이다. 이때 회절 각, 강도와 같은 회절 패턴은 물질마다 다르며 이를 이용해 결정 구조 및 각 원자의 위치 정보를 얻을 수 있다.¹³ 구체적으로 입사하는 X-선에 대한 회절각 2θ 에 따라 보강간섭, 또는 상쇄간섭이 일어나며,

보강간섭으로 만들어진 회절 패턴이 검출기를 통해 데이터로 기록된다.

조성의 농도구배는 결정의 격자 파라미터에 분포를 가져오게 되고, 이는 XRD 패턴 반치폭의 증가로 이어진다. 한편 반치폭은 격자 파라미터의 분포뿐 아니라 입자 크기에 따라 서로 달라질 수 있는데, 입자 크기와 격자 파라미터 분포의 영향은 Williamson-Hall 방정식을 통해 분리하여 알아낼 수 있다. 따라서 XRD 측정 데이터의 Williamson-Hall 도시를 통해 농도구배 정도를 비교분석할 수 있다. 이때 사용되는 Williamson-Hall 방정식은 아래와 같다.¹⁴

$$B \cos(\theta) = c + m \sin(\theta)$$

여기서 m 과 c 는 각각 기울기와 y -절편이며, B 는 회절 피크의 반치폭(FWHM, 2θ 기준)을 의미한다. θ 는 회절 각(2θ)의 절반에 해당하는 브래그-각을 뜻한다.¹⁵ 기울기인 m 의 경우 샘플의 격자 상수 분산 정도에 비례하며 이는 균일한 물질의 비균질 변형(strain) 물질 자체의 불균일성에 기인할 수 있다. 절편인 c 값의 경우 평균 결정 크기에 대한 정보를 제공한다. 따라서 Williamson-Hall 도시의 기울기가 클수록 격자가 더 다양하게 분포함을 의미하며, 이는 곧 양극재 조성의 농도구배 정도를 나타낸다[그림

3d).¹⁴ 이처럼 Williamson-Hall 도식 분석은 동일한 평균 조성을 갖는 양극재 내의 농도구배를 비교하는 데 있어 매우 유용하지만, 위 수식에는 많은 가정이 들어가기 때문에 이 방법으로 얻은 수치 자체에 절대적인 의미를 부여하기는 힘들다.

입자 조성의 농도구배 정량분석을 이상적으로 실행하기 위해서는 3차원적인 농도구배를 분석하여야 한다. 이를 위해 3차원 full-field transmission X-ray microscopy (TXM)과 X-선 흡수분광법(XAS)을 결합한 TXM-XAS 분석법을 이용할 수 있다[그림 4]. TXM은 180°에 걸쳐 X-선 투사 이미지를 모은 후 재구성하여 3차원적인 이미지 및 각 위치에서의 정보를 파악할 수 있는 기술이다.¹⁶ XAS는 샘플을 투과하기 전후의 X-선 세기를 비교하여 X-선 에너지에 따른 흡광도를 측정하는 것으로, X-선이 샘플을 통과할 때 물질 속의 전자가 여기되면서 특정 파장의 에너지를 흡수하는 현상을 이용한다. 이때 X-선의 에너지 및 방향을 달리함으로써 샘플에 대한 다양한 정보를 파악할 수 있다. 서로 다른 성분의 원소는 고유의 흡수 계수 및 고유의 흡수단(absorption edge)를 가지므로 이를 통해 정성분석이 가능하다. 또한 각각의 흡수단에서 일어나는 흡수 강도는 해당 원소의 농도에 비례하기 때문에 이를 이용하여 정량 분석 또한 가능하다. 구체적으로 Ni, Co, Mn 각각의 K-edge 에너지보다 약간 작은 에너지와 약간 큰 에

너지에서 측정된 XAS 신호의 차이는 각 원소의 흡수 강도에 해당하며, 이로부터 각 원소의 양을 3차원적으로 정량할 수 있다.¹⁶ 입자 전체에 대한 농도구배 경향을 보다 효과적으로 파악하기 위해서는, 유클리드 거리 매핑을 통해 표면으로부터의 거리에 대해 각 원소의 농도를 나타냄으로써 조성의 3차원적 농도구배를 1차원적으로 시각화할 수 있다.¹⁶

4. 농도구배 구현에 있어서의 난점 및 극복 방안

앞에서 살펴본 바와 같이 농도구배형 양극재는 합성 및 분석 측면에서 20년간 많은 발전을 거듭해 왔으나, 아직도 해결해야 할 과제가 남아있다. 추가적인 탱크 및 반응기의 설치로 인한 생산 비용의 증가는 양산을 해야 하는 기업의 입장에서는 중차대한 요소가 될 수 있다. 그러한 경우에는 농도구배형 양극재의 안정성이 생산 비용의 증가에 비해 더 큰 경제적 가치를 가져다주는지를 면밀히 판별하는 작업이 선행되어야 할 것이다. 또한 농도구배 양극재의 경우 반경 방향으로 길쭉하게 발달한 막대 형태의 1차 입자 성장이 관찰되는데, 이는 2차 입자의 기계적 안정성을 향상시키는 데에 도움이 될 수 있어, 충방전 중에 일어나는 입자의 균열을 효과적으로 방지하는 역할을 한다고 알려져 있다.¹⁷ 이처럼 안정성 향상에 도움이 되는 추가적인 장점

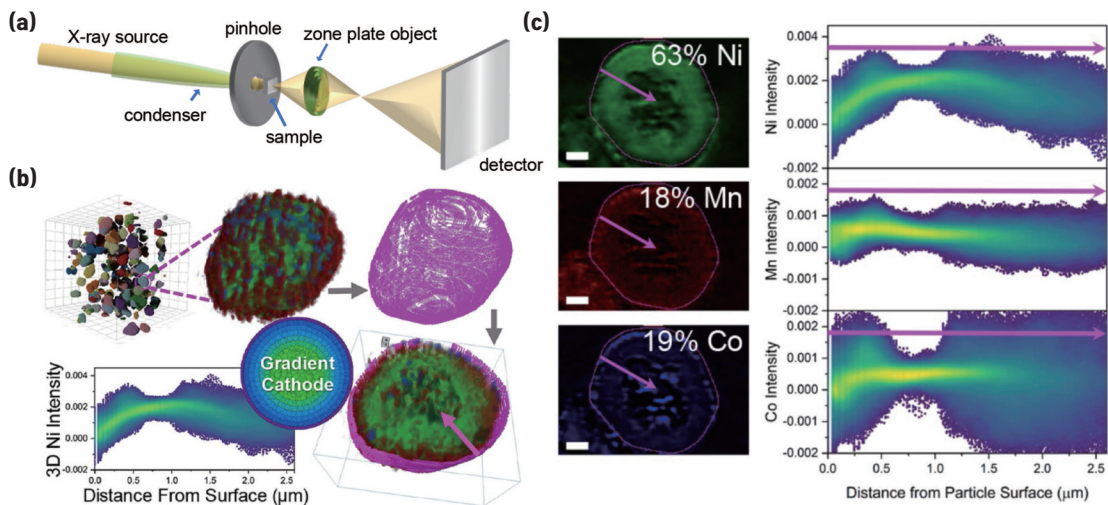


그림 4. (a) 투과 X-선 분광법(TXM)의 개념도, (b) TXM 결과를 이용한 3차원 농도구배 정량 과정, (c) 입자 표면으로부터의 거리에 따른 Ni, Mn, Co 각 원소의 신호 세기(오른쪽); 및 이를 통해 얻은 입자 내 각 원소의 평균적인 분율(왼쪽).¹⁶

들이 추후 더욱 명확하게 규명되고 보강될 경우, 생산 비용이 다소 증가하더라도 장기적인 관점에서 안정성이 반드시 보장되어야 하는 전기자동차용 배터리 같은 경우에는 후보군으로 꾸준히 검토될 가능성이 있다.

또한 전구체 합성 단계에서 조성의 농도구배를 구현하더라도, 고온에서 소성하는 동안 전이금속이온들의 열확산에 의해 농도구배가 상당 부분 희석되는 문제가 있다(그림 5). 특히 Ni^{3+} 나 Mn^{3+} 에 비해 Co^{3+} 는 10배 높은 확산 속도를 보여 소성 후에는 Co의 농도구배가 거의 사라지는 사례가 많이 발견된다.¹⁶ 따라서 가능한 한 낮은 온도로 짧은 시간 열처리해야 농도구배의 희석을 최소화할 수 있다. 이처럼 온도에 따른 전이금속이온의 열확산 계수를 규명하는 것은 보다 정교한 농도구배 구현을 위해 풀어야 할 중요한 문제 중의 하나이다.

그러나 소성 온도를 마냥 낮출 수만은 없는 것이, 소성 온도는 일차입자의 형상과 배향에 상당한 영향을 미치는 요소이기 때문이다.¹⁷ 보다 높은 온도에서 활물질을 소성할수록, 반자리-결함(antisite-defect) 등의 구조적 결함을 제거하여 결정성을 향상시키고 불순물이 제거되어 순도가 높아진다. 그러나 열처리 온도를 너무 높일 경우 용융점이

하의 온도에서 원자의 이동현상에 의해 분말 입자가 서로 결합하는 소결(sintering)로 인하여 일차입자 결정립이 커지는 조대화 현상이 발생한다. 이는 2차 입자의 균열을 야기하고, 그 균열을 통해 전해질이 침투하여 고전압에서 부반응을 일으킴으로써 사이클 안정성을 저해한다.¹⁸ 따라서 농도구배형 양극재의 결정성 및 농도구배를 크게 해치지 않는 최적의 열처리 온도 및 시간을 결정하는 것은 추후 in-situ XRD 등의 분석을 통해 규명해야 하는 과제 중 하나이다.

고온소성 시 전이금속 양이온의 내부 확산은 열역학적으로 기인한 현상으로서 완전히 억제하기는 어렵지만, 이러한 문제를 해결하기 위한 종래의 방법으로서 Sb^{3+} , Nb^{5+} , Mo^{6+} 와 같은 다양한 다가이온을 도펀트로 사용하고 있다. 이를 통해 전이금속 양이온의 입자내부 확산을 억제함으로써 선택할 수 있는 소성 온도의 폭을 넓힐 수 있었으며, 또한 입자 경계(grain boundaries)를 제한하는 pinning 효과로 입자의 성장을 억제하는 역할도 함께 보고되었다.¹⁷ 나아가 전지의 특성을 크게 저하시키는 양이온 혼합 역시 도핑으로 억제할 수 있다. 리튬층과 전이금속층 사이에서 일어나는 양이온 혼합은 Li^+ (0.76 Å)과 Ni^{2+} (0.69 Å)와 같이 반지름이 유사한 이온들이 서로 위치를 바꾸는 현상이

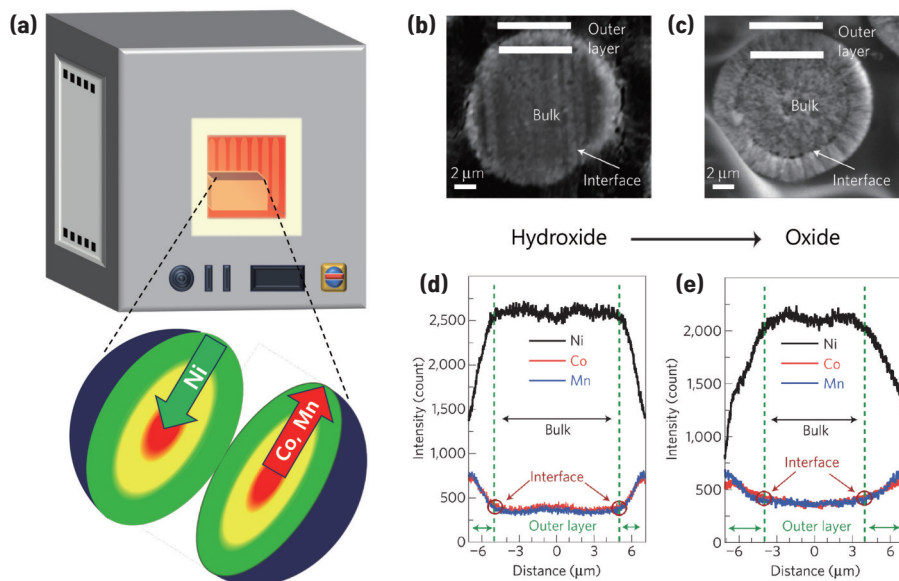


그림 5. (a) 고온소성 시 농도구배 입자 내에서 발생하는 전이금속 양이온의 확산, (b) $[\text{Ni}_{0.64}\text{Co}_{0.18}\text{Mn}_{0.18}](\text{OH})_2$ (소성 전), (c) $\text{Li}[\text{Ni}_{0.64}\text{Co}_{0.18}\text{Mn}_{0.18}]\text{O}_2$ (소성 후) 단면의 SEM 이미지. (d) $[\text{Ni}_{0.64}\text{Co}_{0.18}\text{Mn}_{0.18}](\text{OH})_2$ (소성 전), (e) $\text{Li}[\text{Ni}_{0.64}\text{Co}_{0.18}\text{Mn}_{0.18}]\text{O}_2$ (소성 후)의 EPMA 라인스캔 결과.²

다. 니켈은 3가 보다는 2가를 선호하는 경향이 있기 때문에, 고온 소성 시 리튬의 공급원인 리튬염(LiOH·H₂O)의 휘발에 의해 리튬 결핍이 일어난 리튬층의 빈 공간으로 니켈이온(Ni²⁺)이 혼입된다. 이러한 양이온 혼합은 리튬 이온의 확산을 방해하고 가역용량을 감소시키는 문제를 야기한다.¹⁹ 다가이온 도펀트는 리튬층의 빈자리를 먼저 차지하여 정전기적 반발력을 통해 니켈이온의 유입을 막을 수 있다. 이처럼 다가이온 도핑은 농도구배형 양극재의 소성 과정에서 농도구배를 유지시킬 뿐 아니라, 1차 입자의 과도한 성장 및 양이온 혼합을 효과적으로 억제하는 중요한 전략 중 하나이다.

결론

전기자동차 산업의 급격한 발전에 따라 고안정성 하이니켈 양극재를 개발하는 것은 현재 산업계에서 가장 중요한

과제 중 하나이다. 현재 농도구배형 양극재는 단입자(single-crystal)형 양극재와 함께 안정성 측면에서 가장 매력적인 하이니켈 양극재 중 하나이다. NCM 조성의 농도구배를 정밀하게 설계 및 구현하고 이를 정량적으로 분석하는 작업은 각국의 연구진들이 지금 이 순간도 활발히 개발 중인 매우 흥미진진한 주제이다. 공침 과정에서의 비용 증가와 소성 과정에서의 열확산 등의 미결 과제를 근본적으로 해결하기 위해서는, 종래의 공학적인 접근에 더하여 기초과학인 화학이 앞으로 보다 적극적인 역할을 해야 할 것으로 보인다. 이렇게 개발된 농도구배형 양극재는 고용량과 안정성을 동시에 만족시킴으로써 이동형 전원장치부터 전기차, 에너지 저장 시스템까지 점차 큰 규모의 이차전지에 적용이 가능할 것이다. 나아가 신재생에너지를 안전하고 효율적으로 저장하고 활용할 수 있는 매개체로서, 현재 인류가 직면하고 있는 기후변화와 환경오염에 대응하는 중추적인 역할을 할 수 있을 것이다.



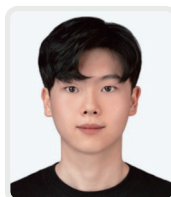
1. Yang-Kook Sun; Seung-Taek Myung; Myung-Hoon Kim; Jai Prakash; Khalil Amine "Synthesis and characterization of Li [(Ni_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1})_{0.8}(Ni_{0.5}Mn_{0.5})_{0.2}]O₂ with the microscale core-shell structure as the positive electrode material for lithium batteries." *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, *127*, 13411-13418.
2. Yang-Kook Sun; Seung-Taek Myung; Byung-Chun Park; Jai Prakash; Ilias Belharouak; Khalil Amine "High-energy cathode material for long-life and safe lithium batteries." *Nat. Mater.* **2009**, *8*, 320-324.
3. Y. K. Sun; Z. Chen; H. J. Noh; D. J. Lee; H. G. Jung; Y. Ren; S. Wang; C. S. Yoon; S. T. Myung; K. Amine "Nanostructured high-energy cathode materials for advanced lithium batteries." *Nat. Mater.* **2012**, *11*, 942-947.
4. Byung-Beom Lim; Sung-Jun Yoon; Kang-Joon Park; Chong S. Yoon; Sung-Jin Kim; Juhyon J. Lee; Yang-Kook Sun "Advanced Concentration Gradient Cathode Material with Two-Slope for High-Energy and Safe Lithium Batteries." *Adv. Funct. Mater.* **2015**, *25*, 4673-4680.
5. Tongchao Liu; Lei Yu; Jun Lu; Tao Zhou; Xiaojing Huang; Zhonghou Cai; Alvin Dai; Jihyeon Gim; Yang Ren; Xianghui Xiao; et al. "Rational design of mechanically robust Ni-rich cathode materials via concentration gradient strategy." *Nat. Commun.* **2021**, *12*, 6024.
6. M. H. Lee; Y. J. Kang; S. T. Myung; Y. K. Sun "Synthetic optimization of Li[Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}]O₂ via co-precipitation." *Electrochim. Acta* **2004**, *50*, 939-948.
7. Seon Hwa Lee; Ki Young Kwon; Byeong Kil Choi; Hyun Deog Yoo "A kinetic descriptor to optimize Co-precipitation of Nickel-rich cathode precursors for Lithium-ion batteries." *J. Electroanal. Chem.* **2022**, *924*, 116828.
8. Jin-Wook Ju; Eung-Ju Lee; Chong S. Yoon; Seung-Taek Myung; Yang-Kook Sun "Optimization of Layered Cathode Material with Full Concentration Gradient for Lithium-Ion Batteries." *J. Phys. Chem. C* **2014**, *118*, 175-182.
9. Eung-Ju Lee; Hyung-Joo Noh; Chong S. Yoon; Yang-Kook Sun "Effect of outer layer thickness on full concentration gradient layered cathode material for lithium-ion batteries." *J. Power Sources* **2015**, *273*, 663-669.
10. Xiaokang Ju; Xu Hou; Zhongqing Liu; Hongfei Zheng; Hui Huang; Baihua Qu; Taihong Wang; Qihong Li; Jie Li "The full gradient design in Li-rich cathode for high performance lithium ion batteries with reduced voltage decay." *J. Power Sources* **2019**, *437*, 226902.
11. J. Laigo; F. Christien; R. Le Gall; F. Tancret; J. Furtado "SEM, EDS, EPMA-WDS and EBSD characterization of carbides in HP type heat resistant alloys." *Mater. Charact.* **2008**, *59*, 1580-1586.
12. Stephanie Spence; Wah-Keat Lee; Feng Lin; Xianghui Xiao "Transmission x-ray microscopy and its applications in battery material research—a short review." *Nanotechnology* **2021**, *32*, 442003.
13. J. Epp. 4 - X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization. In *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*, Hübschen, G., Altpeter, I., Tschuncky, R., Herrmann, H.-G. Eds.; Woodhead Publishing, 2016; pp 81-124.
14. Ning Zhang; Nafiseh Zaker; Hongyang Li; Aaron Liu; Julie Inglis; Linda Jing; Jing Li; Ying Li; Gianluigi A. Botton; Jeff R. Dahn "Cobalt-Free Nickel-Rich Positive Electrode Materials with a Core-Shell Structure." *Chem. Mater.* **2019**, *31*, 10150-10160.

15. A. Khorsand Zak; W. H. Abd. Majid; M. E. Abrishami; Ramin Yousefi "X-ray analysis of ZnO nanoparticles by Williamson–Hall and size–strain plot methods." *Solid State Sci.* **2011**, 13, 251-256.
16. Eva Allen; Youngho Shin; William Judge; Mark Wolfman; Vincent De Andrade; Stephanie M. Cologna; Jordi Cabana "3D Quantification of Elemental Gradients within Heterostructured Particles of Battery Cathodes." *ACS Energy Lett.* **2023**, 8, 1371-1378.
17. Nam-Yung Park; Hoon-Hee Ryu; Liang-Yin Kuo; Payam Kaghazchi; Chong S. Yoon; Yang-Kook Sun "High-Energy Cathodes via Precision Microstructure Tailoring for Next-Generation Electric Vehicles." *ACS Energy Lett.* **2021**, 6, 4195-4202.
18. Geon-Tae Park; Hoon-Hee Ryu; Tae-Chong Noh; Gyeong-Cheol Kang; Yang-Kook Sun "Microstructure-optimized concentration-gradient NCM cathode for long-life Li-ion batteries." *Mater. Today* **2022**, 52, 9-18.
19. Un-Hyuck Kim; Geon-Tae Park; Patrick Conlin; Nickolas Ashburn; Kyeongjae Cho; Young-Sang Yu; David A. Shapiro; Filippo Maglia; Sung-Jin Kim; Peter Lamp; et al. "Cation ordered Ni-rich layered cathode for ultra-long battery life." *Energy Environ. Sci.* **2021**, 14, 1573-1583.
20. PY Hou; LQ Zhang; XP Gao "A high-energy, full concentration-gradient cathode material with excellent cycle and thermal stability for lithium ion batteries." *J. Mater. Chem. A* **2014**, 2, 17130-17138.
21. Yang-Kook Sun; Bo-Ram Lee; Hyung-Ju Noh; Huiming Wu; Seung-Taek Myung; Khalil Amine "A novel concentration-gradient $\text{Li}[\text{Ni}_{0.83}\text{Co}_{0.07}\text{Mn}_{0.10}]\text{O}_2$ cathode material for high-energy lithium-ion batteries." *J. Mater. Chem.* **2011**, 21, 10108-10112.



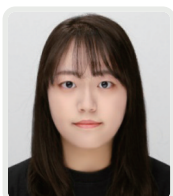
홍정기 Jeong Ki Hong

- 부산대학교 화학과, 학사(2017.3-2022.8)
- 부산대학교 화학과, 석사과정 (2022.9-현재, 지도교수 : 유현덕)



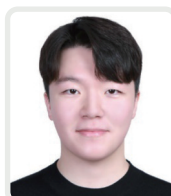
김기욱 Gi Uk Kim

- 부산대학교 화학과, 학사과정 (2020.3-현재, 지도교수 : 유현덕)



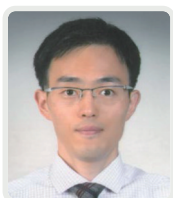
옥영인 Yeengin Ok

- 부산대학교 화학과, 학사과정 (2020.3-현재, 지도교수 : 유현덕)



정태호 Taeho Jeong

- 부산대학교 화학과, 학사과정 (2022.3-현재, 지도교수 : 유현덕)



유현덕 Hyun Deog Yoo

- 서울대학교 원자핵공학과, 학사(2000.3-2004.2)
- 서울대학교 화학생물공학부, 석/박사(2004.3-2011.8, 지도교수 : 오승모)
- 이스라엘 바르일란대학교 화학과, 박사 후 연구원(2011.10-2013.10, 지도교수 : Doron Aurbach)
- 미국 휴스턴대학교 전기컴퓨터공학부, 박사 후 연구원(2013.11-2015.5, 지도교수 : Yan Yao)
- 미국 일리노이대학교 시카고캠퍼스 화학과, 방문연구조교수(2015.6-2017.8, 지도교수 : Jordi Cabana)
- 부산대학교 화학과, 조/부교수(2017.9-현재)

피어난 식물들, 숨겨진 이야기

홍영식 | 서울교육대학교 과학교육과, njyshong@snu.ac.kr

서론

첫 화학 수업에서의 아스피린 합성 시간이다. 학생들의 표정이 어둡다. 교육학과 단일 전공으로 입학한 학생들은 140학점 중 교양 34학점, 교직 22학점, 공통전공필수 64학점을 수강하며, 과학교육 심화전공의 경우 과학을 20학점 수강한다. 대다수를 차지하는 문과 출신 학생들이 물·화·생·지 네 과목을 각각 5학점 정도 추가로 이수하는 것이다. 우여곡절이 있었지만, 아스피린에 버드나무의 스토리텔링이 있었다면 어떠했을까?

「고려 말, 이성계 장군은 우물가의 여인에게 물을 청한다. 훗날 태종 이방원의 정적으로 파란만장했던 신덕왕후 강씨는 버들잎을 띄워 건네며 말했다. “체하지 않도록 버들잎을 불며 천천히 드십시오.” 태조의 갈증을 풀었던 버드나무는 인류의 통증을 푼 나무였다. 이순신 장군이 말에서 떨어져 정강이가 부러지자, 버드나무 부목을 대고 과거를 치른 것은 유명한 일화다. 양치질도 버들 ‘양(楊) 과 가지 ‘지(枝)’의 ‘양지질’에서 유래한다. 버드나무의 진통 효과는 ‘살리신’에 있다. 그러나 쓴맛의 살리신은 위벽을 자극하는 등의 부작용이 있었다. 이에 바이엘사의 호프만은 무수 아세트산과 반응시켜 세계 최초의 의약품인 아스피린을 합성한 것이다. 지금은 조팝나무에서 추출한 살리실 알데하이드를 산화시켜 합성한다. 아스피린도 그 화학명인 아세틸 살리실산의 ‘A’, 조팝나무의 속명인 ‘spiraea’의 ‘spir’, 바이엘사의 제품에 공통으로 붙였던 ‘in’의 합성어다.」

이러한 예는 수국(안토시아닌), 주목(텍솔), 양귀비(모르핀), 인삼(사포닌), 감자(솔라닌) 등과 같은 일상의 식물과

비교적 낯설지만 듣고 나면 ‘아! 그런 스토리가?’ 하며 끄덕이게 되는 비누풀(사포닌), 개똥쑥(아르테미시닌), 꼭두서니(알리자린), 함초(소금풀) 췌기풀(프로페시아) 등이 있다. 여기에서는 학생들의 호기심을 유발하기 위하여 수업에 활용했던 ‘식물과 화학’ 중 일부를 소개하고자 한다.

본론

1. 개똥쑥(아르테미시닌)

개똥도 약에 쓰려면 없다는 속담처럼 흔했던 개똥쑥이 드물어진 것은 말라리아(학질) 때문이었다. 말라리아 원충



그림 1. 조팝나무
(서울교대)



그림 2. 개똥쑥(노들섬), 꼭두서니(일자산), 삼지구엽초(서울숲)

에 감염된 모기에 의해 생기는 말라리아는 고열과 황달 등으로 사망에 이르는 질병이다. 옛말에 ‘학을 떤다.’라는 것은 끔찍한 고통에서 벗어난다는 것을 의미했다. 최초의 말라리아 치료제는 키나나무에서 추출한 ‘키니네(퀴닌)’였다. 이후 제2차 세계대전 당시 공급이 부족하자, 미국은 대체약으로 클로로퀸을 합성했으나 베트남전쟁에서 내성을 가진 말라리아가 창궐하면서 인접한 중국에도 많은 환자가 발생했다. 1969년, 갈홍(283~343)이 쓴 “주후비급방”에서 개똥쑥이 학질을 치료한다는 것에 주목한 투유유는 개똥쑥에서 말라리아 치료제인 ‘아르테미시닌’을 추출해냈고 노벨상을 수상했다. 계속해서 개똥쑥의 함암 효과가 알려지면서 무분별한 채취로 가뭄에 콩 나듯 보기 어려워진 것이다. 노벨상은 “동의보감(1613년)”의 한 줄 처방에 있을 지도 모른다.

2. 꼭두서니(알리자린)

남사당패의 우두머리인 ‘꼭두쇠’가 붉은 옷을 입은 것에서 유래한 꼭두서니는 곤충학자 파브르가 신분 상승을 꿈꾸던 식물이었다. 붉은색 염료인 알리자린을 추출해낸 것이었다. ‘무척 기뻐다. 이제 장래가 보인다. 나의 회색 하늘에 뚫린 구멍 하나에서 장밋빛이 반짝이기 시작했다. 이

제 빵 문제에서 골몰하던 지옥에서 해방되어 조용히 곤충 사이에서 생활할 수 있겠지.’ 그러나 이내 알리자린 제조법이 개발되면서 가격은 폭락했고 그의 꿈은 물거품이 되고 말았다. 그에게 터닝 포인트가 찾아왔다. 56세에 퇴직하면서 벌의 생태를 기록한 ‘곤충기(1879년)’가 성공을 거둔 것이었다. 30여 년에 걸쳐 곤충기를 완성한 그는 노벨문학상 후보에까지 올랐다. 화학과 물리 교사에서 지천명을 넘긴 나이에 30여 년간 곤충기를 써내려간 파브르다.

3. 삼지구엽초(비아그라)

남자의 힘을 샘솟게 하며 여성의 갱년기에 좋다는 삼지구엽초는 3개로 갈라진 가지마다 세 장의 잎이 달린 것에서 유래한 이름이다. “삼재도회(1609년)”에 의하면, 삼지구엽초는 음란한 양이 기진맥진하면서도 이를 먹으면 원기가 회복되는 콩잎(藿) 같은 풀, 음양곽이었다. 비아그라와 같은 식물로는 음양곽, 비수리, 복분자, 구기자 등이 알려져 있다. 비아그라는 노벨의 협심증으로 거슬러 올라간다. 그런데 특이하게도 협심증 환자들의 발작은 주로 공장이 쉬는 일요일에 일어났다. 80여 년 후, 이그나로 교수는 니트로글리세린의 대사 과정에서 생긴 일산화질소가 혈관을 확장시키는 것을 발견했다. 산성비로만 만났던 일산화질소



그림 3. 비누풀(월드컵공원), 붉나무(다산생태공원), 까마중(서울교대)

의 새로운 발견이었다. 제약회사들은 혈관을 확장시키는 신약 개발에 나섰고, 실데나필의 부작용이 비아그라 개발로 이어진 것이다. 노벨상을 수상(1998년)한 그는 64세에 마라톤을 시작했다. 유산소 운동이 일산화질소를 유발하기 때문이다.

4. 비누풀(사포닌)

뿌리나 잎을 잘라서 물에 비비면 비누처럼 거품을 일으키는 비누풀(soapwort)의 비밀은 사포닌에 있다. 사포닌도 비누를 뜻하는 '사포'에서 유래한다. 사포닌은 비누처럼 체내 혈관에 축적된 콜레스테롤 등을 씻어내어 동맥경화 등의 성인병을 예방하는 성분이다.

5. 붉나무(소금)

빨간 단풍이 불타는 것 같다는 붉나무는 소금을 만드는 '염부목(鹽夫木)'이다. 열매에 생긴 짠맛의 흰색 가루(사과산갈슌)를 소금 대신 사용했기 때문이다. 수렵·채집 생활에서는 동물의 내장 등에서 섭취한 소금으로도 충분했지만 농경생활에서 따로 섭취해야만 하는 소금을 채취한 곳은 광산이었다. 소금은 인류의 역사와 궤를 같이했다. 그 처음

은 소금에 과도한 세금을 매겼던 당나라였다. 이에 소금 밀매업자인 황소가 일으킨 '황소의 난(875~884)'이 원인이 되어 결국 멸망하고 말았다. 프랑스대혁명의 도화선이 된 가벨(염세)도 비슷한 전철을 밟았다. 영국이 정한 소금법 폐지를 주장한 간디의 비폭력적 시민 불복종 운동인 소금 행진, 소금 도시인 잘츠부르크와 솔트레이크 시티, 마포구 염창동과 염리동이 소금의 흔적으로 남아있다.

6. 까마중(솔라닌)

까만 까마중 열매에는 독성물질인 솔라닌이 많다. 솔라닌도 까마중의 학명인 *Solanum nigrum*에서 유래한다. 솔라닌이 익숙한 것은 감자(*Solanum tuberosum*)다. 남아메리카에서 유럽으로 전파된 감자는 먹고 탈이 나는 경우가 많아 '악마의 식물'로 불렸다. 독일의 프리드리히 2세(1712~1786)는 군대의 감시하에 강제로 심게 했다. 이후 오스트리아와의 7년 전쟁에서 감자가 승리에 결정적인 기여를 했다. 감자를 주식으로 삼은 나라는 아일랜드다. 당시 먹을 것이라고는 감자밖에 없었기에 불가피한 선택이었다. 아이러니하게도 감자의 높은 농업생산성으로 인구가 증가하기 시작했다. 맬서스가 '식량 생산량은 산술급수적으로 늘어나는데 인구는 기하급수적으로 증가하기 때문에



그림 4. 털여뀌(강화도), 함초(시화호), 아스파라거스(성남시청)

인구 과잉으로 인한 식량 부족은 필연적이며, 인류는 빈곤에 허덕이게 된다.’라는 인구론(1798년)을 발표할 정도였다. 그러나 감자잎마름병의 창궐로 ‘아일랜드 대기근(1845~1852)’이 발생하고 말았다.

7. 여뀌(캡사이신)

앞에 여덟 ‘팔’ 자 무늬가 선명한 여뀌(water pepper)의 특징은 매운맛이다. 고추의 매운맛은 캡사이신, 마늘과 양파의 알싸한 맛은 알리신, 코끝이 간질거리는 후추는 피페린, 코끝이 찡한 겨자와 고추냉이는 시니그린 그리고 여뀌의 매운맛은 타테오날이다. 2021년 노벨생리의학상은 온도와 촉각 수용체를 발견한 과학자들이 선정되었다. 그들은 ‘고추를 먹으면 왜 땀이 나는가?’라는 궁금증에서, 온도가 42도 이상에서 활성화되는 단백질 수용체가 캡사이신과 결합할 때 동일한 전기 신호를 발생시키는 것을 발견했다. 계속해서 꼬집고 만지는 자극에 반응하는 촉각 수용체도 발견되었다. 일상의 질문에서 감각 전달 메커니즘을 밝혀낸 것이다. 민트 껌을 씹으면 시원해지는 것도 민트의 멘톨이 특정 온도 이하에서 활성화되는 단백질 수용체에 작용하는 것이다.

8. 함초(탄산나트륨)

갯벌의 함초는 짤 ‘함(鹹)’, 풀 ‘초(草)’로 짤 풀이라는 뜻이다. 속명 살리코르니아(Salicornia)도 라틴어 ‘sal(소금)’과 ‘cornu(뿔)’의 합성어로서 줄기가 뿔처럼 생긴 소금풀(saltwort)이라는 뜻이다. 갯벌이나 암염 광산이 많지 않은 유럽에서 함초는 소금처럼 쓰였다. 함초는 유리풀(glasswort)로도 불린다. 유리의 원료인 규사(산화규소)는 모래, 생석회(산화칼슘)는 석회석에서 얻는다. 그리고 규사의 용융점을 낮추는 소다회(탄산나트륨)는 함초나 다시마 등을 태운 재에서 얻었기 때문에 함초를 유리풀이라 불렀던 것이다. 비누 수요가 급증하자 유리풀로 만든 소다회는 절대적으로 부족했다. 1775년, 프랑스 과학 아카데미는 소다회 제조에 상금을 걸었다. 이에 르블랑은 황산, 석탄, 석회석 등을 이용하여 소금으로 소다회를 제조했다. 그러나 프랑스 대혁명으로 공장을 몰수당하자 권총으로 자살하고 말았다.

9. 아스파라거스(아스파라긴산)

화분의 아스파라거스... 스테이크 옆에 있던 아스파라거스? 고사리처럼 생긴 아스파라거스의 새순은 오래전부터



그림 5. 샬비어(보라매공원), 흑썬기풀(와우산), 치커리(여주)

식용으로 쓰였으며 숙취 해소를 돕는 콩나물의 ‘아스파라긴산’도 아스파라거스에서 유래한다. 아귀짬에서 콩나물 대가리를 떼어내는 것은 깔끔하게 보이기 위해서다. 짬이 아니더라도 대가리를 떼어냈던 사람은 암행어사 박문수였다. 그는 노론의 핵심인 조태채를 배척했다. 어느 날 콩나물 반찬이 나오자 그는 “콩나물 대가리는 베지 않을 수 없다.”며 대가리를 떼어냈다. 콩나물의 한자 ‘태채(太采)’가 조태채(泰采)와 음이 같기 때문이었다.

10. 샬비어(살바르산)

화단의 사루비아는 콩무니의 단물을 빨았던 꽃이다. 정식 명칭은 치료라는 라틴어 ‘salvare(살바레)’에서 유래한 ‘샬비어(salvia)’로 마법의 탄환, 살바르산의 어원이었다. 16세기에 수많은 사람들이 매독으로 죽어갔으나 매독 치료제였던 수은 화합물은 부작용이 심각했다. 이후 매독 병원균인 스피로헤타가 발견되었고 파울 에를리히는 비소 화합물로 특정 병원균만 죽이는 매독 치료제, ‘살바르산606’을 합성했다. 살바르산은 살바레와 비소(arsenic)를 합친 것으로 606번의 시도 끝에 합성했다는 의미다.

11. 썬기풀(미녹시딜)

습한 곳에 자라는 썬기풀은 줄기의 가시에서 개미산이 나오기 때문에 찔리면 가렵고 아프다. 베어드 쇼의 “세상을 바꾼 식물 이야기 100”에 ‘중세의 대머리 치료제, 로마 병사들은 왜 썬기풀을 사랑했을까?’처럼 탈모의 고민은 오래전부터 있었다. 대머리로 고민했던 시저가 항상 월계관을 썼던 것도 탈모를 가리기 위한 것이었다. 최초의 탈모 치료제는 우연한 발견이었다. 1950년대 고혈압 치료제로 개발된 ‘미녹시딜’이 발모의 부작용이 나타나자 탈모 치료제로 승인받은 것이다. 인디언은 대머리가 없다는 통계를 근거로 개발한 양모제에도 썬기풀이 원료로 쓰인다. 썬기풀에 기적의 탈모 성분은 없을까?

12. 치커리(이눌린)

낮설지만 원두커피 대응으로 치커리 커피를 처음 마신 나라는 프로이센이었다. 에티오피아 커피가 유럽으로 전파되면서 커피의 인기는 폭발적이었다. 프로이센의 프리드리히 2세는 커피 과소비와 맥주 소비 감소로 인한 세수 부족을 이유로 커피를 금지했다. 이에 커피 밀거래로 가격이 폭등하자 치커리 커피가 등장한 것이다. 치커리, 돼지감자에



그림 6. 백년초(협재해수욕장), 현호색(대야산), 디기탈리스(일자산허브공원)

풍부한 이눌린은 볶으면 쓰고 고소한 맛이 난다. 치커리 커피를 주목한 사람은 나폴레옹이었다. 트라팔가르 해전에서 영국에 패한 나폴레옹이 대륙봉쇄령을 선포하자 영국에서 수입되던 원두의 공급이 차단됐다. 나폴레옹은 치커리 커피에 눈을 돌렸다. 치커리 커피는 원두커피보다는 못했지만 마실 만했고 이후에도 계속 마시게 된 것이다. 미국에서도 남북전쟁 당시 북군이 뉴올리언스를 공격하면서 커피 공급이 차단되자 치커리 커피가 그 자리를 대신했다. 뉴올리언스 커피 하면 원두에 치커리를 가한 커피를 말한다.

13. 백년초(코치닐)

백년초로 불리는 멕시코 원산의 손바닥선인장은 쿠로시오 해류에 의해 제주 서쪽의 해안가로 떠밀려와 군락을 이루어 천연기념물로 지정되었다. 백년초는 초콜릿으로 익숙하지만, 멕시코의 아즈텍인들은 선인장에 기생하는 연지벌레로부터 딸기 맛 우유나 햄 등을 붉게 만드는 코치닐 색소를 얻었다. 벌레라는 어감 때문일까? 여러 부작용이 제기되었다. 그러나 비과학적인 내용이 과학으로 포장되기도 한다. 코치닐 색소의 카르민산은 인체에 영향을 미칠 수는 있지만 산도에 따라서 색깔이 달라지기 때문에 못 믿는다는 것은 터무니없다. 이것은 14세 소년이 수행했던 프로젝트 ‘우

리는 얼마나 잘 속는가?’에서 일산화 이수소(DHMO)의 사용을 금해야 한다는 설문에도 잘 나타난다. DHMO는 물을 화학식 명명법에 따라 표기한 것이었다.

14. 현호색(활명수)

검을 ‘현(玄)’, 오랑캐 ‘호(胡)’, 새끼 풀 ‘색(索)’의 현호색은 생명을 살리는 물, 활명수(活命水)의 원료였다. 활명수는 의학 지식이 풍부했던 궁중 선전관 민병호가 고증을 보좌하면서 익힌 소화제 비법에 제중원에서 배운 양약 성분을 배합해서 만든 우리나라 최초의 신약이었다. 옛날에 우리나라는 지금보다 훨씬 많은 고봉밥을 먹었다. 영국의 지리학자인 이사벨라 버드 비숍은 “조선과 그 이웃나라들(1898년)”에서 조선 사람들은 한 사람이 보통 3~4인분을 먹는다고 기록할 정도였다. 이로 인해 급체와 위장장애, 소화불량은 흔한 질병이었다. 활명수는 불티나게 팔려나갔고 그가 설립한 우리나라 최초의 제약회사인 동화약방(현 동화약품) 지점이 전국에 생겨났다. 가스명수는 탄산음료에서 힌트를 얻어 삼성제약에서 만든 세계 최초 탄산가스 함유 소화제다.

15. 디기탈리스(디곡신)

꽃이 장갑의 손가락을 닮아 라틴어 'digitus' 에서 유래한 디기탈리스는 고흐의 천재적인 재능을 이끌어낸 꽃이었다. 예술가 공동체를 꿈꾸던 고흐의 초대에 응한 사람은 고갱이었다. 둘의 화풍은 달랐다. 심한 다툼 끝에 고갱이 떠나 버리자 고흐는 자신의 귀를 자르는 소동을 벌였고 정신병원에 입원된다. 그리고 퇴원 후 가세 박사의 치료를 받으며 크리스티 경매 사상 최고가에 낙찰되었던 '가세 박사의 초상' 을 그렸다. 초상에서 가세 박사의 손에 들린 꽃은 디기탈리스였다. 당시 디기탈리스는 강심제와 간질 등에 효험이 있는 만병통치약이었다. 디기탈리스에서 추출한 디곡신은 심혈관계 질환에 사용되며 과다 복용 시 세상이 노랗게 보이는 황시증 등을 유발한다. 일설에 의하면 실제보다 더

노란 해바라기와 '별이 빛나는 밤' 에서의 별빛도 황시증에 의한 것이었다.

결론

일상의 많은 식물은 저마다의 화학적 스토리를 갖고 있다. 무스카리(머스크향), 윗나무(우루시올), 갓(시니그린), 때죽나무(에고사포닌), 석류(에스트로젠), 양귀비(모르핀), 금잔화(루테인), 오이(쿠쿠르비타신), 투구꽃(아코니틴), 쇠비름(오메가-3 지방산), 시금치(옥살산), 회화나무(소포리사이드), 까마귀쪽나무(리세놀라이드), 자작나무(자일리톨) 등이 그 예이다. 이전에는 별다른 의미 없이 지나쳤던 식물들을 화학적 관점에서 바라보면 새로운 스토리를 만날 수 있다.



1. 박중환, 「식물의 인문학」, 한길사, 2014년.
2. 스테파노 만쿠소와 알레산드라 비올라, 「매혹하는 식물의 뇌」, 행성B이오스, 2016년.
3. 유명만, 「나무는 나무라지 않는다」, 나무생각, 2017년.
4. 이나가키 히데히로, 「세계사를 바꾼 13가지 식물」, 사람과 나무사이, 2018년.
5. 이유미, 「내 마음의 들꽃 산책」, 진선출판사, 2021년.
6. 추순희, 「숲은 번개를 두려워하지 않는다」, 솔트앤씨드, 2015년.
7. 황경택, 「숲 읽어주는 남자」, 황소걸음, 2018년.



홍영식 Young-Sik Hong

- 고려대학교 화학과, 학사(1986.3-1990.2)
- 고려대학교 화학과, 박사(1992.3-1997.8, 지도교수 : 김시중)
- 서울교육대학교 과학교육과 교수(2005. 9-현재)

KNU 경북대학교

질량분석융복합연구센터

Mass Spectrometry Convergence Research Center(MSCRC)

“물질은 질량을 가진다 고로 존재한다
- 자연에 존재하는 유기 화합물을 탐구하다”

대구광역시 북구 대학로 80
경북대학교 화학관 313호

053) 950-7930

ckpcbkn@knu.ac.kr

<https://www.zeus.go.kr/cloud?cloudid=201812080404&coreYn=Y>

Project 1 질량분석 전문 인력 기반 공동연구시설

자연계에 존재하는 유기 화합물에 대하여 인간은 얼마나 알고 있을까요? 자연은 여러 가지 환경적 요인을 통하여 화합물들을 다양한 형태로 생성 및 변형시킵니다. 예를 들어 원유를 연구하는 학자들은 원유에 포함된 유기 화합물들이 100만 가지 종류 이상이라고 생각하고 있습니다. 흙속에 포함되어 있는 유기물질들, 강물이나 바다에 포함되어 있는 유기 화합물의 종이 몇 개나 되는지 아직 어떤 과학자도 알지 못합니다. 저는 지난 30년 동안 자연에 존재하는 유기 화합물들을 연구하면서 자연계는 다양성의 구현이라는 의지와 방향을 가지고 있다는 생각을 하게 되었습니다.

인간은 환경학, 약학, 식품학, 의학, 생물학을 포함한 현대 과학과 산업의 연구 분야에서 여러 가지 필요를 충족시키기 위하여 다양한 화합물들을 추가적으로 만들어 내고 있습니다. 이러한 활동을 수행하면서 복잡한 유기 혼합체 속에서 미량 화합물들을 분자단위에서 측정할 필요가 증가하고 있습니다. 이러한 필요성을 충족시킬 수 있는 대표적인 측정장비가 질량분석기입니다.

질량분석융복합연구센터(mass spectrometry convergence research center, MSCRC)는 경북대학교에 위치한 국제적 규모의 질량분석 기반 공동연구시설로, 질량분석 분야에서 혁신과 발전을 주도하여 관련 분야에서 우수성을 추구하는 연구자와 학생들에게 등대 역할을 하고자 합니다. MSCRC를 통한 공동 연구는 다양한 첨단 시설을 기반으로 지원됩니다.

MSCRC에는 총 40억 원의 가치를 지닌 20종의 질량분석기와 크로마토그래피 장비가 포함됩니다. 첨단 연구 장비는 탁월한 연구 결과를 도출하여 성공적인 공동연구를 수행하는데 결정적인 역할을 합니다. MSCRC에서 보유한 다양한 장비들의 사진이 [그림 1]에 제시되어 있습니다.

국내 대학 중 유일하게 보유하고 있는 초고분해능 질량분석기(Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry, FT-ICR MS)와 싸이클릭 이온이동성 질량분석기(Cyclic ion mobility mass spectrometry)를 활용하여 다양한 화합물들의 정밀하게 규명을 하고 화학 구조에 대한 정보를 얻을 수 있습니다. 오비트랩 질량분석기(Orbitrap mass spectrometry)와 싸이클릭 이온이동성 질량분석기를 초고성능 액체크로마토그래피와 연결하여 화합물에 대한 정성 및 데이터베이스 검색을 수행할 수 있습니다. 삼중극자 질량분석기와 초고성능 액체크로마토그래피 활용하여 화합물의 정량 측정을 수행합니다. 비극성 물질들과 중합체를 연구할 수 있는 열분해 가스크로마토그래피-질량분석기(pyrolysis gas chromatography), 퍼지 앤 트랩(purge and trap) 열분해-가스크로마토그래피-질량분석기를 구축하고 있습니다. 장비들을 활용하여 환경학, 에너지, 생물학 등 다양한 분야 간의 복잡한 상호 연결성을 깊게 연구할 수 있고, 이러한 탐색은 자연계에서 일어나는 다양한 화학반응들에 대한 흥미로운 통찰력을 가져올 것으로 기대하고 있습니다.

MSCRC의 핵심은 질량분석 전문가로 구성된 연구팀입니다. 이 전문가들은 공동연구의 핵을 형성하며 뛰어난 연구역량을 바탕으로 국내외 공동연구를 활발하게 진행하고 있습니다. MSCRC는 독특한 학제간 접근법으로 특징지어집니다. 팀은 다양한 학문 배경을 가진 개인들로 구성되어 있으며, 각자가 자신의 기술과 전문 지식을 보유하고 있습니다. 이러한 환경에서는 여러 분야의 아이디어와 견해가 모여서 혁신을 촉진하게 됩니다. 팀의 작업 뒤에는 경북대학교 화학과 김성환 교수와 약학부의 류광현 교수가 있습니다. 광범위한 경험과 질량분석 적용에 대한 깊은 이해는 센터의 연구를 새롭고 흥미진진한 방향으로 이끌고 있습니다.

질량분석 전문가인 박소영과 손승우의 전문적 지식과 풍부한 경험은 센터 공동연구의 성공적 수행에 기반을



그림 1. 질량분석융복합연구센터 대표장비들의 사진. (왼쪽 위부터 시계방향으로 오비트랩 고분해능 질량분석기, 고감도 삼중극자 질량분석기, 이온이동성 질량분석기, 기체크로마토그래피 질량분석기, 초고분해능 FT-ICR 질량분석기, 고분해능 액체크로마토그래피)

이루고 있습니다. 센터 매니저인 김미정은 MSCRC 운영 및 공동연구 수행에 대한 중추적인 역할을 담당하고 있습니다.

MSCRC는 또한 다음 세대의 질량분석 전문가를 양성하는 활발한 훈련장입니다. 현재 센터의 일원인 학·석·박사 과정 학생들은 총 17명입니다. 이 학생들은 센터의 공동연구에 활발히 능동적으로 기여하고 있습니다. 그들의 노력과 열정은 질량분석의 지식 경계를 다양한 분야로 확장하고 진행 중인 프로젝트에 새로운 시각을 제공하는 데 도움이 됩니다.

MSCRC는 학제간 협력적 연구 환경을 창출하는 것을 주요 목표로 하고 있습니다. 과학 연구 성공의 결정적 세 가지 요소인 숙련된 인력, 견고한 전문 지식, 고급 시설을 갖추고 우수한 융합적 공동 연구 플랫폼을 제공하고자 합니다. 센터에서 수행되는 공동연구의 소개를 통하여 이러한 연구 플랫폼의 역할 및 중요성을 보여 드릴 수 있을 것입니다.

Project 2 개발 도상국 강물 속 유기염료 기원 환경오염 물질 연구

환경오염, 특히 수질 오염은 과학자, 환경 전문가, 정책 결정자 모두가 우려하는 전 세계적인 도전 과제입니다. 다양한 환경 유해 물질은 인간의 건강부터 수생 생명체의 안녕까지 모든 생태계에 영향을 미칩니다. 이러한 보편적인 위협에도 불구하고, 선진국과 개발도상국 간에 환경 유해물질에 대한 모니터링 노력의 빈도와 철저성에는 명확한 차이가 있습니다. John L. Wilkinson과 공저자들은 의약품에 의한 강물 오염의 심각성을 보여주는 논문에서 “생태 및 인체 건강에 대한 해로운 영향에 대한 증거가 증가하고 있음에도 불구하고, 전 세계적으로 하천에서 발생하는 의약품에 관해서는 알려진 바가 거의 없습니다. 196개국 중 75개국에서 약물의 하천 유입을 평가하는 연구가 진행 중이며, 대부분의 연구는 북미와 서유럽에서 수행되었습니다.”라고 기술하고 있습니다.¹



그림 2. 인도네시아 Logi 강에서 수행된 시료채취 위치. 채취된 시료는 현장에서 동결건조 후 MSCRC로 전달되었고 분석되었음.

개발도상국이 환경 모니터링 역량을 강화하도록 지원해야 합니다. 강은 육상과 수생 생태계의 생명의 터전이며, 해로운 물질들이 바다를 통하여 확산될 수 있는 주요 통로입니다. 그러므로 한 나라의 문제는 다른 나라의 문제와 밀접하게 연결되어 있습니다. 이런 생각을 바탕으로 MSCRC는 인도네시아, 방글라데시 연구자들과 활발한 공동연구를 수행하고 있습니다. 인도네시아 National Research and Innovation Agency (BRIN) 소속 연구자들과의 공동연구를 통하여 Loji 강 강물에 포함된 유해성 유기염료 물질을 연구하고 있습니다. 그림 2는 시료가 채취된 위

1. Proceedings of the National Science Academies of the United States of America, 2022, 119, e2113947119.

치를 보여주고 있습니다. 인도네시아 연구자들이 강물을 채취하여 동결건조한 뒤 MSCRC로 시료를 보냅니다. 도착한 시료는 고분해능 크로마토그래피-초고분해능 질량분석기를 활용하여 분석됩니다. 분석 결과의 해석을 통하여 약 650여 개의 유해 물질이 발견되었고 특히 유독성 유기 염료 물질들도 다수 측정되었습니다. 얻어진 결과를 활용하여 국제 공동연구 논문이 작성되고 있으며, 이는 인도네시아 강물 속 유기 염료 물질을 질량분석기를 활용하여 분자단위에서 정밀하게 보고한 첫 번째 논문이 될 것입니다.

Project 3 플라스틱 분해산물 연구

미세 플라스틱은 종종 5밀리미터 미만의 크기를 가진 플라스틱 조각으로, 최근 몇 년 동안 전 세계적인 환경 문제로 부상하며 과학자들, 정책 결정자들, 그리고 일반 대중들로부터 주목받아왔습니다. 플라스틱 제품의 지속적이고 가속화된 생산과 소비에 의해 해양과 육지 생태계에 미세 플라스틱이 널리 퍼져 있고 조성의 특성 때문에 오랫동안 환경에서 지속되는 것이 문제의 핵심입니다.

미세 플라스틱이 환경에 미치는 영향은 그들의 물리적 존재만으로 제한되지 않습니다. 미세 입자들의 화학적인 영향도 고려되어야 합니다. 플라스틱은 시간이 지나면서 UV 방사선, 열, 기계적 스트레스, 미생물 작용 등의 환경 요인의 영향으로 점차적으로 작은 조각으로 분해됩니다. 이 과정에서 제조 과정에서 처음에 혼합되었던 단량체와 첨가제가 방출되고, 새로운, 잠재적으로 유해한 물질들이 생성됩니다. 이러한 분해 제품들의 화학적 정체성, 농도, 그리고 생체이용성, 그들이 생성되는 조건, 그리고 그들이 환경과 생물체에서 어떤 영향을 미치는지 등은 모두 중요한 주제들로서 추가적인 연구가 필요합니다.

MSCRC 연구진은 미세 플라스틱의 분해 과정에서 생성되는 화학물질들이 환경오염의 중요한, 그러나 대부분 간과된 요인이라는 가설을 세우고 이를 입증하기 위한 공동연구를 수행하고 있습니다. 이 공동연구는 해양 마이크로 플라스틱 연구분야에서 세계적으로 인정받고 있는 한국해양과학기술원 심원준, 홍상희 박사 팀과 수행하고 있습니다. 이 가설이 확인된다면 플라스틱 폐기물의 환경적 영향에 대한 이해를 재평가할 필요성을 제기하고, 이러한 영향을 완화하는 새로운 정책을 개발해야 할 수 있습니다.



그림 3. 대한민국 거제시의 재활용 센터에 수거된 해양 부표들의 사진, 벗겨진 후의 표면 샘플, 벗겨진 후의 내부 부분, 부표의 확대된 단면(표면은 검정색과 노란색이었으며, 내부 부분은 EPS의 원래 흰색을 유지하였음).

[그림 3]은 연구에 사용된 해양 플라스틱 부표의 사진을 보여주고 있습니다.² MSCRC 공동연구를 통해 얻은 결과에 의하면 각각의 부표가 1년 동안 광분해를 통하여 mg 단위의 화합물들을 생성합니다. 대한민국에만 천만 개 이상의 부표가 사용되고 있다는 점을 고려하면 전 세계적으로 많은 양의 화합물들이 부표의 분해를 통하여 매년 바닷물로 유출되고 있다는 것을 알 수 있습니다. MSCRC 연구진은 PP, PET, Nylon 등 다양한 플라스틱의 분해산물로 연구대상을 확장하고 있습니다.

2. Marine Pollution Bulletin, 2023, 192, 114998.

Project 4 미세먼지 속 유기 화합물 연구

현대 환경 과학에서 공기 중 입자상 오염물질 (PM) 연구는 매우 중요합니다. PM은 환경, 기후, 그리고 모든 생물체의 건강에 영향을 미친다고 알려져 왔습니다. 그러나 PM에 포함된 화학 성분이 매우 다양하므로, 이 성분들에 대한 과학적 규명이 필요합니다. PM 연구에서 주요한 도전과 기회가 공존하는 곳이 있는데, 바로 이 유기 분자들의 화학 구성물이 대부분 알려져 있지 않다는 사실입니다. 유기 분자들의 상세한 화학적 특성을 이해하지 못한다면, PM과 대기간 상호 작용들과 그들이 초래할 수 있는 결과를 이해하고 예측하기 어렵습니다. MSCRC의 연구진은 PM에 포함된 유기 분자들의 특성과 행동을 이해하기 위한 공동연구를 활발하게 수행하고 있습니다.

대한민국, 몽골, 중국, 일본, 한국기초과학지원연구원 김영환 박사팀과 공동으로 진행되는 연구에서는 서울, 울란바토르, 북경, 노토에서 1년간 채집된 300개 이상의 미세먼지 시료로부터 추출된 유기물질들을 고분해능 크로마토그래피-초고분해능 질량분석기를 활용하여 분석합니다. 얻어진 방대한 양의 데이터를 인공지능망 분석(neural network analysis)을 통하여 해석합니다. MSCRC 연구진은 인공지능망 계산에 사용된 가중치(weight)를 해석하여 필요한 화학정보를 얻어내는 방법을 개발하였습니다. 이 방법을 미세먼지로부터 얻어진 초고분해능 질량분석 스펙트럼에 적용하여 PM에 존재하는 유기 분자들의 계절적이고 지역에 따른 차이를 연구하고 있습니다. 공동연구의 전반적인 흐름이 [그림 4]에 표현되어 있습니다.

현재까지 얻어진 결과에 의하면 울란바토르의 미세먼지는 석탄 연소를 통하여 생성된 SO_x 화합물들이 대기 중에서 이차반응을 거쳐서 발생된 화합물들이 주요 성분을 이루고 있습니다. 베이징과 서울의 미세먼지에서는 NO_x 유기 화합물과 불포화고리를 가진 화합물들이 다수 검출되었습니다. 특히 겨울철 시료에서 이들 화합물이 발견되었고 이를 통하여 겨울철에 화석연료 연소과정에서 생성된 화합물들이 미세먼지 발생에 기여한다

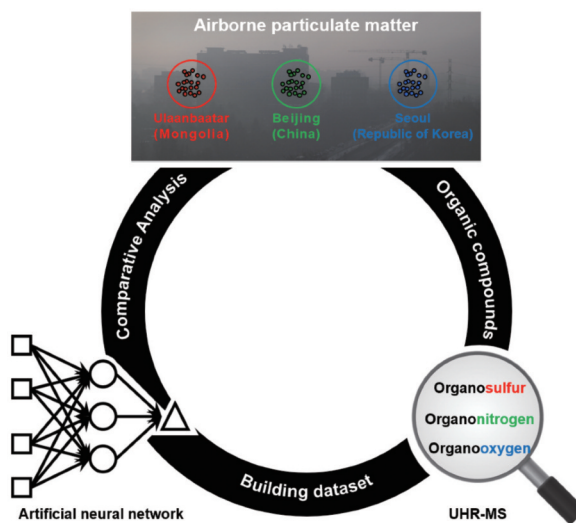


그림 4. 국제공동연구에 의하여 채집된 PM 시료의 초고해상도 질량 분석법과 인공 신경망 분석을 결합하여 수행된 연구의 흐름

는 제안을 하게 되었습니다. 이 결과는 2D GC-MS에 의한 분석 결과와 일치합니다. 현재 울란바토르에서 출발한 미세먼지의 이동이 대한민국 미세먼지에 미치는 영향을 탐구하고 있고, 또한 청정지역으로 알려진 일본 노토에서 채집된 시료와 비교를 통하여 미세먼지 발생에 기여하는 자연적인 영향 요소를 연구하고 있습니다.

MSCRC 연구진은 미세먼지 연구를 통하여 인간 활동과 자연 과정들이 에어로졸 오염에 어떻게 기여하는지에 대한 통찰력을 얻고자 합니다. 이런 이해는 기후 변화, 도시화, 산업화, 또는 기타 요인들에 의해 발생하는 미세먼지의 생성 및 변화를 예측하는 데 도움이 될 수 있습니다.

Project 5 대사체 데이터 표준화 공동 연구

최근 해외 및 국내에서 타 오믹스 분야와 더불어 대사체학 연구 관련 데이터가 급속히 생산되고 있으나, 대사체 데이터의 경우 표준화가 어렵고 대사체 데이터 품질 관리를 위한 지표가 없어서 타 연구자들이 이미 생산된 대사체 데이터를 활용하는데 어려움을 겪고 있습니다. 해외 주요 선진국들은 대사체 데이터 센터 구축을 통하여 전세계를 대상으로 대사체 빅데이터를 축적 및 공유하는 글로벌 오픈 플랫폼을 운영하고 있습니다(미국 Metabolomics Workbench, 유럽 MetaboLights 등). 이에 MSCRC 연구진은 한국 바이오 데이터 스테이션(K-BDS) 등록에 필요한 대사체 데이터의 품질관리 및 큐레이션을 대사체 데이터 품질선도센터와 함께 수행하고 있습니다.

구체적인 연구 내용으로는 K-BDS 등록을 위한 대사체 데이터 생산에 필요한 1) 대사체 데이터 표준화, 품질관리 및 큐레이션을 위한 표준작업지침서(SOP) 개발, 2) 대사체 데이터 품질관리 평가 지표 및 프로그램 개발, 3) 대사체 데이터 큐레이션 SOP 개발 및 4) K-BDS 입력 표준 제안 등이 있습니다. 특히 본 MSCRC에서는 표적 지질체 분석을 위한 SOP 개발 및 품질관리 지표 마련을 위하여, 질량분석기를 이용하여 레드/그린/화이트 바이오 시료 중 표적 지질체 분석 및 교차 검증을 수행하고 있습니다. 또한 내부표준물질 및 품질관리 시료를 활용한 품질관리 지표도 개발하고 있습니다. 대사체 데이터 품질관리를 위한 지표에 대한 내용이 [그림 5]에 표현

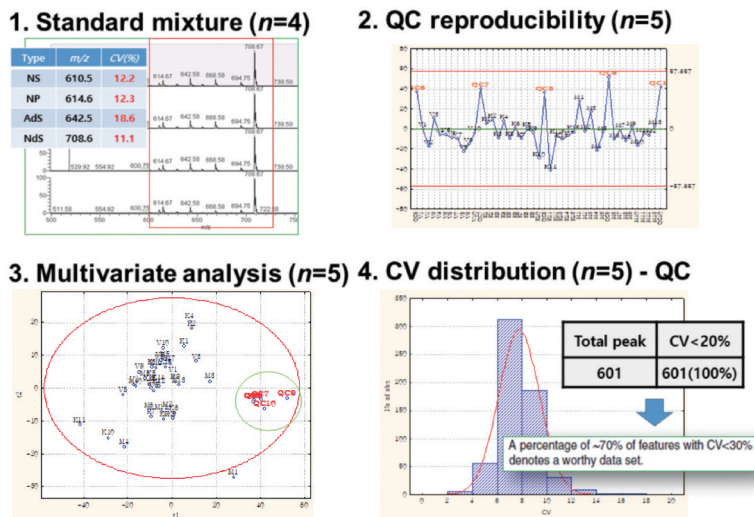


그림 5. 대사체 데이터 품질관리를 위한 지표 검증

되어 있습니다.

Project 6 공동연구 및 샘플분석 의뢰를 위한 이용 절차

공동연구를 위한 시료 분석에서는 시험 샘플 제공자와 분석 진행자 간에 샘플 및 진행 중인 연구에 대한 정보를 반드시 공유해야 합니다. 질량 분석기와 같이 고가의 민감한 장비를 사용하여 샘플을 분석하는 경우 이 필요성은 더욱 증가합니다. 따라서 MSCRC에 분석 요청 및 공동 연구를 수행하기 위해 [그림 6]에 명시된 절차를 따르게 됩니다. 분석 비용은 분석을 수행하는 연구원의 시간 사용, 협동 연구의 범위, 사용되는 장비의 종류, 샘플 및 화합물의 개수, 정성 및 정량 분석 등에 따라 달라집니다. 센터에 대한 더 많은 정보를 원하는 연구자는 <https://www.zeus.go.kr/cloud?cloudId=201812080404&coreYn=Y>를 방문하거나 센터의 연구원에게 이메일 (ckpcbknknu@knu.ac.kr)로 문의 바랍니다. MSCRC는 질량 분석 및 분리 분석 전문가와 함께 협력을 원하는 전국의 모든 연구자에게 문을 열고 있습니다.

데카르트트는 “나는 생각한다. 고로 존재한다.”라는 명제를 통하여 자연과학적 방법으로 물질세계의 진리를 찾을 수 있다는 논리적 근거를 전달하였습니다. MSCRC는 “물질은 질량을 가진다. 고로 존재한다”라는 생각을 바탕으로 대한민국 과학의 발전에 기여하고자 최선을 다하겠습니다.



① 시험 의뢰

- 시험 상담 및 분석 의뢰
053)950-7930
ckpcbknknu@knu.ac.kr
- 분석장비/시료/일정 협의



② 장비 예약 및 분석료 산출

- 제우스 장비활용종합포탈 사이트 접속 (www.zeus.go.kr)
- 이용자 직접 장비 사용 예약 신청
- 예상 분석료 산출(유형별 할인율 적용)



③ 이용 승인 및 시료 접수

- 예약관리(담당)자 장비 이용 승인
- 해당 분석장비 및 일정 확정
- 필요 시료량 안내 및 시료 수령



④ 분석 수행 및 결과보고

- 시험분석 수행
- 데이터 처리 및 결과 보고서 작성



⑤ 분석료 납부

- 시험 종료 후 분석료 납부
- 데이터 처리 및 결과 보고서 작성

그림 6. “질량분석융복합연구센터”에 분석 의뢰 및 공동연구 수행을 위한 절차 안내

이번 호에는 BKCS에 보고된 Anticoagulant 및 Antiplatelet Aggregation 관련 연구 논문을 소개합니다. 혈전증(Thrombosis)은 혈관 내에서 혈액이 응고되고 혈소판이 응집되어 혈전이 생성되어 혈관이 막히며 발생하는 질환입니다. 혈전형성이 조절되지 않으면, 정맥 판막 손상, 조직 궤양, 잔류 혈전에 의한 폐색전증(Obstruction)과 같은 심각한 합병증이 발생할 수 있습니다. BKCS에서는 혈전의 생성/혈액 응고 인자 활성을 억제하는 후보물질의 합성, 효능 기반 스크리닝, 결합 부위 예측, 혈전의 생성을 검출하는 다양한 논문이 발표되었습니다. 관련 연구를 하시는 대한화학회 회원분들의 많은 관심 부탁드립니다.

글 이원화(성균관대학교 화학과, wonhwalee@skku.edu)

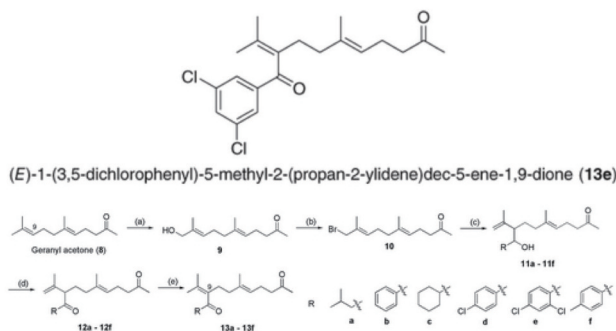
가톨릭관동대학교 이석준 교수팀에서 해양 천연물 추출물 기반 항혈소판제를 개발하였습니다. 해당 약물은 *Sargassum micracanthum* (잔가시모자반), *Sargassum yezoense*(왜모자반) 추출물 라이브러리에서 collagen-induced platelet aggregation 실험을 통해 효능 기반 스크리닝을 진행했고 효능이 좋았던 farnesyl acetone 유도체 중 가장 효능이 좋은 물질을 스크리닝하기 위해 rat의 혈소판을 분리하여 혈소판의 활성을 가장 잘 억제하는 물질을 선정했습니다. 해당물질의 혈소판 활성 억제 기전을 찾기 위해 혈소판 활성 유도인자 스크리닝을 진행했고 Collagen, thrombin, ADP를 억제함으로써 혈소판의 활성을 억제하는 것을 밝혔습니다.

[2019년 6월호, DOI: 10.1002/bkcs.11726]

Synthesis of Substituted Farnesyl Acetone Derivatives and their Inhibitory Activity against Platelet Aggregation.

Collagen, thrombin, TXA2, serotonin (5HT), and adenosine diphosphate (ADP) activate platelet aggregation, which are significant targets for anti-platelet therapy for the treatment of cardiovascular diseases. Although such anti-platelet drugs are clinically and preemptively useful, their daily use is associated with significantly high risks of conditions, such as fatal or nonfatal bleeding, neutropenia, and thrombocytopenia. Therefore, it is urgent and important to develop new antiplatelet agents that have little or no risk factors. So synthesized three kinds of C-9 substituted farnesyl acetone libraries (type 11, type 12, and type 13) from geranyl acetone in five steps.

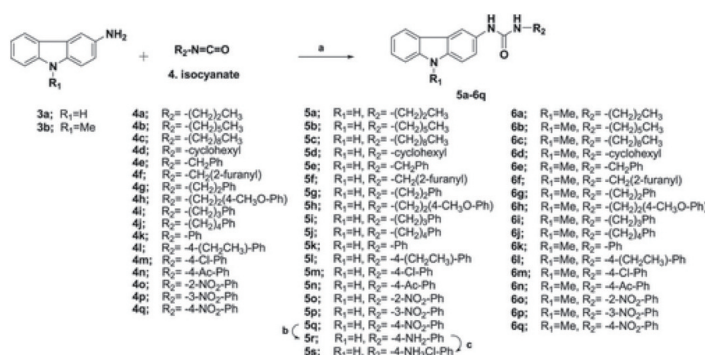
Among them, type 13 exhibited a stronger inhibitory activity against platelet aggregation induced by collagen. Based on the preliminary structure activity relationship, hydrophobic bulky substituents at the C-9 position play an important role in the anti-platelet activity. In particular, the additional functional group of benzene that was attached to the C-9 position improved the inhibitory activity. In this research, we discovered a novel structure for an anti-platelet drug candidate. By diverse synthesis of structural derivatization, we will develop an anti-platelet drug that meets the currently unmet-medical needs.



충남대학교 송규용 교수팀과 PCIPIA BIT 연구팀에서 새로운 3-*N*-substituted Carbazole 유도체를 합성했고, Platelet Aggregation 저해능력을 평가했습니다. 약물의 합성 이후 NMR, LCMS-IT-TOF를 활용하여, 3-*N*-substituted Carbazole의 유도체를 분리했습니다. 기존의 Carbazole 유사체들은 항암, 항바이러스, 항염증 등의 효능을 가지는 것으로 알려져 있었으나 혈소판 응고 억제 효능에 대해서는 알려져 있지 않았습니다. 해당 연구팀은 *in vitro* 혈소판 응집 실험을 통해 Carbazole 유사체의 urea 부분과 nitro group이 콜라겐 유도 혈소판 응집을 저해한다고 밝혔습니다. [2018년 6월호, DOI: 10.1002/bkcs.11462]

Synthesis of Novel 3-*N*-substituted Carbazole Derivatives and Evaluation of their Abilities to Inhibit Platelet Aggregation

The carbazole moiety exhibits various biological activities, including anticancer, antiviral, anti-inflammatory, and antimicrobial activities; some compounds containing the moiety also inhibit platelet aggregation. In the present study, we synthesized a series of 3-*N*-substituted carbazole derivatives and evaluated their abilities to inhibit *in vitro* platelet aggregation induced by collagen (5 $\mu\text{g}/\text{mL}$). The most active compound 5q may serve as a potential lead compound in future work on the development of inhibitors of platelet aggregation. These results suggest that the urea moieties and nitro groups of 3-*N*-substituted carbazole derivatives may play key roles in inhibiting *in vitro* platelet aggregation induced by collagen.



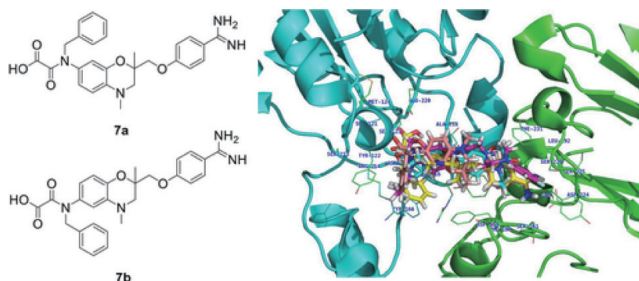
창원대학교 신동수 교수팀과 Southwest 대학교 Hua Zuo교수팀에서 *N*-(1,4-Benzoxazinone)Acetamide 유도체 기반 혈소판 응고 저해제를 개발했습니다. 이전 연구를 통해 개발한 BOAP-L9u의 구조를 바탕으로 BOAP-AM을 합성하였고 해당 약물의 구조 활성 연관성 (Structure-activity relationship; SAR)을 보기위해 혈소판 응집 실험을 통해 혈액 응고 억제 효능을 확인했습니다. molecular docking을 통해 GPIIb/IIIa 수용체와 결합해 혈소판 응고 억제를 한다는 것을 밝혔고, 물질과 수용체 간의 결합부위를 예측했습니다.

[2018년 2월호, DOI: 10.1002/bkcs.11359]

Rational Design, Synthesis, and Biological Activity of *N*-(1,4-Benzoxazinone)Acetamide Derivatives as Potent Platelet Aggregation Inhibitors

Based on our studies on the pharmacophoric role of 1,4-benzoxazine-3(4*H*)-one for desirable platelet aggregation inhibitory activity, we identified *N*-(4-ethyl-3-oxo-3,4-dihydro-2*H*-benzo[*b*][1,4]oxazin-7-yl)-2-(4-methylpiperazin-1-yl)acetamide (**BOAP-AM6**) and *N*-(4-butyl-3-oxo-3,4-dihydro-2*H*-benzo[*b*][1,4]oxazin-7-yl)-2-(4-(4-fluorophenyl)

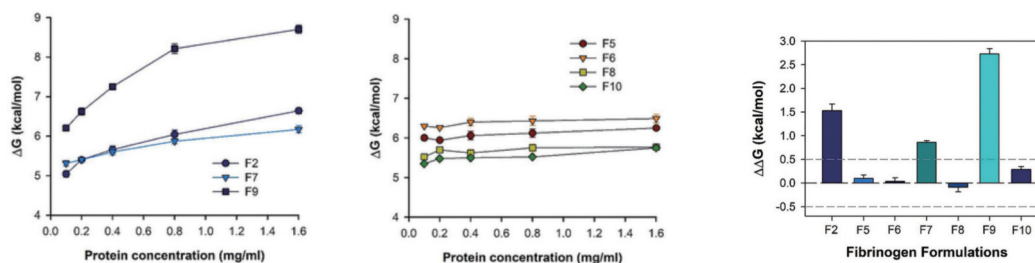
piperazin-1-yl)acetamide (**BOAP-AM21**) as platelet aggregation inhibitors with an IC_{50} of 8.93 and 8.67 μM . The most potent antiaggregatory compounds **BOAP-AM6** and **BOAP-AM21**, which had even equally aggregation inhibition activity as the control drug aspirin, can serve as lead compounds for the next generation of platelet inhibition agents, making use of established binding modes and SARs.



중앙대학교 나동희 교수팀과 경북대학교 송임숙 교수팀에서 등온화학변성 (isothermal chemical denaturation; ICD)을 이용하여 피브리노겐 생산에서 최적의 제형법을 개발했습니다. 등온화학변성(ICD)은 urea와 같은 변성제로 인한 구조 변형을 통해 단백질의 구조적 안정성을 측정하는 기술로 자동화된 ICD를 통해 피브리노겐의 최적의 습도와 온도 제형을 선별하였고 이를 통해 ICD 기반의 제형 선별 접근법이 피브리노겐의 초기 단계 제형 개발에 매우 적합하다는 것을 보여주었습니다. 본 연구는 선천성 및 후천성 피브리노겐 장애를 치료에 도움이 될 것으로 기대됩니다. [2023년 4월호, DOI: 10.1002/bkcs.12664]

Application of isothermal chemical denaturation to early-stage formulation development of fibrinogen

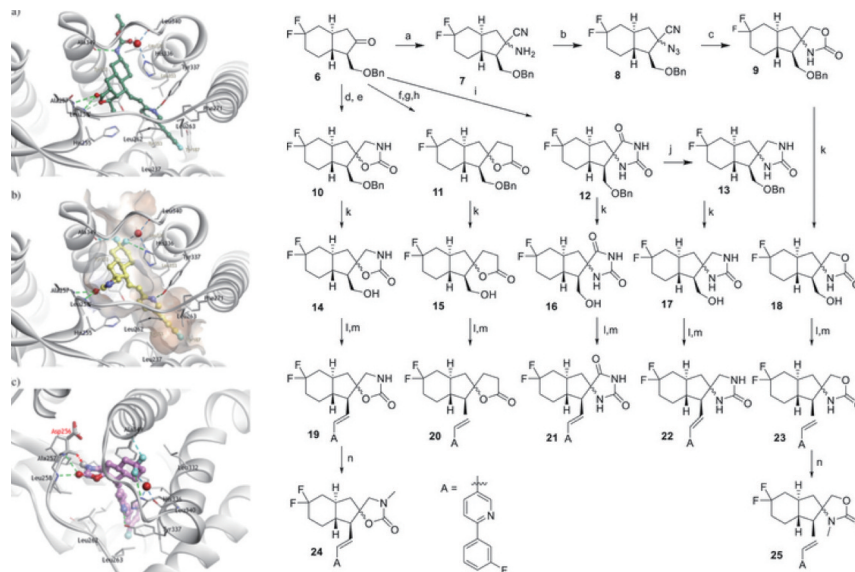
The right formulation at an early stage in drug development can lead to competitive advantages by avoiding potential project failure and product launch delays, and reducing development costs. This study shows an efficient process for selecting the optimal fibrinogen formulation using an automated, high-throughput ICD instrument. The appropriate formulations were screened by ICD results (ΔG , ΔG_{Trend} , and $\Delta\Delta G$), followed by further optimization of the formulation selection process by osmolality measurements and accelerated stability study at 40°C and 75% RH. The finally selected optimal formulation of fibrinogen consisted of 20 mg/ml fibrinogen, 16 mg/mL-L-arginine, 10 mg/ml glycine, 1.2 mg/ml tri-sodium citrate dihydrate, and 3.5 mg/ml sodium chloride (pH 7.0). This study demonstrates that ICD-based formulation screening approach is highly applicable to early-stage formulation development of fibrinogen.



한국화학연구원 이선경 연구원 연구팀에서 (E)-5,5-Difluoro-1-[2-[5-(3-fluorophenyl)pyridin-2-yl]vinyl]octahydrospiro(indene-2,5'-oxazolidin)-2의 PAR1 작용제로의 기능을 밝혔습니다. PAR1 작용제는 다른 항 혈전제에 비해 출혈 부작용이 상대적으로 적은 안전한 항혈전제로 알려져 있습니다. 본 연구팀은 trans-fused 5,5-difluorooctahydroindenes 유도체를 합성했고, 해당 약물의 생물학적 활성 및 대사 안정성을 확인하기 위하여 각각 PAR1 결합 실험과 혈소판(PRP)의 응집 실험을 진행했습니다. 또한 molecular docking을 통해 약물과 사람의 PAR1 단백질의 결합 부위를 예측했습니다. 최종적으로 약물의 원숭이 구강투여를 통해 PK profiling과 ha-TRAP 유도 혈장 응집 억제제의 유효 농도를 검증했습니다. [2019년 7월호, DOI: 10.1002/bkcs.11747]

Discovery of (E)-5,5-Difluoro-1-[2-[5-(3-fluorophenyl)pyridin-2-yl]vinyl]octahydrospiro(indene-2,5'-oxazolidin)-2'-one as a PAR1 Antagonist

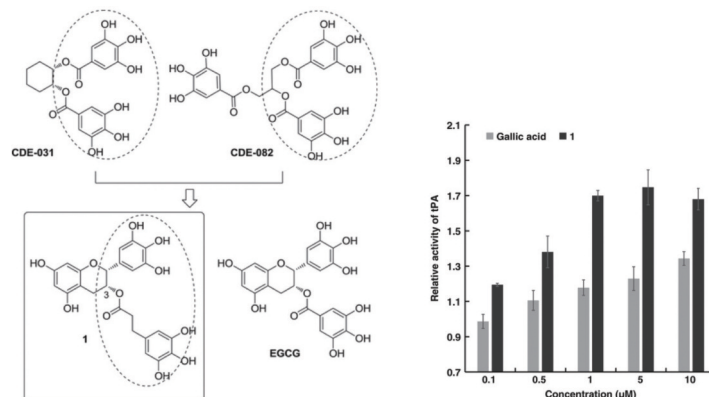
Protease activated receptor 1 (PAR1) antagonists are relatively safe antiplatelet agents that have a lower bleeding side effect than do other antithrombotic agents. In the current study, we prepared a series of trans-fused 5,5-difluorooctahydroindenes which do not have a C5 stereogenic center, and evaluated their biological activities and metabolic stabilities. Compound **19** in this series, containing a spirooxazolidinone moiety at C2, showed excellent efficacy in both PAR1 binding ($IC_{50}=70$ nM) and human platelet rich plasma (PRP) aggregation ($IC_{50}=0.19$ μ M), along with good metabolic stability ($R_{50}=345.8, 337.2,$ and 43.4 min in human, rat, and monkey liver microsomes, each), which is comparable to that of vorapaxar. completely inhibits haTRAP-induced platelet aggregation at 30 mg/kg up to 24 h. When the plasma concentration of **31** is maintained above 200 ng/mL, platelet aggregation induced by haTRAP is completely inhibited.



건국대학교 정유훈 교수팀과 최윤경 교수팀에서 PAI-1 억제제 약물 디자인 시 Epigallocatechin-3-gallate (EGCG)의 새로운 PAI-1 약물 디자인으로서 가능성을 제시했습니다. PAI-1은 혈액 응고와 혈관 폐색을 조절하는 단백질로 알려져 있습니다. PAI-1의 과도한 활성화는 혈전 형성을 억제하여 출혈 증상을 유발할 수 있으며, 반대로 PAI-1의 부족은 과도한 혈전 형성으로 동맥 경화 등 심혈관 질환의 위험을 증가시킬 수 있습니다. 본 연구팀은 EGCG 기반 유도체를 합성하였고 해당 약물의 효능 평가를 위하여 Gallic acid와 조직 플라스미노겐 억제 능력을 비교하여 평가하였습니다. [2017년 8월호, DOI: 10.1002/bkcs.11188]

Epigallocatechin-3-gallate (EGCG) Serves as a Novel Scaffold for Designing an Inhibitor of Plasminogen Activator Inhibitor-1 (PAI-1)

Plasminogen activator inhibitor-1 (PAI-1) is a serine protease inhibitor (serpin), which plays a pivotal role in regulating plasminogen activation system through inhibition of tissue plasminogen activator (tPA) and urokinase plasminogen activator (uPA). A novel scaffold for development of PAI-1 inhibitors has thus been urgently required and, in this context, a pharmacophore model composed of a 6-atom-bridged bi-pyrogallol moiety drew our attention. In this proof-of-concept study, for evaluation of EGCG as a new scaffold of PAI-1 inhibitors, a novel EGCG derivative was designed to mimic the 6-atom-bridged bi-pyrogallol pharmacophore. The newly prepared EGCG derivative 1 showed approximately two times more potent inhibitory activity against PAI-1 compared to gallic acid, which warrants further development of more promising PAI-1 inhibitors based on the EGCG scaffold.



인천대학교 김규원 교수팀이 알카인티올레이트로 코팅된 금 전극 표면을 활용한 피브리노겐의 전기화학적 검출법을 개발했습니다. 피브리노겐은 혈전 형성 과정에서 트롬빈과 상호작용하며 중요한 역할을 담당합니다. 전극 표면의 알카인티올레이트 수정은 금 전극과의 강한 결합을 형성하여 안정한 표면을 형성하고, 분자들을 효과적으로 고정시키는 방식을 통해 페로신-라벨된 피브리노겐과 전극 표면 간의 상호작용이 가능해집니다. 해당 기술 혈전 관련 질환의 진단, 혈전의 형성과정의 이해, 그리고 항응고제의 효과 평가 등 다양한 응용 분야에서 활용될 것으로 기대됩니다. [2015년 8월호, DOI: 10.1002/bkcs.10389]

Alkanethiolate-modified Gold Electrode Surfaces Used in Electrochemical Thrombin Detection with Ferrocene-labeled Fibrinogen

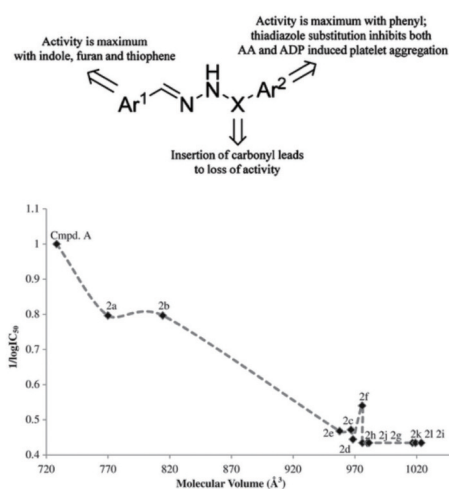
Thrombin is an essential protease involved in the coagulation cascade, major thrombotic processes, and hemo-

stasis. Thrombin facilitates blood clotting by converting fibrinogen into fibrin and is regarded as a tumor marker in the diagnosis of pulmonary metastasis. This study showed that the alkanethiolate layer has significant effects on electrochemical thrombin detection with Fc-Fib. Fibrinogen arrangement, first investigated electrochemically, is dependent on the type of alkanethiolate. The MCU-immobilized surface provided the most efficient assembly to detect thrombin. The proposed method showed high selectivity toward thrombin due to its specific conversion of fibrinogen into fibrin polymers. In addition, the dynamic range of thrombin was from 1 ng/mL to 1 μ g/mL, resulting in high sensitivity. This study thus describes a feasible method of detecting and measuring thrombin and suggests electrochemical investigations of adsorbed-fibrinogen assembly.

Zanjan University of Medical Sciences의 Shohreh Mohebbi 교수 팀에서 새로운 N-Substituted ((1H-indol-3-yl)methylene)benzohydrazides and ((1H-indol-3-yl)methylene)-2-phenylhydrazines의 합성법을 개발했고 물질의 항혈소판 응집 능력을 평가했습니다. 합성된 화합물들의 항혈소판 응집 활성은 인체 혈소판의 응집을 억제하는 능력을 평가하기 위해 진행되었습니다. 이를 위해 인체 혈소판을 대상으로 한 응집 실험을 수행하고, 응집 억제 효과를 측정하였습니다. 이러한 실험을 통해 합성된 화합물들의 항혈소판 응집 활성을 평가하고, 구조와 활성 간의 상관관계를 파악했습니다. 본 연구는 혈전 관련 질환의 예방 및 치료 후보물질을 개발한 연구입니다. [2015년 11월호, DOI: 10.1002/bkcs.10531]

Novel N-Substituted ((1H-indol-3-yl)methylene)benzohydrazides and ((1H-indol-3-yl)methylene)-2-phenylhydrazines: Synthesis and Antiplatelet Aggregation Activity

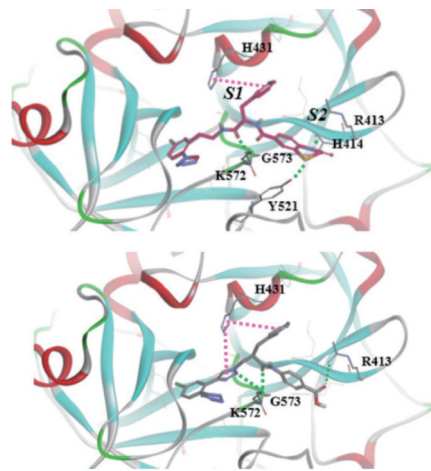
Synthesis of the derivatives was accomplished by substitution at the N-1 position of indole-3-carboxaldehyde and reacting the resulting intermediates with either phenylhydrazine or benzoylhydrazide. The structure of the synthesized compounds was confirmed by different spectral methods such as mass spectrometry, ¹H-NMR, and IR spectroscopy. The derivatives were tested for their ability to inhibit human platelet aggregation, where arachidonic acid (AA), adenosine diphosphate ADP, and collagen were used as aggregation inducers. The presence of arylhydrazine moiety is vital for antiplatelet activity of the studied hydrazones. The results obtained in this study showed that substitution at indole nitrogen decreased the antiplatelet activity, the extent of which depended on the size of the substituent. Among the alkyl/benzyl substituents examined, short alkyls were best tolerated on the indole ring. Therefore, keeping the indole nitrogen intact or substituted by a maximum of two carbon units is an important criterion that we consider in the future studies on antiplatelet hydrazones containing the indole ring as a part of the pharmacophore.



충남대학교 강남숙 교수팀에서 신규 혈액응고인자Xia(FXla) 억제제를 개발했습니다. 혈액응고인자 Xia (FXla)는 혈액응고 메커니즘의 내인성 경로의 초기단계에서 활성화되는 효소입니다. 본 연구에서는 구조 기반 분자 모델링을 기반으로 새로운 FXla 억제제를 개발했습니다. 구조 기반 분자 모델링 이후 molecular docking을 통하여 혈액응고인자와 억제제와의 결합 부위를 예측했습니다. 혈전성 장애는 선진국에서의 주요한 사망원인으로 심부정맥 혈전증, 급성 심근경색, 폐색전증, 허혈성 뇌졸중을 모두 혈전성 장애로 분류됩니다. 해당 연구는 중증 혈전증의 치료 후보물질 개발 연구입니다. [2016년 7월호, DOI: 10.1002/bkcs.10831]

The Discovery of New Human Coagulation Factor Xla (FXla) Inhibitors by Synthesis, Biological Evaluation, and Structure-based Modeling

Factor Xla (FXla) is an enzyme that is activated during the earliest stage of initiation of the intrinsic pathway of the blood coagulation mechanism. In this study, we attempted to discover a new FXla inhibitor based on structure-based molecular modeling. For compound **16**, the triazole ring replacing the ethylamide linker forms a hydrogen bond with Gly573 and undergoes cation- π interactions with His431. The benzyl group of the S1 site forms stacking interactions with His431, while the carboxylic benzyl group of the S2 site forms a hydrogen bond with Arg413. On the other hand, the isoxazole that replaced the ethylamide linker does not form many hydrogen bond interactions compared with that of the triazole. For compound **26** (not shown here), the ethylphenyl group in S1 seems to be too long to form a cation- π interaction with His431. We found that compound **16** exhibits satisfactory predicted properties while maintaining important binding interactions with FXla.



「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

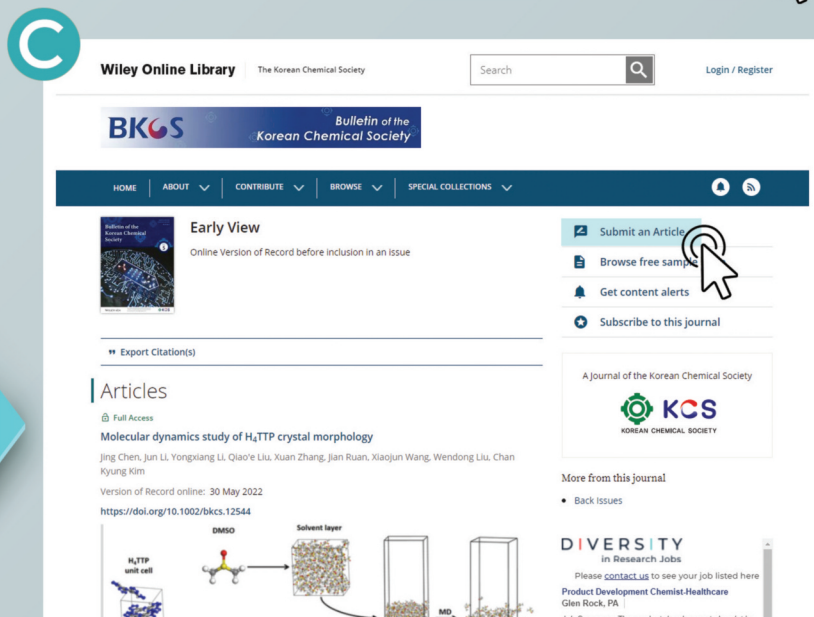
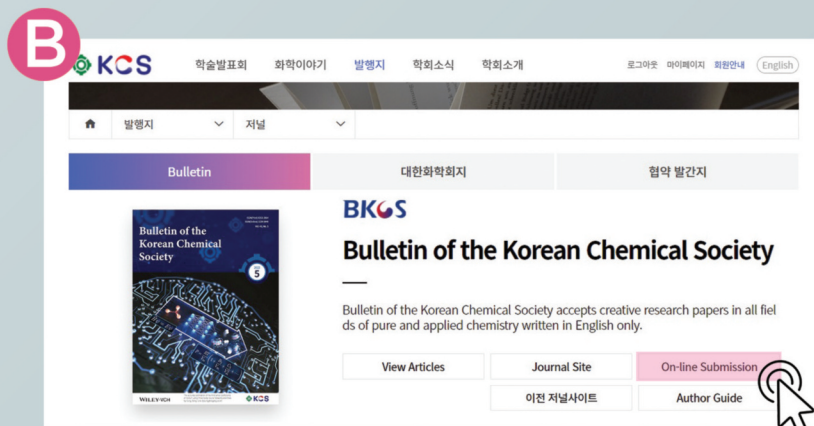
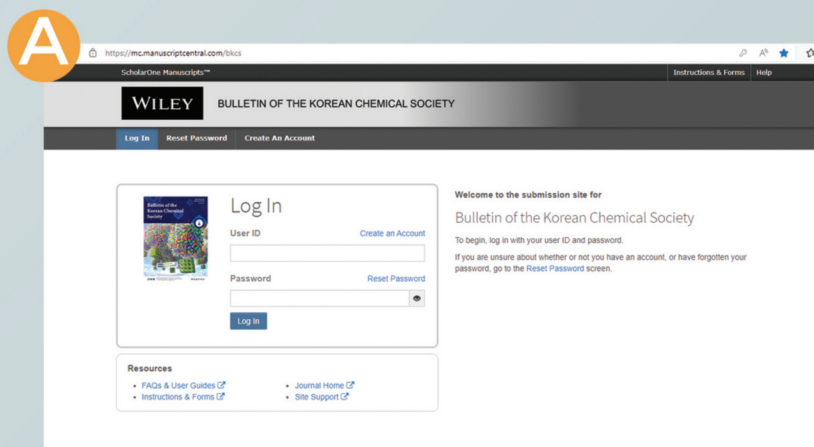
2. 계정 개설 후 로그인

- 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

화학세계가 만난 화학자 19

“화학의 본질을 위해
순수하게 연구하라”



〈화학세계가 만난 화학자〉에서는 대한민국 화학계에 공헌한 화학자와의 인터뷰를 소개해 드리고 있습니다.

이번 호에는 제131회 대한화학회 학술발표회에서 전민제 화학인상을 수상하신 윤경병 교수님(서강대학교 화학과)을 모셨습니다. 교수님께서 인공광합성을 이용한 액체연료 생산, 제올라이트 결정을 이용한 마이크로 결정의 자기조립 현상 및 제올라이트를 이용한 첨단 소재 개발 및 비선형광학물질 개발에 관한 연구를 수행하셨습니다.

윤경병 교수님의 연구 및 그 외 다양한 면모를 소개합니다.

[모더레이터: 한순규 교수 (KAIST 화학과)]

1. 교수님께서 중고등학교 학창시절부터 화학에 관심이 많으셨나요? 교수님께서 화학을 전공하시게 된 특별한 계기가 있었나요?

중학교 1학년 때 “물상”이라는 과목을 처음 배우기 시작했습니다. 물상에선 물리 화학 생물 지학을 종합적으로 가르칩니다. 그때 화학분야에서 소개된 여러 가지 화학물질들이 원소기호로 표현되어 나타났는데 난수표 같은 느낌을 받았지만 어찌하다가 보니 그들의 조성과 전하가 주기율표의 규칙성과 관련 있다는 사실을 터득하였습니다. 그때부터 화학에 대한 이해가 빨라졌고 흥미가 더 생겼습니다. 고등학교에 진학하여 매우 훌륭한 전경갑 화학 선생님을 만나게 되는 행운을 얻었습니다. 그 선생님으로부터 화학을 좀 더 체계적으로 좀 더 많은 것을 배운

후 화학에 대한 이해가 더 넓어졌습니다. 그래서 고등학교 재학 시절부터 대학에 입학하면 화학을 깊이 공부해야겠다는 생각을 굳혔습니다.

또한, 제가 아주 어린 시절에 선친께서 비누제조 및 화장품 제조사업을 하셨던 적이 있었습니다. 그래서 어려서부터 글리세린 등 몇 가지 화장품 원료와 소기름, 가성소다, 굳지 않은 비누 등을 자주 보고 만졌던 생각이 납니다. 제 몸속에는 이미 화학에 대한 관심이 많은 DNA가 있는 듯하며, 그것도 제가 화학자의 길로 가는데 한몫을 한 것 같습니다.

2. 교수님께서 서울대학교 화학과(현재는 화학부)에서 학사학위를, KAIST 화학과에서 석사학위를, 그리고 University of Houston에서 박사학위를 받으셨습니다. 그 과정에서 다양한 스승에게서 사사하셨는데 특별히 기억나는 분이 계신가요? 그 분(들)은 현재의 교수님을 있게 한데 어떠한 영향을 끼쳤나요?

학부시절 생화학을 전공하시는 박인원 교수님으로부터 학부 논문 지도를 받아서 t-RNA에 관한 공부를 한 적 있습니다. 그러나 제도가 만든 형식적이고 단기적인 지도교수와 지도학생 간의 관계였음이 아쉽습니다. 박인원 교수님은 인품이 매우 훌륭하신 분이셨는데 그분의 인성과 학문에 관한 많은 것을 배우지 못해 매우 아쉽습니다.

KAIST에서는 전학제 교수님으로부터 “제올라이트”라는 다공성 물질에 대해서 처음 배웠습니다. 당시 제올라이트는 석유화학 산업에서 원유를 크래킹시켜서 다양한 석유화학 제품을 만들 때 사용하는 촉매로서 학계와 석유 산업계에서 많은 관심을 받고 있었습니다. 따라서 전학제 교수님을 통해서 다공성 물질, 촉매, 석유화학 산업에 대해서 눈을 뜨게 되었습니다. 더 나아가 전학제 교수님께서 저를 교수님의 큰 형님이신 전민제 사장님께 소개해 주셨습니다. 그리하여 석사과정을 마친 후 전민제 사장님께서 설립하시고 운영하신 전엔지니어링 회사에서 직원 겸 연구원으로 근무하게 되었습니다. 직원이라기보다는 월급 받으며 공부를 더하는 학생이었다고 생각합니다. 결국 전학제 교수님과 인연으로 제가 전민제 사장님과 인연도 시작되었습니다. 전민제 사장님을 통해서 화학공정, 기초설계, 상세설계 이런 개념들과 실제 화학산업에서 이러한 것들의 역할, 지식과 기술의 산업화, 사업의 지속가능성(sustainability)의 중요성 등을 많은 것을 배웠습니다. 그런 면에서 저는 큰 행운이라고 생각합니다. 이처럼 매우 훌륭하신 두 분 형제 선각자들로부터 너무 중요하고 많은 것들을 배웠기 때문입니다. 이 두 분한테 배운 것들이 제가 대학교수로서 연구함에 있어서 연구분야와 연구내용을 결정할 때 큰 방향이 되어 주었고 갈피를 못 잡을 때 밝은 등대가 되어주었습니다.

지금 와서 생각해 보니 KAIST 대학원생 시절 지도 교수님과도 많은 대화를 하지 못한 점이 못내 아쉽습니다. 2년이라는 제한된 기간에 마쳐야 하는 석사과정이라서 아무래도 지도교수님과 많은 대화와 연구에 대한 토의시간을 갖기엔 물리적으로 불가능했습니다. 특히 당시 전학제 교수님께서 KAIST 부원장직도 역임하셔서 실험실에 오실 시간이 많지 않으셨습니다. 대신에 매우 훌륭하신 실험실 선배님들로부터 아주 많은 것들을 배웠습니다. 이를테면 KIST에 오래 계셨던 어용선 박사님, 전남대 화학과 한중수 교수님, 전남대 화공과 서곤 교수님, 화학연구원과 인하대학에 계셨던 박상언 교수님, 서울대 오승모 교수님, 명지대 윤천호 교수님, 전북대 안병준 교수님, 제일모직에 근무하셨던 장두원 박사님 등 후일 각계에서 많은 업적을 남기신 매우 훌륭하신 선배님들이 계셨습니다. 전학제 교수님 덕분에 이렇게 기라성 같이 훌륭하신 선배님들과 실험실 선배배로서의 연을 맺을 수 있었습니다. 그리고 KIST에서 많은 활약을 하다가 한양대학교 화학과 교수로 자리를 옮긴 한성환 교수가 제 대학동기이자 KAIST 실험실 동기인데 매우 뛰어난 화학자이자 예술가이며 세상을 넓게 그리고 아주 멀리 보는 안목과 혜안을 가지고 있었습니다. 동기이지만 매우 존경스러운 한성환 교수로부터도 아주 많은 것들을 배울 수 있었습니다. 이 모두가 전학제 교수님 덕입니다. 그래서 저는 전학제 교수님께 늘 감사하고 있습니다.

제가 근무하던 시절 전엔지니어링이 재정적으로 많은 어려움을 겪었습니다. 함께 근무하던 KAIST 출신 사원들 여러 명이 길 건너 석유공사(유공, 지금의 SK 이노베이션)로 이전했습니다. 전엔지니어링에선 급여가 3개월씩 밀리던 시절 유공에서는 제 또래 친구들이 전엔지니어링에서 받던 급여의 3배 넘게 받았습니니다. 보너스도 많았습니다. 그때 저도 그리로 옮겨간 동기들로부터 그리로 회사를 옮기라는 유혹을 받았으나 거절했습니다. 위에서 말씀드린 전학제 교수님과 전민제 사장님과의 소중한 인연과 가르침에 대한 고마움이 급여액 상승보다 더 크다는 사실을 깊게 인지하였기 때문입니다. 지금 생각해 봐도 그때 신의를 저버리지 않았던 점 기쁘게 생각합니다.

전엔지니어링에 3년쯤 다녔을 회사는 대우그룹 산하로 넘어갔습니다. 그 무렵 KAIST 실험실 대선배님이신 어용선 박사님의 소개로 델라웨어 월딩턴 소재 듀퐁종합연구소에서 컨설팅을 하시던 인디애나 대학의 저명한 교수님이신 Jay K Kochi 교수님을 알게 되었습니다. Kochi 교수님은 organic free radical의 세계적인 권위자 션으며 균일촉매를 사용한 올레핀의 에폭시화 반응의 리더이셨습니다. 여러 번 서신을 주고받고 나서 Kochi 교수님 문하생이 되기로 하였습니다. 그새 Kochi 교수님께서 텍사스 소재 휴스턴 대학으로 연구실을 이전하신다고 하여 그리로 따라가기로 하였습니다. 그래서 휴스턴대학에 원서를 제출하여 그리로 직접 입학했습니다.

휴스턴 대에서 처음 뵈 날 Kochi 교수님께서 제게 말씀하셨습니다. 나를 지도교수로 정해주어서 고맙다. 그렇다고 내가 너의 박사학위를 꼭 주겠다는 것은 아니다. 박사학위를 받는 것은 너의 몫이다. 지금부터 딜(deal)을 하자. 그 말씀에 “미국교수들은 원래 이런가?” 하며 문화가 매우 다름에 흠칫했습니다. Kochi 교수님께서 제안하신 딜이란 이거였습니다. “지금부터 실험실에 들어가서 네가 알아서 연구주제를 고르고 실험을 해서 그 결과를 저명 학술지에 논문도 써서 외부로부터도 검증을 받아라. 내가 연구주제를 주는 일은 결코 없다. 그러나 누가 먹다 흘린 빵부스러기를 연구 주제로 삼으면 안 되고 “me too”여도 안 된다. 내가 연구주제를 주지는 않지만 네가 빵부스러기를 줍는지 “me too” 연구를 하는지는 내가 쉽게 안다. 그런 것들은 못하게 할 것이다. 그리고 무엇보다도 그 연구는 너를 즐겁게 해주고 네가 연구를 배우고 자연을 배우게 한 독창적인 연구 그 자체라야지 나를 비롯한 다른 사람에게 보여주기 위한 것이거나 자랑하려고 하는 연구이면 안 된다. 지금부터 5년의 기한을 줄 테니 알아서 연구해라. 5년 후 내가 너와 일상생활에 관한 평범한 대화를 할 것이다. 그 대화는 주로 사람이 살아가면서 늘 마주치는 일반적인 주제에 대한 대화가 될 것이다. 이때 그 대화를 통해서 내가 판단하기에 네가 화학자가 되었음을 느끼게 되면 너보고 졸업하라고 할 것이고 아니면 학위 없이 그냥 여기를 떠나라.

사실 매우 쉬워보였기도 하지만 사실 매우 어려운 딜이었습니다. 그때 비로소 화학에 대해, 독창성에 대해 진지하게 생각해보기 시작했습니다. 사실 KAIST에서 일종의 흡가루인 제올라이트를 고체촉매로 사용하고 가스 상태의 반응물을 고온의 고체상 촉매에 주입하고 얻어지는 생성물들을 온라인 가스크로마토그래프로 정량분석을 해본 연구가 전부였던 제게 모든 실험을 유기용매에서 하던 Kochi 교수님 실험실의 연구내용이 너무 생소하고 아는 게 별로 없었습니다. 많은 시행착오 끝에 시간은 계속 흘러갔고 드디어 5년이 지나고 그날이 왔습니다. 사람은 무엇인가? 자연은 무엇인가? 남자와 여자가 결혼해서 자식을 낳고 살아간다는 게 무슨 의미인가?. 그게 자연인가? 정치란 무엇인가? 법은 무엇인가? 경제는 무엇인가? 돈은 꼭 벌어야 하나? 돈은 어떻게 써야 하나? 과학이 왜 필요한가? 앞으로 세상은 어떻게 변화할 것인가? 가치관이란 무엇인가? 한국은 어떤 나라인가? 한국 사람들은 어떤 문화를 가졌는가? 왜 사는가? 사람이 죽으면 어떻게 되는가? 사람의 삶과 죽음을 간단한 화학으로 설명할 수 있는가? 이런 수없이 많은 질문에 대해 나름대로 제 생각을 말씀드렸습니다. 이런 거시적인 질문 속에서 어떻게 제가 분자를 다루는 화학자 수준에 와 있다고 판단하셨는지는 모르겠으나 하여튼 5년의 박사과정을 마칠 수 있었고, 바로 postdoc 경험도 쌓지 못하고 서강대학교 화학과에 교수직을 얻어서 귀국하였습니다. 비로소 제 나름대로 연구를 시작할 수 있게 되었습니다. 지금 생각하면 Kochi 교수님을 통해 진정한 하드 코어 화학을 배웠고 그게 제가 그간 교수로서 연구자로서 살아오게 하는데 엄청나게 큰 기여를 하였습니다. 화학과 인생에 대

하여 많은 것을 터득하게 해 주신 Kochi 교수님께 깊이 감사드립니다. 이렇게 훌륭하신 멘토이신 Kochi 교수님과 의 인연을 맺게 해주신 어용선 박사님께도 깊이 감사드립니다.

3. 교수님 연구의 대표 키워드를 뽑으라 한다면 “제올라이트”와 “인공광합성”이 아닐까 싶습니다. 화학과 학부생 정도가 이해할 수 있을 정도로 교수님의 주된 연구관심사를 간략히 설명해주실 수 있을까요?

제올라이트는 미세한 공간 또는 미세한 기공이 많은 물질 중의 하나로서 천연 물질 중의 하나입니다. 요즘 반도체 산업에서는 2-3 나노미터 크기의 선풍으로 소자들을 연결하는 기술이 최첨단으로 떠오르고 있습니다. 그런데 제올라이트는 2-3 나노미터 보다 더 작은 0.3에서 1 나노미터 크기의 비워진 기공을 가진 물질들입니다. 이 작은 기공 안에서 물질들을 직접 합성하면 합성된 물질이 1 나노미터보다 작아지게 됩니다. 외부에 존재하는 작은 물질을 밀어 넣어 채워줄 수도 있는데 이 경우에도 채워지는 물질의 크기가 1나노미터 이하야 합니다.

공간이 “비어 있음”과 “채워져 있음”은 서로 반대 개념이지만 사실 둘 다 똑같이 중요합니다. 비어 있어야 채울 수 있고 채워져 있어야 비울 수 있기 때문입니다. 단지 수학에서 보는 것처럼 부호가 반대라고 생각하면 됩니다. 이를테면 수학에서 +1과 -1은 방향만 다를 뿐 똑같이 중요한 수입니다. 그러므로 우리가 어떤 물질에 규칙적으로 -1에서 -0.3을 채우는 것은 이 물질에서 +1에서 +0.3 만큼씩 깎아 내거나 비워내는 것입니다. 깎아낸 물질 대신에 다른 물질을 그 비움 속에 규칙적으로 채워넣기도 쉽지 않습니다. 그런 면에서 -1에서 -0.3나노미터 만큼씩 비움을 가진 물질을 만들고 다시 +1에서 +0.3 나노미터 크기의 다른 물질들 더해 가는 것은 매우 흥미로운 화학의 한 연구분야이며 산업계에서 매우 유용하게 사용되는 화학입니다.

인공광합성은 인공적인 분자, 소재, 디바이스, 반응기 등을 도구로 사용하여 태양에너지와 물 그리고 이산화탄소를 반응시켜 화석연료를 대체할 수 있는 연료물질을 생산해 내는 것입니다. 이 반응이 성공하려면 무엇보다도 경제성이 있어야 합니다. 즉, 이 반응을 통해 생산한 연료가 화석연료보다 저렴해야 합니다. 그러나 인공광합성은 단위면적 이를테면 1 m² 면적 안에 그리고 일정시간(예를 들면 1초) 안에 태양에서 오는 광자(photon)의 수가 매우 적기 때문에 많은 면적을 사용해야만 비로소 적당한 양의 연료를 만들 수 있습니다. 그러나 설치비와 유지 관리비가 너무 많이 들고 그리고 부지 비용이 너무 비싸서 경제성을 맞추기란 불가능합니다. 그래서 학문적인 호기심에선 수행할 수 있으나 당장 급한 기후위기 문제를 해결하기엔 적당하지 않은 연구분야입니다.

4. 교수님께서서는 수많은 논문을 출판하셨습니다. 그중에서도 가장 기억에 남는 논문이 어떤 것인가요? 가장 기억에 남는 이유가 무엇인가요?

저는 한 주제에 안주하지 않고 여러 분야를 돌아다니며 연구한 사람에 속합니다. 광화학, 새로운 제올라이트 합성, 마이크로 결정들의 자기조립, 전기화학적 이산화탄소 환원, 알칼리인 수전해, 자체 합성한 고체 포집체를 이용한 이산화탄소 포집, 수용액 상에서 유기염기를 이용한 이산화탄소 포집, 고체흡착제를 이용한 이산화탄소 포집, 이산화탄소 수소화 반응을 위한 고체촉매 개발, 인공광합성 파일럿 플랜트 제작, Ru-계 분자촉매를 이용한 물분해, 태양광과 태양열을 함께 이용하는 물분해, 태양열만을 이용한 이산화탄소 환원, 염료감응 태양전지, 태양광을 이용한 물전기분해, *o*-, *p*-xylene 혼합물 분리막 개발, 2차 및 3차 비선형 물질 개발 등 다양한 분야에서 연구를 했습니다. 일종의 방랑자 같은 생활을 하며 다양한 분야에서 연구하였습니다. 지금 와서 생각하면 한 가지에 집중하지 못했음에 아쉬움이 남습니다.

그렇게 여러 분야에 대해서 연구를 했어도 가장 기억에 남고, 결과에 대해서 가장 흡족스럽게 생각하는 연구는

다양한 금속산화물의 표면산도(surface acidity)를 측정하여 금속산화물들의 표면산도를 정량적으로 서로 비교할 수 있게 산성도를 부여한 연구였습니다("Acidity Scale for Metal Oxides and Sanderson's Electronegativities of Lanthanide Elements." *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, 47, 10128–10132). 이 연구는 제가 Kochi 교수님 문하생이던 시절에 많이 이해하게 된 상대적으로 전자가 풍부한 물질(electron donor 또는 전자 주게)과 상대적으로 전자가 결핍된 물질(electron acceptor, 또는 전자 받게) 간의 전하이동 착물(charge-transfer complex) 형성 현상을 확장한 연구를 통해 얻어진 결과입니다. 이 연구에서 알리자린(alizarin)이란 분자를 프로브(probe) 전자 받게로 사용하고 여러 가지 다양한 금속산화물을 전자 주게로 보아 금속산화물 표면에서 금속산화물과 흡착된 알리자린 간에 형성되는 전하이동 밴드를 분석하여 금속산화물들의 상대적인 전자 주게 능력을 일렬로 세워서 비교한 연구입니다. 사실 우리 주위에 수없이 많은 다양한 금속산화물들이 존재하며 이들은 다양한 화학반응과 다양한 장치의 소재로 사용하였지만 정작 이들의 상대적인 표면산도를 정량적으로 알 수 있는 방법들이 존재하지 않았습니다. 이를테면 어떤 금속산화물의 전자 주게 성질이 크면 이 금속산화물은 염기성 금속산화물이 되고 전자 주게 성질이 약하면 산성산화물이 되는 것입니다. 그러나 그들 간의 상대적인 산도 또는 염기도를 수치로서 서로 비교할 수 있는 방법이 없었습니다.

그러나 금속산화물-알리자린 실험을 통하여 저희는 금속산화물들의 표면산도를 이해하려면 금속산화물을 이온 결합 화합물로만 보면 안 되고 공유결합 화합물로만 봐서도 안 되며, 이온결합과 공유결합이 공동으로 존재하는 물질로 봐야 한다는 사실을 알게 되었습니다. 또한 금속산화물의 공유결합을 이해하려면 그 금속산화물을 구성하는 원소들의 샌더슨 전기음성도 스케일(Sanderson's electronegativity scale)이 매우 중요한 역할을 한다는 사실을 알게 되었습니다. 샌더슨 전기음성도 스케일은 폴링(Linus Pauling)의 전기음성도 스케일과 쌍벽을 이루는 매우 중요한 전기음성도 스케일입니다. 그러나 고체촉매 분야에선 촉매의 산성도를 이해하기 위해 샌더슨 전기음성도 스케일이 매우 활발하고 유용하게 활용되고 있습니다. 더군다나 샌더슨 스케일에선 동일한 원소라도 그 원소의 산화상태에 따라 전기음성도가 달라집니다. 그런 면에서 샌더슨의 전기음성도 스케일이 폴링 스케일보다 훨씬 더 실질적이고, 훨씬 더 유용하다고 말할 수 있습니다. 특히 샌더슨 스케일에선 공유결합을 하고 있는 인접한 두 이종 원자 사이에서 두 이종원자는 전기음성도가 서로 같아 질 때까지 한쪽 원자에서 다른 쪽 원자로 부분전하(partial charge)가 이동해 가는데, 이때 부분전하를 잃은 원자의 부분양전하(δ^+)와 부분전하를 받은 원자의 부분음전하(δ^-)의 전하 절대값이 같아질 때까지 부분전하가 흘러갑니다.

$$|\delta^+| = |\delta^-|$$

이러한 개념을 샌더슨의 전기음성도 균등화 원리(equalization principle)라고 합니다. 따라서 샌더슨의 전기음성도 스케일을 사용하면 공유결합을 한 인접한 두 원자 간의 부분전하를 계산할 수 있습니다. 나아가 물질 전체를 단순한 그들의 화학조성만을 통해서도 물질 전체의 전기음성도를 계산하고 정의할 수 있습니다. 물질 전체의 전기음성도가 그 물질의 상대적 전자 주게 또는 전자 받게 또는 상대적 산-염기 성질로 부여할 수 있습니다. 이러한 여러 가지 면에서 샌더슨의 전기음성도 스케일을 폴링 스케일보다 훨씬 더 유용합니다.

그런데 저희 연구실이 금속산화물과 알리자린 염료 간에 형성되는 전하이동착물의 전하이동 밴드 최대치(charge-transfer band maximum)가 금속산화물의 표면산도와 함수관계가 있음을 밝히고, 전하이동 밴드 최대치와 이온결합 성질과 공유결합 성질이 공존하는 물질이라는 사실을 밝혀내고 나서 역으로 다양한 금속산화물과 알리자린 간의 전하이동밴드 최대치를 이용하여 그 물질의 샌더슨 전기음성도를 부여할 수 있게 되었습니다. 이런 역과정을 활용하여 샌더슨이 살아생전 전기음성도를 부여할 수 없었던 여러 가지 금속의 전기음성도를 부여할 수 있었습니다. 특히 란탄족 계열의 원소는 다양한 촉매에 활용되는데 샌더슨은 란탄족 원소들의 전기음성도를 부여하지 못했는데 저희 연구실이 란탄족 원소들에 대해 신뢰성 있는 샌더슨 전기음성도를 부여할 수 있었습니다. 또한

샌더슨 전기음성도 스케일과 폴링 전기음성도 스케일 간에 1:1 직선관계가 있음을 알게 되었습니다. 그 직선관계를 통하여 폴링스케일을 부여할 수 없었던 원자들에게 폴링 전기음성도를 부여할 수 있었고, 실험적으로 구하지 못한 여러 가지 원소들의 수화열, 이온반경 등도 부여할 수 있었습니다. 이 연구결과는 금속산화물들의 표면산도를 최초로 정량적으로 부여하여 이들을 다양한 디바이스나 반응에 사용할 때 하나의 가이드라인이 되도록 해 주었으며, 샌더슨의 전기음성도 스케일을 란탄족 원소를 비롯한 다양한 금속 원소에 부여할 수 있게 해 주었으며, 금속산화물 내의 금속과 산소 원자 간의 결합엔 이온성 결합 성질과 공유결합 성질이 공존한다는 사실을 밝혀주었습니다.

이 연구는 현재 DGIST 소속 정낙천 교수가 당시 박사과정 학생으로서 도맡아 수행하였습니다. 정낙천 교수가 아니었으면 이렇게 역사적인 결과를 얻지 못했을 것이라 생각합니다. 정낙천 교수는 학생 시절부터 매우 훌륭한 화학자의 소양을 보였으며 앞으로도 활동에 대해 큰 기대가 됩니다.

5. 교수님께서 1998년부터는 창의연구사업을 통해 제올라이트 초결정 연구단을 이끄셨고, 2009년부터는 한국인공광합성연구센터의 센터장으로 큰 연구사업을 이끄셨습니다. 이들 연구사업을 이끄시면서 어려움은 없으셨는지, 또 그 어려움을 어떻게 극복하셨는지 궁금합니다.

창의과제에 대한 주제는 마이크로 결정을 정렬시키고 조직화시키는 연구였습니다. 화학은 원자들을 정렬시키고 조직화시켜서 분자를 생성하는 게 분류입니다. 여기서 원자는 분자의 빌딩블록이 됩니다. 그러나 화학이 발전하게 되면 결국엔 마이크로 입자를 원자처럼 정렬하는 방법론이 필요할 것이란 생각이 들었습니다. 즉, 마이크로 입자들을 빌딩블록으로 보는 화학입니다. 이런 목적으로 제올라이트 마이크로 결정들을 빌딩블록으로 사용하여 이들을 정렬시키고 조직화시키는 연구를 했습니다. 워낙 시대를 앞서가던 연구인이라 당시 응용성을 몰랐는데 최근에 디스플레이 분야에서 저희가 개발한 방법론이 그 분야가 애타게 찾고 있던 방법이라는 소식을 들었습니다. 지금이라도 이 연구결과가 산업계에서 활발히 사용될 수 있으면 좋겠습니다.

인공광합성연구는 10년간 수행하였으며 여러 교수진이 참여하였습니다. 그러나 이 프로젝트는 매우 어려운 주제를 연구하는 프로젝트이었습니다. 결론적으로 많은 실패를 했고 대신에 많은 것을 배웠습니다. 왜 실패를 했는지 알게 되었습니다. 이제 다시 연구한다면 훨씬 더 당장 실용화가 가능한 연구를 할 수 있을 것이란 확신이 듭니다. 당시엔 태양빛이 갖는 한계와 복잡한 광반응 메커니즘을 충분히 이해하지 못하고 상업화가 전혀 불가능한 분야를 연구하느라 많은 시간을 소비했습니다. 이를테면 태양빛을 조사하고 전기에너지를 가해주며 물을 환원한 다든지, CO₂를 환원하는 광전기수소생산(photoelectrochemical H₂ production), 광전기이산화탄소환원(photo-electrochemical CO₂ reduction), 또는 전기화학적 CO₂ 환원분야는 절대로 상업화가 불가능한 분야입니다. 이런 사실을 모른 채 이런 분야까지 들어가서 많은 시간을 소비했습니다. 이들을 단순히 학문적 목적으로 하는 것은 괜찮다고 생각합니다. 그러나 요즘처럼 화석연료 과다사용에서 야기된 기후변화가 이제 기후위기로 치달는 상황에서 우리가 제한된 연구비를 사용하여 상업화가 아예 불가능한 연구분야를 인공광합성이나 기후변화대응 연구이니 위장하며 정부로부터 연구비를 타내고, 연구비를 사용한다면 과학자들이 정치가들과 국민에게 신뢰를 잃을 것입니다. 과학자들이 신뢰를 잃는 것도 큰 문제지만 국민의 세금을 사용하여 나라에 실질적으로 도움을 주지 못한다는 것도 큰 문제입니다. 만약 위와 같은 연구들을 기후변화대응 연구라고 하며 연구하는 사람들이 있다면 당장 멈추고 신중하게 다른 분야를 찾을 것을 권합니다.

6. 교수님께서 KAIST 화학과에 2023년 3월 29일 김용해 렉처십의 연사로 세미나 발표를 하셨습니다. 세미나에서 교수님은 인류가 직면한 기후변화 문제의 심각성에 대해서 말씀해주셨습니다. 한편으로는 현재 이루어지고 있는 다방면의 관련 연구가 인류가 직면한 에너지 문제의 근본적인 해결책이 되기에 미흡한 부분이 있다고도 말씀하셨습니다. 이 부분에 대해서 이야기해 해주실 수 있을까요? 또 그렇다면 인류가 직면한 기후 변화 및 에너지 문제의 근본적인 해법은 무엇인지 알려주실 수 있을까요?

현재 에너지원은 9가지가 있습니다. 1) 화석연료, 2) 바이오매스, 3) 핵분열 에너지, 4) 태양광, 5) 풍력, 6) 수력, 7) 지열, 8) 조력, 9) 핵융합 에너지입니다. 이 모두 문제가 있습니다. 이를테면 화석연료나 바이오매스는 온실가스를 발생하므로 문제입니다. 현재 태양광 발전과 풍력발전으로 얻는 에너지 총량은 사용되는 모든 에너지 중에 1% 밖에 안 됩니다. 이게 2%로 증가하기는 쉽지 않습니다. 더군다나 태양광 패널과 풍력발전 설비는 제작 시 막대한 양의 이산화탄소를 발생하므로 20년 이상 사용하지 않으면 온실가스 배출량을 줄이는데 기여하지 않습니다. 수력, 지력, 조력 발전은 미미한 양의 전기를 발생합니다. 핵융합은 적어도 70년이 지나야 상업용 발전이 가능할 것으로 예상되고 있습니다. 그렇다면 현재 우리 인류가 환경과 지구온난화에 해를 끼치지 않고 당장 사용할 수 있는 에너지원은 없습니다. 그러므로 근본적인 해결책을 찾아야 합니다. 즉, 친환경적이고 저렴한 무공무진한 에너지원을 찾아야 합니다. 이것은 지구에서 인간을 비롯한 다양한 생명체들의 지속가능성을 높여주기 위해 반드시 해야 할 일입니다.

7. 교수님께서 많은 후학을 배출하셨고 그들은 지금 산업계, 학계 등 다양한 분야에서 활약 중입니다. 훌륭한 많은 제자가 있지만 특별히 기억나는 제자가 있으신가요?

앞의 질문에서도 소개한 DGIST의 정낙천 교수와 한양대 이진석 교수, 부경대 김현성 교수가 늘 믿음직스럽습니다. 위 세 명의 제자들을 통해서 많은 연구를 재미있게 수행하였습니다. 다들 과학자적인 훌륭한 자질을 가지고 있으며 무엇이든지 맡겨 놓으면 반드시 해내는 훌륭한 연구자로서의 소질을 가지고 있습니다. 이 세 명의 제자들이 화학계에 큰 족적을 남겨주기를 늘 기대하고 바라고 있습니다.

8. 교수님은 학문적 Mentor의 가장 중요한 덕목/자질이 무엇이라고 생각하시나요?

학문적 멘토는 그 스스로가 최우선적으로 학문의 본질을 잘 이해하여야 한다고 생각합니다. 자신이 잘 알지도 못하면서 남에게 가르쳐 줄 수는 없기 때문입니다. 학문의 높고 깊고 넓은 본질을 잘 이해하게 되면 다른 여러 분야에서도 많은 이해를 가질 수 있습니다.

9. 지금 이 시간에도 화학연구를 열심히 해나가는 신진/중견 화학 연구자에게 조언을 부탁드립니다.

요즘 우리나라의 신진/중견 화학자들의 연구는 화학 그 자체로 보면 매우 우수합니다. 오히려 제가 이분들로부터 배울 게 많습니다. 그럼에도 불구하고 한 말씀을 드리자면 “화학을 하되 순수하게 하라.”입니다. 제사를 모시면 제사 그 자체의 본질을 위해서 제사를 모셔야지 잣밥을 위해서 제사를 모시는 것이 아니라는 점을 상기시켜 드립니다. 잣밥을 위해 제사 지내는 타입의 화학자들은 아무리 좋은 음식들을 또는 연구결과물들을 전리품처럼 제사상에 차려놓아도 사람들에게 감동을 주지 않습니다. 후학들에게도 세속에 찌든 타락한 모습을 보이는 것은 옳지 않습니다. 연구 그 자체의 순수한 본질을 잊지 말아 주시기를 당부드립니다.



김종구 Jong Goo Kim

DGIST 화학물리학과, 조교수

jgkim7@dgist.ac.kr

https://rmsd.dgist.ac.kr

소개글

김종구 교수는 용액상의 작은 분자 및 단백질의 반응 메커니즘 연구를 수행해왔다. 시간분해 X-선 산란 실험을 통해 시간에 따른 분자의 구조 변화를 관측함으로써 반응의 키네틱스, 반응중간체의 삼차원 구조와 같은 반응동역학적 정보를 밝히는 연구를 진행하였다. 특히, X-선 자유전자 레이저를 활용하여 펨토초 영역의 파동다발의 움직임을 밝힘으로써 비평형적 전이 과정의 반응 경로를 시각화하는 연구, 용액상 단백질 반응중간체의 삼차, 사차구조 등의 구체적 구조 파라미터를 알아내는 연구 등을 수행하였다. 이와 같은 실험적, 분석적 기법을 기반으로 화학적, 생물학적 현상에 대한 이해를 증진시키고자 다양한 유기/무기 분자, 단백질의 반응을 연구하고 있다.

주요연구분야

- 물리화학(Physical Chemistry)
- 반응동역학(Reaction Dynamics)
- 단백질 구조동역학(Protein Structural Dynamics)

대표논문

1. **J. G. Kim**, S. Nozawa, H. Kim, E. H. Choi, T. Sato, T. W. Kim, K. H. Kim, H. Ki, J. Kim, M. Choi, Y. Lee, J. Heo, K. Y. Oang, K. Ichyanagi, R. Fukaya, J. H. Lee, J. Park, I. Eom, S. H. Chun, S. Kim, M. Kim, T. Katayama, T. Togashi, S. Owada, M. Yabashi, S. J. Lee, S. Lee, C. W. Ahn, D.-S. Ahn, J. Moon, S. Choi, J. Kim, T. Joo, J. Kim, S. Adachi, H. Ihee*, "Mapping the emergence of molecular vibrations mediating bond formation." *Nature* **2020**, *582*, 520-524.
2. K. H. Kim†, **J. G. Kim**†, S. Nozawa†, T. Sato†, K. Y. Oang, T. W. Kim, H. Ki, J. Jo, S. Park, C. Song, T. Sato, K. Ogawa, T. Togashi, K. Tono, M. Yabashi, T. Ishikawa, J. Kim, R. Ryoo, J. Kim, H. Ihee*, S.-i. Adachi*, "Direct observation of bond formation in solution with femtosecond X-ray scattering." *Nature* **2015**, *518*, 385-389.
3. **J. G. Kim**, E. H. Choi, Y. Lee, H. Ihee*, "Femtosecond X-ray Liquidography Visualizes Wavepacket Trajectories in Multidimensional Nuclear Coordinates for a Bimolecular Reaction." *Acc. Chem. Res.* **2021**, *54*, 1685-1698.
4. **J. G. Kim**†, T. W. Kim#, J. Kim, H. Ihee*, "Protein Structural Dynamics Revealed by Time-Resolved X-ray Solution Scattering." *Acc. Chem. Res.* **2015**, *48*(8), 2200-2208.
5. J. Heo†, **J. G. Kim**†, E. H. Choi, H. Ki, D.-S. Ahn, J. Kim, S. Lee, H. Ihee*, "Determining the charge distribution and the direction of bond cleavage with femtosecond anisotropic x-ray liquidography." *Nat. Commun.* **2022**, *13*, 522.
6. Y. Lee†, **J. G. Kim**†, S. J. Lee, S. Muniyappan, T. W. Kim, H. Ki, H. Kim, J. Jo, S. R. Yun, H. Lee, K. W. Lee, S. O. Kim, M. Cammarata, H. Ihee*, "Ultrafast coherent motion and helix rearrangement of homodimeric hemoglobin visualized with femtosecond X-ray solution." *Nat. Commun.* **2021**, *12*, 3677.
7. M. Choi†, **J. G. Kim**†, S. Muniyappan†, H. Kim, T. W. Kim, Y. Lee, S. J. Lee, S. O. Kim, H. Ihee*, "Effect of the abolition of intersubunit salt bridges on allosteric protein structural dynamics." *Chem. Sci.* **2021**, *12*, 8207-8217. (†: equal contribution)

- KAIST 화학과, 학사(2006.3-2010.2)
- KAIST 화학과, 박사 (2010.2-2016.8, 지도교수 : 이효철)
- 기초과학연구원(IBS), 선임연구원/연구위원 (2016.8-2023.5, 지도교수 : 이효철)
- DGIST 화학물리학과, 조교수(2023.6-현재)

우리 실험실은요!

우리 실험실은요!

양자 화학 시뮬레이션 연구실 (Quantum Chemical Simulation Lab)

글 | 한다빈(광주과학기술원, 화학과,
hdb47020652@gm.gist.ac.kr)

컴퓨터와 화학, 그리고 양자

저희 연구실은 2022년 GIST에서 연구실을 열어서 컴퓨터를 이용한 화학 연구를 진행하고 있습니다. 세부 연구 분야는 '인공지능 활용'과 '분자 동역학 방법 개발과 전산 모사', '양자 화학 계산'입니다. 인공지능 활용 부분에서 저희는 화학 분야에서 생성되는 실험 혹은 계산 데이터를 활용해서 사람이 찾기 어려운 숨겨진 규칙을 찾는 연구를 진행하고 있습니다. 화학 분야에서 고품질 데이터를 얻는 데 많은 노력이 필요하기 때문에 적은 수의 데이터에서 의미 있는 결과를 만들어내는 연구에 관심이 많습니다. 현재 구성원이 대부분 화학을 전공했기 때문에 화학 지식을 활용하는 방법 개발에 집중하고 있습니다. 두 번째 연구 주제인 분자 동역학 관련해서는 양자-고전 혼합 분자 동역학 방법을 개발하는 연구와 기존 양자 분자 동역학 방법을 응용하는 연구가 진행되고 있습니다. 양자-고전 혼합 분자 동역학은 고전역학과 양자역학을 모두 이용하는 흥미로운 방법인데, 현재 양자 시뮬레이터에서 활용 가능한 방법을 만드는 연구가 진행되고 있습니다. 저희 연구실 이름에 '양자'를 넣은 것은 향후 양자 화학과 양자 시뮬레이터라는 두 주제를 모두 고려했기 때문입니다. 저희 연구팀은 기존 분자 동역학 방법 또한 주어진 열역학 조건에서 시간에 따라 움직이는 분자 혹은 소재를 전산모사하는 데 이용하고 있습니다. 저희 연구

팀이 새로운 방법을 만들어서 실험 현상을 설명할 수 있을만한 크기를 가진 분자와 소재를 전산모사하기까지 많은 시간이 소요되었지만, 꾸준히 연구를 진행하고 있습니다. 마지막으로 양자 화학 계산 부분에서는 밀도 범함수 이론 등을 이용해 화학 현상을 설명하는 연구를 진행하고 있습니다. 실험 그룹과 협력 연구를 통해 폭넓게 화학을 이해할 수 있도록 도와주는 연구 주제입니다. 앞으로 학생들이 졸업해서 취업을 했을 때 계산 화학 지식을 바탕으로 여러 연구자들과 협력을 할 수 있도록 준비하고 있습니다.

저희 연구실은 현재 석사과정 학생 4명과 학부생 인턴 3명으로 구성되어 있습니다. 양자 시뮬레이터 활용, 촉매 소재 물성 계산 및 최적화, 기계학습 응용 신약 개발 등에 관심있는 학생들이 함께 생활하고 있습니다. 김현우 교수님의 지도하에 우수한 학생들이 모여 연구에 매진하고 있습니다. 매학기 새로운 수업을 개설하고 공부하는 지도교수님을 보며 저희 연구실 구성원들도 대학원에 진학해서 새롭게 접하는 분야에 도전하고 있습니다. 규모가 작은 신생 연구실이라는 점을 활용해서 지도교수님은 매주 개인 미팅으로 연구 진행 상황을 확인하고 있습니다. 학생들 모두 개인 관심사에 따라 두 가지 연구 주제를 선택할 수 있기 때문에 졸업 후 변화하는 연구 환경에서 장점을 살릴 수 있을 것으로 기대됩니다. 지도교수님이 쌓았던 연구 경험 중에서 학생들이 배우고 싶은 부분을

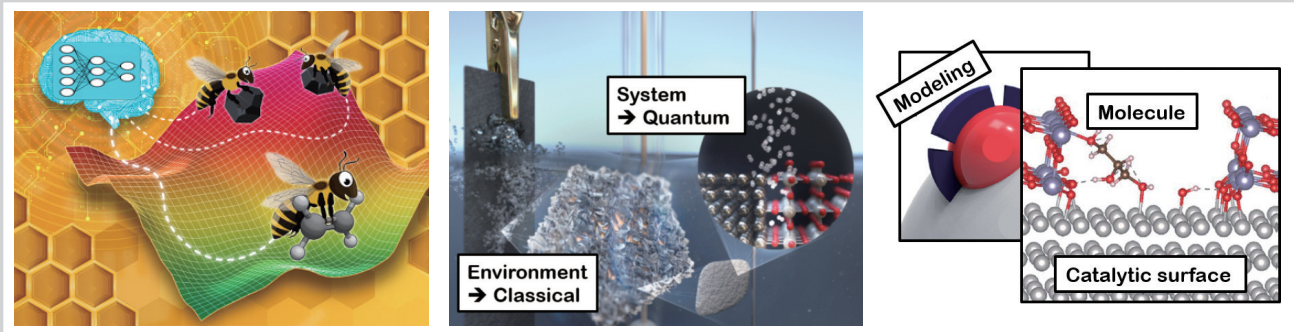


그림 1. 연구 분야 소개 (왼쪽부터 인공지능 활용, 분자동역학 전산모사, 양자화학 계산)



그림 2. 연구실 환경 (왼쪽부터 연구실, 휴게실, 서버실)

선택할 수 있다는 점이 이 연구실이 가진 매력이라 생각합니다. 매주 진행되는 그룹 미팅은 격주로 최신 연구 동향 파악을 위한 논문 읽기와 계산 화학 공부로 기초를 다지고 최신 연구를 배우는 시간입니다.

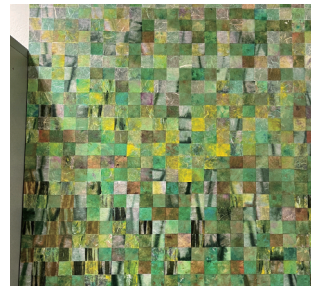
연구실 생활

저희 연구실이 자랑할 수 있는 부분은 소소한 행복이 있는 연구 환경이라 생각합니다. 저희 연구실 구성원은 책상과 의자, 개인 연구용 컴퓨터를 하나씩 이용하고 있습니다. 실험실보다는 사무실에 가까운 환경이 이룬 및 계산화학을 선택했을 때 장점 중에 하나라고 생각합니다. 연구실 중앙에는 대화가 가능한 테이블이 있고, 작은 세면대도 있습니다. 연구 공간 한 칸에는 회의실 겸 탕비실이 있습니다. 다과를 즐길 수 있게 과자와 차가 준비되어 있습니다. 한 칸에 거대한 화이트보드가 있어서 낙서를 할 수도 있고 아이디어를 적어가며 이야기할 수도 있습니다. 저희 연구실에는 작은 서버실이 있습니다. 큰 규모로 계산을 할 때는 외부 자원을 활용하는 것이 필요하겠지만, 저희 연구팀이 개발한 방법 검증과 다른 연구팀과 공동 연구를 저희 서버실에서 진행할 수 있습니다.

저희 연구실에서는 국내 기업이 만든 협업 도구를 이용해서 일상과 업무를 분리하려 노력합니다. 많은 사람들이 쓰는 모바일 메신저 앱은 일상에서만 이용하고, 업무는 주로 협업 도구를 이용해서 진행합니다. 개인 연구 진행 상황이나 앞으로 할 일을 지도교수님과 상의하며 연구실 생활을 하고 있습니다.

스스로 행복을 찾는 삶

교수님 오피스 한 칸에는 화학책들 외에도 식물들이 자라고 있습니다. 식물이 마음을 쉬게 해주는 효과가 있다고 합니다. 연구 과정에서 좌절하는 순간도 있고, 스스로 통제할 수 없는 문제에 휘말려서 정신



건강에 압박을 받는 시점이 있습니다. 이때 해결책으로 대학원 시절 교수님이 찾은 방법은 식물을 키우는 것이었다고 합니다. 삶이 힘들어서 찾아온 대학원생에게 식물 키우기 등 취미 생활에 대해 지도교수님이 조언해준 일도 있었습니다.

교수님 책장에는 초록 색상의 추상화가 자리잡고 있습니다. 추상화가 정물화보다 창의력을 기르는 데 도움이 된다고 하는데, 나중에 저희 연구실만 할 수 있는 연구 주제가 생긴다면 이 그림이 얼마나 유용했는지 알 수 있겠습니다.

저희 그룹은 단체 활동을 최소한으로 진행합니다. 지도교수님이 내향적인 성격을 가진 영향이 큼니다. 새로운 구성원이 와서 회식을 하더라도 가능한 점심 시간을 활용해서 저녁 이후에 개인 시간을 충분히 활용할 수 있는 환경을 만들고 있습니다. 연구실에 있는 시간만큼은 연구에 집중하기를 바라는 지도교수님 생각이 반영된 결과입니다. 학생들끼리도 서로 친목을 도모하는 시간을 마련하여 서로를 이해하며 연구실 생활을 하고 있습니다.

맺는 글

과연 5년 후에 저희 연구실 구성원은 어디에서 어떤 일을 하고 있을까요? 교수님도 본인이 앞으로 5년 뒤에 어떤 삶을 살고 있을지 모르겠다고 하십니다. 아마 다들 불확실한 미래에서 현재 최선으로 보이는 선택을 하며 앞으로 나아갈 것입니다. 저희 연구실에서 함께 보냈던 시간이 뒤돌아 봤을 때 그리운 시절이 될 수 있기를 바라며 이 글을 마칩니다.

화학사 돌아보기

Part.14

베르셀리우스의
시대최정모 | 부산대학교 화학과,
jeongmochoi@pusan.ac.kr

스웨덴의 화학자 옌스 야코브 베르셀리우스(Jons Jakob Berzelius, 1779-1848)는 19세기 전반 화학을 이해하는데 빼놓을 수 없는 사람입니다. 베르셀리우스는 데이비로 대표되는 전기화학과 돌턴으로 대표되는 원자설을 통합하여 화학을 이해하는 관점을 정립하였습니다. 그는 화학 결합을 설명하는 이원론을 창안하였고, 원자량 데이터를 정교하게 확립하였으며, 오늘날까지 사용되고 있는 화학 기호를 만들어 냈습니다. 게다가 베르셀리우스는 삶의 족적도 범상하지 않았습니다. 이번 글에서는 그의 삶을 소개하고, 그의 주요 업적을 살펴보도록 하겠습니다.¹

베르셀리우스의 어린 시절은 불우했습니다. 학교 교사였던 아버지는 그가 네 살일 때 사망했고, 어머니는 역시 짝을 잃은 홀아비였던 새아버지와 결혼합니다. 베르셀리우스가 여덟 살이 되자 어머니마저 세상을 떠났습니다. 새아버지는 점잖고 교양 있는 사람으로 그 이후에도 베르셀리우스를 맡아 키웠지만, 베르셀리우스가 열한 살이 되던 해 세 번째로

결혼하면서 가족이 너무 늘어 더이상 베르셀리우스를 감당할 수 없었습니다. 이후 베르셀리우스는 외삼촌 댁에 맡겨졌습니다. 외삼촌 내외가 베르셀리우스를 학대하지는 않았지만 그는 행복하지 않았고, 14세에 독립하여 가정교사 일을 하여 돈을 벌면서 중학교²를 다녔습니다. 1798년 그는 열아홉의 나이로 옹살라 대학교에 진학하여 의학을 공부하기 시작했고, 같은 시기에 영어, 프랑스어, 독일어를 독학하여 원어민 수준으로 구사할 수 있을 정도가 되었습니다. 이러한 언어 능력은 이후 베르셀리우스의 과학 활동에 큰 도움을 줍니다.

당시 의대 커리큘럼에서는 화학 실험을 수행하는 것이 포함되어 있었고, 베르셀리우스에게 주어진 첫 실험은 황산철의 연소 실험이었습니다. 1주일 동안 수행해야 하는 실험이었지만 그는 몇 시간 만에 실험을 끝냈고, 이 실험으로 화학에 큰 흥미를 느낀 그는 담당 조교의 호의를 얻어 실험실을 몰래 들락거리며 논문에서 읽은 실험을 수행하곤 했습니

1. 이 내용은 다음 글들에서 큰 도움을 받았습니다. Alan J. Rocke, "Atoms and Equivalents: the Early Development of the Chemical Atomic Theory," *Historical Studies in the Physical Sciences* 9: 225-263 (1978); Hans-Werner Schütt, "Chemical Atomism and Chemical Classification" in *The Cambridge History of Science, Volume 5: The Modern Physical and Mathematical Sciences*, ed. Mary Jo Nye (Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2002); Ferenc Szabadvary, *History of Analytical Chemistry*, trans. Gyula Svehla (Oxford, UK: Pergamon Press, 1960), Chapter VI.

2. 중학교라고 번역했지만 중·고등학교를 합친 중등교육 기관입니다.

다. 당시 옘살라 대학의 화학 석좌 교수는 요한 아프젤리우스(Jöhan Afzelius, 1753-1837)로, 베르셀리우스가 비밀리에 실험실을 이용한다는 사실을 알고 그걸 금지시키는 대신 공식적인 허가를 내주었고, 이후 베르셀리우스의 연구 결과를 논문으로 출판하는 데에도 적극적으로 지원해 주었습니다. 베르셀리우스의 첫 논문은 온천수의 분석 논문으로 1800년 출판됩니다.

베르셀리우스는 1802년 의학 박사 학위를 취득한 뒤, 스톡홀름의 군의관 학교 조교 자리를 얻습니다. 여기서 그는 자유롭게 화학 연구를 수행할 수 있었는데, 문제는 이 자리가 무급으로 일하는 자리였다는 점이지요. 그는 돈을 벌기 위해 광천수 생산 사업에 재산을 투자하였지만, 한 푼도 건지지 못했습니다. 이후 스스로 식초 공장을 세워서 사업을 시작했지만, 역시나 큰 빚만 남기고 실패하고 말죠. 베르셀리우스는 본인의 자서전에서 이 시기를 돌이키며 이런 말을 남겼습니다. “안타깝게도 [나는] 그 전까지 식초 공장을 본 적이 없었고, 더 나빴던 점은 내가 과학을 산업에 응용하는 데에는 재능이 없었다는 것이다. 이 무능력 때문에 나는 삶 전반에서 많은 돈을 잃었다. 우리 공장에서는 아세트산이 매우 느리게 생산되었고 그마저도 충분히 진하지 않았다.” 이후 거의 10년 동안 베르셀리우스는 수입이 생기는 족족 빚을 갚아야 했습니다.

이 시기에 베르셀리우스의 관심을 끌었던 것은 전기 현상이었습니다. 그는 볼타 전지를 여러 물질에 연결해 보기도 하고, 심지어 질병 치료에 활용할 수 있을지 연구해 보기도 했습니다. 그러한 연구의 결과, 1803년에는 염에 전기를 가하면 알칼리³와 산이 생성된다는 보고를 하기도 했습니다. 베르셀리우스는 의사로서의 전문성을 더하여 인체에서 유래된 물질과 체액을 화학적으로 분석해 보기도 했고, 광물을 분석하여 그때까지 알려지지 않은 새로운 물질(산화 세륨)을 찾아내기도 했습니다. 베르셀리우스는 즉시 산화 세륨의 발견을 논문으로 써서 접수했지만, 바로 직전에 다른 화학자가 동일한 물질을 발견하여 출판했다는 실망스러운

답변을 받았습니다.

1807년, 베르셀리우스는 스톡홀름 외과 대학의 의약학 교수로 임명되었습니다. 그는 1808년 『화학 교과서(Lärobok i Kemien)』를 출판하였고, 같은 해 스웨덴 과학원(Swedish Academy of Science)의 회원으로 선출됩니다. 점점 유명세를 탄 그는 1818년에는 귀족 작위를 받았고, 1820년에는 과학원 서기로 임명되죠. 이 시기, 즉 1807년부터 1820년까지가 베르셀리우스가 가장 왕성하게 연구 활동을 진행한 시기입니다.

베르셀리우스는 1809년 당시 유럽 화학계를 강타한 돌턴의 원자설에 대해 듣고 관심을 갖게 됩니다. 다만 돌턴의 책을 얻기 힘들었기 때문에 그는 우선 리히터가 했던 것처럼 알려진 무기 산화물, 산, 염에 대해 당량을 엄밀하게 계산하여 데이터로 만들었습니다. 이 데이터는 1810년부터 1812년 사이에 발표되었는데, 특히 1811년과 1812년에 출판된 논문에서 그는 화학적 친화력이 전기적 현상이라는 가설을 제시합니다. 서로 전기적으로 반대인(즉 양전하와 음전하) 두 원자가 서로 결합하여 화합물을 형성하고, 이 때 두 원자의 비율은 중성을 만들 수 있는 최소한의 비율이라는 것입니다. 그리고 이 이론을 확장하여 분자 내의 원자 수를 결정할 수 있는 규칙을 몇 가지 만들었습니다. 예를 들어 두 종류의 산화물이 서로 결합할 때는 두 화합물의 결합비가 각 산화물이 포함하고 있는 산소의 수에 비례해야 한다는 규칙이 있었고, 가연성 물질이 결합할 때는 각 물질이 결합할 수 있는 산소의 수에 따라 결합비가 결정된다는 규칙이 있었습니다.⁴

베르셀리우스는 1812년이 되어서야 돌턴의 책을 손에 넣게 되었고, 그 지식을 기반으로 원자량 연구에 본격적으로 뛰어듭니다. 베르셀리우스는 지난 글의 윌라스턴과 마찬가지로 산소의 원자량을 기준으로 각 원소의 원자량을 계산하였는데, 이는 산화물이 수소화물보다 더 다양하게 존재했기 때문입니다. 문제는 한 분자에 포함된 원자의 수였습니다. 베르셀리우스는 기체의 경우 동일한 부피 안에는 동일한 수의 입자가 포함되어 있다는 가설⁵을 사용하였고, 금속 산화물의 경우에는 MO_2 와 같은 비율이 원자 간의 반발력을 고려할 때 분자를 안정적으로 만들 것이라는 가설을 사용하였습니다.

그렇게 1814년, 최초의 원자량 표가 발표됩니다. 이 표는 대부분 베르셀리우스가 직접 측정한 실험값에 기반하고 있었고, 그렇지 않은 데이터는 정확히 원전을 밝혀두었습니다. 당시 베르셀리우스는 최고의 분석 화학 기술을 가진 사

3. 알칼리 금속의 산화물을 가리킵니다.

4. Kiyohisa Fujii, "The Berthollet-Proust Controversy and Dalton's Chemical Atomic Theory 1800-1820," *The British Journal for the History of Science* 19 (2): 177-200 (1986).

5. 이 가설은 그가 아보가드로의 연구를 모른 채 독자적인 논리에 따라 개발한 가설입니다.

람이었기에, 대부분의 원자량은 네 개에서 일곱 개까지의 유효 숫자로 표시되었죠. 1815년 윌리엄 프라우트(William Prout, 1786-1850)는 모든 원자의 원자량은 수소 원자량의 배수라는 가설을 발표하였습니다. 역시 원자량 연구에 몰두하고 있던 톰슨은 자신의 원자량 데이터를 이용하여 프라우트의 가설이 실험적으로 옳다고 주장했지만, 베르셀리우스는 자신의 엄밀한 데이터를 통해 각 원소의 원자량이 수소 원자량의 정수 배와 정확히 일치하지는 않는다는 것을 보였습니다.⁶

하지만 당시에 분자 내 원자의 질량비를 실험적으로 정확히 결정하는 것은 무척 어려운 일이었고, 베르셀리우스는 이후 여러 차례 자신의 원자량을 수정해야 했습니다. 베르셀리우스의 개정 작업에 큰 도움을 준 두 가지 규칙이 있습니다. 1819년 아일하르트 미처리히(Eilhard Mitscherlich, 1794-1863)가 같은 수의 원자를 포함하고 있는 화합물은 유사한 결정 구조를 갖는다는 규칙을 발표합니다. 이 규칙을 이용하면 화합물 내의 원자 수를 조금 더 쉽게 결정할 수 있었죠. 그리고 비슷한 시기 듀롱(Pierre Dulong, 1785-1838)과 프티(Alexis Petit, 1791-1820)는 금속의 경우 원자량과 비열의 곱이 일정하다는 규칙을 발견하였습니다. 이 규칙들을 이용하면 기체 외의 화합물에 대해서도 보다 정확하게 원자량을 결정할 수 있었습니다. 이러한 규칙들을 조합하여 그는 당시 유럽 화학계에서 가장 정확하다고 간주된 원자량 데이터를 만들어낼 수 있었습니다.

베르셀리우스는 정확한 원자량 데이터만 남긴 것이 아닙니다. 그는 화합물의 분류와 화학 결합 이론에도 큰 영향력을 미쳤습니다. 1813년 베르셀리우스는 새로운 화학 표기법을 고안합니다. 이전까지 화학 물질과 화학 반응은 문장으로 기술되거나 간단한 그림으로 표시되었습니다. 하지만 이러한 표기법은 여러모로 불편했기 때문에 베르셀리우스는 이해도 쉽고 인쇄도 용이한 새로운 표기법을 만들었죠. 각 원소 물질의 라틴어 이름 첫 글자를 화학 기호로 사용하는, 바로 오늘날 우리가 사용하고 있는 표기법과 같은 표기법입니다. 물론 첫 글자가 같은 원소들이 많이 있었기 때문

에 베르셀리우스는 다음과 같은 규칙을 만들었습니다.⁷

- (1) 비금속은 무조건 한 글자로 표시한다.
- (2) 금속의 경우 이름이 겹치는 원소가 있다면 두 번째 글자까지 표시한다.
- (3) 만약 두 번째 글자까지 이름이 겹친다면 첫 글자를 쓰고 이어서 처음으로 겹치지 않는 자음을 쓴다.

그 결과 비금속 황(*sulphur*)은 S가 되었고, 금속 규소(*silicium*)는 Si, 금속 안티모니(*stibium*)는 St, 금속 주석(*stannum*)은 Sn이 되었습니다.

그리고 이제 화학 반응식을 만들어야죠. 베르셀리우스는 화학 기호 하나가 단위 부피를 의미한다고 보았습니다. 단위 부피가 여러 개 필요하다면 숫자를 붙여서 표시합니다. 일산화 구리의 조성은 Cu + O로, 이산화 구리의 조성은 Cu + 2O로 표시할 수 있습니다. 이렇게 만들어진 화합물은 더 이상 더하기 기호를 사용하지 않고 원소 기호를 전부 붙여서 표현합니다. 이 때 동일한 원소가 여러 부피 포함되어 있다면 위첨자로 쓰도록 했습니다. 즉, 일산화 구리는 CuO이고 이산화 구리는 CuO²가 됩니다. 이를 통해 화학자들이 복잡한 화학 반응식을 대수식처럼 쉽게 다룰 수 있게 되었고, 특히 이 표기법은 유기화학의 발전에 큰 기여를 하게 됩니다.⁸

또한 앞서 살펴본 것처럼 베르셀리우스는 전기화학에 큰 감명을 받았기 때문에, 데이비가 그랬던 것처럼 전기 현상을 이용해 화학 결합을 설명하고자 하였습니다. 사실 전기 분해 실험을 직접 해본 화학자들에게, 양극과 음극에서 발생하는 두 가지 물질이 원래 물질의 구성 요소라는 생각은 자연스러운 것이었죠. 게다가 그 두 가지 물질은 전기적으로 양전하와 음전하를 띠고 있습니다. 따라서 두 물질은 전기적 인력을 통해 서로 안정적인 화합물을 형성한다고 볼 수 있습니다. 이를 전기화학적 이원론(electrochemical dualism)이라 부릅니다. 전기화학적 이원론은 무기 화합물을 설명하는 데에 큰 성공을 거두었고, 유기 염들 역시 전기 분해로 쪼갤 수 있었기 때문에 유기 화합물에도 적용될 수

6. 원자의 질량이 매우 유사한 질량을 가지고 있는 양성자와 중성자에 의해 결정된다는 지금의 관점에서 보면, 프라우트의 가설은 본질적으로 크게 틀린 것은 아닙니다. 하지만 동위원소의 존재 때문에 실제 원자량은 프라우트의 가설과 맞지 않게 됩니다.

7. 오늘날의 원소 기호는 이 규칙을 엄밀하게 따르지 않기 때문에 불규칙적으로 보입니다. 베르셀리우스는 당시 알려져 있던 원소들을 대상으로 이 규칙을 고안하였습니다.

8. Ursula Klein, "Berzelian Formulas as Paper Tools in Early Nineteenth-Century Chemistry," *Foundations of Chemistry* 3: 7-32 (2001).

있다고 널리 믿어졌습니다.⁹

명민한 이론가이기도 했던 베르셀리우스는 이전까지 활동한 여러 화학자들의 개념을 통합하여 자신의 이원론을 완성하였습니다.¹⁰ 그는 베르톨레로부터 여러 종류의 분자들이 서로 다른 화학적 친화력을 작용하고, 이것이 평형을 이루는 점이 안정한 화합물을 만드는 지점이라는 개념을 흡수하였습니다. 이 화학적 친화력을 전기적 인력으로 대체하면 베르셀리우스의 이원론이 되죠. 그리고 돌턴으로부터는 각 분자가 여러 원자들로 구성될 수 있다는 개념을 도입하였습니다. 서로 모순인 것처럼 보였던 베르톨레와 돌턴의 이론을 자신의 이론 속에 조화롭게 녹여낸 것입니다.

전기화학의 영웅이었던 데이비 역시 베르셀리우스에게 영향을 주었습니다. 베르셀리우스의 연구 초반, 특히 1806년에서 1811년 사이의 기간 동안 베르셀리우스는 데이비와 서신을 교환하고 데이비를 칭송하는 글을 쓰는 등 좋은 관계를 유지했죠. 하지만 1811년 이후 그 관계가 삐걱거리기 시작합니다. 1811년 데이비는 무리움산(oxymuriatic acid)¹¹에서 산소를 찾을 수 없었다고 발표하였습니다. 당시 라부아지에의 영향으로 모든 산에는 산소가 포함되어 있다는 생각이 널리 퍼져 있었고, 베르셀리우스 역시 무리움산에 산소가 포함되어 있다는 이론에 기반하여 자신의 이원론을 펼치고 있었습니다. 따라서 데이비의 발표는 베르셀리우스에게 큰 배신으로 다가왔습니다. 게다가 데이비는 계속해서 원자론을 받아들이지 않았습니다. 베르셀리우스의 이원론은 원자론에 기반하고 있었기 때문에 이 역시 큰 문제였습니다. 결국 1812년, 베르셀리우스가 데이비의 책을 혹평하면서 둘 사이의 관계는 완전히 틀어져 버렸습니다.

베르셀리우스의 삶에 대해 아직 남은 이야기가 몇 가지 더 있습니다. 먼저 후학 양성 이야기를 해볼까요. 베르셀리우스는 많은 학생을 두지 않는 것으로 유명했습니다. (그나마도 화학자들보다는 의사 학생들이 많았습니다.) 그의 연

구실에는 주로 한 명, 많아야 두 명의 학생이 있었고, 베르셀리우스는 그들을 성심성의껏 교육하였습니다. 베르셀리우스 연구실을 거쳐간 학생들은 좋은 곳에 자리 잡을 수 있었는데, 이는 베르셀리우스의 교육이 훌륭하기 때문이기도 했지만, 한편으로 그가 제자들의 일자리를 위해 발 벗고 뛰었기 때문입니다. 심지어 그는 제자에게 자리를 양보하기 위해 1834년 카롤린스카 대학의 교수 자리에서 은퇴하기까지 했습니다.

한편, 베르셀리우스는 늦은 나이까지 결혼하지 않고 홀로 살았습니다. 본인의 회고에 따르면 그는 젊은 시절 어느 선배 과학자의 이야기를 듣고 죽을 때까지 결혼은 생각도 하지 않겠다고 결심했다고 합니다. 그 과학자는 비록 현재 행복한 결혼 생활을 유지하고 있지만, 가족과 함께 살면서 생기는 여러 문제가 골치 아프므로 만약 다시 옛날로 돌아간다면 결혼을 심각하게 고민해 볼 것이라는 이야기를 했다고 하죠. 그러나 1834년 스웨덴을 덮친 콜레라 사태 속에서 많은 사람들이 죽는 것을 보면서 베르셀리우스의 생각이 바뀌었습니다. “나는 처음으로 외롭다고 느꼈고, 내 경제적 상황이 탄탄할 때 빨리 결혼하는 게 낫겠다고 생각했다.” 베르셀리우스는 1835년, 56세의 나이로 친구의 딸(당시 24세!)과 결혼식을 올렸습니다.

베르셀리우스는 삶 자체로도 매력적인 사람이지만, 다양한 분야에서 많은 업적을 남긴 다재다능한 사람이었습니다. 그 중 특히 유기화학이 베르셀리우스의 업적을 기반으로 급격하게 성장하게 됩니다. 베르셀리우스 이전까지는 유기 화합물을 설명하는 것이 거의 불가능했고, 라부아지에나 돌턴 등도 유기 화합물의 존재는 알고 있었지만 그들의 이론으로 설명해낼 수 없었습니다. 이제 때가 무르익었습니다. ⚙



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)

9. Alan J. Roche, "The Theory of Chemical Structure and Its Applications" in *The Cambridge History of Science, Volume 5: The Modern Physical and Mathematical Sciences*, ed. Mary Jo Nye (Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2002).

10. Colin A. Russell, "The Electrochemical Theory of Berzelius, Part I: Origins of the Theory," *Annals of Science* **19** (2): 117-126 (1963).

11. 염산(HCl)입니다. 오늘날의 우리에게는 누가 정답을 맞힌 것인지 뻔히 보이지만 당시에는 그것이 명확하지 않았음을 이해합니다.

132회

대한화학회 학술발표회 초록등록 안내

2023년 10월 25일~27일(3일간)
김대중컨벤션센터, 광주

초록등록 2023년 7월 14일-8월 24일, 17:00까지

사전등록 2023년 6월 22일-9월 21일, 17:00까지

01. 심포지엄 및 구두발표 주제/조직책임자

심포지엄

분과회	No.	주제	조직책임자	이메일
고분자화학	1	고분자 합성 연구의 최신 동향	이인환(아주대학교)	ilee@ajou.ac.kr
	2	중견 고분자화학 연구자 심포지엄	서명운(한국과학기술원)	seomyungeun@kaist.ac.kr
	3	지속가능형 고분자 소재의 최신 연구동향	박제영(서강대학교)	jeypark@sogang.ac.kr
무기화학	1	무기재료화학의 최신 연구동향	임주현(강원대학교)	jlim@kangwon.ac.kr
	2	배위화학 및 유기금속화학의 최신 연구동향	김진영(서울대학교)	jykim@snu.ac.kr
	3	나노화학의 최신 연구동향	박정은(광주과학기술원)	parkje@gist.ac.kr
물리화학	1	광전기화학 연구의 최근 동향	황윤정(서울대학교)	yjhwang1@snu.ac.kr
	2	컴퓨터와 화학: 최신 연구 동향	김현우(광주과학기술원)	hwk@gist.ac.kr
	3	에너지 과학을 위한 물리화학의 최신 연구동향	손운용(충북대학교)	nunyong@chungbuk.ac.kr
분석화학	1	산업 문제 해결을 위한 분석화학 최신 연구 동향	김기훈(한국과학기술연구원)	kihun.kim@kist.re.kr
	2	첨단 분석화학 최신 연구 동향	김민식(대구경북과학기술원)	mkim@dgist.ac.kr
생명화학	1	생체분자 응집현상 연구의 최신 동향	박종민(강원대학교)	jpark@kangwon.ac.kr
	2	바이오시스템 엔지니어링 연구의 최신 동향	고민섭(부산대학교)	mikoh@pusan.ac.kr
유기화학	1	국외 유기화학자 심포지엄	이홍근(서울대학교)	hglee@snu.ac.kr
	2	유기화학의 최신 연구 동향	윤주영(이화여자대학교)	jyoon@ewha.ac.kr
	3	촉매유기화학의 최신 연구 동향	배한용(성균관대학교)	hybae@skku.edu
의약화학	1	의약화학인상 수상 강연	임상민(한국과학기술연구원)	smlim28@kist.re.kr
	2	최신 유전자 암호화 라이브러리 기술 동향	이규명(한국화학연구원)	kmlee@kricr.re.kr
재료화학	1	2023 BKCS의 선택-재료화학	박성진(인하대학교)	sungjinpark@inha.ac.kr
	2	배터리 응용을 위한 재료화학의 최근 동향	김종순(성균관대학교)	jongsoonkim@skku.edu
	3	양자특성을 갖는 나노소재의 합성부터 응용까지	김인영(이화여자대학교)	iykim@ewha.a.kr

분과회	No.	주제	조직책임자	이메일
전기화학	1	전기유기합성: 전기화학 그리고 유기화학	최창혁(포항공과대학교)	chchoi@postech.ac.kr
	2	탄소중립을 위한 전기촉매 화학 반응	황윤정(서울대학교)	yjhwang1@snu.ac.kr
	3	기초전기화학의 최신 연구 동향	박준희(충북대학교)	jhp@cbnu.ac.kr
화학교육	1	화학교육의 최근 이슈와 연구 동향	최원호(순천대학교)	stensil@scnu.ac.kr
	2	과학영재를 위한 화학교육	김기향(세종과학예술영재학교)	matari@sasa.hs.kr
환경에너지	1	(초)미세플라스틱 검출 및 인체/환경영향	김은주(한국과학기술연구원)	eunjukim@kist.re.kr
	2	이산화탄소 포집·활용 알키미스트 기술: 탄소부터 액체연료까지	박현웅(경북대학교)	hwp@knu.ac.kr
KCS	1	[미래혁신 화학심포지엄] 화학이 만드는 우리 인생의 이야기	조재흥(울산과학기술원)	jaeheung@unist.ac.kr
	2	[미래혁신 화학심포지엄] 4차 산업혁명 시대 화학교육의 선진화를 위한 최신 화학 소개	이혁진(공주대학교)	hyuckjin@kongju.ac.kr
	3	[미래혁신 화학심포지엄] Sub-nm 급 반도체용 소재 혁신 위한 화학의 역할	정현담(전남대학교)	hdjeong@chonnam.ac.kr
	4	[미래혁신 화학심포지엄] 엔트로피 접근법을 통한 고성능 다성분계 거대분자 소재	고두현(성균관대학교)	dhko@skku.edu
	5	[미래혁신 화학심포지엄] 상 전이 거동에 대한 융합적 이해	최정모(부산대학교)	jmchoi@pusan.ac.kr
	6	[KCS-ACS Applied Bio Materials Research Publications Summit] 나노바이오 화학 분야 주요 연구 트렌드와 도전	김종승(고려대학교)	jongskim@korea.ac.kr
	7	[IBS 심포지엄] 탄소 및 탄소 관련 재료	Rodney S. Ruoff(IBS)	ruofflab@gmail.com
	8	[KCS] 젊은 화학자 특별 심포지엄	김태규(연세대학교)	tkkim@yonsei.ac.kr
			이윤미(광운대학교)	ymlee@kw.ac.kr
9	[KCS-RSC Joint 심포지엄] 에너지 과학의 다학제적 접근	황성주(연세대학교)	hwangsju@yonsei.ac.kr	

구두발표

- 발표자 선정 및 발표시간 확인은 추후 홈페이지를 통해 확인 가능합니다.

분과회	No.	주제	조직책임자	이메일
고분자화학	1	젊은 고분자화학 과학자를 위한 구두발표	김정곤(전북대학교)	jeunggonkim@jbnu.ac.kr
무기화학	1	젊은 무기화학자를 위한 구두발표	이경훈(경상국립대학교)	kleel1@gnu.ac.kr
물리화학	1	젊은 물리화학자 구두발표	민승규(울산과학기술원)	skmin@unist.ac.kr
분석화학	1	젊은 분석화학자 구두발표	유성주(아주대학교)	sungjuyu@ajou.ac.kr
	2	후속세대 분석화학자 구두발표	하지원(울산대학교)	jwha77@ulsan.ac.kr
생명화학	1	젊은 생명과학자를 위한 구두발표	이민희(숙명여자대학교)	minheelee@sookmyung.ac.kr
유기화학	1	젊은 유기화학자 구두발표	최이식(충북대학교)	isaac.choi@chungbuk.ac.kr
의약화학	1	젊은 의약화학자 구두발표	김종훈(송실대학교)	jhkim19@ssu.ac.kr
재료화학	1	젊은 재료화학자를 위한 구두발표	양지웅(대구경북과학기술원)	jiwoonyang@dgist.ac.kr
전기화학	1	젊은 전기화학자를 위한 구두발표	박준희(충북대학교)	jhp@cbnu.ac.kr
환경에너지	1	환경에너지 일반발표	김효원(한국에너지공과대학교)	hwkim@kentech.ac.kr

02. 연회비 및 참가비 안내

연회비 및 참가비 납부 안내

*종신회원 회비 : 1,400,000원 (가입 당시 정회원 연회비의 20년치)

회원구분	연회비	사전등록		현장등록	
		A	B(연회비 면제)	A	B(연회비 면제)
종신회원	1,400,000원*	100,000원	-	120,000원	-
정회원	70,000원	100,000원	170,000원	120,000원	190,000원
교육회원	50,000원	60,000원	110,000원	70,000원	120,000원
학생회원					
비회원		-		250,000원	

- 학술발표회 및 총회 참가자는 올해 회비를 납부한 본회 회원이어야 합니다. 따라서 지난해 정회원, 교육회원, 학생회원은 먼저 2023년도 회비를 납부하여 주시기 바랍니다.
- 참가비 사전등록 : 2023.6.22(목)-9.21(목) ※사전등록 마감 후에는 현장등록을 하셔야 합니다.
- 학부생(대학원생 제외) : 학생증을 제시할 경우 참가비 면제(단, 학부생이어도 초록 저자/공동저자/발표자는 면제에서 제외됩니다.)
- 만 65세 이상 회원 : 참가비 면제

학회 참가비 지원 프로그램 안내

회원구분	사전등록		현장등록	
	A	B(연회비 면제)	A	B(연회비 면제)
종신회원	50,000원	-	60,000원	-
정회원	50,000원	120,000원	60,000원	130,000원
교육회원	30,000원	80,000원	35,000원	85,000원
학생회원				

- 연구비 지원을 받지 않고 자비로 학술발표회에 참가하는 회원들에게는 학회에서 일정액을 지원해 주는 제도입니다. (참가비의 50% 지원)
- "연구비 지원이 없는 국내 화학자 지원 프로그램으로 학술발표회 참가비 일부 금액을 대한화학회에서 지원함"이라는 문구가 영수증에 명시됩니다.
- 신청 방법: 참가비 결제페이지에서 온라인 접수

환불규정

연회비와 참가비 환불 마감일

- 초록 수정 및 삭제 기한까지 초록을 접수 취소(삭제)할 경우 연회비와 참가비를 환불해 드립니다.
- 초록 수정 및 삭제 기한 종료 후에는 초록의 접수 취소(삭제)는 불가하며, 발표 취소로 처리됩니다.
- 기념강연 및 특별 강연, 심포지엄, 구두발표, 포스터발표의 발표자가 초록 수정 및 삭제 기한 종료 후에 발표를 취소할 경우 연회비는 환불 불가하고, 참가비는 사전등록 마감일(9월 21일(목), 17:00)까지만 요청에 의하여 환불해 드립니다.
- 개인 사정으로 참가비를 환불해야 할 때에는 사전등록 마감일까지 접수된 요청에 한하여 환불해 드립니다.
- 재결제 규정 : 재결제를 포함한 결제 변경에 대한 최종 요청일은 학술발표회 종료 후 14일 이내만 처리 가능합니다. 사전등록 결제 기간이 지나고 재결제 시 현장등록비로 변경되어 결제 진행됩니다.
- 영수증 출력 : 마이페이지에서 회원확인/회비 및 참가비 결제/영수증 출력 등이 가능합니다.
- 환불 및 재결제 요청 접수 : member@kcsnet.or.kr

03. 심포지엄 및 구두발표 주제 요약문

고분자화학분과회

| 심포지엄 1 |

고분자 합성 연구의 최신 동향

본 심포지엄에서는 고분자 합성 연구의 최신 동향들을 공유할 수 있는 시간을 마련하였다. 고분자 합성 방법론은 고분자의 구조를 정밀하고 다양하게 합성하는데 있어 근간이 되는 학문 분야이다. 최근 고분자 합성 연구의 발전은 물성, 기능성, 더 나아가 분해성을 고려한 신규 고분자 재료의 탄생을 가능하게 하고 있다. 고분자 합성에 대한 발표와 토론을 통하여 관련 연구의 잠재력과 발전 방향에 대한 의견을 서로 교류할 수 있는 시간이 될 것이다.

| 심포지엄 2 |

중견 고분자화학 연구자 심포지엄

고분자화학분과회의 중견 연구자 특별심포지엄으로, 고분자화학 분야에서 중요 연구주제를 다년간 수행해온 중견 연구자의 주목할 만한 연구성과를 보고하는 시간을 마련하였다. 최근 고분자 화학 연구의 발전에 대한 발표와 토론을 통하여 고분자화학 관련 연구가 앞으로 어떤 방향으로 나아가야 할 것인지에 대한 해답을 찾아볼 수 있는 기회가 될 것으로 기대한다.

| 심포지엄 3 |

지속가능형 고분자 소재의 최신 연구동향

본 심포지엄에서는 지속가능형 고분자 소재의 최신 연구동향들을 공유할 수 있는 자리를 마련하고자 한다. 최근 들어, 플라스틱의 급격한 생산량 증가에 의한 탄소배출 위기 및 폐기되는 플라스틱에 의한 환경 오염 문제가 심각해지면서 이와 같은 사회문제를 해소할 수 있는 지속가능형 고분자 소재 연구에 대한 관심이 증가되고 있다. 지속가능형 고분자 소재의 범위로 바이오매스 활용, 생분해성, 기계화학적 재활용, 업사이클링, 탄소중립 특성에 국한하지 않고 다양한 최신 고분자 소재를 소개하고 토론하는 교류의 장을 제공할 것으로 기대한다.

| 구두발표 |

젊은 고분자화학 과학자를 위한 구두발표

다양한 고분자 화학 분야에서 연구하고 있는 대학원생, 박사 후 연구원 및 신진 연구 인력들의 최신 연구 결과들을 접할 수 있는 기회를 청중들에게 제공하는 것을 목적으로 한다. 고분자화학분과회에서 마련

한 심포지엄 연구발표 주제 이외의 모든 고분자 분야의 주제를 다룰 예정이기 때문에 다양한 분야의 젊은 연구자들 뿐만 아니라 여러 분야에서 연구해 온 청중들에게 좋은 기회가 될 것이다.

무기화학분과회

| 심포지엄 1 |

무기재료화학의 최신 연구동향

무기재료화학은 분자, 초분자, 그리고 고체 무기 재료에 이르는 다양한 형태의 재료 개발을 통해 현재 우리가 직면한 여러가지 문제를 해결하는 실마리를 제공한다. 본 심포지엄에서는 이러한 무기재료화학 분야의 최신 연구 결과를 공유하고 새로운 발전 방향을 모색하고자 한다.

| 심포지엄 2 |

배위화학 및 유기금속화학의 최신 연구동향

최근 무기화학 분야에서는 철저한 분석을 통해 물질에 대한 이해를 심화하고 이를 다양한 응용 분야에 적용하거나 현안을 해결하는 것이 강조되고 있다. 이번 심포지엄은 유기금속화학 및 배위화학 분야의 우수 연구자들의 최근 연구동향 및 다양한 응용 연구 결과를 공유하는 것을 목적으로 한다. 본 심포지엄을 통해 향후 융합 연구를 위한 교류 자리를 마련하고자 한다.

| 심포지엄 3 |

나노화학의 최신 연구동향

나노화학은 화학적 지식을 활용해 나노스케일의 물질을 합성하고 광학적, 화학적, 전기적 속성 등을 연구한다. 그 결과를 바탕으로 물리학, 재료 과학, 생명 과학, 의학, 에너지 등 다양한 분야로의 응용 연구도 활발히 진행 중이다. 본 심포지엄에서는 나노물질을 활용한 연구의 최근 동향과 새로운 연구 방법의 개발에 대해 소개하고자 한다.

| 구두발표 |

젊은 무기화학자를 위한 구두발표

본 세션에서는 다양한 무기화학 분야에서 연구 활동을 하고 있는 박사후연구원 및 대학원생들이 최근 연구 결과를 발표할 수 있는 기회를 제공하고 있다. 이를 통해 국내외 최신 연구 동향을 파악하고 자유로운 토론과 심도 있는 학문적 교류의 장을 갖고자 한다. 또한, 젊

은 무기화학자들의 연구 의욕을 높이고 무기화학 분야의 차세대 리더로 성장할 수 있는데 일조하고자 한다.

물리화학분과회

| 심포지엄 1 |

광전기화학 연구의 최근 동향

광 또는 전기화학 기반의 화학 반응을 제어하기 위해서는 분자의 에너지, 구조, 전자 전달, 촉매 표면과의 상호 작용 및 반응 동역학에 대한 물리화학적 이해가 중요하다. 이러한 광전기화학적 반응은 에너지 및 환경 문제를 해결하기 위한 방안으로 많은 관심을 받고 있다. 계면에서의 반응을 이해하기 위해서, 이론적 접근이나 실시간 반응 중에 특성을 관찰하기 위한 연구 방법이 적용되고 있다. 본 심포지엄에서는 광전기화학 분야의 최근 동향과 새로운 연구 방법 개발 사례에 대해 소개하고, 물리화학이 기여할 수 있는 방향에 대해서 논의하고자 한다.

| 심포지엄 2 |

컴퓨터와 화학: 최근 연구 동향

컴퓨터를 이용한 화학 연구는 실험으로 관찰된 현상을 설명하고 가설을 실현하기 쉽게 하는 귀중한 통찰력을 제공할 수 있다. 본 심포지엄은 컴퓨터를 이용한 화학 연구의 최신 경향을 탐구하는 것을 목표로 한다. 본 심포지엄은 계면에서 현상을 연구하는 데 중점을 둔 양자 화학 계산과 포텐셜 함수나 자율 실험실을 연구하기 위한 인공 지능의 응용이라는 두 가지 하위 주제를 살펴볼 것이다.

| 심포지엄 3 |

에너지 과학을 위한 물리화학의 최신 연구동향

본 심포지엄에서는 에너지 과학을 위한 물리화학 분야의 최신 연구 동향들을 공유할 수 있는 자리를 마련하고자 한다. 최근 환경오염 및 자원 고갈에 대한 이슈로 인해 대체에너지 개발 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 일환으로 분광학적 기술들을 활용하여 효율 향상의 원인을 밝히고, 그 결과를 바탕으로 더 높은 효율을 갖는 디바이스 개발에 기여하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 다양한 에너지 과학을 위한 물리화학 분야의 최신 연구동향들에 대한 정보를 나눔으로써 향후 이 분야의 국내외 발전 방향을 예측할 수 있는 좋은 교류의 장을 제공할 것으로 기대한다.

| 구두발표 |

젊은 물리화학자 구두발표

이 포럼은 이론 및 실험 물리화학 전 분야의 최신 연구 동향을 공유하고, 새로운 연구 주제 발굴하고 공동 연구할 수 있는 플랫폼을 제공하고자 한다. 국내외 젊은 물리화학 연구자뿐만 아니라 박사과정 학생 및 박사 후 연구원의 최근 연구 성과 발표를 권장하며, 이를 통해 젊은 물리화학 연구자의 연구 의욕을 고취시키고 연구자 간 교류를 활성화하는데 기여하고자 한다.

분석화학분과회

| 심포지엄 1 |

산업 문제 해결을 위한 분석화학 최신 연구 동향

현대 산업에서 발생하는 다양한 문제 해결을 위해 혁신적인 분석 기술과 방법을 개발하여 산업 분야에서 발생하는 복잡한 문제를 분석하고 해결하는데 있어 분석화학의 역할이 점점 중요해지고 있다. 본 심포지엄에서는 산업 분야에 적용 가능한 분석화학 연구 동향을 학문적 관점에서 논의하고, 최신 연구 결과를 공유하고, 연구자들의 의견 교류 및 다양한 토론의 장을 마련하고자 한다. 본 심포지엄을 통해 산업 현장에서 발생하는 문제에 대한 신속하고 정확한 해결책을 모색하는데 큰 도움이 될 것으로 기대한다.

| 심포지엄 2 |

첨단 분석화학 최신 연구 동향

본 심포지엄은 첨단 분석화학 분야에서의 최신 연구 동향을 다루는 것을 목표로 한다. 첨단 분석화학은 높은 수준의 연구와 혁신적인 기술 개발로 매우 빠르게 진보하고 있다. 이와 동시에 산업 분야에서의 응용 가능성과 실용성이 중요해지고 있다. 본 심포지엄에서는 분석화학 분야에서의 최신 연구 동향을 공유하고, 신규 분석 기술과 방법의 개발, 응용 분야의 확장 등에 대한 다양한 연구 결과를 논의하고자 한다.

| 구두발표 1 |

젊은 분석화학자 구두발표

본 일반 구두발표에서는 분석화학 전 분야의 최신 연구 동향을 공유하고, 새로운 연구 주제 발굴과 공동 연구 모색을 위한 토론의 장을 마련하고자 한다. 특히, 분석화학을 전공하는 대학원생에게 최근 연구 성과를 발표할 수 있는 기회를 제공하고, 이를 통해 젊은 분석화학

자의 꿈을 키울 수 있도록 격려한다. 본 구두발표를 통해 분석화학의 최신 연구 동향을 파악하고, 대학원생, 신진 연구자, 중견 연구자 간 연구 교류가 활성화될 것을 기대한다.

| 구두발표 2 |

후속세대 분석화학자 구두발표

본 일반 구두발표에서는 분석화학 전 분야의 최신 연구 동향을 공유하고, 새로운 연구 주제 발굴과 공동 연구 모색을 위한 토론의 장을 마련하고자 한다. 특히, 박사학위 취득 예정자, 박사후 연구원, 연구 교수 등 신진 연구자들의 최근 연구 성과를 발표할 수 있는 기회를 제공하고, 이를 통해 학문 후속세대의 독립된 연구자로서 한 단계 더 성장할 수 있도록 한다. 본 구두발표를 통해 분석화학의 최신 연구 동향 공유와 더불어 학생, 신진 연구자, 중견 연구자간 연구 교류가 활성화될 것을 기대한다.

생명화학분과회

| 심포지엄 1 |

생체분자 응집현상 연구의 최신 동향

세포의 주요한 기능을 수행하기 위해서 핵, 미토콘드리아와 같은 세포막으로 구성 되어있는 기관들이 존재한다. 최근에는 이런 세포 소기관 이외에 막이 없더라도 생체분자들이 응집되어 생성되는 다양한 세포 구획들이 존재한다는 사실이 속속 보고되고 있다. 이런 생체 분자들의 응집체들은 다양한 세포의 기능을 조절하는 역할을 할 뿐만 아니라 다양한 질병과도 연관이 있음이 밝혀지고 있다. 본 심포지엄에서는 생체분자 응집현상에 대한 최신 연구 동향을 소개하고 심도 있는 논의를 진행하고자 한다.

| 심포지엄 2 |

바이오시스템 공학 연구의 최신 동향

이 심포지엄에서는 합성생물학 및 단백질 공학 분야를 포함하는 바이오시스템 공학 분야의 최첨단 연구를 소개하고자 한다. 합성 생물학은 유전자 및 단백질과 같은 생물학적 구성 요소를 인공적으로 설계하고 합성하여 유용한 유기 물질 또는 유기체를 만드는 학문이다. 이 기술을 활용하여 고부가가치의 대대물질 및 효소를 생성하고 바이오 연료를 생산할 수 있다. 본 심포지엄에서는 바이오시스템 공학의 새로운 화학 및 생물학적 접근법을 알아보고, 미래 연구 방향에 대한 토론의 장을 마련하고자 한다.

| 구두발표 |

젊은 생명과학자를 위한 구두발표

본 세션에서는 생명과학 분야에서 활발한 연구 활동을 하고 있는 신진 연구자, 박사후연구원 및 대학원생들의 최근 연구결과를 발표하는 기회를 제공하고자 한다. 이러한 기회를 통하여 국내외 최신 연구 동향을 파악하고 자유로운 토론과 심도 있는 학문적 이해를 도모하며 연구자들 사이의 창의적인 융합 연구 및 협력 연구의 기회를 모색하는 기회와 장을 마련한다. 본 세션을 통해 젊은 생명과학자 에게 해당 분야 발전을 선도하는 차세대 리더로서 성장할 수 있는데 일조한다.

유기화학분과회

| 심포지엄 1 |

국외 유기화학자 심포지엄

이 심포지엄은 국외 유기화학 연구자의 최신 연구동향을 공유할 수 있는 자리를 마련하고자 한다. 새로운 광촉매 접목 분야, 비대칭 촉매 분야, 유기붕소화학 등에 대한 혁신적인 아이디어를 토론, 학습 및 교환하기 위한 플랫폼을 제공하는 것을 목표로 한다. 이를 통해 향후 유기화학의 국내외 발전 분야를 예측하고 연구 아이디어를 교환할 수 있는 좋은 기회가 제공될 것이다.

| 심포지엄 2 |

유기화학의 최신 연구동향

유기화합물의 효율적 합성과 다양한 응용은 현대 유기화학의 핵심을 이룬다. 이번 심포지엄에서는 우리나라의 유기화학 분야를 이끌어가고 있는 역대 유기화학분과 회장님을 연사로 초청하여 새로운 반응성의 발전과 선택성의 증가, 다양한 응용 분야를 세부 내용으로 하여 최근 연구 동향을 공유하고 유기 화학 및 관련 분야의 연구자들과 의견 교류를 할 수 있는 기회를 제공하고자 한다.

| 심포지엄 3 |

촉매유기화학의 최신 연구동향

새로운 촉매 및 합성 방법을 개발하는 화학은 다양한 분자의 효율적 합성에 직접적으로 적용되는 유기화학에서 매우 중요한 분야이다. 본 심포지엄에서는 이러한 유기합성방법론 및 촉매 반응의 최신 동향에 대해, 전문가들의 활발한 발표 및 토론의 장을 마련하여, 최근의 학문

적 진보 및 미래 방향을 조명하고자 한다.

| 구두발표 |

젊은 유기화학자 구두발표

유기화학의 다양한 주제에 관한 발표를 통해 최신 연구 결과들을 공유하고, 새로운 연구 주제를 소개하는 기회를 마련하고자 한다. 특히 대학원생들과 박사후과정 연구원들의 발표를 적극 권장하여 연구 결과를 공유하고 토론할 수 있는 폭넓은 교류의 장을 제공함으로써 유기화학 분야의 발전을 선도하는 차세대 리더로서 성장할 수 있도록 한다.

의약화학분과회

| 심포지엄 1 |

의약화학인상 수상 강연

의약화학분야에서 우수한 과학적 성과를 도출하신 또는 새로운 치료제 개발연구에 기여하신 의약화학자를 선정하여 의약화학인상을 수여하고 수상자의 대표 성과 또는 그간의 의약화학분야에의 기여에 대한 강의를 듣는 심포지엄을 마련하였다. 아울러 의약화학인상 수상자와 밀접한 관계를 가지고 계신 연구자 분들을 초청하여 최신 의약화학 연구동향을 공유하는 심포지엄이 될 것이다. 이 심포지엄을 통해 의약화학 연구자의 우수한 연구성과를 대내외적으로 홍보하고 신약개발 연구의 질적 향상을 모색할 것이다.

| 심포지엄 2 |

최신 유전자 암호화 라이브러리 기술 동향

본 심포지엄에서는 유전자 암호화 라이브러리(DNA-encoded library, DEL) 기술의 최신 연구동향을 공유할 수 있는 자리를 마련하고자 한다. 최근 신약개발의 연구비용을 낮추고, 성공 가능성을 높이기 위한 기반 기술의 개발은 지속적으로 요구되고 있다. 유전자 암호화 라이브러리(DEL) 기술을 이용한 유효물질 발굴은 전통적인 합성이나 스크리닝 방법들보다 획기적으로 빠른 시간 내에 저비용으로 우수한 후보물질을 도출할 수 있는 기회를 제공하고 있다. 본 심포지엄에서는 국내 의약화학분야 연구자들의 역량 제고와 아이디어를 공유를 통해서, 향후 연구 교류에 기여할 수 있는 자리를 마련하고자 한다.

| 구두발표 |

젊은 의약화학자 구두발표

신약개발을 위한 의약화학 전 분야에서, 새로운 연구 주제 발굴과 공동 연구 모색을 위한 토론의 장을 마련하고자 한다. 국내외의 젊은 연구자를 포함해 박사과정 학생 및 박사 후 연구원의 최근 연구 성과 발표를 권장하며, 본 포럼을 통해 젊은 의약화학 연구자의 연구 의욕을 증진하고 연구자간 교류를 활성화하고자 한다.

재료화학분과회

| 심포지엄 1 |

2023 BKCS의 선택-재료화학

재료화학은 고체 무기 재료를 비롯하여, 유기 및 고분자 재료, 바이오 재료 등을 아우르는 대표적인 다학제 연구 분야로 발돋움해 왔다. 재료화학 분야는 새로운 기능성 재료의 개발 및 분석 기법의 개발과 함께 새롭게 개발된 재료의 촉매, 에너지, 광학 및 바이오 분야 개척을 통해 나날이 발전을 거듭하고 있다. 본 심포지엄에서는 Bulletin of the Korean Chemical Society (BKCS) 편집인들이 선택한 국내 재료화학 분야 우수 연구진들을 초청하여 최신 재료화학 연구 결과들을 공유하고 토론할 수 있는 장을 제공하고자 한다.

| 심포지엄 2 |

차세대 이차전지를 위한 재료화학의 최근 동향

리튬이온전지는 현재 소형전자기기에서부터 전자자동차와 같은 중대형 에너지저장 매체로 까지 적용 범위가 확대되고 있습니다. 이에 따라 리튬이온전지의 고에너지밀도와 안전성을 개선하고, 생산 단가를 낮추는 차세대 이차전지의 개발에 많은 관심이 집중되고 있습니다. 이를 위해 양극, 음극, 전해질 소재 등 이차전지의 주요 구성 요소에 대한 원천 기술 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있습니다. 이 심포지엄에서는 최근 연구되고 있는 차세대 이차전지인 전고체 전지, 소듐 이온전지, 금속-공기 전지 등에 적용되는 고성능 양극, 음극 및 전해질 소재에 관련된 최신 연구 결과를 공유하고, 이에 대해 연구자들이 토론할 수 있는 기회를 제공하고자 합니다.

| 심포지엄 3 |

양자특성을 갖는 나노소재의 합성부터 응용까지

양자특성은 매우 작은 크기의 나노소재들이 가지는 특징으로, 이를

이해하고 제어함으로써 전자 소자를 비롯한 다양한 분야에서 혁신적인 기술 응용의 발전을 이끌 수 있다. 본 심포지엄에서는 양자특성을 갖는 나노소재의 합성부터 물성 분석, 응용 연구를 하고 있는 연구자들을 초청하여 최첨단 나노과학기술의 연구동향을 공유하고자 한다.

| 구두발표 |

젊은 재료화학자를 위한 구두발표

다양한 재료 화학 분야에서 연구하고 있는 대학원생, 박사 후 연구원 및 신진 연구 인력들의 최신 연구 결과들을 접할 수 있는 기회를 청중들에게 제공하는 것을 목적으로 한다. 특히, 재료화학분과회에서 마련한 심포지엄 연구발표 주제 이외의 다양한 재료 분야의 연구 주제를 다룰 예정이기에, 본 포럼을 통해 최신 연구동향을 배우고 연구자 간의 교류 활성화에 좋은 기회가 될 것이다.

전기화학분과회

| 심포지엄 1 |

전기유기합성: 전기화학 그리고 유기화학

전기화학은 이전에 전통적인 방법을 통해 접근할 수 없었던 다양한 유기 분자의 합성을 가능하게 함으로써 유기화학 분야의 새로운 가능성을 보여주고 있다. 본 심포지엄은 전기화학적 유기 합성이라는 공동의 목표를 바탕으로 유기화학과 전기화학에서 바라보는 두 개의 다른 학문적 관점 및 목표 등을 조화롭게 논의하고자 한다. 서로 간의 심도 있는 토론을 통해 유기화학과 전기화학 사이의 학문적 견해를 좁혀 나가고, 향후 본 학문의 발전을 위한 연구 방향과 통찰력 그리고 적극적인 협업의 기회를 제공하고자 한다.

| 심포지엄 2 |

탄소중립을 위한 전기촉매 화학 반응

전기화학적 촉매 반응은 신재생 발전 기술과 융합이 용이한 친환경 촉매 반응 기술로서 관심을 높게 받고 있다. 그 대표적인 반응으로는 수전해 그린 수소 생산 반응, 이산화탄소 전환 반응, 바이오 매스 유래 분자의 고부가가치화 반응, 질소 순환 반응, 혹은 이들의 조합으로 이루어진 C-N 결합 형성 반응 등이 있다. 작은 분자의 산화/환원 반응을 통해 부가 가치를 높일 수 있는 전기 촉매 반응에 대해서 다양한 각도에서 살펴보고, 향후 전기 촉매 화학이 탄소 중립 기술 개발에 기여할 수 있는 방향에 대해서 논의하고자 한다.

| 심포지엄 3 |

기초전기화학의 최신 연구 동향

이 세션은 기초전기화학 분야의 최신 동향과 중요한 발전을 논의하는 것을 목표로 한다. 최근 배터리, 에너지 변환, 바이오센서와 같은 전기화학 응용 분야가 성장을 거듭하고 있으며 더불어 인접 분야 학문과의 융합을 통해 전기화학의 영역은 빠르게 확장하고 있다. 이러한 전기화학 기반 응용 산업들의 지속적인 성장과 더불어 새로운 응용 기술 개척을 위해서는 제한된 공간에서의 전기화학 반응과 전기적 이중층에서의 반응 조절, 향상된 물질 이동, 전자 전달 동역학과 같은 기초전기화학의 깊이 있는 연구와 이해가 더욱 중요하다. 본 심포지엄에서는 학제 간 토론과 협업을 통해 기초전기화학의 발전을 꾀하는 한편 기술혁신과 다양한 응용분야로의 활용 가능성을 논의하는 기회가 될 것으로 기대한다.

| 구두발표 |

젊은 전기화학자를 위한 구두발표

다양한 전기화학 분야에서 활발히 연구를 수행하고 있는 젊은 전기화학자들에게 연구 결과를 공유하고 토론할 수 있는 기회를 마련한다. 특히, 대학원생과 박사후 과정 연구원들의 참여를 권장하며, 본 세션을 통해 최신 연구동향을 파악과 동시에 동료 연구자들 간 아이디어 교환을 통해 공동 연구를 모색할 수 있는 기회를 제공한다.

화학교육분과회

| 심포지엄 1 |

화학교육의 최근 이슈와 연구 동향

중등 및 대학 화학교육의 현황, 문제점, 발전 방안 등에 관한 발표와 토론을 통해 화학교수학습 이론의 효과 연구, 화학 교육과정 및 평가 관련 연구, 화학교사의 전문성 신장 및 교사양성 방안, 학교 밖 화학 교육 연구, 스마트 교육 관련 연구, 과학의 본성 연구 등 다양한 화학 교육 이슈와 연구 분야를 소개하는 것을 목적으로 한다. 개별 연구 결과의 발표보다는 여러 연구 결과의 종합에 기반을 둔 통합적인 시각을 제공하고, 중등 및 대학의 화학교육 발전을 위하여 화학 연구자, 화학교육 연구자, 현장 화학교사 사이의 폭 넓은 교류의 장을 제공하고자 한다.

| 심포지엄 2 |

과학영재를 위한 화학교육

초중등 및 대학에서 이루어지고 있는 과학영재를 위한 화학교육의 현황과 문제점에 대한 발표와 토론을 통하여 미래의 화학자들을 양성하기 위한 효과적인 방안을 모색한다. 발표 주제는 과학영재를 위한 화학교육 프로그램, R&E 프로그램, 탐구 프로그램, AP 프로그램, 학부생 연구 프로그램, 국제공동연구 프로그램 등 과학영재를 위한 화학교육과 관련된 다양한 분야를 폭넓게 다룬다.

환경에너지분과회

| 심포지엄 1 |

(초)미세플라스틱 검출 및 인체/환경영향

미세플라스틱(microplastics; MPs)과 나노플라스틱(nanoplastics; NPs)의 광범위한 확산은 다양한 환경 매체에서 심각한 우려를 야기하고 있다. 국내외의 다양한 연구 그룹에서 미세플라스틱과 나노플라스틱의 검출, 거동 및 인체/환경영향과 관련하여 활발한 연구가 진행되고 있지만 검출과 독성 분야에서는 여전히 상당한 지식 격차가 있다. 본 심포지엄에서는 (i) 다양한 환경 매트릭스에서 미세플라스틱과 나노플라스틱의 검출 및 (ii) 수생 생물, 식물 및 인간 세포주에서 그들의 독성에 대한 최근 연구 동향 및 결과를 소개하고자 한다.

| 심포지엄 2 |

이산화탄소 포집·활용 알키미스트 기술: 탄소부터 액체연료까지

최근 이산화탄소 포집 및 전환(Carbon capture utilization, CCU) 기술에 대한 세계적인 관심이 고조되고 있다. 열, 전기, 광 등을 기본 에너지원으로 하여, 이산화탄소를 유용한 화합물로 전환하는 기술은 인류를 구원할 마지막 도전이다. 본 심포지엄은 최근 진행 중인 산업 기술알키미스트프로젝트에서 진행 중인 이산화탄소를 액체화합물로 전환하는 다양한 기술들을 소개하고, 현재 직면한 난관과 이를 극복하는 전략 등에 대해 심도 있는 논의의 장을 제공하고자 한다.

| 구두발표 |

환경에너지 일반발표

본 구두발표에서는 환경에너지화학 분야의 최신 연구동향을 살펴보고자 한다. 특히 환경 및 에너지 관련 기초화학 및 이와 관련된 응용 분야에서 다양한 연구를 수행하고 있는 석·박사 학생 및 연구원들의

최신 연구결과를 소개하며 이를 바탕으로 연구방법에 대한 아이디어를 얻고 최신 분석기술 및 실험기술들을 교류하고자 한다.

KCS

| 심포지엄 1 |

[미래혁신 화학심포지엄] 화학이 만드는 우리 인생의 이야기

이번 융합 심포지엄은 무기화학분과-의약화학분과-BKCS가 주최하며 “화학이 인간 생활에 미치는 영향”을 실제적인 연구 내용 발표를 통해 토론의 장을 마련하고자 한다. 무기화학, 의약분야 및 화학 전반(BKCS) 분야의 석학들이 모여 최신 동향과 연구 결과를 발표하며, 이를 바탕으로 미래 인간 삶의 질 향상을 위한 화학 방향에 대해 토론하고자 한다.

| 심포지엄 2 |

[미래혁신 화학심포지엄]

4차 산업혁명 시대 화학교육의 선진화를 위한 최신 화학 소개

새로운 4차 산업혁명 시대 화학 교육의 최신화를 위하여 다양한 분야에서 활용되고 있는 화학의 최신 연구를 알아가는 것은 중요합니다. 무기화학, 유기금속화학, 생무기화학, 생화학 등 화학의 여러 분야의 발전은 현재 인류가 직면하고 있는 다양한 환경 문제와 에너지 문제 해결 및 의약분야에서의 발전에 많은 기여를 하고 있습니다. 이러한 화학의 최신 연구를 바탕으로, 4차 산업혁명 시대에서 요구하는 화학 관련 직업군의 다변화에 대응하고, 화학분야 전문성을 강화할 수 있는 교육 방향과 방법을 찾아내어 화학 교육의 최신화와 선진화를 위한 발전 방향에 대한 논의의 장을 마련하고자 합니다.

| 심포지엄 3 |

[미래혁신 화학심포지엄]

Sub-nm 급 반도체용 소재 혁신 위한 화학의 역할

무어의 법칙에 따르면, 반도체 집적 회로의 성능은 24개월마다 두 배로 증가하고 제조 비용은 절반으로 줄어들게 됩니다. 이런 변화를 가능하게 하는 것이 반도체 미세화 공정입니다. 2031년에는 1 nm 급 반도체가, 2034년에는 sub-nm 급 반도체가 개발될 것으로 예측되고 있으나 이를 구현하기 위해서는 새로운 개념의 핵심 반도체 소재 개발이 관건입니다. 초미세 반도체 용 신소재 개발이 쉽지 않은 이유는 소재 분자 구조와 그 특성의 상관 관계를 이해하는 것이 매우 어렵기 때문입니다. EUV 레지스트 소재 분야에서는 전자와 분

자의 충돌에 관한 기초 과학적 이해가 부족하여 체계적인 소재 설계의 한계에 봉착해 있습니다. Ultra low-k 소재의 유전율 대비 기계 특성의 극대화가 필요하나 플라즈마 반응에서 저에너지 전자의 역할이 규명되어 있지 않아 많은 어려움을 겪고 있습니다. 이를 극복하기 위해서는 양자화학, 계산화학, 표면과학 등의 여러 물리화학 연구자와 무기화학, 유기화학, 재료화학의 연구자, 그리고 고체물리, 광학, 재료과학 분야의 연구자들이 협력하여 기초 이론 및 모델을 정립할 필요가 있으며, 특히 화학 분야의 기초 과학 연구자들이 주도적으로 전자-분자 충돌에 의한 분자 내 결합 해리 메커니즘을 정립할 필요가 있습니다. 본 심포지엄을 통하여 산학연 연구자들의 최신 반도체 소재 연구 및 개발 현황을 소개함으로써 여러 화학 분야 연구자들의 창의성과 기초 과학 연구 역량 및 지식을 바탕으로 sub-nm 급 반도체 용 소재 기술의 난제 해결을 모색할 수 있는 논의의 장을 마련하고자 합니다.

| 심포지엄 4 |

[미래혁신 화학심포지엄]

엔트로피 접근법을 통한 고성능 다성분계 거대분자 소재

거대분자 소재는 소재의 응용성으로 그 이용 범위가 급속히 확대되어 산업계의 큰 관심을 받고 있다. 특히 이종 물질의 블렌드를 통한 소재의 성능 향상은 산업계 뿐만 아니라 여러 학문 측면에서 시도가 되고 있다. 그러나 두 개의 비상용성 물질의 단순한 혼합 이성분계 블렌드를 통해 원하는 물성을 얻는다는 것은 아주 드문 경우로, 보다 이론적이고 다차원적인 접근 방법이 요구된다. 이에 본 발표에서는 다성분계 열역학적 엔트로피 접근법을 통한 소재의 성능 향상을 논의하고자 하며, 특별히 다성분계 거대분자 시스템에 대한 이해와 블렌드 morphology 분석, 상분리 제어를 통한 소재의 성능 향상을 다학제간 측면에서 논의하고자 한다.

| 심포지엄 5 |

[미래혁신 화학심포지엄] 상 전이 거동에 대한 융합적 이해

상 전이는 물질의 변화 현상을 보편적으로 기술할 수 있는 개념 틀로서, 다양한 화학 현상을 설명하는데 널리 활용되고 있습니다. 특히 고체 물질의 구조 변화, 나노 물질의 핵화, 생체 분자의 상 분리 및 섬유화 등 최근 연구 현장에서 높은 관심을 받고 있는 여러 현상이 상 전이를 통해 설명될 수 있습니다. 본 심포지엄에서는 분야를 막론하고 상 전이라는 개념으로 묶일 수 있는 여러 주제를 연구하는 연구자들을 모아 각 분야의 독창적인 관점을 공유하고 이를 통해 혁신적인 연구 아이디어를 창출하고자 합니다.

| 심포지엄 6 |

[KCS-ACS Applied Bio Materials Research Publications Summit]

나노바이오 화학 분야 주요 연구 트렌드와 도전

미국 화학회인 ACS Publications은 전 세계 화학 분야의 중요 저널을 보유하고 있으며, ACS-KCS Applied Bio Materials Research Publications Summit이라는 제목으로 제132회 대한화학회에서 특별심포지엄으로 개최합니다. 나노바이오 기술과 소재과학기술 분야를 주로 리딩하고 있는 ACS Applied Materials Interfaces, ACS Applied Bio Materials 등에서 활동하고 있는 미국화학회 에디터 및 국내 대한화학회의 리더들을 초청하였습니다. 이번 심포지엄에서는 화학 각 분야의 학문적 맥락, 발전 과정, 해결해야 할 난제, 최근 연구 동향 및 미래의 연구 방향에 대한 정보를 국내 화학자들과 공유하고자 합니다.

| 심포지엄 7 |

[IBS 심포지엄] 탄소 및 탄소 관련 재료

IBS 다차원 탄소소재 연구단(Center for Multidimensional Carbon Materials, CMCM)은 새로운 탄소 및 관련 소재(예: 질화붕소)를 합성하고 연구합니다. IBS CMCM은 다양한 합성 접근법과 다양한 기기를 사용하여 이러한 물질을 합성, 분석하고, 양자 분자 역학(및 기타)과 같은 최첨단 전산 모델링 방법을 사용하여 반응 경로, 에너지 지형, 특성을 더 깊이 탐구합니다. 이 심포지엄에서는 액체 금속 사용과 같은 새로운 합성 방법을 포함하여 탄소 및 질화붕소 재료의 최근 발전 내용을 소개합니다.

| 심포지엄 9 |

[KCS-RSC Joint 심포지엄] 에너지 과학의 다학제적 접근

국내 화학계의 국제적 위상의 재도약을 위해, RSC의 Chemical Science 및 Journal of Materials Chemistry 에디터들을 초청하여, RSC-KCS 에너지 심포지엄을 개최하고자 한다. 기후 변화에 따른 지속 가능한 에너지의 필요성이 매우 중요한 상황에서, 에너지 과학을 주제로, 소재화학, 물리화학, 인공지능 등 다학제간 관점에서 해결해야 할 난제, 최근 연구동향, 그리고 미래의 연구방향에 대해 토의하고, 국내화학자들과 공유하고자 한다.

2023년 대한화학회 화학포스터 그리기 및 화학시화 대회

- 수상작 -

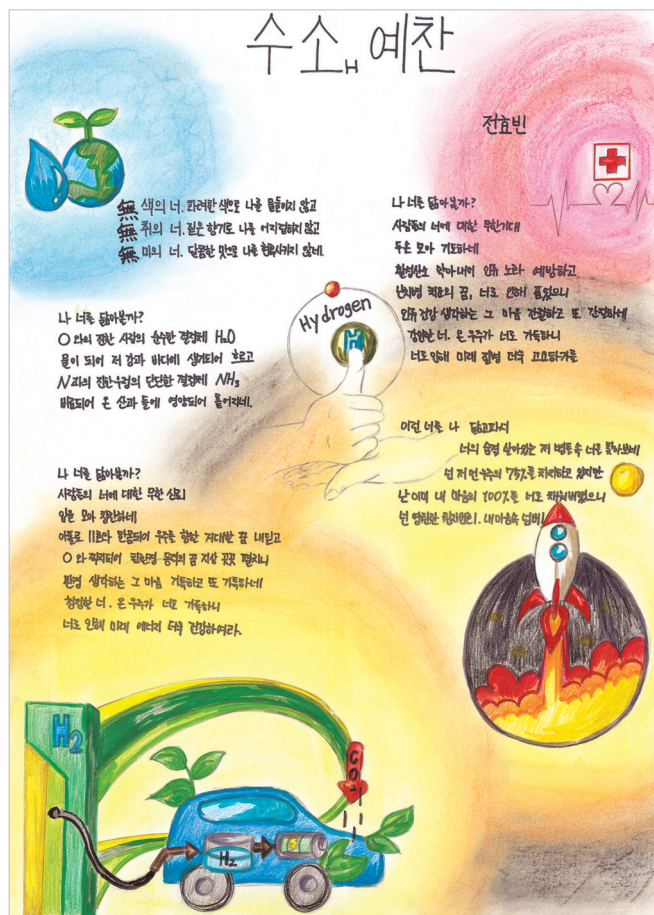
대한화학회 2023년 대한화학회 화학포스터 그리기 및 화학시화 대회에 참여해주신 모든 분들께 감사드립니다. 공정하고 신중한 심사를 통하여 선정된 수상작을 아래와 같이 소개해 드립니다. 본 대회에 관심을 가지고 참여해주신 모든 분들께 다시 한 번 감사드리며 공정하고 신중하게 심사를 해주신 심사위원분들, 그리고 이 대회를 후원해주신 분들께 감사드립니다. 이 대회를 통해 초·중·고 학생들이 화학에 대한 올바르고 좋은 인식을 갖고, 화학을 친근하게 느낄 수 있는 계기가 되기를 기대합니다.

대 상



포스터 부문 | 대상

인서현
(신승중학교)

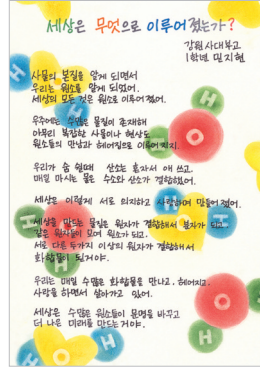


시화 부문 | 대상

전효빈
(인천과학고등학교)

화학포스터그리기 및 화학시화 대회 수상작은 “대한화학회 학술발표회, 총회 및 기기전시회” 기간(10월 25일-27일)동안 광주 김대중컨벤션센터에서 전시될 예정이며, 10월 27일(금)에 시상식을 진행할 예정입니다.

금 상



포스터 부문 | 금 상

시화 부문 | 금 상

김익현
(인천과학고등학교)

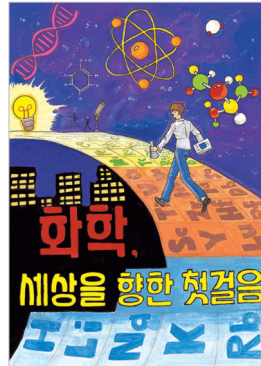
서인성
(인천과학예술영재학교)

윤정민
(인천과학고등학교)

민지현
(강원대학교사범대학부설
고등학교)

이중서
(인천과학고등학교)

은 상



포스터 부문 | 은 상

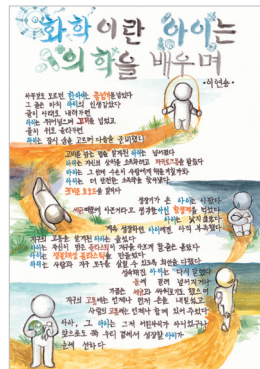
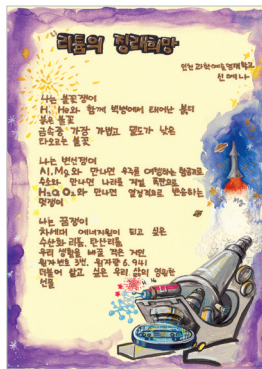
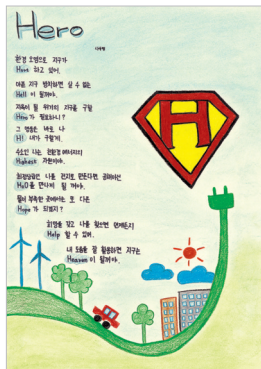
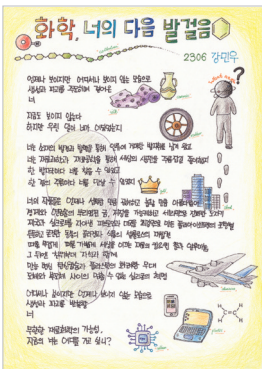
김민술
(강원대학교사범대학부설
고등학교)

김채린
(전주근영여자고등학교)

류동현
(인천과학고등학교)

정수빈
(창원대산고등학교)

허정빈
(창원대산고등학교)



시화 부문 | 은 상

강민우
(인천과학고등학교)

나우영
(인천과학고등학교)

신예나
(인천과학예술영재학교)

이연승
(전주근영여자고등학교)

지해인
(신송중학교)

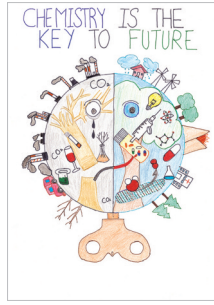
등 상



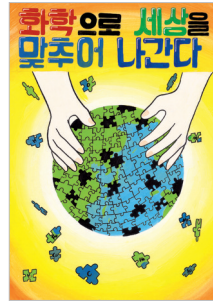
김예진
(창원대산고등학교)



서혜승
(창원대산고등학교)



아디야
(강원대학교사범대학부설고등학교)

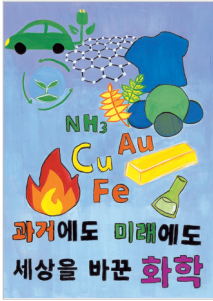


양채원
(창원대산고등학교)



이나경
(현동초등학교)

포스터 부문 | 동 상



이다현
(창원대산고등학교)



이현진
(부평여자고등학교)



전보민
(용곡중학교)



전선빈
(창원대산고등학교)

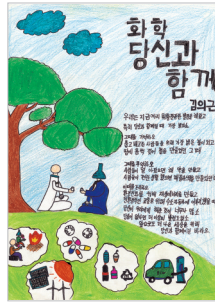


한어진
(강원대학교사범대학부설고등학교)

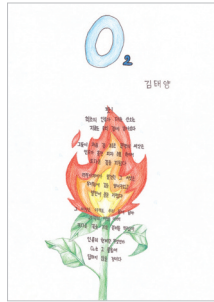
포스터 부문 | 동 상



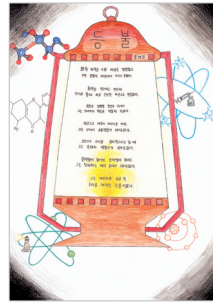
김대현
(대연고등학교)



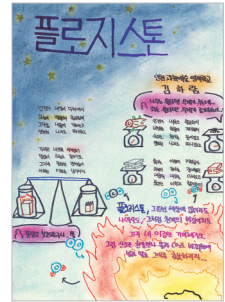
김의근
(홍천고등학교)



김태양
(강원대학교사범대학부설고등학교)



문세인
(강원대학교사범대학부설고등학교)

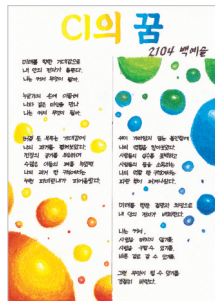


김하람
(인천과학예술영재학교)

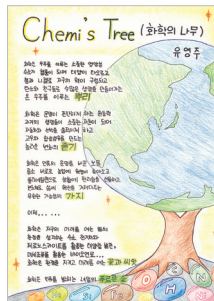
시화 부문 | 동 상



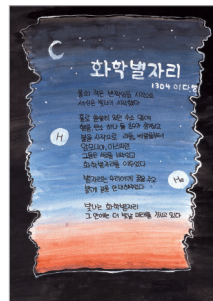
동혜담
(강원대학교사범대학부설고등학교)



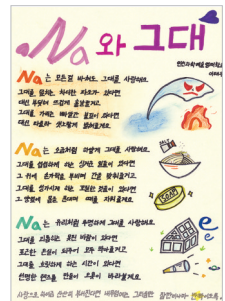
백예슬
(인천과학고등학교)



유정주
(인천과학고등학교)



이다영
(인천과학고등학교)



이태우
(인천과학예술영재학교)

시화 부문 | 동 상

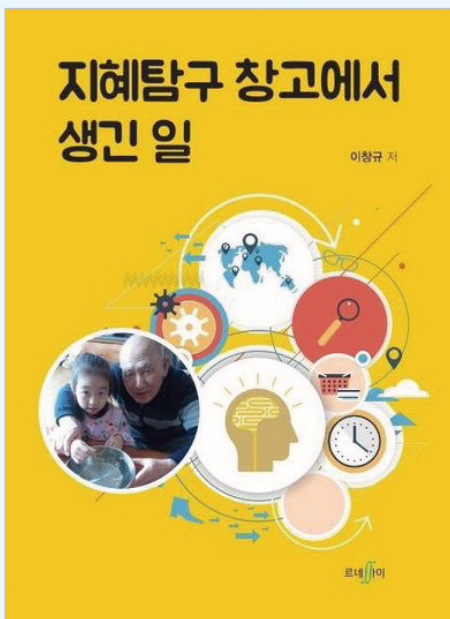
단체 상

포스터 부문 | 창원대산고등학교(담당교사: 진상민) 시화 부문 | 인천과학고등학교(담당교사: 양승원)



지혜탐구 창고에서 생긴 일

이창규 지음 | 르네사이 | 2023.6.25 출간
ISBN 9791198061997



목차

- I. 과학 실험 준비운동 1. 물체의 분류와 특징 / 2. 고체 기구의 설치 방법 / 3. 눈금 읽기 / 4. 실험기구들의 특징 비교
- II. 기체 1. 바람개비 / 2. 풍선 자동차 / 3. 공기의 성질 / 4. 입김과 공기의 차이 / 5. 풍선에 컵 매달기...(중략)...13. 버들피리
- III. 액체 1. 물체의 세 가지 형태 -물로 보는 고체, 액체, 기체 / 2. 액체가 액체를 만나면? / 3. 표면장력 / 4. 액체의 어느 점-물의 얼음과 소금물과 설탕물의 얼음 / 5. 액체의 끓는 점-물의 끓음과 소금물과 설탕물의 끓음...(중략)...22. 물의 전기분해
- IV. 고체 1. 고체의 중심 잡기 / 2. 양팔(막대) 저울 만들기 / 3. 소금과 모래의 분리 및 소금의 재결정 / 4. 고체는 어떤 액체에 잘 녹을까? / 5. 자석의 성질...(중략)...18. 톱니바퀴의 회전
- V. 특수 실험 1. 질량보존의 법칙 / 2. 액체의 종류 / 3. 비누 만들기 / 4. 전기도금

책 소개

저는 화학 교수로 약 35년을 가르치고 연구하다가 정년을 맞이한 지 이제 10년 반이 되었습니다. 정년 후 고향인 강원도 원주시 부론면 법천리 생가로 귀향하여 외양간과 창고, 돼지우리 등을 철거하고 15평 정도 되는 과학실을 지었습니다. 2013년 6월부터 동네 어린이들에게 과학실험을 가르치면서 제가 잘할 수 있는 일을 통해 고향에 진 마음의 빛을 갠 일을 해왔는데, 어린이들과 실험한 내용을 매번 정리하여 컴퓨터에 저장해 놓다 보니 자료가 정말 많이 모였습니다. 그것들을 편집한 것이 이 책의 내용입니다. 그리고 과학실을 열면서 현판을 '지혜탐구 창고'라고 썼기에 이 책의 제목도 비슷하게 정했습니다. 우리 과학실에서는 모든 참가자가 자기 기구를 가지고 실험합니다. 즉, 1인 1기구입니다. 그리고 화학 시약은 거의 사용하지 않습니다. 실험의 주제는 기체, 액체, 고체입니다. 기체로는 공기와 이산화탄소, 액체로는 물, 담근 소주, 식초 등을 주로 사용하고, 고체로는 소금, 설탕, 소다, 모래 등을 재료로 사용합니다. 그러기에 많은 실험은 집에서 싱크대, 욕실, 식탁 등을 이용하여서 할 수 있습니다. 물론 특별한 실험은 초등학교나 중학교의 과학실에서 할 수밖에 없습니다. 실험을 시작하기 전에 한자리에 모여 짧은 설명을 해주고 각자의 자리로 가서 이미 준비된 기구들로 실험한 후에는 다시 한자리에 모여 오늘 실험의 핵심 사항을 다시 정리합니다. 이때 많은 질문을 주고받습니다. 여기에 실린 실험들은 우리 과학실에서 실제로 진행하였던 실험을 바탕으로 기록한 것입니다.

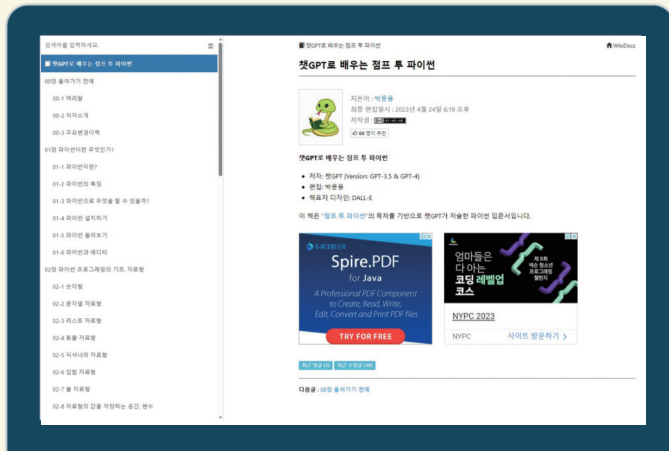
이 책을 참고해서 어린이들과 실험을 해보려는 부모님들에게 특별히 강조해서 말씀드리는 것은 자녀들이 일찍부터 수치 개념을 습관화하도록 지도하시라는 것과 어떤 실험이든 얼마든지 잘 안될 수 있다는 것 그리고 제시된 질문에 다양한 답을 말할 수는 있지만 정답은 없다는 것을 항상 염두에 두시고 자녀들이 스마트폰에 빠지는 것보다는 과학실험이 훨씬 더 흥미롭고 유익함을 일깨워 주시기를 바랍니다. 어떤 물체를 접했을 때 그것의 이름, 모양, 무게, 부피, 길이 등을 말하고 기록하는 습관을 어린이가 일찍부터 생각과 행동의 중심에 놓고 살아간다면 반드시 무엇이든지 할 수 있는 어른으로 성장하리라 확신합니다.

어떤 동기로든 집에서나 학교에서 실험하는 어린이들과 부모님 그리고 교사 선생님들에게 감사와 칭찬을 아낌없이 드립니다. 혹시라도 이 책에 수록된 실험에 대해서 의문이 있으면 저에게 연락해 주시기를 바랍니다. 또 해보고 싶지만, 실험기구가 부족하다거나 특수 실험 같은 것을 직접 해보고 싶으면 저에게 연락해 주시기를 바랍니다. 우리 과학실 방문도 환영합니다.



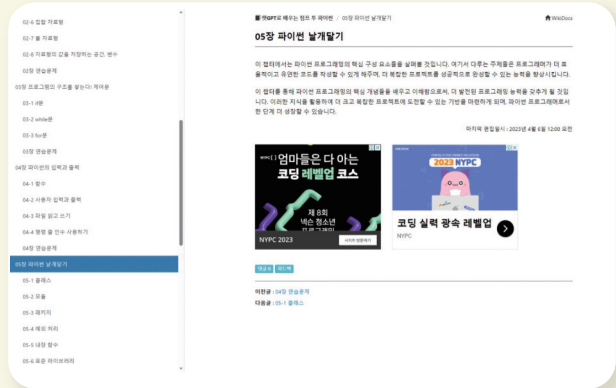
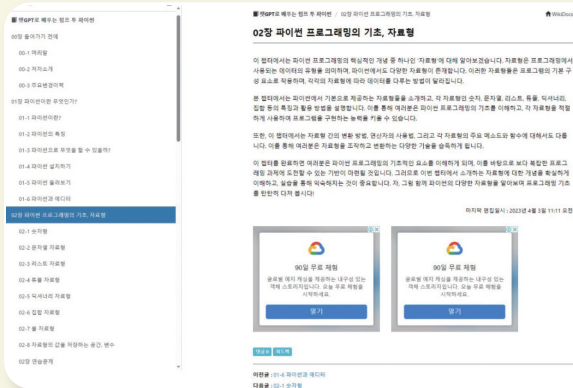
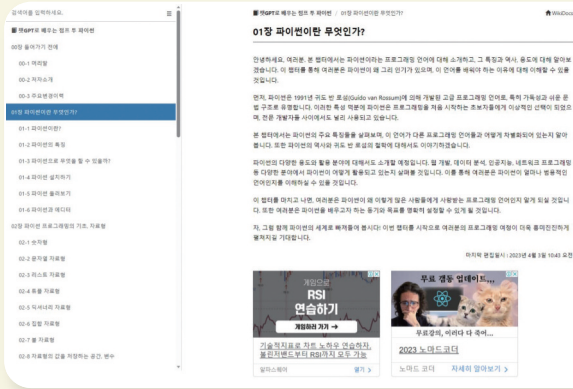
챗GPT로 배우는 점프 투 파이썬

(https://wikidocs.net/book/9291)



플랫폼 소개

이번 8월호에는 모바일 앱이나 웹 플랫폼이 아니라 강좌를 소개해 드리하고자 합니다. 이 강좌는 웹으로 제공되는 파이썬 강좌입니다. 이미 “점프 투 파이썬”으로 유명한 지은이 박응용씨가 100% 인공지능을 이용해 제작한 강좌라는 점에서 특이합니다. 박응용씨는 파이썬 강좌의 목차를 ChatGPT 프롬프트에 입력하고, ChatGPT가 작성한 답변을 토대로 강좌를 제작하였습니다. 책표지 디자인 역시 인공지능인 DALL-E를 사용하였습니다. 따라서 이 책의 편집자는 박응용씨이고 저자는 ChatGPT (GPT-3.5 & GPT-4)로 명시되어 있습니다. 편집자가 말한 바로는, ChatGPT가 저술한 “챗GPT로 배우는 점프 투 파이썬”은 기술서적으로 전혀 손색이 없는 수준이라고 합니다. 기술서적 저작의 미래를 보여주는 한 장면이기도 한 “챗GPT로 배우는 점프 투 파이썬”은 학생들과 연구자들에게도 큰 도움이 됩니다. 웹 강좌를 무료로 공개했기 때문에, 파이썬을 공부하고자 하는 대한화학회 회원에게 매우 소중한 자료라고 생각합니다. 데이터 분석, 모델링, 인공지능, 그래프 그리기 등 파이썬의 활용도가 무궁무진하기 때문에, 회원 여러분께서 이 강좌를 통해 파이썬을 더 쉽게 배울 수 있기를 기대합니다.



>>> 운영위원회

7월 운영위원회

2023년 7월 30일에는 제10차 운영위원회가 대한화학회 사무국에서 온·오프라인 하이브리드 형태로 진행되었다. 운영위원회에서는 먼저 지난 7월 9일부터 14일까지 실시된 ACC (Asian Chemical Congress)에 신석민 회장의 참가 및 관련 ACC 협의체 활동사항에 대해 공유하는 시간을 가졌다. 특히 대한화학회 신석민 회장이 ACC executive committee로 선출되었을 공유하였으며, 2024년 봄 한국에서 개최될 ACC Executive Committee 회의의 행사준비를 위하여 2023년 예산을 일부 명시하여 이월하기로 하였다. 또한, 지난 7월 28일에 실시된 학회-과총 간담회의 결과를 공유하는 시간을 가졌으며, 이에 대한 보고로 다음 연도 과총의 학술활동지원사업의 예산이 소멸함에 따라, 향후 정부의 각종 정책에 원활한 대응을 위해 9월 중에 현, 차기 임원진의 회담을 통한 '정부 정책대응위원회'를 구성하기로 하였다. 또한, 학회 간 교류 활성화를 위하여 한국화학공학회에서 제안한 대한화학회-한국화학공학회 친선 테니스 대회를 개최하기로 하여, 행사 진행 일자와 진행 방법 등을 한국화학공학회와 협의하여 추후 논의하기로 하였다. 현재 추무분과에서 추진 중인 대한화학회 홈페이지 개편을 위한 주관 업체로 아이사이트, 이스웨이, 씽크온 등의 견적서와 업체별 제안 내용을 공유하였으며 주관 업체 최종 선정은 8월 14일에 시행될 대한화학회 운영위원회 워크숍에서 보다 심층적으로 논의 후 결정하기로 하였다. 화학세계 온라인 발간에 관련하여서는 9월 1일부터 관련 웹사이트를 정식 오픈하기로 하고 화학세계 내에 지면 안내를 통해 실시 내용을 홍보하기로 하였다. 추가로 신규 오픈되는 화학세계 웹페이지 내 후원사 및 협찬사 광고에 대한 절차, 비용 등에 관련하여 논의가 있었다. 운영위원회에서는 2023년 추계 대한화학회 학술발표회에서 실시될 '젊은 화학자 특별 심포지엄' 관련하여 현재 분과별로 추천한 18인의 연사가 추천됨에 따라 행사진행 시간 등을 고려하여 2~3명의 연사를 추천한 분과에 연사 감원 조정을 요청하기로 하였다. 또한 추계 대한화학회 학술발표회에서 개최될 'KCS-RSC Joint Symposium: Multidisciplinary Approach to Energy Science' 관련하여 국제협력분과에서 지난 6월 19일에 RSC 측과 줌 미팅을 하여 관련 프로그램을 확정하여 이를 공유하는 시간을 가졌다. 행사 관련하여 초청연사에게는 \$3000을 지원하기로 하고 숙박은 초청 연사만 지원하고 패널 등의 참

석자 숙박지원 여부는 예약만 대행하기로 하였으며, 추가 비용부담 등은 초청레터를 확인하여 추후 결정하기로 하였다. 또한 KCS-ACS Publication MOU를 통해 출판 업무를 진행할 한국 측의 정식 직원을 채용하기로 하였으며, 실제 채용은 ACS에서 진행하지만, 대한화학회에서 인재 추천이 가능하므로 화학 관련 학위, 출판 업무 경험 등을 고려하여 인재를 심사하고 최종 추천하기로 하였다. 8월 14일에는 운영위원회 워크숍을 진행하기로 하고 부서별로 차기연도 임원진으로의 원활한 업무 인수인계를 위한 자료를 준비하여 워크숍에서 공유하는 시간을 갖기로 하였다.

>>> 지부·분과회

경남지부

- 행사명: 2023년 대한화학회 영남지역 공동학술대회
- 개최기간: 2023년 8월 17일~2023년 8월 18일
- 개최장소: 경상국립대학교
- 담당자: 김주영 교수(경상국립대학교, chris@gnu.ac.kr)
- 참석인원: 100명
- 발표편수: 교수 구두발표(9편), 포스터 발표(50편 내외)
- 내용: 초청연사 특강, 학생 포스터 발표, 영남지역 공동 연구 활성화를 위한 간담회

유기화학분과회

- 행사명: 2023년 제23회 유기화학분과 하계워크샵
- 개최기간: 2023년 8월 23일~2023년 8월 25일
- 개최장소: 평창 알펜시아 리조트
- 주최: 유기화학분과회
- 담당자: 홍승우 교수(KAIST, hongorg@kaist.ac.kr)
- 참석인원: 800명
- 발표편수: 튜토리얼(3편), 특별강연(4편), 학생 구두발표(10편), 포스터 발표(200편 내외)
- 내용: 튜토리얼, 특별강연, 학생 구두발표, 학생 포스터 발표, 유기화학 분과회 공동연구 활성화를 위한 간담회

>>> 부 고

2023.7.29	이홍인(경북대 화학과) 회원	빙모상
2023.7.22	이무상(경북대 화학교육과 명예교수) 회원	별세
2023.7.19	김민경(한양대학교 화학과) 회원	모친상
2023.7.18	이보람(부경대학교 물리학과) 회원	모친상
2023.7.18	이민영(이화여자대학교 화학나노과학과) 회원	별세
2023.7.10	정용석(충북대 화학과 명예교수) 회원	별세



대한화학회장상, 외부단체협찬상

※수상후보자는 선정되는 해를 포함하여 최근 연속 3년 이상 대한화학회 회원이어야 합니다.

시상시기	상	구분	시상주기	수상인	상금	공고	후보자 추천 마감
춘계	학회상	공로상	매3년 춘계	1인	100만원	시행 전 연도 12월	시행 연도 1월 중순
		학술상	매년 춘계	1인	600만원		
		우수논문상	매년 춘계	1인	100만원		
		화학교육상	홀수연도 춘계	1인	50만원		
		학술진보상	매년 춘계	Bulletin지 1인, 대한화학회지 1인	각 100만원		
		교육진보상	매년 춘계	1인	50만원		
	외부상	한만정 학술상*	매년 춘계	1인	3,000만원 내외**	시행 연도 1월	시행 연도 2월 초
		전민제화학인상	매년 춘계	1인	500만원		
추계	학회상	기술진보상	매년 추계	1인	50만원	시행 연도 6월	시행 연도 6월 말
		초중등학교화학교사상	매년 추계	1인	50만원		
		우수박사학위논문상***	매년 추계	5인 내외	20만원		
		우수지부(회)상****	매년 추계	1개 지부(회)	50만원		
		화학경영자상	매년 추계	1인	순금 상패		
		이태규학술상	매년 추계	1인	500만원		
	외부상	KCS-Wiley 젊은화학자상	매년 추계	1~2인	150만원	서울, 지방소재 각1인 각 300만원	
		Sigma-Aldrich 화학자상	매년 추계	2인			
아이센스 여성화학자상		매년 추계	1인	500만원			
춘·추계	포스터상	대한화학회 포스터상	매년 춘,추계	40인	상장 및 부상	시행 연도 3월, 9월	선정위원회 별도 구성
		IUPAC 포스터상	매년 춘계	3인			
		동우화인켄(주) 포스터상	매년 춘·추계	2인			

* 2017년도 제2차 이사회(2017.9.22) 의결에 따라 '헬스켄 한만정 학술상'에서 '한만정 학술상'으로 상의 명칭이 개정됨.

** 후원금과 주식의 배당금에 따라 변동될 수 있음.

*** 우수박사학위논문상의 수상자격, 추천 및 심사 절차는 별도의 공고문을 통해 확인.

**** 우수지부(회)상: 전년도에 개최된 학술발표회에 참석한 소속 회원 수의 비율과 지부(회)에서 주관한 학술활동 등으로 학회 발전에 기여한 1개 지부(회) 선정.

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

새로운 적외선 현미경 시스템!

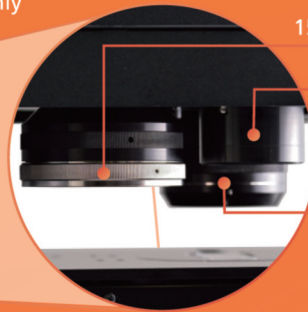
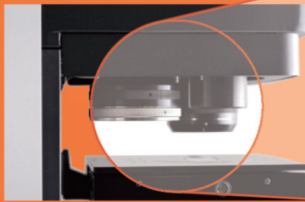
Infrared Microscope

AIMsight™

SHIMADZU AIMs to
provide analysis systems for all users.



Determines the measurement position smoothly
by capturing the measurement target with
a wide field of view

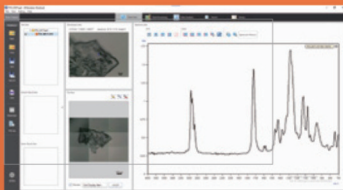


15x reflective objective mirror

Wide-field camera

Grazing Angle Objective
(optional)

Exports
the measurement results



Observe
Wide-field camera



Measure
Automatic contaminant
recognition system
Highest class S/N
Length measurement function



Analyze
Original library of high hit ratios*
Contaminant analysis program
Spectrum advisor function
*Optionally available

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.