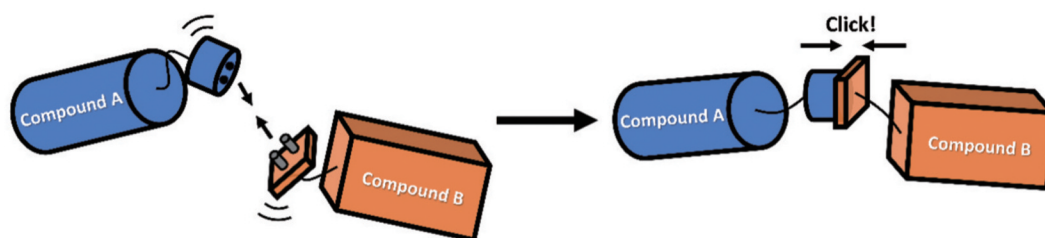




Sulfur(VI) Fluoride Exchange Click Chemistry



Functional Groups



Sulfonyl fluorides

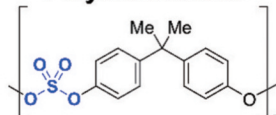


Fluorosulfates



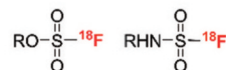
Sulfamoyl fluorides

Polymerizations



Polysulfates

Radiochemistry



11
2023

<이달의 하이라이트> SuFEx 화학은 차세대 클릭 화학으로 주목받고 있으며 고분자 및 방사화학 분야를 포함하여 여러 응용 분야에서 활발히 이용되고 있다.

읽기쉬운 총설

단분자 이미지를 이용한 유전자 발현 동역학 연구

이달의 하이라이트

차세대 클릭 화학인 SuFEx 화학과 이를 이용한 방사화학을 포함한 응용 분야에 대한 고찰

화학교육

분광광도계를 활용한 미량의 BTB로 pH 측정

우수선도연구기관

고려대학교 나노화학연구실/다성분나노입자구조론연구단

INTERVIEW

화학세계가 만난 화학자 | 최철호 교수

“앞서가는 화학회, 공식후원사와 함께 합니다”



지속적인 기술 혁신을 지향하는 동우화인켐은

대한민국 IT산업의 중심에 서 있습니다!

START

TOP PARTNER

CHALLENGE

DONGWOO
FINE-CHEM

SUMITOMO CHEMICAL

5G

디스플레이 전자 재료 및 화학 분야의
GLOBAL COMPANY

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

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

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

AIRsight™

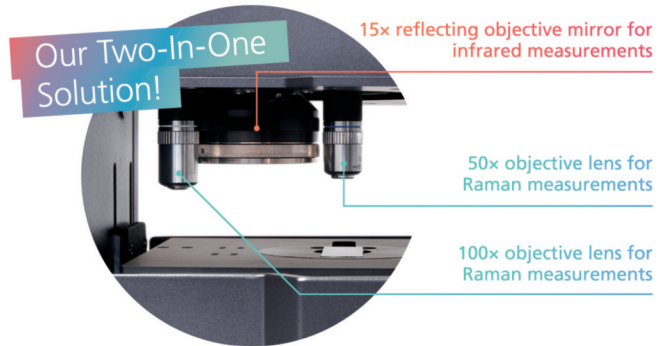
Raman and FTIR microscopy
in perfect harmony



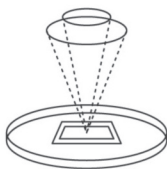
Infrared Spectroscopy and Raman Spectroscopy

상호 보완적인 분자 정보를 제공하기 위해
두 가지 분석 기술을 결합한 IR & Raman 현미경!

이 간단한 시스템은 시료 관찰에서 데이터 분석에 이르기까지
모든 프로세스 단계를 쉽게 수행할 수 있도록 하여
분석 작업의 효율성을 향상시킵니다.

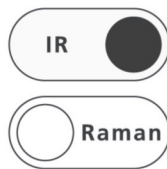


3S Microscope



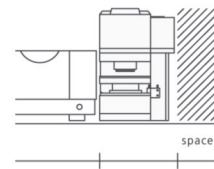
Same position
is measured by IR and Raman

시료 위치를 변경하지 않고
IR과 Raman 측정이 가능합니다.



Smart software
controls IR and Raman

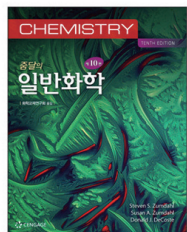
소프트웨어에서 IR 측정과 Raman
측정 모드를 매우 쉽게 전환합니다.



Single system
saves space

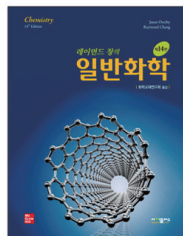
IR과 Raman의 측정이 하나의 기기에서
가능하므로 공간 효율적입니다.

줌달의
일반화학 10판



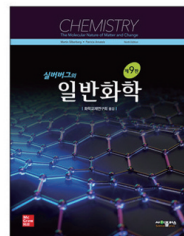
저 자: Zumdahl
판 수: 10
발 행: 2019
페 이 지: 1168
I S B N: 9788962184358

신간 레이먼드 창 의
일반화학 14판



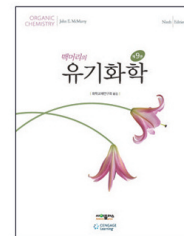
저 자: Overby, Chang
판 수: 14
발 행: 2023
페 이 지: 1080
I S B N: 9791188731343

신간 실버버그의
일반화학 9판



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

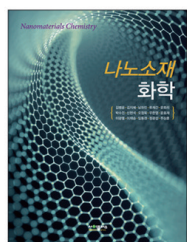
맥머리의
유기화학 9판



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

★대한민국학술원 우수학술도서

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



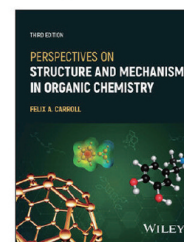
역 자: 윤우진, 윤호섭
판 수: 1
발 행 일: 2022
페 이 지: 236
I S B N: 9791188731329

Biochemistry



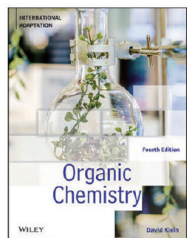
저 자: John T. Tansey
판 수: 1
발 행: 2022
페 이 지: 1008
I S B N: 9781119820802

신간 Perspectives on Structure and Mechanism in Organic Chemistry 3/e



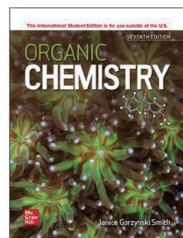
저 자: Carroll
판 수: 3
발 행: 2023
페 이 지: 864
I S B N: 9781119808619

신간 Organic Chemistry 4/e



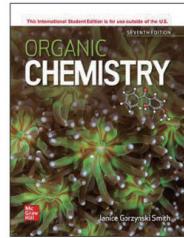
저 자: David R. Klein
판 수: 4
발 행 일: 2022
페 이 지: 1178
I S B N: 9781119820833

근간 스미스의
유기화학 7판



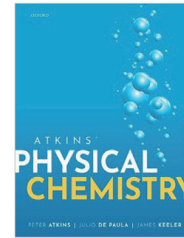
저 자: Smith
판 수: 7
발 행 일: 2024

근간 Organic Chemistry 7/e



저 자: Smith
판 수: 7
발 행 일: 2024
페 이 지: 1400
I S B N: 9781266223938

근간 앳킨스의
물리화학 12판



저 자: Atkins
판 수: 12
발 행 일: 2024

Starlet®

국내 LAB 시험기 선두 기업!!

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



자동 배출형 건조기
[코팅 경화기]
Mini Dryer (DL-2015)

그라비아 코팅기 Gravure Coater (DL-2500GV)



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



QR코드로 대림스타릿(주) 홈페이지에 접속하여 다양한 제품을 알아보세요!

DaeLim Starlet
DAELIM STARLET CO., LTD

경기도 시흥시 옥구천동로 34 (시화공단 2바 115호) | 34, Okguchenondong-ro, Siheung-si, Gyeonggi-do, Korea

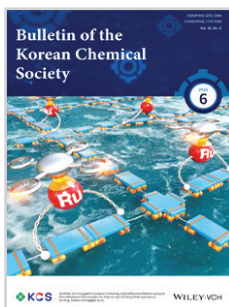
+82-31-499-6446

www.daelimlab.com

dl1001@daelimlab.com

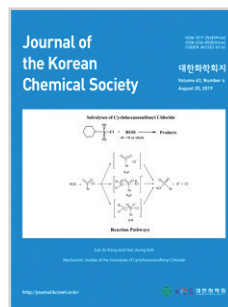
본 제품의 사양 및 외형치수 등은 제품의 개선을 위하여 예고없이 변경될 수 있습니다. The specifications are subject to alter or modify the appearance without notice.

대한화학회 발간(참여) 학술지



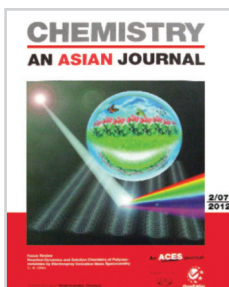
Bulletin of the Korean Chemical Society

- 월간
- SCI 저널
- 언어: 영어



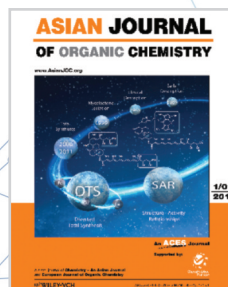
Journal of the Korean Chemical Society

- 격월 간행
- 언어: 한글, 영어



Chemistry - An Asian Journal

- 월간
- ACES와 Wiley-VCH 공동발행



Asian Journal of Organic Chemistry

- Wiley-VCH에서 발행하는 Chemistry, An Asian Journal 자매지



ChemNanoMat

- Wiley-VCH에서 발행하는 Chemistry, An Asian Journal 자매지



Physical Chemistry Chemical Physics

- 대한화학회를 포함한 18개국 화학회에서 공동 발행하는 RSC 저널

2023년 11월 광고 목차

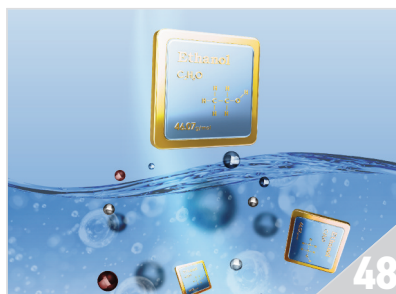
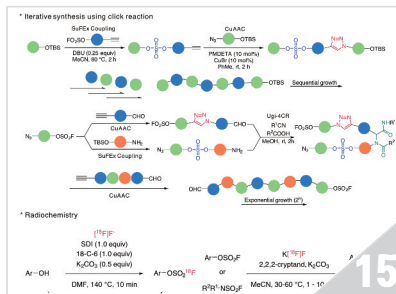
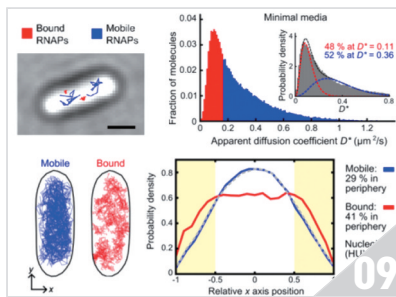
- 뒤표지 바이오니아
- 앞표지 안쪽 동우화인켐
- 뒤표지 안쪽 아이센스
- p.01 시마즈 사이언티픽 코리아
- p.02 사이플러스
- p.03 대림스타릿(주)

2023년 운영진

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

2023년 화학세계 편집위원회

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



NEWS

- 06 KCS 캘린더
- 07 이달의 학회
- 31 신진연구자 소개 · 김연준
- 39 신진연구자 소개 · 김재욱
- 58 월간학회소식

PAPER

- 09 읽기 쉬운 총설 | 단백질 이미징을 이용한 유전자 발현 동역학 연구 · 박수진, 이남기*
- 15 이달의 하이라이트 | 차세대 클릭 화학인 SuFEx 화학과 이를 이용한 방사화학을 포함한 응용 분야에 대한 고찰 · 김민평, 양홍선, 전중현, 홍성유*

SPECIAL

- 26 우수수도연구기관 | 고려대학교 나노화학연구실/다성분나노입자구조조연연구단 · 이광렬
- 32 INTERVIEW | 화학세계가 만난 화학자 · 최철호
- 42 KCS 하이라이트 | 헤테로고리 주변부 반응 개발 연구 · 송무건, 정원진

EDUCATION

- 22 화학 교육 | 분광광도계를 활용한 미량의 BTB로 pH 측정 · 하양훈

COLUMN

- 48 화학칼럼 | 생명과 진실의 물, 에탄올 · 장홍재
- 51 화학칼럼 | 화학사 돌아보기 ⑩: 리비히, 빌러, 뒤마 · 최정모

TREND

- 46 우리 실험실은요! | 연세대학교 시스템생물학과 구조생물학 실험실 · 김의진
- 55 화학만평
- 56 Book & App

ADVERTISING & CAMPAIGN

- 04 대한화학회 발간(참여) 학술지
- 07 클린 인터넷을 선언합니다
- 59 대한화학회장상, 외부단체협찬상
- 60 지면광고 안내/회비 및 구독료 안내

2023

KCS
CALENDAR



NOVEMBER

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		

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)

August

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

September

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

October

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

December

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

CONFERENCE OF THE MONTH

2023년 11월 22일~24일

Single-Molecule Sensors and NanoSystems International Conference (S3IC 2023)

장 소 | Barcelona, Spain

안 내 | <https://premc.org/conferences/s3ic-single-molecule-sensors-nanosystems/>

2023년 11월 23일~24일

13th World Congress on Green Chemistry and Technology

장 소 | Amsterdam, Netherlands

안 내 | <https://greenchemistry.chemistryconferences.org/>

클린 인터넷을 선언합니다



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

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

※ 관련법에 어긋나는 사례를 발견하시면 화학회의 cleankcs@kcsnet.or.kr로 연락해주시길 바랍니다.

'정보통신망 이용촉진 및 정보보호 등에 관한 법률' 제70조(벌칙)

- ① 사람을 비방할 목적으로 정보통신망을 통하여 공공연하게 사실을 드러내어 다른 사람의 명예를 훼손한 자는 3년 이하의 징역이나 금고 또는 2천만원 이하의 벌금에 처한다.
- ② 사람을 비방할 목적으로 정보통신망을 통하여 공공연하게 거짓의 사실을 드러내어 다른 사람의 명예를 훼손한 자는 7년 이하의 징역, 10년 이하의 자격정지 또는 5천만원 이하의 벌금에 처한다.
- ③ 제1항과 제2항의 죄는 피해자가 구체적으로 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 · VIII

생물 복잡계에 대한 물리화학 연구

PART

2

단분자 이미징을 이용한 유전자 발현 동역학 연구

박수진, 이남기* | 서울대학교 화학부
namkilee@snu.ac.kr

단분자 이미징을 이용한 유전자 발현 동역학 연구

박수진, 이남기* | 서울대학교 화학부, namkilee@snu.ac.kr

서론

단분자 이미징(single-molecule imaging)은 생체 분자의 기능 및 작동 메커니즘을 연구하는 데 있어 매우 유용한 도구이다. 용액에서의 실험이 수많은 분자들의 평균적인 특성만을 도출하는 것과 달리, 단분자 수준에서 생체 분자를 관찰하면 분자들의 여러 상태들을 포착하고, 시간에 따른 상태들의 전이와 분포 변화를 알 수 있다. 단분자 이미징이 제공하는 생체 분자의 이질성(heterogeneity)과 동역학(dynamics)에 대한 정보는 정교한 생체 분자의 작동 메커니즘을 설명하는데 결정적인 실마리를 제공해왔다. 이러한 단분자 이미징 기술은 1990년대, 형광공명전달현상(FRET)을 이용한 단분자 검출이 보고되면서 급진적으로 발전하였다.¹ 광집계(optical tweezer), 전반사 현미경(total internal reflection microscope), 공초점 현미경(confocal microscope), 등 다양한 기술이 개발 및 응용되어 생체 분자의 물리적 특성과 동역학에 대한 연구가 급속도로 발전하게 되었다.^{2,3} 현재 단분자 이미징 기술들은 생체 분자 연구에 있어서 필수적인 연구 기술로 자리 매김하고 있다.

그러나 이러한 단분자 기술들은 생체 분자의 정제를 요구하며, 세포 밖에서 이루어진다는 한계를 가지고 있다. 세포 내부에는 수많은 생체 분자들이 존재하며, 이들의 복잡한 상호작용에 의해 다양한 생화학 반응들과 세포 내 구조 형성이 일어난다. 이러한 복잡한 현상들을 세포 밖에서 구현하는 것은 매우 어려워 단백질 자체의 기능에 관한 연구가

주로 이루어졌다. 또한, 세포 내의 생체 분자 거동은 세포 밖에서 관찰된 결과와 상이할 가능성도 존재한다. 이러한 이유로 세포 내부에서 일어나는 현상을 직접 이해하는 것은 현대의 생물학 및 의학 분야의 궁극적 목표라 할 수 있다. 이러한 중요성으로 인해 단분자 이미징 기술들은 세포 내의 생체 분자 거동을 직접 관찰하는 분야의 발전으로 이어졌다. 2000년대에 최초로 살아 있는 박테리아 세포에서 실시간으로 단일 단백질의 생성을 관찰한 것을 시작으로,⁴ 현재까지 많은 세포 내의 생물학적 현상들이 단분자 이미징 기술을 통해 규명되었다. 본 총설에서는 단분자 이미징에 의해 가장 활발하게 연구된 생물학적 과정인 박테리아 세포 내 유전자 발현(gene expression)의 동역학에 대한 연구들을 소개할 것이다. 이를 통해 단분자 이미징 기술의 발전 역사와 세포 내 현상을 직접 관측하는 연구 방식의 중요성을 설명하고자 한다.

본론

1. 살아 있는 박테리아 세포 내 단일 단백질 이미징

형광 단백질이 발견 및 광학적 성질이 개량되면서, 타겟 단백질을 형광 단백질로 표지하여 비침습 방법인 형광 이미징을 통해 살아 있는 세포 내부의 단백질을 관찰할 수 있게 되었다. 그러나 단일 분자 수준의 단백질을 관찰하는 데에는 많은 어려움이 있었다. 세포 내부에 형광 단백질 외에도 형광을 방출하는 많은 분자들이 존재하여 세포 자

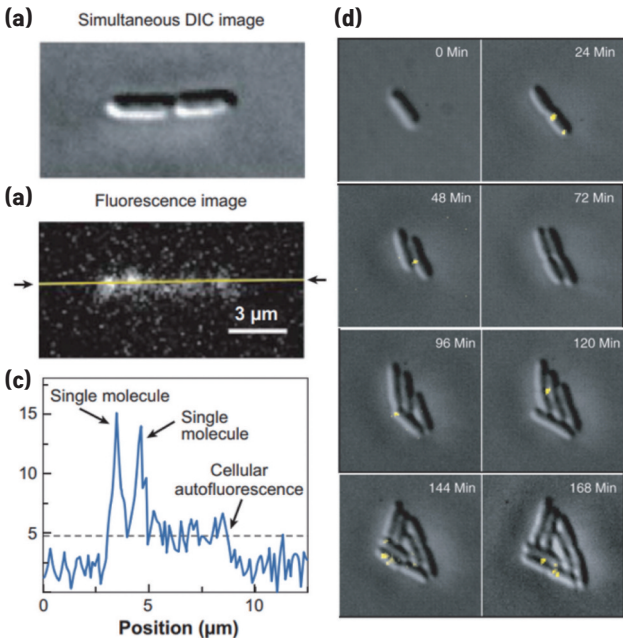


그림 1. (a) 대장균 세포의 Differential interference contrast (DIC) 이미지. (b) Tsr-YFP 단백질이 발현된 대장균 세포의 형광 이미지. (c) (b)의 노란 선을 따라 검출된 형광 신호. (d) 살아 있는 대장균 세포에서 실시간으로 관측된 Tsr 단백질의 생성. [인용 논문에서 발췌⁵]

체에서 자동형광(autofluorescence)을 방출하기 때문이다. 세포 내의 단일 단백질을 이미징 하기 위해서는 자동형광과 단일 단백질로부터 방출되는 형광 신호를 구분해 내는 방법이 필요하였다.

2006년, Harvard대의 Sunney Xie 그룹은 살아 있는 대장균 세포 내부에 Tsr이라는 세포막 단백질에 황색 형광

단백질 (yellow fluorescent protein, YFP)을 결합시켜 단일 단백질을 이미징 하는 데 성공하였다[그림 1a,b].⁴ 세포 내부를 자유롭게 확산하는 세포질 단백질의 경우, 통상적인 이미지 습득 시간 동안(약 100 밀리초) 세포 내부를 빠르게 움직이기 때문에 형광 신호가 자동 형광보다 작게 된다. 반면, 세포막 단백질은 위치가 고정되어 있기 때문에 이미지 습득 시간 동안 형광 신호가 한곳에 누적되어 강한 형광 신호를 검출할 수 있다. 그 결과, [그림 1c]와 같이 자동형광과 단일 단백질의 형광 신호가 뚜렷하게 구분되었다.⁵ 이 방법을 이용하여 Xie 그룹은 세포 내부에서 Tsr 세포막 단백질이 생성되는 것을 실시간으로 관측하였다[그림 1d]. 그 결과, 세포 내 단백질 합성은 하나의 mRNA로부터 여러 개의 단백질이 합성되는 burst 형태로 일어나며, 한 번의 burst에서 합성되는 단백질의 개수는 기하 분포(geometric distribution)를 따른다는 것을 최초로 규명하였다.

2. 전사 인자(transcription factor) 단백질의 세포 내 확산 규명

전사 인자는 DNA에 결합해서 RNA를 생성하는 RNA 중합효소의 전사(transcription)를 촉진 혹은 억제하여 유전자 발현 조절에 핵심적인 역할을 하는 단백질이다. 약 460만 개의 염기쌍으로 이루어진 대장균의 긴 염색체에서 전사 인자가 어떻게 특정 DNA 서열(약 6-10 염기서열)을 찾아내 결합하는지는 오랫동안 풀리지 않는 난제였다. 세포 밖 실험을 통해 전사 인자가 세포질에서는 비교적 느린 3차원 확산으로 이동하다가, DNA에 결합한 후에는 1차원 확산,

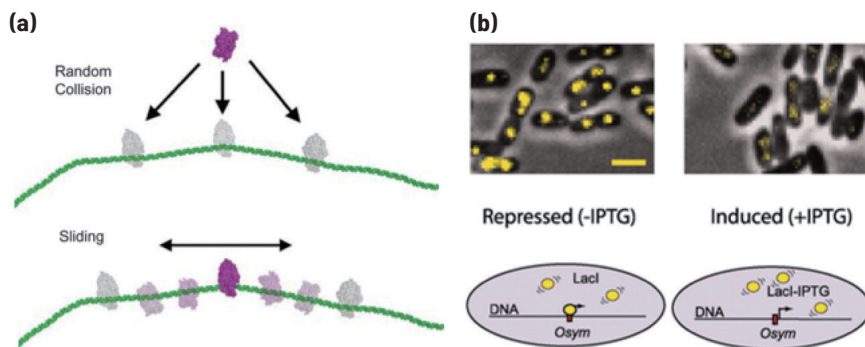


그림 2. (a) 전사 인자가 가질 수 있는 두 가지 확산: 세포질 내 3차원 확산 (위)과 DNA 결합 시 1차원 확산 (아래). (b) IPTG 처리 유무에 따른 LacI-YFP 단백질이 발현된 대장균 세포의 형광 이미지. [인용 논문에서 발췌^{7,9}]

즉, DNA를 따라 미끄러짐 (1D-sliding)을 통해 빠르게 이동하면서 결합 부위를 찾아낸다는 모델이 제시되었다[그림 2a].^{6,7} 그러나, 이러한 현상이 정말로 세포 내에서 일어나는지는 검증되지 않았다. 2007년, Xie 그룹은 살아 있는 대장균 세포 내부에서 lac 오페론의 억제 인자인 LacI 단백질을 단일 분자 수준으로 관찰하였다.⁸ 그들은 세포 내에서 매우 적은 수의 황색 형광 단백질이 달린 LacI 단백질을 발견시켰다. 세포 내에 아이소프로필 β-D-1-티오갈락토피라노사이드(IPTG)가 없는 경우, LacI 단백질이 DNA에 결합한 채로 위치가 고정되어 자동 형광과 구분되는 형광 신호가 검출되었다[그림 2b, 왼쪽]. 반면 IPTG 처리 시, LacI 단백질이 DNA로부터 분리되어 세포질 내부를 자유롭게 확산하기 때문에 이미지에서 희미한 형광 신호만이 나타났다[그림 2b, 오른쪽]. 이러한 차이를 토대로, Xie 그룹은 세포 내 LacI 단백질의 DNA 결합 반응 속도와 확산 계수를 측정할 수 있었다. 더 나아가서, 2012년 Elf 그룹의 후속 연구에서는 LacI 단백질이 DNA에 결합한 후 1차원 확산하는 거리와 그 빈도를 구하였다.⁹ 이러한 결과들을 통해 세포 내에서 일어나는 LacI 단백질 확산의 동역학을 확인하고, 전사 인자가 DNA에서 빠르게 결합 부위를 찾아내는 기작을 비로소 정확하게 이해할 수 있게 되었다. 이 연구 결과는 세포 밖에서는 구현할 수 없는 실험이라는 점에서, 세포

내에서의 연구의 중요성을 잘 보여주는 것이라 평가할 수 있다.

3. 세포 내 리보솜(ribosome) 소단위의 실시간 거동 추적

핵막에 의해 전사와 번역(translation)이 공간적으로 분리된 진핵 생물과 달리, 핵막이 없는 박테리아에서는 전사와 번역이 공간적 분리 없이 일어난다. 때문에 RNA 중합 효소에 의해 mRNA가 합성되는 동시에 리보솜이 붙어 번역을 일으킬 수 있다. 그 결과 전사와 번역의 활성도가 밀접하게 연관되어 박테리아의 유전자 발현 조절의 핵심 기작으로 작용한다. 이러한 특성을 전사-번역 커플링(transcription-translation coupling)이라고 부른다. 그러나 형광 현미경을 통해 리보솜이 핵상(nucleoid)의 형태로 강하게 응축되어 있는 DNA로부터 배제되어 있음이 관찰되었다[그림 3a].¹⁰ 이에 따라, DNA와 리보솜이 공간적으로 분리되어 있는데 어떻게 전사와 번역이 동시에 일어날 수 있는지도 오랫동안 난제로 남아 있다. 2014년 Elf 그룹은 살아 있는 세포에서 단일 리보솜 소단위를 이미징하고, 그 거동을 추적하였다.¹¹ 박테리아의 70S 리보솜은 50S 소단위와 30S 소단위가 mRNA에 조립되어 형성된다. Elf 그룹은 세포 내에서 형광 단백질이 결합된 리보솜 소단위를 발견시켜 단

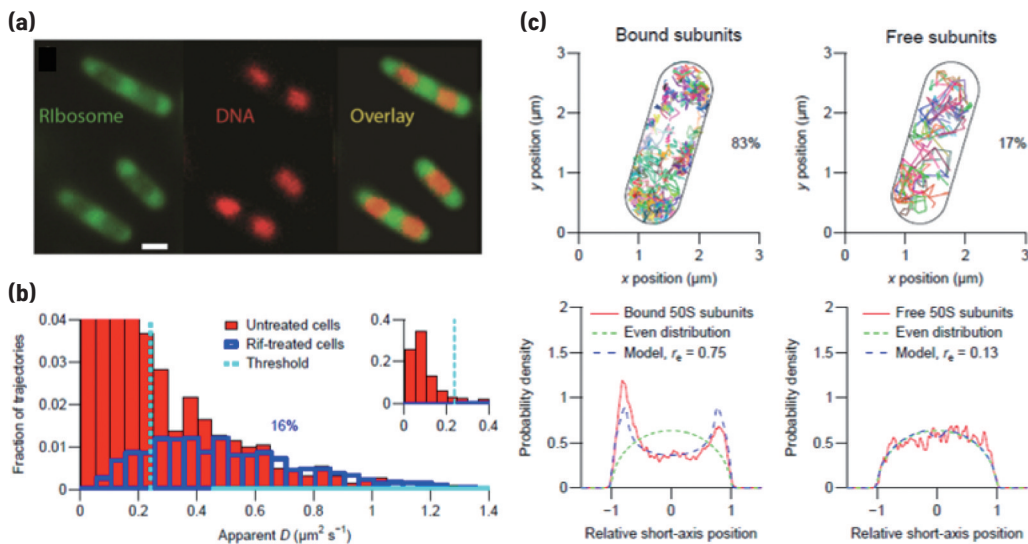


그림 3. (a) 형광 현미경으로 관찰한 대장균 세포 내 DNA(빨강)와 리보솜 (초록). (b) 전사 여부에 따른 리보솜 소단위의 확산 계수 분포. (c) mRNA 결합 리보솜 소단위(왼쪽)와 자유로운 리보솜 소단위(오른쪽)의 세포 내 위치. [인용 논문에서 발췌^{10,11}]

일 리보솜 소단위가 어떻게 이동하는지 이미징 하였다. 그들은 정상적인 환경의 세포와 항생제 처리를 통해 전사를 억제한 세포에서 관찰되는 확산 계수 분포를 비교하였다[그림 3b]. 전사가 억제된 세포에는 자유롭게 움직이는 리보솜 소단위만이 존재하므로, 이와 비교하여 정상적인 세포의 약 15%의 리보솜 소단위가 자유롭게 움직이는 상태임을 밝혔다. 이때, 나머지 85%의 mRNA 결합 리보솜 소단위들이 핵상과 벗어난 곳에서 관찰되는 것과 달리[그림 3c, 왼쪽], 자유로운 리보솜 소단위들은 핵상으로부터 배제되지 않는다는 것을 확인하였다[그림 3c, 오른쪽]. 이를 통해 핵상 내부에서 생성되고 있는 mRNA에 리보솜 소단위들이 결합하여 번역을 시작할 수 있음을 규명하여 전사-번역 커플링의 역설에 대한 한가지 해석을 제공하였다.

4. 유전자 발현에 의한 DNA와 RNA 중합 효소의 실시간 운동 규명

전사와 번역이 일어나면 DNA, RNA 중합 효소, 메신저 RNA(mRNA), 리보솜이 커다란 복합체를 이루게 되어 구성 생체 분자들의 물리적 특성이 크게 변화한다. 유전자 발현이 진행될 때 동반되는 DNA와 RNA 중합 효소의 물리적 특성 변화는 이들의 세포 내 거동을 바꾸고, 전사 효율에 큰 영향을 줄 수 있다. 이를 규명하기 위해서는 세포 내에서 유전자 발현이 일어나는 동안 DNA와 RNA 중합 효소의 실시간 거동을 관찰해야 한다. 2015년 Achillefs N. Kapanidis 그룹은 살아 있는 세포에서 단일 RNA 중합 효소를 이미징하고, 각 RNA 중합 효소 분자의 거동을 추적하였다[그림 4a].¹² 그 결과 측정된 확산 계수의 분포를 통해, DNA에 결합한 RNA 중합 효소와 자유롭게 확산하고 있는 RNA 중합 효소를 구별할 수 있었다[그림 4b]. 자유롭게 확산하는 RNA 중합 효소의 세포 내 위치는 핵상과 거의 비슷한 반면, DNA에 결합한 RNA 중합 효소는 핵상 표면에 밀집해 있었다[그림 4c]. 이를 통해 유전자 발현에 참여하는 RNA 중합 효소들은 핵상 표면으로 재편성될 수 있음을 제안하였다.

2019년 본 연구실은 살아 있는 세포에서 특정 유전자의 위치를 이미징하고, 유전자 발현에 의한 DNA 움직임을 실시간으로 관측하였다.¹³ lacZ 유전자 아래에 TetR 단백질이 특이적으로 결합하는 유전자 서열을 삽입하고, 세포 내

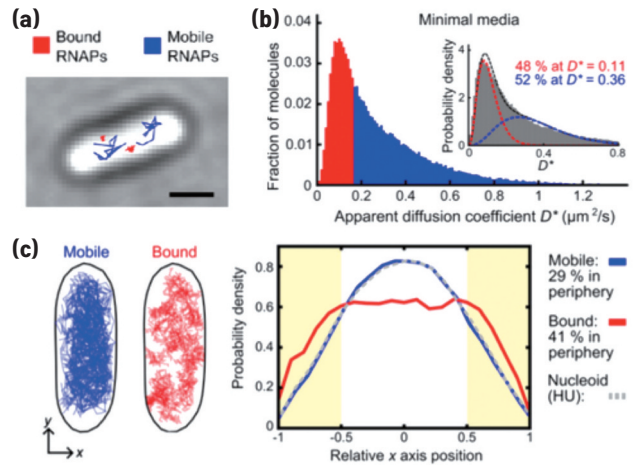


그림 4. (a) 살아 있는 세포 내에서 관찰된 RNA 중합 효소의 거동 궤적. (b) RNA 중합 효소의 확산 계수 분포를 통해 구별된 ‘DNA와 결합한 RNA 중합 효소’와 ‘자유롭게 확산하는 RNA 중합 효소’. (c) 전사를 진행 중인 RNA 중합 효소는 핵상 내부에서 표면으로 재편성됨. [인용 논문에서 발췌]¹²⁾

에 황색 형광 단백질이 달린 TetR 단백질을 발현시켜 형광 신호로 세포 내 lacZ DNA의 위치를 관측할 수 있었다[그림 5a]. IPTG 처리로 전사가 유도되었을 때, 관측 시간 동안 DNA가 점점 핵상 표면 가까이 이동하는 것을 확인할 수 있었다[그림 5b, 파란색 선]. 반면, lacZ 유전자의 번역이 억제된 돌연변이체에서는 전사 유도 후 DNA의 움직임을 관측되지 않았다[그림 5b, 회색 선]. 즉, 전사 유도에 의한 DNA의 핵상 표면으로의 이동이 번역을 동반할 때 더 크다는 것을 의미한다. 앞서 보고된 RNA 중합 효소 연구에서는 RNA 중합효소의 정적 위치만 확인하였지만, 본 연구에서는 시간에 따라 특정 유전자가 움직이는 것을 직접 규명하였다. 이에 기초하여 박테리아 세포 내 유전자 발현 시스템의 공간적 이동에 대한 새로운 메커니즘을 제시할 수 있었다[그림 5c].

결론

본 총설에서는 단분자 이미징을 이용해 살아 있는 박테리아 세포 내부의 생체 분자를 직접 관측하고, 이를 통해 유전자 발현 동역학에 대한 이해를 높인 연구들을 소개하였다. 단분자 이미징이 제공하는 세포 내 생체 분자의 상태

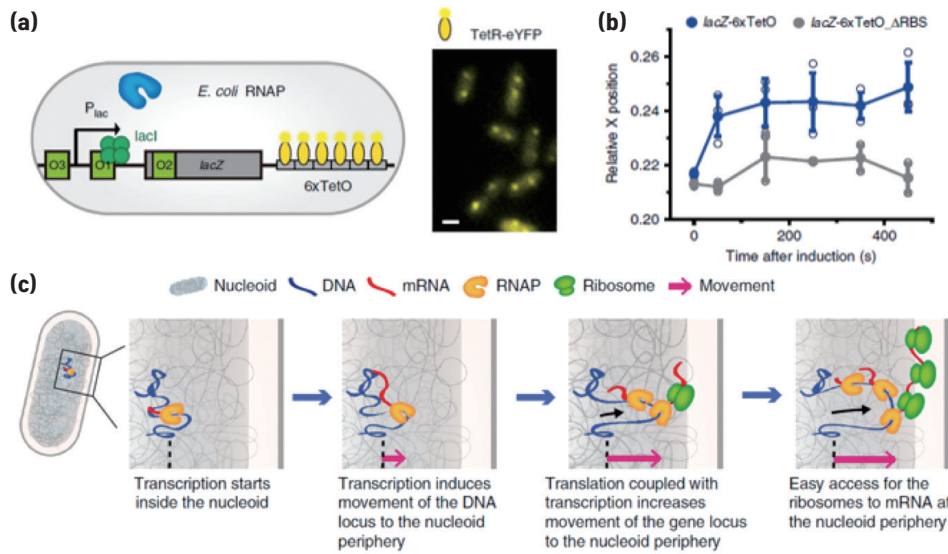


그림 5. (a) tetO-TetR 시스템을 이용한 DNA 이미징. (b) 전사 유도 후 시간에 따른 DNA의 위치 변화. (c) 전사와 번역에 의한 박테리아 세포 내 유전자 발현 시스템의 위치 변화 모델. 핵상 내부에서 전사가 시작되면 DNA와 RNA 중합 효소가 핵상 표면으로 이동한다. 생성된 mRNA에 리보솜이 결합하여 번역이 시작되면 형성된 거대한 복합체가 배제 효과에 의해 핵상으로부터 벗어나게 된다. [인용 논문에서 발췌¹³⁾

와 거동에 대한 정보는, 그동안 세포 밖에서 정제된 단백질 및 RNA 등을 이용한 연구로 규명할 수 없었던 복잡한 생명 현상에 대한 새로운 이해를 가능하게 하였다. 현재의 단분자 이미징 기술은 초고해상도로 3차원 수준에서 생체 분자의 거동을 어느 정도 추적할 수 있을 만큼 발전하였으며, 박테리아보다 복잡한 시스템을 가진 동물 세포에까지 적용되고 있다. 2014년 노벨화학상이 초고분해능현미경 기술 개발 분야에 수여되었다. 이는 초고분해능현미경을 통해 세포 내의 많은 현상을 규명할 수 있을 것이라는 기대를 반영했다. 그러나, 초고분해능현미경 기술은 정적으로 고분해능 이미지를 얻을 수 있지만, 이것만으로는 세포 내에서 일어나는 복잡한 현상을 실시간으로 규명할 수 없음이

자명해진 현실이다. 최근 알파폴드가 단백질 구조 분야에 혁명적 변화를 가져왔다. 이와 마찬가지로 세포 내에서 단일 단백질을 초고분해능, 실시간으로 3차원 운동 관측이 가능한 새로운 기술이 개발된다면, 이미징 분야의 알파폴드와 같이 세포 내 현상을 규명하는데 혁명적 변화를 가져올 것이다. 이런 기술이 개발된다면, 생화학, 분자 및 세포 생물학, 의학 등 다양한 분야에 커다란 발전을 가져올 뿐만 아니라, 각종 질병을 보다 면밀히 이해하고, 이를 치료할 수 있는 각종 신약이 획기적으로 개선될 것이다. 이러한 연구에 분광학에 기반한 다양한 물리화학적 접근법에서 그 해결책이 나올 가능성이 매우 크다고 예상된다. ☺



1. Ha, T., Th. Enderle, D.F. Ogletree, D.S. Chemla, P. Selvin, and S. Weiss "Probing the interaction between two single molecules: Fluorescence resonance energy transfer between a single donor and a single acceptor." *Proc. Natl. Acad. Sci.* **1996**, 93, 6264.

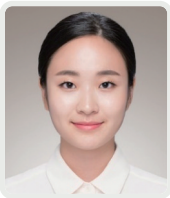
2. Neuman, K. C., and Nagy, A. "Single-molecule force spectroscopy: optical tweezers, magnetic tweezers and atomic force microscopy." *Nat. Methods.* **2008**, 5, 491.

3. Joo, C., Balci, H., Ishitsuka, Y., Buranachai, C., and Ha, T. "Advances in single-molecule fluorescence methods for molecular biology." *Annu. Rev. Biochem.* **2008**, 77, 51.

4. Yu, J., Xiao, J., Ren, X., Lao, K., and Xie, X. S. "Probing gene expression in live cells, one protein molecule at a time." *Science.* **2006**, 311, 1600-1603.

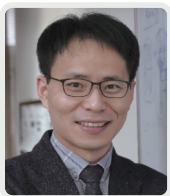
5. Li, G. W., and Xie, X. S. "Central dogma at the single-molecule level in living cells." *Nature.* **2011**, 475, 308-315.

6. Riggs, A. D., Bourgeois, S., and Cohn, M. "The lac repressor-operator interaction. 3. Kinetic studies." *J. Mol. Biol.* **1970**, 53, 401-417.
7. Gorman, J., and Greene, E. C. "Visualizing one-dimensional diffusion of proteins along DNA." *Nat. Struct. Mol. Biol.* **2008**, 15, 768-774.
8. Elf, J., Li, G. W., & Xie, X. S. "Probing transcription factor dynamics at the single-molecule level in a living cell." *Science*. **2007**, 316, 1191-1194.
9. Hammar, P., Leroy, P., Mahmutovic, A., Marklund, E. G., Berg, O. G., and Elf, J. "The lac repressor displays facilitated diffusion in living cells." *Science*. **2012**, 336, 1595-1598.
10. Bakshi, S., Siryaporn, A., Goulian, M., and Weisshaar, J. C. "Superresolution imaging of ribosomes and RNA polymerase in live *Escherichia coli* cells." *Mol. Microbiol.* **2012**, 85, 21-38.
11. Sanamrad, A., Persson, F., Lundius, E. G., Fange, D., Gynnå, A. H., and Elf, J. "Single-particle tracking reveals that free ribosomal subunits are not excluded from the *Escherichia coli* nucleoid." *Proc. Natl. Acad. Sci.* **2014**, 111, 11413-11418.
12. Stracy, M., Lesterlin, C., Garza de Leon, F., Uphoff, S., Zawadzki, P., and Kapanidis, A. N. "Live-cell superresolution microscopy reveals the organization of RNA polymerase in the bacterial nucleoid." *Proc. Natl. Acad. Sci.* **2015**, 112, 4390-4399.
13. Yang, S., Kim, S., Kim, D. K., Jeon An, H., Bae Son, J., Hedén Gynnå, A., and Ki Lee, N. "Transcription and translation contribute to gene locus relocation to the nucleoid periphery in *E. coli*." *Nat. Comm.* **2019**, 10, 5131.



박수진 Soojin Park

- 서울대학교 화학부 학사(2018.8)
- 서울대학교 화학부 석·박사 통합 과정(2018.9-현재, 지도교수 : 이남기)



이남기 Nam Ki Lee

- 서울대학교 화학부 학사(1998.2)
- 서울대학교 화학부 석사(2000.2, 지도교수 : 김성근)
- 서울대학교 화학부 박사(2005.8, 지도교수 : 김성근)
- 하버드대 박사 후 연구원(2006.5-2008.12, 지도교수 : X. Sunney Xie)
- POSTECH I-Bio 및 물리학과 조교수 및 부교수(2009.1-2017.2)
- 서울대학교 화학부 부교수 및 교수(2017.3-현재)

차세대 클릭 화학인 SuFEx 화학과 이를 이용한 방사화학을 포함한 응용 분야에 대한 고찰

김민평, 양홍선, 전중현, 홍성유* | UNIST 화학과, syhong@unist.ac.kr

서론

Karl Barry Sharpless가 클릭 화학(click chemistry) 개념을 도입한 이래로, copper-catalyzed azide-alkyne cycloaddition(CuAAC) 및 strain-promoted azide-alkyne cycloaddition과 같은 클릭 화학 반응들은 기초 화학 분야에서 다양한 화학 반응의 개발로 이어졌다.^{1,2} 클릭화학의 특징으로 다양한 화합물에 대한 모듈식 적용성(modularity), 반응 부산물이 적은 깨끗한 반응과 높은 합성 수율을 들 수 있다. 또한, 프로세스에 있어서 반응 조건이 간단하고 사용되는 반응물은 쉽게 구할 수 있는 동시에, 산소 및 물에 민감하지 않은 물질을 이용하며, 용매를 사용하지 않거나 사용한다면 물처럼 유해하지 않은 용매를 사용해야 하고 칼럼 크로마토그래피가 아닌 되도록 증류나 재결정 같은

비교적 간단한 정제 과정을 거쳐야 한다.³ 이러한 기준을 충족한 클릭 화학의 화학 반응은 기초 과학뿐만 아니라 응용 분야에서 제약, 자연물, 고분자 및 재료에 가리지 않고 여러 분야에 활용되어 우리의 삶에 영향을 직접 주는 것에 이르렀다[그림 1].

Sharpless 교수는 이러한 범용성을 가진 클릭 화학의 창안에 그치지 않고 2014년 전후에 이르러 황을 이용한 클릭 화학의 분야인 SuFEx 화학(sulfur(VI) fluoride exchange chemistry, SuFEx chemistry)을 새로이 소개하였다. SuFEx 화학의 특징은 주로 사용되는 SO₂F 기능이 SO₂X(X = Cl, Br)와 전혀 다른 반응성을 보이는 것에서 기인한다. ArSO₂F로 표현되는 설포닐 플루오라이드(sulfonyl fluoride)들은 환원 반응에 저항력이 있고, 높은 온도에서도 안정성이 좋으며 Si-F 결합을 유도하는 반응

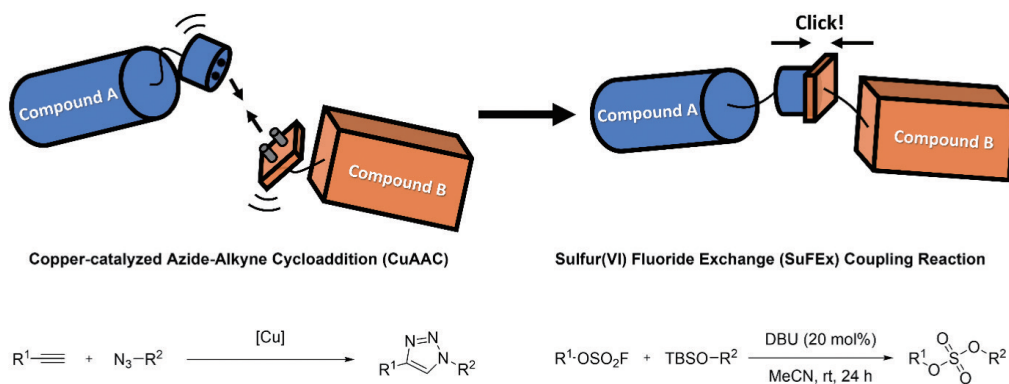


그림 1. 클릭 화학의 대표적 예시인 CuAAC 반응과 차세대 클릭 화학인 SuFEx 화학

에도 적용될 수 있는 등, 기존의 다른 설포닐 할라이드(sulfonyl halide)들의 역할과 궤를 달리한다.⁴ 또한, SO_2F 유도체가 가지는 SO_2F 중에 있는 불소를 친핵성 치환반응을 통해 황을 포함한 연결고리를 만들거나 $-\text{SO}_2\text{F}$ 그룹 전체가 이탈기로 치환 반응이 가능한 두 가지 기능을 가진 반응 양식이 이용될 수 있다. 이러한 범용성으로 인해, SuFEx 작용기들은 금속 촉매 반응과 같은 기초 화학뿐만 아니라 고분자 합성, 단백질 및 자연물 개질, 제약 및 방사 의학 분야 등과 같은 응용 분야에 널리 이용되고 있다.⁵ 이에 본 총설에서는, SuFEx 화학에서 사용되는 대표적인 작용기들과 이를 이용한 방사화학을 포함한 응용 분야를 소개하고자 한다.

본 론

1. SuFEx 작용기들과 그 합성법

황은 초원자가를 갖는 대표적인 원자 중의 하나로, 옥텟 규칙(octet rule)을 따르는 탄소 등의 원자들과는 달리 8개 이상의 최외각 전자를 가지며, 최대 +6까지의 다양한 산화수를 가질 수 있다. 이에 따라, 황이 포함된 작용기들은 구조에 따라 다양한 명명법을 가지게 된다. 예컨대, $-\text{SO}_2\text{F}$ 작용기를 가진 화합물들 또한 이에 결합하는 원자의 종류(예: 탄소, 산소, 그리고 질소)에 따라 이름이 다르다. 그중, 아릴설포닐 플루오라이드(arylsulfonyl fluoride, ArSO_2F)는 약 90년 전인 1931년에 Davies와 Dick에 의해 설포닐

클로라이드(sulfonyl chloride)에서 KFHF를 이용하여 만드는 방법이 보고되었다.⁶ 그 이후 1979년, Hyatt에 의해 에텐설포닐 플루오라이드(ethenesulfonyl fluoride, ESF)라는 화합물이 개발되면서, 기존의 합성법은 반드시 $-\text{SO}_2\text{Cl}$ 그룹이 존재해 있어야 $-\text{SO}_2\text{F}$ 를 만들 수 있었다면, ESF를 이용하여 $-\text{SO}_2\text{Cl}$ 없어도 알코올, 아민과 같은 친핵체를 통한 첨가 반응으로 설포닐 플루오라이드를 분자에 쉽게 도입할 수 있게 되었다.⁶ 또한, 1-브로모에텐-1-설포닐 플루오라이드(1-bromoethene-1-sulfonyl fluoride, BESF), 2-substituted-알카이닐-1-설포닐 플루오라이드(2-substituted-alkynyl-1-sulfonyl fluoride, SASF), 메테인다이설포닐 플루오라이드(methanedisulfonyl fluoride, MDSF) 및 에텐-1,1-다이설포닐 다이플루오라이드(ethene-1,1-disulfonyl difluoride, EDSF) 같은 ESF 유래 SuFExable hub 후보군이 많이 개발되었다.⁷ [그림 2] 설포닐 클로라이드에서 설포닐 플루오라이드로 쉽게 치환되는 것과 달리, 플루오로설페이트를 클로로설페이트(chlorosulfate)로부터 만드는 경로는 비교적 제한되었다. 이 때문에, 훈증 살충제로도 사용되는 SO_2F_2 (sulfuryl fluoride) 가스를 이용하여 플루오로설페이트를 만드는 경로가 연구되었다.⁶ 하지만, SO_2F_2 가 독성을 가지는 기체이기 때문에 보편적으로 사용하기 어려운 문제가 있었고, 이를 해결하기 위해 Sharpless 그룹에서 SuFEx-IT(fluoro-sulfonyl imidazolium triflate)라는 고체상의 염으로 개발하여, 플루오로설페이트에 대한 접근성을 매우 쉽게 만들었다.⁸ 주목할 만한 점으로는, 아릴 플루오로설페이트와

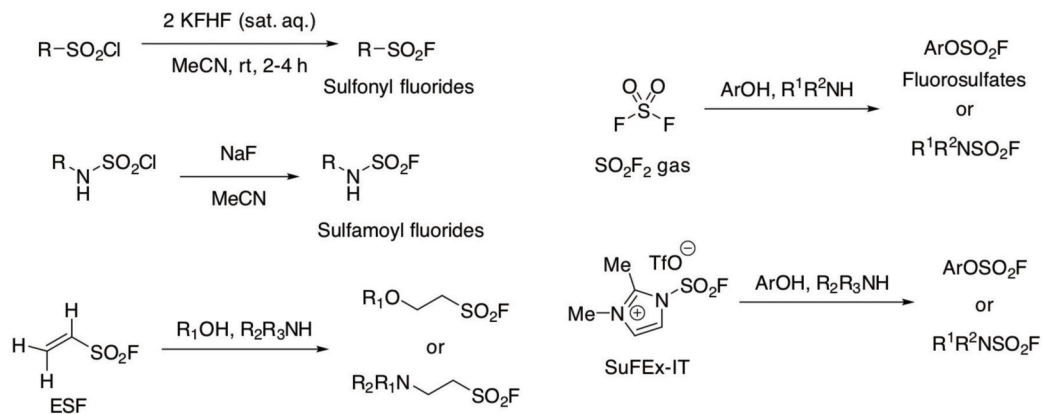


그림 2. SuFEx 기능기들의 합성법들.

달리 알킬 플루오로설페이트의 낮은 안정성으로 형성하자마자 쉽게 분해되는 경향이 있어 안정한 알킬 플루오로설페이트의 합성은 아직도 풀리지 않은 문제이다.

RR' NSO₂F는 설파모일 플루오라이드(sulfamoyl fluoride)라고 하며, Murthy 그룹에 의해 1982년에 SO₂F₂와 아민이 반응하는 것과 RR' NSO₂Cl에서 KFHF를 사용하여 설파모일 플루오라이드를 만드는 방법이 보고되었다.⁶ 이 경우, 1차 아민을 SO₂F₂ 가스와 반응시키면 설파모일 플루오라이드가 생성되고, 생성된 설파모일 플루오라이드가 바로 이량체화(dimerization)로 이어지는 어려움이 있었다.⁶ 이러한 문제점은 Sharpless 그룹이 만든 SuFEx-IT를 사용하여 1차 아민에서 설파모일 플루오라이드를 합성하는 방법이 보고되면서 해결되었다.⁸

2. SuFEx 기능기를 이용한 연결고리 형성

SuFEx 기능기들은 위에서 언급한 것처럼 친전자체로서 작용하여 연결고리를 만들 수 있다. 이와 같은 반응은 크게 실릴 에터(silyl ether)의 유무에 따라 나뉘며, 실릴 에터가 있는 경우에는 DBU(1,8-diazabicyclo(5.4.0)undec-7-ene), BEMP(2-tert-butylimino-2-diethylamino-1,3-dimethylperhydro-1,3,2-diazaphosphorine) 및 BTMG(2-tert-butyl-1,1,3,3-tetramethylguanidine)를 비롯한 루이스 염기류의 적용, 혹은 루이스 산인 바이플루오라이드(bifluoride)를 촉매로써 이용하는 두 가지 방식으로 분류한다. 설파닐 플루오라이드와 실릴 에터를 DBU 존재

하에 반응시켜 설파이네이트 에스터(sulfinate ester)를 만드는 합성법은 1995년 Vorbruggen 그룹에 의해 처음 보고되었다.⁹ DBU를 이용한 촉매 반응은 페놀레이트의 형성 이후에 치환반응으로 이어지는 게 주 경로지만, DBU가 설파닐 플루오라이드 혹은 실릴 에터 중 무엇과 먼저 반응하는지는 명확하게 밝혀지지 않았으며 반응 시스템에 따라 다를 것으로 추측되고 있다. DBU를 이용한 반응은 설파닐 플루오라이드뿐만 아니라, 플루오로설페이트 및 설파모일 플루오라이드에도 적용할 수 있다(그림 3).

실릴 에터 없이 연결 고리를 만드는 반응은 -SO₂F와 아민 혹은 알코올을 이용한다. 그중 아민을 이용한 반응은 1979년에 ESF를 보고한 논문에서 그 활용에 관한 연구를 통해 알려졌다.⁶ 이후 2020년에 이르러 Ende/Ball 그룹이 Ca(NTf₂)₂와 DABCO(1,4-diazabicyclo[2.2.2]octane)를 이용하여 설파모일 플루오라이드, 플루오로설페이트 및 설파닐 플루오라이드와 아민의 반응을 보고하였다.⁹ 이어서, Li 그룹은 HOBt(1-hydroxybenzotriazole)를 촉매로 사용하여 플루오로설페이트 및 설파닐 플루오라이드와 아민의 반응을 고안하였는데, 이전의 연구들과 다르게 1 mol%의 적은 촉매를 사용한다는 장점이 있다.⁹ 알코올과 SuFEx 기능기와의 연결고리 형성은 2020년에 Zuilhof 그룹에 의해 설파이미도일(sulfoimidoyl) 기능기와 페놀을 DBU 촉매 하에 반응시키는 것을 통해 알려졌다.⁹ 그러나, 이 반응은 설파이미도일 기능기에 한정되는 문제가 있었다. 이는 2021년에 이르러 Moses 그룹이 설파닐 플루오라이드, 플루오로설페이트 및 설파이미도일과 페놀을

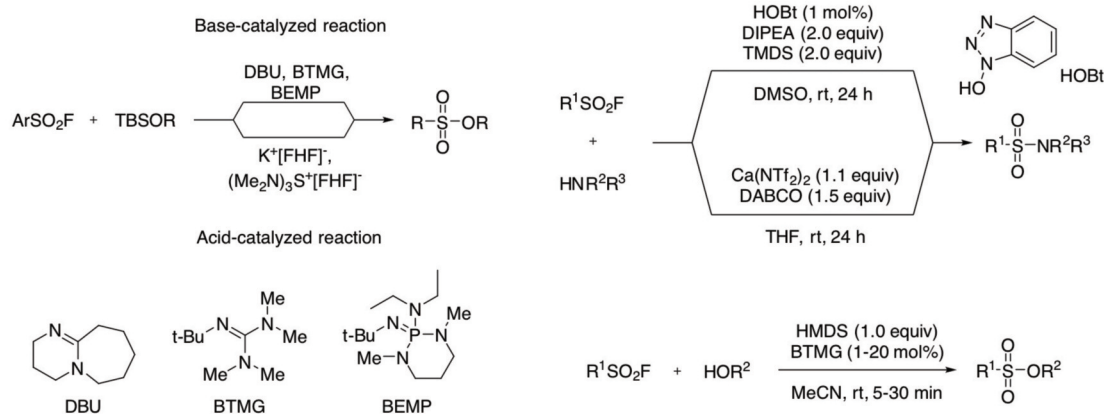


그림 3. SuFEx 기능기들을 이용하여 연결고리를 만드는 반응들.

HMDS(hexamethyldisilazane)와 BTMG를 통해 반응시키는 것을 제안함으로써 이 문제를 해결하였다.¹⁰ 또한, 해당 반응은 획기적으로 반응 시간을 단축시켰다.

SuFEx 기능기들은 금속 촉매를 이용한 교차 짝지음(cross-coupling) 반응에도 활용되어 연결고리를 형성할 수 있다. 짝지음 반응은 서로 같은 짝이 합쳐져 대칭을 이루는 화합물을 형성하는 동종 짝지음(homo-coupling) 반응과 서로 다른 짝을 이용하는 교차 짝지음(cross-coupling) 반응으로 나뉜다. 이러한 짝지음 반응은 주로 C-C 결합을 형성하는 예시가 많지만, 이에 국한되지 않고 C-O 및 C-N 같은 헤테로 원소와의 결합 형성에도 사용된다. 보편적으로 많이 알려진 교차 짝지음 반응인 Suzuki, Negishi 및 Sonogashira 짝지음 반응은 친핵체인 유기 금속 전구체와 친전자체인 아릴 할라이드가 반응하여 진행되는데, 설포닐 플루오라이드의 경우, 아릴 할라이드 대신 사용되어 C-C 결합을 형성할 수 있다.⁷

3. SuFEx 화학에서 유래된 신규 고분자들

2014년에 Sharpless 그룹은 DBU와 같은 organic superbases를 이용하여 아릴 실릴 에터와 아릴 플루오로설페이트를 연결하는 커플링 반응을 제시하였고, 이를 이용하여 폴리설페이트(polysulfate)라는 새로운 고분자를 합성

하면서 고분자 합성 분야까지 적용 범위를 넓히게 된다.⁶ Sharpless와 Fokin 그룹은 함께 온도, 용매 및 반응 시간과 촉매 종류와 농도, 그리고 단위체의 종류에 따른 폴리설페이트의 중합 경향성에 대한 연구를 수행하였다.⁴ 그리고, 2017년에 상업적 중합 개시제로서 여전히 높은 농도의 10 mol% 내지 1 mol% 촉매 농도를 요구하던 폴리설페이트의 중합법은 다양한 바이플루오라이드 촉매의 screening 결과, 촉매 농도를 0.05 mol% 수준까지 감소시켜 촉매 경제성 또한 상당히 개선될 수 있었다.⁴ 나아가, 플루오로설페이트가 아닌 설포닐 플루오라이드를 단위체로 활용하여 폴리설포네이트(polysulfonate)라는 신소재 또한 보고되었다.⁴

Michaudel 그룹은 설파모일 플루오라이드를 이용하여 2020년에 이르러 SuFEx 고분자 분야를 확장하였다. 설파모일 플루오라이드와 아민을 DBU 촉매 하에 비스(설파모일 플루오라이드)와 비스(아민) 단량체를 사용하여 만든 고분자인 폴리설파마이드(polysulfamide)의 합성 방법을 제시하였다.⁷ 또한 상기 논문에서, 폴리설파마이드는 특정 산 및 염기 조건에서 가수분해되어 단분자로 재사용되었고, 이를 통하여 해당 고분자의 고분자 재활용 가능성도 제시되었다[그림 4].

기존의 폴리설페이트의 중합은 단계 축합중합(step-growth polycondensation)으로 각각 친전자체와 친핵체

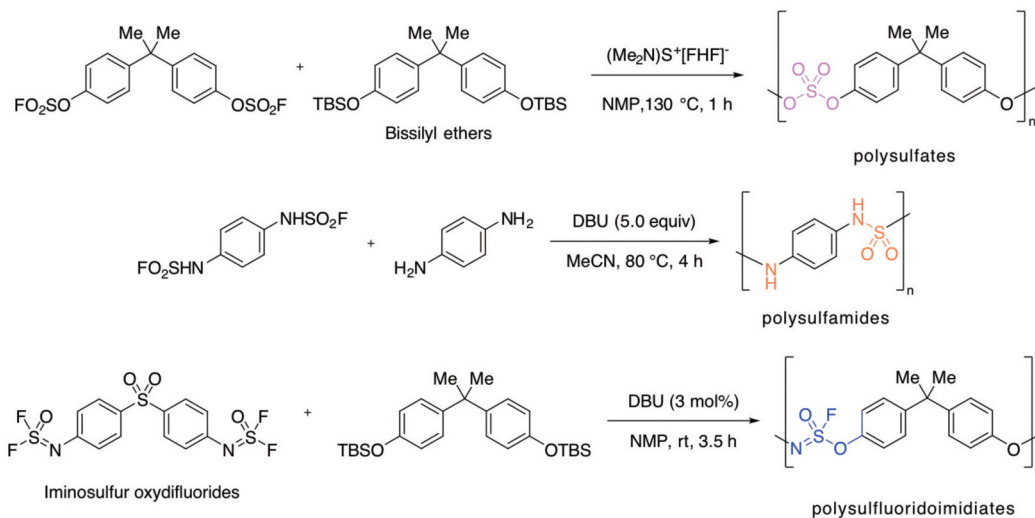


그림 4. SuFEx 화학에서 유래된 신규 고분자들.

인 단위체가 반응하여 동중중합체(homopolymer) 및 교대 공중합체(alternating copolymer)만 만들 수 있다는 한계점을 가지고 있었다. Sharpless 그룹이 친핵성 및 친전자성 기능기를 동시에 지닌 분자를 단위체로, 그리고 이미노설피 옥사다이플루오라이드(iminosulfur oxydifluoride)를 가진 화합물을 개시제로 사용한 사슬 축합 중합(chain-growth polycondensation)을 새로운 중합법으로 보고하였다.¹¹ 이 방법을 통하여, 동중중합체뿐만 아니라 블록 공중합(block copolymerization)까지 가능함을 보여주었고, 산-염기를 이용한 폴리설피에이트의 분해 방법도 제시하였다. 그리고 앞에서 언급된 이미노설피 옥사다이플루오라이드 기능기를 가진 단위체 또한 마찬가지로 SuFEx 짝지음 반응이 가능하였는데, 이를 이용하여 폴리설피플루오리도이미디에이트(polysulfuoridoimide)를 합성될 수 있었다.⁴ 이 고분자는 다른 SuFEx 고분자 중합

에 사용되는 SO_2F 기능기와 다르게 $\text{N}=\text{SOF}_2$ 를 사용하고 가용한 S-F 결합이 2개 존재하여 중합 후에 1개의 S-F 결합이 여전히 고분자 사슬에 남게 된다. 이러한 잔여 S-F 결합으로 인하여 폴리설피플루오리도이미디에이트는 구조적으로 나선 구조를 가질 수 있게 되고, 실릴 에터나 아민 기능기를 통한 SuFEx 짝지음 반응을 통해 추가 개질도 가능하게 되어 기존에 보고되었던 SuFEx 고분자보다 더 다양한 활용 가능성을 보여주었다.

4. Iterative Synthesis & 방사화학에서의 응용

SuFEx 화학은 이전에 언급된 기능기로서 손쉽게 링커로 치환될 수 있는 범용성 때문에 고분자 합성 분야뿐만 아니라 단백질 및 소재 개질에도 많이 이용되고 있다.⁵ Iterative synthesis는 특정 반응을 반복하여 DNA나 펩타이드 같은

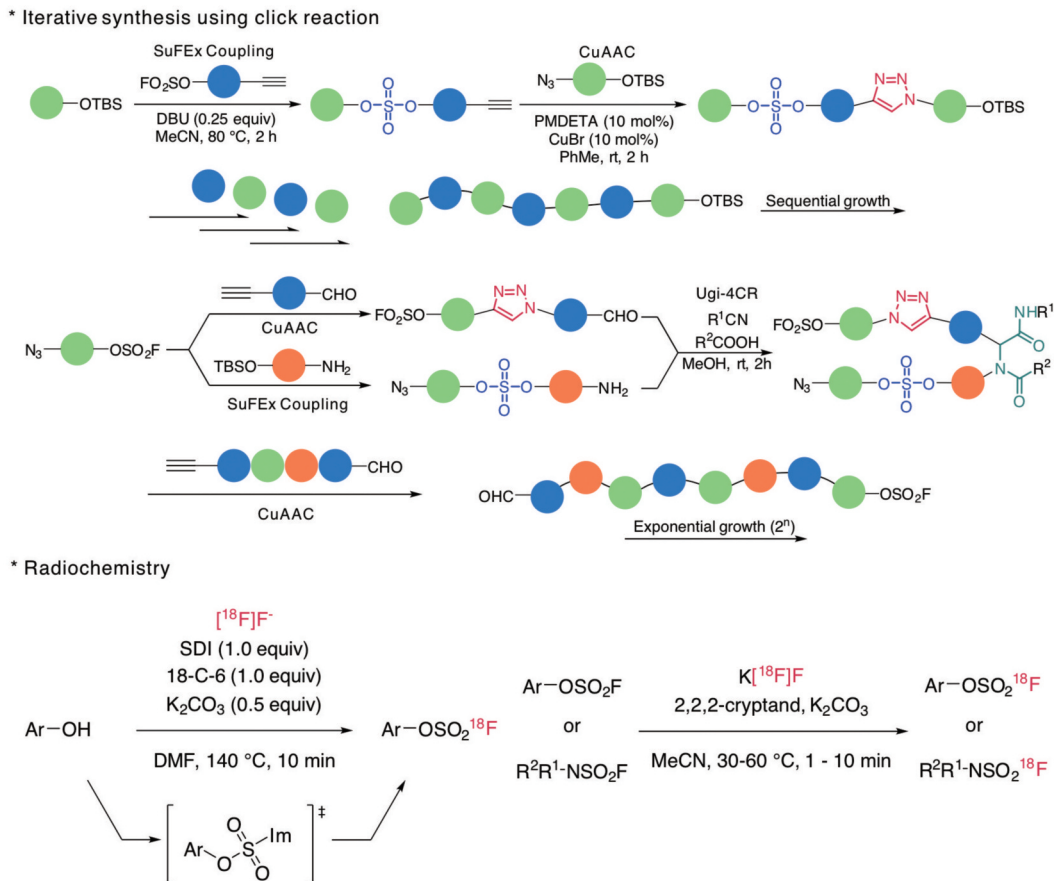



그림 5. SuFEx 화학의 응용 분야중 하나인 iterative synthesis 분야와 방사 화학 분야의 대표적 예시들.

반복 구조를 가지는 천연물 혹은 합성 물질을 수득하는 합성 분야이다.¹² SuFEx 기능을 이용한 치환 반응은 강력한 반응성과 직교성(orthogonality)을 가지고 있기 때문에 효율적인 합성을 이뤄내기 적합하여 iterative synthesis에 활용되고 있다. 일례로, Niu 그룹은 클릭 화학과 SuFEx 화학을 교차로 사용하여 주기성이 있는 공중합체(periodic copolymer)를 합성하였으며 펩타이드 합성에서 널리 이용되고 있는 고상 합성(solid phase synthesis)를 이용하여 9개의 단량체를 가진 올리고머의 합성을 보여주었다.¹³ 또한, Zhang 그룹은 이러한 두 클릭 화학에 Ugi-4CR 반응을 추가하여 지수 함수적 성장을 통해 순서가 규명된 고분자를 합성하였다[그림 5].¹⁴

Fluorine-18은 양전자 방출 단층 촬영술(Positron Emission Tomography; PET)에서 널리 쓰이는 방사성 동위원소로 다른 방사성 동위원소인 Carbon-11 ($t_{1/2} = 20.4$ 분), Nitrogen-13 ($t_{1/2} = 9.97$ 분), Oxygen-15 ($t_{1/2} = 2.04$ min)와 달리 110분의 상대적으로 긴 반감기를 가지고 있다.¹⁵ 그리고 SuFEx 기능기에 있는 불소가 체내에서의 유발하는 약리작용으로 인하여 제약 분야에서 큰 관심을 얻고 있다.⁴ $-SO_2F$ 를 포함한 SuFEx 기능기들은 PET에서 방사성의약품으로써 이용될 수 있는 후보군으로 고려되어 최근 활발한 연구가 이뤄지고 있다. 최근 한국에서는 연세대 전중현 교수와 울산과학기술원 홍성유 교수 연구실의 공동 연구를 통해 이미다질레이트(imidazylate) 중간체를 경유하여 페놀에서 Fluorine-18가 표지된 플루오로설페이트를 만드는 일과 늦은 단계의 $^{18}F/^{19}F$ 동위원소 교환 반응(late-stage $^{18}F/^{19}F$ isotopic exchange)을 이용하여 설페이트 플루오라이드를 ^{18}F 로 치환된 설페이트 플루오라이드를 합성하는 성과들을 달성하였다.^{16,17} 또한, SuFEx 화

학의 선두 그룹인 Sharpless 그룹에서도 Wu 그룹과의 공동 연구로 SuFEx 화학을 방사화학의 영역으로 확장하고 있다.⁴

결론

SuFEx 화학은 2010년대 들어 새로운 클릭 화학의 새로운 개념으로 대두되고 있다. 이는 SO_2F 기능이 다른 할라이드로 치환된 SO_2X 기능기들과 다르게 환원조건에 견딜 수 있으며, 열적 안정성을 가지며, 선택적 반응성을 갖는 것에서 비롯되었다. 이를 통해, SuFEx 기능기들은 그 특이성을 이용한 여러 유기 방법론의 개발이 활발히 이뤄지고 있으며, 친전자체로서 이용되어 연결고리를 만들거나 교차 짝지음 반응에 이용되어 C-C 결합을 형성하는 것이 대표적인 예시이다. 그리고 황을 포함한 연결고리를 만드는 반응은 고분자 합성으로 이어져 폴리설페이트를 비롯한 다양한 황 기반 고분자 신소재를 탄생시키는 것에 이르렀다. 또한, 이러한 SuFEx 화학의 선택적 반응성은 iterative synthesis에 활용되어 반복 단위를 가지는 새로운 기능성 화합물 합성에도 기여하고 있다. 방사화학에서 SuFEx 기능기에 포함된 불소를 Fluorine-18로 치환하여 신규 PET 방사성 추적자로 개발하기 위한 노력도 활발하게 이뤄지고 있다. 광범위한 분야에서 활용되고 있는 SuFEx 화학은 유기방법론에서 적극적으로 활용되어 새로운 반응 경로를 개척하고, 재료 분야에서 고분자 신소재의 도입을 통해 소재 다양성을 만들며 SuFEx 기능을 이용해 설페이트 연결고리를 만드는 것으로 소재 및 단백질 개질을 좀 더 용이하게 하여 관련 분야의 발전을 촉진할 수 있을 것으로 기대된다. 



1. Vsevolod V. Rostovtsev, Luke G. Green, Valery V. Fokin, and K. Barry Sharpless "A Stepwise Huisgen Cycloaddition Process: Copper(I)-Catalyzed Regioselective "Ligation" of Azides and Terminal Alkynes." *Angew. Chem. Int. Ed.* **2002**, *41*, 2596–2599.

2. Nicholas J. Agard, Jeremy M. Baskin, Jennifer A. Prescher, Anderson Lo, and Carolyn R. Bertozzi "A Comparative Study of Bioorthogonal Reactions with Azides." *ACS Chem. Biol.* **2006**, *1*, 644–648.

3. Hartmuth C. Kolb, M. G. Finn, and K. Barry Sharpless "Click Chemistry: Diverse

Chemical Function from a Few Good Reactions." *Angew. Chem. Int. Ed.* **2001**, *40*, 2004–2021.

4. Joshua A. Homer, Long Xu, Namitharan Kayambu, Qinheng Zheng, Eun Joung Choi, Byeong Moon Kim, K. Barry Sharpless, Han Zuilhof, Jiajia Dong, and John E. Moses "Sulfur Fluoride Exchange." *Nat. Rev. Methods Primers* **2023**, *3*, 59.

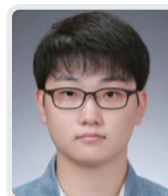
5. Andrew S. Barrow, Christopher J. Smedley, Qinheng Zheng, Suhua Li, Jiajia Dong, and John E. Moses "The Growing Applications of SuFEx Click Chemistry." *Chem. Soc. Rev.* **2019**, *48*, 4731–4758.

6. Jiajia Dong, Larissa Krasnova, M. G. Finn, and K. Barry Sharpless "Sulfur(VI) Fluoride Exchange (SuFEx): Another Good Reaction for Click Chemistry." *Angew. Chem. Int. Ed.* **2014**, *53*, 9430–9448.
7. Terry S.- B. Lou, and Michael C. Willis "Sulfonyl Fluorides as Targets and Substrates in the Development of New Synthetic Methods." *Nat. Rev. Chem.* **2022**, *6*, 146–162.
8. Taijie Guo, Genyi Meng, Xiongjie Zhan, Qian Yang, Tiancheng Ma, Long Xu, K. Barry Sharpless, and Jiajia Dong "A New Portal to SuFEx Click Chemistry: A Stable Fluorosulfonyl Imidazolium Salt Emerging as an "F-SO₂" Donor of Unprecedented Reactivity, Selectivity, and Scope." *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, *57*, 2605–2610.
9. Cayo Lee, Alina J. Cook, Jonathan E. Elisabeth, Nathan C. Friede, Glenn M. Sammis, and Nicholas D. Ball "The Emerging Applications of Sulfur(VI) Fluorides in Catalysis." *ACS Catal.* **2021**, *11*, 6578–6589.
10. Christopher J. Smedley, Joshua A. Homer, Timothy L. Gialelis, Andrew S. Barrow, Rebecca A. Koelln, and John E. Moses "Accelerated SuFEx Click Chemistry For Modular Synthesis." *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, *61*, e202112375.
11. Hyunseok Kim, Jiayu Zhao, Jinhye Bae, Liana M. Klivansky, Eric A. Dailing, Yi Liu, John R. Cappiello, K. Barry Sharpless, and Peng Wu "Chain-Growth Sulfur(VI) Fluoride Exchange Polycondensation: Molecular Weight Control and Synthesis of Degradable Polysulfates." *ACS Cent. Sci.* **2021**, *7*, 1919–1928.
12. Jonathan W. Lehmann, Daniel J. Blair, and Martin D. Burke "Towards the Generalized Iterative Synthesis of Small Molecules." *Nat. Rev. Chem.* **2018**, *2*, 0115.
13. Cangjie Yang, James P. Flynn, and Jia Niu "Facile Synthesis of Sequence-Regulated Synthetic Polymers Using Orthogonal SuFEx and CuAAC Click Reactions." *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, *57*, 16194–16199.
14. Zi Li, Xiangzhu Ren, Peng Sun, Hao Ding, Shumu Li, Yilin Zhao, and Ke Zhang "Protecting-Group-Free Iterative Exponential Growth Method for Synthesizing Sequence-Defined Polymers." *ACS Macro Lett.* **2021**, *10*, 223–230.
15. Philip W. Miller, Nicholas J. Long, Ramon Vilar, and Antony D. Gee "Synthesis of ¹¹C, ¹⁸F, ¹⁵O, and ¹³N Radiolabels for Positron Emission Tomography." *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, *47*, 8998–9033.
16. Young-Do Kwon, Min Ho Jeon, Nam Kyu Park, Jeong Kon Seo, Jeongmin Son, Young Hoon Ryu, Sung You Hong, and Joong-Hyun Chun "Synthesis of ¹⁸F-Labeled Aryl Fluorosulfates via Nucleophilic Radiofluorination." *Org. Lett.* **2020**, *22*, 5511–5516.
17. Min Ho Jeon, Young-Do Kwon, Min Pyeong Kim, Gianluca Bartolini Torres, Jeong Kon Seo, Jeongmin Son, Young Hoon Ryu, Sung You Hong, and Joong-Hyun Chun "Late-Stage ¹⁸F/¹⁹F Isotopic Exchange for the Synthesis of ¹⁸F-Labeled Sulfamoyl Fluorides." *Org. Lett.* **2021**, *23*, 2766–2771.



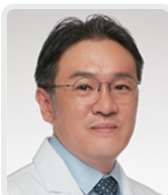
김민평 Min Pyeong Kim

- 아주대학교 응용화학생명공학부, 학사 (2011.3–2017.2)
- LG화학 엔지니어(2018.3–2019.5)
- 울산과학기술원 에너지화학공학과, 석·박사 통합과정(2019.9–현재, 지도교수 : 홍성유)



양홍선 Hongsun Yang

- 한국과학기술원 생명화학공학과, 학사 (2012.3–2016.8)
- 서울대학교 화학생물공학부, 석사(2016.9–2019.02, 지도교수 : 이규태)
- 서울대학교 화학생물공학부, 박사과정



전중현 Joong-Hyun Chun

- 영남대학교 화학과, 학/석사(1991.3–1999.2)
- University of Akron 화학과, 박사 (1999.12–2005.12, 지도교수 : Gerald F. Koser)
- Kent State University, 박사 후 연구원 (2005.9–2006.6, 지도교수 : Kenneth K. Laali)
- 미국국립보건원(NIH), 박사 후 연구원 (2007.4–2012.4, 지도교수 : Victor W. Pike)
- University of Cambridge, Wolfson Brain Imaging Centre, 연구원(2013.6–2015.2)
- 연세대학교 의과대학 핵의학교실, 임상조교수, 조/부교수 (2015.3–현재)



홍성유 Sung You Hong

- 서울대학교 화학생명공학부, 학사 (1998.3–2002.2)
- University of Oxford, 박사 과정 (2005.10–2009.11, 지도교수 : Benjamin G. Davis/Malcolm L. H. Green)
- 막스 플랑크 연구소, 박사 후 연구원 (2009.11–2010.10, 지도교수 : Peter H. Seeberger)
- 울산과학기술원, 조/부/교수(2010.11–현재)

분광광도계를 활용한 미량의 BTB로 pH 측정

하양훈 | 대전과학고등학교, switchkiller84@gmail.com

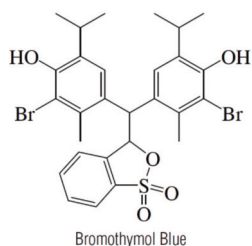
서론

미지의 산 또는 염기 용액의 농도를 알아내는 방법으로 가장 많이 사용되는 것은 산-염기 중화 적정일 것이다. 적정(titration)이라는 분석 기술은 분석물과 지시약을 플라스크에 담고 여기에 뷰렛으로 적정 시약을 첨가하는 것을 뜻한다. 이때 사용하는 지시약은 BTB를 비롯하여 페놀프탈레인, 메틸 오렌지 등과 같이 당량점에서 색 변화가 뚜렷한 것을 선택한다. 하지만 실제 산-염기 중화 적정에서 색 변화를 뚜렷하게 관찰하기 쉽지 않은데, 분광광도계를 활용하면 더 쉽게 색 변화를 통해 pH를 측정할 수 있을 것으로 생각하였다. 본 기고에서는 대전과학고등학교 40기 박수민 학생과 40기 조아현 학생의 창의재단 R&E연구를 바탕으로 분광광도계를 활용한 미량의 BTB로 pH 측정에 관해 설명하고자 한다.

본론

1. BTB(Bromothymol blue, C₂₇H₂₈Br₂O₅S)의 물리적 화학적 성질

BTB는 오른쪽과 같은 분자 구조로 물 보다는 에탄올이나 다이에틸 에터에 잘 녹는 화합물이다. 또한 BTB는 pH에 따라 황(S)이 포함된 오각 고리의 유무 및 그 비율로 pH가 증가



함에 따라 노랑(pH 6.0 이하)→초록(pH 6.0~7.6)→파랑(pH 7.6 이상) 순서로 색이 바뀌게 된다. 이 때문에 산-염기 중화 적정 실험에서 중성 용액에서 볼 수 있는 초록색은 ‘초록색’이 아닌 ‘노랑과 파랑의 혼합된 초록색’으로 보인다.

2. BTB 용액의 분광학적 성질

(1) 실험 1: pH별 BTB 용액의 흡광도

HCl과 NaOH 용액을 이용하여 pH=2.0부터 pH=12.0까지 1.0 단위로 다양한 pH를 갖는 용액을 제작한다. 흡광도를 측정하기 위해 큐벳에 각 용액 3mL와 BTB 지시약 60μL를 넣고 BTB 색깔이 충분히 발현될 수 있도록 기다린다. UV/Vis spectrophotometer로 300nm~800nm 범위에서 1nm 단위로 각 용액의 흡광도를 측정하였다[그림 1]. 이 중에서 pH가 2, 3, 4, 5, 6일 때 흡광도는 큰 차이가 없었고[그림 2], pH가 10, 11, 12일 때도 흡광도가 큰 차이를 보이지 않았다[그림 3].

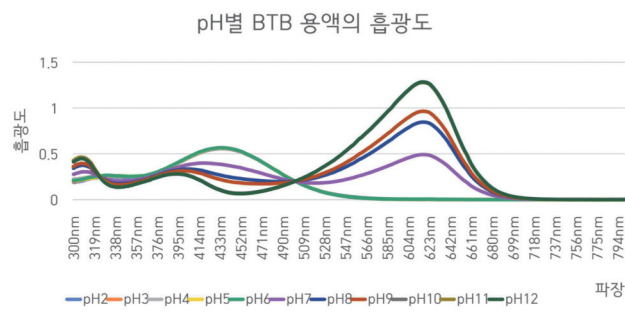


그림 1. pH별 BTB 용액의 흡광도

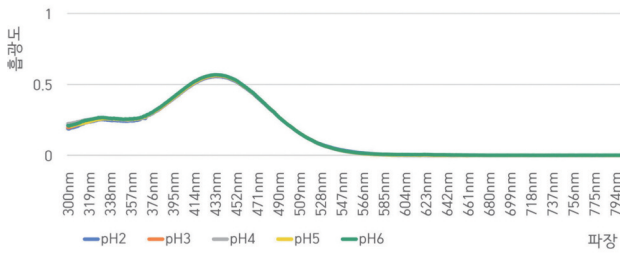


그림 2. pH=2, 3, 4, 5, 6일 때 BTB 용액의 흡광도

pH가 6, 7, 8, 9, 10일 때[그림 4], 흡광도가 의미있는 변화를 보이고, 이를 바탕으로 흡광도를 분석하면 417nm~432nm와 617nm에서 최대 흡광 파장 범위임을 알 수 있었다. 또한 동일한 BTB 농도(BTB 지시약 60 μL/ 3mL)에서 pH와 관계없이 일정한 흡광도를 갖는 등흡광점(isosbestic point)의 파장이 501nm임을 확인할 수 있었다.

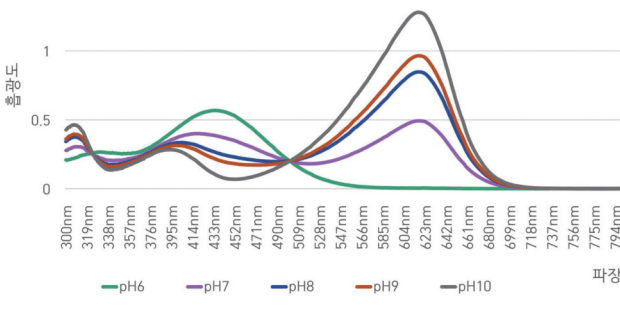


그림 4. pH=6, 7, 8, 9, 10일 때 BTB 용액의 흡광도

3. 501nm의 흡광도를 기준으로 한 상대적 흡광도

pH별 BTB 용액의 흡광도[그림 1]의 데이터 중 425nm,

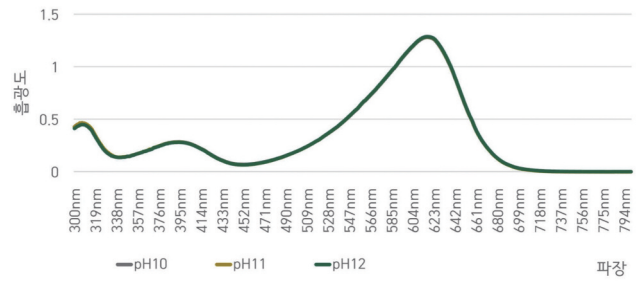
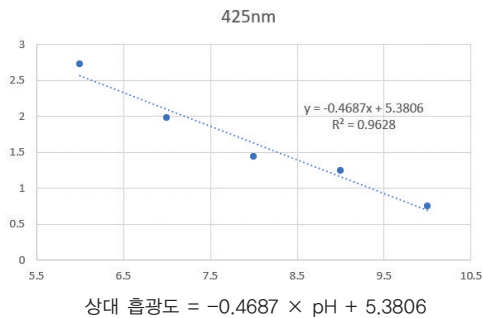


그림 3. pH=10, 11, 12일 때 BTB 용액의 흡광도

501nm, 617nm의 자료만을 추출하면 다음과 같다[표 1]. 등흡광점인 501nm에서 흡광도 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

표 1. 425 nm, 501 nm, 617 nm에서 BTB 용액의 흡광도

	pH=6	pH=7	pH=8	pH=9	pH=10
425nm	0.5567	0.3960	0.2913	0.2490	0.1497
501nm	0.2041	0.1995	0.2020	0.1998	0.1987
617nm	-	0.4924	0.8470	0.9655	1.2795

☆ pH=6에서 617 nm의 흡광도는 0.004793으로 흡광도로서 의미가 없음.

[표 1]의 자료에서 501nm의 흡광도를 기준으로 한 상대적 흡광도로 자료 변환하면 [표 2]와 같고, 1차 함수적인 연관성을 찾으면 [그림 5]와 같다.

표 2. 501 nm의 흡광도를 기준으로 한 상대적 흡광도

상대값	pH=6	pH=7	pH=8	pH=9	pH=10
425nm	2.7276	1.9850	1.4421	1.2462	0.7534
617nm	-	2.4682	4.1931	4.8323	6.4394

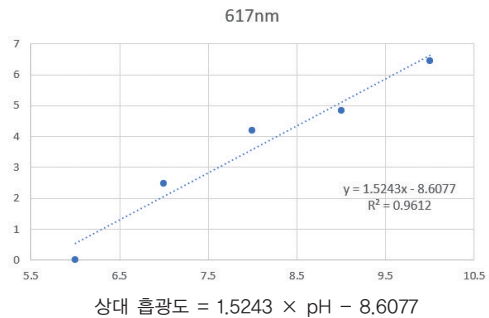


그림 5. 501 nm의 흡광도를 기준으로 한 상대적 흡광도

4. 적용

(1) pH=7.5

- ① pH=7.5 용액에 BTB를 적당량 넣은 후 425nm, 501nm, 617nm에서 흡광도를 측정하였더니 각각 0.3621, 0.2022, 0.6130 이었다.
- ② 이 자료를 501nm의 흡광도를 기준으로 한 상대적 흡광도로 자료 변환하면 425nm에서 1.7908, 617nm에서 3.0317 이 된다.
- ③ 425nm에서 [그림 5]의 식(상대 흡광도 = $-0.4687 \times \text{pH} + 5.3806$)에 대입하면 pH=7.7을 얻을 수 있다.
- ④ 617nm에서 [그림 5]의 식(상대 흡광도 = $1.5243 \times \text{pH} - 8.6077$)에 대입하면 pH=7.6를 얻을 수 있다.

(2) HCl(aq)과 NaOH(aq)로 제조한 미지의 용액

- ① HCl(aq)과 NaOH(aq)로 pH 범위가 6~10인 미지의 용액을 제조한 후 BTB 시약을 적당량 넣는다.
- ② 이 용액을 425nm, 501nm, 617nm에서 흡광도를 측정하였더니 각각 0.153, 0.193, 1.179 이었다.
- ③ 이 자료를 501nm의 흡광도를 기준으로 한 상대적 흡광도로 자료 변환하면 425nm에서 0.793, 617nm에서 6.109 이 된다.
- ④ 425nm에서 [그림 5]의 식(상대 흡광도 = $-0.4687 \times \text{pH} + 5.3806$)에 대입하면 pH=9.8을 얻을 수 있다.
- ⑤ 617nm에서 [그림 5]의 식(상대 흡광도 = $1.5243 \times \text{pH} - 8.6077$)에 대입하면 pH=9.7를 얻을 수 있다.
- ⑥ 미지 용액의 pH를 pH meter로 측정한 결과 9.1로 측정되었다.

(3) HCl(aq)과 Na₂CO₃(aq)로 제조한 미지의 용액 2

- ① HCl(aq)과 Na₂CO₃(aq)로 pH 범위가 6~10인 미지의 용액을 제조한 후 BTB 시약을 적당량 넣는다.
- ② 이 용액을 425nm, 501nm, 617nm에서 흡광도를 측정하였더니 각각 0.971, 0.508, 1.325 이었다.
- ③ 이 자료를 501nm의 흡광도를 기준으로 한 상대적 흡광도로 자료 변환하면 425nm에서 1.911, 617nm에서 2.608 이 된다.
- ④ 425nm에서 [그림 5]의 식(상대 흡광도 = $-0.4687 \times$

pH + 5.3806)에 대입하면 pH=7.4을 얻을 수 있다.

- ⑤ 617nm에서 [그림 5]의 식(상대 흡광도 = $1.5243 \times \text{pH} - 8.6077$)에 대입하면 pH=7.4를 얻을 수 있다.
- ⑥ 미지 용액의 pH를 pH meter로 측정한 결과 7.1로 측정되었다.

결론

고등학교 화학 I 과 화학 II 의 산·염기 개념을 학습하면서 pH 계산과 산·염기 중화적정을 실험하는 경우가 많을 것이다. 하지만 많은 학교에서 pH meter 기기를 운용하고 있지 못하기 때문에 pH를 이론적으로 계산하거나, 지시약의 색깔 변화를 통해 산성/중성/염기성만을 파악하는 한계가 있다. BTB 지시약을 이용하면 산성, 중성, 염기성에 따라 파장에 따라 흡광도가 달라짐에 따라 각각 다른 색깔을 보인다. 이러한 특징을 이용하여 일정한 BTB 농도에서 pH에 따른 흡광도를 조사한 자료를 바탕으로 미지 용액의 흡광도를 측정하면 pH를 유추할 수 있을 것이다.

$$\text{pH} = \frac{5.3806 - \left(\frac{A_{425\text{nm}}}{A_{501\text{nm}}}\right)}{0.4687}$$

$$\text{또는 pH} = \frac{\left(\frac{A_{425\text{nm}}}{A_{501\text{nm}}}\right) + 8.6077}{1.5243}$$

(A는 특정 파장에서 흡광도)

이처럼 용액의 흡광도를 이용하여 pH를 유추하는 방법은 몇 가지 한계점이 존재한다. 첫 번째로 일정한 BTB 농도에서 pH에 따른 흡광도를 조사한 자료를 만들 때 매우 정확해야 한다. 아주 이상적인 데이터는 pH에 따른 흡광도가 선형적으로 나와야 하지만, 용액을 제조하는 데 있어 정확한 pH를 맞추기 쉽지 않고, 공기 중 이산화 탄소의 유입으로 인해 시시각각 pH가 조금씩 변화하기 때문이다. 본 실험에서도 상관계수(R²) 값이 0.9628과 0.9612로 매우 정확하다 할 수 없었다. 두 번째로는 분석하고자 하는 미지의 시료는 가시광선에 대해 투명한 것만 흡광도로 pH를 유추할 수 있다는 것이다. 미지 시료 자체가 가시광선을 흡수한

다면 BTB 시료만이 특정 파장의 빛을 흡수하는 정도가 달라질 것이다. 물론 분광광도계로 흡광도를 측정하기 전 baseline을 제거하여 BTB 시료만의 흡광도를 측정할 수 있지만, 실험적/이론적으로 복잡한 단계를 거쳐야 하는 단점이 존재한다. 마지막 한계점은 산·염기 지시약으로 BTB가

아닌 다른 지시약을 사용할 때 등흡광점이 명확한 지시약만이 사용 가능하다는 것이다. 수많은 지시약 중에 산성, 중성, 염기성에서 색깔이 명확하게 다른 지시약은 몇 종류 없어서 등흡광점이 불명확하여 적절한 지시약의 범위가 좁다는 한계점이 있다. ⚙

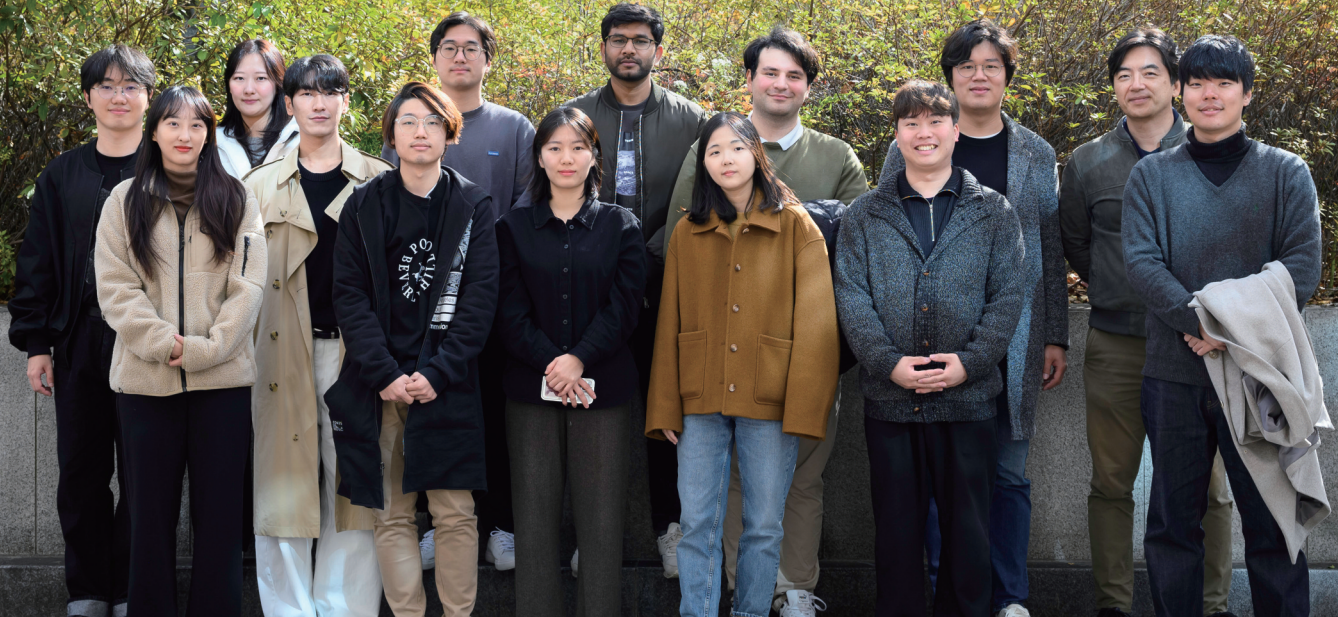


1. 홍훈기, 이보경, 석동진, 김호성, 전호균, 김민성, 신일정. *고등학교 화학 I*. 교학사. **2017**. 154-173
2. 최미화, 서인호, 한문정, 정대홍, 김혜경, 최길순. *고등학교 화학II*. 미래엔. **2017**. 112-125.
3. Daniel C. Harris. *Quantitative chemical analysis*(김강진 외 3인 옮김). 자유아카데미. **2007**. 500-501
4. Skoog, Douglas A., F. James Holler, and Stanley R. Crouch. *Principles of Instrumental Analysis*(박기재 외 7일 옮김). Cengage Learning. **2008**. 313-319, 621-6273
5. Lide, David R., ed. *CRC handbook of chemistry and physics*. Vol. 87. CRC press. **2006**. 3-71
6. Choi, Won-Hyung, and Ho-Jang Hur. "pH measurement using isosbestic point of indicator." *Journal of the Korean Chemical Society* **1989**. 33(2). 203-207
7. Salgado, LE Vidal, and C. Vargas-Hernandez. "Spectrophotometric determination of the pKa, isosbestic point and equation of absorbance vs. pH for a universal pH indicator." *American Journal of Analytical Chemistry* **2014**. 5(17). 2190



하양훈 Ha Yanghune

- 전남대학교 화학교육학과, 학사(2006.3-2012.2)
- 한국교원대학교 화학교육전공, 석사(2015.3-2020.2, 지도교수 : 송기형)
- 대전과학고등학교 화학교사(2022.3-현재)



고려대학교
나노화학연구실/
다성분나노입자구조론연구단

서울특별시 성북구 안암로 145
고려대학교 아산이학관 304호

02) 3290-3139

kylee1@korea.ac.kr

https://nanolab.korea.ac.kr

고려대학교 나노화학연구실/다성분나노입자구조론연구단

다성분 나노입자 구조론 연구

나노미터 공간에서의 물질 구조와 조성의 정밀제어는 거시세계 물질에서 구현할 수 없는 물질 특성에 접근하는 포털(portal)이므로 큰 관심의 대상이다. 특히 아주 큰 화합물 라이브러리를 손쉽게 구현할 수 있는 실험 방법론의 탐색 연구가 전세계적으로 경쟁적으로 진행 중에 있다. 본 연구실에서 진행하고 있는 다성분 나노입자 구조론(tectonics)은 다성분 고체 나노입자 내부에서 격자 에너지에 갇힌 원자들을 입자 내의 특정 위치로 재배치하는 원리로서 나노입자 라이브러리를 폭발적으로 확장하는 새로운 방법론을 제시한다. [그림 1]에 도시된 바와 같이 나노입자 구조론의 적용을 통하여 원자는 나노입자에서 분출되거나, 이동하고 섞이게 되는데 이러한 현상은 지구의 표면에서 일어나는 지각활동과 큰 유사성을 지닌다.

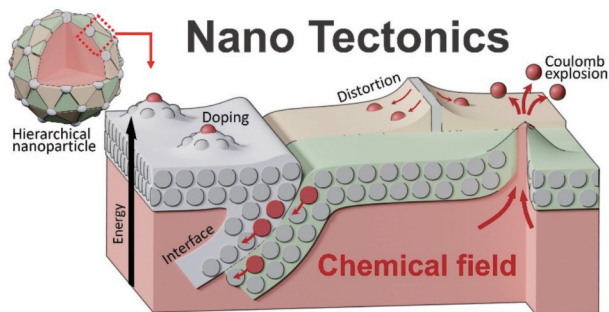


그림 1. 다성분 나노입자 구조론의 개념도. 에너지 기울기의 영향으로 원자/이온이 이동하여 나노입자의 결정구조, 조성, 형태가 변화.

Project 1 화학장과 이를 확장한 나노입자 구조론

나노입자 내 원자들의 에너지는 이웃 원자들과의 배위상태와 인근에 존재하는 계면 등에 영향을 받으며, 원자마다 다른 값을 가진다. 나노입자 내에는 다양한 방향 축의 에너지 기울기가 존재할 수 있는데, 이러한 원자 및 이온의 화학적 상태에 의해 유발되는 에너지 기울기를 화학장(Chemical Fields)이라 명명하였다. 화학장은 단지 나노입자의 물리적/화학적 특성을 결정하는 것에 그치지 않고, 나노입자 내에서의 원자 이동에 방향성을 부여하여 새로운 상 및 구조 생성을 유도할 수 있는 합성 도구로 활용될 수 있다.

고체 내에서는 구성 원자들이 각각의 위치에 고정되어 움직임이 철저히 제한되어 있다. 마치 계란판에 담긴 계란들처럼 격자 에너지 장벽에 원자들이 갇혀 있는 모습을 상상할 수 있다. 이 계란들은 절대온도에 비례하는 운동에너지를 가지고 계란판의 움푹한 바닥을 기준으로 진동하고 있는데, 만약 온도가 충분히 높아서 이들의 운동 에너지가 계란판의 높은 능선들을 뛰어넘을 정도가 되면 원자들의 이동이 시작될 수 있다. 모든 원자가 운동성을 가지게 되면 고체는 녹아 액체가 된다. 다성분 나노입자를 가열하는 경우를 생각해 보자. 입자 내의 다양한 원자들의 이동 방향이 제어되지는 않는 경우, 무작위적으로 섞이든지 이종 원소들 간의 상호작용이 큰 방향으로 분리될 것이다 (엔트로피의 기여가 높을 때는 합금이 되고, 엔탈피의 기여가 높을 때는 상 분리가 될 것이다).

나노입자 구조론의 핵심은 아래 그림과 같이 계란판의 모습을 한 격자 에너지를 휘어서 기울기를 유발하는 요소, 즉 화학장을 제공하여 준안정성 나노입자 내에서 구성 원자들의 방향성 있는 이동을 유발하는 것이다.

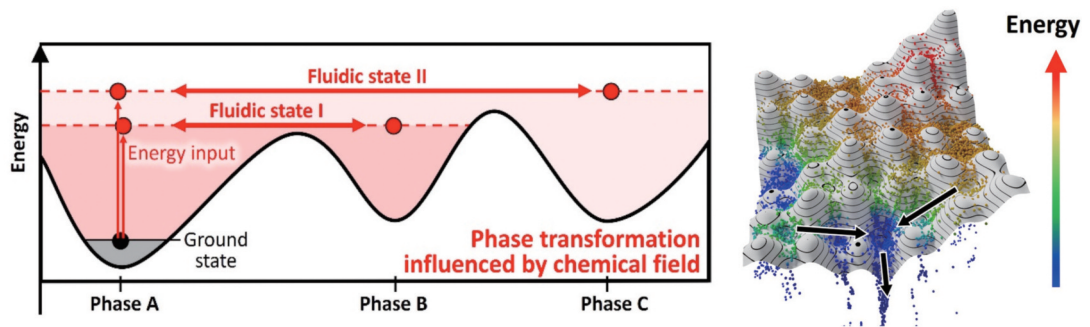


그림 2. (왼쪽) 에너지 여기된 원자가 화학장에 따라 도달하는 다양한 준안정성 상과 (오른쪽) 나노입자 내 격자 에너지 기울기에 따라 흐르는 원자/이온의 모식도.

Project 2 화학장 적용의 예시: 도핑(doping), 결함(defect) 및 공석(vacancy)의 도입

도핑(doping), 결함(defect) 및 공석(vacancy)은 나노촉매의 활성 및 내구성과 밀접한 관계를 가지고 있음을 다양한 선행 연구를 통해 알 수 있었다. 나노물질의 표면 또는 계면에 있는 원자들은 낮은 배위수를 지니며 상대적으로 불안정한 상태로 여기되어 있으므로, 외부로부터 작은 에너지가 도입된다면 쉽게 격자 에너지 장벽을 벗어날 수 있다. 또한, 원자들의 에너지는 나노입자의 공간기하학적 구조에 따라 다양한 상태로 존재한다. 즉, 나노입자가 녹는점에 도달하지 않아도 일부 원자들은 이동의 자유를 얻어 유동상(fluidic phase)이 될 수 있으며, 준

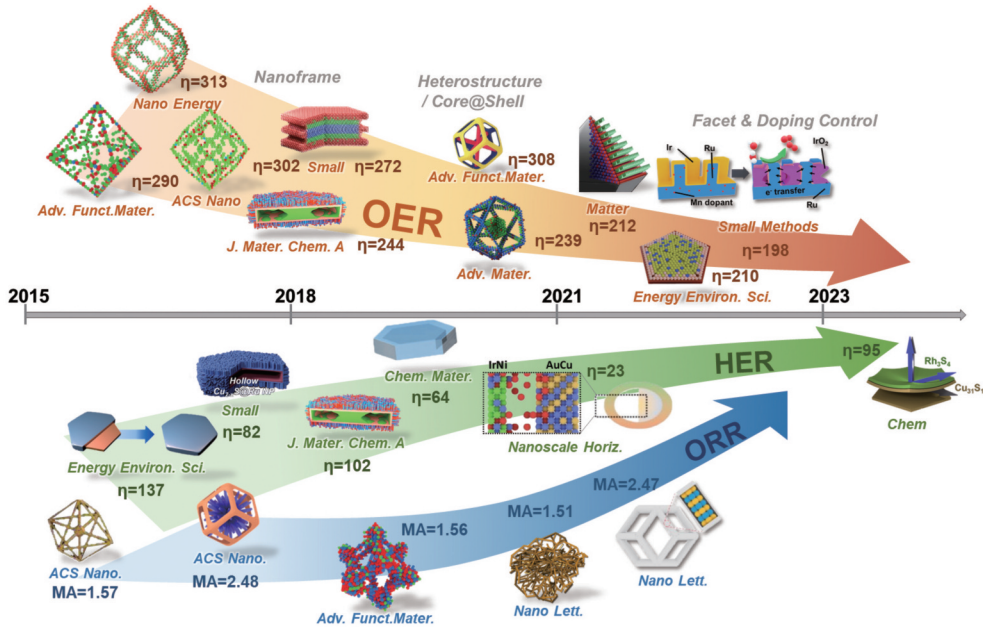


그림 3. 연구진이 개발한 전기화학적 에너지 전환 촉매들의 구조와 성능

안정성 상을 찾아 재조립될 수 있다.

화학장은 나노물질 내에서 공간의 위치에 따라 원자의 자유에너지 준위가 다른 값을 가지도록 하는 다양한 변인들로 인해 형성된다. 원자의 원자량, 부피, 전하량, 화학 반응성 등에 따라 특정 화학장과 상호작용 정도가 다르므로, 다양한 화학장에 대해 원자마다 서로 다른 양상으로 반응(response)할 수 있다. 간단한 예로, 합금 나노입자 표면을 산소에 노출시키면 산소친화도가 높은 금속이 표면으로 이동할 수 있다. [Science 2008, 322, 932–934]

도핑(doping), 결함(defect) 및 공석(vacancy)은 원자의 배위상태를 변화시켜 결합에 사용되지 않은 원자 오비탈이 노출되도록 하여 촉매 반응과정에서 활성화 에너지 조절에 기여한다. 또한 결정격자 왜곡, 전기음성도 차이에 의한 전자구조 변화 등이 야기되어 다양한 응용을 위한 소재 합성에 중요한 요소이다. 어떠한 방법을 통하여 도핑, 결함, 공석이라는 구조적 요소를 나노 구조에 위치 선택적으로 도입할 수 있을까?

서로 다른 물질이 만나는 이종 계면에서 존재하는 높은 계면 에너지와 낮은 격자 에너지로 인해 계면 주변에서는 원자들이 쉽게 유동화될 수 있다. 이러한 조건에서는 이종 물질 간의 혼합 엔탈피가 양수인 경우에도 엔트로피의 큰 기여에 의해 전방위적인 원소의 확산이 일어날 것이다. 이를 통하여 합금의 계면 근처에서의 수월한 이종 원소 도핑을 유도할 수 있을 것이며, interstitial 탄소와 같이 공유결합성이 커서 금속 내 확산이 느린 비금속 원자의 확산도 구현할 수 있을 것이다.

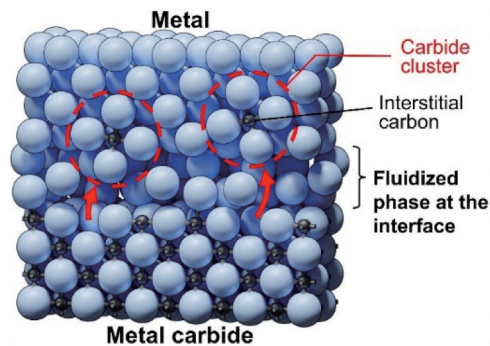


그림 4. 나노입자의 이종 계면에서 탄화물 클러스터(carbide cluster)의 국소적인 유동화 개념도

한편, 이종원소의 나노구조로의 부분 도입은 새로운 결정 계면을 형성하며, 이때 발생하는 격자의 왜곡에 의하여 나노입자 전체의 결정구조가 변형될 수도 있다. [Chem 2023, 9, 948–962] 황화 구리/황화 로듐 나노 판의 휘어짐의 정도가 계면에서의 물질 섞임에 의해 조절 가능함을 입증하였으며, 이러한 구조적 휘어짐이 물질의 촉매 반응성 즉 화학적 성질과 밀접한 관련이 있음을 보여 주었다.

Project 3 다성분 나노입자 구조론의 정립을 통한 나노입자 library의 폭발적 확장

다성분 나노입자 구조론에서는 나노입자를 완성된 생산품, 정적인 고체 재료가 아닌 변화를 이끌어낼 수 있는 촉발 물질이며 또한 환경에 따라 동적으로 반응하는 준안정성 물질로 인식한다.

나노입자의 성장, 화학적 조성 변화 과정 또는 촉매 구동 상황에서 나노입자 내부의 미소영역(microdomain)들은 끊임없는 물리적 영역 크기 변화, 유동상의 형성 및 소멸, 새로운 물질상의 형성을 겪게 된다. 반응 시간의 축에서 고정된 한 시점에서는 위치적으로 잘 정의된 화학장이 형성되지만, 나노입자가 변화함에 따라 화학장의 유효거리, 기울기와 위치 또한 변하게 된다. 다시 말해, 나노입자의 구조는 그 형태와 조성을 따로 떼어놓고 볼 수 있는 독립적인 상태가 아니며, 구조와 화학장이 실시간으로 상호작용하여 생성된 준안정성 상태인 것이다. 한편, 화학장의 유효거리를 벗어난 영역들은 더 큰 화학장이 새로 제공되기 전까지는 안정한 상태에 도달한다. 따라서 다성분 나노입자의 설계는 준안정성 상태들의 동적인 변화 경로를 총괄적으로 이해하는 것이 필수적이다.

본 연구진이 제시하는 나노입자 구조론적 설계의 예를 보자. 베타-철/니켈수산화물(β -Fe/NiOOH)의 불포화 배위면(undercoordinated facets)은 산소발생반응에 높은 활성을 보인다. 이 결정면은 Fe-도핑된 {111}Ni 결정면의 수화에 의해서 형성 가능하므로 Fe가 도핑된 {111}Ni 결정면을 구현하는 것이 필요하다. 일산화탄소와 백금의 상호작용을 활용하여 니켈 결정 속에서의 백금 원자의 방향성 있는 이동을 유도하고 Fe가 도핑된 {111}Ni 결정면으로 덮인 정팔면체 나노결정을 형성하였다. 이 물질의 표면은 촉매 구동하에서 수화가 되어 불포화 배위면

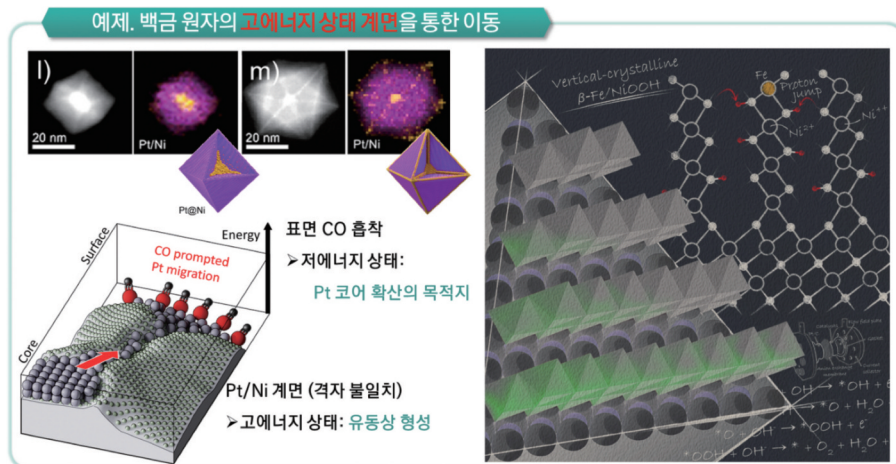


그림 5. 준안정성 나노입자의 구조에서 원자의 이동을 유도하는 화학장(Pt-CO interaction)의 예와 이를 통한 나노구조의 합성 경로

(undercoordinated facets)을 노출시키고 산소발생반응에 높은 활성과 내구성을 보였다. [*Matter* **2021**, 4, 3585–3604, *ACS Nano* **2015**, 9, 2856] 이처럼 나노입자의 동적인 구조 변화 경로에 대한 완벽한 이해를 통하여 원하는 최종 나노입자의 구조와 조성을 만들어 내는 출발 물질을 디자인할 수 있을 것이다.

연구진은 나노입자의 준안정성과 나노물질상의 형성 및 분리 등의 근원적인 이해를 통하여 화학장 개념을 최초로 도출하였으며 더 나아가 다성분 나노입자 구조론을 제안하였다. 또한 연료전지와 친환경 수소 생산 등의 분야에서 에너지 전환 성능을 최적화하는 원자 배위를 가지는 촉매 구조를 구현하는 등 기초연구를 넘어 나노구조의 실용성을 입증하고 있다. 향후 다성분 나노입자 구조론 연구를 통하여 나노입자 라이브러리를 폭발적으로 확장하고 물질 특성 연구의 혁신을 불러오고자 한다.

About



고려대학교

나노화학연구실/다성분나노입자구조론연구단

고려대학교 나노화학연구실을 이끌고 있는 이광렬 교수는 1992년 KAIST 화학과를 졸업한 후 미국 UIUC에서 박사학위를 취득했다(1997년). 이광렬 교수는 2003년 고려대학교 화학과에 부임한 이래 나노 물질 합성 분야 연구에 매진하고 있으며 2007년 일본 화학회 “The distinguished lectureship award”, 2009년 “KCS-Wiley 젊은 화학자상”, 2017년 고려대학교 “석탑연구상”, 2019년 KCS 무기분과회 “우수연구상” 등을 수상하였다. 국내 나노연구 대표 학술지인 『Nano Convergence』의 부편집장을 역임하며 해당 학술지를 SCI 등재시키는데 일조하였으며, 2020년 6월부터 『CrystEngComm』의 부편집장, 2020년 9월부터 『ChemNanoMat』의 Editorial Board Member를 역임하고 있다. 2023년 6월부터 한국연구재단 리더연구사업의 지원으로 다성분 나노입자 연구단을 설립하고 15명의 연구원들과 함께 연구에 매진하고 있다.



이광렬 단장
고려대학교 화학과 교수

최근 대표 학술 논문

1. “Flattening bent Janus nanodiscs expands lattice parameters.” *Chem* **2023**, 9, 948.
2. “Electrochemically Activatable Liquid Organic Hydrogen Carriers and Their Applications.” *J. Am. Chem. Soc.* **2023**, 146, 16951.
3. “Chemical Fields: Directing Atom Migration in the Multiphasic Nanocrystal.” *Acc. Chem. Res.* **2022**, 55, 1015.
4. “Safeguarding the RuO₂ phase against lattice oxygen oxidation during acidic water electrooxidation.” *Energy Environ. Sci.* **2022**, 15, 1119.
5. “Vertical-crystalline Fe-doped β-Ni oxyhydroxides for highly active and stable oxygen evolution reaction.” *Matter* **2021**, 4, 3585.
6. “Pt Dopant: Controlling the Ir Oxidation States toward Efficient and Durable Oxygen Evolution Reaction in Acidic Media.” *Adv. Funct. Mater.* **2020**, 30, 2003935.
7. “Highly Crystalline Hollow Toroidal Copper Phosphosulfide via Anion Exchange: A Versatile Cation Exchange Nanopatform.” *ACS Nano* **2020**, 14, 11205.
8. “Janus to Core-Shell to Janus: Facile Cation Movement in Cu_{2-x}S/Ag₂S Hexagonal Nanoplates Induced by Surface Strain Control.” *ACS Nano* **2019**, 13, 11834.
9. “Topotactic transformations in an Icosahedral Nanocrystal to Form Efficient Water-Splitting Catalysts.” *Adv. Mater.* **2019**, 31, 1805546.
10. “Janus nanoparticle structural motif control via asymmetric cation exchange in edge-protected Cu_{1.81}S@Ir_xS_y hexagonal nanoplates.” *ACS Nano* **2018**, 12, 7996.
11. “Dendrite-Embedded Platinum–Nickel Multiframes as Highly Active and Durable Electrocatalyst toward the Oxygen Reduction Reaction.” *Nano Lett.* **2018**, 18, 2930.
12. “Vertex-Reinforced PtCuCo Ternary Nanoframes as Efficient and Stable Electrocatalysts for the Oxygen Reduction Reaction and the Methanol Oxidation Reaction.” *Adv. Funct. Mater.* **2018**, 28, 1706440.



김연준 Yeonjoon Kim

부경대학교 화학과, 조교수
 yeonjoonkim@pknu.ac.kr
<https://sites.google.com/view/yeonjoon>

소개글

김연준 교수는 박사과정 때 계산화학과 그래프 이론을 접목시켜 컴퓨터로 화학 반응 경로를 자동으로 예측하는 방법론을 개발하였다. 이후 박사 후 연구원 때에는 바이오매스를 바이오연료와 고부가가치 화합물로 변환하는 촉매를 계산화학적 방법으로 디자인하기 위한, 양자화학 계산을 활용한 반응 메커니즘 연구를 진행하였다. 그 외에도 머신러닝과 딥 러닝 방법론을 활용해서 바이오연료와 대체 연료 후보 물질을 빠르고 정확하게 대량으로 스크리닝 할 수 있는, 분자의 물성, 화학적 성질을 예측하는 모델을 개발하였다. 최근에는 촉매 디자인 분야에 화학적으로 설명 가능한 기계학습 모델 도입을 위한 연구를 진행하고 있다. 또한, 실험과 양자 계산에서 각각 얻은 데이터베이스의 서로 다른 오차와 불확정성을 보정해, 더 광범위하면서도 신뢰도가 높은 데이터베이스를 구축하기 위한 연구를 진행 중이다. 이와 같은 데이터베이스를 딥러닝 모델에 적용하면 지금보다 더 정확하고 넓은 분자 범위에 일반화 가능한 딥러닝 모델을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

주요연구분야

- 계산화학(Computational Chemistry)
- 물리화학(Physical Chemistry)
- 화학정보학(Cheminformatics)
- 화학에서의 딥 러닝(Deep Learning in Chemistry)
- 재생에너지(Renewable Energy)
- 지속가능성을 위한 화학 (Chemistry for Sustainability)

대표논문

1. **Y. Kim**, S. Kumar, J. Cho, N. Naser, W. Ko, P. C. St. John, R. L. McCormick, S. Kim, Designing high-performance fuels through graph neural networks for predicting cetane number of multicomponent surrogate mixtures, *SAE Technical Paper* **2023**, 2023-32-0052.
2. **Y. Kim**, J. Cho, N. Naser, S. Kumar, K. Jeong, R. L. McCormick, P. C. St. John, S. Kim, "Physics-informed graph neural networks for predicting cetane number with systematic data quality analysis." *Proc. Combust. Inst.* **2023**, *39*, 4969.
3. J. Cho, **Y. Kim**, B. D. Etz, G. M. Fioroni, N. Naser, J. Zhu, Z. Xiang, C. Hays, J. V. Alegre-Requena, P. C. St. John, B. Zigler, C. S. McEnally, L. D. Pfefferle, R. L. McCormick, S. Kim, "Bioderived ether design for low emission and high reactivity transport fuels." *Sustain. Energy Fuels* **2022**, *6*, 3975.
4. **Y. Kim**, M. A. Javed, D. M. Price, D. Kilin, S. Kim, "Toward rational design of supported vanadia catalysts of lignin conversion to phenol." *Chem. Eng. J.* **2022**, *446*, 136965.
5. **Y. Kim**, B. D. Etz, G. M. Fioroni, C. K. Hays, P. C. St. John, R. A. Messerly, S. Vyas, B. P. Beekley, F. Guo, C. S. McEnally, L. D. Pfefferle, R. L. McCormick, S. Kim, "Investigation of structural effects of aromatic compounds on sooting tendency with mechanistic insight into ethylphenol isomers." *Proc. Combust. Inst.* **2021**, *38*, 1143.
6. **Y. Kim**, A. Mittal, D. J. Robichaud, H. M. Pilath, B. D. Etz, P. C. St. John, D. K. Johnson, S. Kim, "Prediction of Hydroxymethylfurfural Yield in Glucose Conversion through Investigation of Lewis Acid and Organic Solvent Effects." *ACS Catal.* **2020**, *10*, 14707.
7. **Y. Kim**, A. E. Thomas, D. J. Robichaud, K. Iisa, P. C. St. John, B. D. Etz, G. M. Fioroni, A. Dutta, R. L. McCormick, C. Mukarakate, S. Kim, "A perspective on biomass-derived biofuels: From catalyst design principles to fuel properties." *J. Hazard. Mater.* **2020**, *400*, 123198.
8. **Y. Kim**, J. W. Kim, Z. Kim, W. Y. Kim, "Efficient prediction of reaction paths through molecular graph and reaction network analysis." *Chem. Sci.* **2018**, *9*, 825.

- KAIST 화학과, 학사(2008.2-2012.2)
- KAIST 화학과, 박사 (2012.2-2018.2, 지도교수 : 김우연)
- KAIST 화학과, 박사 후 연구원 (2018.3-2018.6)
- National Renewable Energy Laboratory, 박사 후 연구원 (2018.6-2020.12, 연구책임자 : 김선아)
- Department of Chemistry, Colorado State University, 박사 후 연구원 (2021.1-2023.8, 지도교수 : 김선아)
- 부경대학교 화학과, 조교수(2023.9-현재)

화학세계가 만난 화학자 ㉑



“많은 사람에게
혜택이 돌아갈 수 있는
유용한 연구를 추구”



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

이번 호에는 제132회 대한화학회 총회 및 학술발표회에서 이태규학술상을 수상하신

경북대학교 화학과 최철호 교수님을 모셨습니다. 수상을 축하드립니다.

교수님께서서는 새로운 양자화학이론 개발과 응용 및 차세대 양자 소프트웨어 개발을 위한

개방형 양자 플랫폼 개발에 관한 연구를 활발히 진행하셨습니다.

이론 화학과 계산 화학에 관한 교수님의 철학과 연구 업적에 더하여 교수님의 다양한 면모를 대한화학회 회원분들께 소개해 드립니다.

[모더레이터: 한순규 교수(KAIST 화학과)]

1. 화학세계의 독자 중에는 중고등학생도 있습니다. 교수님께서서는 중고등학교 학창시절부터 화학에 관심이 많으셨나요? 교수님께서 화학을 전공하시게 된 특별한 계기가 있었나요?

어릴 때부터 과학에 대한 막연한 동경이 있었습니다. 특히 물리를 좋아했습니다. 혼자 사색하는 것을 좋아하는 편이었습니다. 대화하다가도 혼자 생각에 빠지곤 하였습니다. 고등학교에 오면서 원리를 살펴보는 물리학도 좋았지만, 물질을 다루는 화학에 대한 관심도 생겼습니다. 고등학교 3학년 때 담임선생님이 화학선생님이셨는데 제가 화학을 전공으로 정한 데 있어 그분의 영향이 있었을 수도 있겠네요. 결국에는 “물리화학”을 전공하게 되었네요.

청소년기는 진로 선택을 하는 중요한 시기입니다. 이때 자신이 정말 좋아하는 것이 무엇인지 깊이 고민하고 선택을 하시기 바랍니다. 외적 요인에 의해서 결정을 하면 후회를 하게 될 공산이 크다고 생각합니다. 단순히 현시점에서 대부분의 사람들이 선호하는 방향의 진로는 경쟁이 치열할 수밖에 없습니다. 그만큼 성공 확률은 낮아지겠지요. 자신이 좋아하는 영역에서 잘하면 그 진로에서 성공 확률이 더 높다고 생각합니다. 미래에 대한 막연한 두려움을 갖지 말고 좋아하는 것에 도전하세요!

2. 화학세계의 독자 중 화학전공 대학원생들도 많습니다. 교수님께서 서울대학교 화학과(현재는 화학부)에서 학사학위와 석사학위를 받으시고 미국의 조지타운 대학교에서 박사학위를 받으셨습니다. 그리고 Iowa State University에서 박사 후 과정을 수행하셨습니다. 이 트레이닝 과정은 순조로웠나요? 혹시 어려움은 없으셨나요? 어려움이 있었다면 어떻게 극복하셨나요?

고등학교 때와는 너무나 다른 학부과정에서의 공부에 처음에는 큰 어려움을 겪었습니다. 커리큘럼이 이미 짜여져 있는 고등학교와 달리 대학에서는 저에게 갑자기 주어진 자유를 처음에는 어떻게 사용할지 익숙지 않았습니다. 그런 와중에 학부생 때부터 컴퓨터를 활용한 과학연구에 관심이 갔습니다. 컴퓨터의 과학적 활용에 관심이 많았지만 막상 서울대 화학과 교과과정에서 이를 접할 수 없었습니다. 대학원에 올라가 김관 교수님 실험실에서 처음으로 양자역학 소프트웨어인



■ (왼쪽 부터) Mike Schmidt 박사, Klaus Ruedenberg 교수님, 최철호 교수님(2015년경)

Gaussian 76을 접했지만 막상 그 소프트웨어들은 중대형 컴퓨터용이었고, 당시 서울대 화학과에는 복잡한 계산을 할 수 있는 대형 컴퓨터는 존재하지 않았습니다. 릴 테이프에 담긴 Gaussian과 MOPAC이라는 SW를 당시 386이라는 PC로 옮겨 작동시키려 했었습니다. 결론적으로 Gaussian 76은 실패했고 MOPAC은 성공적으로 PC를 이용하여 여러 양자 계산들을 수행했습니다.

당시 외국은 컴퓨터 환경이 국내보다는 좋았습니다. 박사과정 중에는 중대형 컴퓨터 활용이 훨씬 자유로워 그동안 하고자 했던 계산들을 마음껏 할 수 있었습니다. 연구적인 부분에서는 풍족하였지만 외국에서의 생활이 쉽지 않았습니다. 언어 장벽도 있었고 문화적 이질감도 컸습니다. 그러한 어려움은 더욱더 연구에 집중하면서 해결했던 것 같습니다. 그럼에도 당시 여러 사람과 열린 마음으로 더 충분한 교류를 하지 못했던 것이 지금에 와서는 아쉬움으로 남습니다.

3. 지금의 교수님을 있게 한데 가장 큰 영향을 미치셨던 분이 누구셨나요? 어떤 영향을 미쳤나요?

원래 포닥 지도교수님은 Iowa State University의 Mark Gordon 교수님이셨습니다. 하지만 저에게 큰 영향을 준 분을 꼽으라 한다면 Klaus Ruedenberg 교수님(캐스스씨를 처음 개발하신 분) 꼽고 싶습니다. Ruedenberg 교수님은 양자역학의 역사와 같은 분이십니다. 수학과 이론 개발에 탁월한 능력을 갖추신 분이셨습니다. 포스닥 시절 한계에 부딪혀 있을 때 수학에 대한 신세계와 순수 열정을 느낄 수 있게 해 주신 분입니다. 저에게 수학은 어렵

다는 선입견이 있었는데, 그분은 수학을 마치 음악의 아름다운 선율을 연주하듯 대하셨고, 수학이 너무나 자연스러운 분이셨습니다. 하루는 Ruedenberg 교수님과 어떤 문제를 의논하다가 풀리지 않아 다음날 다시 논의하기로 하였습니다. 그런데 다음날 보니 교수님은 이미 상당한 진전이 있었습니다. 그날 새벽 2시에 갑자기 아이디어가 떠올라서 새벽까지 생각해봤다고 하셨습니다. 당시 여든이 넘는 연세에도 불구하고 저와 함께 문제의 해결을 위해 밤새워 노력하시는 모습은 지금도 뇌리에 깊이 남아 있습니다. 연구라는 게 힘들기만 한 것이 아니라 진짜 즐거울 수 있구나 하는 것을 배울 수 있었습니다.

4. 교수님은 계산 방법론 개발을 통해 양자화학 계산의 정확도를 높이고 양자계산으로 다룰 수 있는 시스템의 크기를 현저히 높이는 알고리즘 연구를 수행해 오셨습니다. GAMESS 양자화학계산 패키지 공동 개발, QFMM 방법론 개발, SIMOMM 개발, MRSF-TDDFT 이론 개발 등 많은 성과를 내셨습니다. 연구 업적에 약자 이름이 각각 붙여진 것이 인상깊습니다. 교수님의 연구를 화학과 학부생 정도가 이해할 수 있을 정도로 설명해주실 수 있을까요?

GAMESS(“게임즈”라고 발음)은 Gaussian과 비슷한 것으로 생각하시면 됩니다. 누구든지 내려받아서 무료로 쓸 수 있는 양자패키지입니다. 저희가 개발한 이론들을 추가하였습니다.

QFMM은 거대 시스템의 계산량을 선형으로 증가하도록 줄이는 방법입니다. Gaussian을 써보면 알겠지만 계산 시간이 상당히 오래 걸립니다. 보통은 시스템 크기(N)의 3승으로(N³) 계산량이 늘어납니다. 이 문제를 해결하기 위해 점전하들간 쿨롱힘들의 계산속도를 높이기 위해 개발된 FMM(Fast Multipole Method)을 양자계산에 도입하였습니다. 즉 시스템 크기 대비 N(선형)으로 계산량이 늘도록 하고자 개발한 것이 QFMM입니다. 사실은 좀 더 효율적으로 만들지 못해서 아쉬움이 아직도 있는데 아직 개선의 여지가 많습니다.

SIMOMM 역시 QM/MM의 일종으로 특히 표면화학연구를 편리하게 하기 위해 개발했습니다. 시스템이 너무 크면 계산량이 많아져 모든 것을 양자계산(QM, Quantum Mechanics) 하긴 힘들니 시스템 대부분은 MM(Molecular Mechanics)으로 계산하고 정밀해야 하는 특정 계산은 QM을 하는 하이브리드 방식입니다. 특히 실리콘 반도체 표면에서의 거동을 계산하기 위해서 개발하였습니다.

MRSF-TDDFT는 가장 최근에 개발한 것으로 기존 DFT, TDDFT들의 한계들을 극복하여 특히 원뿔형 교차점, 다이라디칼, 전이상태, 화학결합분해 및 생성 등 기존 이론들로 계산이 불가능했거나 불완전했던 것에 새로운 대안을 제공하고자 개발하였습니다. 경북대에서 교수로 지내면서 어느 날 문득 그동안 “연구를 위한 연구”를 진행한 것이 아닌가 하는 반성을 하였습니다. 많은 사람에게 혜택이 돌아갈 수 있는 연구를 해야겠다는 생각이 들었습니다. 그러한 고민을 통해서 2017~2018년에 개발한 것이 MRSF-TDDFT입니다.

기존에 많이 쓰이고 있는 DFT는 다이라디칼 시스템을 기술하지 못합니다. DFT는 두 개의 홀전자를 자꾸 짝을 지으려고 합니다. 그러다 보니까 엉뚱한 계산 값이 나오기 일쑤입니다. 결합의 homolytic한 끊음을 잘 기술하지 못하는 DFT의 단점들을 MRSF-TDDFT를 통해서 해결하였습니다.

또한, 여기상태의 계산에는 TDDFT를 많이 사용하는데 원뿔형 교차점 등을 올바르게 기술하지 못하는 단점이 있습니다. 서로 다른 전자상태 간의 만나는 교차점을 원뿔형 교차점이라 하는데 한 전자 상태에서 다른 전자 상태로 훌쩍 넘어가는 일이 원뿔형 교차점에서 일어납니다. 한 시스템이 형광을 보이다가 갑자기 형광을 보이지 않는 퀸칭 현상을 보이기도 하는데 이게 다 여기서 기인하는 문제입니다. 원뿔형 교차점 근처의 시스템은 여기 상태에 있다 가도 펌프초 상간에 기저 상태로 갈 수 있습니다. 그런데 이러한 거동을 TDDFT를 비롯한 기존 단일 참조 이론들은 잘 계산하지 못하거나, 또 계산할 수 있더라도 계산량이 지나치게 많은 반면, 저희가 개발한 MRSF-TDDFT는

원뿔형 교차점을 찾는 문제를 쉽고 빠르게 그리고 정확하게 잘 계산할 수 있습니다.

따라서, 기존 DFT와 TDDFT로 계산하셨다면 MRSF-TDDFT가 이들의 단점을 극복할 수 있어 좋은 대안으로 적극 추천 드립니다.

5. 교수님께서 KISTI와의 공동연구를 통하여 “스마트 사이언스 플랫폼”을 개발하셨습니다(mqcp.edison.re.kr). 이 플랫폼에 대해서 설명해주실 수 있을까요? 이 플랫폼이 왜 중요하고 그 임팩트가 무엇이라고 생각하시나요?

스마트 사이언스 플랫폼은 양자역학 소프트웨어 관련하여 사용자와 개발자 모두에게 도움을 주기 위해서 개발한 것입니다. 한 교수님과 같은 양자역학 소프트웨어 사용자의 경우 Gaussian을 많이 사용하실 겁니다. 그런데 사용자의 입장에서 Gaussian을 내려받아서 설치해야 하고, 또 배워야 하는 부분이 큰 진입 장벽으로 느껴질 수 있습니다. 이러한 어려움을 웹 기반의 양자역학 소프트웨어를 통해서 해결하고자 하였습니다. 양자역학 계산이 낯선 사용자도 쉽게 양자역학 계산을 할 수 있는 플랫폼을 개발을 통해서 말입니다. 다양한 템플레이트를 통해서 구조만 딱 넣으면 계산이 되는 시스템, 사용자가 굳이 많은 내용을 알지 못해도 쉽게 접근할 수 있는 시스템을 구현하고자 하는 것입니다.

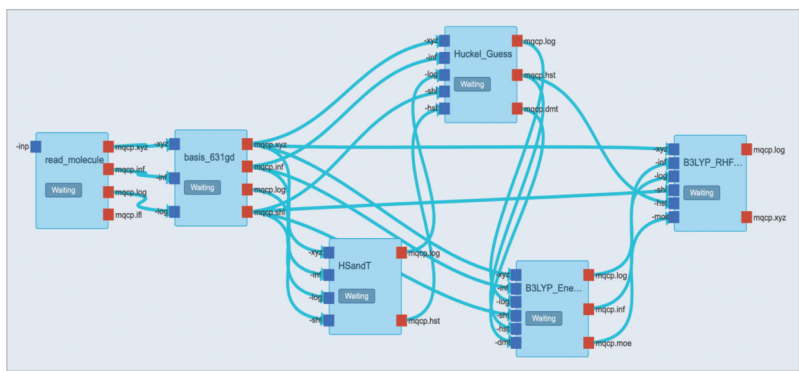
개발자의 측면에서도 양자역학 소프트웨어 개발에 있어 어려움과 문제점이 많습니다. 먼저 연구개발에 있어 폐쇄성의 문제입니다. 양자 소프트웨어를 개발하는 특정 그룹에 소속되거나 그 그룹과 관련이 있어야만 개발에 참여할 수 있는 문제가 있어왔습니다. 또한, 특정 그룹에 속해 있어도 자신이 생각했던 새로운 양자이론을 기존의 시스템에 더하기 위해서는 기존 시스템을 상당 부분 이해해야만 하는 문제가 있었습니다. 그런데 그렇게 하려면 보통 반년 이상의 많은 트레이닝 시간이 필요합니다. 비효율적이죠. 마지막으로 중복투자의 문제가 있습니다. 같은 양자이론이 Gaussian에도 있고 게임즈에도 있고 하는 식이죠.

저희가 제시한 새로운 플랫폼은 기존 소프트웨어를 모듈화하여 실행하는 구조로 되어 있어서 전체 소프트웨어를 이해해야 하는 문제를 해결했습니다. 모듈화를 통해 새로운 양자이론의 도입도 쉽고 그 과정에서 전체를 이해하지 않아도 되는 플랫폼을 만든 것입니다. 흡사 휴대전화의 앱과 같은 형태로 말이지요. 휴대전화의 앱이 각자의 기능은 제한적이지만 그 각각의 기능을 저희가 편리하게 잘 사용하는 것과 마찬가지로, 사용자로서도 다양한 모듈들의 단순 연결만으로 복잡 다양한 계산들을 수행할 수 있습니다.

많은 모듈이 개발된다면 컴퓨터언어를 몰라도 본인만의 소프트웨어를 아래 그림처럼 단순한 연결만으로 구현

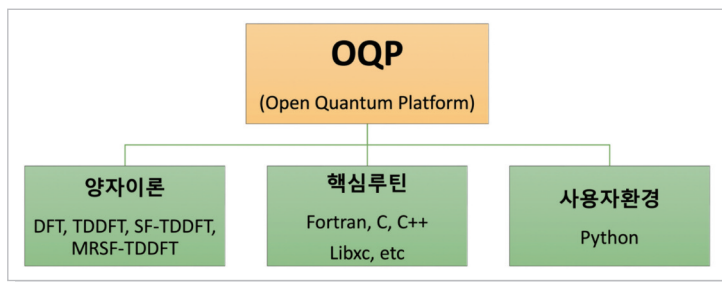
할 수 있을 것입니다. 즉, 컴퓨터언어 사용 없이 누구든지 자신만의 소프트웨어를 쉽게 개발할 수 있도록 하는 것이 궁극적 목표입니다.

그동안 굉장히 폐쇄적이었던 양자 소프트웨어의 환경을 개방형 시스템으로 혁신하고자 하는 것인데, Gaussian을 개발했던 사람들이 굉장히 똑똑했겠지만 집단 지성을 이기기는 어려우니까요. 저는 이러한 개방형 플랫폼이 더욱 지속 가능하게 과학발전을 견인할 수 있다고 믿고 있습니다. 이와 관련하여 새로운 무료 개방형 양자 소프트웨어(OQP: Open Quantum Platform)



■ 모듈형 양자패키지의 예시

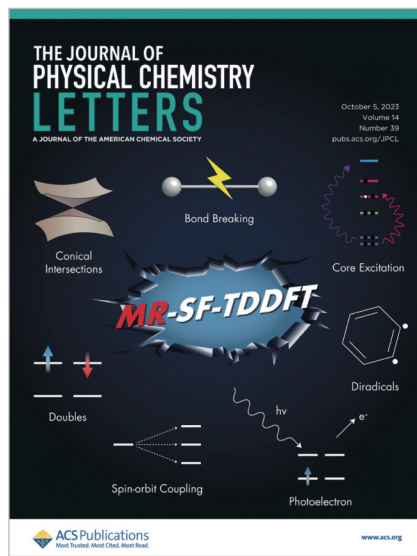
를 개발 중이고 곧 일반에 공개할 예정입니다. “스마트 사이언스 플랫폼”과 같은 취지이나 웹 플랫폼이 없어도 그와 유사한 기능을 가지는 소프트웨어입니다. 아래 그림처럼 파이선상에서 쉽게 대중적으로 많이 활용하는 DFT, TDDFT 및 저희가 개발한 MRSF-TDDFT 계산이 가능합니다. 뿐만 아니라 간단한 수정으로 다양하게 계산을 변형시킬 수 있고 계산결과를 각자의 요구에 맞게 변형 처리 가능합니다. OQP는 제가 하는 연구만 혜택을 보는 것이 아닙니다. 거의 대부분의 화학자들께서 손쉽게 활용 가능한 소프트웨어입니다. 벌써 해외 연구자들의 관심이 증가하고 있습니다. 물론 대부분의 연구자들이 Gaussian을 활용하시겠지만 그 폐쇄적 개발환경으로 발전에 한계가 있는 반면 OQP는 개방형 및 모듈형을 추구하여 추가 개발에 있어서 손쉬운 접근이 가능합니다. 새로운 방법론들이 즉각적으로 추가될 수 있고 추가 즉시 활용 가능합니다. 따라서, 국내에서도 OQP 및 그를 활용한 많은 추가 개발/활용이 이루어지길 기대합니다. 지금 거의 최종 개발 단계인데 파이선 잘하시는 화학자분들이 조금만 도와주시면 더욱 빨리 출시할 수 있을 것 같습니다. 많은 도움과 관심 부탁드립니다.



■ OQP의 개략도

6. 교수님께서 그동안 많은 논문을 출판하셨습니다. 그중에서도 특별히 기억에 남는 논문이 있으신가요? 기억에 남는 이유가 무엇인가요?

최근 발표된 『JPC Letters』의 Perspective 논문을 통해 MRSF-TDDFT의 소개와 전망에 대해 설명했습니다. 앞서 말씀드린 것과 같이 MRSF-TDDFT를 2017년과 2018년에 걸쳐서 개발했는데 그게 실제로 얼마나 유용하게 사용될지는 예측이 쉽지 않았습니다. 양자이론이 결국에는 수학적 결과물에 불과하기 때문에 실제 화학문제에 적용했을 때 얼마나 유용할지는 봐야 아는 것이니까요. 그런데 최초 개발 이후 MRSF-TDDFT를 실제로 써 보니 굉장히 유용한 이론이라는 공감대가 국제적으로 점차 확대되어갔습니다. 국내 최초의 양자이론인 MRSF-TDDFT가 세계적으로 인식되기 시작했다는 것이고 그런 의미에서 최근 발표한 『JPC Letters』의 MRSF-TDDFT 관련 Perspective 논문은 저에게 각별한 의미가 있습니다. 재차 강조하지만 이 이론은 기존 가장 대중적인 DFT 및 TDDFT의 한계들을 거의 대부분 극복하는 몇 안 되는 이론입니다. 앞으로 많은 연구자들에 의해 사용되어 질 것으로 예상합니다.



■ 『JPC Letters』에 표지논문으로 출판한 MRSF-TDDFT의 perspective 논문 [DOI: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpcllett.3c02296>]

7. 교수님께서 주로 이론 및 계산화학분야의 연구를 수행해 오셨습니다. 이론/계산화학과 실험화학 사이의 관계에 대해서 교수님의 생각과 철학을 말씀해주실 수 있을까요?

이론/계산화학 연구자와 실험화학 연구자는 너무나 다른 것을 연구하기에 괴리가 큼니다. 심지어 실험화학을

연구하는 연구자 사이에도 연구 주제와 방식이 조금만 다르면 서로에 대한 이해가 어려워지는데 하물며 이론과 실험화학자 사이의 괴리는 더 클 수밖에 없지요. 그 과정에서 서로 간의 오해가 생기기도 합니다.

그런데 생각해보면 화학반응 자체가 양자 현상입니다. 실제 양자세계를 눈으로 볼 수 없으므로 연구는 간접적 증거들로 결론에 도달한다고 생각합니다. 예를 들어 스펙트럼 분석은 빛이라는 도구를 활용하여 물질의 양자상태를 간접적으로 살펴봅니다. 실험과 이론은 각기 다른 원리에 기초하여 서로 독립된 데이터를 제공하고 있습니다. 따라서, 최대한 다양한 데이터들을 확보하여 좀 더 일관된 결론에 도달할 수 있도록 노력하는 것이 필요하다고 생각합니다. 이 점에서 실험과 이론은 상호신뢰를 바탕으로 상보적으로 협력해야 한다고 생각합니다.

한편 이러한 상호신뢰는 서로의 연구영역을 최대한 이해하려고 하는 노력에서 비롯된다고 생각합니다. 저도 이론화학자지만 실험에 대해서 최대한 이해하려고 노력을 합니다. 저의 이론을 영뚱한 실험결과에 맞추는 것을 미연에 방지해야 하니까요. 실험화학자 역시 이론의 세세한 부분까지는 다 알지 못하더라도 각 이론의 장점은 무엇이다 단점은 무엇이다 정도를 알고 있는 것이 건설적인 논의에 도움이 된다고 생각합니다.

8. 교수님께서 지금까지 화학자의 길을 걸어오면서 좋은 일도 많았지만 고난도 많았을 것이라 예상합니다. 지금까지의 커리어 중 가장 큰 스트레스 요인 혹은 교수님을 가장 힘들게 했던 요인은 무엇이었나요? 그 문제에 어떻게 대처하셨고 해결하셨나요?

아무래도 매너리즘에 빠질 때 일 것 같습니다. 하던 연구가 잘 되어서 안주하는 순간이 위기인 것 같습니다. 박사학위 그리고 포닥 기간 동안 연구했던 내용을 바탕으로 독립된 연구자가 돼서도 어느 정도 연구를 이어갈 수 있는데, 그 후에는 한계에 부딪히는 순간이 오기 마련입니다. 새로운 것을 추구해야 하는데 그게 말처럼 쉽지가 않습니다. 완전히 새로운 것을 하기에는 실패의 두려움이 크기 때문에 과감한 변화를 주기 힘듭니다. 이를 넘어서려면 실패의 두려움보다는 새로운 것을 추구하는 것 자체를 즐길 줄 아는 마음이 필요할 것 같습니다. 물론 쉬운 일은 아닙니다. 때로는 결과에 연연해 하지 않고 과학에 대한 순수했던 마음으로 돌아가 원래 하고자 했던 것이 무엇이었는지 고민하다 보면 해결의 실마리가 보일 수 있습니다.

제가 앞서 말씀드린 MRSF-TDDFT도 그러한 고민의 산출이었습니다. 새로운 양자이론을 개발하는 것은 무척이나 어렵습니다. 이론적 개념구상, 그의 수학적 유도, 최적화를 위한 각종 수치해석적 기법, 컴퓨터 프로그래밍을 통한 최종 구현 등 다양한 과정을 망라해야 합니다. 투여시간 대비 결과가 비례해서 나오지 않습니다. 당연히 실패할 가능성이 더 많고 비록 개발하더라도 기존 이론대비 우위를 점하는 것은 더욱 어렵습니다. 하지만



■ 제132회 대한화학회 학술발표회 이태규학술상 시상식 모습



■ 이태규학술상 수상 기념 강연 모습

그러한 일을 즐기고, 훌륭한 학생이 있고 실패 가능성이 대부분이더라도 저 개인뿐만 아니라 진심으로 다른 사람들이 유용하게 쓸 수 있는 양자이론을 개발하겠다는 단순한 생각으로 여기까지 올 수 있었던 것 같습니다.

9. 교수님께서 풀고 싶으신 궁극의 화학 문제가 무엇인가요?

팜토나 아토초에서 일어나는 전자-핵 상호작용의 체계적 이해입니다. 이에 대한 충분한 이해는 물질의 물성 및 화학반응의 근원적 이해로 이어질 것으로 기대합니다. 예를 들어 ‘빛을 흡수한 DNA가 어떻게 그 추가 에너지를 해소하는지? 왜 특정 물질만 형광을 잘 내는지?’ 등에 대한 일반적인 이해가 가능할 것 같습니다. 이 영역에서는 Bohn–Oppenheimer 가정이 성립되지 않고 핵과 전자 간의 상호작용이 중요해집니다. 물론 지금까지 많은 연구들이 있어왔지만 이를 효과적으로 기술할 수 있는 양자이론이 없었습니다. 저희가 개발한 MRSF–TDDFT가 중요한 대안으로 떠오르고 있고 이를 활용한다면 지금까지 알려지지 않은 새로운 발견으로 이어질 것이라 기대합니다.

10. 지금 이 시간에도 화학연구를 열심히 해 나가고 있는 신진/중견 화학 연구자에게 조언의 말씀을 해주실 수 있을까요?

제가 최근 느끼는 것 중 하나가 국내의 젊은 연구자들이 여유가 없다는 것입니다. 새로 독립된 연구자로 시작하면 당장 승진을 생각해야 하고 여러 가지 평가에 대비하기 위하여 연구 업적의 숫자 채우기에 신경을 쓰게 됩니다. 조금은 여유를 갖고 깊은 고민도 해보고 하길 바라는데 현실적인 여건이 그것을 허락하지 않는 것 같아 안타까울 때가 많습니다. 그래서 제가 저희 학과에 신입교수가 부임하면 가장 먼저 하는 말이 “이제 좀 쉬어라”입니다. 그동안 여기까지 오려고 얼마나 많은 노력을 했는지 눈에 선하기 때문입니다. 앞만 보고 달려왔기 때문에 주변을 볼 심적, 시간적 여유가 없었을 것입니다. 그런데 그러한 상태에서는 중요한 연구적 가능성을 놓칠 수 있습니다. 여건이 힘들수록 조금 여유를 가지시길 권유합니다. 그를 통해 현실과의 타협보다는 힘들지만 이상적인 연구에 대한 구상을 하시길 바랍니다. 최근 외국의 저명학자와 대화할 기회가 있었습니다. 그 분의 말씀이 한국의 과학자 개개인들은 무척 뛰어난데 한국으로 돌아가면 안주하는(self-contained) 것처럼 보인다고 하셨습니다. 비록 한국에 있지만 다양한 국제적 활동과 활발한 교류를 통해 끊임없이 자극을 받는 것이 좋습니다. 그래서 한자리에 머물지 않고 꾸준히 앞으로 진행하시길 바랍니다.



김재욱 Jaewook Kim

한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅응용센터, 선임연구원
jaewookkim@kisti.re.kr

소개글

김재욱 박사는 분자 오비탈의 특성을 올바로 묘사할 수 있는 양자화학 방법을 연구해왔다. 특히 밀도범함수이론(DFT) 계산으로 얻어진 분자 오비탈의 특성을 이해하고, 이를 통해 분자의 바닥 상태 및 들뜬 상태 에너지를 빠르고 올바르게 묘사할 수 있는 방법론을 개발해왔다. 최근에는 공유결합 유기 구조체나 유기발광다이오드 염료와 같은 유기물 기반 소재의 안정성 및 전기적, 광학적 특성을 이해하는 연구를 진행하고 있다. 또한 오비탈 정보를 이용해 DFT의 오류를 개선할 수 있는 방법론을 개발하고 있다.

주요연구분야

- 물리화학(Physical Chemistry)
- 계산화학(Computational Chemistry)
- 양자화학(Quantum Chemistry)
- 밀도범함수이론(Density Functional Theory)
- 분자전자학(Molecular Electronics)
- 유기광전자소재(Organic Opto-Electronic Materials)

대표논문

1. V. Singh,[†] **J. Kim**,[†] B. Kang, J. Moon, S. Kim, W. Y. Kim,* and H. R. Byon*, "Thiazole-Linked Covalent Organic Framework Promotes Fast Two-Electron Transfer of Azo Electrochemistry for Lithium-Organic Batteries." *Adv. Energy Mater.* **2021**, *11*, 2003735.
2. S. Kang, J. Woo, **J. Kim**, H. Kim, Y. Kim, J. Lim, S. Choi, and W. Y. Kim*, "ACE-Molecule: An open-source real-space quantum chemistry package." *J. Chem. Phys.* **2020**, *152*, 124110.
3. **J. Kim**, S. Kang, J. Lim, and W. Y. Kim*, "Study of Li adsorption on graphdiyne using hybrid DFT calculations." *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2019**, *11*, 2677-2683.
4. **J. Kim**,[†] S. Kang,[†] J. Lim, S.-Y. Hwang, and W. Y. Kim*, "Kohn-Sham approach for fast hybrid density functional calculations in real-space numerical grid methods." *Comput. Phys. Commun.* **2018**, *230*, 21-26.
5. **J. Kim**,[†] K. Hong,[†] S.-Y. Hwang, S. Ryu, S. Choi, and W. Y. Kim*, "Effects of the locality of a potential derived from hybrid density functionals on Kohn-Sham orbitals and excited states." *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2017**, *19*, 10177-10186.
6. **J. Kim**,[†] K. Hong,[†] S. Choi, S.-Y. Hwang, and W. Y. Kim*, "Configuration Interaction Singles based on Real-Space Numerical Grid Method: Kohn-Sham versus Hartree-Fock Orbitals." *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2015**, *17*, 31434-31443.

- KAIST 화학과, 학사(2009.2-2013.2)
- KAIST 화학과, 박사 (2013.3-2019.2, 지도교수 : 김우연)
- KAIST 자연과학연구소, 박사 후 연구원 (2019.2-2023.7, 지도교수 : 김우연)
- 한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅응용센터, 선임연구원(2023.7-현재)

KCS 하이라이트

22 헤테로고리 주변부 반응 개발 연구

이번 호에는 지난 2021-2023년 『BKCS』와 『JKCS』에 보고된 헤테로고리 주변부 반응 개발 연구 논문을 소개합니다. 유동 화학을 이용한 인돌의 3번위치 포밀화 반응, 아이세틴 유도체로부터 스피로옥신돌 합성, 피리딘 유래 썬비티이온의 탈방향족화 반응 등 헤테로고리 기본구조의 주변부 다양화 반응에 대한 연구가 발표되었습니다. 회원분들의 많은 관심 부탁드립니다.

글 송무건(광주과학기술원 화학과 박사과정) 정원진(광주과학기술원 화학과 부교수, wjchung@gist.ac.kr)

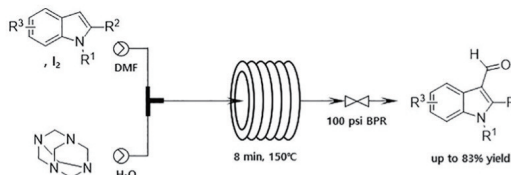
BKCS

Vol.42 No.03 p.388-392 / Article

충남대학교 박찬필 교수 연구팀에서 연속 유동 공정을 이용하여 산, 염기, 금속 촉매 등을 사용하지 않고도 인돌의 3번자리를 효율적으로 포밀화하는 반응을 개발하였습니다. [2021년 3월호, DOI: 10.1002/bkcs.12199]

C3-Formylation of Indoles in Continuous Flow

We have developed a continuous flow C3-formylation technique for indoles using hexamethylenetetramine (HMTA) and iodine. A mixed solvent system of DMF-H₂O (1:1, vol/vol) completely dissolves reagents and prevents clogging of microchannels during fluid flow.



The continuous flow technique provides maximized mixing and excellent heat transfer efficiency. Thus, flow chemistry accelerates the rate of C3-formylation of indoles in the absence of a strong acid, base, or metal catalyst. We show that high yields of C3-formylated indoles (up to 83%) can be obtained at 150°C when the residence time is as low as 8 min.

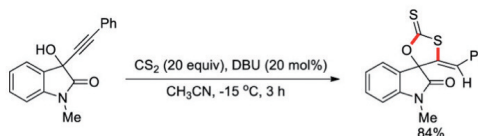
BKCS

Vol.42 No.03 p.429-434 / Article

전남대학교 김재녕 교수 연구팀에서 아이세틴의 프로파질 알코올 유도체에 이황화탄소를 첨가하여 1,3-옥사사이올란-2-싸이온 구조를 포함하는 스피로옥신돌을 형성하는 반응을 개발하였습니다. [2021년 3월호, DOI: 10.1002/bkcs.12206]

Synthesis of Spirooxindoles Bearing 1,3-Oxathiolane-2-thione Moiety From Isatin-Derived Propargylic Alcohols

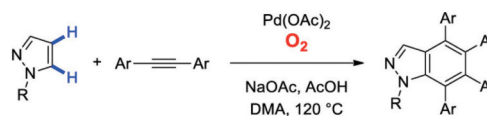
Spirooxindoles bearing 1,3-oxathiolane-2-thione moiety were synthesized from isatin-derived propargylic alcohols and carbon disulfide in the presence of 1,8-diazabicyclo[5.4.0]undec-7-ene (DBU). The spirooxindoles were formed stereoselectively via attack of the alkoxide of propargylic alcohol to carbon disulfide to form xanthate anion and a following 5-exo-dig cyclization process.



부산대학교 주정민 교수 연구팀과 자오통대학 시칭창 교수 연구팀에서 팔라듐 촉매를 이용한 피라졸과 알카인의 벤조고리화 반응을 산소 기체를 산화제로 사용하여 수행하는 친환경적 조건을 개발하였습니다. [2021년 3월호, DOI: 10.1002/bkcs.12175]

Palladium-catalyzed Aerobic Benzannulation of Pyrazoles with Alkynes

As an alternative to a stoichiometric metal oxidant, oxygen was used as an oxidant for Pd-catalyzed annulation reactions of pyrazoles with internal alkynes. The addition

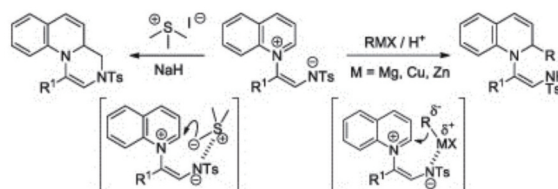


of sodium acetate and acetic acid was critical for stabilizing the Pd system. This green approach allowed the preparation of indazoles from readily available parent pyrazoles in a single step.

경희대학교 유은정 교수 연구팀에서 친핵성 유기금속 혹은 일리드 시약을 사용한 N-방향족 썬비터 이온의 탈방향족화 반응에서 시약과 질소 음이온 사이의 상호작용이 자리선택성을 결정하는 중심 요인임을 밝혔습니다. [2021년 4월호, DOI: 10.1002/bkcs.12244]

Chelation-driven Regioselective 1,2-Dearomatizations of N-Aromatic Zwitterions

In this study, several dearomative reactions of N-aromatic zwitterions were carried out to determine the factors controlling site selectivity. A series of organometallic species were applied as nucleophiles for dearomative additions, which revealed that chelation between metal and nitrogen



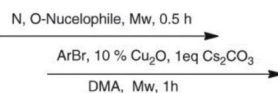
anion dominantly affected the site selectivity of the dearomative reaction in N-aromatic zwitterions. A cascade process, involving dearomative addition followed by intermolecular cyclization, to synthesize fused cyclic molecules was also demonstrated using ylides, which were selected as capable chelation substrates.

충남대학교 염을균 교수 연구팀에서 마이크로파를 이용하여 7H-피롤로[2,3-d]피리미딘에 친핵성 치환반응과 구리 촉매 N-아릴화 반응을 통해 다양한 치환기를 도입하는 공정을 개발하였습니다. [2021년 12월호, DOI: 10.1002/bkcs.12422]

A microwave-assisted synthetic approach to analyzing disubstituted pyrrolo[2,3-d]pyrimidine diversity via ligand-free Cu-catalyzed N-arylation

Facile introduction of diverse substituents to 2- or 4-chloro-7H-pyrrolo[2,3-d]pyrimidines was examined with microwave-assisted nucleophilic substitution and Cu-catalyzed N-arylation. Microwave-assisted Cu-catalyzed

N-arylation of pyrrolo[2,3-*d*]pyrimidines with various nucleophiles proceeded very well with diverse heteroaryl halides. Sequential microwave-assisted substitution



R = Cyclicamine, alkoxy
Ar = Ph, N, or S heterocycles

provided good to excellent yields of 2,7- or 4,7-disubstituted pyrrolo[2,3-*d*]pyrimidines, with short reaction times and energy savings compared with conventional thermal heating. The diverse pyrrolo[2,3-*d*]pyrimidine derivatives are useful for screening drug candidates for various diseases.

BKCS

Vol.44 No.02 p.137-140 / Communication

경희대학교 유은정 교수 연구팀에서 알릴설포늄 일리드를 두 가지 역할로 활용하여 *N*-방향족 쯔비터 이온과의 연속 단계 탈방향족 고리화 첨가 반응을 개발하였습니다. [2023년 2월호, DOI: 10.1002/bkcs.12648]

Cascade cycloadditions of *N*-aromatic zwitterions and allylic sulfonium ylides: Dual roles of the allylic sulfonium ylide in the cascade reaction

Dearomative cycloadditions of *N*-aromatic zwitterions have been performed to synthesize diverse *N*-containing cyclic compounds. However, few practical syntheses of polycyclic molecules are reported, and thus, a novel methodology is necessary. We describe cascade reactions of *N*-aromatic zwitterions and allylic sulfonium ylides to furnish fused *N*-heterocyclic compounds. Unprecedentedly, molecules of the allylic sulfonium ylide react with the corresponding zwitterion as C1 and C3 synthons in the same reaction.



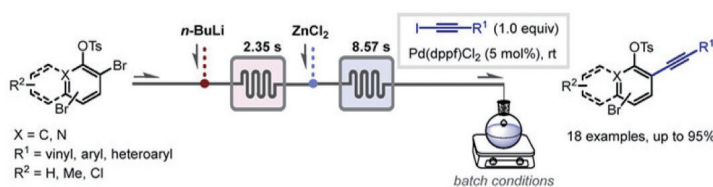
BKCS

Vol.44 No.09 p.772-776 / Communication

이화여자대학교 김원석 교수 연구팀에서 연속 유동 공정과 배치 공정을 융합하여 헤테로방향족 토실 화합물의 오쏘-선택적 알카인화 반응을 개발하고, 벤조퓨란과 피리도퓨란 유도체의 합성에 적용하였습니다. [2023년 9월호, DOI: 10.1002/bkcs.12717]

Integrated continuous-flow/batch protocol for *ortho*-selective alkylation of (hetero)aryl tosylates

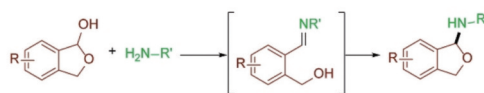
The *ortho*-selective alkylation of polyhalo-substituted (hetero)aryl tosylates was investigated using an integrated continuous-flow/batch protocol. Without the elimination of the tosyloxy group, the regioselective *ortho*-metalation of the (hetero)aryl tosylates employing *n*-BuLi and ZnCl₂ was successfully achieved in continuous-flow chemistry within 10.92 s (residence time). The Pd-catalyzed Negishi alkynylations of various iodoethynyl (hetero)arenes and the resulting arylzinc species proceeded at room temperature in yields ranging from 51% to 95%. Finally, the synthetic utility of this strategy was validated by the synthesis of benzofuran and pyridofuran derivatives.



경기대학교 김성곤 교수 연구팀에서 다이하이드로벤조퓨란올의 분자내 옥사-마니히 반응을 통해 1-아미노프탈란 유도체 합성을 개발하였습니다. [2022년 2월호, DOI: 10.5012/jkcs.2022.66.1.9]

Intramolecular Oxa-Mannich Reaction of 1,3-Dihydro-2-benzofuran-1-ol for Efficient Synthesis of 1-Aminophthalan Derivatives

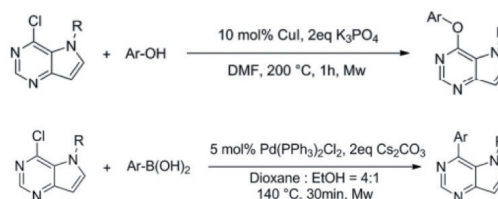
An efficient method for the synthesis of 1-aminophthalans has been developed. The intramolecular oxa-Mannich reaction of 1,3-dihydro-2-benzofuran-1-ols with p-toluenesulfonylamine in the presence of Cs_2CO_3 as a base, without using any catalyst, provided the desired 1-aminophthalans in moderate to good yields.



충남대학교 김영준 교수 연구팀에서 마이크로파를 이용한 금속 촉매 반응을 통해 피롤로[3,2-*d*]-피리미딘의 구조를 다양화하는 방법을 개발하였습니다. [2022년 12월호, DOI: 10.5012/jkcs.2022.66.6.442]

Diversification of 4,5-disubstituted Pyrrolo[3,2-*d*]pyrimidines by Microwave Assisted Metal Catalyzed Reaction

Diverse pyrrolo[3,2-*d*]pyrimidines that are expected to exhibit bioactivity were synthesized through *O*-arylation and Suzuki coupling reactions. Microwave-assisted *O*-arylation was successfully performed using a Cu metal catalyst, so that 4 position of pyrrolo[3,2-*d*]pyrimidine could be substituted with phenol group. In addition, 4-aryl



substituted pyrrolo[3,2-*d*]pyrimidines were synthesized with good to excellent yields by microwave-assisted Suzuki coupling reaction using a Pd metal catalyst. By using microwaves as reaction conditions for diversification of derivatives, it was possible to dramatically overcome the disadvantages of traditional heat reactions of long reaction times and heat transfer efficiency problems. The result of this study can be used to be diversify pyrrolo[3,2-*d*]pyrimidine derivatives, which are expected to play an important role in the drug discovery research.

「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 BKCS)의 재도약을 도모하고자

본회 운영위원회와 학술지간행위원회 BKCS 편집장은 BKCS의 논문 투고 시스템을

스칼라원 논문투고시스템(ScholarOne Manuscripts)으로 변경하기로 하였습니다.

이에 논문 투고 시스템 접속 방법을 별첨으로 안내드리오니 모든 회원들께서는

BKCS의 재도약을 위한 활동에 동참하여 주시기 바랍니다.

대한화학회 회장 신석민

대한화학회 학술지간행위원회 BKCS 편집장 남원우

1. BKCS 논문 투고 시스템 접속

* 아래 방법 중 택 1

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

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

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



A

B

C

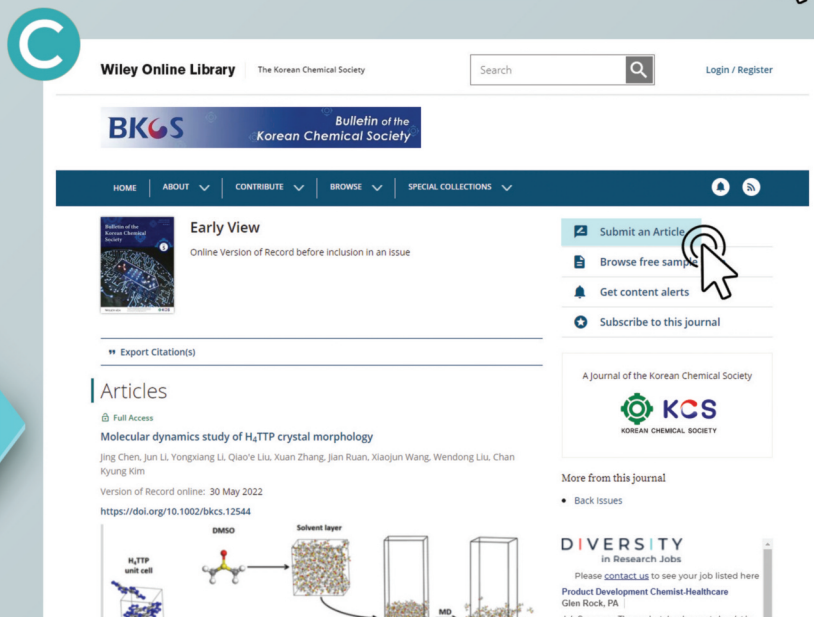
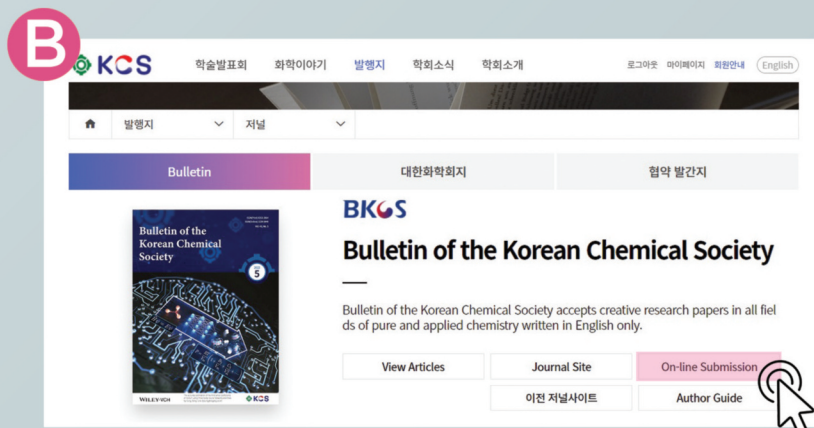
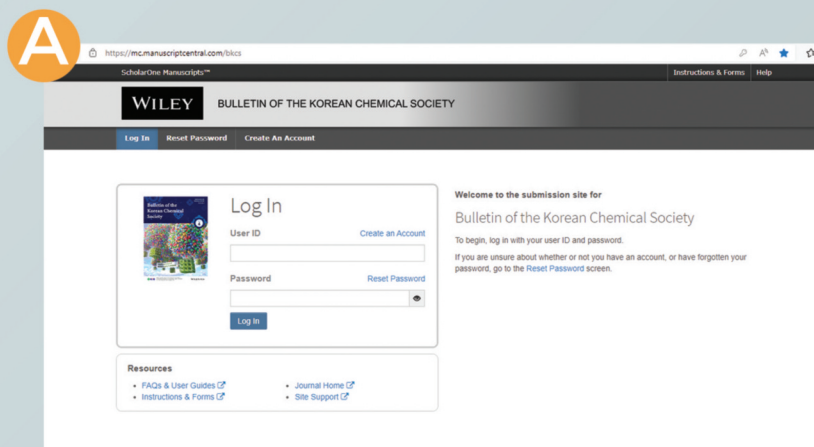
2. 계정 개설 후 로그인

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

* 외국인 심사위원은 점차적으로 늘릴 예정입니다.

* 논문 투고에 어려움이 있으실 경우 아래로 문의하여 주십시오.

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

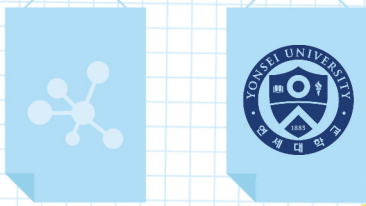


<https://mc.manuscriptcentral.com/bkcs>로 바로 접속

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

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

우리 실험실은요!



우리 실험실은요!

연세대학교 시스템생물학과 구조생물학 실험실

글 | 김의진(연세대학교 시스템생물학과
uijin311@gmail.com)

구조가 기능을 결정한다

2003년 연세대학교에서 연구실을 열어서, 지금까지 시스템생물학과에서 계속 연구를 진행 중에 있습니다. 현재는 석박사 통합과정 6명, 박사과정 1명, 석사과정 1명 총 8명의 학생들과 교수님까지 한 구성원으로 막단백질 및 수용체, 병원성 박테리아와 바이러스의 단백질에 대한 연구를 활발히 진행 중에 있습니다. 다소 뜬금없는 질문을 하나 드리고 싶은데요, 독자분들께서는 앞선 실험실 소개를 어떻게 읽으실 수 있었나요? 여러 복잡한 과정이 머릿속에 떠오르실 텐데요, 간단하게는 ‘눈이 빛을 받아들여서 볼 수 있다’라고 이야기 할 수 있을 것 같습니다. 그럼 눈은 어떻게 빛을 받아들일까요? 눈에는 시세

포가 있는데, 이 세포들이 빛을 받아들이고 이를 신경 신호로 변환하여 우리가 비로소 글자를 볼 수 있게 됩니다. 시세포는 어떻게 빛을 받아들일 수 있을까요? 마찬가지로 여러 요인들이 있지만, 시세포에 위치한 로돕신 단백질이 빛을 받아들이는 것으로 알려져 있습니다. 그럼 로돕신은 어떻게 빛을 받아들일까요? 로돕신은 G protein coupled receptor이기 때문에, 흡수한 빛 에너지가 로돕신 단백질 구조를 변화시키고, 로돕신 단백질의 구조가 변경되면 G protein이 로돕신에 결합하여 세포 내 하위 신호를 전달하게 됩니다. 구조 생물학은 바로 이 지점에서, 생명체 및 단백질 거대분자의 구조를 규명하고, 그 작동 원리를 분자 수준에서 밝혀내는 분야입니다. 여러 생물학적 현상들도 종국엔 생체 내 분자들의 상호작용에 의해 이뤄지는 경우가 대부분이기 때문에, 구조 생물학은 생물학의 여러 분류 중 ‘어떻게?’라는 질문에 대해 가장 자세하고 정확하게 답할 수 있는 분야라고 생각합니다. 저도 이 점이 마음에 들어서 구조생물학 실험실로 지원하게 되었습니다.

저희 연세대학교 구조생물학 실험실에서도 조현수 교수님의 지도 아래 여러 단백질의 3차원 구조를 규명하고 그 기능에 대해 밝혀내 왔습니다. 2016년에는 앞서 언급했던 로돕신 단백질의 구조를 규명했는데요, 이 연구는 당시 불모지이던 국내 막 수용체 연구의 초석이 되기도 했습니다. 그 이후로도 동일한 GPCR인 CRF1 수용체 및 살모넬라균의 병원성 단백질에 대한 구조를 규명했고, 이 연구들은 각각 단백질 억제제 특허 및 신약 발굴로 이어지기도 했습니다. 최근에는 전 세계를 강타했던 COVID-19의 중화 항체 및 단백질 결합체의 구조를 규명해 여러 코로나 변이를 한꺼번에 억제할 수 있는 단백질 치료제도 개발한 바 있습니다. 이처럼 다양한 분야의 단백질에 대해 구조적 연구를 진행하고 있기 때문에, 서울대학교, 카이스트 등 대학 연구실에서부터 KBSI, IBS 등의 국책연구기관과 세브란스/서울대학교 병원 실험실까지 다학제에 걸쳐 활발한 공동 연구를 진행 중에 있습니다.

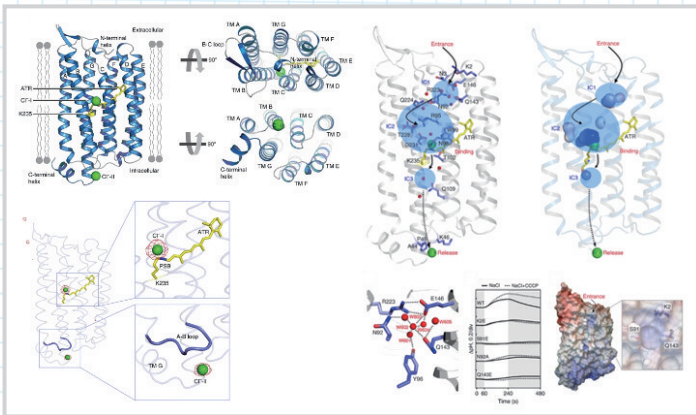


그림 1. 우리 실험실에서 규명한 CIR 단백질의 작동 원리

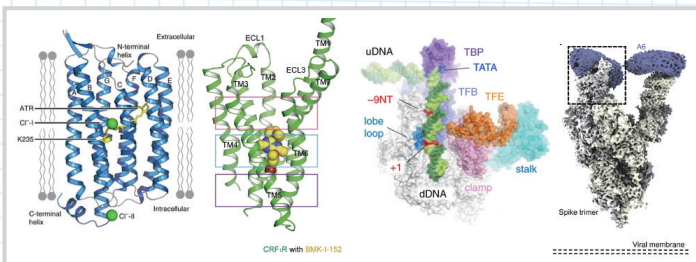


그림 2. 구조생물학 실험실이 규명한 단백질 구조: CIR, CRF1, RNA Pol, and CoV-2 Spike protein (좌측부터)



싱가포르 Newton Hawker Center에서 실험실 졸업생 Bellinda Ong Xiang과 함께



하계 포항 구조생물학회



교수님 생일 파티

트렌디한 학문 구조생물학

‘트렌디’라는 단어와 학문의 조합을 다소 생소하게 느끼실 수도 있을 것 같은데요, 구조생물학 분야에서 만큼은 예외인 것 같습니다. 최신 연구 동향을 익히고, 적용하는 건 어느 분야에서나 통용되는 덕 목이겠지만, 최근 구조생물학은 지각 변동이라는 표현이 어울릴 정도로 연구의 주류 자체가 시시각각 변하고 있기 때문입니다. 2017년 노벨 화학상이었던 Cryo-EM과 딥러닝 기반 구조 데이터 분석 기법, 그리고 AlphaFold2 등의 단백질 구조 예측 알고리즘 등은 불과 3~4년 사이에 연구 접근 방법 자체를 송두리째 바꿔 놓았습니다. 저희 실험실도 2018년까지는 기존의 X선 결정 기법을 주로 사용하여 단백질 구조를 규명하려 했지만, 학계의 시류에 발맞춰 다각도로 연구 주제를 변화시켜 나갔습니다. 교수님께서 항상 최신 기술 습득을 중요하게 생각하시는 덕분에, 학생들은 원하는 만큼 KBSI, KRIBB, IBS 등의 국가 연구기관에 파견 및 출장 실험을 갈 수 있었고, 최근 들어 그 결과를 하나 둘 만들어 내고 있습니다. 뿐만 아니라 국내외 다양한 학회를 참가하며 연구를 바라보는 시야를 넓히고, 타 연구 기관 및 해외 연구자들과도 교류할 수 있는 자유로운 분위기가 형성되어 있는데요, 특히 2018년에 규명했던 박테리아 병원성 단백질의 경우, 학회에서 저희 실험실 포스터를 본 Kansas 대학의 Philip Hardwidge 교수님이 직접 연세대학교로 방문하셔서 공동 연구에 대해 의논했던 사건은 재밌는 일화로 남아있습니다. 이외에도 실험실 전원이 참석했던 싱가포르 AsCA2019 학회나 프랑스 파리에서 열렸던 ECM33 학회는 학회 자체 뿐만 아니라 해외에서 쌓은 실험실 학생들끼리의 즐거운 추억으로 남아있습니다.

연기(緣起)

연기(緣起)란 모든 현상은 무수한 원인과 조건이 상호 관계하여 성립되므로, 모든 원인과 결과는 상호 의존적으로 상관하는 관계에 있다는 불교 용어입니다. 교수님이 저희에게 자주 해 주시는 말씀인데요, 실험실 구성원끼리의 모든 인연을 소중하게 생각하고, 그 관계를

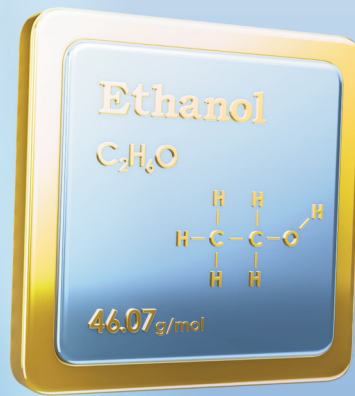
뉘아 나가라는 뜻에서 회식 자리에서 말씀해 주시곤 합니다. 이러한 생각 아래 저희 실험실 구성원들은 연구적인, 혹은 연구 외적인 부분까지 서로 도와주고 공유하며 실험실 생활을 하고 있습니다. 그 과정에서 학생들끼리 열띤 토론을 하기도 하고, 그 토론의 결과로 더욱 더 나은 방법을 찾아내기도 합니다. 이러한 교수님의 생각은 당신이 저희를 대하실 때에도 나타나는 것 같습니다. 교수님께서 길을 알려주며 직접적으로 지도해 주시기 보다는, 학생이 스스로의 노력 끝에 옳은 방향으로 갈 수 있도록 믿어주시는 편인데요, 실험의 주제나 방향을 결정할 때에도 상하 관계로 대하시기 보다는 한 명의 독립된 연구자로서 학생 개개인의 의견을 많이 존중해 주시곤 합니다. 그럼에도 불구하고, 학생들이 최선의 연구 결과를 낼 수 있게 실험실의 장비 및 기자재나 연구기관 파견 등에도 많이 지원해주시고, 매주 미팅 시간을 가지며 학생들의 연구에 관심을 가져 주십니다. 돌이켜 보면 신입생 시절에는 수업과 시험에 익숙해서 오히려 내가 할 수 있는 일과 해야 하는 일이 많아 혼란스러웠던 적도 있지만, 교수님의 이러한 믿음 속에 한 명의 독립적인 과학자로 성장할 수 있는 게 아닌가 라는 생각이 듭니다. 이런 가르침 덕분인지, 최근 실험실 선배들 중 두 분이 신규 교원으로 임용되셨는데요, 저희는 선배들의 이러한 모습을 보면서 미래에 나아갈 길에 대해 자극을 받기도 하고, 앞으로 어떤 선택을 할지 꿈꾸기도 합니다.

맺는 글

구조 생물학의 심도 있는 탐구와 혁신적인 연구를 통해 우리는 미지, 미시의 영역을 계속해서 밝혀내고 있습니다. 그 과정에서 맺어지는 인연과 연구자 간의 연결, 지식과 경험의 공유는 우리 실험실의 가치 중 하나입니다. 우리 실험실의 연구와 혁신을 위한 여정이 계속될 수 있기를 바라며, 이 과정에서의 모든 지원과 협력을 감사하게 생각합니다. 앞으로도 함께 일하며 더 나은 내일을 만들어 나가기를 기대합니다.

생명과 진실의 물, 에탄올

장흥제 | 광운대학교 화학과, hjang@kw.ac.kr



예로부터 생명의 물(Aqua vitae)이라 불려온 물질이 있으니, 정말 여러가지 이유로 생명의 물이라는 명칭이 아깝지 않은 에탄올(ethanol)이 되겠다. 감염성 바이러스 혹은 세균 시대를 견뎌내 온 우리에게 에탄올을 이용한 손 세정제의 긍정적인 효과는 기억에 남아있다. 또한, 채혈이나 주사 직전에 국소부위 소독을 위해 필수적으로 사용되는 에탄올인 만큼 그 기능에 의심의 여지가 없음을 알고 있다. 보건·의료적 용도를 벗어난 다소 일상적인 관점에서도 피로한 하루의 마무리를 함께해 주거나, 답답하고 속상한 기억에 잊고 싶은 순간을 넘기게 해 주는 에탄올 수용액, 곧 술은 생명의 물이라 해도 그럴싸하다.

에탄올과 술

어느 학문 분야나 소위 괴담 혹은 전설 등이 곳곳에 숨어

있다. 학생 시절 가장 자주 들었던 이야기는 실험을 위한 에탄올에는 흑시라도 술처럼 마시지 못하도록 독성 물질인 메탄올이나 다른 화학 물질을 혼합해 판매한다는 것이었다. 너무 극단적인 처방인 것은 아닌지 의아했다. 필요한 용매를 추가적으로 증류해 고순도로 사용하는 유기화학 실험실의 경우에는 걱정할 일이 없겠지만, 판매되는 시약을 그대로 사용하는 다른 많은 실험실에서는 불순물로 인한 문제가 발생하는 것은 아닐지 궁금했다.

언제나 많은 일이 당시에는 이해하지 못했더라도 시간이 흐르며 갑작스레 깨닫게 되는 순간이 오듯, 실험용 고순도 에탄올과 공업용 변성 에탄올의 차이도 자연스럽게 이해되었다. 의도적인 불법 밀주 제작의 우려도 있지만, 그보다 본질적인 섭취로 인한 죽음이 유발되지 않도록 삼킬 수 없는 고미제를 첨가하는 것이 일반적이었다.

에탄올은 다양한 면면을 갖는다. 실험실에서의 에탄올은

(바람직하지 않은 태도지만) 안전장비를 제대로 착용하지 않은 맨피부에 몇 방울 혹은 잔뜩 쏟아져도 겹겹이 떨어 내고 닦아낼 수 있는 용매다. 피부 접촉으로는 큰 유해성이 실감 나지 않는, 매우 안전하고 평이하며 흔한 용매인 셈이다. 하지만 상처를 통해 드러난 피부밑 조직에 닿는 순간 소독작용과 더불어 급격한 탈수를 일으켜 뜨겁게 지지듯한 고통을 느끼게 한다. 입으로 마셔야하는 순간에는 농도에 따라 다양한 수준의 통증이나 열감을 일으키기도 하고, 서서히 중추신경이 마취되는 듯한 기묘한 상태에 빠지기도 하니, 더 이상 별것 아닌 용매가 아니게 된다.

에탄올과 진실

에탄올(C_2H_5OH)은 두 개의 탄소(C), 여섯 개의 수소(H), 그리고 단 하나의 산소(O)로 이루어진 매우 간단한 구조의 유기 분자다. 하지만 몸에 유입되기 시작하는 순간 연속적이며 극단적인 변화가 시작된다. 그중 하나가 논리와 마음의 장벽이 무너져 내리며 자신도 모르게 속마음이나 진실을 내뱉는다는 ‘취중진담’의 순간이다.

섭취된 에탄올은 우리의 감정과 신호 전달, 그리고 중추신경의 핵심인 신경전달물질의 분비를 촉진하기 시작한다. GABA라고도 불리는 감마-아미노뷰틸산(γ -aminobutyric acid)의 급격한 방출은 수용체에 작용하며 뇌의 인지작용을 느리게 만들고 신경 세포의 작용을 감소시킨다. 우리는 이 과정에서 점차 생각과 반응이 둔해진다고 체감한다. 동시에 도파민(dopamine)이 방출되기에 음주가 시작된 초기에는 편안함과 기분 좋은 느낌을 느끼게 된다. 문제는 에탄올 섭취가 증가할수록 글루타메이트(glutamate) 수용체의 기능이 저하 된다. 이는 기억 형성에 관여하는 역할이기에 어느 순간 우리의 기억은 군데군데 빈 공간이 생기거나 완전히 새카맣게 사라지게 된다.

취중진담은 이해할 수 없을 정도의 복잡한 인지적 작용은 아니다. 에탄올의 영향으로 GABA 수용체가 작용해 진정되고, 잠이 오며, 뇌 기능과 작용이 느려져 인지 기능이 둔화 되는 것이 전부다. 들롱타지 않을 정도의 거짓을 꾸며내는 것은 생각보다 복잡한 작업이기 때문에, 둔화 된 인지 기능은 거짓을 이야기하기 어려운 환경에서 자신도 모르게 간단한 반응과 대처를 통해 진실을 표출하는 것이다. 과학



술과 에탄올, 너무나 유용하고 친숙한 단어들이다.

적으로 이 과정을 신뢰할 수 있을까? 물론이다. 음주 과정과 만들어내는 이야기에 대한 뇌파 측정은 취중진담이 과학적 결과임을 보였다.

화학적 자백제

자백은 유죄 추정이나 판결에서 중요한 요인이다. 자신의 치부를 드러내고 싶어하지 않는 것이 일반적인 만큼, 신뢰할 수준의 진실일 이끌어내기 위해 다양한 방식이 사용되었다. 가장 비인도적이며 왜곡이 작용할 수밖에 없는 자백 유도 기술은 아마도 물리적인 고문일 것이다. 의지와 무관하게 고통이나 정신적 압박을 이용해 허위 진술로 이어질 수도 있기 때문이다. 하지만 그와는 다른 인지 기능의 둔화로 깊은 곳에 감춰둔 사실을 꺼내도록 만드는 것은 어떨까? 물론, 국내에서는 자백제의 사용은 증거로 채택되지 않는다. 소위 알코올로 인한 심신미약이라는 표현이 많은 경우 보호장치로 작동하는 것과 마찬가지로.

하지만 화학자의 입장에서는 분자가 작동하는 메커니즘이 밝혀졌다면 이를 얼마든지 활용해 더 효율적인 물질을 만들어내고 싶을 수밖에 없다. 가장 오래된 자백제는 육각형 고리 구조로 이루어진 바르비투레이트 계열의 분자들이다. 아모바르비탈(Amobarbital)이나 싸이오펜탈(Thiopental)을 비롯한 유사 구조들은 에탄올의 뒤를 잇는 자백제의 시초다. 위험성으로 인해 다른 분자들로 대체 되었지만 여전히 애용되는 국가들도 있다.

다이아제핀 계열의 유명한 분자인 다이아제팜(Diazepam)이나 아크릴사이클로헥사민 계열의 케타민(Ket-

amine)은 사회적으로도 여러 문제를 일으키기도 하는 물질들이다. 이들 역시 뛰어난 자백제가 아닐 수 없다. 프로포폴(Propofol) 역시 마찬가지다. 사실상 진정, 최면, 자백은 크게 다르지 않은 개념이다. 인간의 의식과 인지능력을 하위 단계로 끌어내려 원하는 목적을 이끌어내기 때문이다.

에탄올에서 벗어나기

에탄올의 의식 둔화에서 시작해 극단적인 자백까지 이야기했지만, 우리가 실제로 우려해야 할 것은 그보다는 한참 낮은 단계다. 날이 좋아서, 날이 좋지 않아서, 날이 적당해서 마셨던 에탄올이 남겨놓은 여파를 벗어나기 위한 수많은 노력이 현실적인 난관이 무엇인지 체감하게 한다. 자연스레 숙취 해소 효과를 강조한 다양한 음료와 제품들이 개발되었고, 사람마다 효과의 편차가 있지만, 그럭저럭 작동하는 것을 느낄 수 있다.

음료, 알약, 젤 등 다양한 형태의 숙취 해소 제품들 속에서도 만고불변의 전통적 숙취해소제로 이야기되는 것은 꿀물이다. 실제로 꿀물을 마시든 아니든 간에 주위 누군가 숙취에 허덕이고 있다면 자연스레 꿀물을 권하곤 한다. 별다른 것 같은 달콤하기만 한 꿀의 기능은 신뢰할 만한 것일까? 의외로 그렇다.

꿀벌은 꽃을 오가며 다양한 형태의 당분을 채취해 집에 보관한다. 그 과정에서 꿀벌의 체내에서 분비되는 효소는 두 개의 당 분자가 연결된 이당류 물질인 자당(설탕)을 분해해 포도당(glucose)과 과당(fructose)이라는 두 가지 단위체로 분해한다. 그중 알코올 대사 과정에 중요하게 작용하는 것은 바로 과당이다. 과당은 포도당에 비해서 당수치를 덜 상승시키지만, 흡수가 빠르며, 에너지원으로 즉각적인 활용이 어렵기 때문에 잔여 열량이 간단히 지방의

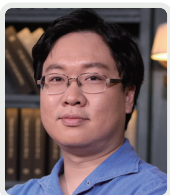


꿀의 과당은 알코올 분해를 가속한다.

형태로 저장되어 체중 증가의 주원인으로 여겨지기도 한다. 탄수화물을 분해해 과당 형태로 전환 시킨 액상 과당의 사용과 섭취가 우려되는 이유이기도 하다.

체내에 유입된 에탄올은 체내 효소의 도움을 받아 숙취를 유발하는 주원인이라 알려진 아세트알데하이드를 거쳐 아세트산의 형태로 산화된다. 아무 대가 없이 효소가 작동하며 산화 반응이 일어날 리는 없다. 체내 여러 산화 반응에 작용하는 NAD⁺는 NADH로 전환되며 알코올과 그 중간체들을 제거한다. 소모된 재료는 보충되어야 한다. 과당은 체내에서 소르비톨로 변환되며 다시금 NADH를 유용한 NAD⁺로 전환한다. 가장 즉각적인 과정에 대한 참여에서 예견되듯, 과당의 섭취는 혈중 알코올의 제거나 대사 속도를 적게는 40%에서 크게는 100% 이상 가속 시킨다.

우리는 넘치는 정보와 과학적 사실들, 그리고 그 틈에 교묘하게 숨어있는 유사과학과 미신적인 사실들을 정신없이 구분한다. 하지만 조금 더 진지하게 가장 기본적인 과정을 추적하다 보면, 가볍게 흘려넘기던 이야기 속에 매력적인 화학적 원리들이 녹아들어 있다는 것을 체감할 수 있다. 분명 세상은 화학으로 이루어져 있다. ⚙️



장흥제 Hongje Jang

- KAIST 화학과, 학사(2004.3 - 2008.2)
- KAIST 화학과, 박사(2008.3 - 2013.8, 지도교수 : 한상우)
- 서울대학교 화학과 박사 후 연구원(2013.9 - 2015.1, 지도교수 : 민달희)
- Georgia Institute of Technology, Department of Chemistry and Biochemistry 박사 후 연구원 (2015.1 - 2016.1, 지도교수 : Mostafa A. El-Sayed)
- 광운대학교 화학과 부교수(2016.3 - 현재)

화학사 돌아보기

Part.16

리비히, 빌러, 뒤마

최정모 | 부산대학교 화학과,
jeongmochoi@pusan.ac.kr

오늘 글에서는 리비히(Justus von Liebig, 1803-1873), 빌러(Friedrich Wöhler, 1800-1882), 뒤마(Jean-Baptiste Dumas, 1800-1884)라는 세 명의 화학자를 중점적으로 살펴보고 합니다. 비슷한 나이대였던 이들은 때로는 경쟁자로, 때로는 공동 연구자로, 때로는 친구로 유럽 화학계를 이끌어 나갔습니다. 흥미롭게도 이들은 모두 그 이전 세대 거장의 제자들이라는 공통점을 가지고 있습니다. 리비히는 게이뤼삭 밑에서 공부했고, 빌러는 베르셀리우스로부터, 뒤마는 테나르로부터 화학을 배웠습니다. 이들은 이전 세대의 연구를 충실히 전수받아 그를 뛰어넘는 새로운 연구를 수행하였으며, 자신의 뒤를 잇는 후배 세대에게도 연구를 체계적으로 전달하는 역할을 하였습니다. 오늘 글에서는 특히 이들의 초기 삶과 업적에 집중하여 살펴볼 것입니다.¹

빌러는 수의사의 아들로 태어나 어린 시절부터 화학에 관

심을 갖고 1820년 마르부르크 대학교에 입학합니다. 1823년 하이델베르크 대학교에서 그멜린(Leopold Gmelin, 1788-1853)의 지도 아래 의학 박사 학위를 받은 빌러는, 그멜린의 추천을 따라 스웨덴의 베르셀리우스 밑에서 공부하러 떠납니다. 약 1년 동안 함께 시간을 보낸 빌러와 베르셀리우스는 이내 최고의 관계를 이루었습니다. 빌러는 베르셀리우스와의 만남을 “헤아릴 수 없는 축복”이라고 칭했고, 베르셀리우스 역시 빌러를 최고의 애제자로 삼았습니다.² 빌러는 1826년 독일로 돌아와 베를린 공과대학교에서 화학을 가르치기 시작했습니다. 빌러는 베르셀리우스의 책과 논문을 독일어로 번역하는 등 독일에서 베르셀리우스를 대변하는 역할을 수행했습니다. 1828년 요소를 합성했을 때도 그는 베르셀리우스에게 가장 먼저 편지를 보내 기쁜 소식을 알렸죠.

한편, 리비히는 약재상으로 일하던 부친 밑에서 태어났

1. 이 내용은 다음 글들에서 큰 도움을 받았습니다. Alan J. Rocke, "Organic analysis in comparative perspective: Liebig, Dumas, and Berzelius, 1811-1837," in *Instruments and experimentation in the history of chemistry*, eds. F.L. Holmes and T.H. Levere (Cambridge, MA: MIT Press, 2000); Ferenc Szabadváry, *History of Analytical Chemistry*, trans. Gyula Svehla (Oxford, UK: Pergamon Press, 1960), Chapter IX; 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); Alan J. Rocke, "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).

2. T. E. Thorpe, "Berzelius and Wöhler," *Nature* **31**: 196-197 (1885).

습니다. 그는 어릴 때 학과 공부에서 크게 두각을 드러내지 못했고, 아버지는 그를 학교에서 빼내 약사로 훈련받도록 보냈습니다. 이 시기에 화학에 흥미를 갖게 된 리비히는 아버지를 설득하여 화학을 더 공부하기 위해 1820년 본 대학교에 입학합니다. 아버지와 친분이 있었던 화학 교수 카스트너(Karl Kastner, 1783–1857) 밑에서 공부하던 그는 1821년 카스트너가 에를랑겐 대학교로 옮겨자 그를 따라 에를랑겐 대학교로 옮겨갔고, 카스트너의 추천으로 1822년 10월부터 파리에 가서 화학을 공부하게 됩니다.

리비히는 당시 화학의 중심지였던 파리에서 17개월을 머물면서 화학을 공부했습니다.³ 리비히는 테나르의 지도를 받아 화학 연구에 매진했고, 1823년 뇌산염(fulminate)에 관한 첫 연구 결과를 발표합니다. 테나르는 리비히를 대신하여 이 결과를 과학 아카데미 모임에서 발표하였는데, 이때 젊은 리비히의 인간미를 보여주는 짝막한 촌극이 벌어졌습니다. 테나르의 발표가 끝나고 한 낮선 신사가 리비히를 찾아왔습니다. 그 신사는 리비히를 저녁 식사 자리에 초대하고 싶다고 말했죠. 리비히는 그 신사가 누구인지 몰랐고, 너무 무섭고 부끄러운 나머지 그 저녁 식사에 참석하지 않았습니다. 그런데 알고 보니 그 신사는 알렉산더 훔볼트(Alexander von Humboldt, 1769–1859)였고, 리비히를 자신의 오랜 친구 게이뤼삭에게 소개해 주고자 저녁 식사 자리를 마련한 것이었습니다.

훔볼트는 당시 독일 학계를 대표하는 지식인으로서 세계 곳곳을 탐험하는 박물학자이기도 했습니다. 멀리 아메리카 대륙과 러시아까지 탐험했던 그는 당시 유럽에 와있었는데, 그곳에서 젊은 학자들을 발굴하는 데에 관심을 가졌습니다. 그 중 한 명이 제네바에서 생리학과 약제학을 공부하고 있던 젊은 화학자 뒤마였습니다. 훔볼트는 제네바에서 뒤마를 만나 그를 파리로 초청하였고, 뒤마는 1823년 파리로 와서 테나르와 함께 화학 연구에 매진하게 됩니다. 그런 훔볼트가 과학 아카데미 모임에 참석했다가 또다른 젊은 화학자를 발견한 것이었습니다.

비록 첫 번째 기회는 놓쳤지만, 마침내 리비히는 훔볼트의 주선으로 게이뤼삭을 만나게 되었습니다. 그 둘은 순식

간에 끈끈한 사제 관계를 형성했습니다. 빌러와 베르셀리우스의 관계처럼, 리비히와 게이뤼삭 역시 서로를 진심으로 아끼는 사이를 이루었지요. 이후 리비히는 언제나 게이뤼삭을 자신의 스승으로 여겼고, 게이뤼삭이 세상을 뜰 때까지 깊은 존경심과 우정을 유지했습니다. 1824년 5월, 훔볼트의 추천으로 리비히는 21세의 나이에 기센 대학교의 교수가 됩니다. 게이뤼삭을 만난지 6주만에 헤어진 셈이지만, 독일로 돌아간 이후에도 리비히는 프랑스 학계와 깊은 관계를 유지합니다. 대학에 입학한 첫 학기부터 프랑스어를 공부했던 리비히는 프랑스어를 능숙하게 구사할 수 있었습니다. 이 능력을 활용하여 리비히는 게이뤼삭을 비롯한 프랑스 화학자들과 프랑스어로 서신을 교환했고, 논문을 출판할 일이 있으면 프랑스 화학 저널인 『*Annales de chimie*』를 가장 먼저 고려했습니다.

재미있게도, 이 시기의 베르셀리우스와 빌러는 프랑스 스타일의 화학을 싫어했습니다. 리비히의 초기 논문을 두고 베르셀리우스와 빌러가 나누는 서신을 보면, 연구가 빠르지만 불완전하다거나 영성하다는 평가가 많이 나오고, “부분적인 관찰 결과와 불완전한 분석으로부터 중요한 결론을 서둘러서 도출한다”는 표현도 사용되었습니다. 뒤마는 더 심한 혹평을 받았습니다. 베르셀리우스는 뒤마를 가리켜 “모든 프랑스인들이 그렇듯 뒤마는 발견을 뒤쫓아 다닐 뿐이다”라고 평가하였고, 깊이 있는 질문을 던지지 않는다고 보았습니다. 빌러는 베르셀리우스에게 뒤마가 남의 연구를 표절한 것으로 의심되는 여러 연구를 정리한 목록을 보내기도 했습니다.

빌러와 리비히의 운명은 흥미롭게 겹쳐집니다.⁴ 리비히는 파리에서 뇌산 은(silver fulminate)을 연구했고, 빌러는 스톡홀름에서 시안산 은(silver cyanate)을 연구했습니다. 그런데 각자 무게를 분석한 바에 따르면, 두 물질은 동일한 조성으로 구성되어 있었습니다. 다혈질이었던 리비히는 이 결과를 보자마자 빌러를 강하게 공격하였습니다. 반면 보다 차분한 성격의 소유자였던 빌러는 리비히에게 샘플을 보내 직접 확인하게 했죠. 분석을 마친 리비히는 1826년, 빌러의 분석이 올바르게 수행되었음을 받아들이고 자

3. 리비히는 파리 체류 기간 중인 1823년 6월, 에를랑겐 대학교로부터 박사학위를 받습니다. 리비히는 박사학위논문도 제출하지 않았고 학위 수여식에 참석할 수도 없었지만, 지도교수 카스트너가 그 모든 것을 면제받을 수 있도록 강력하게 힘을 쓴 덕분에 학위를 받을 수 있었습니다.

4. Soledad Esteban, "Liebig-Wöhler Controversy and the Concept of Isomerism," *Journal of Chemical Education* **85** (9): 1201–1203 (2008).

신의 실수를 인정했습니다.⁵ 그리고 뵐러와 리비히는 좋은 친구가 됩니다. 이들은 평생에 걸쳐 1000통 이상의 서신을 교환했고, 여러 연구를 함께 수행하였습니다. 1829년 리비히가 뵐러에게 쓴 편지에는 심지어 이런 말이 나오죠. “나는 우리의 우정이 우리가 마주친 사소한 충돌로 인해 결코 흔들리지 않을 것이며, 여전히 서로를 지지할 것이라 확신한다네.”⁶

이 시기는 유기물의 조성 분석법이 급속도로 발전하던 시기였습니다. 우리의 주인공들이 바로 그 주역이었죠. 리비히는 1831년 칼리구(kaliapparat)라는 기구를 발표합니다.⁷ 당시 유기 분석법은 시료 내의 탄소와 수소를 산화시켜 이산화 탄소와 물을 얻는 방식을 주된 방식으로 하고 있었습니다. 그 결과 시료를 많이 사용하면 기체가 많이 발생하여 수집 및 정량화가 어려웠죠. 따라서 시료를 적게 사용할 수밖에 없었고, 이는 정확도의 하락으로 귀결되었습니다. 리비히는 수산화 포타슘(KOH)과 염화 칼슘(CaCl₂)을 이용하여 이산화 탄소와 물이 발생하는 즉시 반응하여 액체 및 고체 상으로 포집되도록 기구를 고안하였습니다. 이제 많은 양의 시료를 사용할 수 있었고, 정확도도 크게 상승하였습니다.⁸ 뵐러와 베르셀리우스는 칼리구를 보자마자 극찬하였습니다. 뒤마는 처음에 이 기구를 평가절하하였지만, 이내 그 가치를 알아보고 자신도 이 기구를 사용하기 시작하였습니다. 뒤마 자신도 새로운 분석 방법 개발에 관심이 많았습니다. 그는 1826년 기체의 밀도를 정량적으로 결정하는 방법을 개발하였고, 1833년에는 질소의 함량비를 정량적으로 분석하는 방법을 발표하였습니다. 이렇게 다양한 분석법의 발전으로 정확한 원소 함량비를 구할 수 있게 되면서, 유기화학의 발전은 가속화됩니다.

뵐러와 리비히는 1832년 함께 쓴 논문에서 벤조산(benzoic acid), 벤조인(benzoin) 등의 화합물에서 특정 원자단(C₇H₅O)⁹이 반복적으로 나타난다는 것을 발견하고, 이 원자단을 벤조일 라디칼(benzoyl radical)로 명명하였습니

다. “라디칼”이라는 용어는 뿌리를 의미하는 라틴어 *radix*에서 온 말로, 여러 화합물 내에서 변하지 않는 덩어리로 존재하는, 뿌리가 되는 존재라는 의미를 담고 있습니다. 이 연구는 큰 반향을 일으켰고, 이후 빠른 속도로 에틸(ethyl), 메틸(methyl), 아세틸(acetyl), 카코딜(cacodyl) 라디칼 등이 제안되었습니다. 이때는 베르셀리우스의 이원론이 여전히 영향력을 떨치고 있던 때라, 사람들은 이 라디칼이 마치 무기화합물 내 양이온처럼 유기화합물 내에서 전기적으로 양성을 띠고 있는 부분이라고 생각했습니다. 이원론과 라디칼 이론이 결합되자 모든 것이 아름답게 설명되는 것처럼 보였습니다.

하지만 이내 라디칼 이론은 반대에 부딪힙니다. 주된 공격은 뒤마로부터 왔습니다. 먼저 무엇을 라디칼이라고 보아야 하는지가 모호하다는 문제가 있었습니다. 리비히는 에탄올(CH₃CH₂OH)의 라디칼을 에틸(CH₃CH₂)로 생각했습니다. 그런데 당시에도 에탄올에 탈수 반응을 시키면 에틸렌(CH₂CH₂)이 형성된다는 것이 알려져 있었습니다. 그렇다면 에탄올의 라디칼은 에틸이 아니라 에틸렌이 되어야 하는 것 아닐까요? 라디칼은 무엇을 기준으로 정해야 하는 걸까요? 더 큰 문제는 많은 화합물에서 염소가 수소를 대체할 수 있다는 점이었습니다. 일찍이 1815년에 게이뤼삭이 사이안화 수소(HCN)로부터 염화 사이아노젠(CNCl)을 얻어낸 바 있었고, 이후 뒤마는 클로로포름(CHCl₃)의 수소가 염소로 대체될 수 있음을 발견했습니다. 베르셀리우스의 이원론에서 수소는 전기적으로 양성을 띤 원소로, 염소는 전기적으로 음성을 띤 원소로 분류되어 있었습니다. 만약 염소가 수소를 대체할 수 있다면, 그 나머지 부분은 전기적으로 양성일까요, 음성일까요? 이를 설명할 수 없었던 베르셀리우스의 이원론은 큰 곤경에 처하게 됩니다.

1835년, 뒤마의 학생이었던 로랑(Auguste Laurent, 1807-1853)은 라디칼의 개념을 뒤바꾼 새로운 이론을 제시합니다. 그는 나프탈렌(naphthalene, C₁₀H₈)과 그 할로젠

5. 지난 글에서 살펴본 것처럼, 뇌산 은과 시안산 은은 1832년 베르셀리우스에 의해 “이성질체”로 명명됩니다.

6. 리비히는 1830년 베르셀리우스를 만나고 역시 좋은 관계를 맺기 시작합니다. 이후 리비히는 베르셀리우스의 원자량을 받아들여 사용합니다.

7. 현재 미국화학회(American Chemical Society)의 로고 하단에는 이 칼리구의 형태가 삽입되어 있습니다.

8. 2005년 이 칼리구를 리비히의 매뉴얼대로 재현한 연구가 발표되었습니다. 칼리구는 심지어 학부생도 쉽게 조작할 수 있을 정도로 쉬웠고, 다른 장비 없이도 분석의 정확도를 판단할 수 있는 자체적인 루틴을 가지고 있었습니다. 그 결과 시료의 순도가 충분히 높다면 한 번의 조작만으로 정확한 조성을 알아낼 수 있었습니다. Melvyn Usselman *et al.*, “Restaging Liebig: A Study in the Replication of Experiments.” *Annals of Science* **62**: 1-55 (2005).

9. 아직 원자량이 통일되어 있지 않았기 때문에, 뵐러와 리비히가 실제로 사용한 분자식은 C₁₄H₁₀O₂였습니다. 이 글에서는 혼동을 막기 위해 오늘날의 표기법을 사용합니다.

유도체들 사이의 관계를 연구하다가 이들 모두를 하나의 종류로 묶어 표현하는 것이 더 낫다는 것을 발견합니다. 그는 탄소와 수소로만 구성된 나프탈렌을 “근본 라디칼(fundamental radical)”이라 부르고, 그 할로젠 유도체들을 “유도 라디칼(derived radical)”이라 불러 라디칼 개념을 확장하였습니다. 이제 “라디칼”은 “변하지 않는 덩어리”가 아니라 “동일한 탄소 틀을 공유하는 유기 물질들”을 총칭하는 용어가 되었습니다. 흥미롭게도 로랑은 이 아이디어를 결정학에서부터 얻었습니다. 결정 구조에 가장 큰 영향을 미치는 것은 각 원자의 종류가 아니라 원자의 배열이었습니다. 즉, 서로 다른 조성으로 구성된 결정들이라 하더라도 이들이 같은 배열을 이루고 있다면 유사한 결정 구조를 갖게 됩니다. 로랑은 유기 분자들 역시 마찬가지일 것이라고 추측한 것입니다. 탄소 틀이 동일하다면 설사 수소가 할로젠 원자로 대체된다 하더라도 비슷한 성질을 가지게 될 것이고, 이들은 동일한 종류로 분류할 수 있을 것입니다.

뒤마는 로랑의 새로운 이론을 접하고 처음에는 거부했으나, 1838년 아세트산(CH_3COOH)의 수소 세 개를 모두 염소로 치환한 트라이클로로아세트산(CCl_3COOH)이 아세트산과 유사한 성질을 보이는 것을 발견하고 로랑의 이론을 받아들입니다. 이 이론은 화학 반응에 의해 서로 변환되는 화합물들은 같은 수의 원자들이 같은 방식으로 결합해 있는, 동일한 “유형”으로 분류할 수 있다는 이론으로 발전하여 유형 이론(type theory)이라는 이름을 갖게 되었습니다. 서로 결합 방식만 같다면 구성 원자가 전기적으로 양성이든 음성이든 상관없었기 때문에, 결국 유형 이론이 널리 받아들여지면서 베르셀리우스의 이원론은 점차 무대에서 밀려나게 됩니다. 리비히의 연구 결과들도 유형 이론으로 더 잘 설명할 수 있었고, 그도 더 이상 라디칼 이론을 고집할 수만은 없었죠. 예를 들어 그는 아세트산과 트라이클로로아세트산이 동일하게 산으로 작용하는 걸 보면서 산성을 띠게 하는 원자는 산소가 아니라 수소라는 것을 깨닫습니다. 리비히는 1838년 발표한 논문에서 산은 산화된 라디칼이 아니라 치환 가능한 수소 원자를 포함하는 물질이라는 이론을 주창하죠.

하지만 리비히는 점차 이러한 이론적 논쟁에 피곤을 느

꼈습니다. 1839년에 쓴 글에서 그는 이렇게 고백합니다. “새로운 결정 물질을 발견하는 것도 어렵지 않고, 그에 대한 정확한 분석을 수행하는 것은 현재로서는 심지어 더 쉽다. 하지만 이 물질이 말하게 만들고, 어디서부터 왔는지, 누가 친척인지 자백하게 하는 것이야말로 진짜 문제다.”¹⁰ 결국 리비히는 이후 화학 이론 연구에 관심을 접고 합성 화학에 집중합니다. 사실 이렇게 눈에 보이지 않는 원자나 분자에 대한 고찰을 그만두고, 그 때까지 개발된 여러 화학 모형들을 도구로 삼아 새로운 물질들을 합성하고자 하는 방향성은 당시 유럽 화학계 전반에서 관찰되었습니다. 리비히도, 벨러도, 뒤마도 예외는 아니었죠. 그들 입장에서는 이 모형들이 정말로 옳은지 그른지 따지는 것은 확인이 불가능한(원자는 보이지 않으니까요!) 형이상학적 논쟁에 불과했고, 어쨌든 이 모형들이 실험 결과를 정확하게 설명하고 예측하는 것은 사실이었으니까요.

리비히, 벨러, 뒤마는 모두 19세기 초중반 화학계를 이끌어 나가는 거물들이었습니다. 오늘 글에서 살펴본 것처럼 이들의 경쟁과 협력으로 당시 화학이 빠르게 발전할 수 있었습니다. 그 중에서도 리비히는 “리비히 학파”라 불릴 정도로 많은 수의 제자들을 체계적으로 길러냈습니다. 뒤마도 파리에서 유사한 프로그램을 시도했지만 그만큼 성공하지는 못했죠. 결국 리비히 이후 화학의 중심지는 프랑스에서 독일로 옮겨지게 됩니다. 여기에는 당연히 리비히 한 명의 역할뿐 아니라 다양한 요소가 개입되어 있었습니다. 다음 글에서는 리비히 학파의 성공과 이 시기 연구 헤게모니의 전환에 대해 자세히 살펴볼까 합니다. 지금까지 주로 살펴본 화학의 지적 흐름과는 조금 거리가 있겠지만, 새로운 관점에서 흥미로운 이야기들이 나오지 않을까 기대해 봅니다. 🌀



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)

10. Catherine Mary Jackson, *Analysis and Synthesis in Nineteenth-Century Organic Chemistry*, Ph.D. dissertation, 103쪽에서 재인용.



화학자가 들려주는 원자와 분자, 세포 이야기

인류의 운명을 바꾼 화학

하상수 지음 | 경희대학교출판문화원

2022.11.30 출간 | ISBN 9788982227363



목차

PART 1 화학은 우리 삶에 왜 중요할까?

1. 화학은 질문에서 시작한다 / 2. 화학물질로 이루어진 세상

PART 2 인류의 운명을 바꾼 원자의 역사

1. 탈레스, 그리고 4원소설: 고대 그리스 시대 / 2. 원자 세기의 도래: 17~18세기 / 3. 돌턴의 원자설: 19세기 초 / 4. 화학적 성질에 따라 원소를 분류하다: 19세기 중반 / 5. 원자론을 체계화하다: 19세기 말~20세기 초

PART 3 물이 있는 곳에 생명이 있다

1. 물질의 세 가지 상태: 기체, 액체, 그리고 고체 / 2. 물이 왜 중요할까?: 물의 생성과 역할

PART 4 인간과 지구, 우주를 이루는 분자의 세계: 분자와 화학결합

1. 분자 성질과 관련된 동족성의 문제 / 2. 분자는 어떤 성질을 지니고 있을까?:

책 소개

우리가 사는 세상은 화학물질로 이루어져 있다. 이러한 물질의 성질과 변화를 연구하는 과학이 바로 화학이다. 생명과 물질의 세계에서 일어나는 온갖 현상을 화학으로 설명할 수 있기에 화학은 무궁무진한 가능성을 안고 있으며, 나노, 반도체, 전기자동차 등 미래 기술과 밀접한 관련을 맺어왔다. 하상수 경희대학교 화학과 교수는 『인류의 운명을 바꾼 화학』에서 우리 몸과 세상을 구성하는 화학의 원리와 역사를 알기 쉽게 설명했다. 화학자로서 오랜 연구를 통해 얻은 경험과 노하우를 담은 저자의 첫 책이다. 이 책은 우리 몸과 세상을 구성하는 원자와 분자, 그리고 세포를 연구한 화학자들의 성공과 실패의 역사를 살펴본다. 4원소설을 주장한 탈레스에서부터 돌턴의 원자설, 원자핵과 반물질, 효소, 호르몬, 마리 퀴리의 방사선 발견, 제너의 천연두 예방 백신과 파스퇴르의 세균설, 페니실린과 아스피린 등 신약의 발명, 면역과 항체 연구, 최근의 유전자 치료까지 화학에 관련된 풍부한 에피소드를 담았다. 인류의 운명을 바꾼 화학』은 화학이 어렵거나 멀게만 느껴지는 고등학생과 일반 독자에게 화학의 원리와 역사를 친절하게 알려주는 입문서다. 이 책을 통해 독자들은 물질 세상을 이루는 기본 원리를 이해하고, 사물에 대한 통찰력과 과학적으로 사고하는 힘을 기를 수 있을 것이다.

저자 소개

하상수 : 1994년 서울대학교 자연과학대학 화학과에서 이화학사, 1996년 동 대학교 대학원에서 이학석사, 2001년 동 대학교 대학원에서 이학박사 학위를 취득했다. 2008년부터 현재까지 경희대학교 이과대학 화학과에서 교수로 재직하고 있다. 암타머, RNA 간섭, 유전자 가위, 진단 또는 치료를 위한 핵산 기반 나노 의약품 등에 관한 논문 60편 이상을 국제 저명 학술지에 게재했으며, 국내 특히 12건과 미국 특허 1건을 등록한 생유기화학과 핵산생화학 분야 전문가다. 경희대학교 이과대학 강의 우수상을 받았으며, 경희대학교 교양필수 과목인 ‘빅뱅에서 문명까지’의 기획 단계부터 적극적으로 참여했다. 과학 교양교육을 위한 홈페이지를 직접 운영하고 있고, 2018년부터 2021년까지 경희대학교 후 마니타스칼리지 중핵교과 프로그램 디렉터로 재직하는 등 과학 교육과 과학의 대중화에도 관심이 많다. 저서로 『빅뱅에서 인간까지』(공저)가 있다.

분자의 개념과 성질

PART 5 생명을 살리는 화학: 생명체의 기본 단위로서의 세포 vs. 물질로 이루어진 세포

1. 풀리지 않는 수수께끼, 생명의 기원 / 2. 모든 세포는 세포에서 유래된다: 세포설, 파스퇴르의 자연발생설 부정과 세균(학)설 / 3. 남녀 성별의 수수께끼를 밝히다: 성 결정과 유전자 / 4. 전염병을 예방하는 백신을 발견하다: 우리 몸속 면역의 역할과 항체 연구 / 5. 혼자서는 생존할 수 없는 원시 생명체, 바이러스 / 6. 생물체의 엔지니어, 효소 / 7. 진정한 만병통치약, 호르몬 / 8. 세균성 감염을 치료한 최초의 의약품, 페니실린 / 9. 염증을 완화하는 최초의 소염 진통제, 아스피린 / 10. 약물 부작용? 이제는 개인 맞춤 의학 시대 / 11. 생명과학의 획기적인 발전, DNA 이중나선 구조 / 12. 양날의 칼, 클론 기술 / 13. 유전자 시대의 새로운 시작, 유전병과 유전자 치료

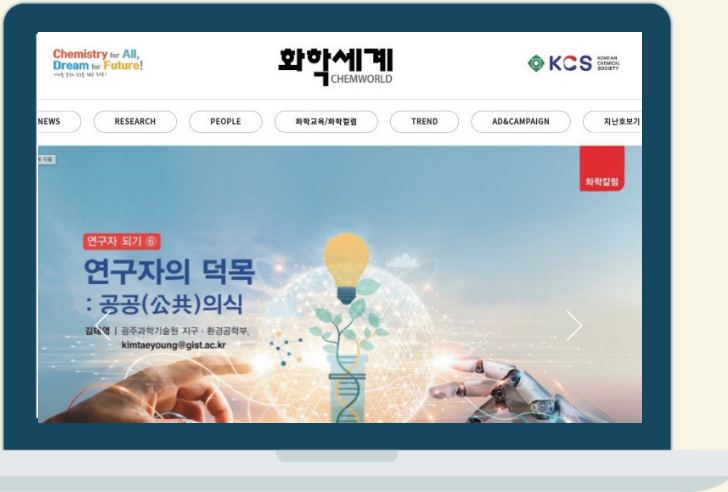


화학세계

(<https://www.chemworld.kcsnet.or.kr>)

플랫폼 소개

『화학세계』는 대한화학회가 매달 발간하는 국문 발행지로 오랜 기간 대한화학회 회원들과 함께하였습니다. “읽기 쉬운 총설”, “이달의 하이라이트” 등과 같이 전문적이고 연구자들에게 도움이 되는 글부터, “우리 실험실은요!”와 같이 학생들이 준비하고 소개하는 실험실 이야기, 깊이 있고 철학적인 “화학칼럼”까지, 『화학세계』는 화학자들의 삶의 다양한 면을 담아오고 있습니다. 이런 『화학세계』는 큰 변화를 앞두고 있습니다. 2023년 10월 25일부터 『화학세계』를 웹페이지(www.chemworld.kcsnet.or.kr)에 공개해서, 『화학세계』의 다양한 기사를 보다 편리하게 만날 수 있게 됩니다. 『화학세계』를 인쇄하는 데 필요한 경비를 절약할 수 있을 뿐만 아니라, 『화학세계』 기사를 손쉽게 검색하실 수 있게 됩니다. 그리고 『화학세계』의 흥미로운 기사들을 공동 연구자나 동료와 SNS를 통해 더 쉽게 공유하실 수도 있습니다. 『화학세계』에 흥미로운 기사가 실리거나 동료 화학자의 동정이 실리면, 이를 손쉽게 주위에 알리고 서로 공유할 수 있을 것입니다. 『화학세계』 웹페이지가 처음 시작하는 만큼 아쉬운 점이 많을 수 있습니다. 부디 애정 어린 눈으로 살펴봐 주시고 충고해 주시면, 『화학세계』의 발전에 큰 힘이 될 것 같습니다.



지속가능한 기계화학 합성방법: 무용매 조건 고체 반응

이효원, 김정근* | 전북대학교 화학과, jeunggonkim@jbru.ac.kr

서론

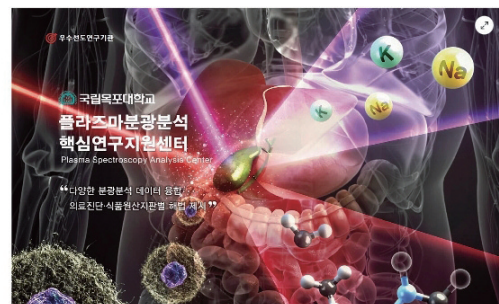
화학의 발전은 인류 생활의 전 영역의 발전에 기여하였다. 특히 1800년대 후반부터 1900년대 후반에까지 우리는 새로운 소재를 사용하여 제품을 쉽고 빠르게 많이 만드는 것에 집중하였다. 만드는 과정, 만들어진 제품, 그리고 사용을 마친 폐기물에 관련된 고민은 지구가 호소하는 아픔이 인류의 생존에 심각한 위협이 된다는 것에 공감한 1990년대 이후 시작하였으며, 화학 분야에서는 녹색화학이 시작되었다. [참고문헌 1,2] 지금까지의 화학과는 달리, 처음 시작부터 마지막 버릴 때까지 지속 가능성을 고민하는 다양한 노력을 하고 있다. 지속 가능성은 짧은 기간이 아닌 오랜 시간을 고려할 때 더 경제이라는 사상을 강조하고자 한다.

녹색 화학의 구현에서 중요한 비중을 차지하는 것은 용매이다. 용매는 화학 반응에서 1) 물질들이 서로 만나게 하기 위하여 균일상으로 녹여주는 역할, 2) 에너지를 전달하는 매개체, 3) 반응의 최적화를 돕는 보조제로서 다양한 일을 한다. 하지만, 그 사용에 따른 다양한 부작용이 발생한다. 우리는 용매의 회수와 제거에 많은 에너지를 사용한다. 어떤 경우는 화학 사고가 반응이 아닌 용매에서 발생한다. 기존에 많이 사용하던 용매 가운데 다수가 독성 및 위험 문제로 사용 금지로 전락되었다. 그에 따라 여러 산업에서 녹색 용매로의 전환에 예를 쓰고 있다. 하지만 근본적으로, 과연 용매는 화학반응에서 꼭 필요한 것인가?

대한민국 정밀화학 분야의 개척자이자 과학기술계 리더



플라즈마분광분석 핵심연구지원센터



>>> 운영위원회

10월 운영위원회

2023년 10월 17일에는 제14차 운영위원회가 대면과 비대면 하이브리드 회의로 진행되었으며, 10월 25일(수)부터 27일(금)까지 김대중 컨벤션센터에서 진행되는 추계학술발표회의 실행계획 내용을 최종 검토하였다. 먼저 기초강연, 이태규 학술상 기념강연, IBS 심포지엄, 젊은 화학자 특별 심포지엄, 동진씨미켄 후원 미래혁신 화학심포지엄, 그리고 KCS-ACS Applied Bio Materials Research Publication Summit, KCS-RSC Joint Symposium 일정을 최종적으로 확인하였고, KCS-ACS 협약 체결 및 ACS와 RSC 국외연사 방문 일정을 공유하였다. 학술 분과에서는 추계학술발표회 심포지엄 장소에 대한 스크린 세팅 사항을 최종 결정하였고, 물리, 무기, 재료, 생명화학분과가 사용할 통합 회의실에는 85인치 스탠드 TV모니터 2대씩 추가 설치하는 것으로 결정하였다. 대한화학회에서 수여하는 기술진보상 초중등교사 부상을 상금 100만 원으로 인상하는 것에 동의하였고, ACS 포스터 상을 수여하는 금요일에는 ACS 담당자가 직접 시상하는 것으로 전달하였다. 미래혁신 화학심포지엄이 진행되는 25일 수요일에 등록하는 회원들에게 동진씨미켄 후원 보조배터리를 제공하기로 하였고, 미래화학자 연구발표회에 참석하는 고등학생에게 대한화학회 경품을 추후 전달하기로 하였다. 공식 후원 업체인 바이오니아와 시마즈 사이언티픽 코리아 외 기

기전시회 참여하는 27개 업체(32개 부스) 현황을 공유하고, 업체들의 요청 사항도 항시 모니터링하기로 하였다. 추계학술발표회 이외, 기초연구 R&D 지원 예산 및 기초과학 교육 관련 정부정책 대응을 위해 신석민 회장님과 이광렬 기획부회장이 위원회를 구성하기로 논의하였다.

>>> 부 고

2023.10.27 한재영(충북대학교 화학교육과) 회원	모친상
2023.10.24 김선희(한국기초과학지원연구원) 회원	부친상
2023.10.20 박윤봉(충남대학교 화학과) 회원	부친상
2023.10.19 이치우(고려대 신소재화학과 명예교수) 회원	빙부상
2023.10.15 황금숙(한국기초과학지원연구원) 회원	모친상
류도현(성균관대학교 화학과) 회원	빙모상
2023.10.14 박준식(포항공대 화학과 졸업) 회원	별세
2023.10.08 김진웅(성균관대 화학공학/고분자공학부) 회원	빙부상
2023.10.05 박용태(경북대학교 화학과 명예교수) 회원	별세
2023.10.05 정용철(부산대학교 화공생명공학과) 회원	외조모상
2023.10.05 안운선(성균관대학교 화학과 명예교수, 대한화학회 제27대 회장) 회원	별세
2023.10.04 윤태영(오스코텍) 회원	부친상
2023.10.04 이우진(삼성전기 책임연구원) 회원	별세
2023.10.04 백경열(한국과학기술연구원) 회원	별세
2023.10.03 김성곤(퍼스트바이오) 회원	모친상

부고 공지 안내

대한화학회 회원 대상 '부고 공지' 방법을 안내드립니다. 아래 내용을 참조하셔서, 공지에 필요한 내용(3번, 신청내용)을 대한화학회에 이메일로 발송해주시고, 회원 여러분들께 이메일로 공지해 드립니다. 단, 회원 별세, 부(모)친상, 조부(모)상, 시부(모)상, 빙부(모)상, 배우자상, 형제/자매상, 자녀상에 한합니다.

1. 신청 자격

부고 당사자 혹은 신청인이 대한화학회 회원인 경우

2. 신청 방법

이메일(office@kcsnet.or.kr)로 신청
※ 휴일에도 이메일로 신청하십시오.

3. 공지 내용

- ① 빈소 ② 발인일 ③ 장지
- ④ 연락처(성명과 연락처 필수)

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 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 · BKCS	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 납부월의 다음 달부터 1년간 발송됩니다. • 학생회원에게는 회원으로 가입한 해당 연도 동안 '화학세계'가 발송됩니다. 단, 유료 구독학술지는 납부월의 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

매 순간
자신있게



케어센스® 에어 연속혈당측정시스템

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

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