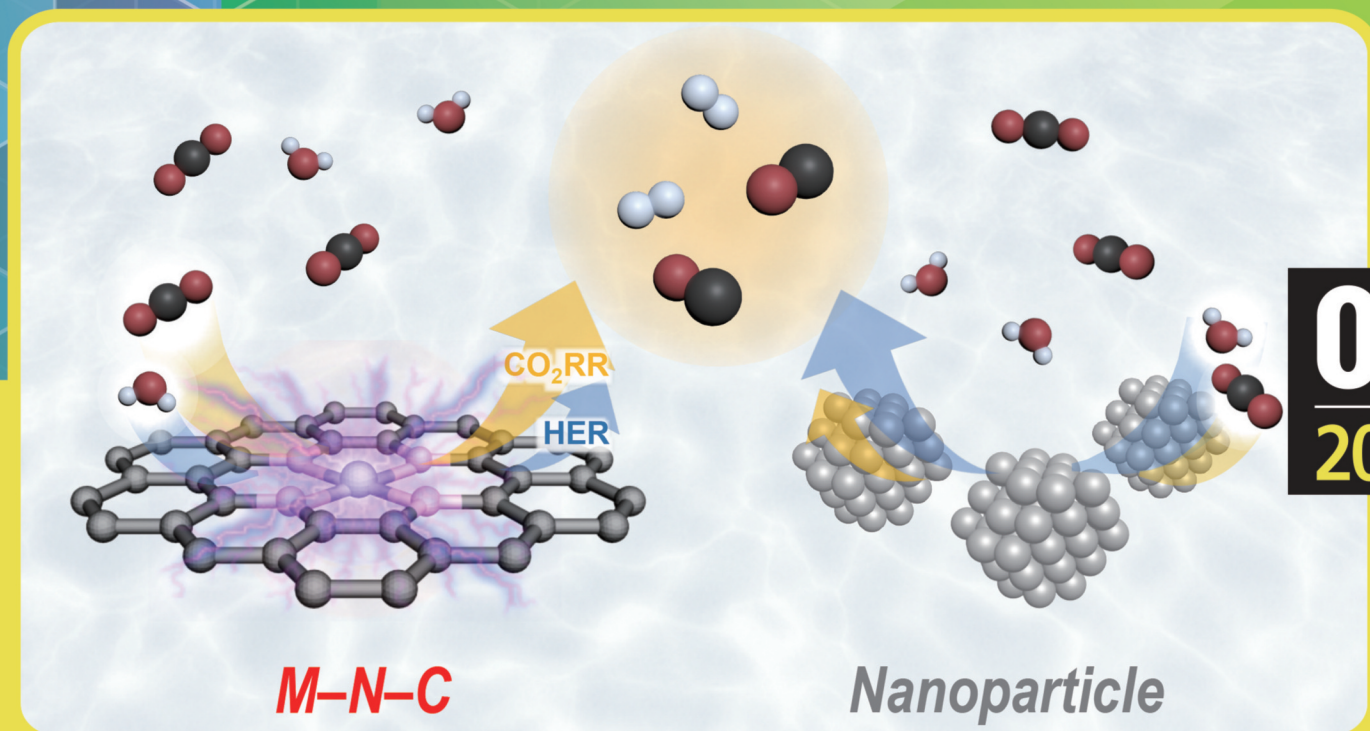


# 화학세계

## CHEMWORLD



07  
2023

〈이달의 하이라이트〉 M-N-C 기반 촉매와 금속 촉매에서의 CO<sub>2</sub> 환원 반응과 수소 발생 반응

### 읽기쉬운 총설

총설에 부쳐: 지속가능한 사회를 위한 화학

탄소-중립 달성을 위한 온실가스(CO<sub>2</sub>)의 유용 화학 물질로의 전환  
이산화탄소 유래 카보네이트 합성 촉매 반응

탄수화물에서 바이오 연료 및 고부가가치 화합물로 전환할 수 있는  
기술 개발의 연구동향

### 이달의 하이라이트

전기화학적 이산화탄소 활용을 위한 탄소 기반 촉매 소재의 기회

### 화학교육

과학과 교육과정 개정의 지역화 정책 측면에 관한 탐색

### 우수선도연구기관

KAIST 금속신경단백질화학 연구단

### INTERVIEW

화학세계가 만난 화학자 | 홍창섭 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.

**케어센스®**  
혈당관리 솔루션



2023 대한민국 퍼스트브랜드 대상  
혈당측정기 부문 12년 연속 수상



2022 올해의 브랜드 대상  
혈당측정기 부문 10년 연속 수상



제43회 국가품질경영대회  
국가품질혁신상 대통령표창



# 대한민국 No.1 혈당관리 파트너

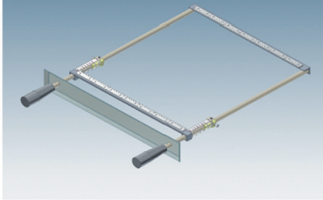
국내 시장점유율 1위  
**케어센스®**



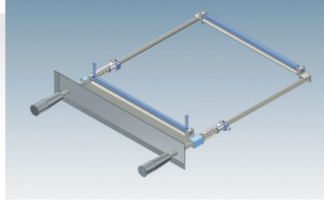
## 국내 LAB 시험기 선두 기업!!

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

상하 핀 타입



종이 호일 타입



자동 배출형 건조기  
[코팅 경화기]

Mini Dryer (DL-2015)

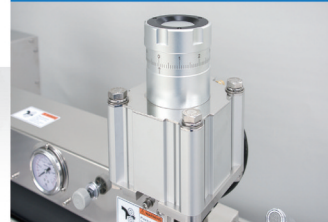
## 그라비아 코팅기

Gravure Coater (DL-2500GV)

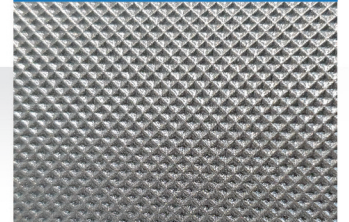


- ✓ 좌, 우측 각각 Air Cylinder의 압력 조절 가능.
- ✓ 편면 코팅가공 (Gravure Coating) 가능.
- ✓ 10사수에서 200사수 까지 가능.
- ✓ 상부와 하부 롤러간의 간격 조절, 두꺼운 시험편 (원단, 부직포 등) 사용이 가능.

롤러 간격 조절 장치

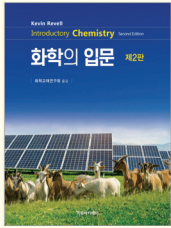


그라비아 패턴 (기본사양)



QR코드로 대림스타릿(주) 홈페이지에 접속하여 다양한 제품을 알아보세요!

## Revell 화학의 입문 제2판



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

## Brown 일반화학 제15판

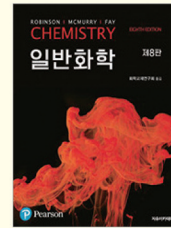


역 자: 화학교재연구회  
출판년도: 2023년 쪽수: 1316쪽  
ISBN: 9791158084196

### 원서 정보

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

## McMurry 일반화학 제8판



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

### 관련 서적

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

### 전자책 출간

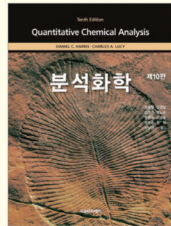
## 합성 유기화학



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

### 전자책 출간

## Harris 분석화학 제10판



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

### 원서 정보

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

### 출간 예정

## Manahan 환경화학 제11판



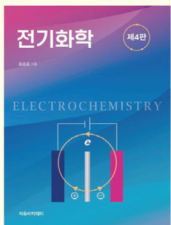
역 자: 김만구 외  
출판년도: 2023년 쪽수: 740쪽  
ISBN: 9791158084981

### 원서 정보

Environmental Chemistry 11/e  
출판년도: 2022년 쪽수: 764쪽  
ISBN: 9780367558871

### 전자책 출간

## 전기화학 제4판



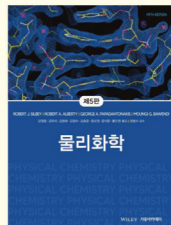
저 자: 오승모  
출판년도: 2023년 쪽수: 380쪽  
ISBN: 9791158084219

### 관련 서적

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

### 전자책 출간

## Silbey 물리화학 제5판



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

### 원서 정보

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

### 전자책 출간

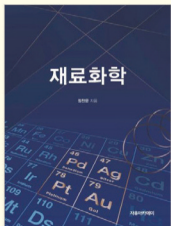
## Stevens 나노세계로 보는 과학의 빅 아이디어



역 자: 정대홍 외  
출판년도: 2023년 쪽수: 280쪽  
ISBN: 9791158084363

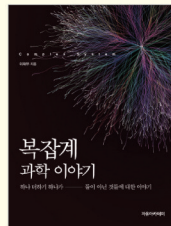
### 전자책 출간

## 재료화학



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

## 복잡계 과학 이야기



저 자: 이재우  
출판년도: 2023년  
쪽 수: 480쪽  
ISBN: 9791158084615

## 향노화 바이오 화장품

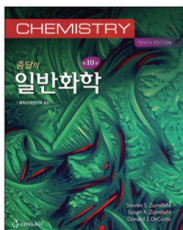
저 자: 신동욱  
쪽 수: 160쪽  
출판년도: 2023년  
ISBN: 9791158084974

### 전자책 출간

## Selinger 장바구니에 담긴 화학 제6판

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

줌달의  
일반화학 10판



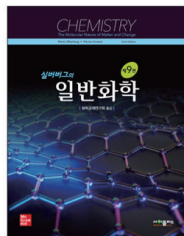
저 자 : Zumdahl  
판 수 : 10  
발 행 : 2019  
페 이 지 : 1168  
I S B N : 9788962184358

신간 레이먼드 창외  
일반화학 14판



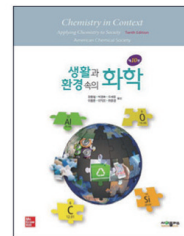
저 자 : Overby, Chang  
판 수 : 14  
발 행 : 2023  
페 이 지 : 1080  
I S B N : 9791188731343

신간 실버버그의  
일반화학 9판



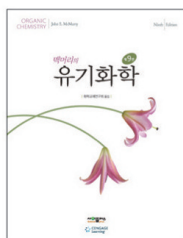
저 자 : Silberberg  
판 수 : 9  
발 행 : 2023  
페 이 지 : 1034  
I S B N : 9791188731367

생활과 환경 속의  
화학 10판



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

맥머리  
유기화학 9판



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

양자화학 입문 2판



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

기초 표면화학



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

Hart의  
유기화학 13판(수정판)



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

신간 나노소재화학



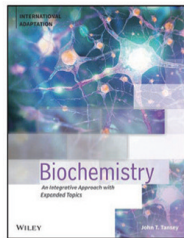
저 자 : 이광렬 외  
판 수 : 1  
발 행 일 : 2023  
I S B N : 9791188731404

신간 화학자를 위한  
결정학



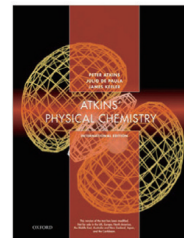
역 자 : 윤우진, 윤호섭  
판 수 : 1  
발 행 일 : 2022  
페 이 지 : 236  
I S B N : 9791188731329

신간 Biochemistry



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

Atkins' Physical Chemistry 11/e



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

## CONTENTS

### 2023년 7월 광고 목차

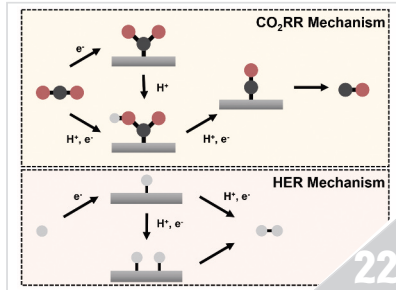
뒤표지	바이오니아
앞표지 안쪽	동우화인켐
뒤표지 안쪽	시마즈 사이언티픽 코리아
p.01	아이센스
p.02	대림스타릿(주)
p.03	자유아카데미
p.04	사이플러스

### 2023년 운영진

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

### 2023년 화학세계 편집위원회

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



## NEWS

- 06 KCS 캘린더
- 07 이달의 학회
- 41 신진연구자 소개 · 김상민
- 75 월간학회소식

## PAPER

- 08 총선에 부쳐 | 지속가능한 사회를 위한 화학 · 홍석원
- 10 읽기 쉬운 총설 | 탄소-중립 달성을 위한 온실가스(CO<sub>2</sub>)의 유용 화학 물질로의 전환-이산화탄소 유래 카보네이트 합성 촉매 반응 · 장혜영
- 16 읽기 쉬운 총설 | 탄수화물에서 바이오 연료 및 고부가가치 화합물로 전환할 수 있는 기술 개발의 연구동향 · 양정운
- 22 이달의 하이라이트 | 전기화학적 이산화탄소 활용을 위한 탄소 기반 촉매 소재의 기회 · 윤혜원, 유수환, 황윤정\*

## SPECIAL

- 36 우수선도연구기관 | KAIST 금속신경단백질화학 연구단 · 임미희
- 42 INTERVIEW | 화학세계가 만난 화학자 · 홍창삼 교수
- 46 KCS 하이라이트 | 천연물 전합성 및 생리활성물질 합성 관련 연구 · 이에서, 정원진\*

## EDUCATION

- 30 화학 교육 | 과학과 교육과정 개정의 지역화 정책 측면에 관한 탐색 · 천주영

## COLUMN

- 55 화학칼럼 | 원자로 만든 인공원자로 만드는 인공분자로 보는 분자 · 장홍제
- 58 화학칼럼 | 화학사 돌아보기 ③: 원자설의 여파 · 최정모

## TREND

- 52 우리 실험실은요! | 생명나노 화학 연구실(Bio-nano Chemistry Lab) · 문영선
- 63 화학만평
- 73 Book & App

## 132<sup>nd</sup> GENERAL MEETING

- 64 포지엄 및 구두발표 주제, 조직책임자
- 66 연회비 및 참가비 안내
- 67 심포지엄 및 구두발표 주제 요약문

## ADVERTISING & CAMPAIGN

- 07 클린 인터넷을 선언합니다
- 76 지면광고 안내/회비 및 구독료 안내

## JULY

S	M	T	W	T	F	S
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

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

### 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)

### August

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

### September

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

### October

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

### November

### December

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



## CONFERENCE OF THE MONTH

2023년 7월 9일~12일

### 18th European Conference on Solid State Chemistry

장 소 | Prague, Czech Republic

안 내 | <https://icbic2023.org>

2023년 7월 16일~21일

### International Conference on Biological Inorganic Chemistry 2023

장 소 | Adelaide, Australia

안 내 | <https://icbic2023.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.kr](mailto:cleankcs@kcsnet.or.kr)로 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 · VII

## 지속가능한 사회를 위한 화학



**홍 석 원 Sukwon Hong**

- 서울대학교 화학과, 학사(1989.03-1995.02)
- 서울대학교 화학과, 석사(1995.3-1997.2, 지도교수 : 이은)
- Northwestern University, 박사 (1998.9-2003.6, 지도교수 : Tobin J. Marks)
- The Scripps Research Institute, 박사 후 연구원 (2003.9-2005.8, 지도교수 : Dale L. Boger)
- University of Florida 화학과 조교수(2005.8-2012.4)
- 광주과학기술원 신소재공학부-화학과, 부교수-교수 (2012.5-현재)

지구의 지속가능성은 현재 우리가 마주한 가장 큰 위협 중 하나입니다. 지속적인 인구증가, 자원 고갈, 기후 변화, 환경 파괴 및 생태계의 붕괴와 같은 문제들이 오늘을 살아가는 인류사회에 경종을 울리고 있습니다. 이대로 계속된다면 오늘과 같은 내일이 보장될 수 없을지도 모른다는 경고가 지구 곳곳에서 터져 나오고 있습니다.

인류는 산업화를 통해 기술의 발전과 생산의 증가를 이루어 오늘의 편리하고 윤택한 생활을 누리게 되었습니다. 화학은 이러한 산업화와 현대화에 중요한 역할을 하였지만, 지구와 인류의 지속가능성에도 심각한 도전을 제기하고 있기도 합니다. 화학 산업은 대기로 유해한 화학물질을 배출하여 대기 오염을 야기하거나, 많은 종류의 화학물질을 생산하고 처리하는 과정에서 산업 폐수로 인한 수질 오염을 일으키기도 하고, 독성 물질을 포함하거나 지속적으로 분해되지 않는 화학폐기물이 심각한 토양 오염을 일으키기도 합니다. 위와 같은 산업폐기물뿐만 아니라, 현대 화학이 우리 일상을 혁명적으로 바꾼 예로 들 수 있는 플라스틱도 인류의 지속가능성을 위협하고 있는 현실입니다. 플라스틱은 내구성이 뛰어나고 외부충격과 부식에 강하면서도 유연하고 가벼운 소재로, 또한 대량생산이 가능하여 현대 생활에서 매우 중요한 재료로 이용되고 있습니다. 오늘 우리 일상에서 플라스틱이 없는 생활을 상상하기조차 어렵지만, 플라스틱은 석유 기반 원료로 제조되기에 석유 자원의 대량 소모를 요구하고, 플라스틱의 뛰어난 내구성과 안정성은 자연 분해를 어렵게 만들어 플라스틱 폐기물은 토양, 해양 및 생태계 오염을 초래하는 심각한 위협으로 떠오르고 있습니다.

최근 화학은 이렇듯 지속가능성 위기의 주범으로 많은 사람에게 인식되는 경향이 있습니다. 그러나 조금 더 깊이 생각해 보면, 이러한 지속가능성 문제를 해결할 수 있는 학문도 역시 화학이라는 것을 깨닫게 됩니다. 생분해성 고분자, 재생에너지 저

장 소재, 태양광 촉매 등 친환경 소재의 개발에 관한 연구, 기후 변화 문제 해결을 위해 탄소 배출을 감소시키는 연구, 화학 산업의 생산공정을 지속가능하고 환경친화적인 방향으로 전환하려는 녹색 화학 연구 등을 통해 환경 보호와 자원 효율성을 향상시키는데 기여할 수 있습니다. 이산화탄소 포집과 화학적 전환을 통해 온실가스 문제에 해법을 제시할 수 있는 학문, 석유자원이 아닌 바이오 원료를 이용할 수 있게 하는 학문, COVID-19를 거치면서 급격히 늘어나는 일회용 플라스틱 폐기물 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 학문, 폐기물을 줄이고 에너지 소비를 줄일 수 있는 친환경 생산공정을 개발할 수 있는 학문, 모두 화학입니다.

이번 읽기 쉬운 총설에서는 '지속가능한 사회를 만드는 화학'이라는 주제를 다루어보고자 합니다. 7월 호에는 아주대학교 장혜영 교수님께서 '탄소 중립 달성을 위한 온실가스의 유용 화학물질로의 전환'에 대해 소개해 주시고, 성균관대학교 양정운 교수님께서 '탄수화물에서 바이오 연료 및 고부가가치 화합물로의 전환 전략'에 대해 설명해 주십니다. 8월 호에서는 KAIST 홍순혁 교수님께서 '플라스틱의 화학적 재활용'에 대해 말씀해 주시고, KAIST 박윤수 교수님께서 '지각에 풍부한 금속을 활용한 지속가능한 광촉매'에 대해 소개해 주실 것입니다. 연재 마지막인 9월 호에서는 POSTECH 김현우 교수님께서 '전기유기화학-새로운 반응성과 선택성을 위한 유기합성 전략'에 대해 말씀해 주시고, 전북대학교 김정곤 교수님께서 '지속 가능한 합성의 새로운 제안-기계화학합성'에 대해 설명해 주실 것입니다. 이번 총설을 통해 현재 인류가 당면한 지속가능성 문제를 해결하려는 화학자의 노력에 대해 살펴볼 수 있는 계기가 되었으면 합니다. 바쁘신 일정 가운데에도 읽기 쉬운 총설 집필에 흔쾌히 참여해 주신 교수님들께 깊이 감사드립니다. 🌱

## 탄소-중립 달성을 위한 온실가스(CO<sub>2</sub>)의 유용 화학 물질로의 전환 이산화탄소 유래 카보네이트 합성 촉매 반응

장혜영 | 아주대학교 화학과, hyjang2@ajou.ac.kr

### 서론

전 지구적인 기온 상승과 급격한 기후변화는 인류의 큰 위기로 다가오고 있다. 기후변화에 영향을 미치는 요인을 단순하게 몇 가지로 말하기는 어려우나, 대기 중 이산화탄소의 농도 증가와 지구 온도 상승 사이에 밀접한 관련을 통해 이산화탄소의 배출이 중요한 원인이라고 할 수 있다. 1970년 기준 전 세계 이산화탄소 방출량은 대략 16 GT이었으나 2018년 기준 37.5 GT로 증가하였고 이와 비례해서 지구의 온도도 계속 상승하고 있다.<sup>1,2</sup> 이에 우리나라를 포함한 세계 각국에서는 배출되는 이산화탄소를 줄이려는 정부와 민간의 지속적인 협력이 진행되고 있으며, 이를 통해 2050년 “탄소-중립” 달성을 목표로 하고 있다. 탄소-중립 달성을 위해서는 이산화탄소의 포집, 저장, 전환을 포함한 CCUS(Carbon capture, utilization, and storage/sequestration) 기술의 개발이 중요하다. 이미 배출된 이산화탄

소를 줄이기 위한 포집과 저장, 그리고 화석연료를 대체할 수 있는 화학물질 및 연료 제조에 이산화탄소의 전환 기술을 이용하여 추가 탄소 배출량을 줄임으로써 2050 탄소-중립 달성에 더 가까이 갈 수 있을 것으로 생각한다. 본 총설에서는 이산화탄소의 전환 기술 중 균일 촉매(전이금속 촉매 및 유기촉매)를 이용하여 이산화탄소를 단분자 유기카보네이트 및 폴리카보네이트 고분자로 전환할 수 있는 촉매 기술에 대해서 살펴보고자 한다.

### 본론

#### 1. 이산화탄소와 에폭사이드를 이용한 단분자 유기카보네이트 합성

에폭사이드와 CO<sub>2</sub> 반응을 통해 얻어지는 고리형 유기카보네이트는 높은 끓는점과 극성을 특징으로 하고 있으며

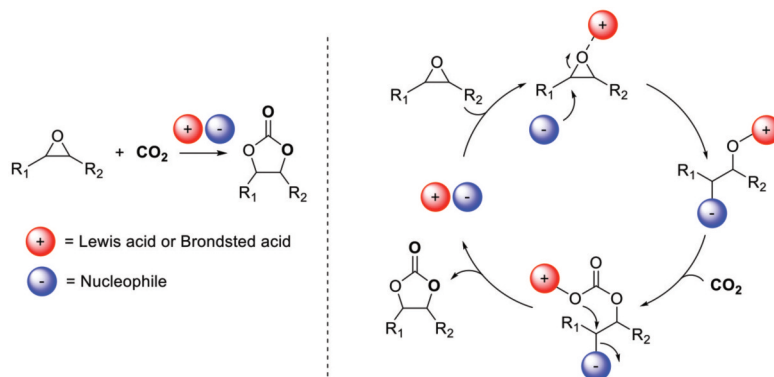


그림 1. 단분자 카보네이트 합성 메커니즘

Li 이온을 포함한 리튬염을 잘 용해시켜 리튬 배터리 용매로 사용되고 있다. 리튬배터리 용매 외에도 다양한 화학 산업에 응용되고 있어 경제적이고 효율적인 합성법에 대한 연구가 보고되어 왔다. 일반적인 고리형 유기카보네이트 합성은 [그림 1]에 도시된 촉매와 메커니즘을 따른다. 금속 기반의 루이스산(Lewis acid) 촉매 혹은 유기물 기반의 브뢴스테드산(Bronsted acid) 촉매가 사용되며, 친핵체로는 할로젠 음이온이 사용된다. 루이스산 혹은 브뢴스테드산에 의해서 활성화된 에폭사이드는 할로젠 음이온과 반응하여 고리 열림 반응이 진행되고, 이산화탄소는 고리 열림 반응으로 형성된 alkoxide 중간체와 반응하여 카보네이트 중간체를 형성한다. 이후 카보네이트는 분자내 치환반응을 통해 할로젠 음이온을 떨어뜨리면서 고리형성 반응을 하게 된다. 금속 기반의 Lewis acid 촉매는 [그림 2]에 도시된 살렌(salen), 포르피린(porphyrin), 매크로사이클 페놀(macrocyclic phenol) 등의 평면 구조를 선호하는 리간드를 포함한 비교적 높은 산화수의 Cr(III), Al(III), Co(III), Zn(II), Fe(III), Mg(II) 등의 금속 이온 화합물이 사용된다.<sup>3</sup> 살렌, 포르피린 리간드가 배위된 금속 화합물은 평면 구조를 형성하여 에폭사이드가 쉽게 배위할 수 있도록 한다. 포르피린 리간드 합성에 비해 살렌 리간드 합성은 상대적으로 쉽고 경제적인 장점이 있다. 매크로사이클 페놀 리간드의 경우 Zn(II), Fe(III), Mg(II)와 같은 금속이온의 배위를 통해 고리형 유기카보네이트 합성에 높은 활성을 보이고 있다. [그림 2]에 도시된 포르피린, 살렌, 매크로사이클 페놀 외에도 다양한 구조의 금속화합물의 도입을 통해 유기카보네이트 합성 온도 및 이산화탄소 압력을 낮추는 등 반응 조건을 개선하는 노력을 계속하고 있다.

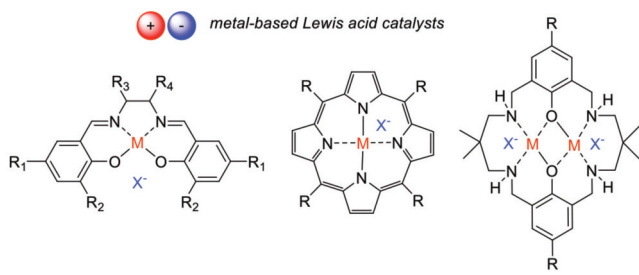


그림 2. 단분자 카보네이트 합성용 금속 촉매

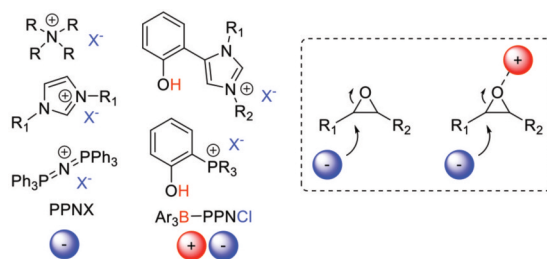


그림 3. 할로젠 음이온 촉매 반응

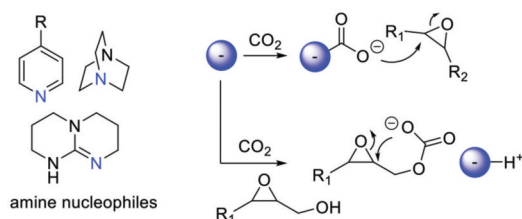


그림 4. 고리형 유기카보네이트 합성용 비할로젠 촉매 I

유기촉매를 이용한 단분자 카보네이트 합성은 금속 촉매에 비해 독성이 없고, 경제적인 장점이 있다. 에폭사이드와 CO<sub>2</sub>의 반응에 적용되는 유기 촉매는 [그림 3,4]에 도시된 할로젠 음이온 촉매와 할로젠 음이온이 사용되지 않는 촉매로 분류할 수 있다.<sup>4-9</sup> 할로젠 음이온은 암모늄(ammonium), 이미다졸륨(imidazolium), 포스핀-이미늄(phosphine-iminium) 양이온과 이온화합물을 형성하고 있으며[그림 3], 에폭사이드의 고리 열림 반응은 할로젠 음이온의 첨가반응으로 이루어지기 때문에 테트라알킬암모늄(tetraalkylammonium)염의 경우 R기의 종류에 따라 반응성이 달라지며, 반응 온도는 80도 이상 고온이 요구된다. 할로젠 음이온의 고리 열림 반응을 촉진하기 위해 수소결합 작용기를 함께 가지고 있는 촉매가 사용되었다. 브뢴스테드산인 페놀 계열의 OH기는 에폭사이드를 활성화시켜 할로젠 음이온의 고리 열림 반응을 촉진한다. 비슷한 구조의 암모늄 할로젠 염에 비해서 분자내에 OH기가 함께 있는 경우 고리형 카보네이트 합성 수율이 향상되는 것으로 보고되었다. 에폭사이드 활성화를 위해 루이스산인 트리아릴 보론(Ar<sub>3</sub>B, triarylborane)이 사용되었는데, 트리아릴 보론과 PPNCl(bis(triphenylphosphine)iminium chloride)를 함께 사용하여(Ar<sub>3</sub>B-PPNCl) 고리형 카보네

이트 화합물을 높은 촉매 활성으로 얻을 수 있었다. [그림 3]에 도시된 바와 같이 에폭사이드 고리는 Bronsted acid의 도움 없이 혹은 도움을 받아 할로젠 음이온의 고리 열림 반응이 진행되고 이후 이산화탄소 첨가와 고리화 반응은 [그림 1]의 일반적인 메커니즘과 동일하게 진행된다.

할로젠 음이온 대신 질소 포함 염기를 촉매로 사용하여 에폭사이드와 CO<sub>2</sub>의 반응이 보고되었다. 질소 포함 염기는 [그림 4]에 도시된 바와 같이 4-다이메틸아미노피리딘(4-(dimethylamino)pyridine(DMAP)), 1,4-다이아자바이사이클로[2,2,2]옥테인(1,4-diazabicyclo[2,2,2]octane(DABCO)), 1,5,7-트리아자바이사이클로[4,4,0]데-5-센(1,5,7-triazabicyclo[4,4,0]dec-5-ene (TBD)) 등이 있다. 아민만을 사용하여 고리형 카보네이트를 합성할 때의 반응 메커니즘은 할로젠 음이온 반응과 다르다. [그림 4]에 도시된 바와 같이 아민 염기들은 친핵체로 작용하여 이산화탄소와 먼저 반응하고 아민 염기-CO<sub>2</sub> 중간체가 에폭사이드와 반응하여 카보네이트를 형성한다. 하이드록시메틸기를 포함한 에폭사이드, 글리시돌(glycidol)은 아민이 염기로 작용하여 양성자를 떼 후 이산화탄소와 직접 반응하여 고리형 카보네이트를 형성하는 반응 메커니즘을 따른다 [그림 4].

이산화탄소와 직접 반응할 수 있는 작용기와 에폭사이드를 활성화시키는 브뢴스테드산기를 함께 갖는 아미노피리딘(aminopyridine), 살렌(salen) 형태의 유기 촉매는 한 분자내에서 CO<sub>2</sub> 활성화와 에폭사이드 활성화를 동시에 진행한다. [그림 5]의 아미노피리딘에서 피리딘의 질소는 CO<sub>2</sub>와 반응하고, 아미노기는 브뢴스테드산으로 작용하여 효과적인

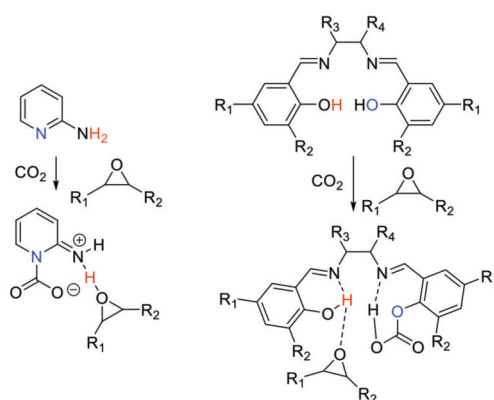


그림 5. 고리형 유기카보네이트 합성용 비할로젠 촉매 II

인 고리형 유기카보네이트를 형성한다. 유기촉매를 사용하는 대부분의 반응이 고온에서 반응을 수행해야 높은 수율을 얻을 수 있는데 아미노피리딘을 이용하는 아래 반응은 100도 이하의 온도에서 높은 수율로 카보네이트를 얻을 수 있었다. 살렌을 사용하는 경우 자유 폐놀기가 하나는 에폭사이드에 브뢴스테드산으로 작용하고, 또 다른 폐놀기는 이산화탄소와 반응하여 카보네이트 중간체를 형성한다. 분자내 동시 활성화를 통해 추가 첨가제 없이 효율적인 고리형 카보네이트를 형성할 수 있다.

## 2. 이산화탄소와 에폭사이드를 이용한 폴리카보네이트 합성

이산화탄소와 에폭사이드를 반응하여 얻어지는 폴리카보네이트는 에폭사이드의 종류에 따라 다양한 물성을 갖는다. 프로필렌옥사이드(propylene oxide, PO) 혹은 사이클

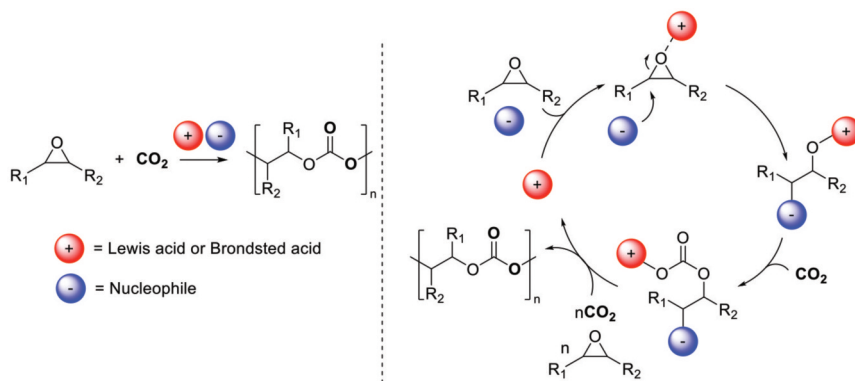


그림 6. 폴리카보네이트 합성 메커니즘

로헥센옥사이드(cyclohexene oxide, CHO)가 에폭사이드 원으로 사용되는데 범용 카보네이트인 비스페놀 A(BPA) 사용 폴리카보네이트에 비해서 낮은  $T_g$ 를 보이고 낮은 인장강도를 보이는 듯 고분자 물성면에서 극복해야 할 점들이 있다. 고분자의 물성은 분자량 및 단량체의 구조 등에 영향을 받기 때문에, 효율적인 촉매 개발을 통해 다양한 구조 및 분자량의 폴리카보네이트 생산을 위한 노력을 기울이고 있다.<sup>3</sup> 아래에는 프로필렌옥사이드와 이산화탄소의 공중합에 효율적인 전이금속 촉매와 유기 촉매에 대해서 기술한다.

최초의 CO<sub>2</sub>와 프로필렌옥사이드의 공중합 촉매는 1969년 이노우에 교수에 의해 보고되었다.<sup>10</sup> ZnEt<sub>2</sub>와 물의 혼합을 통해 보고된 최초의 CO<sub>2</sub>와 프로필렌옥사이드의 공중합 촉매를 시작으로 다양한 비균일, 균일 촉매의 개발이 진행되

었다. 폴리카보네이트 형성의 일반적인 메커니즘은 단분자 고리형카보네이트 형성 메커니즘과 매우 유사하다 [그림 6]. 루이스산 혹은 브뢴스테드산에 의해 활성화된 에폭사이드와 친핵체에 의해 고리 열림 반응이 진행되고 이산화탄소가 첨가되는 반응은 고리형 카보네이트 형성 메커니즘과 동일하다. 고리형 카보네이트 형성을 위해서는 분자내 치환 반응(back biting)을 통해 초기 첨가된 친핵체가 떨어져 나가지만, 고분자 형성 반응에서는 추가적인 CO<sub>2</sub>와 에폭사이드가 연속적으로 첨가된다. 고리형 카보네이트 형성과 고분자 형성의 차이는 이 단계에서 결정되며 촉매의 구조, 친핵체의 종류, 반응 온도(고리형 카보네이트는 고분자에 비해 고온을 선호하는 열역학적으로 안정한 생성물)에 따라 두 반응 경로가 달라지게 된다.

단분자 카보네이트 형성을 억제하고 고분자 형성을 촉진

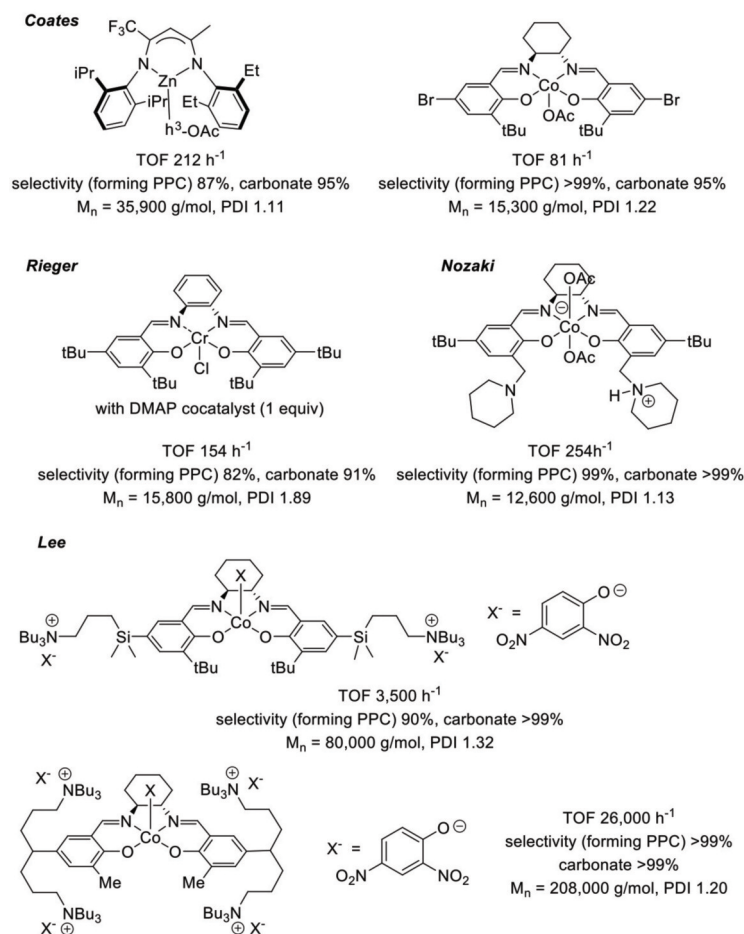


그림 7. 전이금속 기반 폴리카보네이트 합성 촉매

하는 금속기반의 균일 촉매는 Coates, Rieger, Nozaki, Lee 연구그룹에서 주로 보고해왔다[그림 7]. 에폭사이드의 종류에 따라 촉매의 반응성 또한 달라지기 때문에 에폭사이드가 사이클로헥센옥사이드 혹은 프로필렌옥사이드인 경우에 따라 각각 다른 최적 조건과 최적 촉매가 개발되어 왔다. 본 총설에서는 고분자 산업에서 유용한 프로필렌옥사이드와 CO<sub>2</sub>의 공중합에 관여하는 균일 촉매만을 다루기로 한다. Coates 그룹에서는 아연을 기반으로 한 Zn(BDI)OAc (BDI = *-diminate*, OAc = acetate) 촉매와 코발트 이온이 살렌 리간드에 배위한 Co(salcy)OAc (salcy = *N,N*-salicylidene-1,2-cyclohexanediamine) 촉매를 보고하였다[그림 7].<sup>11,12</sup> Zn(BDI)OAc 촉매는 Co(salcy)OAc에 비해서 높은 시간당 촉매 전환수(TOF) 값을 보이고, 생성된 고분자의 분자량 또한 높지만 고분자(폴리프로필렌카보네이트, PPC) 형성 과정 중 부반응 생성물인 단분자 카보네이트(프로필렌카보네이트, PC)의 비율이 더 높은 단점이 있다. Co(salcy)OAc 촉매의 경우 활성은 조금 떨어지지만 PPC에 대해서 매우 높은 선택성을 보이고 촉매의 안정도가 높아 비정제 프로필렌옥사이드를 사용 가능한 장점이 있다. 비슷한 시기에 Rieger 그룹에서 보고한 Cr(salph)Cl/DMAP(salph=*N,N*-salicylidene-1,2-phenylenediamine, DMAP=dimethylaminopyridine)의 경우 Zn(BDI)OAc 촉매와 Co(salcy)OAc 촉매의 중간 정도 활성과 82% PPC 형성의 선택도, 91% 카보네이트 첨가의 비율을 보여주고 있다.<sup>13</sup> Nozaki 그룹에서는 촉매 말단에 피페리디늄(piperidinium)기를 가지고 있는 Co(salcy) 기반 촉매를 보고하였다.<sup>14</sup> Co에 배위하고 있는 두 개의 아세테이트(acetate) 리간드는 촉매반응을 개시하며 촉매 말단의 피페리디늄 작용기는 중간에 생성되는 고분자 사슬의 음이온에 양성자를 전달하여 전파종(propagating species)이 분자내 치환반응(back-biting)을 통해 PC를 형성하는 반응을 억제할 수 있다. 따라서 이 촉매를 이용한 고분자 반응의 경우 PPC 형성의 선택도가 99%이며 촉매 활성도 Coates 그룹의 Zn(BDI)OAc에 비교할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 이후 Lee 그룹에서는 촉매 말단에 오늄(onium) 염을 도입하여 이전에 보고된 촉매 활성에 비해서 혁신적으로 향상된 촉매활성을 보고할 수 있었다. [그림 7]에 도시한 두 촉매의 구조를 비교해보면 살렌 말단에 암모늄기를

2개 도입하였을 때 보다 4개 도입하였을 때 7배 이상 촉매 활성이 향상되었고 PPC에 대한 선택도가 99% 이상 향상되었음을 알 수 있다. 고분자의 분자량 면에서도 이전의 촉매에서는 100,000 이상의 분자량은 관찰하기 어려웠으나 Lee 그룹의 촉매를 이용하여 200,000이 넘는 고분자를 형성할 수 있었다.<sup>15,16</sup> 이 기술은 2008년 SK이노베이션에 기술이전 되어, CO<sub>2</sub>활용 기술의 상용화 가능성을 보여주었다.

금속 기반의 폴리카보네이트 합성 촉매의 연구와 함께 비금속 기반의 촉매 연구 결과들이 최근 보고되고 있다. 금속 촉매의 합성과정에서 경제성이 떨어지고, 고분자 잔류 전이금속의 독성 등을 고려할 때 유기물만을 이용하는 비금속 촉매시스템 연구에 대한 수요가 증가하고 있는 것으로 생각된다. 단분자 카보네이트인 PC의 제조에 사용되는 유기 촉매 연구에 비해서 고분자인 PPC 제조에 높은 활성을 보이는 유기 촉매는 많이 보고되지는 않고 있는데, 최근 루이스산-염기 촉매인 TEB/TBACl(TEB = triethyl borane, TBACl = tetrabutyl ammonium chloride)을 사용하는 고분자 반응이 보고되었다.<sup>17</sup> 촉매의 최고 TOF 값은 49 h<sup>-1</sup> 이고, PPC 선택도는 87%, 분자량은 40,000 (PDI = 1.1) 이 보고되었다. 이후 트라이에틸 보론(TEB)과 트라이에틸 아민(TEA) 혹은 *N,N,N',N'*-테트라에틸 에틸렌다이아민(TEED)의 조합을 이용하여 촉매활성 171 g/g-cat, PPC 선택도 96%, 분자량 56,000 (PDI = 1.16)의 결과를 보고하였다. TEED를 사용하였을 때 촉매 활성이 216 g/g-cat 으로 증가하였다.<sup>18</sup>

## 결론

이산화탄소 유래 단분자 카보네이트 및 폴리카보네이트는 물질 내 이산화탄소 함유량이 40 wt % 내외로 이들 카보네이트의 대량생산을 통해 대량의 이산화탄소를 저감할 수 있는 기술이다. 특히 플라스틱 산업에서 활용도가 높은 폴리카보네이트는 다수의 연구그룹에서 상용화 가능한 고효율 촉매를 개발하여 CCUS 기술 중 가장 상업화에 가까운 기술 중의 하나로 생각된다. 상용화의 걸림돌 중의 하나인 촉매의 경제성 확보 및 비독성 촉매 개발을 통해 이산화탄소 유래 폴리카보네이트의 상용화 가능성을 높일 수



있을 것으로 생각한다. 유기화학, 무기화학, 유기금속 화학 분야의 활발한 촉매 연구를 통해서 이산화탄소 유래 카보

네이트 합성 촉매 분야의 혁신적인 발전을 기대해본다.



1. United Nations Environment Programme, Emissions Gap Report 2019, (2019) 82. <http://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019> (accessed December 19, 2019).
2. Ariane D. N. Kamkeng, Meihong Wang, Jun Hu, Wenli Du, Feng Qian "Transformation technologies for CO<sub>2</sub> utilisation: current status, challenges and future prospects." *Chem. Eng. J.* **2021**, 409, 128138.
3. Aeilke J. Kamphuis, Francesco Picchioni, Paolo P. Pescarmona "CO<sub>2</sub>-fixation into cyclic and polymeric carbonates: principles and applications." *Green Chem.* **2019**, 21, 406-448.
4. Liping Guo, Katie J. Lamb, Michael North "Recent developments in organocatalyzed transformations of epoxides and carbon dioxide into cyclic carbonates." *Green Chem.* **2021**, 23, 77-118.
5. Arjan W. Kleij "Advancing halide-free catalytic synthesis of CO<sub>2</sub>-based heterocycles." *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* **2020**, 24, 72-81.
6. Kori A. Andrea, Francesca Kerton "Triarylborane-catalyzed formation of cyclic organic carbonates and polycarbonates." *ACS Catal.* **2019**, 9, 1799-1809.
7. Jose A. Castro-Osma, Javier Martínez, Felipe de la Cruz-Martínez, Maria P. Caballero, Juan Fernández-Baeza, Julian Rodríguez-López, Antonio Otero, Agustin Lara-Sánchez, Juan Tejada "Development of hydroxy-containing imidazole organocatalysts for CO<sub>2</sub> fixation into cyclic carbonates." *Catal. Sci. Technol.* **2018**, 8, 1981-1987.
8. Hendrik Büttner, Johannes Steinbauer, Christoph Wulf, Mehmet Dindaroglu, Hans-Gunther Schmalz, Thomas Werner "Organocatalyzed synthesis of oleochemical carbonates from CO<sub>2</sub> and renewables." *ChemSusChem* **2017**, 10, 1076-1079.
9. Mirza Cokoja, Michael E. Wilhelm, Michael H. Anthofer, Wolfgang A. Herrmann, Fritz E. Kühn "Synthesis of cyclic carbonates from epoxides and carbon dioxide by using organocatalysts." *ChemSusChem* **2015**, 8, 2436-2454.
10. Shohei Inoue, Hideomi Koinuma, Teiji Tsuruta "Copolymerization of carbon dioxide and epoxide." *J. Polym. Sci., Part C: Polym. Lett.* **1969**, 7, 287-292.
11. Scott D. Allen, David R. Moore, Emil B. Lobkovsky, Geoffrey W. Coates "High-activity, single-site catalysts for the alternating copolymerization of CO<sub>2</sub> and propylene oxide." *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, 124, 14284-14285.
12. Zengquan Qin, Christophe M. Thomas, Stephen Lee, Geoffrey W. Coates "Cobalt-based complexes for the copolymerization of propylene oxide and CO<sub>2</sub>: active and selective catalysts for polycarbonate synthesis." *Angew. Chem. Int. Ed.* **2003**, 42, 5484-5487.
13. Robert Eberhardt, Markus Allmendinger, Bernhard Rieger "DMAP/Cr(III) catalyst ratio: the decisive factor for poly(propylene carbonate) formation in the coupling of CO<sub>2</sub> and propylene oxide." *Macromol. Rapid Commun.* **2003**, 24, 194-196.
14. Koji Nakano, Toshihiro Kamada, Kyoko Nozaki "Selective formation of polycarbonate over cyclic carbonate: copolymerization of epoxides with carbon dioxide catalyzed by a cobalt(III) complex with a piperidinium end-capping arm." *Angew. Chem. Int. Ed.* **2006**, 45, 7274-7277.
15. Eun Kyung Noh, Sung Jae Na, Susith S, Sang-Wook Kim, Bun Yeoul Lee "Two components in a molecule: highly efficient and thermally robust catalytic system for CO<sub>2</sub>/epoxide copolymerization." *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, 129, 8082-8083.
16. Sujith S, Jae Ki Min, Jong Eon Seong, Sung Jae Na, Bun Yeoul Lee "A highly active and recyclable catalytic system for CO<sub>2</sub>/propylene oxide copolymerization." *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, 47, 7306-7309.
17. Dongyue Zhang, Senthil K. Boopathi, Nikos Hadjichristidis, Yves Gnanou, Xiaoshuang Feng "Metal-free alternating copolymerization of CO<sub>2</sub> with epoxides: fulfilling "green" synthesis and activity." *J. Am. Chem. Soc.* **2016**, 138, 11117-11120.
18. Ying Wang, Jian-Yu Zhang, Jia-Liang Yang, Hao-Ke Zhang, Jiraya Kirirattikom, Cheng-Jian Zhang, Kai-Luo Chen, Xiao-Han Cao, Lan-Fang Hu, Xing-Hong Zhang, Ben Zhong Tang "Highly selective and productive synthesis of a carbon dioxide-based copolymer upon zwitterionic growth." *Macromolecules* **2021**, 54, 2178-2186.



장혜영 Hye-Young Jang

- 서울대학교 화학과, 학사(1994.3-1998.2)
- 서울대학교 화학과, 무기화학 석사(1998.3-2000.2, 지도교수 : 정영근)
- The University of Texas at Austin 화학과, 유기화학 박사(2001.9-2005.8, 지도교수 : Michael J. Krische)
- Caltech 박사 후 연구원(2005.9-2006.2, 지도교수 : David W. C. MacMillan)
- 아주대학교 화학과 교수(2006.3-현재)

## 탄수화물에서 바이오 연료 및 고부가가치 화합물로 전환할 수 있는 기술 개발의 연구동향

양정운 | 성균관대학교 에너지과학과, jwyang@skku.edu

### 서론

탄수화물은 단백질, 지방과 더불어 인체의 필수 3대 영양소로 불린다. 탄수화물이 체내에서 소화되면 포도당으로 분해되며, 이 중 일부는 인체의 필요 부위에 활용되거나 구성 성분으로 기여하고, 나머지 대부분은 주로 에너지원으로 이용된다. 이와 같이, 탄수화물은 식물의 광합성 과정에서 생성되는 주요한 유기물로서 인간의 생명 유지에 필수적인 영양소로만 인식돼 왔지만, 실제로는 우리의 생활과 산업에서 광범위하게 활용되고 있다. 그 중 하나는 자연에 풍부하게 존재하는 바이오매스 중 하나인 탄수화물을 이용한 바이오 연료 및 에너지원으로서의 활용이다.<sup>1-3</sup> 현재, 기후 변화와 환경오염 문제로부터 벗어나기 위해 대안적인 에너지원을 탐색하는 데 세계적인 관심이 집중되고 있다. 과거에는 유한 자원인 석유를 중심으로 한 산업 분야에서 에너지원과 화학물질을 생산해왔지만, 최근에는 바이오-리파이너리(bio-refinery)기술의 개발 및 발달로 인해 농작물 부산물, 작물 폐기물, 목재 등 다양한 식물성 자원으로 구성된 바이오매스(biomass)를 활용하여 친환경적이고 지속 가능한 바이오 연료 및 고부가가치 화합물질을 생산할 수 있게 되었다.<sup>4</sup> 이를 통해 화석연료에 의존하는 에너지 및 화학물질 공급구조를 탈피하여 탄소 중립 및 환경 보호에 기여할 수 있는 바이오 기반의 생산 방식으로서의 전환 가능성이 열리게 되었다.

본 총설에서는 인류의 생존과 미래세대의 지속 가능성과 밀접히 연관된 바이오 연료, 생분해성 소재 및 정밀화학 원료로 활용되는 고부가가치 화합물이 어떤 탄수화물의 화학

적 변환(chemical transformation)을 통해 생산되는지에 대한 전략과 동시에 이에 내재된 잠재력에 대해 소개하고자 한다.

### 본론

본론에서는 바이오-리파이너리 기술을 통해 탄수화물로부터 파생된 퍼퓨랄(furfural) 계열, 레블린산(levulinic acid), 그리고 젖산(lactic acid)과 같은 물질을 다양한 용도로 활용되는 바이오 연료, 친환경적 생분해성 소재, 그리고 다목적 정밀화학 물질로 전환할 수 있는 합성법에 대해 기술하고자 한다.

#### 1. 퍼퓨랄(furfural) 계열 물질의 합성 및 응용

5-하이드록시메틸퍼퓨랄(5-hydroxymethyl furfural, HMF)는 각종 플라스틱의 단량체, 합성 섬유(폴리에스터, 폴리우레탄, 폴리아마이드), 수지 및 용매 그리고 차세대 퓨란계 연료의 핵심 중간체로서, 석유화학 대체 플랫폼 화합물로 사용된다.<sup>5</sup> 이는 목질계 바이오매스(lignocellulosic biomass)의 주성분인 셀룰로오스 또는 이의 탈고분자화 반응(depolymerization)을 통해 얻어진 당당류에서 출발하여, 금속 또는 산 촉매를 사용하여 합성할 수 있다 [그림 1]. 합성된 HMF는 석유 플라스틱의 대명사인 폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethyleneterephthalate, PET)의 대체품인 생분해성 바이오 플라스틱 “폴리에틸렌 퓨라노에이트(polyethylene furanoate, PEF)”의 원료인

2,5-퓨란다이카복실산(2,5-furandicarboxylic acid, FDCA)를 주로 전이금속(Au, Pt, Pd, Ru 그리고 Ti)과 산소를 산화제로 한 조합<sup>6,7</sup> 또는 전이금속촉매를 배제한 조건<sup>8</sup>을 통해 합성할 수 있다[그림 2].

바이오매스 유래 FDCA를 사용하여 제조한 생분해성 PEF는 석유기반의 PET 플라스틱과 비교했을 때 다음과 같은 측면에서 우수한 특성을 지닌다.<sup>9,10</sup>

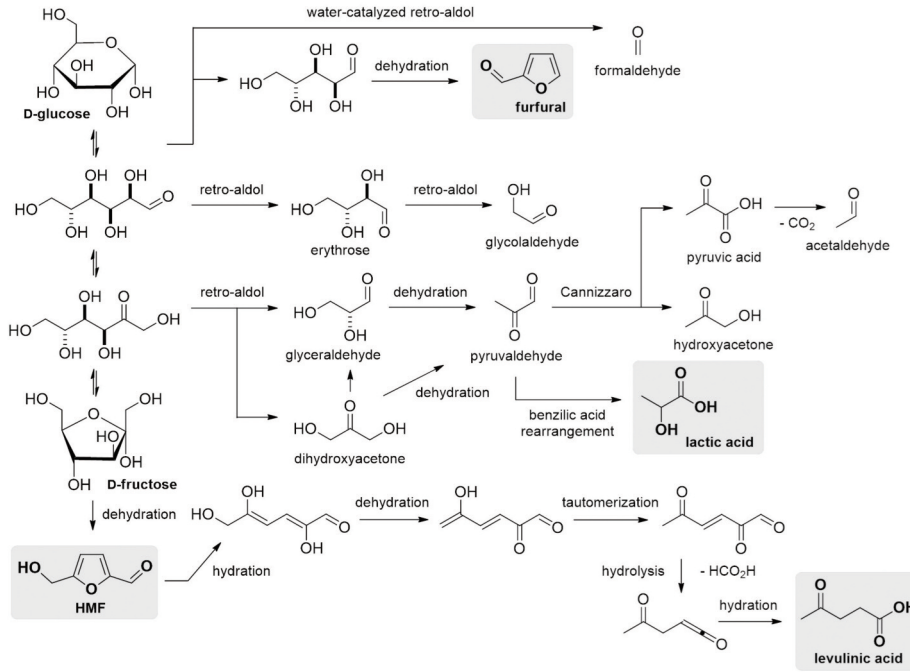


그림 1. 탄수화물에서 유래된 바이오 기반 화합물질들<sup>11-16</sup>

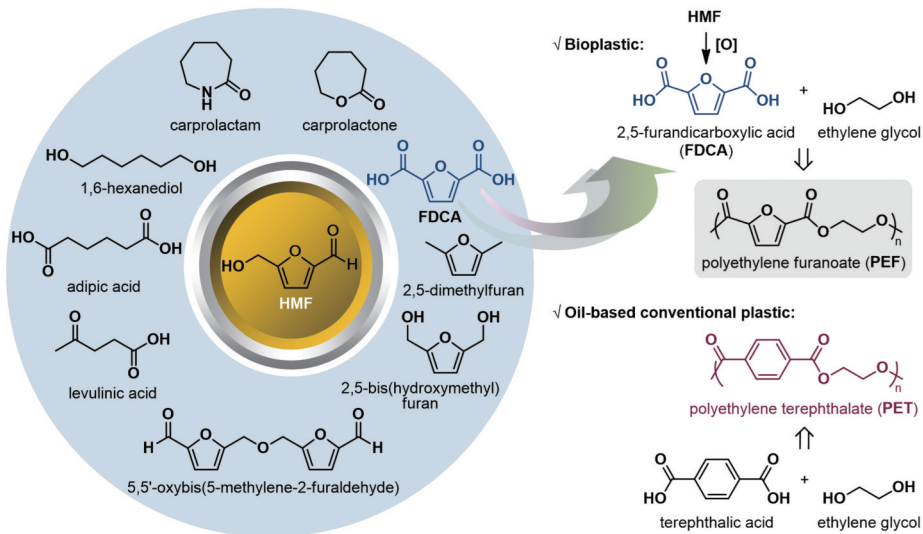


그림 2. 다양한 5-하이드록시메틸퍼푸랄의 응용(2,5-퓨란다이카복실산 및 폴리에틸렌퓨라노에이트 제법 포함)<sup>17</sup>

- 우수한 생분해성: PEF는 퓨라노에이트 (furanate) 단위를 포함하고 있어 PET보다 자연적인 생분해과정에서 더 빠르게 분해될 수 있는 높은 생분해성을 가지고 있다.
- 높은 열적 안정성: PEF (Tg: 86 °C)는 PET (Tg: 74 °C)보다 더 높은 유리전이온도(glass transition temperature, Tg)를 가지고 있다. 이는 PEF가 PET보다 더 높은 열 안정성을 가지며, 고온에서도 안정한 형태를 유지할 수 있다는 것을 의미한다.
- 우수한 가스 차폐 능력: PEF의 산소, 이산화탄소, 수증기 차단성은 PET 대비하여 각각 10, 4, 2배 우수하다. 보다 구체적인 예로 PEF는 PET보다 더 낮은 산소 투과도 (PEF: 1.4299 g/cc, PET: 1.3346)를 가지고 있으므로, PEF를 식품 포장재에 사용될 경우 PET보다 산소의 침투를 최소화할 수 있어 식품의 신선도 유지에 더 효과적이다.

또한, 퓨란계 화합물인 5-하이드록시메틸퍼퓨랄과 퍼퓨랄은 바이오연료 생산에 주요한 성분으로 활용되고 있다. 예를 들어, 비석유계의 재생 가능한 화학원료인 퍼퓨랄은 아세톤과의 알돌 축합반응을 통해 불포화 카보닐 화합물을 생성한 후, 수소화반응, 수소화분해반응, 탈수반응 등의 과정을 거쳐 액상의 C13-알케인(alkane)을 얻을 수 있다.<sup>18</sup>

그리고, 5-하이드록시메틸퍼퓨랄은 아세톤 간의 알돌반응을 통해 알돌 생성물을 얻은 후, 일련의 수소화반응, 수소화분해반응, 탈수반응을 통해 원하는 C9-알케인을 얻을 수 있을 뿐만 아니라,<sup>19</sup> 2-메틸퓨란간의 다이하이드록시화반응, 알킬화 반응 등을 거쳐 연이어 수소화-탈수반응을 통해 C16-알케인을 합성할 수 있다.<sup>20</sup> 또한, N-헤테로고리 카벤(N-heterocyclic carbene, NHC)을 유기 촉매로 사용하여 5-하이드록시메틸퍼퓨랄 두 분자 간의 벤조인 축합반응을 진행한 후, 일련의 수소화 반응, 수소화분해반응, 탈수반응 등의 과정을 거쳐 액상의 C12-알케인을 얻을 수 있다.<sup>21</sup> 이러한 방식으로 얻어낸 액상 탄화수소 물질은 알케인 제트/케로신 연료(alkane jet/kerosene fuels)로 사용되며, 특히 이 바이오 연료는 식물성 폐기물, 작물, 목재 등의 재생 가능한 자원으로부터 생산할 수 있어 환경오염을 최소화하고 지속 가능한 에너지원으로 활용되고 있다 [그림 3].

## 2. 레블린산 (levulinic acid) 계열 물질의 합성 및 응용

레블린산은 기초 화학분야부터 정밀·제약 산업까지 다양한 산업분야에서 핵심적인 빌딩블록으로서 지속적으로 사용되어 왔으며, 미래에 중요한 물질로 인정받아 2004년 미국 에너지부에서 발표한 12개의 핵심 물질 중 하나로 선정

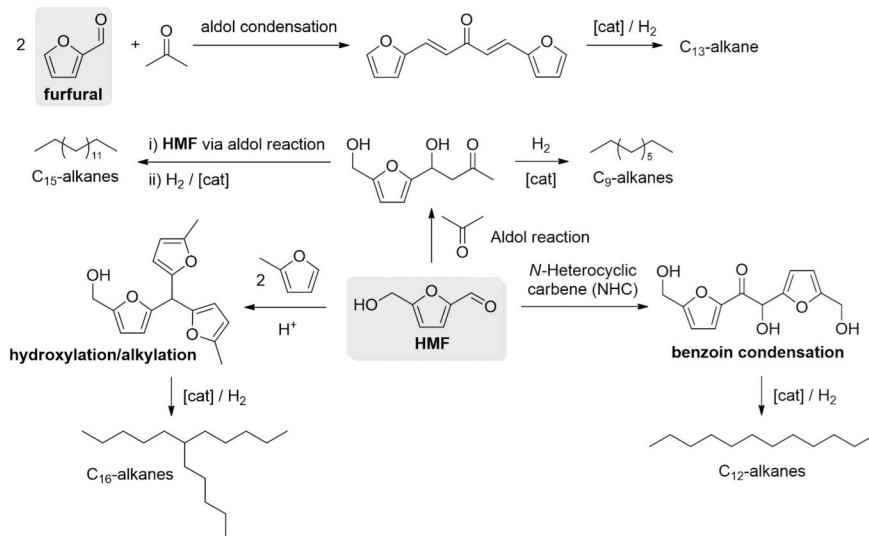


그림 3. 5-하이드록시메틸퍼퓨랄을 알케인 제트/케로신 연료로의 업그레이드 과정

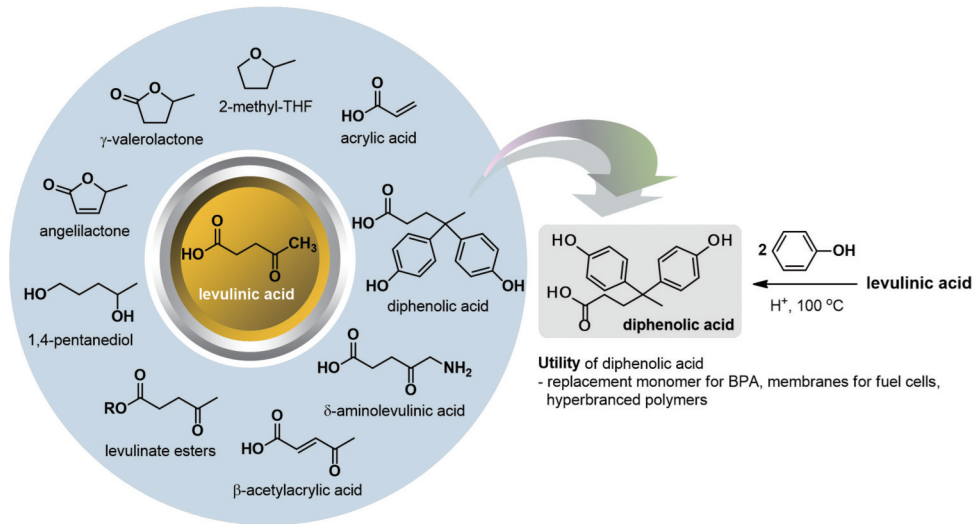


그림 4. 다양한 레블린산의 응용<sup>23</sup>

되었다.

차세대 에너지원으로서의 활용 가능성이 높은 레블린산은 [그림 1]에서 기술한 바와 같이 육탄당에서 출발하여 HMF를 거쳐 다양한 화학변환법(수화반응, 탈수반응, 토토머화반응, 가수분해)을 통해 합성할 수 있으며, 그 활용범위는 다음과 같다[그림 4].

- 화학 산업: 레블린산은 다른 화학 물질로 변환되어 폴리머, 용제, 표면활성제, 용매 등 다양한 화학물질의 생산에 사용되며, 이를 통해 플라스틱, 수지, 페인트, 향료 등의 다양한 제품을 생산할 수 있다. 특히, 레블린산과 두 분자의 페놀과의 반응을 통해 얻을 수 있는 다이페놀산(diphenolic acid)은 비스페놀-A(bisphenol-A, BPA)의 골격을 포함하고 있기 때문에 비스페놀-A 대체물로 사용되어 신규 폴리에스터와 폴리카보네이트 합성 시 유용하게 사용된다.<sup>22</sup>
- 연료 산업: 화학적인 변환 과정을 통해 레블린산은  $\gamma$ -발레롤락톤( $\gamma$ -valerolactone)과 같은 중간체로 변환될 수 있으며, 이 중간체는 다양한 연료 [특히 바이오 기반 디젤 연료와 알켄(2-뷰텐) 제트 연료]로 활용할 수 있다.

### 3. 젖산 (lactic acid, LA)의 응용

젖산은 [그림 1]에서 기술한 바와 같이 화학적 변환 또는 미생물의 작용에 의한 발효과정을 통해 합성할 수 있는 물질로, 생분해성 속성을 가지고 있으므로 친환경적 소재인 폴리젖산(또는 폴리락트산) [poly(lactic acid), PLA]의 단량체로 사용된다. 젖산을 활용한 폴리락트산은 생분해성 물질로 의약품 재료(생체흡수성 의료 임플란트 및 봉합사)나 필름, 화장품에 많이 응용되고 있다.<sup>24</sup> 광범위하게 사용되는 폴리락트산의 제법과 분자량 개선법에 관한 내용은 다음과 같다[그림 5].<sup>25</sup> 폴리락트산은 중축합(polycondensation), 고리개환중합(ring-opening polymerization, ROP) 또는 공비 탈수축합(azeotropic dehydrative condensation)와 같은 직접 공정 등 다양한 접근법을 통해 합성할 수 있다. 이 중 중축합은 가장 저렴한 공정법에 해당되지만 저분자량의 폴리락트산을 얻을 수밖에 없는 단점을 지니고 있다. 높은 분자량을 갖는 폴리락트산을 획득하기 위해서는 공비 탈수축합 또는 저분자의 폴리락트산을 탈고 분자화반응을 통해 락타이드(lactide) 분자로 변환 후 고리개환중합법이 필요로 한다.

폴리락트산은 석유기반 플라스틱을 대체할 수 있는 유망한 후보로 간주되어져 왔지만 다음과 같은 단점을 내포하고 있다.<sup>26-28</sup> i) 비교적 낮은 유리 전이 온도(일반적으로

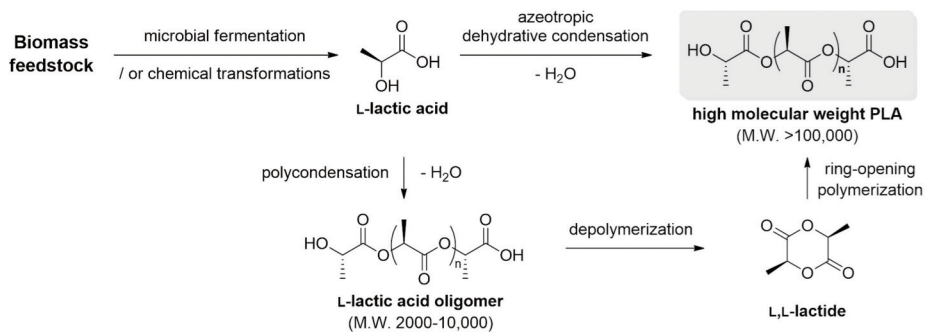


그림 5. 폴리락트산 제법과 분자량 개선법

43~63 ℃)로 인해 고온 응용 분야에 제한적이다. ii) 충격에 약하고 열과 습기, 가스에 대한 내구성과 차단성이 떨어지는 특성이 있으며, 생분해되는 조건 이외의 환경에서는 분해속도가 다소 낮다.

이러한 단점을 극복하기 위한 해결책 중 하나로 타 고분자와의 블렌딩을 통한 폴리락트산 기반 복합소재 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다.<sup>29</sup> 예를 들어, 생분해성 고분자인 폴리카프로락톤[poly( $\epsilon$ -caprolactone), PCL],<sup>30</sup> 폴리 뷰틸렌 아디페이트 테레프탈레이트[poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT]<sup>31</sup>와 고분자 블렌딩을 통해 생분해성 특성을 유지하면서도 강도나 열 안정성 등의 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 비분해성 열가소성 수지인 아크릴로니트릴-부타다이엔-스타이렌 삼원공중합체 수지(acrylonitrile butadiene styrene copolymer, ABS resin),<sup>32</sup> 또는 폴리옥시메틸렌(polyoxymethylene, POM)<sup>33</sup>과의 블렌딩은 서로 다른 특성을 가진 고분자의 성능을 결합하여 다양한 응용 분야에 활용할 수 있다.

이와 같은 타 고분자와의 블렌딩 기술은 다양한 고분자의 장점을 결합하여 원하는 특성을 조절할 수 있으며, 다양한 응용 분야에서 사용될 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

## 결론

탄수화물은 단순히 인간의 생존에 필요한 3대 영양소 역할을 넘어, 환경오염과 기후변화로 인해 대두되는 사회적 문제를 해결하기 위한 중요한 청정/대체 에너지원으로 인식되고 있다. 본 총설의 본문에서 소개한 바와 같이, 바이오리파이너리 기술을 기반으로 한 탄수화물의 바이오매스 전환법(biomass conversion)은 바이오 연료, 생분해성 소재, 그리고 고부가가치의 화학물질로의 전환을 가능하게 만든다. 바이오매스 전환법을 통해 생산되는 바이오 연료는 화석연료에 비해 훨씬 적은 온실가스를 배출시킴으로써 환경오염을 감소시킬 수 있다. 이러한 특성은 에너지 생산과 사용의 지속 가능성을 보장하며, 기후변화와 관련된 환경 문제를 해결하는 데에 기여할 수 있을 것이다. 게다가, 바이오매스 전환법을 통해 개발된 생분해성 소재는 일회용 난분해성 플라스틱 사용량을 감소시키고, 자연적으로 분해되므로 지속 가능한 자원 활용과 환경 보호를 동시에 실현할 수 있을 것이다. 이러한 바이오매스 관련 연구와 혁신은 환경을 우선으로 고려하며, 인류의 지속 가능한 에너지 및 자원 공급에 중요한 교두보 역할을 할 것으로 기대된다.



- Schmidt, L. D., Dauenhauer, P. J. "Hybride routes to biofuels." *Nature* **2007**, 1447, 914.
- Kamm, B. "Production of platform chemicals and synthesis gas from biomass." *Angew. Chem. Int. Ed.* **2007**, 46, 5056.
- Hoang, A. T., Pandey, A., Huang, Z., Luque, R., Ng, K. H., Papadopoulos, A. M., Chen, W.-H., Rajamohan, S., Hadiyanto, H., Nguyen, X. P., Pham, V. V. "Catalyst-based synthesis of 2,5-dimethylfuran from carbohydrates as a sus-

tainable biofuel production route." *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2022**, 10, 3079.

- Goswami, L., Kayalvizhi, R., Dikshit, P. K., Sherpa, K. C., Roy, S., Kushwaha, A., Kim, B. S., Banerjee, R., Jacob, S., Rajak, R. C. "A critical review on prospects of bio-refinery products from second and third generation biomasses." *Chem. Eng. J.* **2022**, 448, 137677.
- James, O. O., Maity, S., Usman, L. A., Ajanaku, K. O., Ajani, O. O., Siyanbola,

- T. O., Sahu, S., Chaubey, R. "Towards the conversion of carbohydrate biomass feedstocks to biofuels via hydroxymethylfurfural." *Energy Environ. Sci.* **2010**, *13*, 1833.
6. Zhang, Z., Deng, K. "Recent advances in the catalytic synthesis of 2,5-furandicarboxylic acid and its derivatives." *ACS Catal.* **2015**, *5*, 6529.
7. Aranha, D. J., Gogate, P. R. "A review on green and efficient synthesis of 5-hydroxymethylfurfural (HMF) and 2,5-furandicarboxylic acid (FDCA) from sustainable biomass." *Ind. Eng. Chem. Res.* **2023**, *62*, 3053.
8. Lee, T. W., Lee, W. J., Kim, Y. S., Do, T., Choi, J.-E., Han, Y. K., Oh, C., Lee, C.-W., Yum, E. K., Yang, J. W. "Transition-metal-free upscaling of 2,5-furandicarboxylic acid synthesis and investigation of the reaction mechanism." *Chem. Eur. J.* **2023**, *29*, e202300903.
9. Poullopoulou, N., Kasmi, N., Bikiaris, D. N., Papageorgiou, D. G., Floudas, G., Papageorgiou, G. Z. "Sustainable polymers from renewable resources: Polymer blends of furan-based polyesters." *Macromol. Mater. Eng.* **2018**, *303*, 1800153.
10. Alaerts, L., Augustinus, M., Van Acker, K. "Impact of bio-based plastics on current recycling of plastics." *Sustainability* **2018**, *10*, 1487.
11. Goto, K., Tajima, K., Sasaki, M., Adschiri, T., Arai, K. "Reaction mechanism of sugar derivatives in subcritical and supercritical water." *Kobunshi Ronbunshu* **2001**, *58*, 685.
12. Antal, M. J., Mok, W. S. L., Richards, G. N. "Mechanism of formation of 5-(hydroxymethyl)-2-furaldehyde from D-fructose and sucrose." *Carbohydr. Res.* **1990**, *199*, 91.
13. Aida, T. M., Sato, Y., Watanabe, M., Tajima, K., Nonaka, T., Hattori, H., Arai, K. "Dehydration of D-glucose in high temperature water at pressures up to 80 MPa." *J. Supercrit. Fluids* **2007**, *40*, 381.
14. Antal, M. J., Mok, W. S. L., Richards, G. N. "Four-carbon model compounds for the reactions of sugars in water at high-temperature." *Carbohydr. Res.* **1990**, *199*, 111.
15. Luijckx, G. C. A., Vanrantwijk, F., Vanbekkum, H. "Hydrothermal formation of 1,2,4-benzenetriol from 5-hydroxymethyl-2-furaldehyde and D-fructose." *Carbohydr. Res.* **1993**, *242*, 131.
16. Kabyemela, B. M., Adschiri, T., Malaluan, R. M., Arai, K. "Glucose and fructose decomposition in subcritical and supercritical water: detailed reaction pathway, mechanisms, and kinetics." *Ind. Eng. Chem. Res.* **1999**, *38*, 2888.
17. Pumrod, S., Kaewchada, A., Roddecha, S., Jaree, A. "5-HMF production from glucose using ion exchange resin and alumina as a dual catalyst in a biphasic system." *RSC Adv.* **2020**, *10*, 9492.
18. Faba, L., Diza, E., Ordóñez, S. "Aqueous-phase furfural-acetone aldol condensation over basic mixed oxides." *Appl. Catal. B: Environ.* **2012**, *113-114*, 201.
19. Huber, G. W., Chheda, J. N., Barrett, C. J., Dumesic, J. A. "Production of liquid alkanes by aqueous-phase processing of biomass-derived carbohydrates." *Science* **2005**, *308*, 1446.
20. Corma, A., Torre, O., Renz, M., Villandier, N. "Production of high-quality diesel from biomass waste products." *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 2375.
21. Liu, D., Chen, E. Y.-X. "Diesel and alkane fuels from biomass by organocatalysis and metal-acid tandem catalysis." *ChemSusChem* **2013**, *6*, 2236.
22. Isoda, Y., Azuma, M. Preparation of bis(hydroxyaryl)pentanoic acids. Japanese patent 08053390 to Honshu Chemical Ind., 1996.
23. Mota, C. J. A., de Lima, A. L., Fernandes, D. R., Pinto, B. P. "Levulinic acid: a sustainable platform chemical for value-added products." 1st Ed. John Wiley & Sons, United States, 2022.
24. Swetha, T. A., Bora, A., Mohanrasu, K., Balaji, P., Raja, R., Ponnuchamy, K., Muthusamy, G., Arun, A. "A comprehensive review on polylactic acid (PLA)-Synthesis, processing and application in food packaging." *Int. J. Biol. Macromol.* **2023**, *234*, 123715.
25. Auras, R., Harte, B., Selke, S. "An overview of polylactides as packaging materials." *Macromol. Biosci.* **2004**, *4*, 835.
26. Martin, O., Avérous, L. "Poly(lactic acid): plasticization and properties of biodegradable multiphase systems." *Polymer* **2001**, *42*, 6209.
27. Corre, Y. M., Maazouz, A., Duchet, J., Reignier, J. "Batch foaming of chain extended PLA with supercritical CO<sub>2</sub>: Influence of the rheological properties and the process parameters on the cellular structure." *J. Supercrit. Fluids* **2011**, *58*, 177.
28. Gandini, A. "Polymers from renewable resources: a challenge for the future of macromolecular materials." *Macromolecules* **2008**, *41*, 9491.
29. Nagarajan, V., Mohanty, A. K., Misra, M. "Perspective on polylactic acid (PLA) based sustainable materials for durable applications: focus on toughness and heat resistance." *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2016**, *4*, 2899.
30. Simões, C. L., Viana, J. C., Cunha, A. M. "Mechanical properties of poly(ε-caprolactone) and poly(lactic acid) blends." *J. Appl. Polym.* **2009**, *112*, 345.
31. Ding, Y., Lu, B., Wang, P., Wang, G., Ji, J. "PLA-PBAT-PLA tri-block copolymers: effective compatibilizers for promotion of the mechanical and rheological properties of PLA/PBAT blends." *Polym. Degrad. Stab.* **2018**, *147*, 41.
32. Choe, I.-J., Lee, J. H., Yu, J. H., Yoon, J.-S. "Mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer/poly(L-lactic acid) blends and their composites." *J. Appl. Polym. Sci.* **2014**, *131*, 11.
33. Guo, X., Zhang, J., Huang, J. "Poly(lactic acid)/polyoxymethylene blends: morphology, crystallization, rheology, and thermal mechanical properties." *Polymer* **2015**, *69*, 103.



양 정운 Jung Woon Yang

- 한국외국어대학교 화학과/신문방송학과, 학사(1991.3-1995.2)
- 한국과학기술연구원 응용과학부/한국외국어대학교 화학과, 석사(1995.2-1997.8, 지도교수 : 송충의/하현준)
- 한국과학기술연구원 생체과학연구부/고려대학교 화학과, 박사(1999.9-2003.8, 지도교수 : 송충의/한호규)
- 독일 막스 플랑크 석탄연구소 (Max-Planck-Institut für Kohlenforschung) 박사 후 연구원/상임연구원/그룹리더 (2003.9-2009.1, 지도교수: Benjamin List)
- 성균관대학교 에너지과학과 조/부/정교수(2009.2-현재)

## 전기화학적 이산화탄소 활용을 위한 탄소 기반 촉매 소재의 기회

윤혜원, 유수환, 황윤정\* | 서울대학교 화학부, yjhwang1@snu.ac.kr

### 서론

산업의 발달과 인구의 증가로 인해 화석 연료 기반의 에너지 사용은 증가하였고, 이는 현대의 경제 성장을 이루는 원동력이 되었지만 동시에 기후 변화를 일으키는 원인이 되었다. 이산화탄소를 비롯한 온실 가스가 지속적으로 공기 중으로 배출될 경우 2050년까지 지구의 온도는 2 °C 가량 증가할 것으로 예측되며, 이로 인한 해수면의 상승, 생태계의 변화, 이상 기후의 빈번한 출몰은 인류를 위협하고 있다. 세계 각국이 경제 성장에 타격을 감수하면서도 시급히 이산화탄소 배출 저감을 위해 노력하는 이유이다. 전 세계는 2050년까지 탄소 배출을 없애는 탄소 중립사회를 목표로 하지만, 현재의 과학 기술 수준은 그 해답을 제공하지 못하고 있다. 우리 나라는 특히 제조업 중심의 국가로 빠르게 경제 성장을 이루면서, 이산화탄소의 배출량이 꾸준히 늘고 있다. 또한, 미국 및 유럽의 다른 국가에 비해서 탄소 저감의 의무가 뒤늦게 대두되면서, 이를 위한 대비가 뒤쳐져 있어, 최근 정부 및 각 산업 기관에서 기술 확보를 위해 적극적으로 노력하고 있다. 탄소 중립 사회 실현을 위해서 효율적인 에너지 사용 뿐만 아니라 재생 에너지 기반의 에너지 소비 기술이 중요하게 개발되고 있다. 동시에, 지속가능한 탄소 순환 기술을 확보하기 위해서 이산화탄소를 직접 전환하여 활용하는 기술 개발이 필요하나, 산업화를 위해서는 앞으로 해결해야 할 과제들이 남아 있다.

전기화학적 이산화탄소 전환 기술은 상온에서의 전환반응이 가능하기 때문에, 불연속 운전이 용이하여 신재생 발전 에너지원과 연계 면에서 장점을 가진다. 또한, 이산화탄소 환원 시에 필요한 수소를 물에서 직접 가져올 수 있기 때문에, H<sub>2</sub> 기체 생산을 위해 별도의 공정이 필요하지 않는다는 장점을 가지고 있다. 이산화탄소와 물분자를 반응물로 하여 유용한 화합물을 합성하고, 부산물로는 산소를 발생시키므로 친환경 기술로 각광을 받고 있다. 한편, 전기화학적 촉매 반응은 전극과 전해질 계면에서의 전기이중층이 형성되어, 기상의 촉매 반응과는 다른 특성을 보여 최근 이를 이해하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 전기화학적 이산화탄소 전환 반응은 여러 경쟁 반응이 있으며, 전해질의 이온 분포가 반응 경로의 선택성에 영향을 준다. 따라서, 촉매 소재뿐만 아니라 전해질 계면에서의 특성을 같이 이해하는 모델 반응으로 중요하게 연구되고 있다. 1980년대 전기화학적 이산화탄소 전환을 통해 일산화탄소, 개미산, 에틸렌, 메탄, 에탄올 등과 같은 유용한 화합물이 합성될 수 있다는 것이 보고된 이래 주춤했던 촉매 기술은, 2010년대 이후 다양한 촉매 소재가 개발되면서 전환 반응의 선택성 및 전류 효율(패러데이 효율, Faradaic efficiency)이 급격히 증가하였다.<sup>1</sup> 그럼에도 불구하고, 수용액 상의 낮은 용해도는 물질 전달의 한계(mass transfer limit)를 야기시켜, 높은 이산화탄소 전환 속도(reaction rate)를 달성하는데 걸림돌이 되어왔다. 그러나, 최근 10년간의 연구에서



기체확산층(gas diffusion electrode, GDE) 기반 전기화학 반응기 기술의 발전은 전환 속도를 10~100배가량 향상시키면서, 산업적으로도 기술 경제성을 갖출 수 있을 것으로 전망되고 있다.<sup>2</sup> 소재 합성 및 분석 기술, 연료전지 및 수전해전지와 같은 전기화학 반응기 기반 기술의 발전에 힘입어 전기화학적 이산화탄소 활용 기술도 새로운 전기를 맞이하고 있다. 금속 및 금속 산화물 기반의 전도성을 가지는 소재가 전통적으로 전기화학 촉매 소재로 활용되어 왔으나, 최근에는 탄소 기반의 소재들도 금속기반의 촉매와는 다른 특성을 가지며 촉매 활성을 제어할 수 있다고 보고되고 있다. 특히 전이 금속 및 질소를 도입한 탄소 소재들은 기존의 전이 금속 촉매와 견주어서도 높은 활성을 가질 수 있어 많은 주목을 받고 있다. 본 총설에서는 금속 및 질소를 도입한 탄소 소재들이 전기화학적 이산화탄소 전환에 사용된 최신 연구 및 유망성에 대해서 소개하고자 한다.

## 본 론

### 1. 불균일 촉매 전극에서의 전기화학적 이산화탄소 환원 반응성

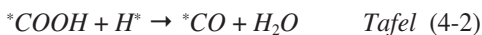
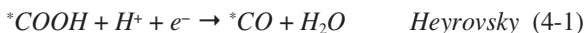
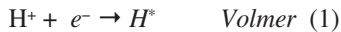
이산화탄소는 여러가지 탄소 화합물을 연소하여 생성되는 열역학적으로 매우 안정한 분자이다. 따라서, 기체의 이산화탄소를 환원하기 위해서는 높은 활성화 에너지가 필요하며, 환원 반응을 통해서는 여러가지 화합물이 경쟁적으로 생성될 수 있다. 전기화학적 환원 반응에서는 과전압을 제공하여 반응성을 조절하게 되며, 다전자 환원 반응으로 여러 단계를 거쳐 CO, HCOOH (HCOO<sup>-</sup>), CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 등의 화합물을 대표적으로 생성할 수 있다. 이중에 CO와 HCOOH는 2전자 환원 반응의 생성물로 다른 생성물에 비해 상대적으로 높은 패러데이 효율과 높은 에너지 전환 효율을 보이며, 전기화학적 이산화탄소 전환 시스템의 대량화(scale-up) 모델로 연구되고 있다.<sup>2</sup> 탄화수소 화합물 합성은 2전자 이상의 환원 반응으로, 반응 경로는 복잡하며 반응성을 이해하는 주요 인자의 연구가 아직 부족하다. 주요 금속 촉매의 반응성은 실험 및 계산화학을 기반으로 기본 기술 인자(descriptor)가 제시되어 촉매 디자인에 지침이 되고 있다. 다만 전기화학적 이산화탄소 환원 반응은 촉매 자체의 특성 이외에 촉매 다공성, 물질 전달,

소수성, 반응기 구조 및 운전 조건 등 환경적인 인자에 의해서도 영향을 크게 받는다. 특히, 촉매 반응 중에는 전해질과의 계면에서 이산화탄소, 양성자 및 수산화 이온, 양이온 등 반응과 관련된 물질의 농도 기울기가 생기고 경쟁 반응 간의 선택도에 영향을 끼친다.

전기화학적 이산화탄소 환원 반응의 제안된 메커니즘은 전자 하나가 촉매로부터 전달되어 CO<sub>2</sub><sup>-•</sup> 중간체를 형성하면서 반응이 개시된다. 이 과정에서 선형의 대칭적인 이산화탄소 분자의 결합은 구부러지고, 쌍극자 모멘트가 생기는데 이는 높은 활성화 에너지가 필요하다. 반응의 중간체는 전극 촉매 표면에 흡착될 때, 촉매에 따라 \*C 또는 \*O로 흡착되는 구조의 선호도가 달라질 수 있으며, 반응의 과전압 및 주 반응 경로를 결정짓는다. 추후 이어지는 환원반응에서 C-O 결합이 깨어지면서 CO를 생성하거나, 탄소원자에 수소화(hydrogenation)가 되면서 HCOO<sup>-</sup>를 생성한다. 대표적으로, Au, Ag, Zn와 같은 금속 촉매 소재는 CO를 생성하고, Sn, In, Bi과 같이 산소의 흡착이 선호되는 p-block 금속 촉매 소재는 HCOOH를 생성한다. 또한, \*CO의 흡착 에너지가 적당한 세기를 가지는 Cu는 CO가 추가적으로 환원되어 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 등을 생성할 수 있다.

한편, 전기화학적 이산화탄소 환원반응은 주로 물을 수소의 공급원으로 사용하기 때문에, 수용액 전해질에서 전기화학 반응으로 인하여 수소발생반응(hydrogen evolution reaction, HER)이 주요 경쟁반응이 되고, 이러한 수소생성반응을 억제하는 것이 이산화탄소의 환원 성능을 높이는 주요한 전략이 된다. 따라서, 두 반응의 반응성 및 반응 경로를 모두 고려하는 것이 필요하다. 수소발생반응에 대해서 대표적으로 볼머-헤이로프스키(Volmer-Heyrovsky)나 볼머-타펠(Volmer-Tafel) 메커니즘이 제안되었다. 두번째 양성자의 환원 반응이 표면과 전해질 사이의 반응인지, 혹은 표면에 흡착된 중간체 사이의 결합 반응인지에 따라 나뉜다.<sup>3</sup> 유사하게 이산화탄소 환원 반응도 \*COOH가 생성된 이후에 \*CO를 생성하는 환원 반응에 두 가지 경우를 고려할 수 있다. 전통적으로 높은 촉매 활성을 보인 Pt과 같은 귀금속 촉매는 수소발생반응이 압도적으로 일어나서 이산화탄소 환원 촉매로는 거의 활용되지 못한다. 또한, 금속 기반 촉매 표면에 흡착 세기는 d-band 위치에 영향을 받아, \*H 와 \*COOH 흡착 세기에는 강한 상관관계(scaling

relationship)을 가지고 있다. 이 때문에, 이산화탄소 환원 성능을 높이기 위한 촉매의 디자인은 자주 수소발생반응을 촉진시키는 역효과를 보여 소재 개발에 어려움이 있다. 이에, 수소의 발생 반응은 억제하면서 이산화탄소 환원 반응을 선택적으로 향상시키기 위해서 수전해 촉매와는 차별되는 새로운 촉매 소재 개발 전략이 필요하다.



## 2. 금속 및 질소가 도핑된 탄소 기반 촉매의 이산화탄소 환원 반응성

전기화학적 이산화탄소 환원반응의 주생성물은 촉매의 구조나 형상 보다는 원소의 종류에 따라서 결정되는 것이 일반적이다. 이러한 특성은 고체 전극 촉매 표면에서의 사바티에(Sabatier) 원리에 근거하여 예측될 수 있다. 촉매 표면에 흡착하는 중간체의 적당한 안정화 에너지가 선호하는 반응 경로를 결정짓기 때문이다. 최근의 이산화탄소 환원 촉매는 단일 원소의 촉매 소재에서 벗어나 다른 종류의 원소를 조합한 합금 촉매로 성능 향상을 시도하고 있다. 또한, 질소가 도핑된 탄소 소재(N-C)는 금속 촉매와는 달리  $*COOH$ 와  $*CO$ 의 흡착 세기가 따로 제어될 수 있어, 이산화탄소 환원 반응에서 선택적 활성 제어에 유리할 것으로 제안되었다.<sup>4</sup> 뿐만 아니라, 금속 원자는 질소에 의해서 안정화되고,  $MN_x$ 는 이산화탄소 환원 촉매 반응의 활성자리가 될 수 있다. 질소가 도핑된 탄소 구조체에 금속 원자가 분산된 (M-N-C) 촉매들은 최근 다양한 전기 촉매로 활용되고 있으며, 금속이 원자 단위로 분포되어 원자의 사용을 극대화한다는 장점이 있다. M-N-C 촉매는 금속이 없는 N-C에 비해서, 전기화학적 이산화탄소 환원 반응에서 높은 전환 속도를 가진다. 또한, 도입된 금속 원소의 종류에 따라 이산화탄소 전환 생성물로 CO, HCOOH, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 등이 가능하다. 전이금속이 도입된 경우에는 대체로 CO를

생성하며, 일부 금속(Mo, In, Sn)의 경우에는 HCOOH를, Cu의 경우에는 CO, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 등 여러 화합물을 생성할 수 있는 것이 보고된 바 있다. 한편, CH<sub>3</sub>OH의 전기화학적 합성은 다른 생성물과는 별도의 반응 경로를 가지며, 이는 매우 도전적인 과제로 인식되고 있다. Wang 그룹은 Cobalt phthalocyanine이 CNT에 고정되고 주변에 아미노 그룹을 도입한 Co-N-C 구조의 촉매에서 전자 구조가 변하여, 다른 CoPc 촉매와는 달리 CH<sub>3</sub>OH가 생성될 수 있음을 특징적으로 보고 하였다.<sup>5</sup> 또한, 이론적 계산 연구에 따르면, 특정 결합 구조를 가지는 Pt-N-C 촉매는 전기화학적 이산화탄소 환원 반응으로부터 CH<sub>3</sub>OH 합성이 가능하다고 제안되었다.<sup>6</sup> 이렇듯이 M-N-C 촉매는 중심 금속 원자, 원자 주변의 결합 및 결합 구조, 작용기의 도입, 이중 원소 도핑 등을 다양한 전략으로 금속 주변의 전자 구조를 조절할 수 있어, 새로운 촉매 활성을 기대할 수 있다.

이산화탄소가 환원될 때, M-N-C 촉매에서도 다른 촉매와 유사하게 첫번째 중간체로 CO<sub>2</sub><sup>•-</sup>를 형성한다[그림 1A]. 그러나, 촉매마다 반응의 중간체와의 결합 세기 및 단계반응의 상대적 반응 속도 차이가 있다. M-N-C 촉매에서는 금속 원자의 활성 자리가 원자 단위로 분포되어 있어, 흡착한 중간체끼리 결합하는 이차 반응이 상대적으로 일어나기 어렵다고 예측된다. 따라서, M-N-C 촉매에서 수소 생성반응이 일어나는 경우, 위에서 언급한 헤이로프스키 스텝(Heyrovsky step)이 타펠 스텝(Tafel step)보다 유리할 것이다. 헤이로프스키 스텝은 타펠 스텝보다 일반적으로 높은 과전압이 필요한 것으로 예상하므로, M-N-C 촉매 계열의 경우 수소생성반응이 느려서 이산화탄소 환원 촉매로 사용할 경우 장점이 될 수 있다. 이와 같이 M-N-C 촉매는 기존의 금속 벌크(bulk) 촉매와는 다른 촉매활성을 보일 수 있다. 질소가 도핑된 탄소 및 Ni, Fe, Co와 같은 전이금속이 질소와 함께 도핑된 탄소 촉매들은  $*C$ 를 통해서 중간체가 흡착되고, 추가적인 환원 반응 단계를 거쳐  $*CO$ 이 탈착되면서 주생성물이 된다. Ni, Fe, Co와 같은 전이금속이 벌크 또는 나노 입자 촉매로 사용될 경우, 이산화탄소 환원 반응에는 낮은 활성을 보이고 강한  $*H$ 와의 결합으로 인해, 주로 H<sub>2</sub>를 생성한다[그림 1B].<sup>7</sup> 반면, Ni-N-C 촉매에서는  $*H$  흡착에너지가 작아지고, 수소발생반응의 과전압이 높아진다. 이산화탄소가 공급되는 환경에서는

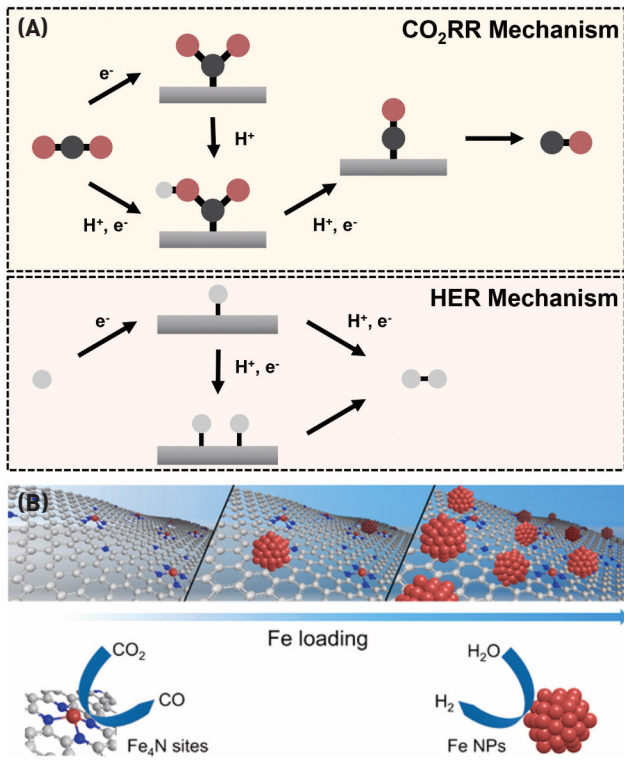


그림 1. (A) 전기화학적 이산화탄소 환원 반응과 수소 발생 반응의 메커니즘. (B) Fe 원자의 양에 따라 달라지는 반응의 선택도.<sup>7</sup>

CO가 선택적으로 생성될 수 있어, M-N-C 계열에서는 CO를 생성하는 가장 효율적인 촉매로 제안되고 있다.<sup>8</sup> 또한, 전해질의 pH에 따른 반응 속도 연구 결과 이산화탄소 환원 CO 생성 반응의 전류 밀도는 pH에 무관한 의존성을 가진다는 특성을 보인다. 이는 이산화탄소 환원 반응의 속도 결정단계에 양성자 전달이 없이 전자 전달만이 관여할 것으로 이해된다. 따라서, 선택적으로 CO 생성을 할 수 있는 촉매 활성은 첫번째 전자가 투입되는 CO<sub>2</sub> 분자의 활성 단계가 상대적으로 선호되기 때문인 것으로 이해할 수 있다. 물론, CO 생성 속도를 높이기 위해서는 활성 자리의 전환수(turn of frequency, TOF)를 높이거나, 더 많은 금속 원자를 도입하려는 노력이 계속적으로 필요하다. Ni 주변에 N의 결합이 있는 경우, Ni의 전자 구조가 CO 생성에 더욱 유리할 수 있음이 보고되었다. 한편, 금속의 함량이 높으면서도 나노 입자를 형성하지 않을 때, CO의 생성 전류 밀도는 높아지므로 중심 금속의 함량을 높이려는 다양한 M-N-C 합성법이 시도되고 있다. 마지막으로, 이렇게 합

성된 M-N-C는 다른 금속 촉매 특히 C-C 결합 반응이 가능한 구리 촉매와의 융합하면 탠덤(Tandem) 촉매로 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 합성 등에도 효과적으로 사용될 수 있다. 이렇듯 M-N-C 계열의 촉매 소재의 확장은 전자구조를 조절하고 촉매 특성에 영향을 주어 전기화학적 이산화탄소 전환 반응에 새로운 기회를 줄 수 있을 것이다.

### 3. 전기화학적 이산화탄소 환원 촉매의 내구성

전기화학적 이산화탄소 전환 기술이 산업적으로 사용되기 위해서는 촉매의 내구성 연구가 필요하다. 지금까지의 연구는 이산화탄소 환원 반응의 활성을 높이기 위한 촉매 소재 개발이 주요하게 진행되었으나, 산업에 적용될 수 있는 모델을 제시하기 위해서는 촉매의 내구성이 확보되어야 한다. 이산화탄소 환원 반응은 H<sub>2</sub> 발생 반응과 항상 경쟁하기 때문에, 촉매의 활성 저하는 생성 속도뿐만 아니라 생성물의 선택도 변화를 야기한다. 즉, 촉매의 활성이 떨어지면, 많은 경우 이산화탄소 환원 반응은 줄어들고 H<sub>2</sub>의 발생 반응이 늘어나는 문제점을 가진다. 촉매의 내구성에 영향을 끼칠 수 있는 요인으로는 촉매 형상의 변화, 촉매 활성 자리의 피독 현상, 촉매 표면의 친수성 변화로 인한 수소생성반응의 활성 변화 등이 있으며 촉매 소재 및 전해조 시스템에 따라서 주요 원인은 다르다. 예를 들면, Ag 나노 입자 촉매를 전기화학적 이산화탄소 환원 촉매로 사용하면, CO 생성은 줄고 상대적으로 H<sub>2</sub>의 생성이 늘어나는데, Ag 표면의 금속이 녹아 나고 다시 재증착하는 등 원자들이 재배열되면서 촉매 형상이 변화되는 현상이 관찰되었다.<sup>9</sup> Ag 나노 입자의 형상 변화는 동일한 조건에서 수소발생반응만 일어나는 경우에 비해 이산화탄소 환원 반응 조건에서 형태 변화가 더 빠르다. Cu 촉매의 경우에도, 표면에 \*CO가 강하게 흡착하여 Cu 원자의 이동을 야기할 수 있다고 보고되었으며, 활성 자리의 원자가 형상 변화에 더욱 취약하다고 제안되었다.<sup>10</sup> 이러한 촉매의 형상 변화는 표면 금속 원자의 배위수 및 결정면의 변화를 야기시켜, 활성 자리에서 이산화탄소 환원 반응의 선택성 및 활성을 떨어뜨리는 원인이 된다. 한편, Pd는 \*H 또는 \*CO이 강하게 흡착할 수 있는 대표적인 촉매 소재로, 강한 흡착에너지는 탈착 속도를 떨어뜨리기 때문에, 활성 자리의 피독 현상으로 촉

매의 환원 전류 밀도가 급격히 떨어지는 문제점이 있다. 이와 같이 금속의 촉매는 형상 변화 또는 반응 중간체의 강한 결합으로 내구성 문제를 일으킬 수 있어, 이를 해결하기 위한 전략들이 보완되어야 할 것이다.

한편, 전기화학적 이산화탄소 환원 반응은 전해질 내의 불순물에 의해서도 촉매 내구성이 떨어질 수 있다는 것이 보고되었다. 전해질로 사용하는 수용액 내에는 물의 순도 및 사용한 염의 순도에 따라 미량의 금속 불순물(impurity) 이온이 존재한다. 불순물 양이온 중에 Fe, Zn, Cu 은 ppm 이하로 존재하더라도, 이산화탄소 환원 반응을 위해 가해 준 음의 전위 조건에서 이 이온들은 먼저 전기 증착(electrodeposition)이 될 수 있다. 전기화학적 이산화탄소 환원 반응 중에 촉매 전극의 표면에 불순물 금속이 증착 되면 촉매 활성이 바뀔 수 있다. 이 중에서 Fe는 표면에 증착 되면, 촉매의 활성 자리를 막을 뿐만 아니라 Fe 금속 나노 입자는 수전해 반응에서 수소를 발생하는 촉매이므로, 이산화탄소 전환 활성은 떨어지고 H<sub>2</sub>의 발생이 늘어나는 원인이 된다[그림 2A].<sup>11</sup> 이를 막기 위해서, 전해질을 전처리하여 불순물을 제거하면 촉매의 내구성이 향상된다. 그러나 전해질의 전처리는 시간이나 비용면에서 현실적인 해결안이 되지 못한다. 이보다는 불순물에 의해서 영향을 받지 않는 촉매 소재를 개발하는 것이 바람직하다. 질소가 도입된 탄소는 불순물 이온이 존재하는 환경에서도 수백 시간 이상의 높은 촉매 내구성을 가지는 것이 보고되었다[그림

2B]. 불순물 이온의 증착이 금속보다 N-C 표면에 느리고, 증착이 되더라도 질소와 결합하여 (MN<sub>x</sub>) M-N-C를 형성하기 때문에 오히려 촉매의 이산화탄소 환원 성능을 향상시킬 수 있으므로 금속 기반의 촉매보다 내구성을 유지하기에 유리하다. 수돗물로 준비된 순도가 낮은 전해질에서도 N-C와 Fe-N-C 촉매는 이산화탄소 환원 CO 생성의 활성이 장시간 동안 유지되는 것이 보고되었다.<sup>12,13</sup> 불순물 이온에 의한 내구성 저하를 막고 금속 표면에 소수성을 유도하기 위해서 금속 촉매 표면에 탄소층을 도포하여 내구성을 향상시키기도 한다. 탄소 기반 전기 촉매 소재 또는 탄소 지지체가 산화 반응 또는 활성 산소(reactive oxygen species, ROS)가 발생하는 반응에 사용될 경우에 탄소가 산화될 수 있어 촉매 내구성을 확보하는데 문제가 될 것으로 염려되었지만 이산화탄소 전환에서는 전기화학적 환원 반응 조건이므로 안정적일 수 있을 것으로 기대된다. 금속 촉매가 가지는 내구성 단점을 보완할 수 있어, M-N-C 기반 촉매는 전기화학적 이산화탄소 환원 반응에 유망한 대체 촉매가 될 수 있을 것이다.

#### 4. 다양한 환경에서의 이산화탄소 환원 반응

전기화학적 이산화탄소 환원 반응의 연구는 실험실 수준에서 성능 확인을 하기 때문에 100%에 가까운 고순도 이산화탄소를 사용하는 경우가 대부분이다. 그러나 온실가스

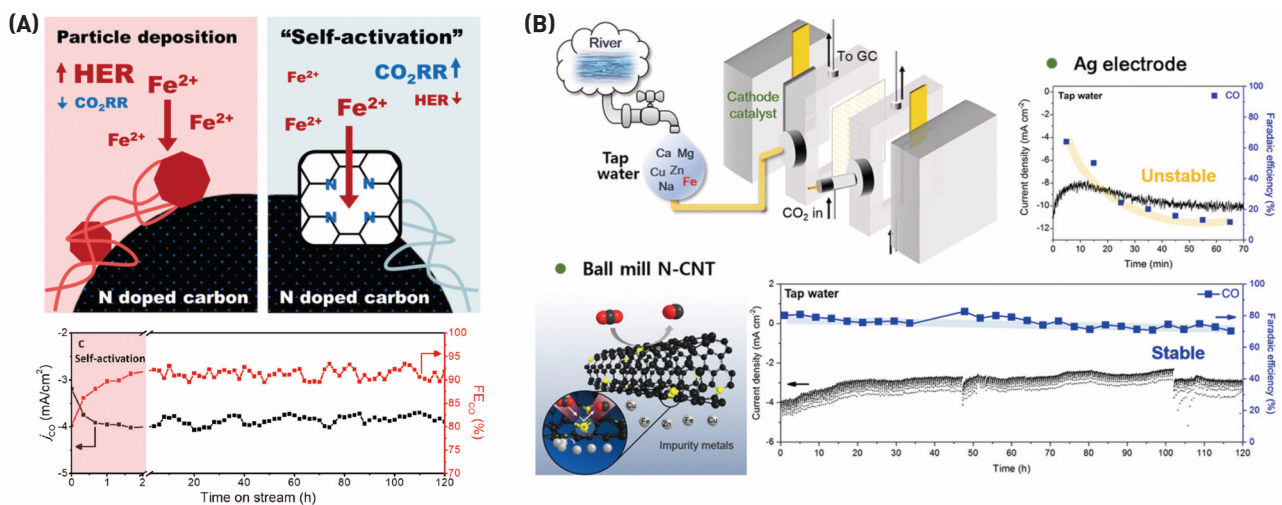


그림 2. (A) 불순물 양이온으로 인한 촉매의 활성 변화.<sup>11</sup> (B) 순도가 낮은 전해질 조건에서 높은 내구성을 보이는 M-N-C 촉매.<sup>12</sup>

처리의 관점에서 보면, 화력 발전소의 연소 과정이나 화학 공정에서의 이산화탄소 발생 농도는 5~30 % 수준이고, 공기 중의 이산화탄소는 500 ppm 수준으로 매우 낮은 농도이다. 따라서, 낮은 농도의 이산화탄소를 직접 사용할 때의 촉매 특성도 고려되어야 한다. 고순도의 이산화탄소에 비해 농도가 낮아지면 부분 압력이 낮아지기 때문에 같은 촉매 조건에서 반응 속도가 낮아진다. 앞서 언급했듯이, 전기화학적 이산화탄소 환원 반응은 이산화탄소 환원 반응과 수소발생반응이 경쟁적으로 일어나기 때문에, 낮은 농도 조건에서는 이산화탄소 환원 반응의 패러데이 효율이 낮아지고 상대적으로 물분해 수소 생성의 패러데이 효율이 증가한다. 또한, 낮은 농도 조건에서는 CO, CH<sub>4</sub>와 같이 C<sub>1</sub> 화합물이, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>와 같은 C<sub>2</sub> 화합물보다 유리하여 이산화탄소 환원 반응의 생성물 분포에도 영향을 끼칠 수 있다. 이산화탄소의 농도를 100 % 에서 10 %까지 낮추는 경우, 농도에 따른 생성물 분포 경향은 특히 촉매의 내적인 활성(intrinsic activity)에 따라서 달라진다.

촉매 활성 자리가 원자 단위로 분포되어 있는 Ni-N-C는 낮은 수소발생반응의 내적인 활성을 가지며, 활성화 에너지가 금속 촉매에 비해 높게 필요하다. 따라서, 이산화탄소의 농도가 낮아지더라도 상대적으로 CO 생성 반응의 선택도를 높게 유지하고, 수소발생반응이 잘 억제된다. 예를 들면, Ni-N-C와 Ag 두 촉매 모두 고순도의 이산화탄소 환원 조건에서는 CO를 95% 이상 매우 선택적으로 생성하나, 이산화탄소의 농도가 10 %로 낮아지면 Ag 촉매에서는 상대적으로 수소발생반응의 전류 밀도가 높아지면서 CO 생성의 선택도가 40% 수준까지 낮아지고, 반면 수소가 주 생성물이 된다. 반면, Ni-N-C 촉매는 같은 조건의 낮은 이산화탄소 환원 반응에서도 여전히 90 % 이상의 높은 CO 생성 선택도를 보인다[그림 3A].<sup>14</sup> 따라서, 낮은 농도의 이산화탄소 환원 반응 조건에서 높은 CO 생성의 선택도를 유지하기 위해서는 CO 생성 반응과 수소발생반응 사이의 활성화에너지 차이가 클수록 유리하다. 탄소 기반의 촉매는 수소발생을 잘 억제할 수 있어 여러 농도 조건의 이산화탄소 환원 반응에 장점이 있다. 한편, 이산화탄소의 환원 반응은 그 동안 중성 또는 염기성 용액 환경에서 주로 연구되었다. 이는 산성 환경의 전해질에서는 양성자의 농도가 높아 수소발생반응의 속도가 빨라 지기 때문이다. 최근에는

이산화탄소의 전환 효율을 높이기 위해서 양이온 교환막을 사용하는 산성환경에서의 전환 반응도 관심 있게 연구되고 있다. 따라서, 산성의 환경에서도 수소발생반응의 성능이 낮은 촉매 소재의 개발이 중요해지고 있다.

전기화학적 이산화탄소 환원 반응은 전극과 전해질 계면에서 양이온의 분포에 의해서 촉매의 활성이 달라지는 현상들이 보고되고 있으며, 특히 생성물의 선택도가 크게 영향을 받아 전기화학적 촉매 반응 중에 양이온의 효과를 연구하는 좋은 모델 반응이다. 양이온이 전기화학적 이산화탄소 환원 반응의 활성 및 선택도에 영향을 주는 원인에 대해서 여러가지 가능성이 제안되었다. 전기장에 의한 효과, CO<sub>2</sub><sup>-</sup>를 비롯한 이산화탄소 환원 반응의 중간체가 수화된 양이온에 의해 직접 안정화되는 효과, 또는 전극 주변의 pH 및 양성자 전달에 영향을 끼치는 효과들이 제안되었고, 여러 요인들이 복합적으로 작용할 수 있을 것으로 예상된다. 비록 어떤 요인이 결정적인 기여도인지 규명하는 것이 쉽지 않으나, 공통적으로 전극 주변에 양이온이 존재할 때 전기화학적 이산화탄소 환원 반응의 과전압을 낮추어 활성을 향상시킬 수 있음을 제안하고 있다. 실험적으로 Ag 전극에서 Cs<sup>+</sup>이 존재할 때 Li<sup>+</sup>이 존재할 때보다 이산화탄소가 전환되어 CO가 생성되는 전류 밀도가 증가되는 것이 관찰되었다.<sup>15</sup> 수화된 Cs<sup>+</sup> 양이온의 크기가 Li<sup>+</sup>의 경우보다 작기 때문에, 영점전하(point of zero charge)보다 음의 전위를 전극에 주었을 때, Cs<sup>+</sup>이 촉매 전극 주위에 더 많이 축적되고 이산화탄소 환원 반응의 과전압을 낮추는 데 효과적인 것으로 제안되었다. 촉매의 영점전하는 촉매의 일함수(work function)와 같이 고유의 전자 구조에 의해서 영향 받을 수 있고, 양이온의 변화에 따른 민감도(sensitivity)는 촉매 표면에 따라 다를 수 있다. 양이온의 민감도는 양이온 종류에 따른 이산화탄소 환원의 부분 전류 밀도의 변화 정도로 정의할 수 있다. 단결정 Ag 전극의 결정면에 따라서 영점전하가 달라지고, CO를 생성하는 부분 전류 밀도의 양이온 민감도도 다르다는 것이 보고되었다.<sup>15</sup> 한편, Ni-N-C 촉매는 Ag에 비해서 낮은 양이온 민감도를 가지는 것이 확인되었다[그림 3B]. 물론, 양이온에 따른 민감도 및 의존도는 전해질의 이온 농도 및 pH 등에 따라 달라질 수 있는 특성이다. 같은 농도의 중성 용액에서 Cs<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup> 순으로 알칼리 양이온의 유효 반지름이 커지면, Ag 촉매의

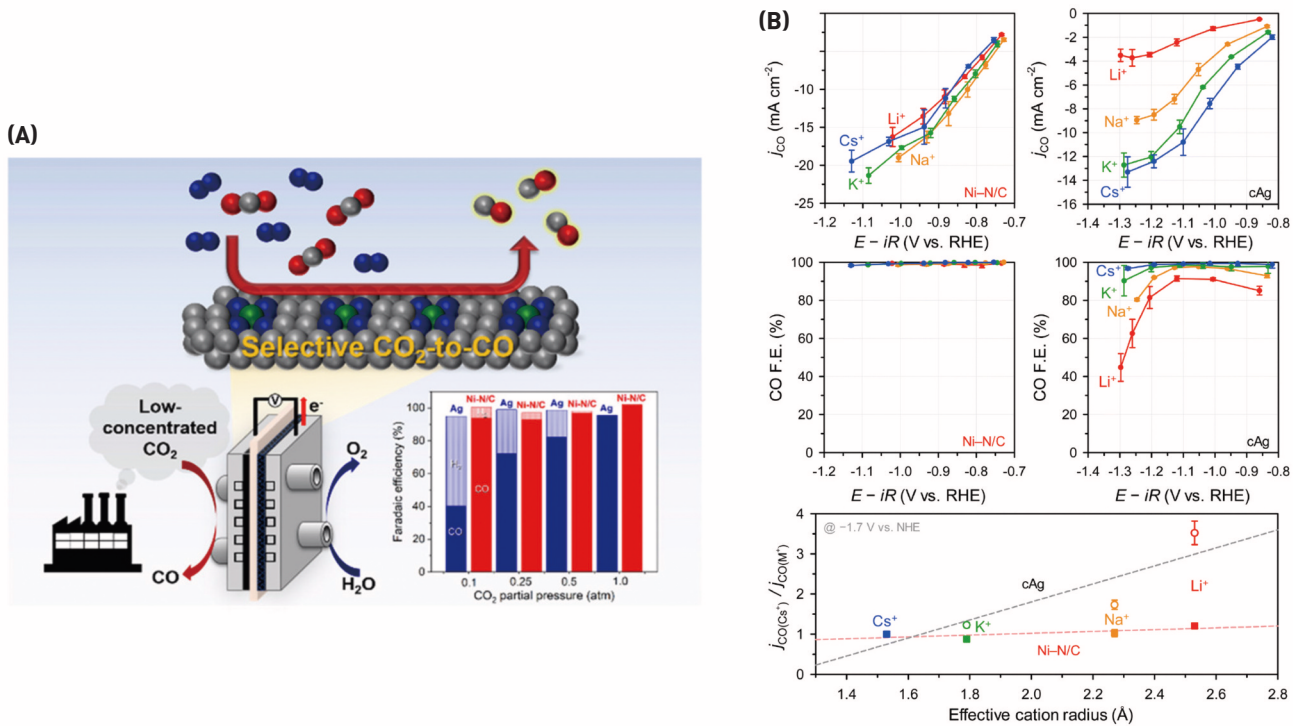


그림 3. (A) 낮은 이산화탄소의 분압 조건에서도 높은 CO 선택성을 보이는 M-N-C 촉매.<sup>14</sup> (B) 낮은 양이온 민감도를 보이는 Ni-N-C 촉매.<sup>16</sup>

CO를 생성하는 전류 밀도는 급격히 줄어들며, CO 생성의 패러데이 효율도 감소한다. 반면, 같은 전해질 비교 조건에서 Ni-N-C는 양이온의 종류가 변하여도 낮은 민감도를 보이고, 여러 양이온 조건에서 CO의 생성 전류 밀도 및 패러데이 효율이 잘 유지되는 것이 확인되었다.<sup>16</sup> Ni-N-C 촉매는 양의 영점전하를 가지고, 금속 촉매와는 구별되게 양이온의 종류에 따라 활성이 크게 변하지 않는 특성을 가질 수 있음이 제안되었다. 전해질 조건에 따른 낮은 민감도는 반응 중 국부적으로 환경이 변하더라도 촉매의 활성이 안정적으로 유지될 수 있다는 점에서 장점이 될 수 있다.

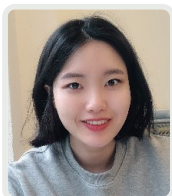
## 결론

지속가능한 탄소 순환 기술을 확보하기 위해 이산화탄소를 유용한 화합물로 전환하려는 촉매 화학 기술은 그 동안 많은 관심을 받아왔다. 전기화학적 이산화탄소 전환 기술은 최근의 전기 기술 및 촉매 소재 기술의 발전과 함께 빠른 기술적 성장을 보이고 있다. 초기의 단결정 중심의 금속 촉매 전극 연구는 이산화탄소의 환원 반응의 주요 중간체를 이

해하고 촉매의 반응성을 예측하는 가이드라인을 제시해주었다. 그러나, 이산화탄소 전환하는 효율 및 선택성을 높일 수 있는 촉매 소재의 발굴은 계속적으로 필요하다. 특히, 경쟁반응인 수소생성반응을 제어하고 이산화탄소 환원 반응의 안정적인 촉매 성능을 확보하기 위해서는 금속 촉매뿐만 아니라 다양한 소재적 접근도 필요하다. 금속과 질소가 도입된 탄소 기반의 소재는 전도성과 촉매 특성을 모두 보유하고 있어 전기화학적 촉매 소재로 활발히 연구되고 있으며, 특히 이산화탄소 환원 반응에서 전이금속이 도입된 M-N-C 촉매는 매우 선택적으로 일산화탄소를 생성할 수 있다. 낮은 수소발생반응의 촉매 활성은 이산화탄소를 선택적으로 환원시키는데 기여하며 다양한 이산화탄소 환원 조건에서도 높은 활성을 유지할 수 있다. 또한, 탄소 기반의 촉매는 전기화학적 이산화탄소 환원 반응에서 향상된 촉매의 내구성을 보이고 있어 디바이스 적용에도 유리할 것으로 기대한다. 이러한 M-N-C 기반의 소재는 중심원자, 주변의 음이온, 탄소의 구조 등 여러 변수를 조절하여, 촉매의 전자 구조 제어가 다양하게 이루어질 수 있어 새로운 촉매의 활성을 기대할 수 있다.



1. Hori, Y. i., "Electrochemical CO<sub>2</sub> reduction on metal electrodes." *Mod. Aspects Electrochem.* **2008**, pp 89-189.
2. Nitopi, S.; Bertheussen, E.; Scott, S. B.; Liu, X.; Engstfeld, A. K.; Horch, S.; Seger, B.; Stephens, I. E. L.; Chan, K.; Hahn, C.; Nørskov, J., K.; Jaramillo, T., F.; Chorkendorff, I. "Progress and Perspectives of Electrochemical CO<sub>2</sub> Reduction on Copper in Aqueous Electrolyte." *Chem. Rev.* **2019**, *119* (12), 7610-7672.
3. Zhang, J.; Cai, W.; Hu, F. X.; Yang, H.; Liu, B. "Recent advances in single atom catalysts for the electrochemical carbon dioxide reduction reaction." *Chem. Sci.* **2021**, *12* (20), 6800-6819.
4. Wu, J.; Yadav, R. M.; Liu, M.; Sharma, P. P.; Tiwary, C. S.; Ma, L.; Zou, X.; Zhou, X.-D.; Yakobson, B. I.; Lou, J. "Achieving highly efficient, selective, and stable CO<sub>2</sub> reduction on nitrogen-doped carbon nanotubes." *ACS nano*, **2015**, *9* (5), 5364-5371.
5. Wu, Y.; Jiang, Z.; Lu, X.; Liang, Y.; Wang, H. "Domino electroreduction of CO<sub>2</sub> to methanol on a molecular catalyst." *Nature* **2019**, *575* (7784), 639-642.
6. Back, S.; Lim, J.; Kim, N. Y.; Kim, Y. H.; Jung, Y. "Single-atom catalysts for CO<sub>2</sub> electroreduction with significant activity and selectivity improvements." *Chem. Sci.* **2017**, *8* (2), 1090-1096.
7. Huan, T. N.; Ranjbar, N.; Rousse, G.; Sougrati, M.; Zitolo, A.; Mougel, V.; Jaouen, F.; Fontecave, M. "Electrochemical Reduction of CO<sub>2</sub> Catalyzed by Fe-N-C Materials: A Structure-Selectivity Study." *ACS Cat.* **2017**, *7* (3), 1520-1525.
8. Yang, H. B.; Hung, S.-F.; Liu, S.; Yuan, K.; Miao, S.; Zhang, L.; Huang, X.; Wang, H.-Y.; Cai, W.; Chen, R.; Gao, J.; Yang, X.; Chen, W.; Huang, Y.; Chen, H., M.; Li, C., M.; Zhang, T. "Atomically dispersed Ni(i) as the active site for electrochemical CO<sub>2</sub> reduction." *Nat. Energy* **2018**, *3* (2), 140-147.
9. Yun, H.; Kim, J.; Choi, W.; Han, M. H.; Park, J. H.; Oh, H.-s.; Kwak, K.; Hwang, Y. J. "Understanding morphological degradation of Ag nanoparticle during electrochemical CO<sub>2</sub> reduction reaction by identical location observation." *Electrochim. Acta* **2021**, *371*, 137795.
10. Huang, J.; H?rmann, N.; Oveisi, E.; Loiudice, A.; De Gregorio, G. L.; Andreussi, O.; Marzari, N.; Buonsanti, R. "Potential-induced nanoclustering of metallic catalysts during electrochemical CO<sub>2</sub> reduction." *Nat. comm.* **2018**, *9* (1), 1-9.
11. Kim, C.; Choe, Y.-K.; Won, D. H.; Lee, U.; Oh, H.-S.; Lee, D. K.; Choi, C. H.; Yoon, S.; Kim, W.; Hwang, Y. J. "Turning harmful deposition of metal impurities into activation of nitrogen-doped carbon catalyst toward durable electrochemical CO<sub>2</sub> reduction." *ACS Energy Lett.* **2019**, *4* (9), 2343-2350.
12. Shin, H.; Chung, M. W.; Jung, H.; Chae, K. H.; Oh, H.-S.; Hwang, Y. J.; Min, B. K. "Achieving tolerant CO<sub>2</sub> electro-reduction catalyst in real water matrix." *Appl. Catal. B* **2019**, *258*, 117961.
13. Gu, J.; Hsu, C.-S.; Bai, L.; Chen, H. M.; Hu, X. "Atomically dispersed Fe<sup>3+</sup> sites catalyze efficient CO<sub>2</sub> electroreduction to CO." *Science* **2019**, *364* (6445), 1091-1094.
14. Kim, D.; Choi, W.; Lee, H. W.; Lee, S. Y.; Choi, Y.; Lee, D. K.; Kim, W.; Na, J.; Lee, U.; Hwang, Y. J. "Electrocatalytic reduction of low concentrations of CO<sub>2</sub> gas in a membrane electrode assembly electrolyzer." *ACS Energy Lett.* **2021**, *6* (10), 3488-3495.
15. Ringe, S.; Clark, E. L.; Resasco, J.; Walton, A.; Seger, B.; Bell, A. T.; Chan, K. "Understanding cation effects in electrochemical CO<sub>2</sub> reduction." *Energy Environ. Sci.* **2019**, *12* (10), 3001-3014.
16. Kim, J. H.; Jang, H.; Bak, G.; Choi, W.; Yun, H.; Lee, E.; Kim, D.; Kim, J.; Lee, S. Y.; Hwang, Y. J. "The insensitive cation effect on a single atom Ni catalyst allows selective electrochemical conversion of captured CO<sub>2</sub> in universal media." *Energy Environ. Sci.* **2022**, *15* (10), 4301-4312.



**윤혜원 Hyewon Yun**

• 서울대학교 화학부 박사과정(2021.9-현재)



**유수환 Suhwan Yoo**

• 서울대학교 화학부 통합과정(2021.9-현재)



**황윤정 Yun Jeong Hwang**

- 한국과학기술원(KAIST) 화학과, 학사(1999.3-2003.2)
- 한국과학기술원(KAIST) 화학과, 석사(2003.3-2005.2)
- 버클리 캘리포니아 주립대(University of California, Berkeley), 박사(2006.8-2012.5)
- 한국과학기술연구원(KIST) 청정에너지연구센터 연구원/선임/책임연구원(2012.6-2021.2)
- 서울대학교 화학부 부교수(2021.3-현재)

## 과학과 교육과정 개정의 지역화 정책 측면에 관한 탐색

천주영 | 서울특별시교육청 장학사, aither1028@sen.go.kr

### 서론

교육과정의 지역화는 국가 수준에서 표준화하여 결정해 온 역할을 시·도교육청 중심의 지역 수준에서 자율적으로 수행하도록 상당 부분 나누는 것을 의미하는데, 그런 맥락에서 교육과정 ‘지역화’ 정책은 2024년부터 순차적으로 적용되는 2022 개정 교육과정의 ‘분권화·자율화’ 방향<sup>a,1</sup>과 밀접한 관련을 맺는다. 이러한 교육과정 정책의 변화는 학생들이 지능 정보 사회 도래, 그린 혁명, 저출산 시대라는 미래사회의 뉴노멀에 대응할 수 있도록 사회변화 대처 역량 함양을 꾀한다.<sup>2</sup> 특히 과학의 본성(Nature of Science: NOS) 등 과학과 고유의 특성과 비형식 과학교육·지역 과학 자원 등으로 변화하고 확대되는 과학 환경을 고려하면 과학과 교육과정의 지역화는 다양성을 통한 전문성으로 나아갈 수 있다는 이점을 갖는다. 본고에서는 세 가지 논의를 통해 과학과 교육과정의 지역화 측면의 현황을 ‘시·도 교육과정 편성·운영 지침(이하 ‘지침’)’과 교육과정 성취기준 중심으로 분석하고 과학과 교육과정 개정과 관련한 교육과정 지역화 정책 측면의 시사점을 실세계 맥락에서 탐색하고자 한다.

### 본론

#### 1. 과학과 교육과정의 지역화 동향 탐색

첫째로 교육과정 지역화를 담은 대표적인 문서로서 제6차 교육과정부터 2015 개정 교육과정 시기까지 17개 시·도교육청에서 고시해 온 ‘지침’에 주목하고, 유의미한 개정 사항이 있는 수집 가능한 모든 초등학교 과학과 ‘지침’ 총 97건의 동향을 국가 수준 교육과정 기준으로 시간적·공간적·정책적 관점에서 분석하고 살펴보았다. 이를 통하여 지역별로 추진해 온 차별적인 과학과 교육 특색이 존재하는지, 교육과정 지역화 정책이 시작된 이래로 국가 수준 교육과정이라는 표준화 측면([표 1] 참고)에 대응해 어떤 경향성을 보여 왔는지 탐색하였다.

결과적으로<sup>8</sup> 시간적 관점에서 제6차 교육과정에서는 교육과정 지역화 초기라는 한계가 드러났고,<sup>b</sup> 제7차 교육과정에서는 지역별 과학 교육과정의 다양화가 점차 이루어지기 시작하였으며,<sup>c</sup> 2007 개정 교육과정에서는 지역과학교육 자원지도(RSM)의 다양성과 구체성이 강화되었다.<sup>d</sup> 2009 개정 교육과정에서는 지역화 정책과 표준화 정책의 상충으

a) 2022 개정 교육과정 총론 ‘구성의 중점’ 중 ‘사’ 항목: 교육과정 자율화·분권화를 기반으로 학교, 교사, 학부모, 시·도교육청, 교육부 등 교육 주체들 간의 협조 체제를 구축하여 학습자의 특성과 학교 여건에 적합한 학습이 이루어질 수 있도록 한다.

b) 개별 교과 각론보다 총론 수준의 서술에 집중한 경향을 보이나, 과학적 태도 평가의 비율 20% 설정(95전남), 생명존중·환경보전 언급(95전남/96경기·전북), 교육과정 재구성 제안(96강원), 과학 영재반 운영(96전북) 등은 지역화를 통한 다양화의 가능성을 보여준다.

c) 과학과 교과 중점의 지역화 강조 중점 추가 서술(06강원/08서울), ‘환경의 날·물의 날 행사’·‘교장의 지층과 화석 관찰’ 등 지역 과학 활동 명시(98경남/03경북), 심화·보충과정의 평가 허용(06경북) 등이다.



표 1. '국가 수준' 과학과 교육과정의 종단적 주요 특징 재구조화<sup>3,4,5,6,7</sup>

제6차	제7차	2007개정	2009개정	2015개정
<ul style="list-style-type: none"> <li>- STS관점 시작</li> <li>- 과학자 · 과학시사</li> <li>- 생명존중교육</li> <li>- 환경오염 주의</li> <li>- 사전 안전지도</li> <li>- 주제활동 대체 운영</li> <li>- 과학전람회 참여</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 심화 · 보충과정 (수준별학습)</li> <li>- STS관점 심화</li> <li>- 교육과정 재구성</li> <li>- 가정학습과제 · 토의수업</li> <li>- 정보화사회 대비</li> <li>- 최신과학 소개</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- STS관점 명료화</li> <li>- 과학글쓰기 · 토론</li> <li>- '자유탐구' 도입</li> <li>- 의사소통 강조</li> <li>- 개방형질문 활용</li> <li>- 사전답사 실시</li> <li>- 연차시 학습운영</li> <li>- 평가의 진로지도 활용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- STEAM 도입</li> <li>- 과학자 연구사례 소개</li> <li>- 과학도서 목록 준비</li> <li>- 과학의본성 지도</li> <li>- 학생개인차 고려 지도</li> <li>- 실험실 안전수칙</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 학교 밖 과학 활동</li> <li>- 과학의 잠정성, 과학적 방법의 다양성, 과학윤리</li> <li>- 최신정보통신기술 · 기기 활용</li> </ul>

로 국가 수준 교육과정 문서를 답습하는 경향이 발생하였고, 2015 개정 교육과정에서는 사회적으로 교육 자치에 대한 분권화 기조가 확대되면서 보다 새로운 국면의 과학 교육과정의 지역화가 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다.<sup>6</sup> 그리고 공간적 관점에서는 지역사회, 과학관이나 박물관 등의 비형식 과학교육 요소가 현재 초등 과학 교육과정 지역화의 핵심적 역할을 하고 있는 것으로 나타났다.

특히 동일한 시기 '지침' 내에서도 국가 수준 교육과정과 별개로 설정된 해당 지역의 과학과 중점을 담고 있는 시·도가 일부 있었다. 이는 단순한 학습 장소나 소재의 지역화를 넘어선 지역의 특색있는 과학 정책을 '지침'에 담는 차이가 나타났음을 의미한다.<sup>7</sup> 추후 실질적인 과학과 교육과정 지역화 정책이 추진된다면, 지역 교육청이나 학교가 중심이 되어 과학과 교육 과정을 개발·고시하는 적극적 의미의 지역화로 나아갈 수도 있겠다. 즉, 과학과 학습 장소나 소재의 지역화를 넘어선 시·도별 특색에 따른 과학교육 정책의 시·도별 '지침' 반영 가능성을 시사한다.

전반적으로 과학과 교육과정 지역화는 시간이 흐름에 따라 그 양과 질의 측면에서 서서히 내실화되는 경향을 보여 주었으나, 표준화된 국가 교육과정 정책에 크게 영향을 받기 때문에 독립적인 흐름을 갖지 못했다. 이는 교육과정 지

역화와 충돌하거나 균형점을 찾으려는 교육과정 표준화 측면의 힘이 강하게 작용하고 있음을 암시한다. 실제로 표준적인 국가 교육과정의 중심화 기조와 교육과정 지역화의 탈중심화 기조가 상반된 영향력으로 동시에 작용하면서 과학과 교육과정 지역화가 정체하는 시기가 관찰되었다. 즉, 현재와 같은 구조의 교육과정 하에서는 교육과정 지역화 정책의 설정 수준만큼 현장의 학교 단위에서 지역화가 실현될 것이라고 보장하기 어렵다. 그러므로 '지침'으로 대표되는 교육과정 지역화 정책에 상반되는 영향력으로 작용하는 교육과정 표준화 측면을 살펴볼 필요성이 생긴다.

## 2. 과학과 성취기준 분석과 지역화 연계 탐색

둘째로 국가 수준에서 개발된 현행 2015 개정 과학과 교육과정 성취기준이 표준화 측면에서 교육과정 총론의 설계를 적절히 구현하고 있는지 Bloom의 신교육목표분류학을 기반으로 비판적으로 분석하고 지역화 정책과 연계한 변화 가능성을 탐색해 보았다. 과학과 교육과정 '지침'이 문서상으로만 존재하는 것이 아니라 실질적인 역할을 하기 위해서는 학교 현장의 실제 수업에 '지침'의 내용이 반영되어야 한다. 그런데 교육과정의 실현된 형태에 절대적인 영향을

d) 이는 공간적 측면에서 각 지역의 과학과 '지침'이 '해양탐구교육' 강화(96·08제주/08부산/09인천·울산·전남) 등 지리적 특성을 반영하고, '대전엑스포과학공원'·'순천만국제정원박람회' 등 지역 내 비형식 과학학습 장소에 대해 명시(09대전/09·11전남/15대구/21경남)하고 있음을 뜻한다.

e) '세종창의적교육과정·세종형 학력', '대구행복역량교육과정' 등 차별적인 교육과정 문서명 및 과학과 추구 방향·역량 제시(15·18세종/17·18·20대구/17광주/21경남), 과학 탐구실험·실습 시수 40% 확보(17강원), 환경·미세먼지·제비생태탐구교육 등 생태환경교육 언급(19경남)이 특징적이다.

f) 지역별 과학과 수월성 추구의 경향 차이(96전북/09·16울산), 과정 중심 평가의 도입(95·03경북/09 강원·경남/14경기), 진로 연계 교육 추진(13경기/15강원/18충남) 등은 지역 교육청의 특색을 담은 과학교육 정책의 가능성을 보여준다.

표 2. 과학과 성취기준의 지역화 정책 반영 방안 예시

순	방안	참고
1	성취기준 폐지	'교육과정 현장 네트워크' 제안 <sup>16</sup>
2	전체 성취기준과 최소 성취기준 제시	한국교육과정평가원 연구 제안 <sup>17</sup>
3	국가 수준 외 성취기준 신설 허용	한국교육과정평가원 연구 제안
4	필수 및 선택 성취기준으로 구분 제시	'교육과정 현장 네트워크' 제안
5	사실적·개념적 지식 차원 외 성취기준 변경 허용	본고 추가 탐색 <sup>18</sup>

끼치는 것은 교육과정 표준화 측면을 대표하는 성취기준이기 때문이다.

최근의 과학과 성취기준 선행연구 동향과 성취기준 분석 결과를 연계하여 비판적으로 논하면, 2015 개정 교육과정 과학과 성취기준은 표준화 측면의 장점을 의도하고 개발되었으나 2015 개정 과학과 교육과정의 철학을 정교하게 담아낸 것으로 보이지 않는다.<sup>9,10</sup> 이는 2015 개정 교육과정이 역량 중심임에도 불구하고 성취기준이 교육목표의 특정 지식 및 인지과정 차원에 집중되어 있고, 과학과 핵심역량과 연계되어 설정되지 않았으며, 2015 개정 교육과정의 과정중심평가에 부적합한 면 등으로 설명된다. 또한 학년 및 학교급에 따른 인지과정 차원의 위계화에 대한 고려와 성취기준 서술어 사용의 다양화와 명료화도 필요한 것으로 보인다.<sup>9</sup>

특히 교육과정 개정 시기마다 교과별 목표나 중점 방향이 달라져 왔지만, 2015 개정 교육 과정 과학과 성취기준의 분석 결과는 선행연구의 2009 개정 교육과정의 과학과 성취기준 양상과 큰 차이가 없었다.<sup>11</sup> 이는 과학과 다른 선행연구에서도 동일하게 비판되어 온 사항이며,<sup>12,13,14</sup> 2015 개정 교육과정에서 역량이 도입됨에 따라 가장 많이 변화되어야 할 부분이 성취기준인 것으로 도출된 정책연구와 같은 맥락이다.<sup>15</sup>

교육과정 표준화의 대표적인 문서인 성취기준이 표준화 측면에서 완전하지 못하다는 분석 결과는 향후 어느 시점에서 과학과 성취기준의 변화 가능성을 열게 된다. 그리고 과

학 과 성취 기준의 대강화, 나아가 지역화 및 자율화 논의가 시작될 수 있는 여지가 생긴다. 그러므로 변화 가능한 방안을 탐색하는 맥락에서 여러 성취기준의 지역화 연계 방안을 ([표 2] 참고)들을 고려해 볼 수 있었다.

예를 들어 과학의 본성(NOS)과 수행(practice) 역량<sup>h,19</sup> 등 과학과 고유의 특성에 주목하여 초등 과학과 성취기준 분석 결과와 연계한 방안을 포함하여 탐색해 보면, 사실적·개념적 지식 차원<sup>i</sup> 외의 성취기준을 제한적으로 지역적 과학 정책을 반영하여 변경하도록 허용하는 등 다양한 방안을 고려해 볼 수 있다. 실제로 성취기준 진술 방식과 관련하여 교과에 따른 융통성과 다양성을 허용할 필요가 있음을 제안한 선행연구에서는 교과별 성취기준 개선에 대한 시사점을 다르게 도출한 바 있다.<sup>20</sup>

### 3. 과학과 교육과정 지역화에 대한 전문가 인식 탐색

하지만 교육과정 지역화와 표준화라는 두 가지 측면은 실세계 맥락의 과학 교육 현장에서는 별도로 작동하지 않는다. 그러므로 세 번째로, 앞선 과학과 '지침' 과 성취기준 분석에 대한 시사점을 반영하여 과학과 교육과정 지역화 측면의 논의점을 종합적으로 살펴볼 필요가 생긴다. 즉, 초기 형태를 벗어나 심화된 교육과정 지역화 정책이 추진되려는 현 시점에서 교육과정 전문가가 인식하는 과학과 교육과정 지역화에 대해 질적으로 조사하고 현장의 총체적인 인식을 탐

g) 2015 개정 과학과 지침은 다양한 탐구활동과 수업활동의 추구하고 있다.

h) 2010년대 미국 NGSS 개발 준비 논의를 참고하면, 과학과 핵심 개념(Core Idea)는 다소 고정적일 수 있지만 과학의 본성이나 과학과 수행(practice) 역량과 관련한 성취기준에 있어서는 지역화된 과학교육 맥락 접목의 가능성이 생길 수 있다.

i) 신교육목표분류학의 '지식 차원'은 사실적·개념적·절차적·메타인지 지식의 4종류로 구성되며, 전문용어, 구체적 사실과 요소에 대한 지식은 '사실적 지식', 분류와 유목, 원리와 일반화, 이론과 모형 구조에 대한 지식은 '개념적 지식'으로 분류하고 있다.

j) 4명의 전문가는 교육청 교원(교사·장학사·장학관) 및 연구기관 연구원으로 근무중이고, 과학교육·교육과정·교육행정 분야 석박사이며, 3명은 10년 이상의 과학 교과 지도 경험이 있다. 또한 모두 시·도교육청 및 직속기관에서 근무한 경력과 지역수준 교육과정 개발에 관여한 업무 수행 경험이 있다.

표 3. 전문가 인터뷰 일부(과학과 지역화 정의 및 시행의 단위 수준·'지침' 개발·성취기준 개선 측면)

연구 참여자	발췌	논점
D	“우리나라에서 지역이라 그러면 17개 시·도로만 생각하는데 이 범위를 못 넘어서서, 저는 시·도교육과정 지침보다도 더 내려와야 된다고 생각해요.”	과학과 지역화 시행의 단위 수준
D	“여태까지 국가 수준 교육과정과 지역의 개념을 볼 때, 지역은 실행의 주체로 봤지, 교육과정을 개발하고 만드는 주체로 보지 않은 거지요.”	과학과 지역 수준 교육과정 거버넌스 구축
C	“한꺼번에 만드는 것이 버겁다면 연차별로 과목별로 단계적 로드맵을 그릴 필요가 있어요.”	과학과 성취기준 변화에 관한 기초 연구
B	“우리 ○○시의 과학 교과 특색을 ‘지침’에 담는 거 찬성해요. 왜냐하면 ‘지침’에 안 담으면 결국은 (교사) 본인의 재구성 영역으로 넘어가기 때문에 ‘지침’에서 권한하는 게 낫지요.”	지역별 과학과 정책의 ‘지침’ 반영
A	“성취기준을 버리지 않으면 지역화는 나올 수가 없어요. 교사가 아이들에게 가르쳐야 할 것이 과학에서는 무엇인지 고민을 해야 되는데 성취기준에 너무 매몰되어 있어요.”	과학과 ‘지침’과 성취기준 동반 개선

색하였다.

결론적으로,<sup>21</sup> 전문가들은 ‘지침’의 교육과정 지역화 실현 수준에 대한 합의가 선행될 필요성, 개정 과학과 교육과정 고시에 따른 개정 ‘지침’ 마련을 위한 과학과 지역 수준 교육과정 거버넌스 구축, 향후 과학과 성취기준 변화와 관련한 기초 연구 등을 제안하였다. 그리고 과학과 교육과정 정책이 실효성있게 추진되려면 지역화의 대표적인 교육과정 문서인 과학과 ‘지침’과 표준화 측면에서 큰 영향력을 갖고 있는 과학과 교육과정 성취기준의 동반 개선이 필요

한 것으로 보았다. 이러한 교육과정 상의 변화를 위해서는 지역 수준의 과학과 교육과정 거버넌스 구축이 선행되어야 할 것이다. 지금까지 우리나라는 중앙 수준에서 교육과정의 강력한 지배구조를 형성해 왔기 때문에 상대적으로 지방이나 학교에서는 교육과정 거버넌스를 거의 형성하지 못했다고 할 수 있다.<sup>22</sup> 즉, 지역 수준에서의 교육과정 편성·운영·평가 권한의 위임과 분배가 이루어지려면, 지역 수준의 교육과정 편성·운영·평가 및 지원 체계를 위한 현실적인 기반 마련이 각론 수준까지 이루어져야 한다는 뜻이다.

표 4. 전문가 인터뷰 일부(과학과 적용 측면·‘교사 교육과정’ 그리고 평가 논의 측면)

연구 참여자	발췌	논점
A	“과학이 지역화에 좋은 이유는 많아요. 과학은 현상을 다루잖아요. 내 주변에 있는 걸 가지고 다루는 거잖아요.”	과학과 지역화에 대한 인식
C	“과학은 어떤 학문적인 위계성이 있기 때문에 지식적이거나 인지적인 (과학과 성취기준) 부분은 이미 상당히 고정이 되어 있는 거라는 생각이 들어요.”	과학과 고유의 특성에 대한 인식
B	“이런 편차를 감수하고도 교사 교육과정을 운영해야 한다고 학교의 (교육과정 담당) 부장교사 입장에서는 말 못 하겠어요.”	‘교사 교육과정’과 교원 역량 강화
A	“그 학교에 최소한 6년에서 7년, 이 정도 있어야 선생님들끼리 형성된 문화가 있어요. 공동체하고 합의된 문화가 존재해야 (과학과) 지역화 교과서도 의미가 있는 거예요, 사실은.”	교원 정책 연계
D	“오히려 저는 중등교육에서 과학과 성취기준을 어떻게 (마련)하느냐에 따라 입시 상황에서도 지역화가 가능하다고 봐요.”	다양성 추구와 표준화된 평가 문제
C	“내가 원하는 과학 교육과정을 갖고 있는 고교에 가서 학점을 딸 수 있는 거라면, 오히려 지역의 과학 교육과정이 다양해지면 고교학점제도 함께 활성화되지 않을까요.”	지역화 정책과 고교학점제 시행 관계

그리고 학교 수준까지 도달한 교육과정 지역화는 필연적으로 ‘교사 교육과정’의 발전 가능성을 열게 된다. 전문가들은 교사의 수준이 지역화의 수준이 되는 상황을 예견하며, 시·도교육청의 교원 정책 기반과 교원 역량 강화를 위한 교사 교육 연계가 필요함을 인식하였다. 다만 ‘교사 교육과정’은 교육과정 지역화보다 교육과정 자율화에 강조점을 두는 서로 다른 개념이므로 지역화 정책 측면에서 교사 교육의 접근 방법은 달라야 할 것으로 보인다.

한편, 교과 측면에서 볼 때 과학과 고유의 특성에 따라 타 교과에 비해 과학과의 지역화 정책 수용성이 높다는 인식이 있었으나, 반면에 과학 교과에는 전세계 공통적인 학습내용이 있을 거라는 대중적인 인식이 강하다는 점도 전문가 인터뷰에서 드러났다. 과학 지식의 잠정성이라는 과학의 본성에도 불구하고, 과학 지식의 구성 요소인 사실·개념·법칙·이론·모형의 인상이 갖는 절대성이 강하기 때문인 것으로 보인다. 그리고 과학과 내에서도 초등 학교급이 중등 학교급보다 지역화 정책 적용 가능성이 높다는 논의는 교육정책의 정교화 측면 그리고 과학 교과 각론 차원에서 유의미한 부분이다.

특히 전문가들은 과학과 교육과정 지역화가 다양성 측면에서 강점을 갖는다고 볼 때, 표준화 측면에서는 평가에 관한 논쟁을 일으킬 수 있음을 인식하며 이로 인한 지역 격차에 대한 문제의식을 드러냈다. 이는 성취기준의 지역화로 인하여 지역에 따라 배우는 내용이 일부 달라졌을 때, 이로 인하여 생길 수 있는 학습 격차에 관한 논의와 연결될 수 있는 부분이다. 반면에, 2025년 전면 시행 예정인 고교학점제 정책과는 상생적인 연계 가능성을 인식했다. 고교학점제와 교육과정 지역화 정책은 둘 다 학습자 중심으로 교육과정 자율화와 다양화의 철학이 저변에 흐른다는 점에서 유사성을

가지므로, 이는 두 정책의 연계지점을 마련하여 정책을 정교화 하는 방향을 고려해 볼 수 있음을 시사한다.

## 결론

본고는 과학과 교육과정의 지역화와 표준화 측면을 담은 과학과 교육과정 문서인 ‘지침’과 성취기준 분석을 기반으로, 과학과 교육과정 개정과 지역화 정책을 연계한 실세계 맥락을 탐색하였다. 그리고 향후 정책을 실효성있게 시행하기 위한 ‘지침’과 성취기준의 동반 개선 방안을 살펴보고 이를 위해 고려해야 할 연관된 맥락들을 논하였다.

결론적으로, 지금까지의 과학과 교육과정 지역화 정책은 지역화와 표준화라는 두 가지 측면의 충돌로 실효성이 크지 않아 보인다. 그리고 입시 교육의 비중이 큰 중등교육에 비해 초등교육에서 과학과 지역화 정책 추진의 유연성이 크긴 하지만, 전반적인 교육과정의 구조에 대한 개선 없이는 과학과 교육과정 지역화 정책 구현은 더딜 것이다.

그럼에도 불구하고 2022년 12월 고시된 2022 개정 교육과정 적용에 따라 2024년부터 전국의 초·중학교는 지역과 연계한 다양하고 특색있는 교육과정을 운영하는 ‘학교 자율시간’을 도입하는 등 큰 변화를 맞게 되었다. 이러한 현실적인 정책 흐름을 고려할 때, 본고에서 탐색한 과학과 ‘지침’과 성취기준의 동반 개선, 지역 수준의 과학과 교육과정 거버넌스 구축 선행, 그리고 교원 정책 연계 등의 세부사항은 향후 정교하게 논의될 필요가 있다. 마지막으로 교육과정 지역화와 자율화를 연계하여, 과학과 교사의 전문성을 기반으로 한 ‘교사 교육과정’ 또는 학교 단위 교육과정을 강조함으로써 지역 수준과 학교 수준 교육과정이 상생하도록 하는 방안 관련 정책적 연구를 제안한다.



1. 교육부, 초·중등학교 교육과정 총론, 2022, 교육부 고시 제2022-33호[별책 1].
2. 교육부, 국민과 함께하는 미래형 교육과정 추진 계획, 2021, 교육부 보도자료(2021. 4. 20.).
3. 교육부, 초등학교 교육과정, 1992, 교육부 고시 제1992-16호.
4. 교육부, 초등학교 교육과정, 1997, 교육부 고시 제1997-15호.
5. 교육인적자원부, 초등학교 교육과정, 2007, 교육인적자원부 고시 제2007-79호 [별책 2].
6. 교육과학기술부, 과학과 교육과정, 2011, 교육과학기술부 고시 제2011-361호[별책 9].
7. 교육부, 과학과 교육과정, 2015, 교육부 고시 제2015-74호[별책 9].
8. 천주영, 이경건, 홍훈기. “한국 과학과 교육과정의 지역화 동향 분석 연구: 초등학교 시·도 교육과정 편성·운영 지침을 중심으로.” *학습자중심교과교육연구*, 2021, 21(17), 915-933.
9. 천주영, 이성민, 홍훈기. “Bloom의 신교육목표분류학에 기반한 2015 개정 초등 과학과 교육 과정 성취기준 분석.” *학습자중심교과교육연구*, 2017, 17(17), 551-573.

10. 이성민, 천주영, 홍훈기. "Bloom의 신교육목표분류학에 기반한 2009 및 2015 개정 과학과 교육과정의 화학 부분 성취기준 비교 분석." *학습자중심교과교육연구*, **2017**, 17(18), 261-289.
11. 최정인, 백성혜. "Bloom의 신교육목표분류체계에 기초한 2007 및 2009 개정 초등학교 과학과 교육과정과 미국의 차세대 과학 표준의 성취기준 비교 분석." *한국과학교육학회지*, **2015**, 35(2), 277-288.
12. 동효관, 하소현, 김용진. "미국 차세대과학표준(NGSS) 수행기대와 한국 과학교육과정 성취 기준의 비교 분석: 중학교 생명과학의 내용요소와 교육목표를 중심으로." *교육연구*, **2015**, 64, 95-125.
13. 위수민, 김보경, 조현준, 손정주, 오창호. "Bloom의 신교육 목표 분류학에 기초한 초등학교 3, 4학년 과학과 7차 교육과정과 2007 개정 과학과 교육과정의 목표체계 비교." *초등과학교육*, **2021**, 30(1), 10-21.
14. 조광희. "통합적 탐구를 지향하는 고등학교 과학 및 사회 교육과정의 성취기준 분석." *학습자중심교과교육연구*, **2015**, 15(3), 515-539.
15. 이수정, 이승미, 최정순, 유금복, 김선희, 조현영, 방은희. "역량 함양을 위한 교과별 주제 중심 교육과정 구성 방안 연구." 한국교육과정평가원, 2021, 연구보고 CRC 2021-9.
16. 교육과정현장네트워크. "2022 개정 교육과정에 대한 제안서". 전국시도교육감협의회, 2021.
17. 이승미, 이병천, 노은희, 이근호, 백경선, 유창원, 김현수, 임윤진, 안중제, 김정윤, 방은희. "교육과정 대강화를 위한 교육과정 구성 방안 연구." 한국교육과정평가원, 2018, 연구보고 CRC 2018-9.
18. 천주영. "과학과 교육과정의 지역화 정책 측면에 관한 비판적 탐색: 초등 교육과정 편성·운영 지침 및 성취기준을 중심으로." 서울대학교 대학원, 2022, 박사학위논문.
19. Lee, O., Quinn, H. & Valdes, G.. "Science and Language for English Language Learners in Relation to Next Generation Science Standards and with Implications for Common Core State Standards for English Language Arts and Mathematics." *Educational Researcher*, **2013**, 42(4), 223-233.
20. 김종윤, 이승미, 박선화, 임윤진, 배화순. "성취기준 질 제고를 위한 국제 비교 연구." 한국교육과정평가원, 2018, 연구보고 CRC 2018-15.
21. 천주영, 이경건, 홍훈기. "과학과 교육과정 지역화 정책에 대한 전문가 인식 탐색: 교육과정 편성·운영 지침 및 성취기준 개정을 중심으로." *한국과학교육학회지*, **2021**, 41(6), 483-499.
22. 정영근, 민용성, 이병천, 권점례. "우리나라 학교 교육과정 거버넌스 변화의 방향 탐색: 교사와 교육전문직의 인식을 기반으로." *교육과정평가연구*, **2021**, 24(4), 1-29.



**천 주 영** Chun Jooyoung

- 이화여자대학교 초등교육과 학사(2000.3-2004.2.)
- 고려대학교 교육학(영재교육전공) 석사(2005.9-2008.2. 지도교수 : 황우형)
- 서울대학교 교육학(화학교육전공) 박사(2014.9-2022.8. 지도교수 : 홍훈기)
- 서울특별시교육청 교사(2004.9-2019.8.)
- 서울특별시교육청 장학사·교육연구사(2019.9-현재)
- 현재 서울특별시교육청 감사관실 근무

KAIST



# 금속신경단백질화학 연구단

Center for MetalloNeuroProteinoChemistry

“ 뇌신경 내 금속-단백질 네트워크  
규명을 통한 신경퇴행성질환 정복 ”

대전광역시 유성구 대학로 291, KAIST  
자연과학대학 화학과 E6-4, 5109호

042) 350-2826

miheelim@kaist.ac.kr

<https://sites.google.com/site/miheelimlab>

KAIST 금속신경단백질화학 연구단(연구단장: KAIST 화학과 임미희 교수)의 연구 분야는 생무기화학, 화학 생물학, 의약화학 및 신경과학 분야입니다. 연구단의 연구 목표는 [그림 1]에 보이는 단백질, 신경전달물질, 산화 스트레스 및 염증 매개체로 구성된 금속 관련 생체 내 네트워크가 알츠하이머 질환과 파킨슨병을 포함한 치매와 어떻게 연관되어 있는지 확인하고, 그 이해를 통해 질환의 효과적인 치료제 및 진단제를 개발하기 위한 방

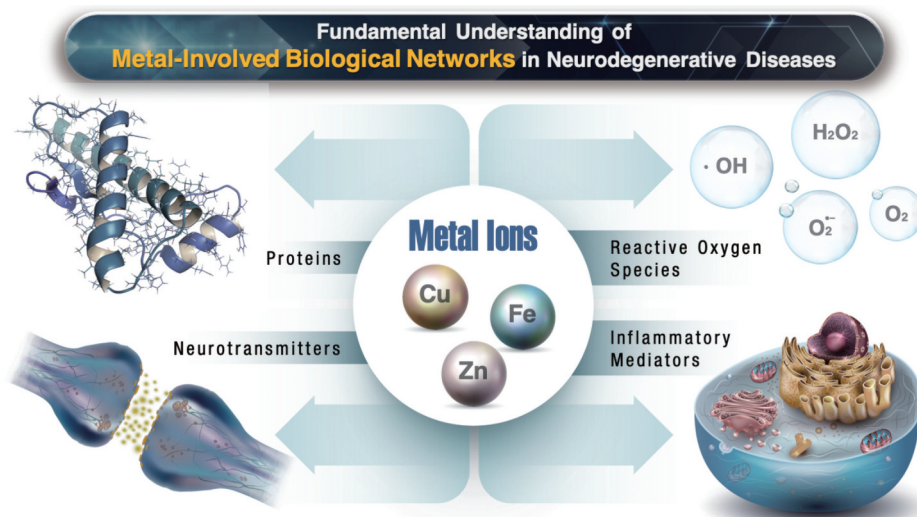


그림 1. KAIST 금속신경단백질화학 연구단의 최종 연구 목표 [Acc. Chem. Res. 2014, 47, 2475; Chem. Soc. Rev. 2017, 46, 310; Chem. Rev. 2019, 119, 1221; Acc. Chem. Res. 2021, 54, 3930; Coord. Chem. Rev. 2023, 478, 214978]

향을 제시하는 것이다. 이러한 목표는 (i) 원자·분자 수준에서 복잡하고 상호적으로 연결되어 있는 질환의 발병 기전을 규명하고, (ii) 금속, 다양한 단백질 및 신경전달물질과 같은 다른 분자들 사이의 복잡한 네트워크의 이해를 통해 소분자 기반 또는 단백질 기반 멀티타스킹 화학도구, 치료제 및 진단제로 개발하고자 하는 것이다[그림 2]. 연구단의 연구원과 학생들은 합성 화학(유기 합성 및 무기 합성), 생물 물리적 방법(핵자기 공명분석법, 전자 상자기성 공명분석법, 적외선 분광법, 원편광 이색성 분광법, 자외선-가시광선 분광법, 질량 분석 및 X-선 결정학), 생화학 및 생물학적 방법(생화학적 분석, 포유류 세포 배양/분석 그리고 생체 내 실험) 등의 지식을 습득하고 다양한 전문 분야에 진출하고 있다.

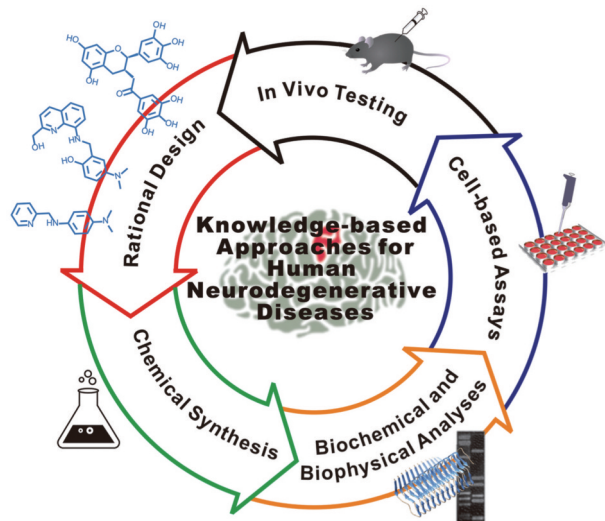


그림 2. KAIST 금속신경단백질화학 연구단의 대학제간 연구 접근

### Project 1 금속-아밀로이드 펩타이드 또는 단백질 착물과 신경퇴화와의 연관성 규명

신경퇴행성질환에 금속-아밀로이드 펩타이드 또는 단백질 착물이 직접적으로 관여하는 것을 규명하기 위해 KAIST 금속신경단백질화학 연구단은 이들을 표적으로 할 수 있는 화학도구를 개발해 왔다. 특히, 금속(구리 혹은 아연)-아밀로이드 착물과 알츠하이머병의 병리와의 연관성을 규명하기 위해, 연구단은 금속-아밀로이드 착물을 표적으로 삼고 이들의 반응성(응집 및 활성 산소종 생성 등)을 제어할 수 있는 소분자 화합물 기반 화학도구 개발에 성공하였다[그림 3]. 합리적인 구조 또는 구조 메커니즘 기반 설계 전략에 따라 연구단은 체외 및 생체

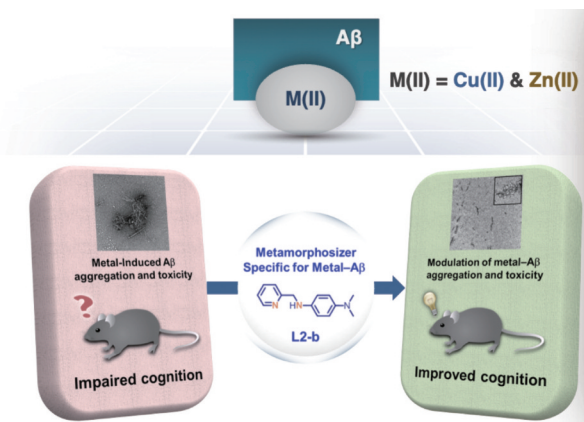


그림 3. 알츠하이머 질환 뇌에서 금속-아밀로이드 착물을 표적하여 반응성을 조절하고 인지능력을 향상시키는 소분자 화합물 기반 화학도구 개발

내에서 금속-아밀로이드 착물을 표적화하고 조절하는 화학 시약을 성공적으로 개발하였다. 이러한 화학 도구를 알츠하이머 질환 마우스에 투여한 결과 금속-아밀로이드 착물의 양이 감소하고 인지 결함이 개선되었다. 더 나아가, 연구단은 레독스 활성을 가진 금속(예, Cu(II))과 아밀로이드 착물을 특정하게 타겟하고 산소와의 반응성을 이용해 금속-아밀로이드 착물의 화학적 변형시켜 독성을 조절할 수 있는 화학 도구 개발도 최근에 성공적으로 이뤘다[그림 4]. 이러한 연구 결과는 금속-아밀로이드 착물이 알츠하이머 질환의 병리와 직접적으로 연관되어 있음을 명확하게 증명하였다.

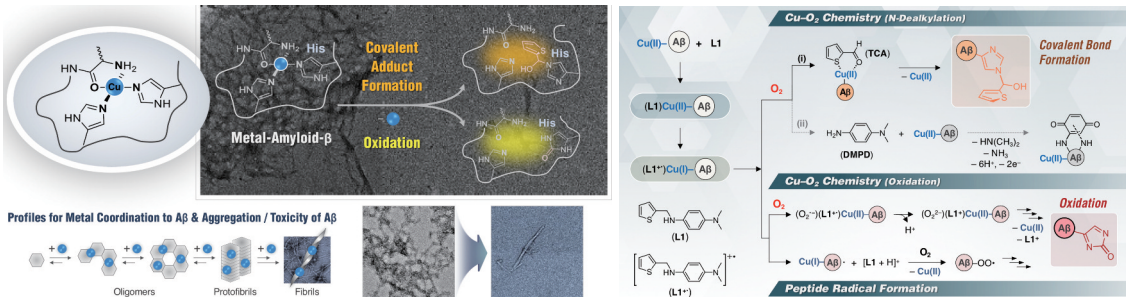


그림 4. 알츠하이머 질환 뇌에서 발견되는 구리-아밀로이드 착물을 표적하여 화학적 변형을 유도하여 반응성을 조절할 수 있는 화학도구 개발. 개발된 화학도구를 이용해 구리-산소 화학을 유도해서 아밀로이드-베타 펩타이드의 화학적 변형 성공 하였음 [Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2020, 117, 5160].

Project 2 신경퇴행성질환 뇌신경계 내 새로운 금속-단백질-단백질 상호작용 네트워크 발굴 및 정립

KAIST 금속신경단백질화학 연구단은 신경 퇴화와 관련된 신경독성과 금속 이온 및 단백질이나 신경전달 물질과 같은 생체 분자 그리고 뇌에 존재하는 아밀로이드성 단백질 간의 상호작용을 규명하기 위해 많은 노력을 하고 있다[그림 1]. 연구단은 생무기적, 생화학적 그리고 생물리학적 방법을 통해 다양한 단백질과 금속 이온, 아밀로이드성 단백질, 또는 그 둘 모두의 직접적인 상호작용과 이에 따른 아밀로이드성 단백질의 응집 경로 및 독성에 대한 영향을 규명하고 있다.

연구단은 아주 최근에 알츠하이머 질환 발병 기전 내 금속에 의한 신경전달물질의 구조 및 기능 변화에 관련된 새로운 역할을 세계 최초로 규명하였다[그림 5]. 알츠하이머병 병적 요인으로 인해 생성된 신경전달물질 소마토스테틴\* 응집체는 수용체에 더이상 결합할 수 없는 것을 증명하였으며, 이는 신경전달물질로서의 본연의 역할을 잃은 것으로 해석되었다. 더 나아가, 소마토스테틴 자체 또한 금속의 유무에 따라 아밀로이드-베타의 응집 경로를 바꾸고 독성 개선 효과를 보았다. 소마토스테틴은 금속-아밀로이드-베타 응집체를 무정형으로 만들어 세포막과의 상호작용을 저해시키고 그에 따라 세포 독성을 완화할 수 있다. 본 연구단은 알츠하이머병 발병 기작 내 소마토스테틴의 새로운 역할을 최초로 제안했다. 따라서 아밀로이드 베타와 금속 등 복잡하게 얽혀있는 치매 네트워크의 새로운 바이오마커를 발굴하는 데에 실마리를 제시해 주었다.

\*Somatostatin, a peptide hormone regulating the endocrine system with the potential to induce hyperactivity-induced excitotoxicity



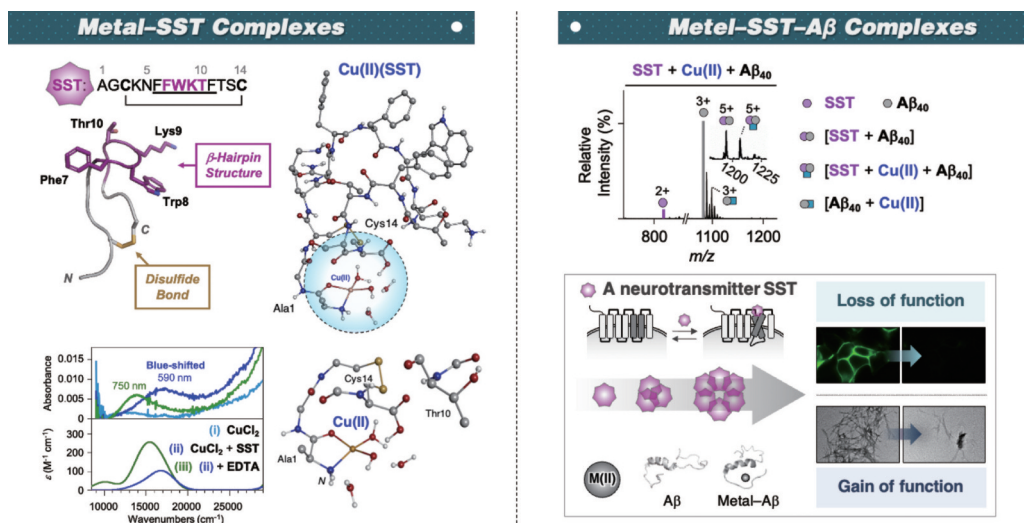


그림 5. 금속-소마토스테틴 착물 형성, 금속-소마토스테틴-아밀로이드-베타 복합체 형성, 그로인한 소마토스테틴의 구조 및 아밀로이드-베타 응집 경로에 미치는 영향 분석 [Nat. Chem., 2022, 14, 1021]

**Project 3** 다중 위험 인자들 조절가능한 멀티태스킹 치료제 후보군 개발

우리는 알츠하이머 질환의 치료 후보 물질로서 소분자 화합물(금속 중심 네트워크를 강조하며 여러 방향으로 표적가능한 치료제)의 발견에 대해 새로운 방향을 제시하고 다중 병적 요소들(금속, 금속이 없거나 금속에 결합된 잘못 접힌 단백질과 활성 산소종 등)을 표적하고 그들의 반응성을 동시에 조절할 수 있는 멀티태스킹 소분자 화합물 개발 가능성을 증명해 오고 있습니다[그림 6]. 특히, 아주 작은 화학구조에 치환기를 간단히 도입하여 화학적 성질(레독스 성질 및 병적 요소들과 상호작용 등)의 변화시켜 알츠하이머병 다중 위험인자들 타겟하고 조절할 수 있는 화합물 개발에 필요한 최소 설계 원리(Minimalist Design Principle)을 정립하였다[그림 6]. 연구단은 정립된 원리에 맞는 소분자 화합물의 체외 및 체내 효능성을 증명하면서 신약 후보군을 발굴하고 있다.

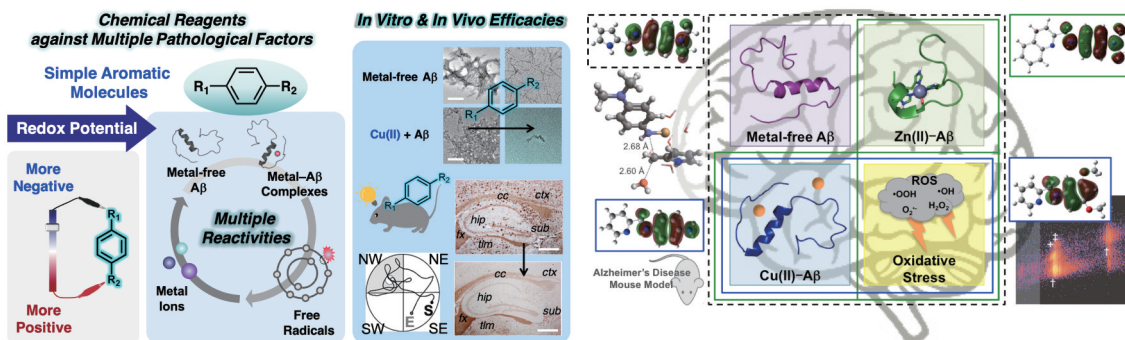
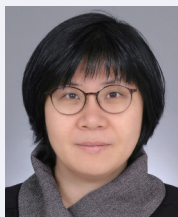


그림 6. 다중 위험 인자들 또는 선택적 돌 또는 그 이상 인자들을 조절가능한 소분자 화합물 개발

[J. Am. Chem. Soc. 2014, 136, 299; J. Am. Chem. Soc. 2015, 137, 14785; Nat. Commun. 2016, 7, 13115; Chem. Rev. 2019, 119, 1221; J. Am. Chem. Soc. 2020, 142, 8183]



**KAIST**  
금속신경단백질화학 연구단



임미희 연구단장  
KAIST 화학과 교수

연구단을 이끌고 있는 임미희 KAIST 교수는 이화여자대학교 화학과에서 학사(1999)를 졸업하고 동 대학원에서 생무기화학 전공으로 석사(2001) 학위를 취득하였다. 미네소타대학 화학과 방문 연구원(2001-2002) 이후 메사추세츠 공과대학(MIT) 화학과에서 무기화학 전공으로 박사(2006) 학위를 취득하였다. 이후 캘리포니아 공과대학(Caltech)에서 박사 후 연구원(2006-2008)으로 근무하다 2008년 미시간 대학교(University of Michigan) 화학과 및 생명과학연구소 조교수로 독립적인 연구 활동을 시작하였다. 2013년 UNIST 화학과, 2018년 KAIST 화학과로 이직하여 현재 KAIST 지정석좌교수로 재직 중에 있다. 2022년부터 리더(창의)연구지원사업에 선정

되어 KAIST 금속신경단백질화학 연구단을 이끌면서 인간 뇌 속 금속-단백질 및 금속-단백질-단백질 상호작용으로 이루어진 네트워크를 새롭게 발굴하고 신경퇴화와의 연관성 규명에 대한 연구를 진행하고 있다. 우수 연구업적을 기반으로 국내·외에서 ‘올해의 여성과학기술인상’, ‘에쓰-오일 차세대과학자상’, ‘Asian Biological Inorganic Chemistry (AsBIC) James Hoeschele Award’, ‘Society of Biological Inorganic Chemistry (SBIC) Early Career Award’, ‘한국을 빛낼 젊은 과학자 30인’ 선정, ‘KCS-Wiley 젊은화학자상’ 등을 수상하였다. 현재 학계 기여도로 『Frontiers in Chemical Biology』 저널 전문편집장, 『Dalton Transactions』 저널 부편집장, 『Accounts of Chemical Research』, 『Chem』, 『ACS Central Science』, 『Chemical Science』, 『Chemical Communications』, 『ACS Applied Bio Materials』, 『Journal of Inorganic Biochemistry』, 『Metallomics』 등 자문편집위원으로 위촉되어 활동하고 있다. 또한 국내외 전문 활동(대통령직속 국가과학기술자문회의 자문위원 및 생명의료전문위원, 대한화학회 기획이사 및 국제협력이사, 대한화학회 무기화학분과회 총무, 홍보 및 재무간사, 한국연구재단 기초연구본부화학 전문위원, 한국과학기술한림원 여성과학자위원회 위원, SBIC Council Committee; IUPAC Inorganic Chemistry Division Member; Royal Society of Chemistry Fellow 및 한국대표 등 역할을 충실히 수행하고 있다.





## 김상민 Sangmin Kim

연세대학교 이과대학 화학과, 조교수  
 sangmink@yonsei.ac.kr  
<https://sites.google.com/view/skimgroup>

### 소개글

김상민 교수는 유기금속화학 및 주족원소화학 등의 분자무기화학을 이용한 다양한 무기 및 유기반응 촉매 개발에 관한 연구를 수행해왔다. 특히 박사과정 중에는 질소로부터 유도된 분자성 전이금속 나이트라이드를 촉매적 수소화 반응을 통해 암모니아로 전환하는 것에 관한 연구를 진행하였다. 박사 후 연구원 중에는 다양한 종류의 보론클러스터들의 산화환원 반응에 대해 연구하였으며 이를 응용하여 새로운 선택성을 가지는 유기반응의 개발을 수행하였다. 현재는 14족 기반 분자성 주족원소 화합물의 합성 및 촉매적 반응성 조사와 더불어 새로운 형태의 금속-리간드 협동성에 관한 주제를 토대로 연구를 진행하고 있다.

### 주요연구분야

- 무기화학(Inorganic Chemistry)
- 유기금속화학(Organometallic Chemistry)
- 주족원소화학(Main Group Chemistry)

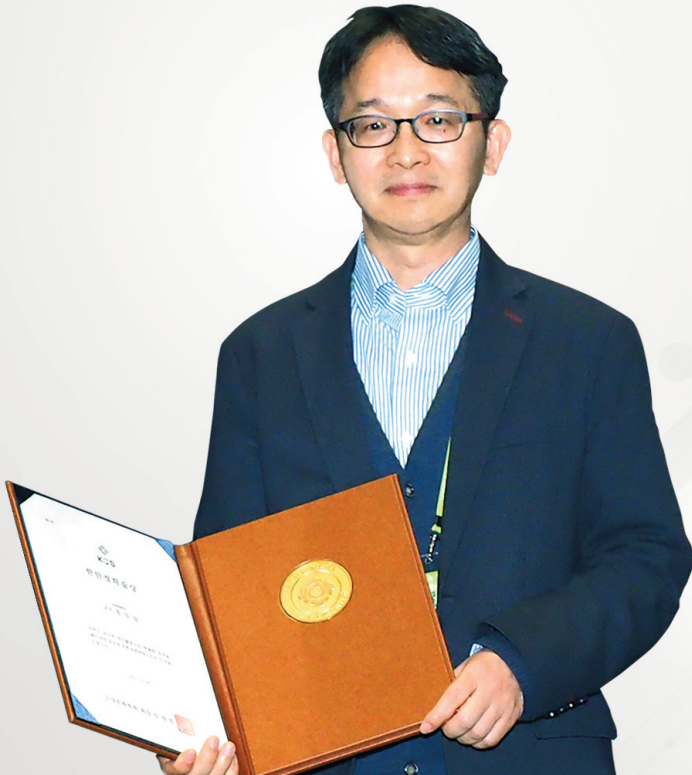
### 대표논문

1. **S. Kim**, J. W. Treacy, Y. A. Nelson, J. A. M. Gonzalez, M. Gembicky, K. N. Houk, A. M. Spokoyny, "Arene C—H Borylation Strategy Enabled by a Non-Classical Boron Cluster-Based Electrophile." *Nat. Commun.* **2023**, *14*, 1671.
2. **S. Kim**, J. Kim, H. Zhong, G. B. Panetti, P. J. Chirik, "Catalytic N—H Bond Formation Promoted by a Ruthenium Hydride Complex Bearing a Redox-Active Ligand." *J. Am. Chem. Soc.* **2022**, *144*, 20661–20671.
3. **S. Kim**, Y. Park, J. Kim, T. P. Pabst, P. J. Chirik, "Ammonia Synthesis by Photocatalytic Hydrogenation of a N<sub>2</sub>-Derived Molybdenum Nitride." *Nat. Synth.* **2022**, *1*, 297–303.
4. **S. Kim**, F. Loose, P. J. Chirik, "Beyond Ammonia: Nitrogen—Element Bond Forming Reactions with Coordinated Dinitrogen." *Chem. Rev.* **2020**, *120*, 5637-5681.
5. **S. Kim**, H. Zhong, Y. Park, F. Loose, P. J. Chirik, "Catalytic Hydrogenation of a Manganese(V) Nitride to Ammonia." *J. Am. Chem. Soc.* **2020**, *142*, 9518-9524.
6. **S. Kim**, F. Loose, M. J. Bezdek, X. Wang, P. J. Chirik, "Hydrogenation of N-Heteroarenes Using Rhodium Precatalysts: Reductive Elimination Leads to Formation of Multimetallic Clusters." *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, *141*, 17900-17908.
7. **S. M. Kim**, D. Lee, S. H. Hong, "Gold(I)-Catalyzed, Stereocontrolled Enamide Synthesis from Primary Amides and Propargyl Aldehydes Using a Tandem Strategy." *Org. Lett.* **2014**, *16*, 6168-6171.

- 서울대학교 화학부, 학사(2008.3–2014.2)
- 서울대학교 화학부, 석사 (2014.3–2016.2, 지도교수 : 홍순혁)
- 서울대학교 나노입자 연구단, 연구원 (2016.3–2016.8, 지도교수 : 홍순혁)
- 프린스턴대학교 화학과, 박사 (2016.9–2021.5, 지도교수 : Paul J. Chirik)
- UCLA 화학 및 생화학과, 박사 후 연구원 (2021.6–2023.2, 지도교수 : Alexander M. Spokoyny)
- 연세대학교 이과대학 화학과, 조교수 (2023.3–현재)

화학세계가 만난 화학자 18

# “화학을 넘어 초융합적 연구를 지향”



〈화학세계가 만난 화학자〉에서는 대한민국 화학계에 공헌한 화학자와의 인터뷰를 소개해 드리고 있습니다. 이번 호에는 제131회 대한화학회 학술발표회에서 한만정 학술상을 수상하신 홍창섭 교수님(고려대학교 화학과)을 모셨습니다. 교수님께서서는 다공성 유기/무기분자소재를 디자인 및 합성하여 에너지와 환경 분야에서 중요한 기체들의 저장과 분리에 응용하는 연구를 진행하고 계십니다. 이에 교수님의 연구 및 그 외 다양한 면모를 소개합니다.

[모더레이터: 한순규 교수 (KAIST 화학과)]

**1. 「화학세계」 독자에는 청소년 및 중고등학교 선생님도 포함되어 있습니다. 교수님께서서는 중고등학교 학창시절부터 화학에 관심이 많으셨나요? 교수님께서 화학을 전공하시게 된 특별한 계기가 있었나요?**

청소년 시절 장래 희망이 자주 바뀌었습니다. 초등학교 때는 나폴레옹 전서를 읽고 군인이 되고 싶었고 중학생 때는 비스마르크 전기에 감동하여 외교관이 되고 싶었습니다. 그러다가 고등학교 때에 일본 학자가 쓴 초전도체 서적을 읽고 과학자가 되어야겠다고 결심했습니다. 특히 초전도체처럼 신소재를 연구하는 과학자가 되고 싶었습니다. 그 후 입학한 KAIST에서는 무학과제를 운영하고 있었기 때문에 기초 교양과목을 수강하고 나서 물질을 다루는 화학과를 자연스럽게 선택하게 되었습니다.

- 2. 교수님께서 KAIST 화학과에서 학사, 석사, 박사학위를 받으시고, 이후 한국표준과학연구원에서 3년간 근무하셨고, 이후 UC Berkeley 화학과에서 포닥을 거치시고 현재의 고려대학교로 2003년에 부임하셨습니다. 그 과정에서 다양한 스승에게서 사사하셨는데, 교수님을 지도하신 분들에 대한 소개를 해주실 수 있을까요? 그 분들은 현재의 교수님을 있게 한데 어떠한 영향을 끼쳤나요?**



■ 박사과정 때 일본 나고야대학에서 개최된 심포지엄 참석 후 나고야성에서 도영규 교수님과 함께

KAIST 대학원 지도교수님은 도영규 교수님입니다. 교수님께 학부 무기화학 강의를 수강했을 때 무기화학이란 학문이 유기화학에 비해 제대로 정립되지 않은 것 같아 매료되었고 전통적인 무기합성에 대해 공부하고 싶다는 생각을 하였습니다. 그 계기로 도영규 교수님 실험실에 석사과정생으로 합류하게 되었습니다. 교수님은 대학원 시절 자유로운 분위기에서 자기주도적 연구를 할 수 있는 실험실 환경을 만들어 주셨습니다. 그리고 언제나 “자신의 기준을 높여서 연구하라.”라고 하셨는데 이 조언이 연구를 진행하는데 에너지가 되었습니다. 표준연구소에서 포닥을 할 때 현재 서강대 화학과에 계시는 허남희 교수님이 지도해 주셨습니다. 술선수범하시며 연구하시는 모습은 저에게 연구자의 자세에 대해 배움을 주셨습니다. 그 후 UC Berkeley 화학과 Jeffrey Long 교수님 그룹에서 포닥을 시작하였습니다.

온화한 성격을 가지고 계시면서 연구에 대해 토론하는 것을 좋아하셨는데, 제가 교수로서 독립적인 실험실을 운영하며 대학원생들과 연구에 관해 토론하는 법을 그때 배웠습니다.

- 3. 『화학세계』의 대학원 독자가 궁금해할 수 있는 질문을 드리겠습니다. 교수님의 대학원 시절은 어떠했나요? 특별히 기억나는 사건이나 경험 혹은 에피소드가 있나요?**

연구실 생활을 할 때 연구계획을 세우고 점검하는 루틴을 가지고 있었습니다. 이런 루틴은 연구를 자기 주도적으로 수행하는 데 도움이 되었습니다. 그 당시 분자자성체 연구를 수행하고 있었는데 국내 전문가가 없어서 어려움을 겪었고 논문 투고 후 리비전 과정에서 리뷰어 코멘트를 보고 배우던 때였습니다. 그때 이 분야 대가 Olivier Kahn 교수님을 학과에서 초청하였습니다. 제가 한 연구에 대해 그 교수님과 면담을 했을 때 대가가 가진 남다른 안목을 경험할 수 있었습니다.

- 4. 지난 춘계 대한화학회에서 진행된 한만정 학술상 수상강연에서 교수님께서 다공성 MOF(Metal Organic Framework)의 디자인을 통해서 효율적으로 이산화탄소 혹은 암모니아를 흡착하는 재료의 개발, 논리적인 분자적 디자인에 기반한 다공성 유기 고분자 기반 양성자 전도성 전해질 연구, 그리고 빛 존재하에서 설파머스터드를 산화시켜 해독할 수 있는 다공성 유기 고분자 물질의 개발에 대해서 발표하셨습니다. 화학과 학부생 정도가 이해할 수 있을 정도로 교수님의 주된 연구 관심사를 간략히 설명해주실 수 있을까요?**

제가 관심을 두고 있는 연구분야는 다공성 물질의 설계와 구조-물성 상관성 규명과 응용성 연구입니다. 대학원 시절만 하더라도 무기화학 분야의 주 관심사는 새로운 물질을 합성하고 구조를 분석하는 데 초점이 있었습니다. 그 후에는 구조와 물성에 대한 이해가 동시에 중요해졌습니다. 현재는 단순한 물성 이해를 넘어 구조 변화를 통해 물성을 조절하고 그 특성을 분자적 수준에서 탐구하는 연구들이 주류를 이루고 있습니다. 다양한 다공성 물질들

이 알려져 있으며 그중 금속-유기 골격체는 무기화학자들의 집중적인 관심을 받아왔습니다. 저의 연구 관심사는 특정한 금속-유기 골격체의 후합성적 변형을 통해 다양한 성질을 구현하는 것입니다. 이와 같은 방법을 활용하면 만능 소재 플랫폼을 만들 수 있을 거로 생각합니다. 이미 알고 있는 구조를 이용하여 원하는 성질을 도입할 수 있으므로 성능을 설계하고 극대화할 수 있는 전략이 가능합니다. 또한 후합성적 변형법을 탄소-탄소 공유결합 기반 특정한 다공성 유기 고분자에 적용해서 맞춤형 성능 구현 연구를 진행하고 있습니다. 이를 통해 에너지/환경 분야에서 대두한 한계 돌파형 연구를 중점적으로 추진하고 있습니다.



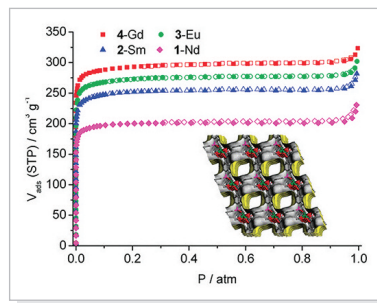
■ 제131회 대한화학회 학술발표회에서 한만정학술상 수상 기념 강연 모습

**5. 교수님께서 지금 주력으로 연구하고 계시는 다공성 물질에 관심을 갖게 되신 계기가 무엇인가요?**

고려대 화학과에 임용된 후에 분자자성체 연구에 매진하였습니다. 이 연구에서는 새로운 물질을 합성한 후에 구조분석과 자기적 성질을 조사하는 게 핵심입니다. 구조분석은 실험실에서 수행할 수 있었지만 자성 측정을 위해 SQUID가 필요했습니다. 다행히 고대 내에 위치한 KBSI에 SQUID가 있어 주말마다 사용할 수 있었습니다. 그런데 이 장비가 고장이 난 후에 자성 측정이 어렵게 되었습니다. 아이러니하게도 이런 연구 환경 변화가 실험실에 구축된 장비로 실험을 마무리할 수 연구분야를 찾게 된 계기가 되었습니다. 그 당시 금속-유기 골격체 연구가 무기화학 분야에서 크게 주목을 받고 있었고 국내 몇몇 그룹에서도 해당 연구를 세계적 수준으로 진행하고 있었습니다. 금속-유기 골격체의 기공을 이용한 응용분야가 매우 광범위하다는 점이 저에게는 매력적으로 다가왔고 본격적인 연구를 시작하게 한 또 다른 계기가 되었습니다.

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

금속-유기 골격체 관련 연구를 시작하면서 전문지식이 없어서 어려움이 많았습니다. 논문들을 정독하면서 다공성 물질 분석법을 하나하나 배워 나갔습니다. 특히 한양대에 계신 전형필 교수님의 논문들이 큰 도움을 주었습니다. 우여곡절 끝에 란탄족 금속 기반 골격체를 합성하고 구조분석과 흡착특성 연구를 마칠 수 있었고, 그 결과를 2010년 『Inorganic Chemistry』 (<https://doi.org/10.1021/ic902182x>)에 게재할 수 있었습니다. 이는 금속-유기 골격체 관련 실험실 최초의 논문이어서 저에게는 특별한 의미가 있습니다.



■ 『Inorganic Chemistry』에 나온 논문 그래픽 초록

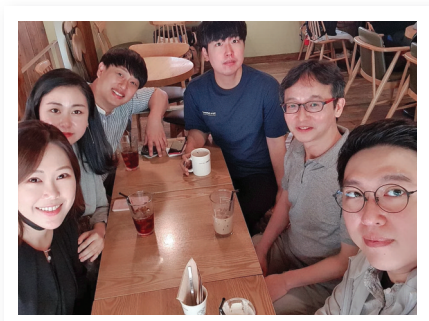
**7. 교수님께서서는 학창시절(중고등학교), 학부시절, 대학원시절, 포닥시절, 신입교수 시절, 현재 중 가장 스트레스가 많았던 시기가 언제였나요? 또 반대로 가장 행복한 시기는 언제였나요?**

박사 학위 후에 한국표준과학연구원에서 3년간 포닥 생활을 했습니다. 허남희 박사님이 창의연구단을 꾸리고 계셨는데 매우 자유롭고 개방적인 분위기를 만들어 주셨습니다. 연구원들 간에 족구도 하고 그 당시 유행했던 DDR을 랩 컴퓨터에 연결해서 점심식사 후에 운동 삼아 하곤 했습니다. 그리고 날이 좋으면 계룡산 자락에 있는 분위기 좋은 카페에 가서 바쁜 가운데 여유를 즐기기도 했습니다. 이때가 즐거웠던 시절로 떠오릅니다. 그 후에

UC Berkeley에서 포닥 생활을 시작했습니다. Jeff Long 교수님께서 연구테마로 항상 이방성 자성 나노 클러스터 화합물 개발 미션을 주셨는데 제가 생각했던 주제가 아니어서 첫 미팅 후 매우 당황했던 기억이 납니다. 연구 진행이 더디고 잘 안되어 고민이 많았습니다. 그때 Peidong Yang 그룹에 포닥으로 온 현재 카이스트 화학과에 있는 송현준 교수가 논문을 찾아 주면서 힘내라고 응원해 주기도 했습니다. 그 시절이 가장 스트레스를 받았던 시기였습니다.

**8. 교수님께서는 많은 후학을 배출하셨고 그들은 지금 산업계 학계 등 다양한 분야에서 활약 중입니다. 훌륭한 많은 제자가 있지만, 특별히 기억나는 제자가 있으신가요? 특별히 기억나는 이유가 무엇인가요? 구체적인 일화를 소개해주시면 감사하겠습니다.**

금속-유기 골격체 연구를 성공적으로 시작하는데 크게 기여한 이우람 박사(한림대학교 화학과), 분자자성체 연구의 전성기를 이룬 임광수 박사(한국화학융합시험연구원), 연구과제 수주 일등공신인 송정화 박사(한라대학교 교양과정부), 다공성 유기 고분자 연구의 기틀을 마련한 강동원 박사(인하대학교 화학과), 그리고 MOF 대량 합성의 기반을 다진 김정은(삼성 디스플레이) 등을 포함하여 제 실험실을 거쳐 간 모든 제자에게 감사한 마음이 있습니다. 현재 각자가 처한 위치에서 제 역할을 멋지게 해내는 모습들이 참 대견하고 자랑스럽습니다.



■ 스승의 날을 맞이하여 제자들의 방문: (왼쪽부터) 김정은, 송정화 박사, 임광수 박사, 강동원 박사, 홍창섭 교수, 이우람 박사

**9. 사회 변화의 속도가 날로 빨라지고 있는 요즘입니다. 화학은 하루가 다르게 변화하는 사회에서 어떻게 대처해야 할까요? 화학자는 어디에 주안점을 두고 연구 및 교육을 해야 할까요?**

인류가 직면한 문제 중의 하나로 급격한 기후 변화를 야기하는 지구온난화는 이제까지 경험하지 못했던 자연 재해를 초래할 것으로 예상하고 있습니다. 이런 문제를 해결하기 위해 과학계에서는 에너지와 환경 분야 연구의 중요성이 부각되고 있습니다. 화학은 분자 수준에서 자연현상을 들여다보는 학문이기 때문에 원천소재 개발, 반응 메커니즘 이해, 특성 최적화 등 신물질에 대한 기초적인 이해를 기반으로 과학 난제를 해결하는 데 선도적이고 주도적인 역할을 할 수 있을 것입니다. 또한 연구와 연계하여 축적된 과학지식이 어떻게 사회 문제 해결에 기여하는지에 대한 콘텐츠를 개발하여 교육에 포함하면 좋을 것 같습니다.

**10. 지금 이 시간에도 화학연구를 열심히 해나가는 신진/중견 화학 연구자에게 조언의 말씀을 해주실 수 있을까요?**

요즘 화학저널에 게재된 연구논문을 보면 기초뿐만 아니라 응용 연구도 상당히 강화되고 있는 추세입니다. 아무리 개발한 물질이 흥미 있다고 해도 응용성이 없으면 주목도가 떨어지고 있습니다. 따라서 연구목표가 인류의 삶과 관련된 산업·사회·과학 문제와 밀접하면 가시성이 높을 것으로 생각합니다. 이를 위해 화학이라는 울타리에만 머물지 말고 그 경계를 넘어 초 융합적 연구를 지향하면 좋을 것 같습니다. 다양한 분야 전문가 그룹과 협력연구를 적극적으로 추진하길 추천 드립니다.

# KCS 하이라이트

## 19 천연물 전합성 및 생리활성물질 합성 관련 연구

이번 호에는 지난 2020–2023년 사이에 BKCS와 JKCS에 보고된 천연물 전합성 및 생리활성물질 합성 관련 연구 논문을 소개합니다. 회원분들의 많은 관심 부탁드립니다.

글 이에서(광주과학기술원 화학과 석사과정), 정원진(광주과학기술원 화학과 부교수, wjchung@gist.ac.kr)

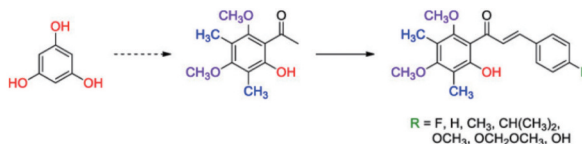
BKCS

Vol.42 No.01 p.66–71 / Article

중앙대학교 박광용 교수 연구팀에서 다양한 약리활성을 나타내는 것으로 알려진 4',6'-다이메톡시-2'-하이드록시-3',5'-다이메틸찰콘(MDMC)의 유도체 라이브러리를 효율적으로 구축할 수 있는 전합성 전략을 발표하였습니다. [2021년, 1월호, DOI: 10.1002/bkcs.12156]

### Total Syntheses of 4',6'-Dimethoxy-2'-Hydroxy-3',5'-Dimethylchalcone Derivatives

Chalcone derivatives afford several pharmacological activities. However, a general synthetic method for 2',4'-dihydroxy-6'-methoxy-3',5'-dimethylchalcone (DMC) derivatives has not been reported thus far. To address this, the preparation of 4',6'-dimethoxy-2'-hydroxy-3',5'-dimethylchalcone (MDMC) derivatives, modified compounds of DMC, in excellent overall yields is reported herein. These compounds have recently attracted growing attention due to their various pharmacological activities. Di-*O*-methyl-dimethylphloroacetophenone, the key intermediate containing the B-ring moiety, was fabricated by four efficient reaction steps from commercially available phloroglucinol in a 50.1% isolated yield overall. Our synthetic route, which constructs the chalcone skeleton in the final stage via a Claisen–Schmidt condensation of the key intermediate with the desired benzaldehyde derivative, can rapidly produce a vast library of DMC derivatives.



BKCS

Vol.42 No.03 p.416–419 / Article

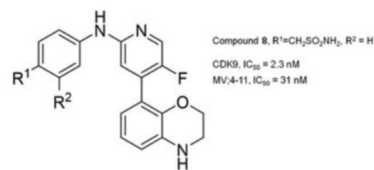
중앙대학교 천영진 교수 연구팀에서 일련의 신규 3,4-다이하이드로-2H-벤조자진 유도체를 고안하여 합성하고, CDK9 억제제로써의 항암성 평가를 통해 효율과 의약적 특성이 뛰어난 화합물을 개발하였습니다. [2021년, 3월호, DOI: 10.1002/bkcs.12204]

### Synthesis and Evaluation of a 3,4-dihydro-2H-benzoxazine Derivative as a Potent CDK9 Inhibitor for Anticancer

Cyclin-dependent kinase (CDK) 9 is a protein kinase that plays a major regulatory role in the process of transcription, thereby representing an attractive target in cancer therapy. A series of novel, highly potent, selective



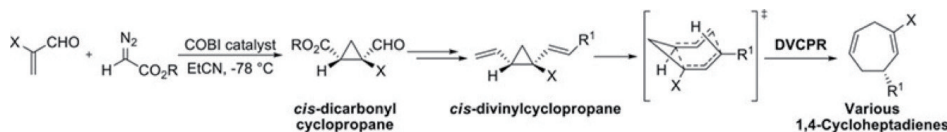
derivatives (coined compounds **8–15**) were designed, synthesized, and evaluated for their inhibitory effect on CDK functions using cancer cell lines. Here, we showed that our compound **8** exhibited a potent CDK9 inhibitory activity in ICR mice, with an  $IC_{50}$  value of 2.3 nM as well as favorable pharmacokinetic properties. Using an MV4-11 xenograft mouse model, compound **8** showed antitumor efficacy at a dose of 10 mg/kg; compound **8** treatment was well tolerated, with no adverse effects on body weight or animal health. Our *in vitro* and *in vivo* findings strongly suggest that compound **8** holds great promise for the development of highly potent CDK9 inhibitors in anti-cancer approaches.



성균관대학교 류도현 교수 연구팀에서 카이랄성 COBI 촉매를 활용한 거울상 이성질 선택적 사이클로프로판화 반응과 이알케닐사이클로프로판의 코프 재배열 반응을 통해 (-)-딕티오테렌 C'의 전환성을 비롯하여 다양한 1,4-사이클로헵타다이엔의 비대칭 합성법을 개발하였습니다. [2021년, 4월호, DOI: 10.1002/bkcs.12250]

### Asymmetric Synthesis of (-)-Dictyopterene C' and its Derivatives via Catalytic Enantioselective Cyclopropanation

An efficient and simple method for enantioselective synthesis of (-)-dictyopterene C' and its derivatives was developed on the basis of chiral oxazaborolidinium ion-catalyzed enantioselective cyclopropanation and divinylcyclopropane-cycloheptadiene rearrangement. Utilizing the Julia-Kocienski reaction and Sonogashira and Suzuki coupling reactions, various 1,4-cycloheptadiene compounds were synthesized with good results.



중앙대학교 민경훈 교수 연구팀에서 LRRK2 저해제로서 효율이 높은 싸이노피리미딘 유도체를 등입체 치환을 통해 새롭게 고안 및 합성하고, 구조-활성 관계를 연구한 결과를 보고하였습니다. [2022년, 2월호, DOI: 10.1002/bkcs.12450]

### Discovery of novel thienopyrimidine derivatives as LRRK2 inhibitors

Leucine-rich repeat kinase 2 (LRRK2) is considered a promising therapeutic target for Parkinson's disease, Crohn's disease, and cancer. Despite considerable research, none of these inhibitors are available for clinical application. Herein, we designed and synthesized novel thienopyrimidine derivatives by a bioisosteric replace-

ment and investigated their structure–activity relationships. Thieno[3,2-*d*]pyrimidine derivative **22** showed the most potent inhibitory activity and inhibited both wild-type and G2019S mutant LRRK2 with IC<sub>50</sub> values of 30 and 14 nM, respectively.

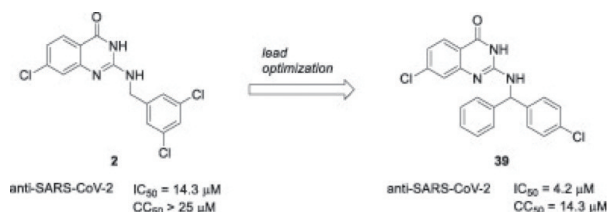


한국화학연구소 박철민 교수 연구팀에서 2-벤질아미노퀴나졸린-4(3H)-온 유도체를 다양하게 합성하고, SARS-CoV-2의 잠재적 치료제로서 평가하여 약리적 특성이 뛰어난 물질을 발견하였습니다. [2022년, 3월호, DOI: 10.1002/bkcs.12470]

### Synthesis and biological evaluation of 2-benzylaminoquinazolin-4(3H)-one derivatives as a potential treatment for SARS-CoV-2

Despite the continuing global crisis caused by coronavirus disease 2019(COVID-19), there is still no effective treatment. Therefore, we designed and synthesized a novel series of 2-benzylaminoquinazolin-4(3H)-one derivatives and demonstrated that they are effective

against SARS-CoV-2. Among the synthesized derivatives, 7-chloro-2-(((4-chlorophenyl)(phenyl)methyl)amino)quinazolin-4(3H)-one (Compound **39**) showed highest anti-SARS-CoV-2 activity, with a half-maximal inhibitory concentration value greater than that of remdesivir (IC<sub>50</sub>=4.2 μM vs. 7.6 μM, respectively), which gained urgent approval from the U.S. Food and Drug Administration. In addition, Compound **39** showed good results in various assays measuring metabolic stability, human ether a-go-go, Cytochromes P450 (CYPs) inhibition, and plasma protein binding (PPB), and showed better solubility and pharmacokinetics than our previous work.



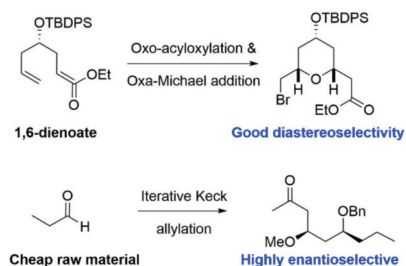
인하대학교 조창범 교수 연구팀에서 N-헤테로고리 카빈 촉매를 활용한 옥소-아실록실화/환원적 옥사-마이클 첨가 전략을 이용하여 세포 독성물질인 (+)-네오펠톨라이드의 주요 부분을 거울상 이성질 선택적으로 합성한 연구를 발표하였습니다.

[2022년, 10월호, DOI: 10.1002/bkcs.12604]

### Studies toward the total synthesis of (+)-neopeltolide using N-heterocyclic carbene-catalyzed oxo-acyloxylation/reductive oxa-Michael addition strategy

This article describes a concise synthesis of two important fragments (tetrahydro-pyran [THP] and ketone moi-

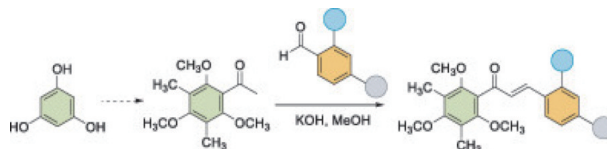
derivatives (coined compounds **8–15**) were designed, synthesized, and evaluated for their inhibitory effect on CDK functions using cancer cell lines. Here, we showed that our compound **8** exhibited a potent CDK9 inhibitory activity in ICR mice, with an  $IC_{50}$  value of 2.3 nM as well as favorable pharmacokinetic properties. Using an MV4-11 xenograft mouse model, compound **8** showed antitumor efficacy at a dose of 10 mg/kg; compound **8** treatment was well tolerated, with no adverse effects on body weight or animal health. Our *in vitro* and *in vivo* findings strongly suggest that compound **8** holds great promise for the development of highly potent CDK9 inhibitors in anticancer approaches.



중앙대학교 박광용 교수 연구팀에서 2',4',6'-트라이메톡시-3',5'-다يمي틸찰콘(DMDMC) 유도체 열두 종의 합성 연구를 발표하였습니다. [2022년 5호, DOI: 10.1002/bkcs.12515]

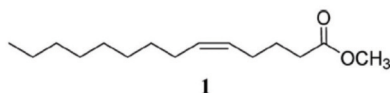
### Total synthesis of 2',4',6'-trimethoxy-3',5'-dimethylchalcone derivatives

2',4'-Dihydroxy-6'-methoxy-3',5'-dimethylchalcone (DMC), which is isolated from plants, has recently attracted much attention due to its beneficial pharmacological effects. The preparation of twelve 2',4',6'-trimethoxy-3',5'-dimethylchalcone (DMDMC) derivatives, which are dimethylated-derivatives of DMC, is reported herein for the first time. Our synthetic method allowed the efficient construction of the DMDMC derivatives from phloroglucinol in 37.8%–46.5% overall yields. This promising approach would be advantageous for the production of many different DMDMC derivatives in a short period of time.



안동대학교 홍용표 교수 연구팀에서 애풍뎡이의 환경친화적 방제를 위한 성페로몬의 합성과 응용에 대한 연구를 발표하였습니다. [2020년, 8월호, DOI: 10.5012/jkcs.2020.64.4.236]

### A Sex Pheromone Synthesis and Application for Eco-friendly Control of Soybean Beetle



「Bulletin of the Korean Chemical Society」

# 논문 투고 시스템 안내 (ScholarOne Manuscripts)

대한화학회가 발간하는 우리 화학회의 얼굴이자 우리 화학인의 학술지인

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

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

대한화학회 회장 신석민

대한화학회 학술지간행위원회 Bulletin지 편집장 남원우

## 1. BKCS 논문 투고 시스템 접속

\* 아래 방법 중 택 1

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

B. [http://new.kcsnet.or.kr/pub\\_bkcs](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

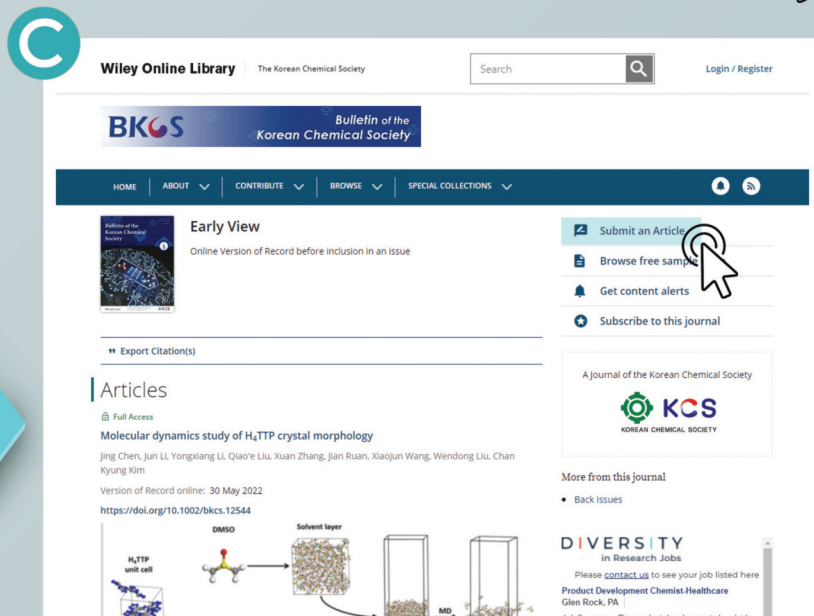
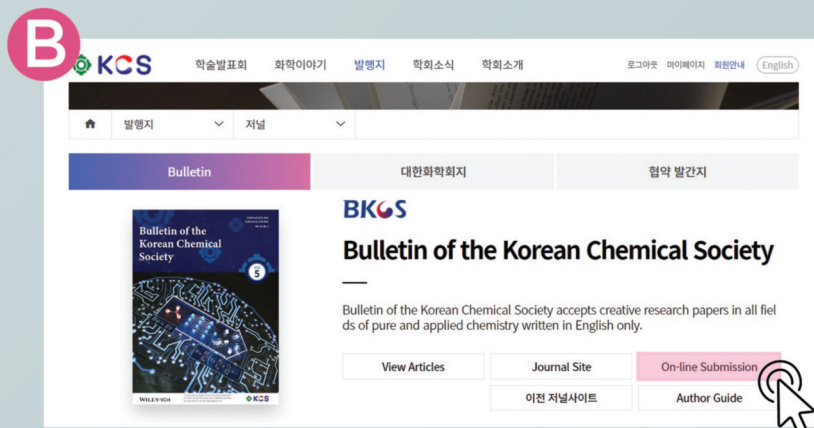
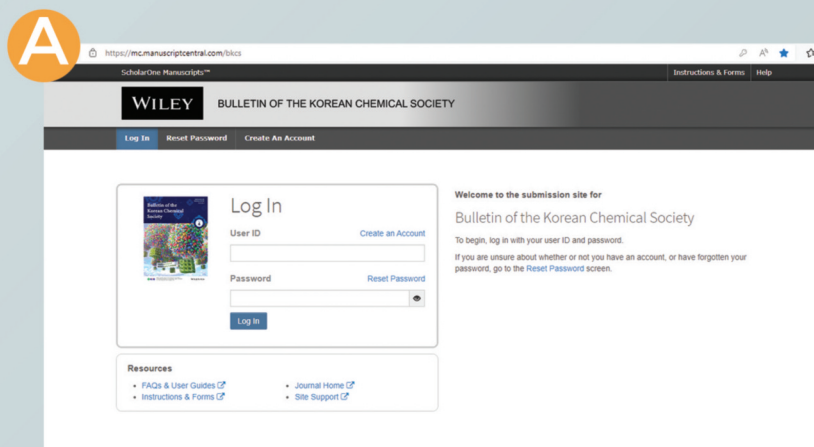
## 2. 계정 개설 후 로그인

- 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](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!

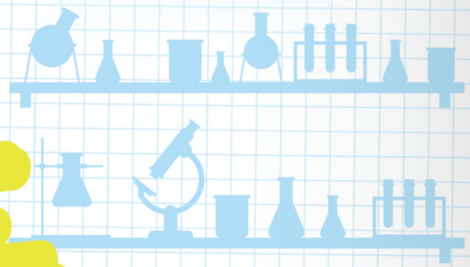


우리 실험실은요!

## 생명나노 화학 연구실

(Bio-nano Chemistry Lab)

글 | 문영선(한양대학교 바이오나노학과,  
moonys720@naver.com)



저희 생명나노화학 연구실(Bio-Nano Chemistry Lab:BNCL)은 2011년 한양대학교 ERICA 바이오나노학과에서 시작하여 채필석 교수님 지도하에 2023년 현재 박사 후 연구원 4명과 석박사 통합과정 4명, 석사 과정 4명으로 구성되어 있습니다. 저희 연구실의 연구주제는 넓게 이야기하면 목표 지향성 기능성 유기분자의 설계 및 개발로 주로 막단백질 구조분석에 유용한 '양친매성 분자'와 다양한 분석을 검출하는 '형광 유기 센서'를 개발하는 것입니다[그림 1].

### 마이셀 형성 양친매성 분자

막단백질은 세포막수송, 세포 인식, 세포 신호전달 등의 다양한 세포 활동에 담당하고 있습니다. 막단백질의 구조가 중요한 이유는 막 단백질의 구조를 통해 이 복잡한 생체고분자의 작용 메커니즘을 분자 수준에서 규명할 수 있기 때문이고 무엇보다도 현재 50% 이상의 약물이 막단백질을 타겟으로 하고 있기 때문입니다. 세포막에 들어있는 막단백질 연구를 위해서는 세포막에서 이를 추출해서 수용액에 용해 시켜야 합니다. 하지만 수용액 환경에 노출되었을 때 막단백질은 응집되거나 변성되는 경향이 커서 원래의 구조와 형태를 잃어버리므로 막단백질 구조는 가장 어려운 연구

중에 하나로 알려져 있습니다. 세포막으로부터 추출한 막단백질을 정제한 후 다양한 분석방법(초저온전자현미경 분석법, 핵자기 공명법, X-선 결정법 등)을 사용하여 단백질이 구조를 규명합니다 [그림 1]. 세포막에서의 추출단계부터 그 구조분석에 이르는 최종 단계까지 막단백질의 구조변화를 방지하기 위해 세포막을 모방할 수 있는 구조가 필요합니다. 이러한 세포막 모방구조가 바로 양친매성 분자가 만들어내는 마이셀입니다. 마이셀은 막단백질 구조연구에 가장 널리 사용하는 세포막 모방구조로 막단백질과 작은 복합체를 형성하여 핵자기 공명법(NMR)과 X-선 결정법을 통해 단백질 구조분석을 가능하게 합니다. 하지만 전통적으로 많이 사용하는 양친매성 분자(예를 들면 DDM)는 불안정한 마이셀을 형성하고 이에 둘러싸인 막단백질도 안정성을 쉽게 잃어버립니다. 이에 마이셀의 장점을 유지하면서도 그 단점을 보완하는 양친매성 분자를 개발하는 일은 막단백질 구조연구 분야에 매우 중요한 일입니다. 저희 연구실에서는 LMNG와 GDN과 같은 새로운 양친매성 분자를 개발하였으며 두 개의 양친매성 분자는 지난 10년간 수

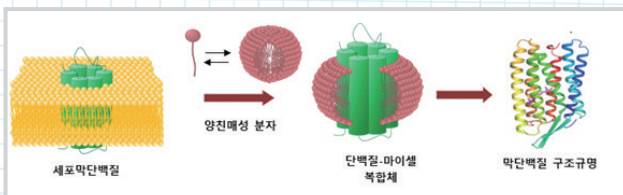


그림 1. 주세포막 단백질 추출 및 구조 규명에서 양친매성분자의 역할. 양친매성 분자는 마이셀을 형성하여 막단백질 주변을 둘러싸아 단백질의 구조안정화에 기여한다.

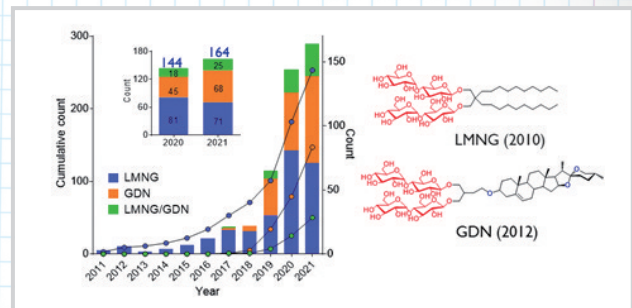
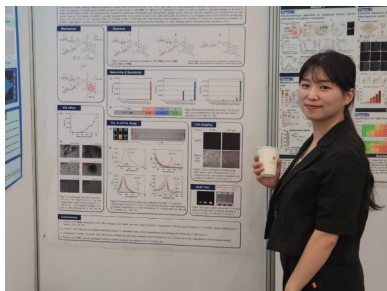


그림 2. 본 연구실에서 개발한 두 개의 양친매성 분자 (LMNG와 GDN)의 막단백질 구조연구에 활용. 두 양친매성 분자는 지난 10년간 450 개 이상의 막단백질 구조규명 (전체 막단백질 구조의 22%에 해당)에 기여했고 최근 2년간 308개의 구조규명에 기여함 (전체 막단백질 구조의 40%에 해당).



연구실 회식(삼성 재단 PD 김경국 선생님과 함께)



학회 참석



바닷길 자전거 라이딩

백 개의 막단백질 구조분석 연구에 사용되어왔습니다[그림 2]. LMNG는 G-단백질 연결 수용체(GPCR)의 안정성에 탁월하며 GDN는 2017년 이후에 그 사용이 급증했는데 바로 초저온전자현미경분석법에 의한 막단백질 구조분석에 매우 유용하기 때문입니다. 최근 2년간의 막단백질 구조연구에서 LMNG와 GDN은 총 308개의 막단백질 구조규명에 기여하였고 이는 이 기간의 전체 막단백질 구조의 40%를 차지합니다. 이 두 개의 양친매성분자는 미국회사인 아나트레이스에서 시판하고 있어 전 세계 연구자들이 사용하고 있습니다.

LMNG와 GDN의 성공적인 사례를 바탕으로 더욱 성능이 뛰어난 양친매성 분자를 개발하고 있습니다. 이러한 노력의 결과로 2016년 이후로 『J. Am. Chem. Soc.』 저널에 논문 4편, 『Chem. Sci.』 저널에 논문 5편을 게재한 바가 있고 2022년에는 『Chem.』 저널에 review 논문을 게재하여 2010년 이후로 이 분야에서 70 개 이상의 논문을 쏟아내고 있습니다. 이 중에는 단백질처럼 접히는 접힘형 양친매성 분자 (foldable detergent)와 팬던트의 친수성 및 소수성에 따라 형태가 바뀌는 가변성 양친매성 분자, 분자간 수소결합을 하는 수소결합성 양친매성 분자등 새로운 개념을 도입한 분자들을 개발하여 이 분야에서 세계를 선도하고 있습니다. 또한, 현재 양친매성 분자들이 막단백질을 둘러싼 상태에서 생체직교반응을 수행할 수 있도록 분자를 설계 및 개발하는 것을 주제로 한양대 ERICA에서는 유일하게 기초과학(화학)분야에서 삼성과제(삼성미래기술육성사업)를 수행하고 있습니다. 이는 막단백질 맞춤형 고분자성 마이셀을 형성할 수 있어 막단백질 구조연구에 혁신을 일으킬 것으로 기대합니다.

### 연구실 환경

저희 연구실은 탄탄한 국제공동연구 네트워크를 구축하고 있습니다. 미국에는 2012년 노벨 화학상을 수상한 스탠포드대학의 Brian Kobilka 교수, 영국의 임페리얼 대학의 Bernadette Byne 교수, 덴마크 코펜하겐 대학의 Claus Loland 교수와는 15년 동안 공동연구를 진행하고 있습니다. 저희 BNCL에서 다양한 양친매성 분자를 디자인하고 합성하여 송부 하면 위와 같은 공동연구자들의 이 분자들의 막단백질 안정화 및 추출 효율을 평가합니다. 또한, 최근에는 새로 개발한 양친매성 분자의 막단백질이 안정화 특성을 파악하기 위해 미국 리하이 대학교의 임원필 교수님과 공동 연구를 수행하고 있습니다. MD 시뮬레이션을 통해 막단백질-양친매성 분자 복합체에 존재하는 다양한 분자간 상호작용을 정량적으로 파악할 수 있습니다. 이외에도 중국 칭화 대학의 Xiangyu Liu과 서울대 최희정 교수님과도 공동연구를 진행하고 있습니다. 이를 통해 국내외 연구자들과 소통하면서 공동연구를 수행하는 과정을 배울 수 있습니다.

저희 연구실은 다양한 장비를 갖추고 있어 양친매성 분자를 합성하고, 합성된 화합물을 정제 및 분석하는데 최적의 조건을 갖추고 있습니다. 초고성능 겔 투과 크로마토그래피/크기 배제 크로마토그래피 시스템으로 절대 분자량을 측정하여 양친매성 분자의 aggregation number를 알 수 있는 'OMNISEC' 과 역상/정상 컬럼으로 분리/정제 과정에 유용한 'MPLC' 가 갖추어져 있으며, 8월 중으로 'LC-MS' 가 연구실에 설치되어 더욱 다양하고 효율적인 연구를 수행할 수 있을 것입니다. 이와 같은 장비들의 운용법을 배우고 실제로 실험에 활용할 수 있다는 점이 저희 연구실의

## ☞ 우리 실험실은요!

큰 장점입니다.

무엇보다도 지도교수님이신 채필석 교수님의 아낌없는 조언과 지지 속에 좋은 연구자로 성장할 수 있는 환경에 있습니다. 저희는 2주마다 리서치 미팅시간을 갖습니다. 리서치 미팅을 매주하지 않고 2주 간격으로 하는 이유는 교수님께서 학생들이 연구 중 장애물에 부딪힐 때마다 스스로 고민해보고 여러 가지 방법을 시도해 볼 수 있는 충분한 시간을 가졌으면 좋겠다고 생각하시기 때문입니다. 또한, 좋은 연구자가 되기 위해서는 단순히 많은 양의 실험을 소화하는 것뿐 아니라 풍부한 배경 지식과 끊임없는 아이디어를 창출할 능력을 갖추어야 한다는 교수님의 지론 아래 한 달에 한 번씩 진행되는 저널 클럽 시간을 가져 실험과 최신 연구 동향에 대해 끊임없이 탐구하고 고민하고 있습니다. 교수님께서도 학생이 관심 있어 하는 연구 주제가 있다면 항상 열심히 지지해 주시고 마음껏 해보라고 지원해 주십니다. 제가 학부생 시절 연구실에서 졸업 작품을 위해 실험을 하던 시절에도 '아직 학부생이지만 졸업하기 전에 한 번이라도 연구실에 있는 많은 시약을 가지고 하고 싶은 실험을 마음껏 해볼 기회가 되었으면 좋겠다.' 하셨고, 그때 원 없이 하고 싶은 실험을 시도했던 경험이 제가 대학원에 진학하는 큰 계기 중 하나가 되었습니다. 교수님께서도 종종 '지도교수를 뛰어넘는 연구자가 되어야 한다.' 라고 말씀하곤 하시는데, 학생을 훌륭한 연구자로 키우고 싶어 하시는 마음을 잘 느낄 수 있는 부분이라고 생각합니다. 어떤 방향성을 가지고 공부해야 하는지, 논문공부가 얼마나 중요한지에 대해 기회가 될 때마다 열심히 설명해 주시고, 바쁘신 와중에도 학생들이 상담을 요청하여 오피스 문을 두드릴 때마다 항상 두 팔 벌려 환영해 주십니다. 이렇게 충분히 공부하고, 고민하고, 시도할 수 있는 조건 속에서 학생들도 교수님의 지원과 지지에 보답해야 한다는 책임감을 가지고 더 열심히 연구에 임하게 되는 것 같습니다.

### 즐겁고 편안한 BNCL

저희 연구실의 특색은 자유롭고 평등한 분위기와 돈독한 선배배 관계입니다. 우선 학생들의 연차와 상관없이 모든 업무를 공평하게 나누고, 예상치 못하게 생기는 업무는 매번 제비뽑기나 사다리타기로 결정합니다. 그래서 누가 어떤 업무를 수행하게 되어도 불평 없이 기꺼이 할 뿐 아니라, 오히려 사다리타기를 하는 것을 이벤트처럼 기다리게 되었습니다. 또한, 저희 BNCL에는 학부 연

구생 때부터 맺어진 선배배 2인1조 '듀오' 문화가 있습니다. 각 듀오에서 후배는 선배에게 실험 방법과 노하우를 배우고 실험하는 동안 많은 조언을 들을 수 있습니다. 선배에게 연구실에서 진행되는 연구에 필요한 주요 실험 기법들을 배우며 많은 시간을 같이 보내면서 후배들이 선배들을 존경하는 한편 마음을 터놓고 의지할 수 있는 인생의 선배로도 느끼게 되는 것 같습니다. 선배들은 자신이 손수 하나하나 가르쳐 키운 후배들을 보며 큰 보람을 느낍니다. 연구 진행 상황을 교수님께 보고하기 전에 선배와 충분한 토의를 한 다음에 교수님 오피스에 찾아가면 그냥 무작정 데이터만 들고 찾아갈 때 보다 훨씬 든든함을 느낄 수 있습니다. 오랜 시간을 같이 보내다 보니 듀오의 선배와 후배는 말투와 사고방식이 닮아가는 일도 자주 있습니다. 얼마 전에도 충청도 출신인 저에게서 부산이고향인 제 선배의 말투가 저도 모르게 나와서 연구실 친구가 박장대소를 한 적이 있습니다. 이 외에도 다같이 바다로, 계곡으로 연구실 MT를 가기도 하고, 바닷길을 따라 자전거 라이딩을 하기도 하는 등 휴일에도 연구실 구성원끼리 뭉치는 것을 보면 모두 연구실을 편안하고 즐거운 공간으로 생각하는 것 같습니다.

### 맺는 글

지난 스승의 날에는 교수님과의 정기 회식으로 초밥을 먹고 카페에서 티타임을 가졌습니다. 맛있는 식사 후 카페에서 둘러앉아 이야기하던 중 신입생들에게 '생활하며 어려운 일은 없니?' 하고 물어보시는 교수님의 질문을 듣고 대학원 진학을 고민할 때 그렇게 불안해하고 걱정했던 것이 거짓말처럼 지난 시간을 너무 잘 지냈다는 것을 깨달았습니다. 공부는 어떻게 해야 할지, 연구는 해 나갈 수 있을지, 선배나 교수님과의 관계는 어렵지 않을지 고민했었는데, 하루하루 연구실 생활을 하며 하나하나 가르쳐주는 선배들과 믿고 맡겨주시는 한편 열심히 지도해주시는 교수님 덕분에 걱정조차 있었던 것 같습니다. 또, 하루하루 주어진 일과와 연구를 수행하다 보니 사소한 걱정이나 불안은 생각도 나지 않았던 것 같습니다. 여전히 앞에 놓여있는 수많은 공부와 아직은 서툰 익숙하지 않은 실험들을 보며 가야 할 길이 멀다는 것을 알지만 무엇을 열심히 해야 하는지도 모른 채 입학 고민하던 그때와는 다르게 '좋은 연구자'를 목표로 차근차근 해나가다 보면 앞서간 선배들과 교수님의 뒤를 따르는 연구자가 될 수 있을 거라고 꿈꿔 봅니다.



# 원자로 만든 인공원자로 만드는 인공분자로 보는 분자

장홍제 | 광운대학교 화학과,  
hjang@kw.ac.kr



우리는 '천연'이라는 단어에서 자연스럽고 싱그러움을 느끼고 '인공'이라는 표현에서는 삭막함과 작위적임을 느낀다. 물론 화학자의 입장에서는 조금 다를지도 모르겠다. 천연물의 복잡한 구조를 재현하기 위해 골머리를 싸매며 반응을 파헤치며, 그 모든 과정은 인공이거나 생체 반응의 모사인 경우가 대부분이다. 대중적으로는 완벽히 동일한 물질이더라도 천연과 인공이 부여하는 가치는 엄청난 차이가 있다. 레몬에서 직접 짜내 추출했다는 비타민C는 제아무리 청결하고 안전한 합성 경로를 통해 얻어진 초고순도의 합성 비타민C보다 높은 가격으로 대우받는다. 우리 모두는 이 아이러니한 사회적 기준에 납득하지 못하면서도, 자유로운 선택권을 준다면 자신도 모르게 천연에 손을 뻗곤 한다.

## 인공의 가치에 대하여

인공artificial이라는 단어가 부정적 뉘앙스를 갖게 된 것은 오래지 않은 현대 시점에 이르러서다. 먼 과거에는 호문쿨루스와 같은 인공 생명을 구현하기 위해 파라켈수스 이래 파우스트의 제자였던 바그너 박사의 실험실까지 탐구의 대상으로 그려졌다. 여러분과 나의 문화적 시대적 기억이 다

를 수 있겠지만, 어릴 적 공상과학 만화나 소설에서 그려지던 인공, 즉 인조인간이나 사이보그, 합체 로봇과 변신 로봇은 불쾌함이 아닌 낭만이었다.

모든 문제는 빠르게 급변하는 기술 흐름을 사회적 인식이 따라가지 못할 경우 싹트기 시작한다. 인간과 부대끼며 살아가는 일상과는 다르게 매체에 소개되는 인간을 닮은 움직임은 인공물들은 불편함으로 다가온다. 불쾌한 골짜기(Uncanny valley)라는 표현으로 미묘하게 어긋난 감각의 유사-인간 외형적 객체들이 미지의 혐오를 자극하기도 한다. 닮아가는 모습과 기능에서 우리의 위치를 빼앗긴 않을까 걱정하며, 한편으로는 과거의 러다이트 운동(Luddites movement)을 재현하고자 하는 욕구마저 불러 일으킨다(나노입자를 스스로 합성하는 기계장치가 발명되고 있다는 사실을 본 나만의 심정일지도 모른다).

하지만 화학자로서 인공은 언제나 추구해야 할 가치다. 가장 흔한 것들로부터 귀중한 물질을 만들어내는 생명의 연금술이라고 해도 과언이 아닐 식물의 광합성을 인공적으로 재현하려는 도전은 태양광 발전을 탄생시켰다. 작은 도전은 현재의 지구 온난화와 환경 위기를 극복할 하나의 장치로 기대받고 있다. 어디든 달라붙는 도마뱀붙이나 홍합, 다공성 구조의 불가사리 골격, 오색으로 빛나는 어패류의 껍질



▲ 인공적인 무엇인가는 단순히 만들어진 것 이상의 의미를 갖는다.



▲ 같은 구조와 형태라도 규모에 따라 얻어지는 정보의 종류는 달라진다.  
[출처: Wikipedia]

내부 등 모든 자연을 인공적으로 모사하는 과정에서 화학은 발달하고 또 다른 미래로 연결되어 왔다.

### 인공의 목적에 대하여

인공의 최종적인 목적은 하나로 귀결되지 않는다. 쉽 리 얻을 수 없는 물질을 다량 얻기 위한 자연친화적이고 경제적인 방식을 위해서, 탐나는 자연의 기능을 인위로 만들어 활용하기 위해서 등 여러 기준이 있겠다. 하지만, 내가 생각하는 인공의 가장 매력적인 목적은 설명할 수 없는 자연을 대체하는 시뮬레이션에 있다.

화학은 물질이 있어야 성립한다. 물질을 연결하고 쌓고 관계짓는 과정을 통해 유용하거나 새롭거나 흥미로운 새로운 물질이 탄생한다. 물질로 물질의 스펙트럼을 넓히는 과정이자, 최근 듣게 된 가장 매력적인 표현을 빌리자면 ‘우주의 법칙과 삶의 규칙 사이에 다리를 놓는 과학’이다.

작은 블록으로 만들 수 있는 것은 우리의 창의력에 따라 수없이 다양하다. 약간은 어이없을지도 모르지만 흥미로운 제작품은 조금 더 큰 블록이 될 수도 있다. 가로 2칸 세로 4칸 높이 1칸의 가장 작은 레고 블록 단위체를 여러 개 쌓아, 같은 비율을 갖는 가로 20칸 세로 40칸 높이 10칸의 거대 블록을 만드는 셈이다. 아무런 의미가 없는 장난으로 비칠 지 몰라도 그 자체로 다른 제안으로 이어진다.

만약 가장 작은 블록들로 작은 집 모양 구조물을 하나 제작했다고 생각하자. 지붕과 벽면, 기둥이나 주위 조경까지 블록의 사용에 따라 실제 건물과 미학적으로 다를 바 없는 멋진 결과를 창조할 수 있다. 하지만 미학에서 멈출 뿐, 실용으로 다가설 수는 없다. 실제로 들어가 지내보며 편의성과 유용

함을 평가하고 확인하는 것은 불가능하기 때문이다. 햄스터나 토끼를 집어넣어 사육장처럼 활용해 볼 수는 있겠다. 그것이 인간에게 그대로 적용될 수 있을 리는 없지만 말이다.

하지만 사용한 단위 블록이 가장 작은 블록들을 연결해 만들었던 10배 큰 블록이라면 어떻게 될까? 우리가 제작한 집의 크기는 조금 전 구조물보다 10배 더 거대한 규모가 될 것이며, 문을 열고 들어가 눕거나 벽에 기대앉을 수 있다. 또다시 블록으로 만든 가구를 채워넣어 볼 수도 있고, 전기나 수도를 연결할 수 있다. 나라마다 있는 레고 랜드(Lego land)를 방문하거나 덴마크 빌룬에 위치한 거대한 레고 하우스(Lego house)와 같다. 활용하며 얻을 수 있는 정보는 단순히 블록으로 만든 집은 살기 편하다거나 비효율적이라는 단편적인 의미가 아니다. 많은 비용과 노력이 필요한 새로운 건축물을 설계할 때, 간략하게나마 시뮬레이션하고 평가할 수 있는 도구가 주어지는 셈이다. 블록으로 만드는 방적기, 프린터 등을 넘어, 이제는 세포를 3D 프린팅하는 기기까지 블록으로 간단히 설계해 조립할 수 있을 정도니 인공의 가치는 모사를 넘어 도구의 측면으로 비춰 질 수도 있겠다.

### 그리고 인공의 화학에 대하여

인공을 찬미하는 것과 같은 매우 긴 서론은 최근 눈여겨 봤던 하나의 흥미로운 학술 논문의 내용을 공감하기 위한 작업이다. 이 글을 읽고 있는 학식 있는 유사 직종의 독자들 이라면 굳이 앞선 인공찬가가 없었더라도 흥미를 느끼기 충분할 듯싶다.

아무리 작은 세계로 다가가더라도 화학에는 한계가 있다.

세상을 이루는 모든 물질의 기본 단위라는 원자보다 작은 크기는 화학이 성립하지 않는다. 원자 크기를 보는 기술도 속속들이 등장하고 있다. 원자 해상도의 전자현미경이나, 최근 몇 달 사이 발표되어 온 옹스트롬 해상도의 형광 현미경과 탄소-수소 결합의 변화를 측정하는 데 사용한 오비탈 해상도 X-선 기법 등이다. 하지만 관측과 해석은 또다시 구분된다.

앞서 인공적으로 큰 규모를 만들어 시뮬레이션이 가능함을 주장했다면, 화학의 근간이 될 분자를 구성하기 위한 원자를 인공적으로 만드는 가장 작은 방향으로의 인공을 살펴보고자 한다. 너무나 부정확한 관계로 원자와 관련된 많은 것에는 근사나 가정을 비롯한 애매함들로 가득하다. 원자의 규모를 이야기하기 위한 전자 덩어리의 경계는 파동함수와 확률로 어렵게 설명되며, 양자역학과 불확정성의 원리 등 모든 애매함의 요소들이 납득을 강요한다. 혼성 오비탈과 분자 오비탈, 공명 구조 등 모든 기본적 화학 원리와 크게 다르지 않다. 흔히 학창 시절 산염기 문제를 풀며 초기 농도에 비해 천여 배 작은 변화량을 편의상 근사해 무시하듯, 원자핵과 전자의 질량 차이는 보른-오펜하이머 근사로 처리된다. 원자핵들의 진동이나 회전 운동에 비해 전자의 움직임이 압도적으로 빠르니 슈뢰딩거 방정식을 두 개로 나누어도 근사가 성립한다는 식이다. 만약 이 모든 근사가 적용되는 조건에서 충분히 작은 규모로 인공 원자가 재현된다면 어떨까?

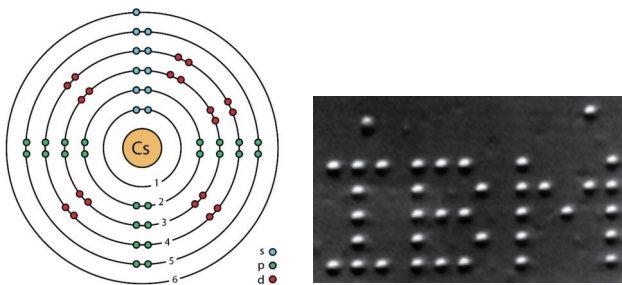
블록으로 큰 블록을 만들었던 예시와 같이, 우리는 고정된 위치에 커다란 인공 원자를 만들기 위한 적절한 작은 실제 원자를 수없이 가지고 있다. 그 중 세슘(Cs)은 가득 차있는 안쪽 껍질의 오비탈들을 제외하면 6s 오비탈에 단 하나의 전자만이 남아 있다. 슈테른-게를라흐(Stern-Gerlach) 실험에서 같은 경우인 은(Ag) 원자를 이용해 스핀 양자수를 규명했던 것과 같다. 커다란 규모에도 불구하고 단 하나의

스핀은 세슘 원자를 하나의 인공 전자로 고려하기에 최소한의 요건을 만족하는 셈이다.

세슘 원자를 원하는 위치에 배치하는 것은 과거 35개의 제논(Xe) 원자를 니켈 표면에 배치에 IBM이라는 웅장한 문구를 새겼던 일이나, 그로부터 3년 후 48개의 철(Fe) 원자를 구리 표면에 울타리 모양으로 고정했던 것을 생각한다면 불가능한 일이 아니다. 주사 터널링 현미경을 통해 원자핵이 위치해야 할 중앙을 비워둔 채, 주위에 옥텟 규칙이 적용되는 온전한 저주기 전형원소의 모양새대로 8개의 세슘 원자를 배치한다면 보른-오펜하이머 근사가 적용되는 원자로 만들어진 인공 원자를 구현한 셈이다.

두 개의 원자가 인접해 전자 밀도가 중첩을 이룬다면 결합 혹은 반결합을 형성할 수 있다. 두 개의 인공 원자를 11 nm 간격을 두고 나란히 배치했을 때 관찰되는 피크 에너지에서의 전도도(dI/dV) 이미징은 일반적인 원자의 결합/반결합과 마찬가지로의 궤도 분포를 보였다. -133 mV에서의 결합 궤도 공간 분포와 -86 mV에서의 반결합 궤도 공간 분포의 형태가 나타난다. 조금 더 실제적인 형태를 보기 위해 벤젠과 사이클로뷰타다이엔의 형태로 인공 원자들을 배치했을 경우에도 혼성화를 통한 궤도 지도가 이론적으로 통용되는 것과 동일하게 나타났다. 심지어 1,3-뷰타다이엔의 *cis*와 *trans* 구조에서의 입체 장애 여부에 따른 에너지 차까지 그대로 확인되니 원자로 만든 인공 원자로 만드는 인공 분자로 분자를 보는 시도는 성공적이겠다. [E. Sierda *et al.*, *Science* **2023**, *380*, 1048-1052]

인공 원자를 이용한 양자 시뮬레이션을 두고 미약한 시작이라 말하기 어려워 보인다. 현재는 수많은 분야에 섞여 들어가 활개치는 나노화학 분야가 지각없이 기원전부터 사용되어 왔음에도 20세기 중반에 이르러 입증된 것은 커다란 심증과 미약한 물증 때문이었다. 튜들 현상이나 이색성(dichroism) 등 미루어 짐작할 요소들은 많았지만 당시 광학의 한계를 극복할 전자 현미경 없이는 규명될 수 없었다. 하지만 그 이후 상황은 급격히 변했음을 모두가 알고 있다. 인공 원자를 이용한 보편적 진실에 대한 다른 관점에서의 실험적 규명은 이후 많은 것을 바꿀 것이다. 원자 규모의 3D 프린팅 기술이 확립되거나, 모사할 수 있는 대상의 범위가 넓어짐에 따라 블록으로 만들어진 커다란 블록으로 지어진 집의 실용성을 체감하듯, 인공과 자연의 사이에 다리를 놓는 순간을 보고 있는지도 모른다. 🌀



▲ 세슘 원자를 인공 전자로 삼아 표면에 고정시켜 인공 전자를 만든다.

[출처: Wikipedia]

## 화학사 돌아보기

Part.13

원자설의  
여파최정모 | 부산대학교 화학과,  
jeongmochoi@pusan.ac.kr

지난 글에서 우리는 19세기 당시 돌턴의 원자설이 어떤 맥락에서 만들어졌고 어떤 맥락에서 수용되었는지를 살펴 보았습니다. 돌턴은 기체와 대기를 연구하는 뉴턴주의자로서 기체의 성질을 설명하기 위해 기체 입자들을 도입하였고, 그 과정에서 다소 과감한 가정을 도입하여 원자설을 형식화하였습니다. 당시 화학자들은 단위 입자의 개념과 일정 성분비의 법칙에 익숙한 사람들이었지만, 그럼에도 돌턴의 원자설은 유럽 화학계에 큰 충격을 주었습니다. 바로 그 단위 입자의 질량을 결정할 수 있다는 점 때문이었습니다. 오늘 글에서는 『화학 철학의 새 체계』 직후 약 5년 동안 화학자들이 이 원자설을 어떻게 수용하고 발전시켜 나갔는지를 살펴보도록 하겠습니다.<sup>1</sup>

돌턴의 원자설이 발표될 즈음 “원자”라는 개념은 물리학과 화학계에서 다소 다른 의미로 사용되고 있었습니다.<sup>2</sup> 물리학과에서는 “물질을 구성하고 있는, 더 이상 쪼갤 수 없는 기본 입자”를 원자라고 불렀습니다. 물리학자들은 이 입자들의 기계적 움직임으로 세상이 돌아가고 있다고 믿었고, 보통 단일한 종류의 입자를 상상했습니다. 반면 화학계에서는 분자를 구성하고 있는 단위 입자들을 원자라고 보았고, 다양한 종류가 존재할 수 있다고 보았죠. 돌턴의 원자설은 이 두 가지 정의를 하나로 합친 것이었습니다.<sup>3</sup> 돌턴의 관심사는 바로 그 물리적인 실체로서의 원자가 얼마의 무게를 갖느냐였습니다. 그러기 위해 사용할 수 있는 실험 데이터는 당량(equivalent) 데이터였죠. 18세기 말 리히터(Richter)

1. 이 내용은 다음 글들에서 큰 도움을 받았습니다. Alan J. Rocke, "Atoms and Equivalents: the Early Development of the Chemical Atomic Theory," *Historical Studies in the Physical Sciences* 9: 225–263 (1978); L. A. Whitt, "Atoms or Affinities? The Ambivalent Reception of Daltonian Theory," *Stud. Hist. Phil. Sci.* 21 (1): 57–89 (1990); 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).

2. 지난 글에서 언급한 것처럼, “원자(atom)”와 “분자(molecule)”라는 단어는 19세기 초에 거의 동의어로 사용되었습니다. 이들이 오늘날과 같은 의미로 분화되기까지는 시간이 걸렸습니다. 이러한 상황을 반영하여 지난 글에서는 “원자”나 “분자”라는 표현을 최대한 배제하였지만, 오늘 글에서는 해당 단어들을 사용하지 않고는 논의를 진행하기가 어려워 불가피하게 두 단어를 오늘날의 의미로 도입하여 쓰겠습니다.

3. 지금 우리의 “원자” 개념은 돌턴의 “원자” 개념과 유사하기 때문에 이 대목에서 이상함을 느끼지 못할 수도 있겠습니다만, 두 개념을 엄밀하게 구분하던 당시 사람들에게는 혼동을 주었습니다. 그 결과 19세기 내내 “원자” 개념을 둘러싼 논쟁이 이어집니다. 자세한 논의는 주석 1번에서 소개한 Whitt의 글과 Schütt의 글을 참고하시기 바랍니다.

가 동일한 양의 산에 반응하는 염기의 양을 종류별로 조사해서 발표한 이래, 많은 화학자들은 두 물질이 반응할 때는 항상 그 질량비가 일정하게 유지된다고 생각했습니다. (베르톨레-프루스트 논쟁의 핵심이 바로 그 질량비가 일정하다는 것이었죠.) 만약 그렇다면 그 비율로부터 원자의 질량도 결정할 수 있을 것입니다.

당량으로부터 원자량을 계산하기 위해서는 분자를 이루는 원자의 비율을 알아야 합니다. 그래서 돌턴의 원자설에는 “최대 단순성 규칙”이라는 규칙이 포함되어 있었습니다. 기체 원자들은 분자를 구성할 때 최소한의 비율로 결합한다는 것이었죠. 그 당시에도 일산화 탄소와 이산화 탄소처럼 동일한 원소들이 다른 비율로 결합하는 예들이 알려져 있었기 때문에, 돌턴은 당시 알려져 있던 화합물을 전부 조사하여 그 중 비율이 가장 작은 화합물이 1:1로 결합하여 만들어졌다고 가정하였습니다. 이 규칙을 따르면 물은 산소 원자 하나와 수소 원자 하나로 구성되어 있고(아직 과산화 수소가 발견되기 이전입니다), 암모니아는 질소 원자 하나와 수소 원자 하나로 구성되어 있으며, 이산화 탄소는 탄소 원자 하나와 산소 원자 두 개로 구성되어 있다고 볼 수 있습니다.<sup>4</sup>

우리 눈에 어색하게 보이는 이 규칙은 당시 화학자들의 눈에도 거슬렸습니다. 1811년 존 보스톡(John Bostock, 1773-1846)이라는 화학자는 다음과 같이 반박했죠. “입자들이 특정 비율로 결합할 때, 그 결합이 일대일이라고 알 수 있는 때는 언제인가? 물이 산소 원자 두 개와 수소 원자 한 개, 혹은 산소 원자 한 개와 수소 원자 두 개로 구성되는 것(...)은 왜 불가능한가? 나는 돌턴 씨가 다른 모든 조합에 비해 이 일대일 결합을 선호하는 어떠한 이유도 찾지 못했다.”<sup>5</sup> 돌턴은 바로 반론을 제시하였습니다. 원칙적으로 원자 A에 원자 B가 결합한다고 하면 최대 열두 개까지 결합할 수 있지만,<sup>6</sup> 원자들은 같은 종류의 원자들끼리 서로 밀어내는 성질을 가지고 있기 때문에 가장 안정적인 구조는 두 원자가 일대일로 결합하는 구조라는 것입니다.

더 큰 문제는 두 원소가 한 가지 비율로만 결합하지 않을 때 발생하였습니다. 앞서 일산화 탄소와 이산화 탄소 이야기를 했습니다만, 사실 이들에 대해 우리가 알고 있는 정보는 탄소 일정량에 결합하는 산소의 양이 두 화합물에서 두 배 차이가 난다는 것 뿐입니다. 돌턴은 일산화 탄소를 가장 단순한 화합물로 놓고 각각 탄소 하나에 산소 하나, 탄소 하나에 산소 두 개가 붙는다고 보았지만, 반대로 이산화 탄소가 가장 단순한 화합물이라고 보면 일산화 탄소가 탄소 두 개에 산소 하나로 구성되고, 이산화 탄소는 탄소 하나에 산소 하나로 구성되는 상황도 가능해집니다. 어느 쪽이 맞는지 어떻게 알 수 있을까요? 돌턴은 이러한 난점을 해결하기 위해 증기압을 이용한 별도의 실험적 증명을 시도하였지만, 설득력은 약했습니다.

이러한 문제들 때문에, 당시 돌턴의 이론에 열광했던 화학자들도 최대 단순성 규칙을 그대로 적용하는 경우는 거의 없었습니다. 그들은 나름의 방법으로 원자량을 결정하려고 하였습니다. 이 글에서는 영국의 화학자들, 즉 토머스 톰슨(Thomas Thomson, 1773-1852), 윌리엄 윌라스턴(William Hyde Wollaston, 1766-1828), 험프리 데이비(Humphry Davy, 1778-1829)의 사례를 소개하고자 합니다.

톰슨은 돌턴 원자설의 강력한 지지자였습니다. 톰슨은 심지어 돌턴이 원자설을 잘 정리하여 발표하기도 전인 1804년 돌턴과의 대화를 통해 기본적인 아이디어를 듣고 크게 흥분한 기록을 남겼습니다. 그는 특히 최대 단순성 규칙에 깊은 감명을 받았는데, 1807년 자신의 책 『화학의 체계 (System of Chemistry)』 제3판에서 돌턴의 최대 단순성 규칙을 적용하여 원자량을 계산해 보기도 했습니다(이 책은 심지어 돌턴의 『화학 철학의 새 체계』 1권이 나오기도 전에 출판되었습니다). 톰슨은 1807년 데이비와 윌라스턴에게 돌턴의 원자설을 소개합니다.

데이비는 당시 영국 화학계를 대표하는 인물 중 하나였습니다.<sup>7</sup> 그는 1800년 볼타의 전기와 그를 이용한 물의 분해

4. John Dalton, *A New System of Chemical Philosophy*, Vol. 1, pp. 214-215.

5. Alan J. Rocke, 앞의 글, pp. 231-232에서 재인용. 여기서 “일대일”이라는 단어는 binary의 번역어입니다. 돌턴은 두 개의 원자로 구성된 분자를 binary라고 불렀습니다.

6. 오늘날의 기호로는  $AB_2$ 입니다. 12라는 숫자는 기하학적으로 가장 조밀하게 구를 쌓아 두었을 때 한 구와 접촉하는 구의 수에서 유래합니다. 즉, 오늘날의 용어로는 최대 배위수가 12라는 의미가 되겠습니다.

7. Colin A. Russell, “The Electrochemical Theory of Sir Humphry Davy, Part I: the Voltaic Pile and Electrolysis,” *Annals of Science* 15 (1): 1-13 (1959).

실험에 대해 듣자마자 바로 전기화학에 뛰어들었습니다. 그는 다양한 전기 분해 실험을 직접 수행하면서 화학적 친화도의 근원에는 전기 현상이 있다고 생각했고, 1806년 발표한 논문에서 정전기, 전류, 전기 분해, 화학적 친화도, 화학 결합 등을 개념적으로 연결하려는 대담한 시도를 하였습니다. 이후 데이비는 이전까지 원소로 간주되던 물질인 알칼리와 알칼리 토류<sup>8</sup>를 전기로 분해하는데 성공하였고, 이를 1808년 논문으로 발표했습니다. 이렇게 전기를 이용하면 다른 방법으로는 분해하기 어려운 분자의 구성 성분들을 떼어낼 수 있고, 이를 통해 화학적 친화도를 측정할 수 있다는 것이 데이비의 생각이었습니다.

데이비는 1809년 강연에서 돌턴의 원자설을 처음 언급합니다. 그는 전기 분해를 통해 알칼리 토류에 포함된 산소의 양을 측정할 수 있었고, 그 비율 속에서 규칙성을 발견하였습니다. 그리고 돌턴의 원자설로부터 예측되는 산소의 양과 자신이 실험으로 직접 측정한 양이 크게 다르지 않다는 것에 놀랐습니다. 비록 데이비 자신은 돌턴의 원자론을 믿지 않았고 오히려 세상이 단일한 종류의 기본 물질로 구성되어 있다고 믿는 쪽에 가까웠지만, 원자량 개념이 화학 연구에 유용하다는 것은 인정할 수 밖에 없었죠. 그는 이 원자량 개념을 활용해 자신의 전기적 화학 결합 이론을 확장합니다.

데이비는 1810년 이후 여러 편의 논문을 통해 (“원자”라는 표현 대신 조심스럽게 “비율”이라는 표현을 사용하였지만) 다양한 원소의 원자량을 제안합니다. 그리고 마침내 1812년 『화학 철학의 기초(*Elements of Chemical Philosophy*)』라는 책을 통해 당시에 실험값이 존재했던 총 37개의 원소에 대해 원자량 데이터를 정리하여 발표합니다. 이 책에 등장하는 데이비의 원자량은 돌턴의 원자량과 다릅니다. 특히 데이비는 물 분자의 구성이 수소 원자 두 개에 산소 원자 하나라고 생각했습니다. 이는 수소 기체와 산소 기체가 반응하여 물을 만들 때 부피 비율이 2:1이었기 때문입니다. 그리고 이 사실로부터 돌턴이 제안한 수소의 원자량의 두 배를 해서 수소의 원자량으로 잡고, 이걸 기준으로 다른 물질들

의 원자량을 새로 계산하였죠. 데이비는 돌턴의 원자량이 “사실에 근거한” 비율에서 벗어난 데이터라고 여겼습니다.

한편 월라스턴은 1808년 이후 원자량 연구를 시작하였고, 직접 실험을 통해 많은 물질의 당량을 결정합니다. 그는 1812년경 수소가 아니라 산소의 원자량을 기준으로 잡는 것이 좋겠다는 결론을 내렸고, 마침내 1813년 학회 발표를 통해 자신이 계산한 원자량을 공개하였습니다.(이 데이터는 1814년 논문으로 출판되었습니다.) 흥미롭게도 월라스턴도 데이비처럼 원자라는 표현을 피하고 대신 “당량(equivalent)”이라는 단어를 사용합니다. 물리학자였던 돌턴은 원자가 실재한다고 믿었고, 원자량 연구는 실제 원자의 원자량을 찾아나가는 과정이라고 생각했습니다. 반면 월라스턴은 원자의 실재성을 크게 신경 쓰지 않았습니다. 월라스턴에게 원자량은 규약(convention)이었고, 규약에 맞춰 숫자를 조작하면 실제 화학 반응을 정확하게 기술할 수 있는 유용한 도구일 뿐이었습니다.<sup>9</sup>

월라스턴의 원자량 데이터는 즉각적인 호응을 얻었습니다. 많은 화학자들이 원자의 실재성에 의문을 표하고 있던 상황에서, 월라스턴은 원자라는 가설적 존재에 대한 이론적 논의 없이 당량 계산을 했다고 주장했기 때문입니다. 데이비는 월라스턴의 데이터가 가설과 분리된 실용적인 데이터라며 만족을 표했고, 톰슨 역시 1813년과 1814년에 출판한 논문에서는 월라스턴의 데이터에 영향을 받아 산소의 원자량을 1로 잡은 원자량 데이터를 제시하였죠. 또한 월라스턴은 실험값을 어디에서 얻었는지 그 출처를 꼼꼼하게 표시하였고, 이 전례를 따라 톰슨 역시 출처를 표시하였습니다. 월라스턴의 꼼꼼한 데이터는 영국에서 1860년대까지 활용될 정도로 인기가 있었습니다.

[표 1]에서는 각 과학자들의 원자량 데이터를 정리하였습니다.<sup>10</sup> 당시에는 어느 물질이 원소인지에 대해 합의가 안되어 있는 경우가 종종 있었습니다. 예를 들어 염소의 경우, 돌턴과 월라스턴은 염소를 무리움(murium, Mu)이라는 원소의 산화물로 생각했고, 데이비와 톰슨은 염소 자체가 원

8. alkali, alkaline earth. 각각 알칼리 금속과 알칼리 토금속의 산화물을 가리킵니다.

9. 원자는 실재하는 존재인가, 아니면 화학자들 사이의 규약인가? 이것이 이후 19세기 화학을 규정하는 큰 논제 중 하나가 됩니다. 케쿨레를 비롯한 많은 19세기 화학자들은 원자 개념을 규약으로 여겼고, 굳이 원자의 실재성을 받아들이려 하지 않았습니다.

10. Alan J. Rocke, 앞의 글, Table 2에서 재인용.

소라고 생각했습니다. 이 경우 돌턴과 윌라스턴은 무리움의 원자량을 보고했고 데이비와 톰슨은 염소의 원자량을 보고했죠. 동일한 기준으로 맞추기 위해 이런 경우 현재 우리가 알고 있는 원소를 기준으로 원자량을 다시 환산하였고, 이런 데이터는 괄호 안에 표시해 두었습니다. 데이터를 보시면, 물 분자의 조성이 무엇인가가 중요한 쟁점이었음을 알 수 있습니다. 당시에는 수소 분자와 산소 분자가 이원자 분자라는 것은 상상할 수 없었기 때문에, 물 분자가 HO라고 생각한 사람들은 산소의 원자량을 8 근처로, H<sub>2</sub>O라고 생

각한 사람들은 16 근처로 계산했습니다. 그리고 어떤 실험 데이터를 사용했느냐에 따라 원자량 값이 약간씩 차이가 나는 것을 볼 수 있습니다.

한편, 영국 밖에서는 돌턴의 원자설이 어떻게 수용되었을까요? 흥미롭게도 많은 경우 돌턴의 원자설이 그대로 수용되지 않았습니다. 이는 뉴턴의 영향력이 상대적으로 작았기 때문이라고 볼 수 있습니다. 뉴턴의 나라였던 영국에서는 자연 현상을 입자들의 상호작용으로 설명하는 것이 자연스러운 관점이었지만, 그 밖의 나라에서는 굳이 입자 개념에 집착할 필요를 못 느꼈던 것입니다. 그리고 “질량”이 측정량의 대표로 사용될 필요도 없었죠. “질량” 대신 널리 사용된 실험적 측정량은 “부피”였습니다.

먼저 조제프 게이뤼삭(Joseph Louis Gay-Lussac, 1778-1850)의 이야기를 살펴보겠습니다.<sup>11</sup> 게이뤼삭은 베르톨레의 제자로서 돌턴의 원자설이 발표되던 당시 프랑스 화학계의 총아였습니다. 그는 1808년 게이뤼삭의 법칙으로 알려진 기체 반응의 법칙을 발표합니다. 기체들의 반응에서, 반응하는 기체와 생성되는 기체의 부피 사이에는 간단한 정수비가 성립한다는 법칙이죠. 앞서 데이비가 이 법칙을 활용하여 물의 조성을 결정했음을 언급한 바 있습니다. 우리도 오늘날 게이뤼삭의 법칙을 이용해 물질의 조성비를 결정한다고 배웁니다.

그런데 흥미롭게도 게이뤼삭은 스승의 가르침을 따라 일정 성분비의 법칙을 받아들이지 않았습니다. 그는 물질의 반응비는 실험 조건에 따라 달라질 수 있다고 생각했고, 자신의 법칙이 돌턴의 원자설을 지지하는 것처럼 보이지만 실제로는 그렇지 않다고 항변했습니다. 그는 오직 기체에서만 부피비가 정수비로 나온다는 점은 고체/액체에서 기체가 될 때 극적인 부피 변화가 수반되기 때문에 나타나는 “경험적” 법칙이라고 설명했고, 따라서 화학 반응에서 성분들 사이의 비율이 일정하다는 것은 일반화할 수 있는 원리가 아니라고 주장했죠. 게다가 게이뤼삭에게 있어 돌턴의 원자설은 최대한순성의 원리라는 임의적인 가설 위에 세워진 것이므로 받아들일 수 없었습니다.

표 1. 원소별 과학자들의 원자량

원소	돌턴, 원자량 (1810)	데이비, 비율 (1810-1811)	데이비, 비율 (1812)	톰슨, 원자량 (1813-1814)	윌라스턴, 당량 (1814)
H	1	1	1	0.132	1.32
O	7	7.5	15	1.000	10.00
C	5.4	5.7	11.4	0.751	7.54
N	5	13.4	26	0.878	17.54
S	13	13.6	30	2.000	20.00
P	9	16.5	20	1.320	17.40
Cl	(29)	32.9	67	4.498	(44.1)
Na	(21)	22 or 44	88	5.882	29.1
K	(35)	40.5	75	5.000	49.1
Ca	(17)	20.8	40	2.620	25.46
Mg	(10)		28	1.368	(14.6)
Sr	(39)		90	5.900	(59)
Ba	(61)		130	8.731	(87)
Fe	50	50	103	6.666	34.5
Cu	56		120	8.000	40
Zn	56		66	4.315	41
Ag	100		205	12.62	135
Hg	167		380	25.00	125.5
Pb	95		398	25.97	129.5

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

돌턴 역시 게이뤼삭의 법칙을 받아들이지 않았고, 자신은 그 법칙을 이해할 수 없다는 글을 남겼습니다. 게이뤼삭은 1828년이 되어서야 산-염기 반응을 다루기 위해 일정 성분비의 법칙과 돌턴의 원자설을 받아들입니다. 그는 자신의 글에서 영국 화학자들이 고심하여 만든 표현들인 “원자”, “비율”, “당량”이라는 표현을 섞어서 사용하였는데, 이는 그 철학적 함의에 대해 깊이 생각해 보지 않았다는 점을 시사합니다.

두 번째 인물로 이탈리아의 과학자 아마데오 아보가드로 (Amadeo Avogadro, 1776–1856)를 살펴봅시다.<sup>12</sup> 아보가드로는 1811년 게이뤼삭의 법칙에서 출발하여 같은 수의 기체 입자는 “그 종류와 무관하게” 동일한 압력에서 같은 부피를 점유한다는 가설을 끌어냅니다. 그는 이러한 가설에 기반하여 모든 물질의 “증기 밀도”를 계산하고자 하였습니다. 즉, 단위 부피당 산소와 결합하는 각 원소의 질량을 이용해 단위 부피당 질량을 계산한 것이죠. 문제는 그가 기체 뿐 아니라 액체와 고체에 대해서도 동일한 작업을 수행했다는 것입니다. 그 결과 기체로 존재하는 홑원소물질과 화합물에 대해서는 “맞는” 데이터를 만들어냈지만, 나머지 수백 종류의 물질에 대해서는(심지어 당시 기준으로 보더라도) 엉터리 데이터를 만들어냈습니다. 그리고 아보가드로 역시 돌턴의 원자 개념을 받아들이지 않았습니다. 그는 실험적으로 결정할 수 있는 최소 단위는 부피, 혹은 “증기 밀도”라고 주장했고, 수소의 부피를 1로 잡아 그로부터 다른 원소들의 단위 부피를 결정하는데 노력을 기울였습니다. 오늘날 흔히 아보가드로가 분자 개념을 처음 도입했다고 여겨지지만, 사실 그는 원자를 믿지 않았기 때문에 원자와 분자 개념을 구분하지 않았습니다.<sup>13</sup>

50년 후 화학자들은 아보가드로를 “재발견”합니다. 그리고 그의 가설을 활용하여 원자와 분자 개념을 정교하게 다시 정의하죠. 그러면서 왜 그동안 화학계에서 이 중요한 가설이 무시당했는지 의아하게 생각하면서, 돌턴과 게이뤼삭을 비롯한 동시대 화학자들을 비난합니다. 이 전통은 이후로도 쭉 이어져서 라이너스 폴링(Linus Pauling, 1901–

1994)마저 아보가드로가 무시당한 역사를 비통하게 여겼습니다. 하지만 화학사를 연구하는 학자들은 사실 아보가드로가 무시당한 것이 아니라는 사실을 알아냈습니다. 아보가드로 이후의 화학자들도 그의 논문을 읽었습니다. 그렇지만 아보가드로의 법칙은 이론적 설득력이 약할뿐더러 응용 가능성도 높아 보이지 않았습니다. 아보가드로의 법칙은 기체에만 적용됩니다. 그런데 19세기 전반 화학자들이 관심을 갖고 있던 많은 물질들은 기체가 아니었습니다. 아보가드로는 액체와 고체에 자신의 법칙을 적용하려고 애를 썼지만, 그 결과는 엉망진창이었습니다. 액체와 고체를 다룰 수 있는 다른 유용한 법칙들이 많은데, 굳이 부정확한 아보가드로의 법칙을 선택할 이유는 없겠죠.

돌턴이 일으킨 돌풍은 어디로 이어졌을까요? 영국에서 출발해 게이뤼삭의 나라 프랑스, 아보가드로의 나라 이탈리아, 그리고 독일로 퍼져나간 돌풍은 토르베른 베리만의 나라인 스웨덴에도 도착합니다. 옌스 야코브 베르셀리우스 (Jöns Jakob Berzelius, 1779–1848)도 돌턴의 원자설에 대해 듣게 됩니다. ⚙



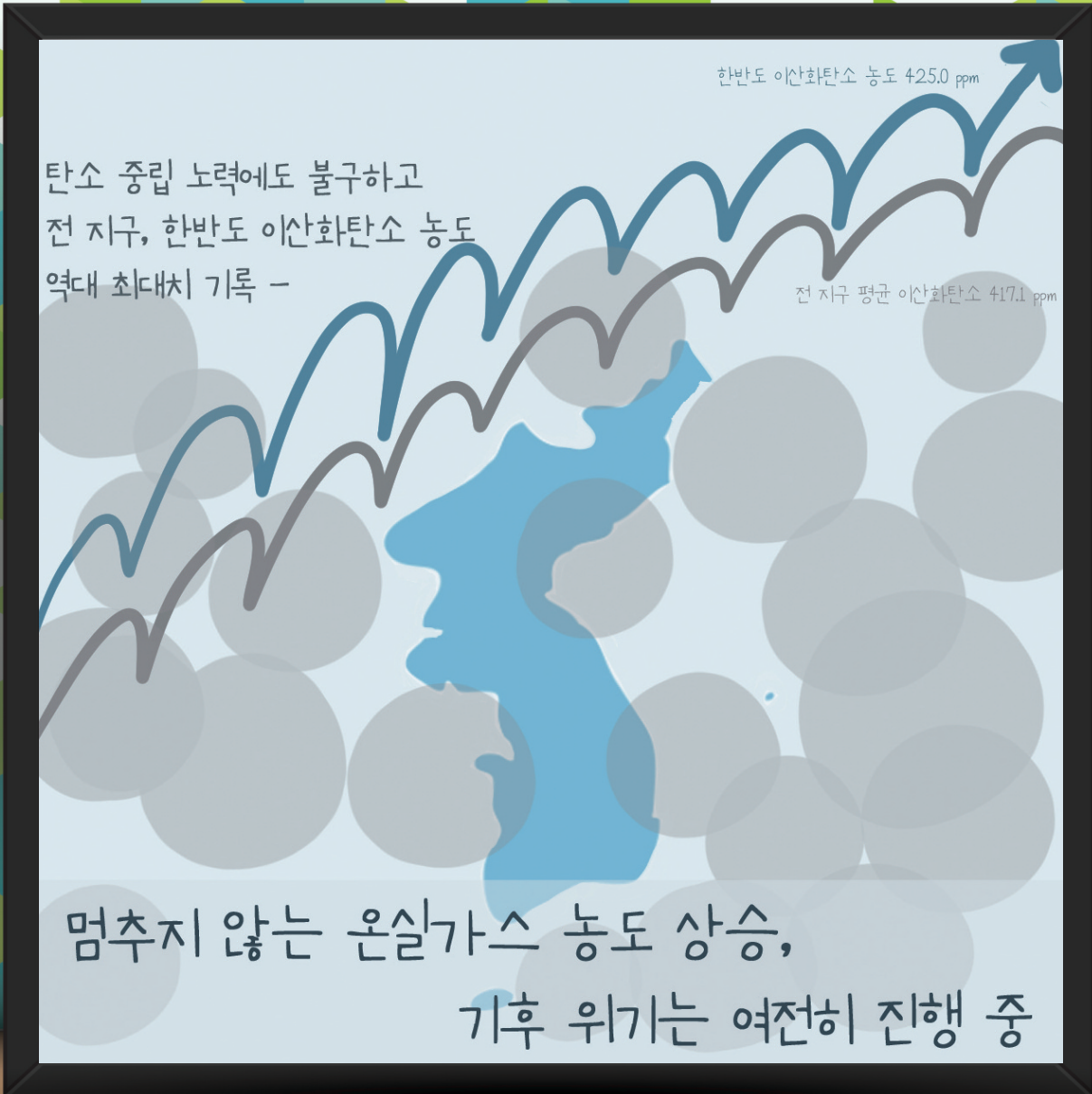
### 최 정 모 Jeong-Mo Choi

- 한국과학기술원 화학과, 학사(2003.3–2011.8)
- Harvard University 과학사학과, 석사 (2011.9–2015.5, 지도교수 : Naomi Oreskes)
- Harvard University 화학 및 화학생물학과, 박사 (2011.9–2016.5, 지도교수 : Eugene I. Shakhnovich)
- Washington University in St. Louis, 박사 후 연구원(2016.8–2019.4, 지도교수 : Rohit V. Pappu)
- 한국과학기술원 자연과학연구소, 연구조교수(2019.6–2020.8)
- 부산대학교 화학과, 조교수(2020.9–현재)

12. Nicholas Fisher, “Avogadro, the Chemists, and Historians of Chemistry: Part 1,” *Hist. Sci.* **20** (2): 77–102 (1982).

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





132회

# 대한화학회 학술발표회 초록등록 안내

2023년 10월 25일~27일(3일간)  
김대중컨벤션센터, 광주

**초록등록** 2023년 7월 14일~8월 24일, 17:00까지

**사전등록** 2023년 6월 22일~9월 21일, 17:00까지

## 01. 심포지엄 및 구두발표 주제/조직책임자

### 심포지엄

분과회	No.	주제	조직책임자	이메일
고분자화학	1	고분자 합성 연구의 최신 동향	이인환(아주대학교)	ilee@ajou.ac.kr
	2	중견 고분자화학 연구자 심포지엄	서명은(한국과학기술원)	seomyungeun@kaist.ac.kr
	3	지속가능형 고분자 소재의 최신 연구동향	박제영(서강대학교)	jeypark@sogang.ac.kr
무기화학	1	무기재료화학의 최신 연구동향	임주현(강원대학교)	jlim@kangwon.ac.kr
	2	배위화학 및 유기금속화학의 최신 연구동향	김진영(서울대학교)	jkim@snu.ac.kr
	3	나노화학의 최신 연구동향	박정은(광주과학기술원)	parkje@gist.ac.kr
물리화학	1	광전기화학 연구의 최근 동향	황윤정(서울대학교)	yjhwang1@snu.ac.kr
	2	컴퓨터와 화학: 최신 연구 동향	김현우(광주과학기술원)	hwk@gist.ac.kr
	3	에너지 과학을 위한 물리화학의 최신 연구동향	손운용(충북대학교)	nunyong@chungbuk.ac.kr
분석화학	1	산업 문제 해결을 위한 분석화학 최신 연구 동향	김기훈(한국과학기술연구원)	kihun.kim@kist.re.kr
	2	첨단 분석화학 최신 연구 동향	김민식(대구경북과학기술원)	mkim@dgist.ac.kr
생명화학	1	생체분자 응집현상 연구의 최신 동향	박종민(강원대학교)	jpark@kangwon.ac.kr
	2	바이오시스템 엔지니어링 연구의 최신 동향	고민섭(부산대학교)	mikoh@pusan.ac.kr
유기화학	1	국외 유기화학자 심포지엄	이홍근(서울대학교)	hglee@snu.ac.kr
	2	유기화학의 최신 연구 동향	윤주영(이화여자대학교)	jyoon@ewha.ac.kr
	3	촉매유기화학의 최신 연구 동향	배한용(성균관대학교)	hybae@skku.edu

분과회	No.	주제	조직책임자	이메일
의약화학	1	의약화학인상 수상 강연	임상민(한국과학기술연구원)	smlim28@kist.re.kr
	2	최신 유전자 암호화 라이브러리 기술 동향	이규명(한국화학연구원)	kmlee@kriect.re.kr
재료화학	1	2023 BKCS의 선택-재료화학	박성진(인하대학교)	sungjinpark@inha.ac.kr
	2	배터리 응용을 위한 재료화학의 최근 동향	김종순(성균관대학교)	jongsoonkim@skku.edu
	3	양자특성을 갖는 나노소재의 합성부터 응용까지	김인영(이화여자대학교)	iykim@ewha.ac.kr
전기화학	1	전기유기합성: 전기화학 그리고 유기화학	최창혁(포항공과대학교)	chchoi@postech.ac.kr
	2	탄소중립을 위한 전기촉매 화학 반응	황윤정(서울대학교)	yjhwang1@snu.ac.kr
	3	기초전기화학의 최신 연구 동향	박준희(충북대학교)	jhp@cbnu.ac.kr
화학교육	1	화학교육의 최근 이슈와 연구 동향	최원호(순천대학교)	stensil@scnu.ac.kr
	2	과학영재를 위한 화학교육	김기향(세종과학예술영재학교)	matari@sasa.hs.kr
환경에너지	1	(초)미세플라스틱 검출 및 인체/환경영향	김은주(한국과학기술연구원)	eunjukim@kist.re.kr
	2	이산화탄소 포집·활용 알키미스트 기술: 탄소부터 액체연료까지	박현웅(경북대학교)	hwp@knu.ac.kr
KCS	1	[KCS-RSC Joint 심포지엄] 에너지 과학의 다학제적 접근	황성주(연세대학교)	hwangsju@yonsei.ac.kr

## 구두발표

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

분과회	No.	주제	조직책임자	이메일
고분자화학	1	젊은 고분자화학 과학자를 위한 구두발표	김정곤(전북대학교)	jeunggonkim@jbnu.ac.kr
무기화학	1	젊은 무기화학자를 위한 구두발표	이경훈(경상국립대학교)	klee1@gnu.ac.kr
물리화학	1	젊은 물리화학자 구두발표	민승규(울산과학기술원)	skmin@unist.ac.kr
분석화학	1	젊은 분석화학자 구두발표	유성주(아주대학교)	sungjiyu@ajou.ac.kr
	2	후속세대 분석화학자 구두발표	하지원(울산대학교)	jwha77@ulsan.ac.kr
생명화학	1	젊은 생명과학자를 위한 구두발표	이민희(숙명여자대학교)	minheelee@sookmyung.ac.kr
유기화학	1	젊은 유기화학자 구두발표	최이삭(충북대학교)	isaac.choi@chungbuk.ac.kr
의약화학	1	젊은 의약화학자 구두발표	김종훈(송실대학교)	jhkim19@ssu.ac.kr
재료화학	1	젊은 재료화학자를 위한 구두발표	양지웅(대구경북과학기술원)	jiwoongyang@dgist.ac.kr
전기화학	1	젊은 전기화학자를 위한 구두발표	박준희(충북대학교)	jhp@cbnu.ac.kr
환경에너지	1	환경에너지 일반발표	김효원(한국에너지공과대학교)	hwkim@kentech.ac.kr

## 02. 연회비 및 참가비 안내

### 연회비 및 참가비 납부 안내

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

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

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

### 학회 참가비 지원 프로그램 안내

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

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

### 환불규정

#### 연회비와 참가비 환불 마감일

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

### 03. 심포지엄 및 구두발표 주제 요약문

#### 고분자화학분과회

##### | 심포지엄 1 |

##### 고분자 합성 연구의 최신 동향

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

##### | 심포지엄 2 |

##### 중견 고분자화학 연구자 심포지엄

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

##### | 심포지엄 3 |

##### 지속가능형 고분자 소재의 최신 연구동향

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

##### | 구두발표 |

##### 젊은 고분자화학 과학자를 위한 구두발표

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

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

#### 무기화학분과회

##### | 심포지엄 1 |

##### 무기재료화학의 최신 연구동향

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

##### | 심포지엄 2 |

##### 배위화학 및 유기금속화학의 최신 연구동향

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

##### | 심포지엄 3 |

##### 나노화학의 최신 연구동향

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

##### | 구두발표 |

##### 젊은 무기화학자를 위한 구두발표

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

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

## 물리화학분과회

### | 심포지엄 1 |

#### 광전기화학 연구의 최근 동향

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

### | 심포지엄 2 |

#### 컴퓨터와 화학: 최근 연구 동향

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

### | 심포지엄 3 |

#### 에너지 과학을 위한 물리화학의 최신 연구동향

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

### | 구두발표 |

#### 젊은 물리화학자 구두발표

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

## 분석화학분과회

### | 심포지엄 1 |

#### 산업 문제 해결을 위한 분석화학 최신 연구 동향

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

### | 심포지엄 2 |

#### 첨단 분석화학 최신 연구 동향

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

### | 구두발표 1 |

#### 젊은 분석화학자 구두발표

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

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

| 구두발표 2 |

**후속세대 분석화학자 구두발표**

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

**생명화학분과회**

| 심포지엄 1 |

**생체분자 응집현상 연구의 최신 동향**

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

| 심포지엄 2 |

**바이오시스템 공학 연구의 최신 동향**

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

| 구두발표 |

**젊은 생명과학자를 위한 구두발표**

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

**유기화학분과회**

| 심포지엄 1 |

**국외 유기화학자 심포지엄**

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

| 심포지엄 2 |

**유기화학의 최신 연구동향**

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

| 심포지엄 3 |

**촉매유기화학의 최신 연구동향**

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

적 진보 및 미래 방향을 조명하고자 한다.

| 구두발표 |

**젊은 유기화학자 구두발표**

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

**의약화학분과회**

| 심포지엄 1 |

**의약화학인상 수상 강연**

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

| 심포지엄 2 |

**최신 유전자 암호화 라이브러리 기술 동향**

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

| 구두발표 |

**젊은 의약화학자 구두발표**

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

**재료화학분과회**

| 심포지엄 1 |

**2023 BKCS의 선택-재료화학**

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

| 심포지엄 2 |

**차세대 이차전지를 위한 재료화학의 최근 동향**

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

| 심포지엄 3 |

**양자특성을 갖는 나노소재의 합성부터 응용까지**

양자특성은 매우 작은 크기의 나노소재들이 가지는 특징으로, 이를



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

**| 구두발표 |**

**젊은 재료화학자를 위한 구두발표**

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

**전기화학분과회**

**| 심포지엄 1 |**

**전기유기합성: 전기화학 그리고 유기화학**

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

**| 심포지엄 2 |**

**탄소중립을 위한 전기촉매 화학 반응**

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

**| 심포지엄 3 |**

**기초전기화학의 최신 연구 동향**

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

**| 구두발표 |**

**젊은 전기화학자를 위한 구두발표**

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

**화학교육분과회**

**| 심포지엄 1 |**

**화학교육의 최근 이슈와 연구 동향**

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

| 심포지엄 2 |

**과학영재를 위한 화학교육**

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

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

**KCS**

| 심포지엄 1 |

**[KCS-RSC Joint 심포지엄] 에너지 과학의 다학제적 접근**

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

**환경에너지분과회**

| 심포지엄 1 |

**(초)미세플라스틱 검출 및 인체/환경영향**

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

| 심포지엄 2 |

**이산화탄소 포집·활용 알키미스트 기술: 탄소부터 액체연료까지**

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

| 구두발표 |

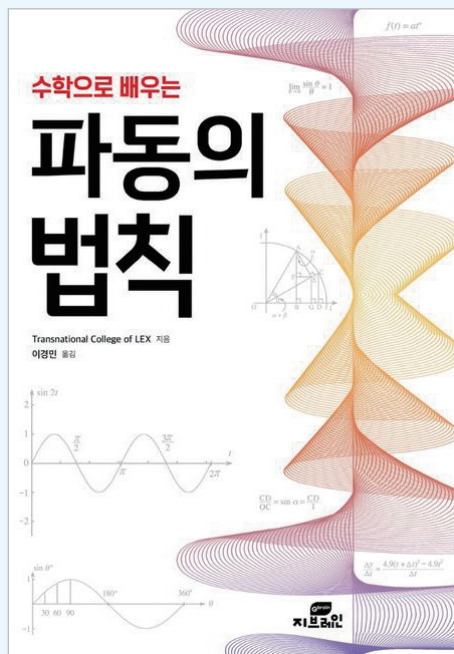
**환경에너지 일반발표**

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

수학으로 배우는

# 파동의 법칙

Transnational College of LEX 지음 | 이경민 옮김  
지브레인 | 2021.7.26 출간 | ISBN 9788959796502



## 목차

### PART 1

- Chapter 1 푸리에 급수
- Chapter 2 푸리에 계수
- Chapter 3 불연속 푸리에 전개
- Chapter 4 음성과 스펙트럼

### PART 2

- Chapter 5 미분
- Chapter 6  $\sin q$ 의 미분
- Chapter 7 적분
- Chapter 8 정사영과 직교

### PART 3

- Chapter 9  $e$ 와  $i$
- Chapter 10 오일러 공식
- Chapter 11 푸리에 급수 전개의 복소 표현
- Chapter 12 푸리에 변환과 파동의 불확정성
- Chapter 13 FFT 방법

## 책 소개

파동의 입문서로 미국과 일본에서도 인정받은 《수학으로 배우는 파동의 법칙》은 과학, 수학, 의학 등 다양한 분야에 흥미있는 사람들에게 가장 이해하기 쉽고 재미있는 파동의 세계로 안내해 줄 것이다.

이론물리학, 음양학, 광학, 우주물리학, 전자공학, 진동해석, 신호처리, 화상처리, 데이터 압축, 통신공학, 영상의학 등 파동은 다양한 학문에서 필수적인 분야이다. 그리고 우리의 일상 역시 파동으로 가득 차 있다. 때문에 우리에게 파동은 대단히 중요한 분야이다. 그런데 고등학교에서 파동 그중에서도 푸리에 변환을 제대로 다루고 있지 않기 때문에 대학에서 본격적인 수학 공부를 시작하려 할 때, 어려움이 많다고 한다. ‘푸리에’는 빛, 소리, 진동, 열전도라는, 파장으로 파악되는 현상을 해석하기에 유력한 수학이다. 이 책은 푸리에 변환을 이해하고 정복할 수 있도록 아주 자상하고 친절하게 가르치고 있다. 예를 들어 푸리에 급수를 배우는 데 필수적인 삼각함수와 미분·적분이 아주 쉽고 기초부터 접근하기 때문에 숫자나 공식을 무서워하는 사람도 친근하게 다가갈 수 있다.

## 저자 소개

**Transnational College of LEX** : Hippo는 스페인어, 한국어, 영어, 일본어, 독일어, 중국어, 프랑스어 7개 국어를 기본으로 여러 나라의 말을 동시에 자연 습득하는 다언어 활동 프로그램이다. 이에 참여하는 사람들의 모임인 Hippo Family Club의 활동을 기반으로 ‘언어와 인간’을 자연과학적으로 탐구하는 데 몰두하는 교육 기관이 Transnational College of LEX이다. 이 모임은 고등학교 졸업 이상의 다양한 연대의 학생들과 연구조수, 각 분야의 전문가에 의해 구성되어 종래의 언어관을 전환하여 새로운 ‘자연적인 언어관’의 확립을 지향하고 있다. 그 연구 성과는 매년 3월에 발표하며, 연구지로도 출판되고 있다. 그중에서 『수학으로 배우는 파동의 법칙』, 『수학으로 배우는 양자역학의 법칙』, 『DNA의 법칙』은 일본, 미국의 대학, 연구기관에서도 교과서로 채택되는 등 세계 속에서 큰 반응을 불러일으키고 있다.

## 역자 소개

**이경민** : 번역 및 출판 기획자로 다수의 도서를 기획 및 출판했으며 실용, 인문 교양, 소설, 만화 등 다양한 분야의 작품을 번역해 왔다. 옮긴 책으로는 『거실 공부의 마법』, 『39종 다이어트에 실패한 46세 비만 의사는 어떻게 1년 만에 요요 없이 15kg을 뺄 수 있었을까?』, 『쿠보타 할머니의 0~1세 두뇌 발달 놀이』, 『My First 나의 첫 번째 스타일 북』, 『돈을 끌어당기는 마법의 지갑』, 『태자비 승직기』, 『향밀침침신여성』 등이 있다.



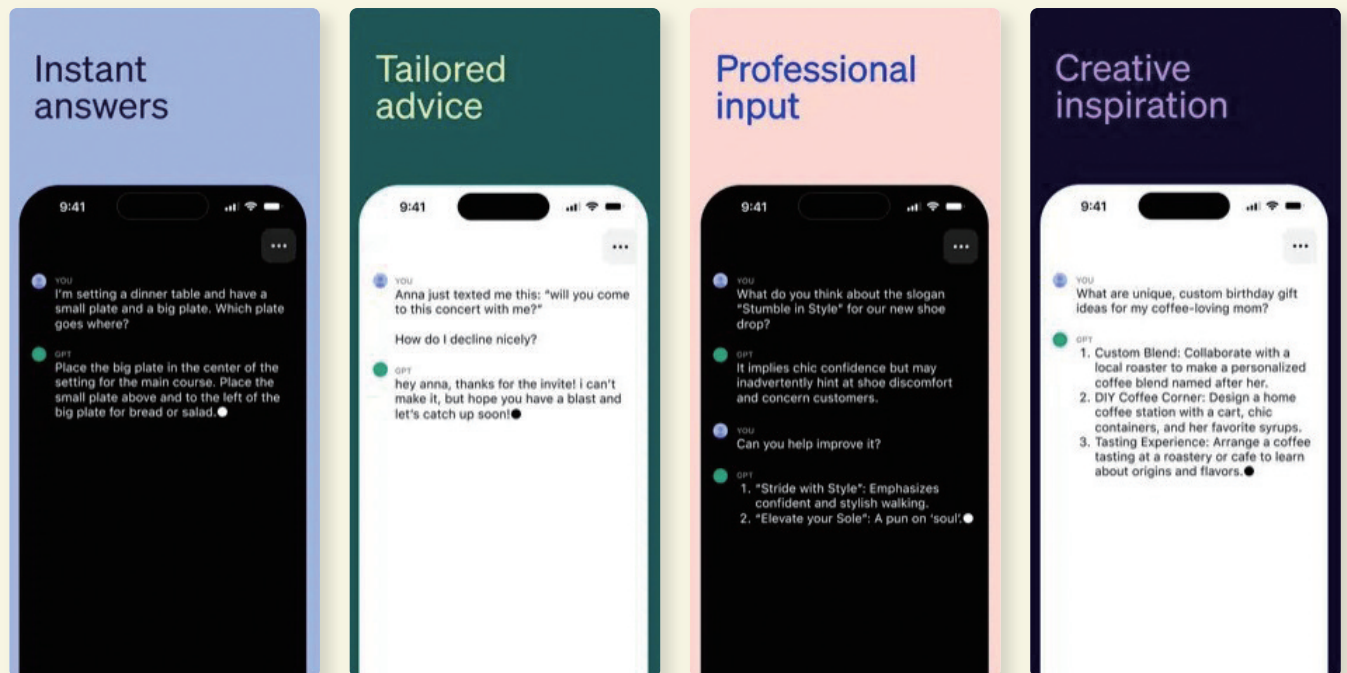
# ChatGPT

(<https://apps.apple.com/app/openai-chatgpt/id6448311069>)



## 앱 소개

이번 7월호에는 ChatGPT를 모바일 기기에서 편리하게 사용할 수 있는 ChatGPT 앱을 소개하고자 합니다. ChatGPT의 파급력과 활용 가능성은 다시 이야기할 필요가 없을 정도입니다. 대한화학회 회원 여러분께서도 연구, 교육, 업무 등 다양한 분야에서 창의적으로 ChatGPT를 활용하고 계시리라 생각합니다. ChatGPT의 API를 이용한 앱들도 속속 개발되고 있습니다. 그 와중에 ChatGPT를 개발한 OpenAI가 공식 ChatGPT 앱을 얼마 전에 발표하였습니다. 개인 컴퓨터에서 활용하던 ChatGPT를 어디서든 모바일 기계를 이용해서 활용하실 수 있을 것으로 기대합니다. 다만, 유사한 로고 디자인의 앱들이 앱스토어에 많이 등록되어 있으니, 신중하게 OpenAI의 ChatGPT 앱을 다운로드하시기 바랍니다.



>>> 운영위원회

6월 운영위원회

2023년 6월 16일에는 제9차 운영위원회가 하이브리드 형태로 진행되었다. 먼저 미래혁신 화학심포지엄 구성을 제안한 5개 융합주제에 대해 승인하고, 예산 지원에 대한 내규를 마련하기로 논의하였다. 아이센스 남학현 대표이사께서 이태규 학술상을 지원하겠다는 의견을 전달하셨고, 이를 구체적으로 논의하기 위한 회의를 7월 중 개최하기로 하였다. 지난 6월 13일, 6개의 기초과학 대표학회 주관, 기초과학 학회협의체 후원으로 “반도체 양자기술, 패권 경쟁 시대와 대한민국의 미래” 포럼이 김지환 학술부회장이 좌장을 맡아 진행되었다. 기초과학의 역할과 교육의 방향에 대한 토론이 이어졌는데, 대한화학회에서 국가 정책에 대응하는 위원회 활동이 필요함을 인식하였고, 이광렬 기획부회장과 고두현 총무실무이사께서 위원회를 조직하기로 하였다. JKCS 교육분야 상임편집위원의 심사비 지급 요청 건은 학술지간행위원회와 내용을 공유하고 논의 후 결정하기로 하였다. 대한화학회 웹페이지 신규 개발업체가 인건비 상승 및 학회의 추가 요청 건을 이유로 수정된 견적서를 전달하여, 이에 대해 검토하기로 하였다. 6월 초에는 화학세계 웹사이트 제작 중간 검토를 위해 웹디자이너와 홍보분과, 기획분과 운영위원님들이 미팅을 진행하였고, 1차 구축된 웹사이트의 수정 의견을 전달하였다. 학술분과에서는 춘계학술발표회 구성에 대한 안건을 논의하였는데, UNIST 다차원 탄소재료 연구단(단장, Rodney Ruoff 교수)에서 특별 심포지엄을 진행하기로 하였고, 기초강연자는 KAIST 장석복 교수님으로 결정하였다. KCS-RSC 심포지엄을 비롯하여 수요일에 진행될 특별 심포지엄이 많아, 튜토리얼 세션을 진행할지를 다음 운영위원회에서 결정하기로 하였다. 국제협력분과에서는 RSC 담당자와 KCS-RSC 심포지엄 구성을 위해 논의하고 있으며, RSC에서 추천한 JMC 저널 에디터 2~3인 이외, 대한화학회에서는 물리화학 분야 연사를 재요청하였다. Gender equality에 관한 패널 토론자 섭외는 여성위원회에 자문을 구하기로 하였다. 교육분과에서는 중고생들을 위한 진로특강을 춘계학술발표회 특강과 동일하게 금요일 오후에 진행하기로 하였고, 포스터 시화 수상작을 진로 특강 중에 시상하는 것을 제안하였다. 사무국에서는 지난 춘계학술발표회 정산 내용을 보고하였고, BKCS 편집위에서 제안한 BKCS 기념논문집 발간에 관한 내규 개정안을 공유하였는데, 해당 안건은 학술지간행위원회

검토와 승인을 거쳐 결정하기로 하였다. 또한 김대중컨벤션센터 답사 후 세션장의 가배정 결과를 공유하였고, 10월 25일(수)과 27일(금)에 개최될 여러 특별 심포지엄 장소는 7월 초 학술분과 답사 후 결정하기로 하였다.

>>> 지부·분과회

고분자화학분과회

- 행사명: 대한화학회 고분자화학분과회 하계워크샵
- 개최기간: 2023년 7월 6일~2023년 7월 7일
- 개최장소: 여수 유담마리나 호텔&리조트
- 주최: 대한화학회 고분자화학분과회
- 후원: 대한화학회
- 담당자: 송창식(성균관대학교, songcs@skku.edu)
- 참석인원: 150명
- 발표편수: 교수 구두발표(9~10편)
- 내용: 대한화학회 고분자화학분과회 회원들간 학술 교류 및 친목 도모를 위해 하계워크샵을 개최합니다. 이번 워크샵은 여수에서 1박 2일 프로그램으로 진행되, 고분자화학 분야 최신 연구동향, 기초/응용연구 결과 및 향후 전망 등이 심도 깊게 논의될 예정입니다. 또한 학생들을 포함한 회원들간의 좋은 친목의 장이 될 것으로 기대합니다. 고분자화학 분야에 관심을 갖고 계신 연구자 여러분들의 적극적인 관심과 참여를 부탁드립니다.

재료화학분과회

- 행사명: 2023년 대한화학회 재료화학분과회 하계심포지엄
- 개최기간: 2023년 7월 5일~2023년 7월 7일
- 개최장소: 부산 해운대 한화리조트
- 주최: 재료화학분과회
- 담당자: 박종남(울산과학기술원, jnpark@unist.ac.kr)
- 참석인원: 250명

>>> 부 고

- |           |                               |     |
|-----------|-------------------------------|-----|
| 2023.6.28 | 유미현(아주대학교 화학교육과) 회원           | 모친상 |
| 2023.6.26 | 이일영(한국화학연구원<br>친환경신물질연구센터) 회원 | 모친상 |
| 2023.6.23 | 박태호(포항공과대학교 화학공학과)회원          | 빙부상 |
| 2023.6.22 | 이지훈(한국교통대 응용화학에너지공학부)회원       | 부친상 |
| 2023.6.19 | 허도성(인제대학교 방사선화학) 회원           | 빙부상 |
| 2023.6.5  | 장순민(세종대학교 화학과) 회원             | 부친상 |

## 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](mailto:office@kcsnet.or.kr))  
서울 성북구 안암로 119 한국화학회관 4층 (02856) / 전화 : 02-953-2095 / 팩스 : 02-953-2093

## 회비 및 구독료 안내

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

2023년도 본회 회비 및 각종 간행물의 구독료는 다음과 같습니다.

(단위: 원)

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

### ■ 회비납부 관련문의

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

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

회원확인 → ID 변경 → 회원 로그인 → 결제 및 영수증 출력

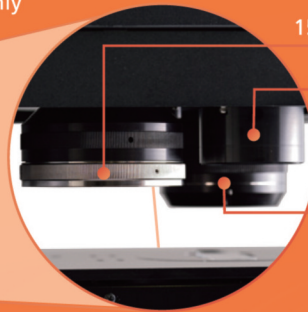
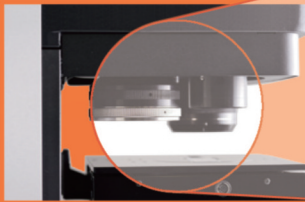
새로운 적외선 현미경 시스템!  
Infrared Microscope

# AIMsight™

SHIMADZU AIMs to  
provide analysis systems for all users.



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

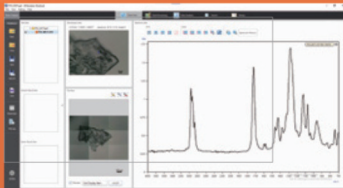


15x reflective objective mirror

Wide-field camera

Grazing Angle Objective  
(optional)

Exports  
the measurement results



**Observe**  
Wide-field camera



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



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

# BIONEER

Life Science Total Solution

## 바이오니아는

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

생명과학 분야의

## **Total Solution**을

제공합니다.

### Our Services

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

[www.bioneer.co.kr](http://www.bioneer.co.kr)



**BIONEER**  
Innovation • Value • Discovery