

ISSN 2005-7474

December 2023

화학연합

Bulletin of Korean Chemical Science and Technology

Winter Vol. 15 No. 2

15권 2호
통권 65호

포커스

- 양자 기술과 화학
- 신축성 트랜지스터 기술 동향
(Trends in Stretchable Transistor Technology)
- 친환경 화이트바이오기술
- 과불소계 이오노머의 위기와 기회
(Risks and opportunities of perfluorinated ionomers)



한국공업화학회



한국고분자학회



한국세라믹학회



한국화학공학회



대한화학회

THE KOREAN
ELECTROCHEMICAL
SOCIETY

한국전기화학회

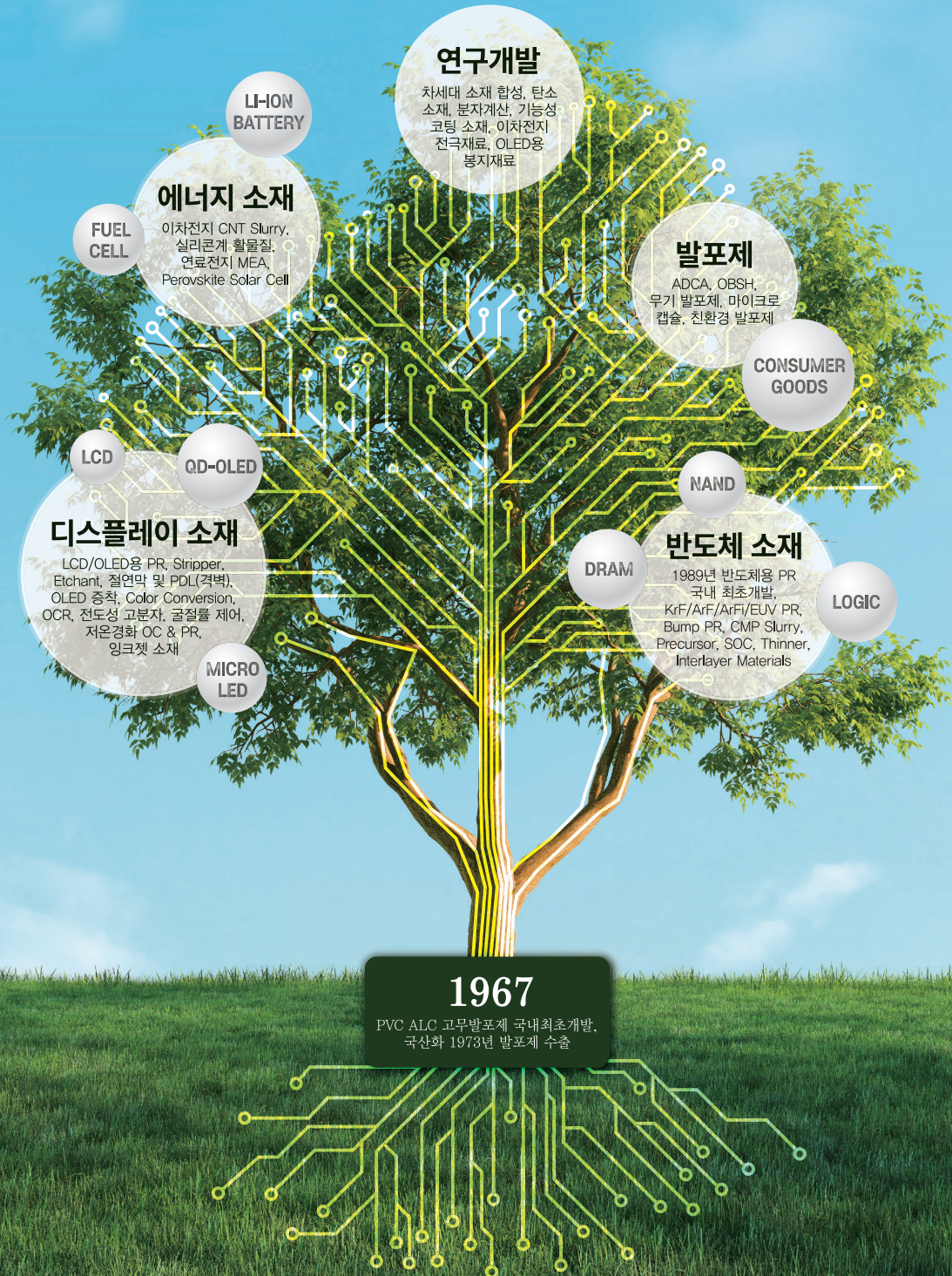


한국화학관련학회연합회
THE KOREAN UNION OF CHEMICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY SOCIETIES

<http://www.kucst.org>

동진세미켐의 소재기술은 전자산업의 역사와 함께 합니다

A Global Leader in Electronic Materials & Foaming Agents



지속적인 기술 혁신을 지향하는 **동우화인켐**은

대한민국 IT산업의 중심에 서 있습니다!



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.

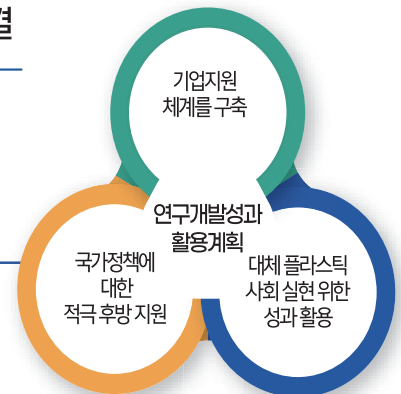
플라스틱 대체물질

소재부품장비산업 지원센터 구축 사업

플라스틱 대체물질 산업의 전주기 관련 원료·가공, 부품·제품의 생분해·성능평가·실증평가, 단체표준 개발 등 사업화 지원 체계 구축으로 중소·중견기업의 기술 경쟁력 향상과 국가 전략 산업 육성을 목표로 하고 있으며, 원료 공급 기업과 수요기업간 Value chain을 형성하여 미래 국내 플라스틱 대체물질 산업 발전 토대를 구축하고자 합니다.



비 전	플라스틱 대체물질 개발지원으로 전후방산업 동반성장 및 환경문제 해결
목 표	<ul style="list-style-type: none"> · 생분해성 바이오플라스틱 소재 연구개발 및 제품화 · 플라스틱 대체물질 적용 시제품 제작 및 상용화 지원 인프라 구축 · 기업대상 단체표준개발, 인력양성지원으로 판로개척 및 고용창출
사업 방향	<ul style="list-style-type: none"> · 플라스틱 대체물질 소재개발 지원 <ul style="list-style-type: none"> - 파일럿 규모 시설운영으로 원료개발 지원 - 생분해성 원료 및 가공된 제품의 다양한 환경에서 생분해도 측정 - 대체물질 응용 제품의 실환경 실증평가 지원 · 플라스틱 대체물질 적용 제품 실증화 지원 <ul style="list-style-type: none"> - 생분해성 컴파운딩 원료 및 화학공정(합성) 원료 시제품 제작 - 플라스틱 대체물질 제품의 시험인증평가 지원 - 판로확대를 위한 단체표준/인증 지원 · 기업 교육 훈련 및 단체표준 개발 지원 <ul style="list-style-type: none"> - 기업애로사항 발굴 및 해결 위한 위원회 운영 - 기술세미나 및 기술상담 지원 - 공급/수요기업대상 기술교육 프로그램 확대로 전문인력 양성 활용



프런티어소재융합교육연구단



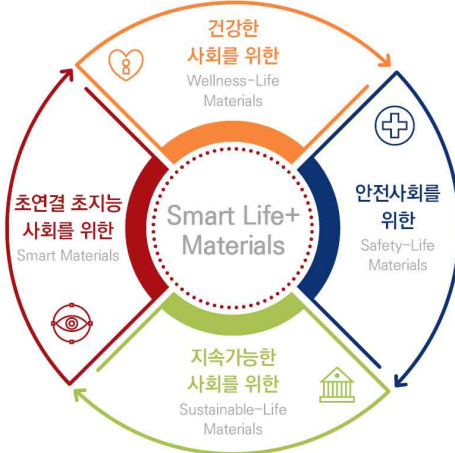
경희대학교
 KYUNG HEE UNIVERSITY

홈페이지 : <http://frontier.khu.ac.kr>



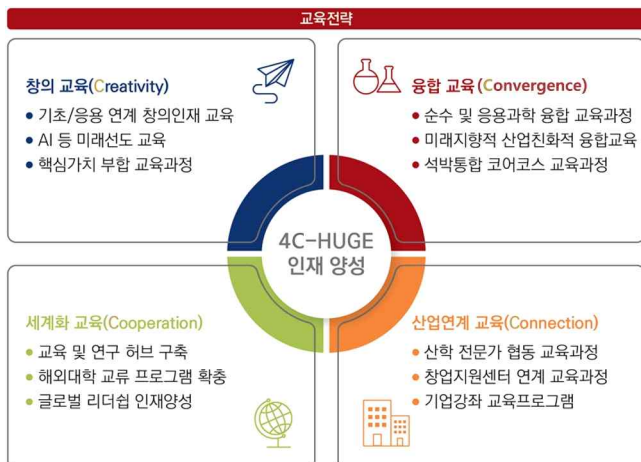
교육연구단 비전 및 목표

비전	4차 산업혁명시대 대응 미래 첨단소재 신산업 일차형 창의 인재 양성			
목표	4C - HUGE 인재 양성			
세부 목표	Human 인류번영에 기여하는 미래첨단 소재 인재양성	Universal 인류공동 이익에 부합하는 소재 연구	Global 미래 첨단소재 글로벌 인재 양성	Energizing 국가·지역 산업 활성화
핵심역량 (4C)	Creativity 인성 및 창의성을 갖춘 리더십	Convergence 다 학제간 융합지식을 지닌 전문성	Cooperation 국제교류 및 협력	Connection 신산업 대응 실무력

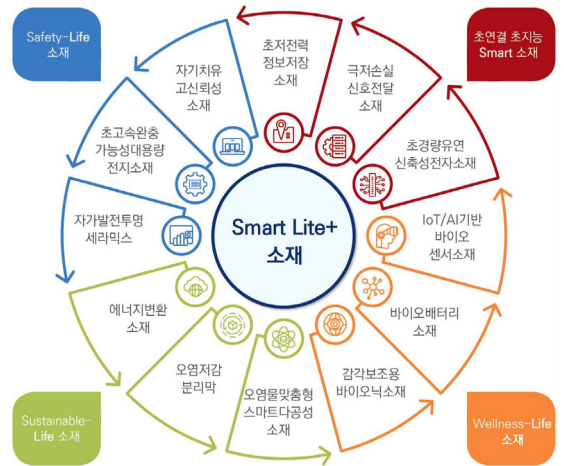


교육/연구 방향

▷ 교육 방향



▷ 연구 방향



▷ 교육연구단 학과 졸업 후 진로



▷ 참여교수

신소재

최석원, 강성준, 박민식, 정재웅, 전우진, 정성호, 이재욱, 박윤석, 이홍섭

물리

이종수, 손종역, 이호선, 김성, 김민수

기계

이순걸, 김윤혁, 허윤정, 이경엽

기능성 유무기 복합소재 실용화 전문인력양성

기능성 첨단소재 기술확산을 통한 4차 산업 르네상스 실현



기술특화별 석박사
교육과정 개발 및 운영



수요 맞춤형 산학프로젝트
개발 및 운영



4차 산업 연계 전문교육과정
개발 및 운영



산학협력 체계 구축
및 성과확산

1 취업연계 및 성과확산



2 취업연계 및 성과확산

취업/창업 지원 프로그램	사례 발굴 및 홍보/확산	취업을 제고 방안	고용연계 성과 환류체계 구축
<ul style="list-style-type: none"> · 산업계 전문가 취업 코칭 (멘토-멘티) · 채용기업 발굴 · 취업매칭 프로그램(찾아가는 인재채용) · CEO/CTO 초청 워크숍 · 취업박람회/기업설명회 · 컨소시엄 고용연계 	<ul style="list-style-type: none"> · 성과 교류회 개최 · 대내외 행사 홍보부스 운영, 브로셔 제작 및 배포 · 졸업생 초청 특강, 졸업생 토크쇼데이 · 홈페이지 제작 및 이동통신단말기 · 어플리케이션 활용 · 분기별 e-Newsletter 발행 	<ul style="list-style-type: none"> · 단기집중 교육프로그램과 연계 · 산학프로젝트/현장연수와 연계 · 교과과정 운영 및 산업현장 전문가 · 강의참여 유도 · 기업 인력수요 현황 및 채용예정계획 조사 	<ul style="list-style-type: none"> · 산학공동프로젝트 참여 학생의 기업취업 장려 · 만족도 조사를 통한 환류시스템 구축 · 미취업자 대상 추가교육 및 산학프로젝트 지원 · 대학원생 대상 마일리지 프로그램 운영을 통한 포상 및 동기부여
우수 성과 / 사례 촉진 / 확산			

3 교육기관



경희대학교 화학공학과 (연구책임자: 박범준교수)
유무기 복합소재 공정/적용 기술특화 집중교육 분야
사업담당 연구원: 은보림(breun12@khu.ac.kr)



성균관대학교 화학공학과 (연구책임자: 채희엽교수)
유무기 복합소재 공정/적용 기술특화 집중교육 분야
사업담당 연구원: 최용혁(yong684@naver.com)



인하대학교 화학공학과 (연구책임자: 최진섭교수)
유무기 복합소재 공정/적용 기술특화 집중교육 분야
사업담당 연구원: 김보경(bkk@inha.ac.kr)

지원조건

구분	지원자격	모집인원	이수 요건
경희대	국내외 대학 학사 및 석사학위 취득자 또는 입학일 기준 졸업 예정자(화학공학전공관련)	년 15명	<div>석사과정</div> 24학점 이수 <div>박사과정</div> 36학점 이수 - 졸업논문 - 신학 프로젝트 수행 등 학교별 상세 졸업요건 참조
성균관대		년 13명	
인하대		년 13명	

* 기능성 첨단소재 산업기술 트랙 필수 수료 요건



문의사항은 연락주세요.

· 전문기관 한국산업기술진흥원 산업인력혁신팀 김성진 책임연구원 02-6009-3231 · 주관연구개발기관 한국석유화학협회 연구조사본부 이경민 사원 02-3668-6156



3D프린팅 및 완전소결 고정밀 세라믹 성형 솔루션

(주)3D컨트롤즈



(주)쓰리디컨트롤즈는 완전 소결체 세라믹 제품을 제작할 수 있도록 세라믹 복합 소재와 세라믹 3D프린터와 전용 소결로를 자체 개발, 국산화에 성공한 기업으로 조달청 혁신제품으로 지정받았습니다.

ULTRA HIGH
PRECISION

TD6

고해상도 DLP 세라믹 프린터

FULL CERAMIC PRINTING
AT ULTRA LOW COST

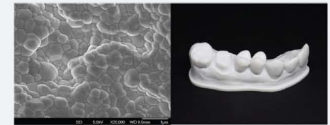


소결로
RO



세라믹 재료

지르코니아 시리즈

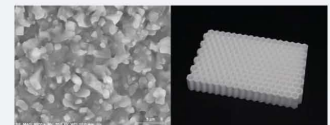


Solids loading [vol%] 45 ~ 54
Viscosity' [Pa.s] 1.8 ~ 15

SINTERED

Theoretical density [g/cm³] 6.05
Relative density [%] 99.5
Porosity [%] 0.5
3 point bending strength [MPa] 600 ~ 950

알루미나 시리즈



Solids loading [vol%] 45 ~ 54
Viscosity' [Pa.s] 1.8 ~ 15

SINTERED

Theoretical density [g/cm³] 6.05
Relative density [%] 99.5
Porosity [%] 0.5
3 point bending strength [MPa] 600 ~ 950

개발 중인 재료 소개



Si₃N₄ 시리즈 ATZ 시리즈 Y₂O₃ 시리즈
일화 규소 알루미나 강화지르코니아
이트리아



혁신제품



서울특별시 마포구 백범로31길 21 서울창업허브 별관 218호

☎ +82 519726986 ✉ sales@3dcontrols.co.kr

🌐 www.3dcontrols.co.kr



로봇의 정교한 조작을 위한 하이브리드형 고성능 멀티모달 전자피부 센서 및 확장형 모듈 개발

경희대학교 화학공학과 오진영 교수



경희대학교
KYUNG HEE UNIVERSITY



성균관대학교
SUNGKYUNKWAN UNIVERSITY

동국대학교
dongguk UNIVERSITY



개발기간: 2021. 04. 01 ~ 2023. 12. 31

사람 촉감을 갖는 로봇 핸드 구현을 위한 요소기술 개발



한국화학관련학회연합회 6개 정회원 학회

2024년 춘·추계 학술대회 일정



대한화학회



한국고분자학회



한국공업화학회



한국세라믹학회



한국화학공학회



한국전기화학회

연도	구분	월	개최학회	개최일	개최장소
2024년	춘계	4월	대한화학회	24(수)~26(금)	수원컨벤션센터
			한국고분자학회	3(수)~5(금)	제주컨벤션센터
			한국세라믹학회	17(수)~19(금)	부산 BEXCO
			한국화학공학회	24(수)~26(금)	제주국제컨벤션
			한국전기화학회	3(수)~5(금)	부산 BEXCO
		5월	한국공업화학회	8(수)~10(금)	부산 BEXCO
	추계	10월	대한화학회	16(수)~18(금)	대구 EXCO
			한국고분자학회	9월 30(월)~10월 2(수)	부산 BEXCO
			한국세라믹학회	16(수)~18(금)	서울 COEX
			한국화학공학회	16(수)~18(금)	부산 BEXCO
			한국공업화학회	30(수)~11월 1(금)	광주김대중컨벤션
			한국전기화학회	6(일)~11(금)	Hawaii Convention Center

CONTENTS

Bulletin of Korean Chemical Science and Technology

포커스

- 03 양자 기술과 화학_김현우
- 09 신축성 트랜지스터 기술 동향
(Trends in Stretchable Transistor Technology)_오힘찬
- 15 친환경 화이트바이오기술_권용구
- 21 과불소계 이오노머의 위기와 기회
(Risks and opportunities of perfluorinated ionomers)_이창현

지상초대석

- 32 수전해공정 수소 크로스오버현상의 이해 (Understanding the hydrogen crossover phenomenon in water electrolysis process)_김정
- 39 암모니아 생산을 위한 광전기화학적 질소환원반응 촉매 디자인의 동향
(Catalyst Design for Ammonia Production via Photoelectrochemical Nitrogen Reduction Reaction)_최진욱, 박태언, 윤영훈, 심욱
- 49 폐기되는 용액 공정 유기 기반 태양전지의 재활용을 위한 기술
_손해정, 윤성원
- 56 3D 프린팅 기반 경사기능재료(Functionally Graded Materials)
_조수영, 조정호

화학연합카페

- 65 분석 기술의 발달이 밝힌 인류 역사의 미스터리
- 금속을 어떻게 만들 수 있게 되었을까?_이경우
- 71 극초음속으로 하늘을 날다_한기보
- 76 남성들의 피임법 성공할까?_진정일

81 화학연합회소식

정회원 소식

- 88 대한화학회
- 92 한국고분자학회
- 97 한국공업화학회
- 106 한국세라믹학회
- 110 한국화학공학회
- 114 한국전기화학회

특별회원사 소식

- 120 한국화학연구원

우수연구단체

- 134 경상국립대학교 화학과 유기반도체 재료 연구실
(Organic Semiconducting Materials Lab, GNU)_김윤희
- 142 에너지 변환 및 저장 연구실
(Energy Conversion & Storage Laboratory, ECSL)_박종혁
- 148 연료전지 에너지혁신연구센터_조은애

양자 기술과 화학

김 현 우 (광주과학기술원 화학과 조교수)

1. 서론

전 세계에서 양자 기술에 관한 관심이 높아지고 있다. 우리나라도 올해 12대 국가 전략기술을 발표하며 양자 기술을 포함했다. 화학은 원자 혹은 전자 수준에서 소재와 분자를 연구하는 학문이기에 화학 전공자는 원자 구조를 배울 때부터 양자를 배운다. 파동 함수와 측정, 양자 상태와 같은 단어들이 물리 화학 교과서에 등장한다. 하지만 아직은 양자 기술이 화학 연구자들에게 다소 생소한 개념이 될 때가 많다. 이 글에서는 양자 기술과 관련된 화학 분야 연구가 소개될 것이다.

2. 본론

2.1. 양자 화학 계산과 양자 기술

양자 화학 계산은 주어진 화학 구조에서 전자 구조를 계산하여 구조와 특성 사이 관계를 밝히는 연구에 주로 이용된다. 밀도 범함수 이론(density functional theory, DFT) 계산이 가장 널리 이용되어 많은 연구자에게 알려져 있다. DFT는 계산 효율성과 정확성이 적절한 균형을 이룬 방법으로 다양한 화학 실험 결과를 설명할 수 있는 규모로 계산을 할 수 있다는 장점

이 있다. DFT가 가진 단점은 포텐셜 에너지 일부를 정확하게 계산할 수 없다는 점이고, 이 때문에 근사법이 도입된다. DFT와 다른 양자 화학 계산 이론인 파동 함수 이론(wave function theory, WFT)은 정확한 계산 결과를 주는 방법을 제시할 수 있다. 하지만 여러 전자 배치가 섞여 있는 분자와 소재를 효율적으로 계산하기에는 어려움이 따른다. 이를 해결하는 방법들이 DFT와 WFT에서 모두 개발되고 있다.

필자는 계산화학 전공자로 양자 기술에 대한 전문가가 아니지만, 이론 및 계산 화학에서 진행되는 양자 기술관련 내용을 설명하기에 필요한 간단한 배경 지식을 소개하려 한다. 양자 컴퓨터는 말 그대로 양자 현상을 이용한 컴퓨터이다. 기존 컴퓨터가 비트(bit)라고 부르는 0과 1로 정보를 기술한다면, 양자 컴퓨터는 정보를 다루는 기본 단위로 큐비트(qubit)을 이용한다. 큐비트가 특별한 점은 중첩에 있는데, 만약 0과 1로 표현되는 두 가지 상태가 있다면 익히 알려진 슈뢰딩거 고양이 예제처럼 측정하기 전에는 두 가지 상태가 중첩되어 있는 상태로 존재한다는 것이다.

슈뢰딩거(Schrödinger) 방정식에 따르면 파동 함수와 해밀토니안(Hamiltonian)을 이용해서 고유값(eigenvalue) 문제를 푸는 방식으로 에너지



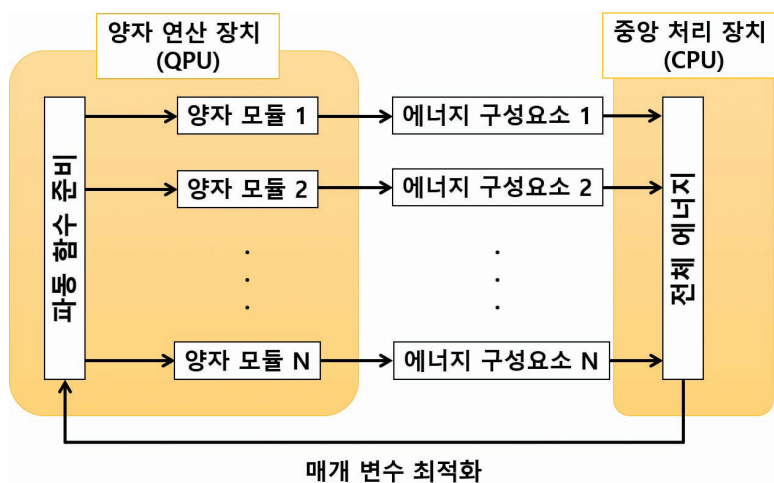
[그림 1] (ㄱ) 슈뢰딩거 고양이 (ㄴ) 공간에 표현된 큐비트 (출처: 위키피디아)

를 구한다. 큐비트를 이용한 양자 컴퓨터를 양자 화학 계산에서 이용하기 위해서는 파동 함수와 해밀토니안이 큐비트로 표현되어야 한다. 먼저 큐비트 표현으로 파동 함수를 기술하는 방법은 Jordan–Wigner, Bravyi–Kitaev 변환 등이 알려져 있다. 또한 해밀토니안도 큐비트를 이용한 표현으로 기술될 수 있다.

물리 화학에서 배운 변분 원리는 ‘임의로 파동 함수를 이용하여 에너지를 계산하는 경우 계산된 값은 실제 에너지보다 전혀 작지 않다.’라는 문장으로 설명될 수 있다. 다르게 말하면 변분 원리는 모든 파동 함수를 시도해서 가장 낮은 에너지가 계산되는 파동 함수를 찾으면 그 파동 함수와 에너지가 바닥 상태에 대응된다고 말하고 있다. 이 원리를 이용해서 개발된 변분 양자 알고리즘(variational quantum algorithm, VQA) 중에서 가장 대표적인 예가 양자 컴퓨터와 고전 컴퓨터를 함께 이용하는 variational quantum eigensolver (VQE)가 있다. VQE

에서는 그림2와 같이 준비된 양자 상태에 따라 에너지를 측정하고, 고전 컴퓨터에서 최적화를 진행해서 다음 양자 상태를 찾는 과정을 반복한다. 이 과정이 반복되며 에너지 최소값을 찾아 바닥상태 에너지와 파동 함수가 찾아진다.

현재 VQE를 이용한 연구는 작은 분자계에서 주로 이루어졌으며 이론 방법도 파동 함수 이론 중에서 coupled cluster (CC)에 기반을 둔 방법이 주로 이용되고 있다. 양자 화학에서 효율성과 정확성을 모두 만족하기 위해 개발되었던 방법들이 양자 알고리즘을 개선하기 위해 도입되고 있다. 예를 들어, 오비탈을 최적화하는 방법 등이 최근 VQE와 함께 연구되었다. 개발된 양자 알고리즘이 양자 연산 장치(quantum processing unit, QPU)에서 구현되어 분자 에너지를 보고한 사례도 있다. 아직 고전 컴퓨터에서 DFT를 이용해서 연구하는 분자계에 비하면 그 규모는 작지만, 최근 하드웨어 발전과 함께 알고리즘 연구도 진행되고 있다.



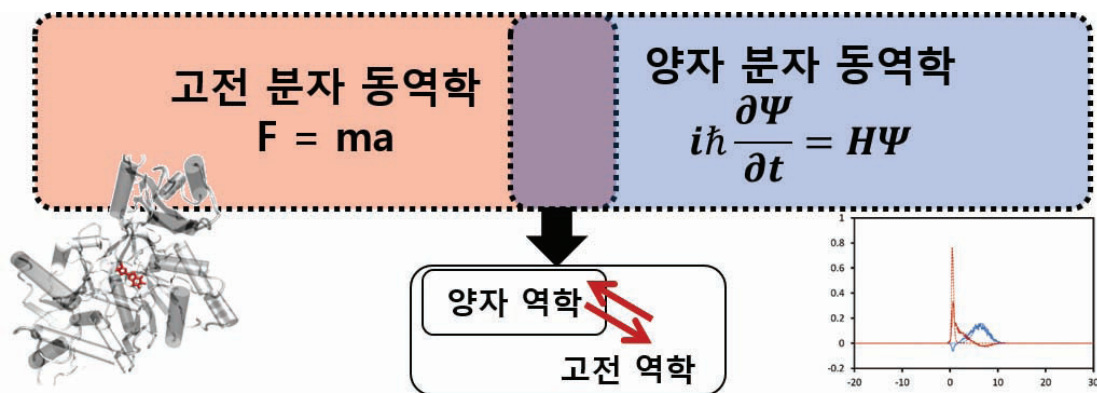
[그림 2] VQE를 간단히 나타낸 그림

2.2. 분자 동역학 전산 모사와 양자 기술

분자 동역학 전산 모사는 시간에 따라 변화하는 분자와 소재 구조 및 특성을 통계 처리하여 화학 현상을 설명하는 분야이다. 작은 유기 분자가 녹아있는 용액부터 생체 고분자나 무기 재료를 포함하는 다양한 화학계를 다루는 방법으로 분자 동역학이 연구되고 있다. 분자 동역학에서 널리 이용되는 방법은 고전 역학을 이용한 방법으로 힘은 질량과 가속도의 곱으로 설명되는 운동 방정식을 이용해서 분자가 시간에 따른 움직임을 기술하는 방법이다. 다만 이 방법은 에너지 표면이 하나만 있을 때 일어나는 화학 현상을 설명할 수 있다는 단점이 있다. 따라서 바닥 상태와 들뜬 상태 혹은 여러 들뜬 상태가 관여된 화학 현상을 설명하기 위해서 양자 분자 동역학도 연구되고 있다. 앞서 양자 화학 계산 연구가 시간 비의존 슈뢰딩거 방정식을 근사하여 진행되는 것과 다르게 양자 분자 동역학 연구는 시간 의존 슈뢰딩거 방정

식을 근사하여 전산모사를 진행된다. 독자들이 짐작하는 것처럼 고전 역학에 따른 분자 동역학에 비해 양자 분자 동역학을 전산 모사하는 것이 더 많은 계산량을 요구하므로 이 둘을 혼합한 양자-고전 혼합 분자 동역학도 연구되고 있다.

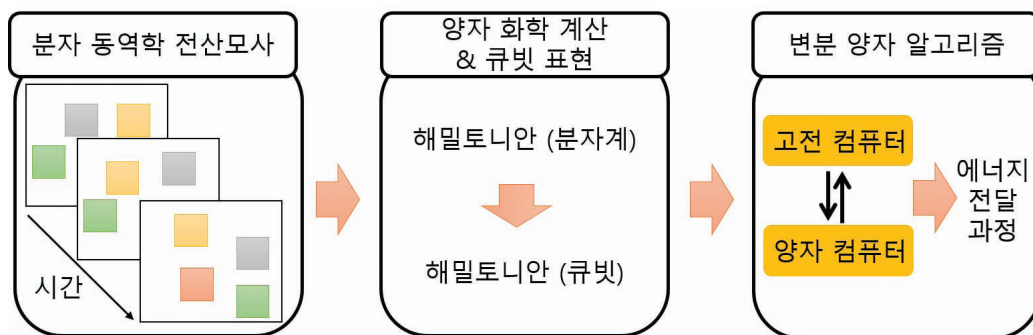
이 글에서는 양자 분자 동역학과 관련해서 양자 기술이 응용된 두 가지 사례를 소개하고자 한다. 첫 번째는 앞서 양자 화학 계산과 같이 분자 동역학 일부 과정에서 큐비트로 표현된 수식을 양자 컴퓨터가 계산하는 것이다. 예시로 유기 분자들이 만든 결정 구조에서 에너지 전달이 일어나는 과정을 설명한 연구가 있다 (그림3). 이 연구에서는 양자 화학 계산에서 소개된 VQA를 시간에 따라 바뀌는 파동 함수에 응용하였다. 먼저 슈뢰딩거 방정식을 풀기 위해서는 해밀토니안이 필요하다. 유기 분자 결정은 주어진 열역학 조건에 따라 여러 가지 구조로 존재할 수 있으므로 고전 컴퓨터를



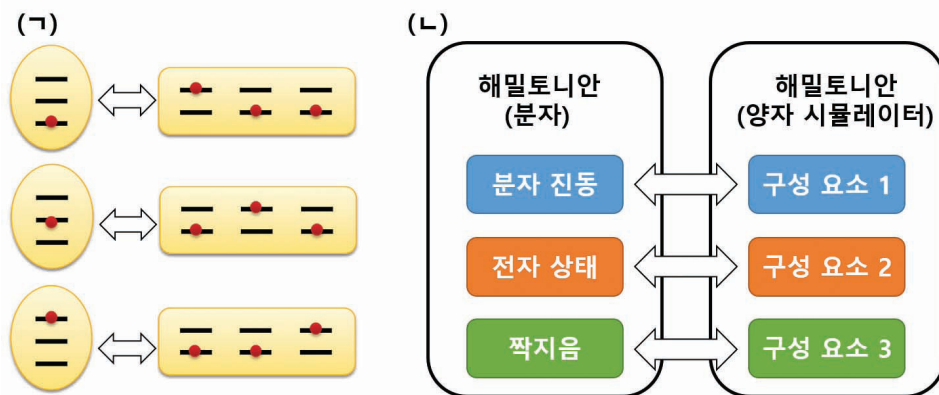
[그림 3] 분자 동역학 방법 설명

이용한 분자 동역학으로 가능한 구조가 추출될 수 있고, 각각 구조에 대해 양자 화학 계산으로 해밀토니안을 구성하는 요소들이 계산될 수 있다. 해밀토니안 요소가 계산된 다음에는 큐비트를 이용한 표현으로 해밀토니안을 새롭게 작성하는 과정이 진행된다. 이 과정에서 N개의 들뜬 상태를 $\log_2(N)$ 개의 큐비트로 기술하는 방법을 이용할 수 있다. 이 방법의 장점은 바닥 상태와 첫 번째 들뜬 상태를 포함하는 동역학을

연구할 때 큐비트를 1개만 이용해도 되는 등 필요한 큐비트 개수가 적다는 것이다. 이러한 방법은 진동 분광학 스펙트럼을 양자 컴퓨터를 이용해서 전산 모사할 때도 이용되었다. 해밀토니안이 큐비트로 기술된 다음에는 변분 원리를 이용해 파동 함수가 시간에 따라 변화하는 것을 전산 모사할 수 있다. 이 글에서는 유기분자 4개로 이루어진 구조에서 에너지가 전달되는 과정을 실제 양자 컴퓨터를 이용해서 전산 모



[그림 4] 변분 양자 알고리즘을 이용한 에너지 전달 과정 전산 모사 방법 예시



[그림 5] (ㄱ) 들뜬 상태와 조화 진동자 사이의 사상 예시 (ㄴ) 양자 시뮬레이터에서 해밀토니안 사상 예시

사되었다는 것을 소개하는 수준으로 글을 마무리하겠다.

분자 동역학에서 두 번째 사례는 사상(mapping)을 이용하는 전산모사 방법이다. 사상을 이용하는 분자 동역학에 이용하는 아이디어는 이미 보고되어 있었다. 예를 들어 들뜬 상태 3개가 있을 때 이를 조화 진동자 3개에 대응시켜서 분자 동역학을 조화 진동자로 전산 모사하고 결과는 들뜬 상태 분자 동역학으로 해석하는 것이 가능하다.

양자 시뮬레이터를 이용한 연구에서 사상은 양자 시뮬레이터에서 일어나는 현상을 설명하기 위한 해밀토니안과 분자 동역학을 기술하기 위한 해밀토니안 구성 요소가 수식으로 비슷하여 서로 대응될 수 있다는 관점에서 시작된다. 따라서 어떤 양자 상태가 준비되고 양자 시뮬레이터에서 일정 시간 이후에 측정을 하면 결과를 분자가 일정 시간 이후에 보여줄 분자 동역학 결과로 해석할 수 있는 것이다. 다만 이 방법이 가진 단점은 아직 오랜 시간 동안 전산모사

가 어렵다는 것과 측정을 한 이후에는 다시 양자 상태를 준비해야 한다는 것을 들 수 있다.

2.3. 기계학습과 양자 기술

빅데이터 시대에 화학 연구자들도 다양한 데이터를 수집하여 기계학습을 도입하는 등 변화에 대응하고 있다. 기계학습 방법은 데이터에서 사람이 쉽게 찾을 수 없는 패턴을 인식하여 신약과 신소재 개발 등에서 유용하다. 이러한 기계학습 방법을 양자 컴퓨터에 구현하는 연구가 최근 진행되었다. 이 글에서 필자는 기계학습에서 많이 쓰이는 방법인 인공 신경망을 양자 컴퓨터에서 이용할 수 있게 만든 양자 신경망을 소개하려 하였으나, 간단한 정보만 남기고 더 궁금한 독자를 위해 참고 문헌을 남기도록 하겠다.

양자 신경망은 기존 신경망에서 행렬 연산으로 층끼리 정보를 전달했다면, 게이트 연산이라는 다른 연산 방식을 통해 층끼리 정보를 전달하는 방식을 이용한다. 이 방법이 가지는 장

점은 여러 매개변수에 대해 더 민감할 수 있다는 점이다. 여러 매개변수가 조금 바뀌는 것에 대한 효과가 크다는 것으로 생각될 수 있고 이는 양자 신경망을 학습할 때 예측 오차를 더 줄일 수 있게 매개변수가 최적화될 수 있다는 것을 의미한다. 이에 따라 학습 단계의 수가 더 적어도 저 작은 오차를 보이는 예제가 보고되었다.

다양한 기계학습 방법이 양자 컴퓨터에서 이용될 수 있도록 연구되고 있으므로 기계학습을 화학 분야에 응용하는 연구에서도 향후 새로운 결과가 보고될 것이다.

3. 맺음말

이 글에서 필자는 양자 기술을 화학에 적용하는 사례를 일부 소개하였다. 많은 관심을 받고 빠르게 변화하는 주제에 대해서 최신 주제가 모두 다루어질 수는 없었다. 하지만 이 글이 화학 연구자들이 관심을 두는 주제들이 양자 기술과 함께 연구되고 있다는 점을 전달할 수 있기를 바란다.

4. 참고 문헌

4.1. 양자 화학 계산과 양자 기술

- (1) McArdle, S., et al. (2020). Rev. Mod. Phys., 92, 015003.
- (2) Zhao, L., et al. (2023). npj Quantum Inf., 9, 60.
- (3) Bauer, B., et al. (2020). Chem. Rev., 120, 12685.

4.2. 분자 동역학 전산모사와 양자 기술

- (1) Cerezo, M., et al. (2021). Nat. Rev. Phys., 3, 625.
- (2) Lee, C. K., et al. (2022). J. Chem. Theory Comput., 18, 1347.
- (3) MacDonell, R. J. et al. (2021). Chem. Sci., 12, 9794.

4.3. 기계 학습과 양자 기술

- (1) Sajjan, M., et al. (2022). Chem. Soc. Rev., 51, 6475.
- (2) Abbas, A., et al. (2021). Nat. Comput. Sci., 1, 403.

신축성 트랜지스터 기술 동향 (Trends in Stretchable Transistor Technology)

오 힘 찬 (한국전자통신연구원 선임연구원)

1. 서론

구부리거나 접을 수 있는 플렉서블 전자소자 (Flexible Electronic Devices)는 이미 우리에게 친숙한 개념이 되었다. 화면을 접을 수 있는 폴더블 스마트폰을 주변에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 이러한 폴더블 제품에서 직접적으로 접히는 부품은 플렉서블 디스플레이로, 발광부인 유기발광다이오드 (OLED, Organic Light Emitting Diode)와 이를 제어하는 박막 트랜지스터 (TFT, Thin Film Transistor)가 실질적인 변형을 겪게 된다. 여기서 트랜지스터는 발광소자를 켜고 꺼고 전류를 공급하는 스위칭/드라이빙 소자로, 디스플레이 구동에 있어 핵심 요소라고 할 수 있다.

이러한 플렉서블 트랜지스터는 앞서 언급했듯이 디스플레이 제품에 주로 사용되고 있지만, 논리 회로를 구성하여 여러 입력으로 부터 들어오는 신호를 처리하고 계산할 수 있는 정보처리장치로 그 영역을 확장해 나갈 것으로 예상하고 있다. 특히 웨어러블 (Wearable) 전자소자를 구성함에 있어, 유연한 소재에 형성할 수 있어 가벼우면서도 신체의 움직임에 의해

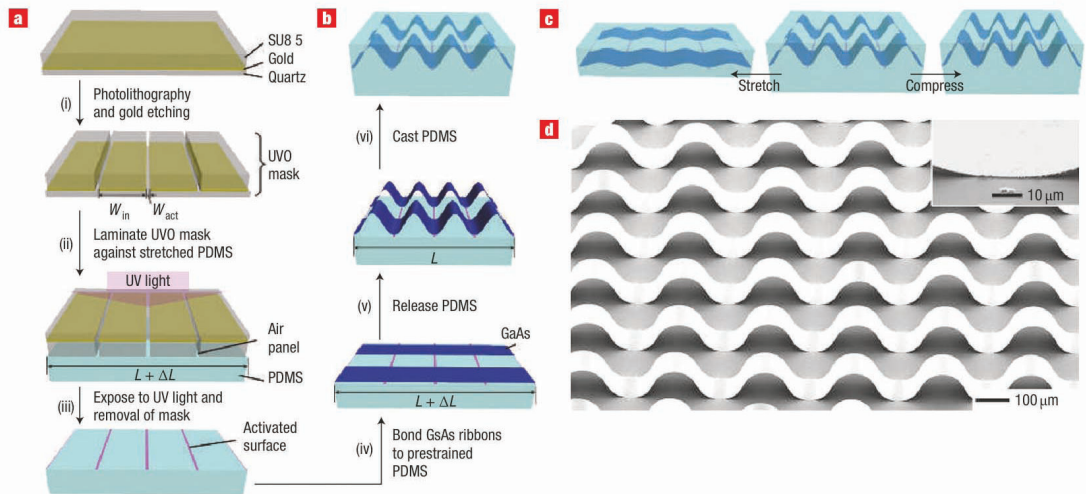
변형되어도 전기적 특성이 흔들리지 않는 트랜지스터가 꼭 필요하다.

구부러지거나 접히는 단계인 플렉서블 전자소자로 웨어러블 제품을 구성할 경우 제품 자체의 면적 내지는 길이가 거의 늘어나지 않으므로 착용했을 때 부자연스러운 느낌을 주며, 신체에 밀착되는 능력이 부족하므로 센싱에 적합하지 않을 수 있다. 이런 문제를 극복할 수 있는 것이 바로 플렉서블 다음 세대의 전자소자인 신축성 (Stretchable) 전자소자 기술이다. 10% 이상의 큰 변형율에서도 신축성 전자소자는 파괴되지 않으며 그 성능을 유지할 수 있다. 본고에서는 이런 신축성 트랜지스터 기술에 대해 살펴보고자 한다.

2. 본론

2.1 주름 구조를 이용한 신축성 트랜지스터 기술

신축성 전자소자 기술이 활발히 연구되기 이전에, 플렉서블 전자소자 기술 발달의 노력으로 구부리거나 접힌 상태에서도 안정적인 소자를 얻을 수 있는 기반이 마련되었다. 이를 바탕으로 유연 기판 전체를 주름 지도록 만들고 이



〈그림 1. 주름 구조를 갖는 신축성 반도체 소재〉 [1]

주름이 펼쳐지면서 제품 전체가 늘어나는 신축성 전자소자가 연구 초기에 주로 발표되었다.

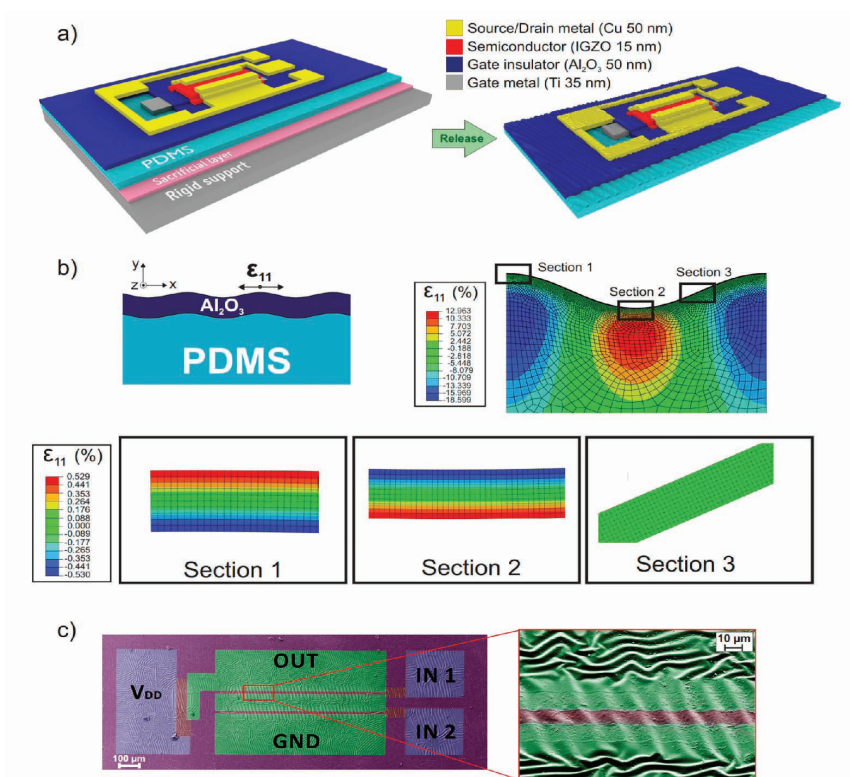
주름 구조를 만드는 데 있어서 사전 신장 후 풀기, 압축법, 몰딩, 용매 팽창, 열팽창, 3D 프린팅의 방법이 쓰일 수 있다. 이 중에서 사전 신장 후 놓는 방법이 신축성 트랜지스터를 만드는 데 가장 많이 사용되어 왔다. 유연한 개별 소재나 전체 박막 전자소자가 단단한 기판위에 제작이 되면 이를 미리 잡아 당겨 놓은 엘라스토머로 전사한다. 당김힘을 풀게 되면 엘라스토머가 다시 수축이 되고 그 위에 전사되어 있던 유연 박막 전자소자는 구불구불하게 주름진 구조를 갖게 된다.

그림 1. 은 초기 주름 구조 신축성 반도체 소재의 예로, 스트링 형태의 GaAs 화합물 반도체 소자를 단단한 기판에서 떼어낸 뒤에 엘라스토머인 PDMS로 전사하는 형태이다. 이 때 PDMS의 일부분만을 자외선 처리하여 반도체

와의 접착력을 늘려, 사전 신장된 PDMS가 다시 스트레인 릴리즈 될 때 접착력이 강화된 부분만 반도체와 PDMS가 붙어 있고 나머지 부분은 떨어지면서 파도 모양의 구조를 형성하게 되는 것이다.

이런 부분 소재 외에 전체 소자가 유연기판에 형성된 이후에 비슷한 방식으로 엘라스토머에 전사되는 방법도 많이 발표되었다. 이 경우 주로 박막 반도체 소재인 저온 다결정 실리콘, IGZO와 같은 산화물 반도체, CNT가 주로 적용되었다.

주름 구조의 장점은 기존의 유연 전자 소자의 공정을 거의 그대로 사용할 수 있어 비교적 용이하게 구현할 수 있다는 점이다. 따라서 신축성 전자소자 연구 초기에 많이 발표되었다. 다만 주름 형태가 보통 무작위로 배열되기 때문에 주름의 깊이나 주기, 균일도를 제어하기가 쉽지 않은 한계가 있다. 또한 주름져 있기 때문



〈그림 2. 주름 구조를 갖는 신축성 박막 트랜지스터〉 [2]

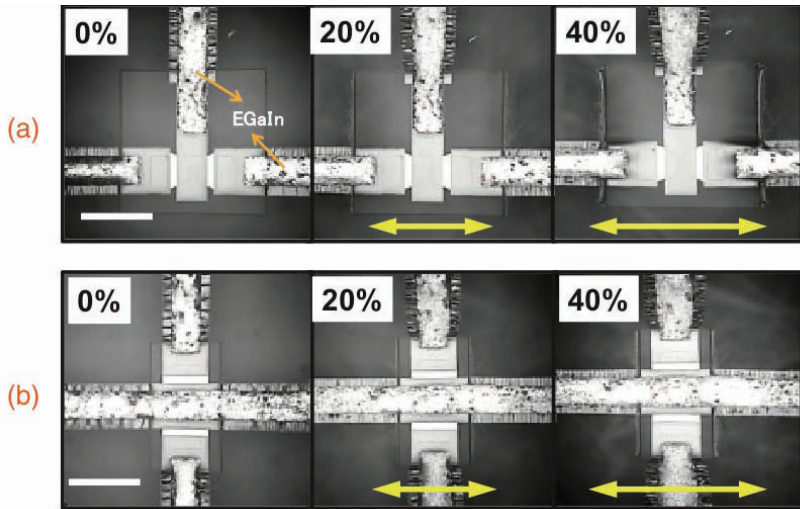
에 신체 표면에 밀착되지 않는 부분이 많아 센싱이 어려울 수 있으며 디스플레이로 활용한다고 했을 때 빛의 산란이 문제가 될 수 있다.

2.2 국소 경도 조절을 통한 신축성 트랜지스터 기술

전자소자는 기능 소자류인 발광 다이오드, 센싱 파트 등이 트랜지스터들로 이루어진 회로에 의해 제어되고 이들은 서로 배선을 통해 연결된다. 이 때 기능 소자류가 존재하는 곳 기판의 경도를 국소적으로 높여 변형이 최소화 되도록 하고 변형에 비교적 강한 배선이 변형율을 담

당하게 할 수 있다. 이 방법은 주름 구조와 다르게 변형이 집중되는 곳을 제작자가 제어할 수 있는 장점이 있다. 또한 트랜지스터가 받는 스트레스가 거의 없기 때문에 신축 안정성 또한 우수하다.

그림 3이 이러한 방법으로 구현한 대표적인 신축성 트랜지스터 어레이의 모습이다. 단단한 폴리이미드 사각 부분위에 박막 트랜지스터가 올라가 있어 이부분은 40%까지 늘려도 트랜지스터가 받는 변형율은 거의 없다. 반면에 액체 금속으로 형성된 세 개의 배선 부분이 늘어나게 되는데 액상 형태이어서 변형에 매우 강



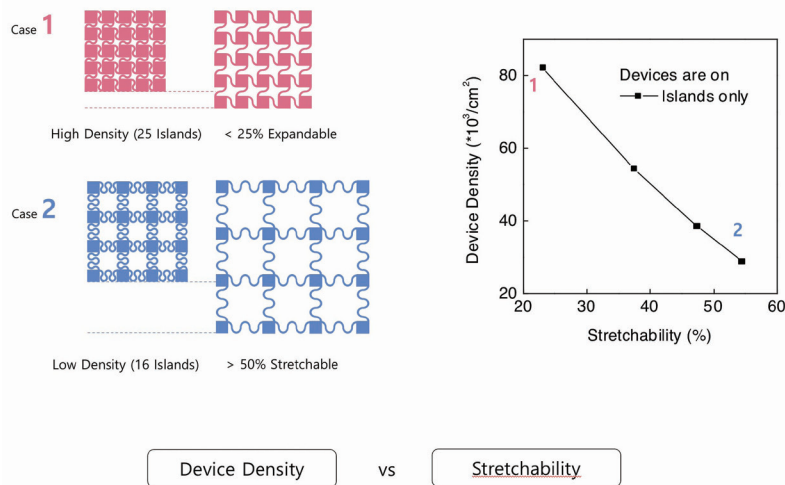
〈그림 3. 단단한 트랜지스터 부분과 이를 연결하고 있는 신축성 액체 금속 배선〉 [3]

력하므로 전체 어레이의 신축 안정성이 보장될 수 있다.

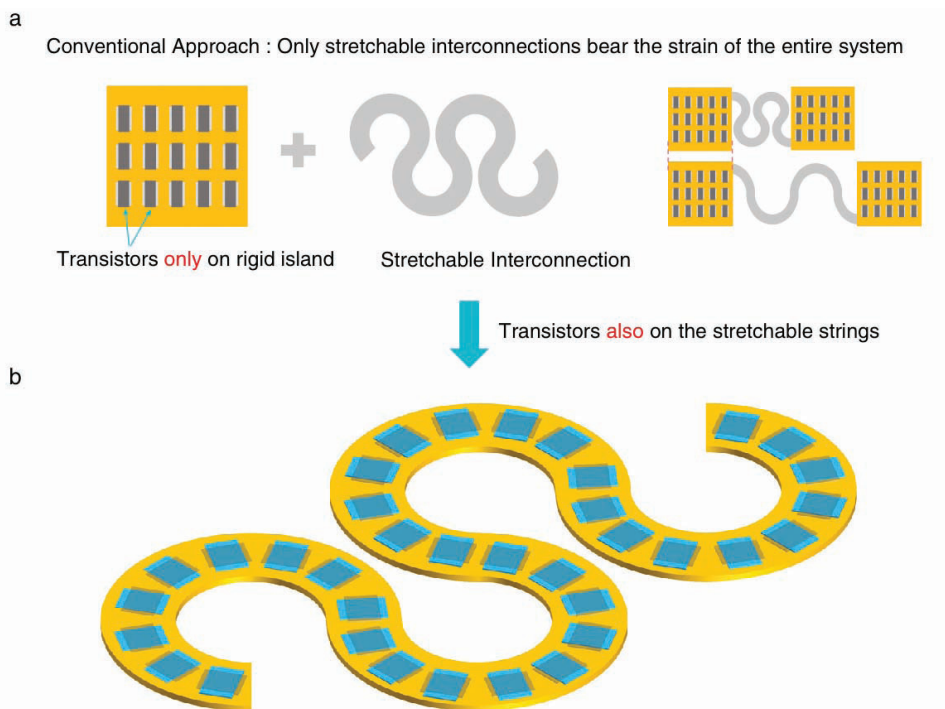
다만 이 방법의 결정적인 단점은 신축 배선이 전체 제품의 변형율을 모두 감당해야 한다는 것이다. 그림 4의 케이스1과 같이 트랜지스터가 차지하는 면적 즉, 단단한 부위가 많아질 수

록 전체 제품의 신축 능력은 떨어질 수 밖에 없다. 한편 동일 제품 크기에서 케이스2와 같이 트랜지스터 수를 줄이면 신축 능력은 올라가지만 케이스1에 비해서 더 단순한 동작이나 더 낮은 해상도만을 얻어 낼 수 있다.

이를 어느 정도 완화하는 방법은 그림 5에 나



〈그림 4. 국소 경도 조절법에서 소자 밀도와 신축 능력의 관계〉



〈그림 5. 신축성 배선 부분에도 트랜지스터를 집적하여 소자 밀도를 향상시키는 방법〉 [4]

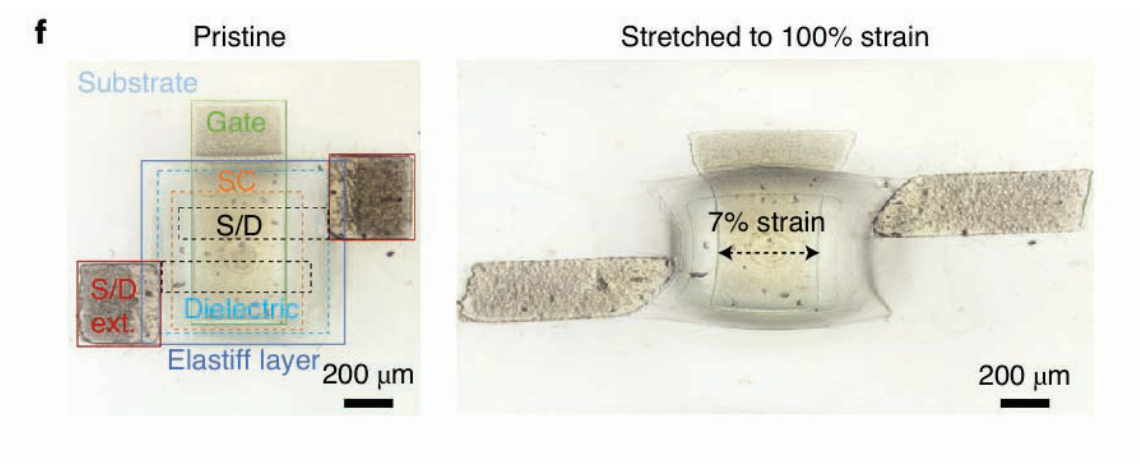
타낸 바와 같이 신축성 배선 부분에도 트랜지스터를 집적시키는 것이다. 이 때는 트랜지스터도 변형을 겪게 되는데 이로 인한 파괴를 막기 위해서 보호층이 적용될 수 있다. 다만 이 방법도 제품 전체 면적을 활용하는 것이 아니기 때문에 소폭의 소자 밀도 향상을 기대할 수 밖에 없다.

2.3 본질적으로 신축성 있는 트랜지스터 기술

사실 앞의 두 방법은 소자 자체가 늘어나지 않으며 기판 내지는 지지소재의 구조 변형을 통해 신축성을 매우 간접적으로 부여하는 방식이다. 그러나 최근에는 트랜지스터를 구성하는 모든 부분, 즉 배선, 절연막, 반도체까지 일정량 늘어날 수 있는 기술이 많이 발표되고 있다.(그

림6) 이 방법에 있어서는 무기물 소재보다는 변형에 더 자유로운 유기물 소재가 각광 받고 있다.

이 방법은 제품 전체의 면적을 활용할 수 있으므로 앞의 두 방법에 비해 소자 밀도를 높일 수 있다. 다만 고이동도 유기물 반도체의 경우 결정성이 대개 높다. 이럴 경우 변형에 좀 더 취약할 수 있는데 왜냐하면 무질서하고 느슨하게 쌓인 재료가 기계적 변형에 더 유리할 것이기 때문이다. 즉 성능과 신축능력이 트레이드 오프 관계에 있다고 할 수 있다. 이러한 저성능 약점을 극복해 나간다면 유기물 재료가 신축성 전자소자 분야를 선도할 것으로 기대한다.



〈그림 6. 본질적으로 신축성이 있는 트랜지스터 기술〉 [5]

3. 결론

우리나라는 디스플레이/반도체 강국이지만 그 위치를 중국, 대만 등에 위협받고 있는 실정이다. 현재까지 OLED 및 폴더블 제품으로 기술 우위를 점하고 있지만 앞으로도 그 지위를 확고히 하기 위해서 신축성 전자소자와 같은 다음 세대 기술 개발이 반드시 필요하다. 많은 인력, 자원 지원이 절실해 지는 시점이다.

4. 참고문헌

- [1] Sun, Y., Choi, W., Jiang, H. et al. Controlled buckling of semiconductor nanoribbons for stretchable electronics. *Nature Nanotech* 1, 201 – 207 (2006).
- [2] Cantarella, G., Vogt, C., Hopf, R., Münzenrieder, N., Andrianakis, P., Petti,

L., ... & Salvatore, G. A. (2017). Buckled thin-film transistors and circuits on soft elastomers for stretchable electronics. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(34), 28750–28757.

- [3] Chan Woo Park *et al.* Stretchable active matrix of oxide thin-film transistors with monolithic liquid metal interconnects. 2018 *Appl. Phys. Express* 11 126501
- [4] Oh, H., Oh, JY., Park, C.W. et al. High density integration of stretchable inorganic thin film transistors with excellent performance and reliability. *Nat Commun* 13, 4963 (2022).
- [5] Wang, W., Wang, S., Rastak, R. et al. Strain-insensitive intrinsically stretchable transistors and circuits. *Nat Electron* 4, 143 – 150 (2021).

친환경 화이트바이오기술

권 용 구 (인하대학교 고분자공학과 교수)

서론

최근 삶의 질과 환경에 대한 관심이 증가하면서 생태계 보전에 대한 필요성과 더불어 우리의 생활을 윤택하게 하는 화학 제품에 대한 환경 영향과 오염에 대하여 많은 논의가 있어 왔다. 탄소중립과 ESG경영이 화두가 되면서 환경과 보건 기술에 대한 필요성이 급증하고 있다. 이와 더불어 바이오와 접목된 화학 기술에 대한 수요가 증가하고 화학과 바이오기술이 접목된 융합기술에 대한 적용 범위가 넓어지면서 최근 화이트바이오 산업과 기술 분야가 많은 관심을 받고 있다.

바이오기술은 그 적용 분야에 따라 크게 레드바이오, 그린바이오, 화이트바이오기술로 분류하고 있다. 레드바이오기술은 의약품 및 보건의료 용도에 사용되는 바이오화학기술로 정의하며, 작물 개량, 개발, 작물 내성 향상, 농작물

생산성 증대 및 식품 산업과 관련된 분야를 그린바이오기술, 석유 등의 화석연료 대신 바이오매스를 원료로 바이오 연료, 바이오플라스틱, 바이오 기반 정밀·특수화학(화장품 원료 등) 등, 환경친화적인 과정을 통하여 화학 및 에너지 산업 등에서 생물학적 기술을 이용하여 제품을 개발하고 생산하는 기술을 화이트바이오기술로 분류한다. 화이트바이오 산업은 이에 관련된 산업과 연관된 에너지 생산, 화학 물질 생산, 폐기물 처리 등 모든 서비스를 포함한다.^{1,2} 화이트바이오기술은 특히 대부분의 과정에서 온실가스를 배출하며 기후위기 해결에 부담이 되고 있는 화석연료 기반의 기존 산업을 극복하는 대안으로 최근 크게 부각이 되고 있다.

화이트바이오기술은 식물 등 재생가능한 자원을 이용하거나 미생물, 효소 등을 활용하여 기존 화학산업의 소재를 바이오기반으로 대체하고 연료, 플라스틱, 생활용품, 시약, 효소 등



〈그림 1〉 화학과 바이오기술이 접목된 바이오기술의 분류

다양한 제품에 적용 가능하다. 예로서 석유기반의 원료에서 나프타, 에틸렌 등 단량체를 거쳐 벤젠, 아세톤 등 석유화학의 기초 원료와 이를 기반으로 플라스틱, 세제, 화장품 등 화학제품을 생산하고 에탄올, 디젤 등의 연료를 생산해왔다면 기존 석유기반의 원료를 바이오매스기반의 원료로 대체하고 이를 이용하여 단량체를 제조하고 발효 등의 공정을 통하여 젖산 및 에탄올 등을 제조하고 다양한 친환경 화학공정과 생물공정을 거쳐 화학제품과 연료를 생산하며, 생산 과정에서 이산화탄소 배출량도 비교적 적지만, 원료인 식물 등 바이오매스가 이산화탄소를 흡수하게 되어 탄소중립적인 기술이라고 볼 수 있다. 특히 저탄소·친환경 트랜드가 최근 크게 부각되고 있으며 이에 따라 관련 산업의 중요성이 부각되고 있으며 시장 규모도 크게 확대되고 있다.²

화이트 바이오 시장 규모는 2019년 기준 대략 281조 원이며 연평균 10.1% 성장이 예상되어 2028년에는 662조 원의 규모로 확대될 것으로 기대되고 있다.² 바이오매스 자원이 풍부한 미국과 유럽 등을 중심으로 바이오연료 및 바이오 화학제품 등 화이트바이오 산업 활성화를 위한 정책적 지원과 일회용 비닐봉투, 빨대 등 비분해성 플라스틱 규제가 강화되고 있다. 이와 함께 다양한 일회용 플라스틱 제품을 단계적으로 폐지시키는 Break Free From Plastic Pollution Act of 2020 법안이 발의된 상태이다. 유럽에서도 산화분해성 플라스틱 제품 포함 일회용 플라스틱 제품 사용을 전면 금지하는 지침을 '21년부터 발효한 바 있다.²

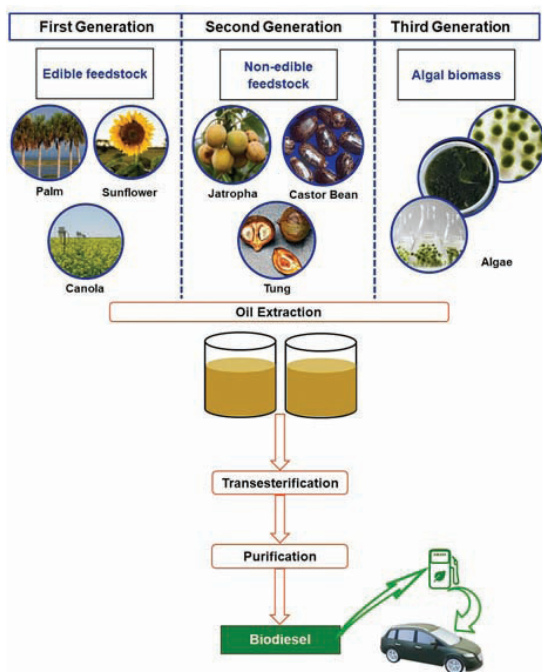
국내의 경우 2012년부터 바이오화학 육성전략을 수립하고 바이오화학산업 및 관련 연구를

지원해왔으나, 때마침 중동 지역의 공격적인 유가 생산 전략과 저유가 장기화로 인한 바이오에너지 및 화학산업 침체로 정책 추진 동기가 다소 약화된 상황이다. 또한 바이오매스 확보 및 이용을 위한 인프라가 부족하고 영세한 실정이며, 바이오매스의 이용 확대와 에너지화를 위한 적극적인 정책 시행 및 지원이 필요한 실정이다. 우리나라의 화이트바이오 산업은 향후 10년 내 시장규모가 2배 이상 확대될 예정이며 높은 부가가치를 나타낼 전망이다. 화이트바이오분야 기술 수준은 미국 대비 85% 수준으로 기술 격차 정도는 3년 정도로 분석되었다. 화이트바이오기술은 바이오와 화학기술 융합을 기반으로 크게 바이오매스 저분자화기술, 바이오플라스틱, 생촉매 및 스마트바이오공정 기술 분야로 구분할 수 있다.

1. 바이오매스 저분자화 기술

바이오매스 저분자화 기술은 화학적, 물리적, 생물학적 방법을 활용하여 다양한 생산품, 에너지, 고부가가치 화합물로 분해 및 변환하는 기술로 바이오매스로부터 바이오연료 및 바이오 화합물을 제조하는 과정에서 이산화탄소가 발생하지만, 바이오매스를 생산하는 과정에서 이산화탄소를 흡수하므로 탄소 중립적인 기술이다. 세부 기술로는 바이오매스 구성성분 및 분석기술, 바이오매스 물리적·화학적 전처리 기술, 바이오매스 효소당화기술을 들 수 있다.

바이오매스 저분자화 기술은 바이오매스로부터 생산된 성분들을 열, 화학적 또는 생물학적 프로세스를 통해 저분자 물질로 변환시키는 과정을 포함하며 저분자화된 바이오매스 성분은 바이오 연료 생산, 바이오매스 기반 플라스틱



〈그림 2〉 바이오매스로부터의 바이오디젤 제조 공정³⁾

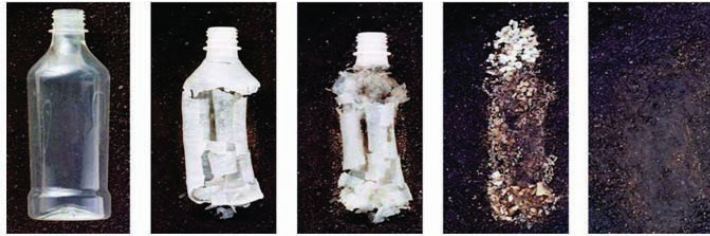
물질의 제조, 화장품 및 의약품 산업 등에 활용된다. 이는 기존의 화석 연료 사용을 줄이고 친환경적인 대안을 제공하는 데 기여할 수 있다.⁴⁾ 화석연료의 사용을 줄이고 지속가능한 사회로의 전환을 위한 대안으로 생물유기체, 즉 바이오매스를 변환시켜 얻어지는 기체, 액체 또는 고체의 연료를 연소 또는 변환시켜 얻어지는 연료를 바이오연료라고 한다. 이들은 생물유기체를 변환시킨 바이오가스, 바이오에탄올, 바이오액화유 및 합성가스 뿐만 아니라 쓰레기 매립장의 유기성폐기물을 변환시킨 매립지가스, 동물·식물의 유지를 변환시킨 바이오디젤 및 바이오중유, 생물유기체를 변환시킨 팜갑, 목재칩, 펠릿 및 숯 등의 고체연료를 모두 포함하며 바이오에탄올과 바이오디젤이 수송용연료를

중심으로 상업화가 가장 활발하다.⁵⁾

2. 친환경 바이오플라스틱

자연에 존재하는 바이오매스 자원은 크게 조류계(algae), 목질계(나무) 및 초본계(풀)로 나눌 수 있으며 전처리 및 당화과정을 거치며 다양한 화합물로 변환되고 사용되거나 고분자 등의 중합에 활용할 수 있다. 이를 기반으로 크게 바이오기반 비분해성 바이오플라스틱과 생분해성 바이오플라스틱을 제조할 수 있으며 생분해성 바이오플라스틱은 곰팡이, 박테리아 등과 같은 미생물에 의해 물과 이산화탄소, 메탄 등으로 완전히 분해되는 고분자로 정의한다. 천연고분자는 생체가 만들어 내는 고분자로 생체 자신이 그 분해효소나 대사계를 갖고 있어 생분해성을 나타낸다. 천연고분자는 크게 polypeptides, polysaccharides, polynucleotides로 나뉘어지며 다양한 용도로 활용되고 있다. 최근 이산화탄소를 포집하고 활용하여 환경 친화형 고분자 소재를 개발하는 연구가 온실가스 저감 효과와 함께 진행되고 있다⁶⁾.

바이오기반 생분해성 바이오플라스틱의 한 예로서 lactic acid를 원료로 하는 poly(L-lactic acid)는 여러 용도로 광범위하게 사용되고 있다. Polysaccharides 기반 물질로부터 추출된 당류를 발효시키거나 중간 단량체 분리 없이 미생물인 수소 세균(Ralstonia Eutrophus)으로부터 polyhydroxyalkanoates (PHAs)를 제조할 수 있으며, 생분해성 고분자로서 polypropylene과 비슷한 물성을 나타낸다. 지방족 polyester는 축중합, 개환중합, 폴리에스터간의 에스터 교환반응을 통하여 합성되며, 물성이나 가공성이 우수하고 100% 완전분해가 가능하다. 화학합성에



고분자	구조식	고분자	구조식
poly(ϵ -caprolactone)	$\left[\text{CH}_2 - \text{C} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array} - \text{O} \right]_n$	starch	
poly(L-lactide)	$\left[\text{CH} - \text{C} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array} - \text{O} \right]_n$ CH ₃	cellulose	
poly(glycolide)	$\left[\text{CH}_2 - \text{C} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array} - \text{O} \right]_n$	chitin	
poly(3-hydroxybutyrate)	$\left[\text{CH} - \text{CH}_2 - \text{C} \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array} - \text{O} \right]_n$ CH ₃		

〈그림 3〉 생분해 플라스틱의 분류⁷⁾

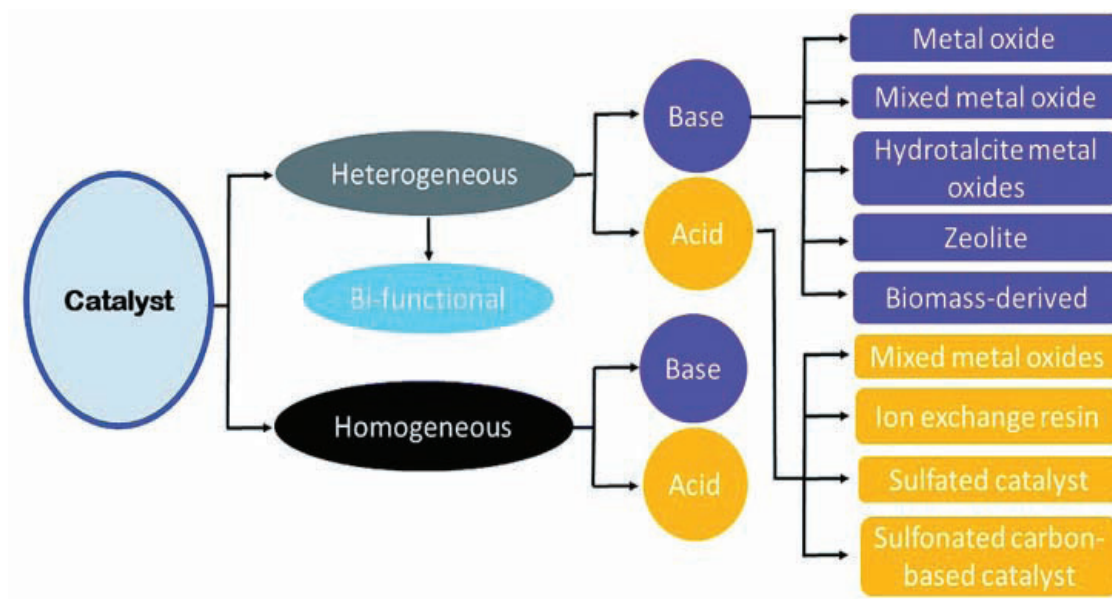
의하여 제조된 생분해성 고분자로는 butanediol과 succinic acid을 합쳐 만들어진 poly(butylene succinate)를 들 수 있다. 원료인 di-methyl succinate와 butanediol은 석유에서 유래된 화학제품을 사용하고 있으나, 녹말 등을 재생 가능한 원료로부터 succinic acid의 발효에 의해서 제조가 가능하다. 또한 1,4-butanediol과 adipic acid, dimethylene terephthalate를 공중합하여 제조한 Poly(butylene adipate-co-butylene terephthalate) (PBAT) 공중합체는 dimethylene terephthalate의 양에 따라 생분해성을 가진다.

곡물에서 추출되는 전분, 게나 새우의 껍질에서 얻을 수 있는 키틴, 셀룰로오스 등이 생분해가 가능한 천연 고분자들이다. 이러한 천연 고분자는 합성하거나 미생물에 의해 생산된 분해성 고분자들에 비해 가공성은 다소 떨어지나 가격이 상대적으로 저렴한 편이다. 특히 전분

은 자원이 풍부하여 공급이 원활하고, 무독성이며, 가격이 저렴하고 생분해도가 우수할 뿐만 아니라, 가공성을 향상시킬 수 있는 다양한 변성 기술이 개발되어 있다. 키틴은 주로 의료용 생체재료로 이용되고 있다.

3. 생물촉매 및 스마트 공정 개발 기술

생물 촉매와 발효 기술은 생물학적 촉매나 미생물을 사용하여 발효과정을 통하여 의약품산업, 식품 및 음료 산업, 환경산업 등에 화합물을 합성하거나 화학 반응을 촉진시키는 기술을 의미한다. 생물촉매는 화합물의 화합 또는 분해를 촉진하는 데 사용되는 유기 또는 무기 화합물이며, 주로 미생물, 효소 또는 유전자 조작된 세포 등으로부터 얻어진다. 발효기술을 통하여 요구르트, 맥주, 와인 등의 다양한 식품 등이 생산되며, 항생제, 백신 등의 제조에 활용



〈그림 4〉 바이오디젤 합성을 위한 촉매시스템의 분류⁸

되기도 한다. 최근 바이오 연료 생산 등의 분야에서 발효시스템 기술이 활용된다.

생물촉매 및 스마트 공정 개발 기술은 크게 효소 기반 생물촉매 시스템과 균류, 세균, 효모 등 미생물 기반 발효 시스템으로 분류되며 효소는 화합물의 변환 또는 분해등에 생물학적 반응을 촉진시키기 위해 사용하며, 미생물 기반 발효기술은 의약품, 식품 및 음료 산업에서 사용되며, 발효공정을 통해 원하는 화합물을 제조한다.⁹ 미생물 또는 효소를 촉매로 사용하여 식물성 오일이나 동물성 지방을 바이오디젤로 생성하며 화학촉매보다 더 높은 효율성과 선택성을 얻을 수 있으며 이산화탄소 배출을 줄이고 재생 가능한 에너지를 이용하기 때문에 환경친화적이다. 최근 빅데이터와 인공지능을 바이오공정에 활용하고 생물학적인 프로세

스의 자동화, 공정 최적화, 유전자 편집 및 조작을 통해 생물체의 물성을 변화시키고, 반응 및 공정에 활용하기도 한다.

4. 결론

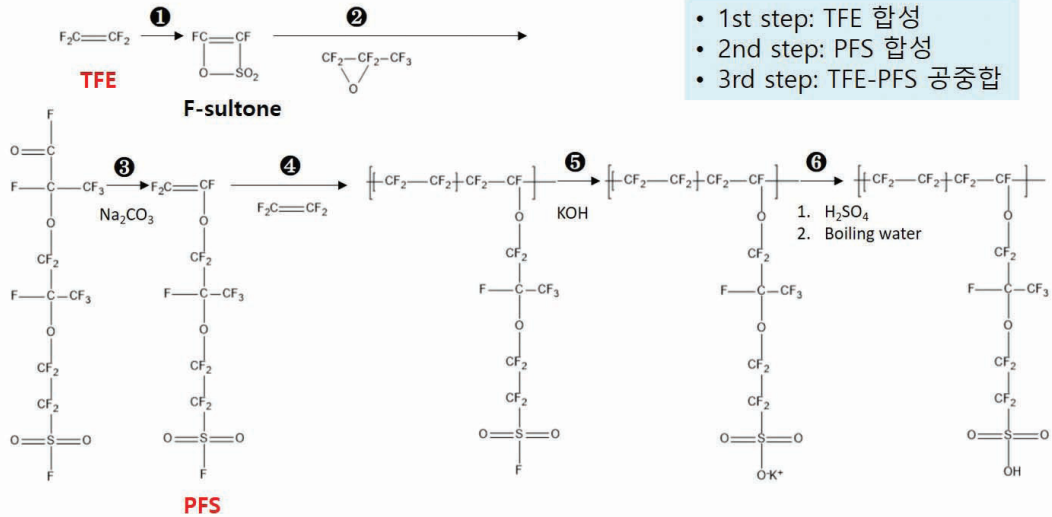
최근 화이트 바이오 제품의 개발이 활발히 진행되고 있으나 상용화에는 일반적으로 2년 이상, 억 단위 비용이 소요되는 규모가 큰 위해성 심사로 인하여 상용화에 애로를 겪고 있으며 이러한 문제는 화이트바이오 제품에 대한 위해성 심사를 간소화하여 극복할 수 있다. 국내 화이트바이오기술 및 산업은 친환경·ESG를 중시하는 글로벌 트렌드로 높은 성장성이 기대되나, 산업 형성 초기 단계며 국제경쟁력이 취약하고 연구 개발의 불확실성이 높아 현재 정부

의 예산지원이 중요하다. 화이트 바이오기술 분야의 성장을 촉진하기 위해서는 시장 선점을 위한 위해성 심사 등, 심사 절차 간소화하고 법률 정비를 통한 등록 기준 완화, 국제 인증 지원 등 정책지원 및 제도개선이 필요하다.

5. 참고문헌

1. 바이오산업 혁신 정책방향 및 핵심과제, 2020
2. KISTEP, 바이오경제로의 이행을 위한 화이트바이오 산업 육성 정책 제언, 2017
3. T. Bera, K. S. Inglett, A. C. Wilkie, Biofuel: Concepts and Considerations, UF IFAS Extension, 2020.
4. N. Shreyas, P. Bagade, S. Ahmed. Bioethanol production: insight into past, present and future perspectives. Biofuels 9 229, 2018.
- Biotech, Bioengineering Jang et al. 2012
5. M. Eslam, M. A. Betiha, N. IA. Negm, Insight into the Recent Advances in Sustainable Biodiesel Production by Catalytic Conversion of Vegetable Oils: Current Trends, Challenges, and Prospects, *Energy & Fuels* 37, 2631, 2023.
6. O. Hauenstein, M. Reiter, S. Agarwal, B. Rieger, A. Greiner, Bio-based polycarbonate from limonene oxide and CO₂ with high molecular weight, excellent thermal resistance, hardness and transparency. *Green Chem.* 18, 760, 2016.
7. 생활속의 고분자, 윤진산, 진인주, 권용구, 학연사, 2020
8. C. Bishwajit, et al. Widely used catalysts in biodiesel production: a review. *RSC advances* 10, 41625, 2020.
9. S.O. Bitire *et al.* The Potential for a Sustainable Biodiesel Production by Modified Biobased Catalyst – A review. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1107 012206, 2021.

TPE: tetrafluoroethylene



[그림 2] PFSA 이오노머 합성공정 모식도

성을 갖는 이온들이 선택적으로 전달될 수 있게 된다.

대표적인 이오노머 형태는 그림 1에서 보여주는 것과 같이, 이오노머에 황산기($-\text{SO}_3\text{H}$)가 공유결합된 구조를 들 수 있다. 황산기는 $-\text{SO}_3^-$ 형태로 해리되어, 수소이온(H^+)이나 금속 이온들(Li^+ , Na^+ , K^+ 등)과 같은 양이온들과 이온결합을 형성하여, 연속적으로 배향된 황산기를 통해 양이온들이 전달될 수 있도록 한다. 이러한 이온전도성으로 인해, 이오노머는 다양한 전기화학적 응용분야에 전해질막이나 전극 소재로 사용되어져 오고 있다. 이오노머의 이온전도성은 노출된 환경(예: 수용액 상 vs 유기 상)이나, 결합된 작용기의 개수 또는 밀집도, 이오노머의 주쇄 및 측쇄 구조에 따라 달라지게 된다. 일반적으로 이오노머의 이온전도성은 수용액 상에서 결합된 작용기의 수가 증가할

수록 향상되나, 팽윤(swelling)을 동반하기 때문에 물을 과다하게 흡수한 상태에서는 단위부피당 작용기 함량이 희석되어 오히려 이온전도성은 감소하게 된다.

이오노머는 주쇄 및 측쇄 구조에 따라, 불소 골격(CF_2)으로 구성된 불소계 또는 과불소계 이오노머와 탄화수소 골격(CH_2)으로 구성된 비불소계 또는 탄화수소계 이오노머로 구분된다. 이 중 과불소계 이오노머는 비불소계 이오노머 대비 화학적, 전기화학적 안정성이 높고, 발달된 친수성-소수성 미세 상분리구조를 가져 넓고 상호연결(interconnection)된 친수성 채널 구조를 형성하여, 보다 적은 황산기 함량에도 높은 이온전도성을 나타내게 된다. 또한 전기화학적 응용시 전극소재로 사용할 경우, 전해질막과의 우수한 접합성을 가져, 내구성이 압도적으로 높아 수명특성 개선에 큰 도움이 된

다. 본 고에서는 이러한 장점을 지녀, 대부분의 전기화학적 응용분야에서 광범위하게 사용되어지고 있는 과불소계(PerFluorinated Sulfonic Acid, PFSA) 이오노머에 대한 최근 발생한 산업적 위기와 이에 따라 발생하는 기회에 대해 다루고자 한다.

2. 본론

2.1. (위기: 전락물자 개념) vs (기회: 탄소중립 필수소재 개념)

PFSA 이오노머는 그림 2에서 제시된 바와 같은 복잡한 합성공정으로부터 제조된다. 특히, 고압 기상반응을 동반하여 합성에 대한 난이도가 높으며, 고순도의 단량체(monomer)가 요구되어 고난이도의 정제공정에 반드시 필요하다. 또한, 전해질막 제조용 또는 전극소재(예: 전극 바인더)용으로 사용될 지의 여부에 따라 유화제(emulsifiers)가 선택적으로 적용되어, 최종적으로 얻어진 PFSA 이오노머의 평균분자량 분포나 분자량이 달라지기도 한다.

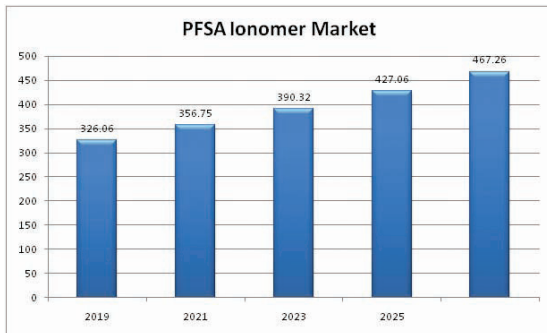
이러한 기술집약적 합성공정을 보유한 기업은 글로벌 탑티어(global top-tier) 업체인 Chemours((구) DuPont), 아사히 글라스(AGC), 3M, 아사히 카세이(AK), Solvay의 5개사이며, 상품명 Nafion®, Flemion®, Dyneon®, Aciplex®, Aquivion®으로 판매되고 있다. 또한, 겔사슬에 위치한 탄소 수에 따라 5개인 C5부터 2개인 C2 구조까지 분류되며, 가장 긴 겔사슬 길이를 갖고 있는 C5구조의 Nafion® 이오노머를 Long Side Chain(LSC) 이오노머로, 그 외 C4-C2 구조를 가진 이오노머를 Short Side Chain(SSC)

이오노머로 구분하기도 한다. LSC 이오노머는 겔사슬에 위치한 $-CF_3$ 기가 고형화 시 밀집 구조 형성을 방해하여, 기체투과도가 증가하는 특징을 갖는다. 반면, SSC 이오노머는 $-CF_3$ 기 부재로 인해 친수성 사슬들 간의 규칙성 증가가 발생하여, 결정화도(crystallinity)가 증가하게 되며, 전해질막 응용시 기계적 강도 및 내화학성 증가로 이어지게 된다. 반면, 결정화도의 증가는 이오노머 사슬의 모빌리티 감소를 유도하여, 이온전도도 감소를 이끌기 때문에, SSC 이오노머의 경우, 황산기 함량을 증가시켜 이온전도도를 보존하는 전략을 취하게 된다.

전통적인 PFSA 이오노머는 크로마토그래픽 분리공정(chromatographic separation), 탈염공정(desalination), 수처리(water treatment) 분야에서 이온교환막 제조를 위해 사용되어져 왔다.² 또한, 세계적인 수소경제 및 탄소중립 정책 추진에 따라 승용 및 상용 수소전기차(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV), 수소철도, 수소선박, 수소드론과 같은 모빌리티 및 분산형 발전과 같은 수소활용분야에서 고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)용 전해질막과 전극소재로, 수소제조분야에서 고분자 전해질 수전해(Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolysis, PEMEW)용 전해질막과 전극소재로의 사용이 급속히 확대되고 있는 추세이다. 그림 4은 PFSA 사용처 증가에 따른 시장 성장 추세를 보여준다. 2019년 통계 기준, PFSA 시장은 매년 약 5.2%씩 지속적으로 증가될 것으로 예측되었다.

Long side chain (LSC)		Short side chain (SSC)	
C5	C4	C3	C2
$\left[\text{CF}-\text{CF}_2 \right]_n \left[\text{CF}_2-\text{CF}_2 \right]_m$ $\begin{array}{c} \\ \text{O} \\ \\ \text{CF}_2 \\ \\ \text{CF}_3-\text{CF} \\ \\ \text{O} \\ \\ \text{CF}_2 \\ \\ \text{CF}_2 \\ \\ \text{SO}_3\text{H} \end{array}$	$\left[\text{CF}-\text{CF}_2 \right]_m$ $\begin{array}{c} \\ \text{O} \\ \\ \text{CF}_2 \\ \\ \text{CF}_2 \\ \\ \text{CF}_2 \\ \\ \text{CF}_2 \\ \\ \text{SO}_3\text{H} \end{array}$	$\left[\text{CF}-\text{CF}_2 \right]_m$ $\begin{array}{c} \\ \text{O} \\ \\ \text{CF}_2 \\ \\ \text{CF}_2 \\ \\ \text{CF}_2 \\ \\ \text{SO}_3\text{H} \end{array}$	$\left[\text{CF}-\text{CF}_2 \right]_m$ $\begin{array}{c} \\ \text{O} \\ \\ \text{CF}_2 \\ \\ \text{CF}_2 \\ \\ \text{SO}_3\text{H} \end{array}$
Chemours (Nafion®) AGC (Flemion®)	3M (3M ionomer)	AK (Aciplex®)	Solvay (Aquivion®)

[그림 3] 탭티어급 PFSA 이오노머 업체별 보유한 이오노머 화학구조



[그림 4] 연도별 PFSA 이오노머 시장 성장 예측3

2.2. (위기: 급격한 이오노머 수요 증가) vs (기회: 공급자 중심의 중산정책추진)

2022년 2월 러시아의 우크라이나 본토로의 전면 침공으로 인해 시작된 러시아-우크라이나 전쟁은 러시아발 천연가스 보급 중단과 그로 인한 유럽발 에너지안보 문제를 일으켰다. 독일, 프랑스 등을 중심으로 한 유럽 각

국은 값 싼 러시아산 천연가스를 활용하는 대신, 재생에너지 확대 정책을 추진하였고, 그에 동반되는 출력변동 문제를 해결하기 위한 에너지저장매체로의 수소를 활용하는 변화가 이루어졌다. 이러한 변화는 재생에너지에 기반한 수전해를 통해 그린수소를 생산코자 하는 기존 계획을 약 25여년 앞당기게 하였다. 그로 인해, 유럽연합에서는 2020년 기준 수전해 시스템 누적 설비 용량 0.936 GW에서 2025년 5 GW, 2030년 40 GW로 급격한 증가를 발표하게 되었고, 이를 현실화시키기 위해 2030년 기준 용량의 40%에 해당되는 수전해 시스템에 대해서는 주문이 이미 완료되어, 수전해 시스템 회사들은 대규모 양산 시스템 구축 및 제작이 이루어지고 있다. 또한, 러시아-우크라이나 전쟁이 장기국면에 접어들게 되자, 2022년 9월 유럽연합은 2030년 기준 계획의 3배 이

상인 140 GW로 수전해 누적 설비 용량 증가 계획을 수정 발표하게 된다.

그로 인해 수전해 핵심소재인 PFSA 이오노머에 대한 시장 요구는 기존 예측에서 확연히 벗어나게 되었고, 그로 인해 공급량 부족(shortage) 문제에 직면하게 되었다. 이는, 현재의 수전해 시스템 생산량이 PFSA 이오노머 소재 수급량에 의해 결정되어지고 있다는 것을 의미한다. 3M사를 제외한 대부분의 PFSA 이오노머 제조사들은 이러한 글로벌 수소 수요증가에 대응하기 위한 생산능력 확대 계획을 앞다투어 발표하였다. 대표적인 사례로 Chemours사의 2억 달러 투자 계획 발표를 들 수 있다.⁴ 하지만, 공급자 중심의 증산정책 추진이 PFSA 이오노머 공급량 부족에 대한 즉각적인 해결책이 될 수는 없을 것으로 예상된다. 이는 PFSA 이오노머 생산체제와 깊이 관련되어 있다. 일반적으로 PFSA 이오노머는 형석(CaF_2)에서 얻어지는 불산(HF)을 시작으로 불소에 결합된 탄소 수 증가에 따라 불소계 고분자로 이르는 수직계열화된 생산체제의 제일 마지막 생성물로서 제조된다. 이런 특수한 생산체제로 인해, 최종 생성물인 PFSA 이오노머를 증산시킬 경우, 불산을 포함한 다양한 불소계 화합물의 불가피한 증산을 동반하게 되며, 이는 고가 불소계 화합물의 단가 저감과 기업이익률 감소로 직결될 수 있다. 따라서, 불소계 화합물의 수익성 약화 문제를 완화시키기 위해, 생산능력 확대 속도는 부정적인 시장파급효과를 상쇄하면서, 완만히 제어되어야만 할 필요가 있다. 그 결과, 현재 발생한 PFSA 이오노머 공급량 부족 문제가 수 년 내에 해결되기는 어려울 것이다.

2.3. (위기: PFAS 규제 제안) vs (기회: PFAS 규제로부터 자유로운 신합성법 도입)

2022년 12월 PFSA 탭티어 5사 중 하나인 3M사가 2025년까지 불소고분자(fluoropolymers), 불소계 유체(fluorinated fluids) 및 과불화 화합물(per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS) 생산의 전면 중지를 선언하였다.⁵ 여기에는 PTFE(polytetrafluoroethylene), PVDF(polyvinylidene fluoride), fluoroelastomers, PFSA 이오노머 모두를 포함하고 있다. 3M사의 선언은 다른 글로벌 탭티어 업체의 생산량 증가 선언과는 상반되는 조치였는데, 이는 기업의 주력사업(3M: 소비재 생산기업 vs Chemours/Solvay/AGC/AK: 산업재 생산기업)의 차이로 인한 기업 입장차에서 비롯된 것이라 추론하고 있다.

이후, 2023년 1월 유럽 5개국(네덜란드, 독일, 덴마크, 스웨덴, 노르웨이)이 유럽화학물질청(ECHA)를 통해 전면적인 PFAS 사용 제한 보고서를 발표하고, 그 간의 인체유해성이 과학적으로 입증된 특정 PFAS 물질 [완전 불소화된 옥탄(C_8 , 탄소 8개) 주골격에 카르복실산($-\text{COOH}$) 또는 술폰산($-\text{SO}_3\text{H}$)가 결합된 PFAS, 대표 사례: 과불화옥탄산(PFOA), 과불화옥탄술폰산(PFOS)]의 취급 금지 및 제한을 한 “스톡홀름 협약(Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutant(POPs))”에서 불소계 화합물 전체로 전면 확대를 제안하였다.⁶ 더해서, PFAS 대체물질 부재시 갑작스런 사용금지에 따른 영향을 고려하여, 옵션 2[표 1, 용도에 따라 18개월 전환기간 부여 후, 용도에 따라 5년(대체물질이 개발중이거나 개발에 시간이 요구되는 산

업용 기계) 또는 12년(심자박동기와 같은 이식형 의료품 등 대안이 없거나, 개발에 장기 소요되는 제품)의 예외적 사용 허용 후 완전 금지를 적절한 대안으로 제안하였다. 하지만, 해당 제안은 현재 확정된 것은 아니며, 2023년 3월부터 9월까지 2개의 ECHA 위원회[위해성 평가위원회(RAC), 사회·경제적 분석 위원회(SEAC)] 검토와 함께 ECHA 웹사이트에 의견을 받고 있는 상태이며, 2024년 RAC, SEAC 최종평가 의견이 결정되면, 2025년 최종의견에 대한 유럽진행위원회의 채택과 발표 후, 2026년부터 제한 적용의 단계를 계획하고 있다. 여기서, PFSA 이오노머는 “에너지 부분” 사용처로 분류되고 있으며, “전환 후 5년 사용 유예

후 완전금지” 아이টে으로 제안되었다.

현재 ECHA웹사이트에서는 EU국가 뿐만 아니라 비 EU국가에 기반을 둔 이해관계자들의 의견을 받고 있는 상황이며, 제한 제외 또는 더 긴 전환기간이 필요하다고 생각되는 경우, 위험성 평가 또는 사회경제적측면에서의 타당한 근거 제시를 요청받고 있다. 이 중, 벨기에(제출기관: Hydrogen Europe)의 제출의견은 흥미롭다. 우선, 수전해 및 연료전지 응용분야로 대표하는 수소산업에 있어서 PFSA 이오노머는 필수적이며, EU 탄소중립 전환을 위해 대체 대안이 없다는 것을 강조하였다. 특히, PFSA 이오노머 금지가 실현될 경우, 향후 10년간 300억 유로 투자가치(20만개의 직접 일자리, 26만

[표 1] EU ECHA의 PFAS 사용제한 옵션2 5년 유예 분야⁶

구분	주요 사용처	사용 용도
전환 후 5년 사용 유예	섬유·가구류	• 물과 기름의 조합된 산업 또는 전문 분야에서 여과 및 분리 매체용 직물
	식품 접촉 소재 및 포장재	• 산업용 또는 전문 식료품 및 사료 생산을 위한 접촉 물질
	불소가스 적용 제품	• 영하 50도 이하의 저온 냉장과 냉매 • 145kV 이상의 고전압 스위치 기어의 절연용 가스
	수송	• 기계압축기가 장착된 연소 엔진 차량의 이동식 공조 시스템의 냉매 • 해양 응용 분야 이외의 운송용 냉동 냉매
	전자 및 반도체	• 연료전지의 양성자 교환
5년 사용 유예 후 재검토	식품 접촉 소재 및 포장재	• 산업용 또는 전문제빵용 용기의 탈착용 코팅
	금속 도금 및 금속제품 제조	• 고강도 크롬 도금
	불소가스 적용 제품	• 건물 단열을 위해 현장에서 분사되는 발포폼의 발포제

[표 2] EU ECHA의 PFAS 제조-사용-판매 등의 전면 사용 금지를 위한 허용 농도수준⁶

구분	허용 농도 수준	농도 측정 방법 및 유의사항
개별 PFAS 농도	25 ppb 이하	• 물질별 표준용액으로 개별 PFAS 농도 정량화 • (유의사항) PFAS 고분자는 농도 계산에서 제외 현재 약 40개의 서로 다른 PFAS를 포함하는 표적분석으로 측정
총 PFAS 농도	250 ppb 이하	• 물질별 모든 PFAS 농도 정량화(분해 산물도 포함) • (유의사항) PFAS 고분자는 농도 계산에서 제외
총 불소 농도	50 ppm 이하	• PFAS 고분자 등을 포함한 총 불소 농도 • (유의사항) 총 불소농도가 허용농도 수준인 50 ppm 초과 시 제조자가 PSAS와 비PFAS 여부에 대한 분석자료 제출하여 입증

개의 간접 일자리)가 있는 수소산업의 붕괴로 이어질 수 있음을 피력하였다. 또한, PFSA를 포함하는 PFAS 고분자가 OECD의 “polymer of low concern” 기준을 충족시켜, 인간의 건강이나 환경적 위험을 발현시키지 않아, ECHA에서 제시하는 PFAS 제한조치로부터 면제해야 함을 주장하면서, 공급망 전반에 걸친 순환경제를 장려하는 프레임워크 설정(수거 시스템 구현 및 재활용, 재사용의 폐쇄순환 등) 필요성을 제안하였다.

해당 PFAS 사용 제한(안) 중 PFAS 고분자에 대한 “전환 후 5년 사용 유예”에 대한 산업계 및 학계의 의견은 과학적으로 입증된 인체유해성과 상관관계를 찾을 수 없으며, 5년 내 대체물질 확보가 어렵고, 사회·경제적 파급효과를 고려해 제한조치를 면제해야 한다는 주장이 압도적이다. 하지만, PFAS 고분자 제조-사용-판매 과정에서 발생할 수 있는 인체유해성이 검증된 PFAS 규제 물질 발생에 대해서는 허용 농도 수준 설정(표 2)이 이루어질 전망이다. 그와 관련하여 Solvay사가 발표한 PFAS 고분자 생산과정에서 환경파괴를 일으킬 수 있는 불소계 계면활성제 사용 중지를 위한 기술개발에 투자하겠다는 조치는 의미심장하다.⁷

2.4. (위기: EU 재활용 플라스틱 사용 촉구) vs (기회: PFSA 이오노머 재활용)

영국, 포르투갈, 독일 등의 일부 유럽국가에서는 2023년 1월부터 플라스틱 재활용 사용 의무화와 관련된 플라스틱세 운영이 이루어지고 있으며, 이탈리아, 폴란드, 네덜란드 등에서는 플라스틱세 도입을 검토 중이다. 특히, 자동차 분

야를 중심으로 2015년부터 재활용률 95%를 목표로 재활용 플라스틱 및 생분해성 플라스틱 채택을 주도하고 있다. 그와 관련한 수소전기차를 포함한 수소 모빌리티 핵심소재인 PFSA 이오노머는 해당 논의로부터 자유롭지 않다.

그림 5는 페플라스틱에 대한 일반적인 재활용 방법을 보여준다. 하지만, PFSA 이오노머를 대상으로 각 방법을 적용할 경우, 부가적인 문제점들이 발생된다. 현재까지 산업적으로 적용되는 PFAS 고분자 폐기법으로는 매립 또는 열적 재활용(소각, incineration)을 들 수 있다. 매립의 경우, PFSA 이오노머의 높은 내화화성으로 인해 자발적 분해되기 매우 어렵기 때문에, 환경적인 문제를 한시적 유예시키는 미봉책에 불과하다. 반면, 일부 산업체에서는 탄화수소계 고분자들과 함께 소각시키는 열적 재활용 방식을 취해, 열분해 시 발생하는 불소계 환경오염물질 농도를 저감시키는 방법을 취하고 있다. 하지만, 소각과정에서 PFAS 규제물질의 발생이 보고⁹되어, 향후 해당 방식에 대한 본격적인 규제조치가 이루어질 전망이다.



PFSA 이오노머에 대한 물리적 재활용 방법을 적용할 경우, 낮은 유리전이온도로 인해 미세분쇄가 어려우며, 분쇄 후 가공으로 위해 적용되는 알코올 수용액 상에 대한 낮은 용해도로 인해 재생 PFSA 이오노머의 물성 및 품질 저하가 발생할 수 있다. 이러한 한계에도 불구하고, PFSA 이오노머의 높은 가격과 부족한 수요를 어느 정도 해소할 수 있는 방법으로 채택되어, 현재 일부 업체에서는 사업화 진행 중에 있다.^{10,11} PFSA 이오노머의 화학적 재활용은 열분해 과정을 통해 중간체 또는 저분자 원료물

질을 얻는 방법으로 반영구적인 재활용이 가능하지만, 정밀한 반응제어 및 고도의 정제과정을 동반하기 때문에, 기술적 난이도가 높고, 높은 제조비용이 발생되어 경제적이지 못한 문제점이 있다.

PFSA 이오노머의 재활용 이슈는 1) PEMFC 또는 PEMWE용 전해질막 제조과정 뿐 아니라, 전해질막과 전극이 결합된 막-전극 어셈블리(Membrane-Electrode Assembly, MEA) 제조과정에서 발생하는 전해질막 스크랩, 2) MEA 제조과정에서 발생하는 코팅불량 MEA, 3) PEMFC 및 PEMWE 시스템 적용된 사용 후 MEA에서 발생할 수 있다. 1)의 대표예로는 전

해질막 제조과정 중 초도 코팅된 막의 일부와 주입된 코팅용액이 소모되는 시점에서 코팅된 막의 일부를 절단하여 최종 제품을 출하하게 되면서 발생하는 전해질막 스크랩, 또는 MEA 제조과정 중 공급된 전해질막의 규격과 출하되는 MEA 규격의 차이로 인해 전해질막 스크랩을 들 수 있다. 이 경우, PFSA 이오노머는 높은 전기화학적 활성을 갖음에도 불구하고, 적용가능한 재활용법의 부재로 인해, 매립(미활용 보관)되거나 타 고분자물질과 함께 열분해되는 방식이 취해져 왔다.

2)의 재활용 이슈는 전극 코팅시 발생하는 불균일 코팅이나, 코팅 품질 문제(크랙, 촉매 응

 폐플라스틱의 리사이클링 방법			
			
방법	열적 재활용 (Thermal Recycling) : 연료화	물질 재활용 (Material Recycling) : 물질회수	화학적 재활용 (Chemical Recycling) : 유화환원
과정	높은 발열량을 이용해 소각하여 열에너지 생산	재질 선별, 분쇄, 압축 등 물리적 가공으로 작은 알갱이 형태의 플라스틱 펠렛 생산	고분자구조의 폐플라스틱을 열분해, 가스화 등의 화학적 과정으로 원료 또는 유류 생산
장점	저비용 폐기물 부피 감소	이산화탄소 저감	적용 품종 다각화 반영구적 재활용
단점	자원 반복 이용 불가 유해가스 및 미세먼지 발생	품종 한정 물성 및 품질 저하	고비용 높은 기술 난이도

[그림 5] 폐플라스틱에 대한 적용가능한 재활용 방법⁹⁾

집 등)로 인해 발생하며, 코팅면적이 증가할수록 불량률은 급속히 증가하게 된다. 해당 이슈는 현 시점에서도 MEA 제조사에서 빈번히 발생된다. 이 경우, MEA 소각, 촉매 전구체의 환원, 나노 입자화, 담지체 흡착 과정을 통해 고가 금속촉매(예: 백금 또는 이리듐)만을 회수하는 방식을 보편적으로 취하고 있다. 하지만, 전해질막 및 전극소재로 사용되어 MEA 가격의 절반을 차지하는 PFSA 이오노머는 MEA 소각 과정 중 열분해되며, 그 과정 중 PFAS 규제물질을 배출하게 되며, 재활용이 불가능하게 되

어 경제적인 손실이 동반하게 된다. 또한, 주목할 만한 점은 MEA 제조과정 중 발생하는 불량 MEA에서의 PFSA는 높은 전기화학적 활성을 여전히 갖고 있다는 점이다.

1) 2)의 경우, PFSA를 선택적으로 활성손실 없이 추출할 수 있다면, 신품 PFSA 이오노머와 비교했을 때 물성차이는 발생하지 않게 된다. 그와 관련하여 적용가능한 기술로는 알코올 수용액상에 전해질막(예. PTFE 강화복합막) 및 MEA와 같은 혼합물로부터 PFSA 이오노머만을 선택적으로 추출시켜 분산시킬 수 있는 초

• Treatment processes



• Technical/Economical issues: 1) HF evolution (Environmental pollution), 2) No use of high cost ionomers, 3) Same Pt/C cost

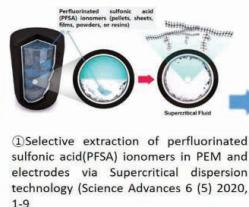
1) Failed PEM or remaining edge film



2) Failed MEA



3) Used MEA



② Physical separation



③ PFSA dispersion



③ Physical separation



② Pt slurry containing the high content of PFSA



③ PFSA dispersion



④ Pt/C

• Technical/Economical advantages: 1) free from HF evolution, 2) Re-use of PFSA ionomer, 3) Reduction of Pt/C cost

[그림 6] PFSA 이오노머 리사이클링 기술(상) 대비 업사이클링 기술(하)

임계 분산기술¹²을 들 수 있다. 추가로 용도에 따른 입자크기제어기술을 적용할 경우, 기존 전해질막 및 전극소재 제조를 위해 적용된 신품 PFSA 이오노머 대비 좀 더 우수한 물성(예: 이온전도도, 기체투과성 및 차단성 등) 구현도 가능하다. 또한, 불량 MEA에 대해, 해당 기술 적용 후 필터과정을 거치게 되면, 촉매 재활용을 위한 소각 공정 적용 시 PFAS 규제물질 발생을 저감 및 원천 차단하는 효과도 기대할 수 있다.

3)의 재활용 이슈는 현 시점에서는 크게 발생하지 않지만, 향후 PEMFC 및 PEMEC 보급확대가 이루어지는 시점에서 반드시 발생하게 되며, 재활용 가능한 양은 1) 2) 수준을 넘어서게 될 것으로 예상된다. 이 경우, PFSA 이오노머에 잔류할 수 있는 불순물(예: 금속이온)을 제거하는 공정이 추가되어야 하며, PFSA 이오노머는 1) 2)와 유사한 방식으로 업사이클링 될 수 있다.

3. 맺음말

전세계적인 탄소중립정책 및 수소경제정책 추진, 러시아-우크라이나 전쟁, PFAS 규제강화, 세계적인 플라스틱 재활용 요구 등으로 인해, PFSA 이오노머는 급격한 시장수요를 감당하지 못하는 공급량부족 문제, 대체소재 부재 문제 등 위기에 직면해 있다. 하지만, 이에 대응한 시장확대, 친환경 합성법 개발, 체계적인 수거 및 재활용을 필두로 하는 공급망 전반에 걸친 순환경제를 장려하는 프레임워크 설정 등

의 PFSA 이오노머 산업전반에 걸친 기회가 동시에 도래했다는 것은 인지하고, 이에 따른 조속한 대비가 필요할 것으로 사료된다.

*이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00241035, 1415188062, 청정 수소 및 암모니아 혁신 연구센터)

참고문헌

1. Kreuer, K.D. On the development of proton conducting polymer membranes for hydrogen and methanol fuel cells, *J. Membr. Sci.*, **185**, 29 (2001).
2. Global ion exchange membrane market size by charge analysis(cation, anion and amphoteric exchange membrane), by material(hydrocarbon membrane, perfluorocarbon membrane, inorganic membrane), by application(electrolysis, desalination, water treatment), by geographic scope and forecast, *Verified Market Research* (2020).
3. PFSA Ionomer Market: Analysis, Growth, and Forecast 2019–2027, *profsharemarket-research.com*.
4. Chemours Company Announces \$200 Million Investment in Hydrogen Solutions - Environment+Energy Leader, *Enviroment+Energy Leader* (2020).

5. 3M says it will end PFAS production by 2025 (acs.org) (2022).
6. Substances perfluoroalkylées (PFAS) - ECHA (europa.eu).
7. Producing new fluoropolymers without fluorosurfactants | Solvay.
8. 플라스틱의 두 번째 삶, 폐플라스틱 리사이클링 기술 (hanwhasolmate.co.kr).
9. Feng, M., Qu, R., Wei, Z., Wang, L., Sun, P., & Wang, Z., Characterization of the thermolysis products of Nafion membrane: A potential source of perfluorinated compounds in the environment, *Scientific Report* **5**, 9859 (2015).
10. Recycled Nafion™ | Nafion Store (ion-power.com).
11. Grot, S., Grot, W., Recycling of used perfluorosulfonic acid membranes, Ion Power, US Patent 7,255,798 B2 (2007).
12. Ahn, C.Y., Ahn, J., Kang, S.Y., Kim, O.H., Lee, D.W., Lee, J.H., Shim, J.G., Lee, C.H., Cho, Y.H., Sung, Y.E. *Sci. Adv.* **6**, 1 (2020).

수전해공정 수소 크로스오버현상의 이해 (Understanding the hydrogen crossover phenomenon in water electrolysis process)

김 정 (인천대학교 에너지화학공학과 부교수)

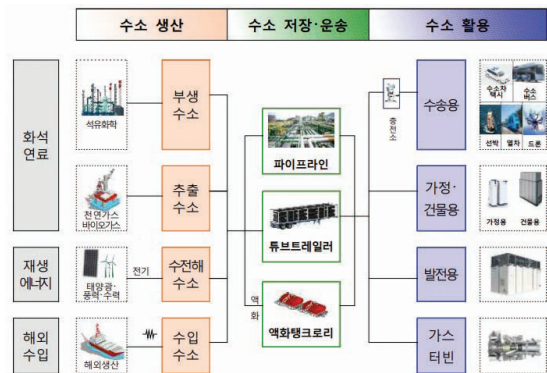
1. 서론

과도한 화석연료사용으로 인해 빠르게 악화되는 기후 위기에 대응하기 위해선 에너지 패러다임을 태양광, 풍력, 수력 및 지열에너지와 같은 탄소배출이 없는 신재생에너지로 전환해야 한다. 신재생에너지 기술은 가격경쟁력을 갖춰가고 있으며, 최근 태양광 및 풍력 에너지의 경우 석탄발전 대비 더 낮은 비용으로 전기 생산이 가능한 사례가 보고되고 있다.

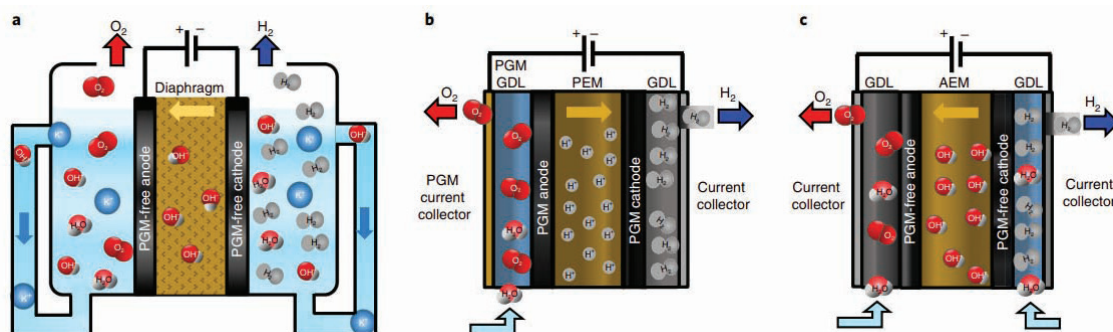
신재생에너지 기술의 핵심 난제는 변동성이 높은 전력생산과 전력수요를 균형 있게 조절하는 것이다. 통상적으로 전력수요 대비 초과전력을 유지할 필요가 있으나, 활용되지 않는 잉여전력은 열에너지로 전환되어 손실된다. 따라서, 최근 많은 연구개발의 초점이 잉여전력을 효율적으로 저장할 수 있는 에너지저장시스템(Energy Storage System, ESS) 기술에 집중되고 있다. 활용되지 않는 잉여전력을 화학에너지 또는 위치에너지 형태로 저장한 후 전력수요에 따라 다시 전기에너지로 변환시킬 수 있는 효율적인 ESS 기술개발이 필요하다.

대표적으로 연구되고 있는 ESS는 잉여전력을 수소분자 내 화학에너지로 저장하는 것이다. 수소는 알려진 화학물질 중에서 가장 높은 에너지 질량밀도(120 kJ/g)를 가지고 있으며, 연료 전지 시스템을 사용하여 탄소배출없이 다시 전기 에너지로 변환될 수 있다. 이상적으로는 잉여전력을 수소형태로 저장해 둔 후, 전력수요에 맞춰 전기를 생산하는 에너지그리드를 구축할 수 있으며, 이를 통해 지속가능한 제로탄소 수소경제를 구현할 수 있다 [그림 1].

수소는 여러 방법으로 생산될 수 있으며, 생



[그림 1] 수소경제의 밸류체인 [1]



[그림 2]. (a) Alkaline Water Electrolysis (AWE) (b) Proton Exchange Membrane Water Electrolysis (PEMWE) (c) Anion Exchange Membrane Water Electrolysis (AEMWE) [2]

산공법에 따라 그린, 청록, 그레이 또는 블랙 수소로 분류된다. 다양한 생산 경로 중에서, 전기에너지를 사용하여 물 분자를 수소와 산소로 분해하는 수전해 방법이 지속가능한 친환경 공정으로 인식되고 있으며, 이 방법을 사용하여 생산된 수소는 그린수소(제로 탄소발자국)로 분류된다. 다만 아직까지 가격경쟁력이 부족하다는 단점이 존재한다. 현재 그린수소 생산단가는 7,000 ~ 12,000 원/kg 수준이며, 정부의 수소경제활성화 로드맵은 2050년까지 2,500 원/kg 이하로 저감하는 것이다.

공간효율적으로 수소를 생산하기 위해선 얇은 이온교환막을 활용한 수전해스택 시스템을 활용하는 것이 일반적이다. 이는 양성자교환막수전해(Proton Exchange Membrane Water Electrolysis, PEMWE), 음이온교환막수전해(Anion Exchange Membrane Water Electrolysis, AEMWE), 및 알칼라인 수전해(AWE, Alkaline Water Electrolysis)로 더욱 세분화될 수 있으며 [그림 2], 양극과 음극 사이에 전기회로연결을 위한 얇은 이온교환막이 필수적으로 포함된다. 이온교환막의 주 역할은 선택적으로 이온

(혹은 H^+ 또는 OH^-)만 투과시키는 것이다. 예를 들어, 양성자교환막(PEM)에서는 H^+ 이온이 선택적으로 투과하여 양극에서 수소분자로 재결합된다.

수소는 질량당 에너지밀도 (120 kJ/g)가 제일 높은 에너지원이지만, 동시에 대기조건에서 기체상태로 존재하므로 부피당 에너지밀도가 매우 낮다 (약 10 kJ/L). 따라서 효율적인 저장 및 운송을 위해서 고압압축 또는 액화공정이 필수적으로 요구된다. 화학공학적 관점에서 기체를 고압으로 압축하는 공정은 비용이 높으므로 수소가 생성되는 양극에서 최대한 고압으로 운전하는 것이 경제적이다 (수소생성반응속도와 평형은 압력에 큰 영향을 받지 않는다). 하지만 이러한 고압환경에서는 생성된 수소가 이온교환막을 통해 다시 음극으로 역투과되는 크로스오버(Crossover) 현상이 일어나며 이는 수전해공정의 수소생산효율을 크게 저해하는 요인으로 작용한다. 또한, 산소가 생성되는 음극에서 투과된 수소와 반응할 경우 많은 열을 방출하여 심각한 안전문제를 초래할 수 있으므로 공정안전을 위해 크로스오버현상을 신중하

게 제어해야 한다.

크로스오버현상은 연료전지와 수전해시스템에서 모두 발생하지만, 수전해공정에서는 자발적 연소 및 폭발이 가능한 조건이 갖춰질 수 있으므로 특별히 더 안전에 주의를 기해야 한다. 80°C에서의 폭발 임계치는 산소가 풍부한 음극에서 4.8 mol% H_2 이며 [3], 이 조건은 낮은 전류 밀도에서 작동하는 고투과성 박막을 활용할 경우 쉽게 도달될 수 있다. 따라서, 수전해 시스템의 공정효율과 안전성을 확보하기 위해선 수소 크로스오버 현상을 정확히 이해하고 측정할 필요가 있다. 수전해공정에서는 이온교환막이 습윤상태(hydrated state)에서 운전되므로 기체투과 특성은 기존 기체분리막과 동일한 방법으로 측정될 수 없다. 하지만 현재 문헌에서는 잘못된 방법으로 측정된 크로스오버 데이터가 인용되고 있는 실정이다. 실제로 대부분의 이온교환막 연구가 이온전달성능에 집중되어 있으므로 기체투과특성에 대해서는 심도 있게 고려되지 않기 때문인 것으로 추정된다.

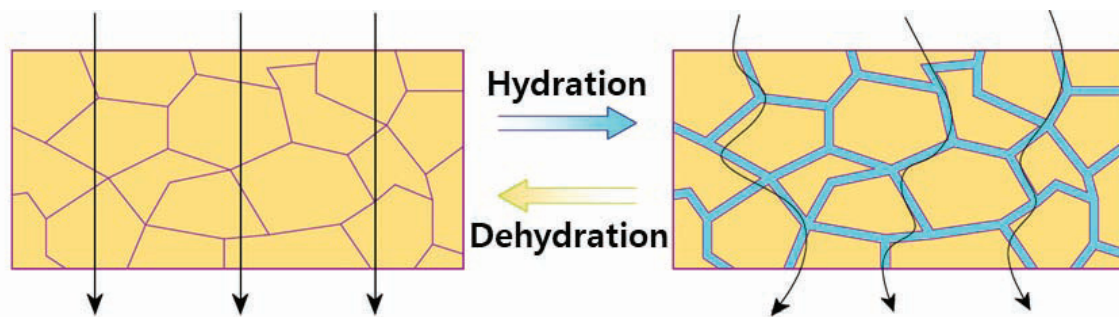
따라서 본 기고문에서는 습윤이온교환막(Hydrated Ion Exchange Membrane) 기체투과

메커니즘을 개론적으로 서술하였으며, 현재 문헌에 보고되는 다양한 크로스오버 측정방식의 장단점을 정리하였다. 나아가서, 이온교환막의 크로스오버 데이터를 활용하여 고분자 내부의 이온채널 구조를 분석하는 최근 연구동향을 소개하고자 한다. 수전해공정의 크로스오버현상의 정확한 이해를 통해 맞춤형 이온교환막 연구개발에 도움이 될 것으로 기대된다.

2. 본론

2.1. 수전해공정 수소 크로스오버 메커니즘의 이해

수전해공정의 크로스오버 현상을 이해하기 위해선 습윤상태의 이온교환막이 액상의 물과 고체상의 고분자가 혼합된 Two-phase (고체+액체) 상태로 존재한다는 것을 인지할 필요가 있다. 이온교환막 내부의 함수량은 상당히 높은 편이며 고분자구조와 온도에 큰 영향을 받는다. 예를 들어, 탄화수소계 이온교환막 소재의 경우 습윤상태에서 액상(물)의 부피분율(volume fraction)이 70% 이상인 경우도 보고된다 [4]. 따라서, 수소기체는 액상의 물로 투과하는 경로와 고체상의 고분자소재로 투과하는



[그림 3] 습윤상태의 이온교환막 내부의 수소기체 투과 경로 [5]

두가지 경로가 동시에 존재한다고 가정할 수 있다 [그림 3].

크로스오버현상을 분석하는 과정에서 추가로 어려운 부분은 이온교환막 내 워터채널 구조의 불확실성이다. 정확한 워터채널 구조는 고분자별로 상이하지만 Nafion과 같은 대표적인 이온교환막의 워터채널 구조에 대해서도 문헌상 consensus가 존재하지 않는다. 건조상태의 이온교환고분자가 물을 흡수하게 되면 고분자 내 소수성파트와 친수성파트(Ionomer)의 상분리를 통해 워터채널이 형성되며, 고분자의 화학적 구조에 따라서 워터채널의 연결성(degree of percolation)과 연속성(connectivity)이 결정된다.

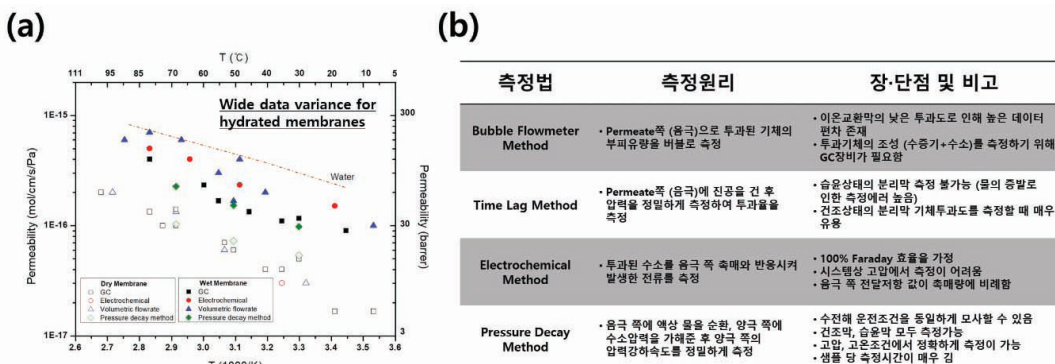
이 과정에서 형성된 워터채널의 연결성과 연속성이 수소 크로스오버에 매우 큰 영향을 미친다. 워터채널이 연속적으로 연결(percolate) 되어있지 않은 경우 액상에서 고체상으로 전달되는 전달저항(또는 그 반대 경우)이 높아지기 때문이다. 바로 이 부분 때문에 수소 크로스오버를 표기할 때 기체투과도(permeability)차원의 단위(e.g., barrer)를 적용하는 것은 이론적으로 적합하지 않다. 물(액상)의 수소투과도와

고분자(고체상)의 수소투과도는 상이하기 때문이다. 아쉽게도 현재 문헌상에서는 이런 부분이 고려되지 않고 permeability 차원의 단위(e.g., barrer)가 활용되고 있으나, 원칙적으로는 permeance 차원의 단위(e.g., gas permeation unit, GPU)를 사용하는 것이 적합하다는 것을 이 기고문에서 다시 한번 강조하고자 한다.

2.2. 수전해공정 수소크로스오버 측정방법 및 한계점

수전해공정에서 습윤상태의 이온교환막 수소투과도를 측정할 때 기존 기체분리공정 구조와 다르다는 점을 인지할 필요가 있다. 수전해스택 내 음극에서는 액상의 물이 순환되며, 양극 쪽 고압수소가 이온교환막을 중심으로 형성되는 수소분압차이로 인해 음극 쪽으로 크로스오버된다. 통상 기체분리막의 단일기체투과도를 측정할 때 분리막은 건조된 상태에서 실험이 진행되지만 수전해공정은 습윤상태로 운전되므로 측정과정에서 수증기의 영향을 면밀하게 고려해야 한다.

크로스오버현상을 측정할 때 수증기의 영향



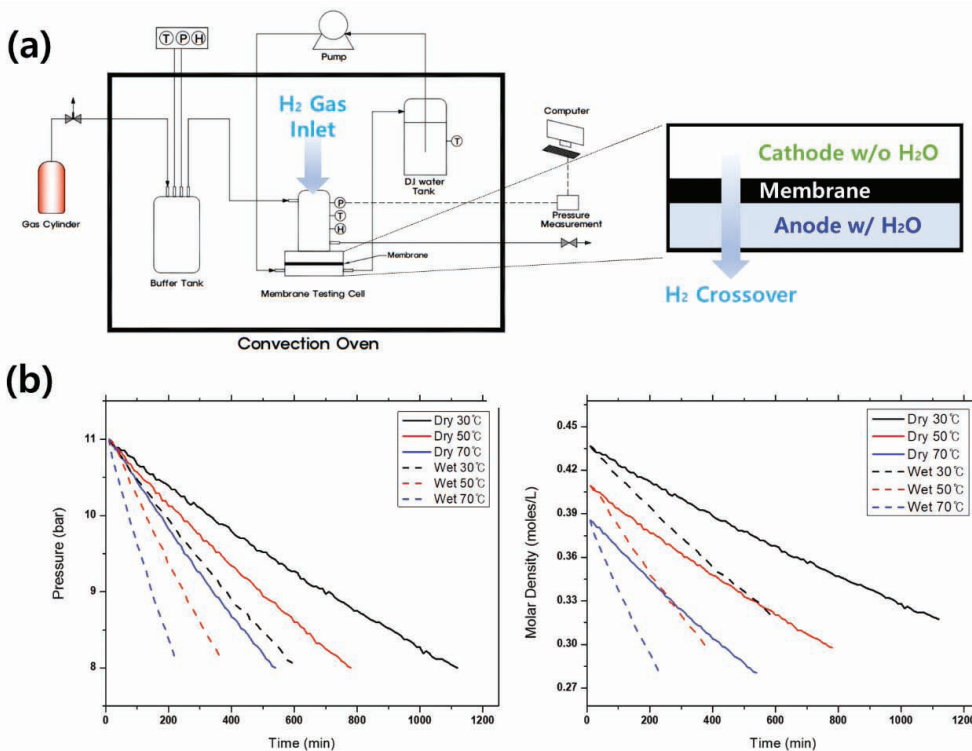
[그림 3] (a) 건조상태의 Nafion막과 습윤상태의 Nafion막의 수소투과도 [5] (b) 문헌상 보고되고 있는 측정법의 원리 및 한계점 정리

을 고려하지 않을 경우 매우 큰 측정오차로 이어질 수 있으며, 문헌에 보고된 방법들 중에서 상당한 오류가 있는 방법도 존재한다는 점을 지적하고자 한다. 현재 문헌에서 보고되고 있는 수소 크로스오버 측정방식은 크게 4가지가 존재하며 각 방법의 장점과 한계점을 [그림 4]에 정리하였다.

먼저 [그림 4(a)]에서 보이는 것과 같이 건조상태 이온교환막의 수소투과도는 측정법과 무관하게 상당히 일정하다는 것을 알 수 있다. 반대로 동일한 막 (Nafion) 내에서도 습윤상태 일 경우 수소투과도는 측정법에 따라 상당히

큰 편차를 보이는 것을 확인할 수 있다.

먼저 Bubble Flowmeter Method의 경우 이온교환막의 기체투과도는 원천적으로 매우 낮으므로 (100 barrer 미만) 실험적 측정오차가 매우 크다. 이 방법은 정밀여과막(Microfiltration, MF)급 분리막의 기체투과도를 평가할 때 주로 사용되므로 이온교환막의 크로스오버현상을 측정하기에는 적합하지 않으며 추천하지 않는다. 또한, 운전조건에 따라 투과되는 기체의 조성이 순수한 수소가 아니므로 추가적으로 조성분석(e.g., GC)이 필요하다. 두번째로 Time Lag Method는 건조상태의 분리막 기



[그림 4] (a) Pressure Decay Method (PDM) 측정장치의 기초구성 [5-6]

(b) PDM 기법으로 측정된 시계열 압력데이터 및 상태방정식을 활용한 시계열 수소몰밀도 데이터

체투과도를 측정할 때 최적화되어 있는 신뢰성 높은 방법이다. 다만 측정원리상 습윤상태의 분리막 기체투과도를 측정할 수 없다는 단점이 있으며, 수소 크로스오버 측정용으로 사용될 수 없다. 세번째로 자주 활용되는 방식인 Electrochemical Method의 경우 투과되는 수소를 음극 쪽의 촉매와 반응시켜 생성되는 전류를 측정하는 방식이다. 모든 수소가 촉매에서 반응한다는 가정하에 수소 크로스오버를 측정할 수 있지만 촉매량과 밀도에 따라 촉매 층 내에서의 전달저항이 무시할 수 없는 수준으로 높아진다는 단점이 존재한다. 또한, 기존 실험실급 수전해스택에서는 양극에서 고압수소를 주입하기 까다롭다는 점도 단점이라고 볼 수 있다.

최근 보고된 Pressure Decay Method (PDM)에선 실제 수전해 구동조건과 매우 유사한 환경에서 크로스오버를 정밀하게 측정하는 방법이며 기존 방법의 단점들을 해결하였다 [5-6]. 기체분리막 연구분야에선 매우 오래전 활용되던 측정법이고 Time-lag Method의 등장과 함께 활용가치가 낮아진 방법이었지만, 습윤상태에서 운전되는 수전해공정 이온교환막의 수소 크로스오버를 측정하기에 매우 적합한 방법인 것으로 재확인되었다. PDM 방법에선 양극 쪽에 고압의 수소를 주입하고 음극 쪽으로 액상의 물을 순환시켜 실제 수전해공정과 유사한 환경을 모사할 수 있으며, 양극 쪽의 압력을 지속적으로 측정하여 크로스오버되는 수소의 양과 속도를 정확하게 계산해낼 수 있다. 이를 활용하여 수소 크로스오버율을 매우 정확하게 예측해낼 수 있는 투과모델이 수립

되었으며 이온교환막 워터채널의 Percolation degree에 대한 정보 또한 얻어낼 수 있다는 가능성이 보고되었다 [6]. PDM 방법을 활용하여 PEMWE 뿐만 아니라 최근 관심이 높아지고 있는 AEMWE용 고분자의 수소크로스오버를 정밀하게 측정한 데이터가 많아질수록 맞춤형 이온교환막 개발속도가 빨라질 것으로 기대된다.

3. 맺음말

본 기고문에서는 수전해공정에서 매우 크리티컬한 위험요소인 수소 크로스오버에 대한 최근 연구동향을 정리하였다. 수전해공정에서 크로스오버현상이 제대로 제어되지 않을 경우 자발적 폭발이 가능한 조건이 갖춰질 수 있으므로 수소가 이온교환막을 투과하는 메커니즘을 정확하게 이해하고 정밀하게 측정할 필요가 있다. 아쉽게도 현재 많은 문헌에서는 잘못된 방법으로 측정된 크로스오버 데이터가 인용되고 있는 실정이다. 따라서, 본 기고문에서 습윤상태의 이온교환막(Hydrated Ion Exchange Membrane) 기체투과 메커니즘을 개론적으로 서술하였으며, 현재 문헌에 보고되는 다양한 크로스오버 측정방식의 장단점과 한계점을 정리하였다. 크로스오버 현상을 이해하기 위해 제일 중요한 부분은 습윤상태의 이온교환막이 액상의 물과 고체상의 고분자가 혼합된 Two-phase (고체+액체) 상태로 존재한다는 것을 인지하는 것이다. 또한, 크로스오버 현상을 설명할 때 Permeability 차원의 단위 (e.g., barrer)를 사용하는 것을 이론적으로 잘못된 것임을 강

조하였다. 현재까지 보고된 기법 중 크로스오버 현상을 정밀하게 측정하기 위해 제일 적합한 방법은 Pressure Decay Method (PDM)인 것으로 판단되며, 정밀한 크로스오버데이터와 수전해의 성능데이터가 연계될 수 있으면 맞춤형 이온교환막 연구개발에 도움이 될 것으로 기대된다.

4. 참고문헌

- [1] 과학기술정보통신부, 수소경제 활성화 로드맵 (2019)
- [2] D. Li, E.J. Park, W. Zhu, Q. Shi, Y. Zhou, H. Tian, Y. Lin, A. Serov, B. Zulevi, E.D. Baca, C. Fujimoto, H.T. Chung, Y.S. Kim, Highly quaternized polystyrene ionomers for high performance anion exchange membrane water electrolyzers, *Nature Energy* 5(5) (2020) 378–385
- [3] P. Trinke, P. Haug, J. Brauns, B. Bensmann, R. Hanke–Rauschenbach, T. Turek, Hydrogen crossover in PEM and alkaline water electrolysis: mechanisms, direct comparison and mitigation strategies, *Journal of The Electrochemical Society* 165(7) (2018) F502.
- [4] S.-Y. Han, D.M. Yu, Y.-H. Mo, S.M. Ahn, J.Y. Lee, T.-H. Kim, S.J. Yoon, S. Hong, Y.T. Hong, S. So, Ion exchange capacity controlled biphenol-based sulfonated poly(arylene ether sulfone) for polymer electrolyte membrane water electrolyzers: Comparison of random and multi-block copolymers, *Journal of Membrane Science* 634 (2021) 119370.
- [5] S. Kim, B.T.D. Nguyen, H. Ko, M. Kim, K. Kim, S. Nam, J.F. Kim, Accurate evaluation of hydrogen crossover in water electrolysis systems for wetted membranes, *International Journal of Hydrogen Energy* 46(29) (2021) 15135–15144.
- [6] S. Kim, J. Song, B.T. Duy Nguyen, J. Lee, J. Seong, S. Nam, S. So, J.F. Kim, Acquiring reliable hydrogen crossover data of hydrated ion exchange membranes to elucidate the ion conducting channel morphology, *Chemical Engineering Journal* 471 (2023) 144696.

• 김 정 •



2014 Ph.D in Imperial College London
 2016 한국화학연구원 선임연구원
 2019-현재 인천대학교 에너지화학공학과 부교수

암모니아 생산을 위한 광전기화학적 질소환원반응 촉매 디자인의 동향

(Catalyst Design for Ammonia Production via Photoelectrochemical Nitrogen Reduction Reaction)

최진욱¹, 박태언¹, 윤영훈², 심욱¹

(한국에너지공과대학교(KENTECH), 동신대학교 신재생에너지학과)

1. 서론

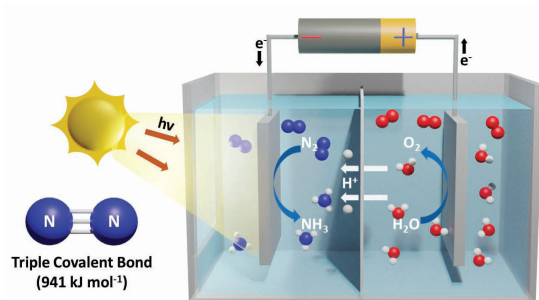
암모니아는 비료, 인조 섬유, 의약 분야 등 다양한 산업 분야에서 유용하게 사용되는 중요한 물질로 인류 생존에 큰 영향을 미치고 있다 [1]. 또한 암모니아는 수소를 3개 포함하고 있어 수소 함량(~17.6 wt%)이 높고, 비교적 낮은 온도에서 액화가 가능하기 때문에 현재 수소 산업에서 운송 및 저장하기 위한 수소 캐리어로서 주목받고 있다. 이러한 암모니아는 현재 산업이 발달함에 따라 더 많은 수요가 발생하고 있어, 생산량 증가가 요구되고 있다.

현재 산업에서는 암모니아는 주로 하버-보쉬법(Haber-Bosch process)으로 생산하고 있다. 이러한 공법은 고온 고압(300–500 °C, 150–300 atm)의 분위기에서 높은 순도의 수소와 질소 가스가 Fe- 혹은 Ru-기반 촉매, K₂O, SiO₂, CaO, Al₂O₃와 같은 촉매를 사용한 빠른 암모니아 합성 속도가 장점이다. 그러나 1 톤의 암모니아 생산 과정 중 1.87 톤의 이산화탄소를 생

산하여 매년 340 백만 톤의 그린하우스 가스들이 발생하고, 전 세계 에너지 소비량의 1–2 %를 차지하여 많은 환경문제를 초래하며 큰 플랜트 설비가 필요하다 [2]. 따라서 이러한 환경적, 경제적 문제를 해결하고 지속가능한 방법을 찾고자 다양한 암모니아 생산 연구가 계속 진행되고 있다.

광전기화학적 질소환원반응(Photoelectrochemical nitrogen reduction reaction, PEC-NRR)은 광에너지와 전기에너지를 통해 전자를 발생시켜 상압·상온에서 이산화탄소를 발생하지 않고 암모니아를 합성하기 때문에 탄소 중립을 위한 일련의 노력에 부합하며, 하버-보쉬법과 달리 작은 규모의 부지에서도 생산이 가능하기 때문에 유망한 지속가능한 친환경 암모니아 합성법으로 주목받으며 이에 대한 많은 연구가 보고되고 있다 [3,4]. 그림 1는 광전기화학적 질소환원반응에 사용되는 셀의 구조를 보여준다. 하지만 질소의 강한 삼중결합(940.95 kJ mol⁻¹)과 전해질 내에서의 낮은 질

소 용해도 및 질소환원반응과 경쟁 반응인 빠른 수소발생반응(Hydrogen reduction reaction, HER)으로 인해 암모니아의 대량 합성에 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제를 해결하고자 다양한 반도체 물질들이 고효율 광전기촉매로 연구되고 있다.



[그림 1] 광전기화학 질소환원반응 셀과 질소 분자의 모식도

광전기화학적 질소환원반응에서 백금(Pt), 금(Au)과 같은 귀금속 촉매들이 높은 촉매 활성과 선택성으로 광범위하게 연구되어왔다 [5]. 이러한 귀금속 촉매는 질소에서 암모니아로의 높은 수율과 효율을 보여주지만, 높은 비용으로 인해 상용화에 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제를 개선하고자 귀금속의 함량을 줄이기 위해 일부를 저가 금속으로 대체하거나, 저가의 전이금속 물질(Ni, Co, Fe, Zn, Mo 등)로 구성된 촉매를 연구하고 있다.

금속 산화물 촉매도 광전기화학적 질소환원반응에서 많은 연구가 진행되고 있으며, 현재 구리 산화물(CuO , Cu_2O)이나 텅스텐 산화물(WO_3)과 같은 산화물 반도체 물질들이 산소 자리의 공공(Vacancy)에 질소가 흡착되어 암모니아 합성 반응을 촉진하는 등의 높은 촉매 활

성과 가격 경쟁력을 갖춘 촉매로 보고되었다 [6]. 황화물과 셀레늄화물 촉매로 대표적인 MoS_2 와 MoSe_2 물질은 2D 형태인 그래핀 모양을 가지고 있어 높은 표면적과 높은 전도도를 보임으로써 유용한 촉매로써 제시되었다 [7]. 그러나 암모니아 합성 반응을 방해하는 수소발생반응도 활발히 일어나며, 구조 안정성이 낮아 질소 선택성을 높이면서 구조 안정성을 개선하는 연구가 진행되고 있다.

조절이 가능한 밴드 구조와 우수한 안정성으로 인해 질화탄소(C_3N_4) 및 질화붕소(BN)를 포함한 비금속 촉매도 연구되고 있다 [8]. 특히 질화물 기반의 촉매는 표면의 질소 원자 일부가 환원되면서 공공을 만들어 질소가 흡착되기 쉬운 활성 사이트를 생성한다. 이러한 비금속 물질은 물질 자체로도 촉매 역할을 수행하기도 하지만, 주로 다른 물질과 함께 사용되어 암모니아 수율 및 효율을 높이는 역할을 수행한다 [9]. 2D 촉매인 MXene은 넓은 표면적, 높은 전도도 및 많은 공공들로 광전기화학적 질소환원반응의 구조체로 많이 활용된다.

현재 다양한 촉매들이 연구 개발됨에 따라 그린 암모니아 생산 기술의 상용화가 가까워지고 있다. 본 총설에는 광전기화학적 질소환원반응의 원리 및 반응경로와 촉매 소재 관점에서 귀금속, 산화물, 황화물(셀레늄화물) 및 비금속 물질을 포함한 다양한 광촉매에 대한 연구 동향을 설명하고자 한다.

2. 본론

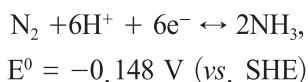
1.1 광전기화학적 암모니아 생성 원리

2.1.1 암모니아 생성 기초

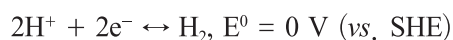
산업에서 암모니아 합성에 많이 사용되는 합성법인 하버-보쉬법에서의 암모니아 생성 반응식은 다음과 같다.



기상의 질소와 산소가 고온·고압의 환경에서 만나 암모니아가 합성되는 과정이다. 이러한 하버-보쉬법은 질소의 강한 삼중결합을 끊고 암모니아를 합성하기 때문에 많은 에너지가 필요하고 공정 중에 다량의 이산화탄소가 발생한다. 이러한 공정을 대체하고자 광전기화학적으로 암모니아를 합성하는 연구가 진행되고 있다. 광전기화학 셀은 광전극(작업전극), 상대전극, 분리막, 전해질, 질소 가스, 투명한 셀, 전원공급장치, 광소스로 이루어져 있다. 광전기화학적 질소환원반응에서는 광을 통해 생성된 전자가 광전극 표면으로 이동하게 되면, 광전극 표면에 흡착된 질소 분자와 전자 및 수소 이온과 만나 분해되면서 광전극 표면에서 암모니아가 생성된다. 질소환원반응은 수소이온과 전자가 같이 수반되는 Proton-coupled electron transfer (PCET) 반응을 통해 일어나며 전자가 6개가 참여한다. 반응식은 다음과 같다.



질소환원반응 외에 수소발생반응도 PCET 반응에 속한다. 이러한 수소발생반응은 질소환원반응과 비슷한 표준환원전위(E^0)를 갖기 때문에 질소환원반응을 저해하는 경쟁반응으로 일어난다. 수소발생반응의 반응식은 다음과 같다.

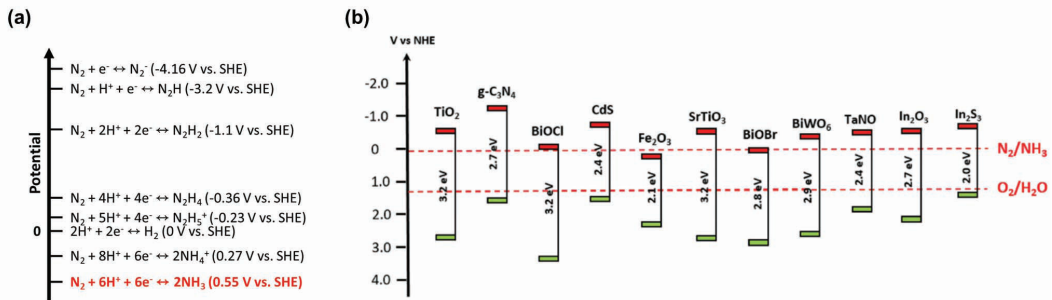


각 반응의 속도는 속도결정단계인 Rate-Determining Step (RDS)에 의해 결정되는데 질소발생반응의 첫 번째 단계인 질소 가스가 촉매 표면에 흡착되는 단계의 속도가 상대적으로 수소가 흡착되는 단계의 속도보다 매우 느리기 때문에 수소발생반응이 더 빠르게 일어난다. 또한, 반응에 참여하는 전자 수도 수소발생반응은 2개로 질소환원반응보다 4개나 더 적어 반응이 종료되는 과정이 더 짧다. 따라서 암모니아 합성에서 촉매를 적합하게 디자인하여 질소환원반응의 선택성을 향상하는 것이 중요하다. 그림 2(a)는 질소환원반응의 목표인 암모니아 발생반응과 그것을 저해하는 경쟁반응들의 전위를 나타낸다. 이러한 경쟁반응들에 따른 전위를 확인하여 질소환원반응의 선택성을 높일 수가 있다.

2.1.2 밴드갭에 따른 활성화 에너지

광전기화학적 질소환원반응은 광을 흡수할 수 있는 밴드갭을 갖는 반도체 물질들이 주로 사용된다. 파장에 따른 에너지는 다음과 같다.

$$E_{\text{photon}} = h\nu = hc/\lambda = E_g$$



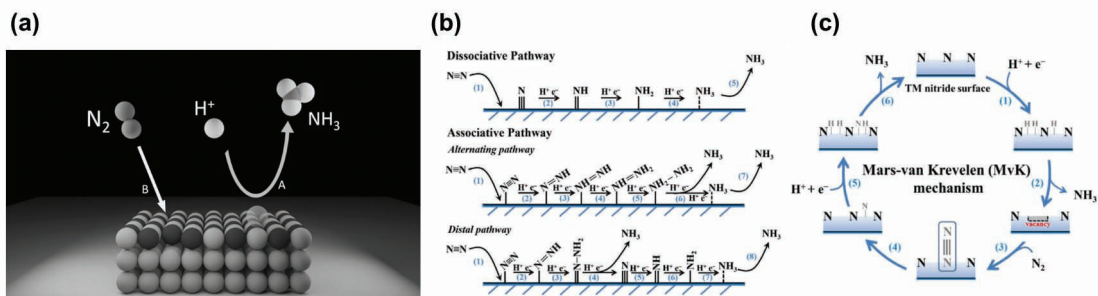
[그림 2] (a) 질소환원반응 및 여타 경쟁반응과 수소발생반응의 전위 및 (b) 광전기화학적 질소환원반응에 활용되는 반도체 물질들의 전도대, 가전자대와 밴드갭 에너지 (그림 (b) is reprinted with permission from Copyright 2019 Wiley-VCH GmbH [10])

여기서 h 는 플랑크 상수, ν 는 빛의 진동수, c 는 빛의 속도, λ 는 파장을 나타낸다. 빛에너지를 받게 되면 가전도대의 전자가 전도대로 들뜬 상태가 된다. 전자가 빠져나간 자리에 정공이 생성되며 전자-정공 쌍을 이루게 된다. 이러한 전하가 전기화학적 산화환원 반응에 참여하여 암모니아 생성 반응을 일으킨다. 그림 2(b)은 광전기화학적 질소환원반응에서 주로 사용되고 있는 반도체 물질 각각의 전도대, 가전자대 위치와 밴드갭 에너지이다 [10]. 이러한 전도대, 가전자대의 위치와 밴드갭 에너지는 광전기화학적 질소환원반응을 일으키는 역할을 한다.

2.1.3 암모니아 생성반응 경로 (Pathway) 및 장점

질소환원반응 중 암모니아가 생성되는 경로는 3가지가 있다. (1) Dissociative Pathway는 활성 사이트에 흡착 전 N_2 분자의 삼중결합이 먼저 끊어진 후 질소 원자 두 개가 따로 활성 사이트에 붙어 진행된다. 표면에 흡착된 질소 원자들은 각각 수소이온과 반응하여 암모니아가 생성되며 촉매 표면에서 탈착

된다. Dissociative Pathway는 질소의 강한 삼중결합이 먼저 깨져야하기 때문에 상대적으로 어렵다. 이와 달리, Associative 메커니즘은 N_2 분자 한쪽의 질소 원자가 활성 사이트에 먼저 붙어 진행되는 반응이다. 이 반응경로는 반응 중에 질소의 삼중결합이 단계별로 깨지며, 단계별로 요구되는 에너지가 적기 때문에 상대적으로 쉽게 일어난다. 이러한 Associative 메커니즘은 (2) Associative Distal Pathway와 (3) Associative Alternating Pathway로 나누어진다. Distal 경로는 질소 분자의 한 원자가 활성 사이트에 흡착되고 난 후, 흡착되지 않은 남은 질소 원자에서 먼저 수소이온을 받아 환원되어 암모니아가 생성된다. 이후 흡착된 원자가 수소이온을 받아 환원되어 암모니아가 생성되는 경로이다. Alternating 경로는 흡착된 질소 원소와 흡착되지 않은 질소 원소가 서로 번갈아 수소이온을 받으며 환원되어 암모니아가 생성되는 경로이다. (4) Mars-van Krevelen (MvK) 메커니즘은 주로 전이금속 질산화물 계열에서 진행되며 전기화학적으로 암모니아가 생성될 때 질산화물의 표면에서 질소 원자가 암모니아로 전환되면서 공공이 생기게 된다.

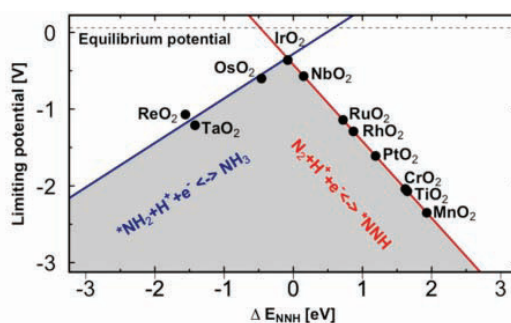


[그림 3] (a) 촉매 표면에서의 질소환원반응 모식도, 전기화학적 질소환원반응의 반응경로; (b) Dissociative pathway와 associative pathway, (c) Mars-van Krevelen mechanism (그림 (a) is reprinted with permission from Copyright 2019 SpringerOpen [4], 그림 (b,c) is reprinted with permission from Copyright 2019 Wiley-VCH GmbH [11])

이러한 공공 자리를 질소 분자가 다시 채우면서 계속적으로 암모니아가 생성되는 반응경로이며, 메커니즘을 명확히 규명하기 위한 연구가 계속해서 진행되고 있다 [11].

2.2 광전기화학적 질소환원반응 촉매

그림 4은 질소환원반응과 수소발생반응의 한계 전위를 금속 산화물별로 표시하여 나타낸 화산 도표(Volcano plot)이다 [12]. 물질별로 질소가 환원되는 과정의 구간별 흡착 에너지를 계산하여 이를 바탕으로 산 모양의 화산 도표를 그릴 수 있으며, 이를 통해 원하는 반응에 적합한 물질군을 확인할 수 있다. 산의 꼭짓점으로 보이는 두 선의 교차점을 기준으로 왼쪽에 위치한 물질들은 흡착된 물질을 강하게 붙잡고 있는 것이며, 오른쪽에 위치한 물질들은 흡착된 물질을 약하게 붙잡고 있는 것이다. 이를 통해 물질에 따른 질소환원반응에 대한 성능을 쉽게 알아볼 수 있으며 질소환원반응에서 선택성(Selectivity)을 높이기 위해 고려해야 하는 수소발생반응에 대한 성능도 함께 고려할 수 있다.



[그림 4] 질소환원반응을 위한 금속 산화물 촉매의 이론 에너지 및 전압값에 대한 화산 도표 (Reprinted with permission from Copyright 2017 American Chemical Society [19])

2.2.1 귀금속 계열 촉매

광전기화학적 질소환원반응의 귀금속 기반 촉매는 Pt, Au, Ag 등이 있다. 이러한 귀금속 촉매는 전도성이 우수할 뿐 아니라 반응 시 쉽게 산화되지 않아 안정성이 높기 때문에 촉매로써 적합한 특성을 가지고 있다. 또한, Au, Ag와 같은 귀금속 나노입자를 반도체 물질과 결합하여 촉매로 활용하면 가시광 영역을 포함한 파장과 공명하는 localized surface plasmon resonance (LSPR)이 발생하여 금속 내

의 전자가 쉽게 여기되어 촉매의 활동도를 높이는 시너지 효과가 발생한다. 이를 기반으로 한 WOF-Au 촉매의 경우 암모니아 수율은 -0.65 V (vs. Ag/AgCl)에서 $9.82\text{ }\mu\text{g h}^{-1}\text{ cm}^{-2}$ 를 보여준다 [13]. $\text{TiO}_2/\text{Au}/\alpha\text{-TiO}_2$ 촉매도 LSPR에 의한 시너지 효과를 통해 성능을 개선하여 $13.4\text{ nmol h}^{-1}\text{ cm}^{-2}$ 의 암모니아 수율을 보여준다 [14]. 현재 귀금속 중 Au가 주로 사용되고 있으나, Pt에 대한 연구도 보고되고 있다. 반도체 물질인 Sb_2S_3 의 표면에 Pt 입자로 개질한 촉매의 경우 밴드갭($1.0\text{--}1.6\text{ eV}$)을 조절하여 빛의 흡수 범위를 최적화함으로써 -0.3 V (vs. Ag/AgCl)에서 $0.5\text{ }\mu\text{mol h}^{-1}\text{ cm}^{-2}$ 의 암모니아 수율을 나타낸다 [5]. 그러나 귀금속은 높은 가격과 희소성으로 이를 대체하기 위한 저가 촉매들에 대한 연구가 지속적으로 보고되고 있다.

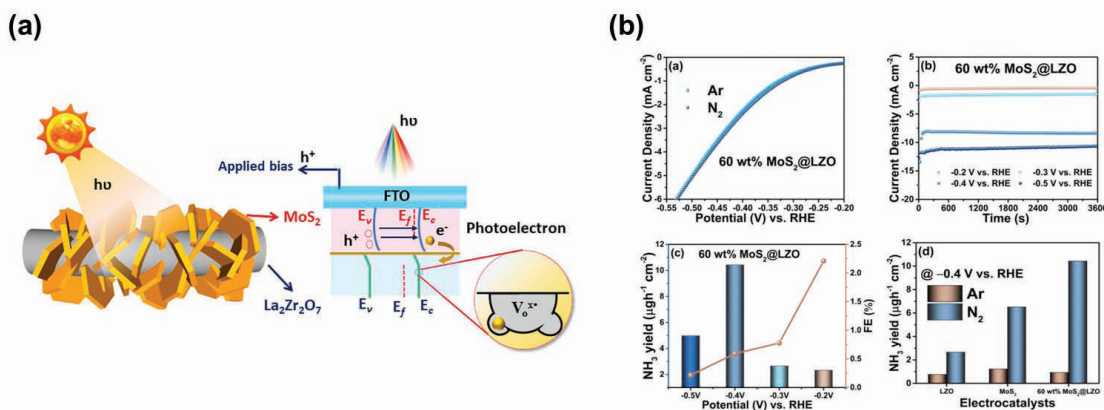
2.2.2 산화물 계열 촉매

산화물 기반 촉매는 대표적으로 TiO_2 , CuO , ZnO , BiVO_4 , BiOI 등이 있다. 산화물 기반 촉매는 귀금속 촉매에 비해 가격이 저렴하고 적절한 밴드 구조로 광촉매에 적합한 성능을 보인다. 이러한 산화물 기반의 반도체 물질 촉매는 일반적으로 p-type 반도체 물질이 사용되는데, 이는 p-type 반도체의 Conduction Band Minimum (CBM)이 질소가 환원되는 전위보다 더 낮은 전위에 있어 질소의 환원을 돕기 때문이다. 이러한 특성을 적용하기 위해 n-type으로 주로 사용되는 BiVO_4 를 p-type으로 개질하여 질소환원반응의 촉매로 활용한 연구도 진행되고 있다. 이러한 p-type BiVO_4 (p- BiVO_4)

의 패러데이 효율과 암모니아 수율은 매우 낮은 전압 구간인 -0.1 V (vs. RHE)에서 16.2% 와 $10^{-8}\text{ mol h}^{-1}\text{ cm}^{-2}$ 를 보여준다 [15]. 그러나 산화물 촉매의 경우 금속 촉매에 비해 전도성이 낮다는 문제가 있다. 이러한 특성을 개선하고자 표면적이 넓고 전도성이 우수한 물질과 결합하여 촉매로 활용되는 연구가 보고되고 있으며, 전도체 물질과 산화물 촉매 간의 이종결합은 전도성을 높일 뿐만 아니라 결합에 따른 시너지 효과를 발현한다.

2.2.3 황화물 및 셀렌화물 계열 촉매

황화물 및 셀렌화물 기반 촉매는 대표적으로 Cu_2S , MoS_2 , MoSe_2 등이 있다. 황화물계 물질 중 대표적인 MoS_2 는 n-type의 반도체 물질이면서 그래핀과 같은 층상 구조로 되어있어 광전기화학적 촉매로서 이점이 많다. 높은 전도도, 넓은 표면적, Mo-S 구조는 자연에서 암모니아를 생성하는 질소고정효소(Nitrogenase)와 비슷하다. 또한 낮은 밴드갭 에너지($1.2\text{--}1.8\text{ eV}$)를 가지고 있어 빛의 파장영역대를 넓게 흡수할 수 있어 광촉매에서 높은 효율을 보여준다. 그러나 MoS_2 는 경쟁반응인 수소발생반응도 수반하고, 빛으로 인해 여기된 전자가 빠른 정공-전자 간 재결합(Recombination)으로 인해 사라지며, 구조적 안정성이 낮다는 문제가 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해 질소나 인을 도핑 또는 결합을 의도적으로 형성하거나 다른 물질과 결합하는 등 다양한 방법을 통한 연구가 진행되고 있다. MoS_2 와 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 를 결합한 $\text{MoS}_2@\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 의 경우 패러데이 효율과 암모니아 수율이 약 2.25% 와 10.4 mg h^{-1}



[그림 5] $\text{MoS}_2@\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 촉매의 (a) 광전기화학적 질소환원반응 모식도 및 (b) 광전기화학적 평가 결과 (Reprinted with permission from Copyright 2022 American Chemical Society [7])

cm^{-2} 로 보고되었다 [7]. 이와 비슷하게 층상 구조를 갖는 셀렌화물 계열인 MoSe_2 도 유사한 장점을 가지고 있다. MoSe_2 와 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 를 결합한 $\text{MoSe}_2@g\text{-C}_3\text{N}_4$ 촉매의 경우 28.91 %의 높은 패러데이 효율과 $7.72 \text{ mg h}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 의 암모니아 수율을 보여주었다 [16].

2.2.4 비금속 기반 촉매

비금속 기반 촉매로는 C_3N_4 , BN, Black phosphorus (BP) 등이 있다. Graphitic carbon nitride ($g\text{-C}_3\text{N}_4$)는 n-type의 반도체로 잘 알려져 있으며, 높은 안정성과 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (2.7 eV)에 비해 좁은 밴드갭 에너지(2.2 eV)를 갖고 있다. 이러한 $g\text{-C}_3\text{N}_5$ 의 질소 자리에 공공(Nitrogen Vacancy)을 더하여 밴드갭을 줄이게 되면 흡수할 수 있는 파장의 범위가 늘어나 광촉매 효율이 높아지게 된다. 이러한 NV- $g\text{-C}_3\text{N}_5$ 를 활용하여 p-type 반도체 물질인 BiOBr과 함께 p-n 이종접합을 하여 NV- $g\text{-C}_3\text{N}_5/\text{BiOBr}$ 촉매를 활용한 연구가 진행되어 11 %의 패러데이

효율과 $29.4 \text{ mg h}^{-1} \text{ mg}_{\text{cat}}^{-1}$ 의 암모니아 수율을 보여준다 [8]. BP는 2D 구조를 가지고 넓은 표면적, 넓은 범위의 파장 흡수율, 많은 반응 사이트와 조절이 가능한 전기적 구조를 가지고 있는 장점이 있다. 또한 경쟁반응인 수소 발생반응과 관련된 표면에서의 수소 흡착을 억제하여, 광전기화학적 질소환원반응의 촉매로써 사용하기에 적합하다. BP의 패러데이 효율과 암모니아 수율은 -0.4 V (vs. RHE)에서 각각 23.3 %와 $102.4 \text{ mg h}^{-1} \text{ mg}_{\text{cat}}^{-1}$ 을 보여준다 [17].

3. 결론

암모니아는 100년이 넘는 긴 시간 동안 우리 생활과 밀접하게 연관되어 사용되고 있는 중요한 화합물로서 기존의 용도 외에 최근 탄소 중립 및 신재생에너지에 대한 이슈로 수소 캐리어로서 각광받고 있다. 이에 친환경적인 암모니아 합성법들이 지속적으로 개발되고 있으

나, 산업에서는 아직 고온·고압의 하버-보쉬법을 통한 암모니아 생산이 주를 이루고 있다. 이를 대체하기 위한 광전기화학적 질소환원반응을 통한 암모니아 합성의 상용화를 앞당기기 위해서는 저렴하고 높은 암모니아 수율과 효율을 갖는 촉매 개발이 필수적이다. 본 총설에서는 광전기화학적 질소환원반응의 주요 메커니즘 및 반응경로와 최근 연구 보고된 촉매들을 귀금속, 산화물, 황화물(셀렌화물)과 비귀금속으로 분류하여 설명하였다. 현재 귀금속 촉매의 경우 높은 효율과 수율을 달성하고 있으나 높은 가격으로 인해 상용화에 어려움이 있다. 이를 해결하고자 저가의 전이금속을 기반으로 한 산화물, 황화물 촉매 또는 비금속 촉매가 주목받고 있으나, 낮은 암모니아 수율과 선택성으로 더 많은 연구가 필요한 실정이다. 촉매의 성능을 개선하기 위해 현재 다양한 촉매들이 연구되고 있고 도핑, 결함, 이중결합, 구조개선, 표면 개질 등의 다양한 시도들이 이루어지고 있으며 계산과 관련된 이론적인 연구도 많이 진행되고 있다. 신재생에너지를 활용한 광전기화학적 질소환원반응은 아직 낮은 패러데이 효율 및 암모니아 수율을 보이고있어 인류의 미래를 위한 탄소중립과 환경문제를 개선하기 위해서 더욱 활발하고 지속적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Ye, T.-N.; Park, S.-W.; Lu, Y.; Li, J.; Sasase, M.; Kitano, M.; Tada, T.; Hosono, H., Vacancy-enabled N₂ activation for ammonia synthesis on an Ni-loaded catalyst. *Nature* **2020**, 583(7816), 391–395.
2. Galloway, J. N.; Cowling, E. B., Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. *AMBIO: A J. of the Human Environment* **2002**, 31(2), 64–71.
3. Janani, G.; Surendran, S.; Choi, H.; Sim, U., Photoelectrochemical Nitrogen Reduction Reaction. In *Photo-and Electro-Catalytic Processes*, **2022**; pp 339–387.
4. John, J.; Lee, D.-K.; Sim, U., Photocatalytic and electrocatalytic approaches towards atmospheric nitrogen reduction to ammonia under ambient conditions. *Nano Convergence* **2019**, 6(1), 15.
5. de Brito, J. F.; Costa, M. B.; Rajeshwar, K.; Mascaro, L. H., Ammonia production from nitrogen under simulated solar irradiation, low overpotential, and mild conditions. *Electrochimica Acta* **2022**, 421, 140475.
6. Jang, Y. J.; Lindberg, A. E.; Lumley, M. A.; Choi, K.-S., Photoelectrochemical Nitrogen Reduction to Ammonia on Cupric and Cuprous Oxide Photocathodes. *ACS Energy Letters* **2020**, 5(6), 1834–1839.
7. Yu, M. S.; Jesudass, S. C.; Surendran, S.; Kim, J. Y.; Sim, U.; Han, M.-K., Synergistic Interaction of MoS₂ Nanoflakes on La₂Zr₂O₇ Nanofibers for Improving Photoelectrochemical Nitrogen Reduction.

- ACS Applied Materials & Interfaces* **2022**,14(28), 31889–31899.
8. Li, M.; Lu, Q.; Liu, M.; Yin, P.; Wu, C.; Li, H.; Zhang, Y.; Yao, S., Photoinduced Charge Separation via the Double–Electron Transfer Mechanism in Nitrogen Vacancies g–C₃N₅/BiOBr for the Photoelectrochemical Nitrogen Reduction, *ACS Applied Materials & Interfaces* **2020**,12(34), 38266–38274.
9. Kim, D.; Alam, K.; Han, M.–K.; Surendran, S.; Lim, J.; Young Kim, J.; Jun Moon, D.; Jeong, G.; Gon Kim, M.; Kwon, G.; Yang, S.; Gon Kang, T.; Kyu Kim, J.; Yeop Jung, S.; Cho, H.; Sim, U., Manipulating wettability of catalytic surface for improving ammonia production from electrochemical nitrogen reduction, *Journal of Colloid and Interface Science* **2023**,633, 53–59.
10. Vu, M.–H.; Sakar, M.; Hassanzadeh–Tabrizi, S. A.; Do, T.–O., Photo(electro) catalytic Nitrogen Fixation: Problems and Possibilities, *Advanced Materials Interfaces* **2019**,6(12), 1900091.
11. Qiao, Z.; Johnson, D.; Djire, A., Challenges and opportunities for nitrogen reduction to ammonia on transitional metal nitrides via Mars–van Krevelen mechanism, *Cell Reports Physical Science* **2021**,2(5), 100438.
12. Höskuldsson, Á. B.; Abghoui, Y.; Gunnarsdóttir, A. B.; Skúlason, E., Computational Screening of Rutile Oxides for Electrochemical Ammonia Formation, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2017**,5(11), 10327–10333.
13. Vu, M.–H.; Nguyen, C.–C.; Do, T.–O., Synergistic Effect of Fe Doping and Plasmonic Au Nanoparticles on W18O49 Nanorods for Enhancing Photoelectrochemical Nitrogen Reduction, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2020**,8(32), 12321–12330.
14. Li, C.; Wang, T.; Zhao, Z.–J.; Yang, W.; Li, J.–F.; Li, A.; Yang, Z.; Ozin, G. A.; Gong, J., Promoted Fixation of Molecular Nitrogen with Surface Oxygen Vacancies on Plasmon–Enhanced TiO₂ Photoelectrodes, *Angewandte Chemie International Edition* **2018**,57(19), 5278–5282.
15. Bai, Y.; Lu, J.; Bai, H.; Fang, Z.; Wang, F.; Liu, Y.; Sun, D.; Luo, B.; Fan, W.; Shi, W., Understanding the key role of vanadium in p–type BiVO₄ for photoelectrochemical N₂ fixation, *Chemical Engineering Journal* **2021**,414, 128773.
16. Mushtaq, M. A.; Arif, M.; Fang, X.; Yasin, G.; Ye, W.; Basharat, M.; Zhou, B.; Yang, S.; Ji, S.; Yan, D., Photoelectrochemical reduction of N₂ to NH₃ under ambient conditions through

hierarchical MoSe₂@g-C₃N₄ heterojunctions. *Journal of Materials Chemistry A* **2021**,9(5), 2742–2753.

17. Liu, D.; Wang, J.; Bian, S.; Liu, Q.; Gao, Y.; Wang, X.; Chu, P. K.; Yu,

X. -F., Photoelectrochemical Synthesis of Ammonia with Black Phosphorus. *Advanced Functional Materials* **2020**,30(24), 2002731.

••최 진 욱••



2019년 조선대학교 신소재공학과 학사
2021년 한양대학교 신소재공학과 석사
2022년 포항산업과학연구원(RIST) 초빙연구원
2023년-현재 한국에너지공과대학교 (KENTECH) 수소에너지트랙 박사과정

••박 태 언••



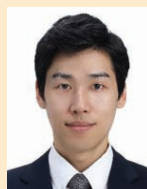
2005년 조선대학교 금속재료공학과 박사
2007년 조선대학교 금속재료공학과 연구교수
2009년 조선대학교 금속재료공학과 초빙객원교수
2023년-현재 한국에너지공과대학교 (KENTECH) 수소에너지트랙 연구교수

••윤 영 훈••



2001년 한양대학교 세라믹공학과 박사
2004년 한양대학교 연구교수
2006년 동신대학교 수소에너지학과 교수
2007년-현재 동신대학교대학원 에너지공학과 교수
2017년-현재 동신대학교 신재생에너지학과 교수
2023년-현재 동신대학교 에너지리사이클링학과

••심 욱••



2016년 서울대학교 재료공학부 박사
2016년 삼성전기 책임연구원
2016년 스탠퍼드대학교 박사후과정 연구원
2017년 전남대학교 신소재공학부 조교수/부교수
2022년-현재 한국에너지공과대학교 (KENTECH) 수소에너지트랙 부교수

폐기되는 용액 공정 유기 기반 태양전지의 재활용을 위한 기술

손 해 정 (한국과학기술연구원 차세대태양전지연구센터 책임연구원)

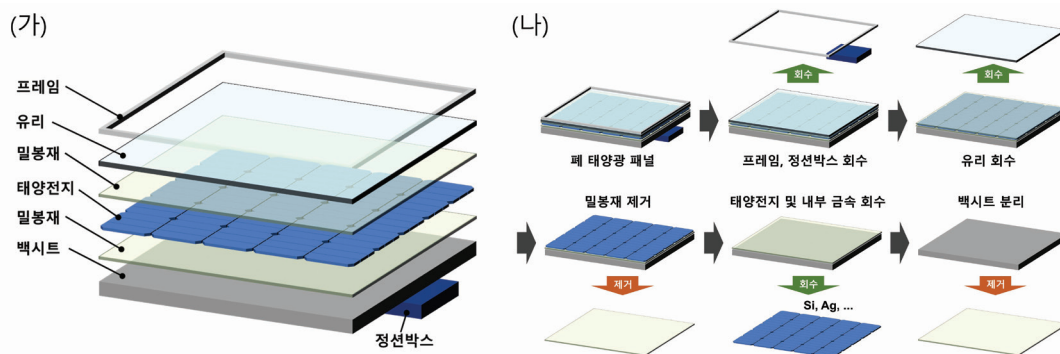
윤 성 원 (한국과학기술연구원 박사후연구원)

서론

태양광은 안전하면서도 무한한 신재생 에너지원으로 오래전부터 인식되어왔다.¹ 태양전지는 이러한 태양광을 전력으로 변환할 수 있는 장치로, 대표적으로 실리콘을 비롯하여 구리-인듐-갈륨-셀레늄 (CIGS), 구리-아연-주석-황(CZTS) 등 다양한 무기 반도체를 광활성층으로 사용하여 제작할 수 있는데, 이러한 태양전지는 계산기, 장난감 등 소형 기기부터 전기 자동차, 건물 일체형 태양광 발전 시스템 (building-integrated photovoltaic, BIPV) 등

에 포함되는 태양광 패널 등 다양한 분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 이러한 태양광 에너지는 각국의 탈탄소 및 친환경 에너지 정책에 부응하여 최근 투자가 급격히 증가하였는데,² 국제에너지기구(IEA)의 발표에 따르면, 세계 태양광 발전 용량은 2010년에는 4만 MW에 불과했지만 2025년에는 151만 MW 이상으로 성장할 것으로 전망했다.

태양광 패널의 수요가 급증하는 만큼, 폐기되는 태양광 패널의 처리 또한 최근 중요한 이슈로 부상하고 있다. 국제재생에너지기구(IRENA)의 발표에 따르면 세계 태양광 폐패



[그림 1] (가) 일반적인 무기 태양광 패널의 구조와 (나) 폐 태양광 패널의 회수 절차

널의 누적 배출량 규모는 2016년 최대 25만 톤 규모에서 2030년에는 최대 800만 톤 규모로 증가하고, 2050년에는 최대 7,800만 톤 규모가 될 것으로 전망하고 있다.³ 폐기되는 실리콘 태양광 패널에서 각 부분의 회수는 그림 1(나)와 같은 순서로 진행되는데, 현재로서는 별도의 공정 없이 분리가 가능한 프레임과 정선박스를 제외하고는 온전한 형태로 분리하기 어려워, 각 층을 온전하고 순도 높은 상태로 분리해내기 위한 연구를 진행하고 있다.

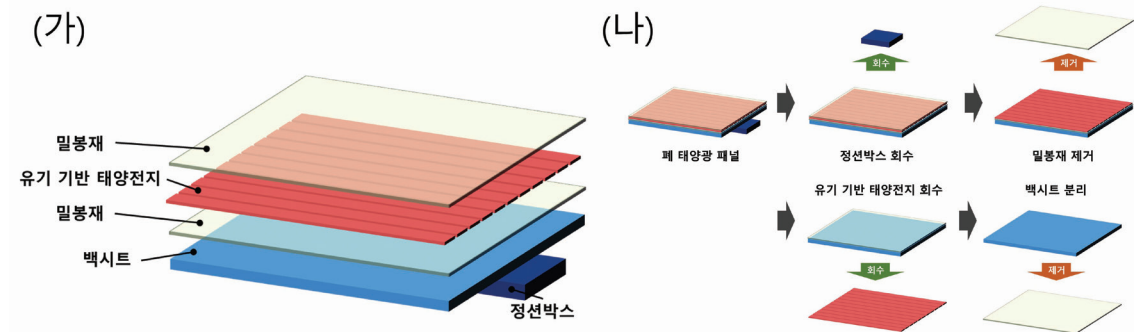
한편, 유기 태양전지, 유·무기 하이브리드 페로브스카이트 태양전지와 같은 유기 기반 태양전지는 위의 무기 반도체 대신 유기 기반 반도체를 광활성층으로 이용한 태양전지로, 현재 소면적 소자 기준 유기 태양전지는 약 20%,⁴ 페로브스카이트 태양전지는 26% 이상의 효율이 보고되고 있다.⁵ 이러한 유기 기반 반도체는 상술한 결정형 무기 반도체와 비교하여 1) 용액 공정으로 제작이 가능하고, 2) 수 십~수 백 nm 수준의 훨씬 얇은 두께로도 태양광을 더 효율적으로 흡수할 수 있기 때문에, 유기 기반 태양전지는 무기 태양전지와는 달리 연속 인

쇄공정을 통해 대량 생산이 가능하고 가벼운 이점을 가진다. 이러한 강점들에 힘입어, 유기 기반 태양전지는 최근 웨어러블 장치, 로봇, 전기 자동차, 넷-제로 건물 등에 적용될 차세대 독립 에너지원으로 각광받고 있다.

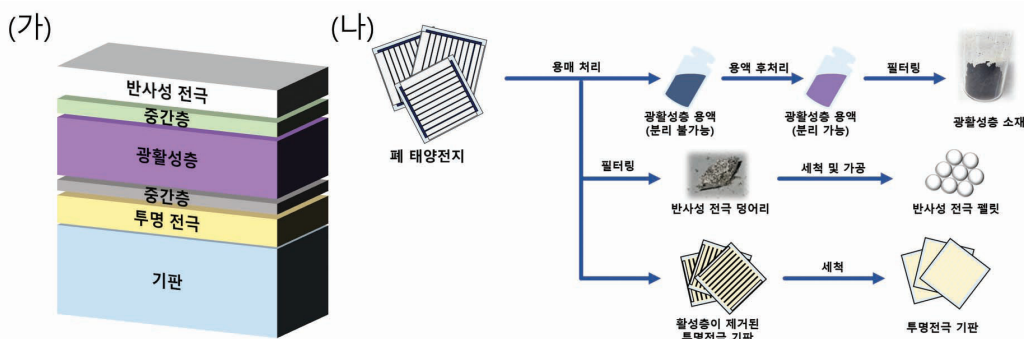
이러한 유기 기반 태양전지를 기반으로 한 태양광 패널은 현재 한화 큐셀을 비롯하여 Heliatek, InfinityPV 등의 소수 기업에서만 제조하는 상용화 초기 단계이지만, 상술한 버려지는 태양광 패널은 시간이 지남에 따라 필연적으로 발생할 수밖에 없다고 할 수 있다. 그러나 버려지는 유기 기반 태양전지의 회수 및 재활용 프로세스는 현재까지 연구가 거의 진행되지 않은 실정이다. 이에 본 지상초대석에서는 용액 공정 유기 기반 태양전지를 재활용하기 위한 기술들을 소개하고자 한다.

본론

현재 상용화된 유기 기반 태양광 패널의 구조(그림 2(가))와 상기 폐 태양광 패널의 회수 절차를 함께 고려하면, 폐 유기 기반 태양광 패널



[그림 2] (가) 유기 기반 태양광 패널의 구조와 (나) 폐 태양광 패널의 회수 절차



[그림 3] (가) 일반적인 유기 기반 태양전지의 구조와 (나) 폐 유기 기반 태양전지의 재활용 절차

의 재활용은 아래의 그림 2(나)와 같이 진행할 수 있다.

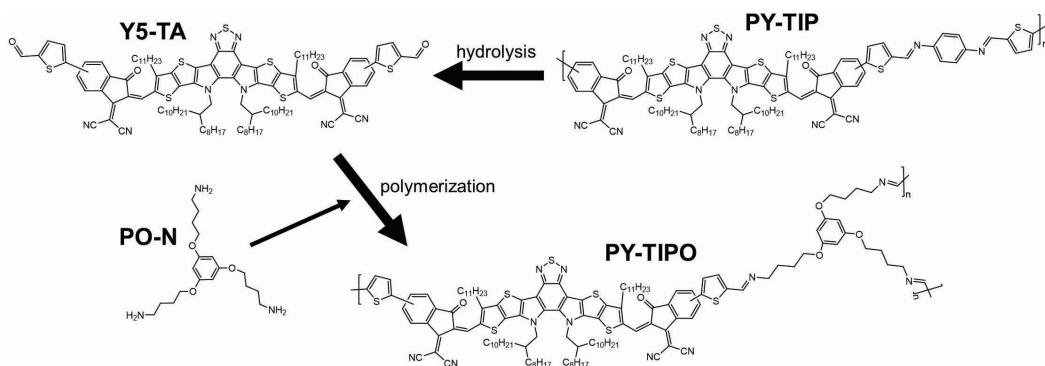
그림에서 보이는 바와 같이, 전체적인 절차는 무기 태양광 패널의 회수 과정과 거의 비슷하지만, 유기 기반 태양전지는 용액 공정을 이용하여 제작할 수 있기 때문에, 마찬가지로 용액 공정을 이용하여 구성 요소들을 회수할 수 있다. 유기 기반 태양전지 재활용은 그림 3(나)와 같이 진행된다.

위의 그림 3(나) 회수 절차를 요약하면 광활성층을 회수하여 재활용하는 절차와 전극 및 기판을 회수하여 재활용하는 절차로 나뉘어짐

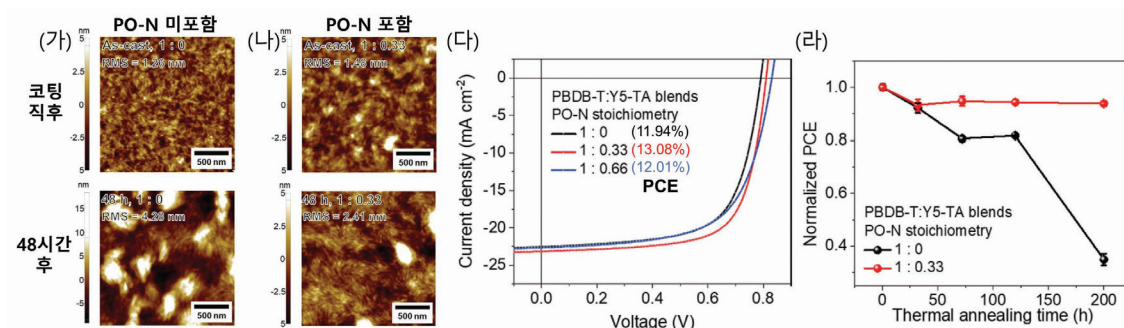
을 알 수 있다.

1. 광활성층의 재활용 방법 및 효과

유기 기반 태양전지의 광활성층은 용매를 이용해 용해하여 회수할 수 있다. 유기 태양전지의 경우, 최근 보고되는 고성능 유기 태양전지의 광활성층은 1)고분자 전자 주개/단분자 전자 받개로 구성되거나 2)고분자 전자 주개/고분자 전자 받개로 구성되는 경우가 많다. 이중 1)의 경우에는 고분자와 단분자 사이에 분자량 차이가 크기 때문에 실리카 겔 필터를 이용하여 두 성분을 분리하여 회수할 수 있지만,



[그림 4] 단분자로 회수가 가능한 고분자 전자 받개 소재의 반응 경로⁶



[그림 5] PO-N 포함 유무에 따른 (가,나) PBDB-T:Y5-TA 박막의 열처리에 따른 모폴로지 변화 (130°C, 48시간), (다) 유기 태양전지의 전류 밀도 - 전압 특성, (라) 유기 태양전지의 열처리 시간에 따른 성능 변화 (130°C)⁶

2)의 경우에는 일반적인 방법으로는 분리해내기 어렵다. 이러한 유기 광활성층을 구성하는 두 소재를 효과적으로 분리하기 위해, 한 연구에서는 아래의 그림 4와 같이 특정 조건을 적용하면 단분자로 분리할 수 있는 고분자 전자 받개(PY-TIP)를 합성하였다.⁶

합성한 고분자에 산 처리를 진행하면 가수분해 반응을 통해 PY-TIP 고분자가 단분자(Y5-TA)로 분해되는데, 분해 후 필터링을 통해 고분자 전자 주개 소재와 분해로 얻은 단분자를 각각 회수할 수 있게 된다.

고분자 분해를 통해 얻은 단위체(Y5-TA)는 그대로 재활용할 수도 있지만 여러 다른 구조의 단위체와 함께 합성을 진행하여 다양한 특성의 새로운 고분자 소재를 얻는 재활용(upcycling)에 사용할 수도 있다. 유기 태양전지의 경우, 열을 가하면 열역학적으로 안정해지기 위해 광활성층의 모폴로지가 변화하고, 이에 따라 소자의 성능이 변화하는데, 네트워크 형태의 고분자를 광활성층에 적용하면 이러한 모폴로지의 변화를 억제할 수 있어, 열에 보다 안정적인 광활성층을 형성할 수 있다.⁷ 상

기 연구에서는 고분자를 단분자로 분해하는 데에서 더 나아가, 형성한 단분자와 반응하여 네트워크 형태의 고분자를 형성할 수 있는 단위체(PO-N)를 사용하여 네트워크 형태의 고분자인 PY-TIPO를 합성하였다. 그림 5(가,나)를 보면, 48시간 동안 섭씨 130도로 가열한 후 고분자 전자 주개(PBDB-T)와 Y5-TA를 혼합한 박막의 모폴로지를 확인한 결과, PO-N을 포함하지 않은 경우에 비해 PO-N을 포함한 경우 열처리에 따른 모폴로지의 변화가 적는데, 이는 박막에 존재하는 Y5-TA와 반응하여 네트워크 형태의 고분자를 형성하기 때문이다. 그림 5(다,라)에서 확인할 수 있는 바와 같이, 광활성층에 적정량의 PO-N을 첨가하여 소자의 성능은 오히려 증가하면서도 열에 대한 소자의 성능 안정성은 비약적으로 향상함을 확인할 수 있다.

유·무기 하이브리드 페로브스카이트 태양전지의 경우, 유기 태양전지와는 달리 광활성층이 단일 소재로 구성되어있지만, 박막 용해 과정에서 구성 원소들이 이온화되기 때문에, 재사용하기 위해서는 이온을 전구체 소재로 변환

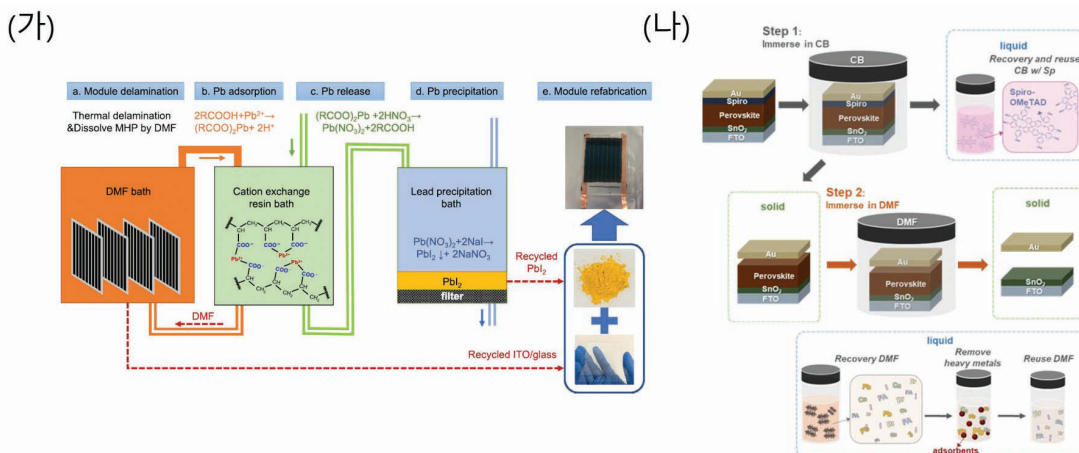


그림 6. (가) 이온 교환 수지를 이용하여 유·무기 하이브리드 페로브스카이트로부터 납 이온을 추출하여 재활용하는 과정,⁸
(나) 두 용매를 사용하여 페로브스카이트 태양전지의 광활성층과 중간층을 모두 재활용하는 과정⁹

하는 과정이 필요하다. 한 연구에서는 페로브스카이트에 포함되는 원소 중 납 이온 (Pb^{2+})을 이온 교환 수지를 이용하여 광활성층을 용해한 용액으로부터 흡착하여 회수하고, 다른 용매에 방출한 후 침전 반응을 일으켜 페로브스카이트의 전구체 소재 중 하나인 요오드화 납 (PbI_2)을 확보하는 방법을 보고하였다 (그림 6(가)).⁸ 해당 방식을 적용하면 광활성층 용액에 포함된 납 이온의 99% 이상을 요오드화 납으로 전환하여 재사용할 수 있게 되므로, 소재의 재활용 이외에도 중금속 배출에 따른 환경 오염도 상당 부분 방지할 수 있다. 그러나 해당 방식으로는 중간층을 따로 회수하기 어렵는데, 중간층과 납 이온을 모두 회수할 수 있는 후술할 방법이 최근 보고되었다 (그림 6(나)).⁹

2. 중간층과 전극의 재활용 방법

중간층은 소자 구조에서 전극과 광활성층 사이에 위치하는데, 광활성층에서 태양광을 받아

형성된 전하 운반자들을 전극까지 전달하는 것을 돕거나 전극에서 광활성층으로 주입되는 전하 운반자를 막는 층이다. 이러한 중간층은 소재에 따라 일반적인 광활성층의 두께인 수 백 nm 수준보다 얇은, 수 nm에서 수십 nm 수준의 두께를 가지기 때문에 일반적으로는 광활성층을 용해하는 동안 손상되기 쉽다. 이를 방지하기 위해서는 1) 광활성층 용해 과정에서 손상되지 않는 중간층을 사용하거나, 2) 광활성층을 용해하기 전에 중간층을 선택적으로 용해할 수 있는 프로세스를 적용하여 중간층을 먼저 회수하는 방법이 있다. 전자의 경우, 산화 아연(ZnO)이나 산화 주석(SnO_2)과 같은 금속 산화물 박막을 졸-겔 반응을 이용하여 형성하거나 나노 입자를 소결(sintering)하여 형성한다면 광활성층 용해 과정에서 중간층이 손상되지 않게 유지할 수 있다. 후자의 경우는 광활성층을 용해하기 전에 중간층을 선택적으로 용해시킬 수 있는 용매로 중간층을 먼저 분리하여, 결

과적으로 중간층과 광활성층을 모두 회수할 수 있는 방법이다. 그림 6(나)에서와 같이, 광활성층에는 영향을 주지 않고 중간층만 용해할 수 있는 용매인 클로로벤젠을 이용하여 중간층을 먼저 분리하고 이를 추후 다방면으로 재활용할 수 있기 때문에, 소재의 재활용 측면에서 전자에 비해 더 자유롭다고 할 수 있다. 또한, 특정 소재 또는 공정 방법만 가능한 전자와 달리 적합한 용매만 찾을 수 있다면 소자의 성능 향상을 위해 더 자유롭게 중간층을 설계할 수 있는 장점도 있다.

유기 기반 태양전지의 전극은 일반적으로 기판 위에 위치한 하부 투명전극과 상부 금속 전극으로 구성되는데, 상부 전극인 금속 전극층의 두께는 약 100 nm 수준으로, 광활성층이나 중간층 용해 과정에서 박리되어 해당 용액과 혼합한 상태로 존재하게 된다. 해당 용액을 필터링한 후, 세척과 가공 과정을 거치게 되면 고순도의 금속 전극을 확보할 수 있다. 비록 실험실 수준의 소형 유기 기반 태양전지에서는 적은 양이 회수되지만, 추후 대형 유기 기반 태양광 패널로부터 회수한다면 재사용이 가능할 정도로 상당한 양을 회수할 수 있을 것으로 예상된다. 하부 투명 전극의 경우 주로 인듐 주석 산화물 (indium tin oxide, ITO)이나 불소가 도핑된 산화 주석 (fluorine-doped tin oxide, FTO)이 사용되는데, 해당 전극은 용매를 이용한 광활성층이나 중간층의 용해 등과 같은 일반적인 유기 기반 태양전지의 회수 공정으로는 손상되지 않고 재사용이 가능하기 때문에, 유기 기반 태양전지의 재활용에 적합한 전극이라고 할 수 있다.

맺음말

최근 여러 국가에서 탄소중립을 위한 탈탄소 및 친환경 정책이 대두됨에 따라 탄소가 발생하지 않는 신재생 에너지원인 태양광을 이용한 발전이 주목을 받기 시작했고, 유기 태양전지나 유·무기 하이브리드 페로브스카이트 태양전지와 같은 유기 기반 태양전지는 여러 장점과 더불어 최근 높은 성능까지 보고되기 시작하여 차세대 태양전지 형태로 특히 이목을 끌고 있다. 이와 더불어, 수십 년 전부터 사용되기 시작한 무기 태양광 패널 중 수명을 다하고 폐기되는 패널이 해가 갈수록 증가할 것으로 예측되어, 이에 대한 효과적인 처리 방안이 필요한 상황이라고 할 수 있다. 이러한 상황은 유기 기반 태양광 패널이 상용화된 후에도 발생할 것이 자명하므로, 본 지상초대석에서는 이에 대해 폐기되는 유기 기반 태양광 패널을 재활용할 수 있는 연구 결과들을 소개하였다. 비록 현재 유기 기반 태양광 패널이 상용화 초기 단계이고, 이를 재활용할 수 있는 기술은 연구 초기 단계이지만, 무기 태양광 패널에서의 재활용 사례를 거울삼아 연구를 계속해서 진행한다면 유기 기반 태양광 패널이 상용화된 후 버려지는 태양광 패널의 재활용에 대한 부담이 무기 태양광 패널에 비해 상당 부분 완화될 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Nayak, P. K.; Mahesh, S.; Snaith, H. J.; Cahen, D., Photovoltaic solar cell technolo-

- gies: analysing the state of the art. *Nat. Rev. Mater.* **2019**, 4, 269.
2. 정인수, ASTI market insight 2022 [태양광 패널 재활용], **2022**.
 3. 지식산업정보원, 폐자원 산업별 리사이클링 R&D 분석. **2023**.
 4. Zhu, L.; Zhang, M.; Xu, J.; Li, C.; Yan, J.; Zhou, G.; Zhong, W.; Hao, T.; Song, J.; Xue, X.; Zhou, Z.; Zheng, R.; Zhu, H.; Chen, C.-C.; MacKenzie, R. C. I.; Zou, Y.; Nelson, J.; Zhang, Y.; Sun, Y.; Liu, F., Single-junction organic solar cells with over 19% efficiency enabled by a refined double-fibril network morphology. *Nat. Mater.* **2022**, 21, 656.
 5. NREL Cell Efficiency Chart (<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>)
 6. Jin, H.; Kim, K.; Park, S.; Rhee, J.H.; Ahn, H.; Kim, D. J.; Kim, K.; Noh, J. H.; Kim, T.-S.; Shin, E.-Y.; Son, H. J., Chemically recyclable conjugated polymer and one-shot preparation of thermally stable and efficient bulk-heterojunction from recycled monomer. *Adv. Funct. Mater.* **2023**, 2304930 (DOI: 10.1002/adfm.202304930).
 7. Park, S.; Kim, T.; Yoon, S.; Koh, C. W.; Woo, H. W.; Son, H. J., Progress in materials, solution processes, and long-term stability for large-area organic photovoltaics. *Adv. Mater.* **2020**, 32(51), 2002217.
 8. Chen, B.; Fei, C.; Chen, S.; Gu, H.; Xiao, X.; Huang, J., Recycling lead and transparent conductors from perovskite solar modules. *Nat. Commun.* **2021**, 12, 5859.
 9. Kim, H. J.; Gong, O. Y.; Kim, Y. J.; Yoon, G. W.; Han, G. S.; Shin, H.; Jung, H. S., Environmentally viable solvent management in perovskite solar cell recycling process. *ACS Energy Lett.* **2023**, 8(10), 4330.

••손 해 정••



2000 성균관대학교 화학과 (학사)
 2002 한국과학기술원 화학과 (석사)
 2002-2004 삼성종합기술원 연구원
 2005-2012 시카고대학교 (박사 및 Post-Doc.)
 2012-현 재 한국과학기술연구원
 선임/책임연구원
 2019-현 재 KU-KIST 에너지환경대학원 교수

••윤 성 원••



2015 중앙대학교 화학신소재공학부 (학사)
 2017 중앙대학교 화학신소재공학과 (석사)
 2020 대구경북과학기술원
 에너지공학전공 (박사)
 2020-현재 한국과학기술연구원 박사후연구원

3D 프린팅 기반 경사기능재료 (Functionally Graded Materials)

조수영, 조정호 (연세대학교 화공생명공학과)

서론

무더운 여름을 지나 가을이 오면 우리 주변에서 솔방울을 쉽게 발견할 수 있다. 솔방울은 소나무 열매의 송이로, 씨앗을 보호하기 위해 높은 습도 환경에서는 오므라들어 있다가 습도가 낮은 최적의 환경이 갖추어지면 비늘들이 활짝 퍼지며 씨앗을 퍼뜨릴 수 있는 독특한 특징을 갖고 있다.¹ 어떻게 이 작은 솔방울이 습도에 반응하여 움직일 수 있는 것일까? 솔방울의 비늘은 계층 구조로 이루어져 있고 각 층은 서로 다른 크기의 기공으로 구성되어 있다.² 이에 따라 층마다 습도에 반응하여 팽창하는 정도가 달라지게 되며, 외부 습도에 따라 비늘이 솔방울 중심으로 오므러지거나 바깥으로 퍼질 수 있는 것이다.³ 이처럼 하나의 물체 내에 서로 다른 구조를 가지며 발현하는 특성도 달라지는 현상은 솔방울뿐만 아니라 우리 몸을 구성하는 뼈에서도 발견할 수 있다. 뼈는 구조적으로 치밀뼈(compact bone)와 해면질뼈(sponge bone)로 구성되어 있다. 치밀뼈는 낮은 공극률과 높은 밀도를 갖고 있어 높은 응력에서도 견딜 수 있으며, 해면질뼈는 치밀뼈에 비해 상대적으로 높은 공극률과 낮은 밀도를

갖고 있어 낮은 응력을 견딜 수 있지만 파단 전 변형률이 치밀뼈보다 훨씬 높다.⁴ 이러한 구조 덕분에 뼈는 강한 힘에 견딜 수 있는 견고함을 가지면서 충격 흡수도 가능하여 다양한 기계적 성능을 동시에 갖는 조직이 될 수 있는 것이다. 이러한 생물학적 특성을 모방하여 기존의 단일 재료의 한계를 극복하기 위한 신기술로 경사기능재료(functionally graded materials)가 제안되었다.

“경사기능재료”의 개념은 초음속 항공기의 방열재를 연구하던 일본 학자들(M. Niino *et al.*)에 의해 1987년에 처음 소개되었다.⁵ 경사기능재료는 하나의 구조체 내에 재료의 조성 및 특성을 연속적으로 변화시켜, 국부적으로 맞춤형 특성을 갖는 새로운 복합 재료를 일컫는다. 이러한 구조는 재료의 불연속성으로 인한 박리 및 크랙 현상을 극소화할 뿐만 아니라, 용도에 따라 다중기능성(multifunctional properties) 확보까지 가능하게 한다. 이처럼 다양한 특성을 동시에 갖는 경사기능재료는 맞춤형 다기능 특성을 구현할 수 있는 재료로써 항공우주공학, 소프트로봇공학, 도시공학, 의공학 등 광범위한 응용 분야에 활용되고 있다.⁶ 적층 제조(additive manufacturing)로도 불리는

“3D 프린팅”은 첨단 제조 시스템의 혁신을 위한 신기술로 주목받으며 최근 몇 년 동안 급격한 발전을 이루었고, 맞춤형 부품을 설계하고 제조할 수 있는 기술로서 경사기능재료를 접목할 수 있게 되면서 경사기능성 적층제조(functionally graded additive manufacturing)라는 용어가 등장하게 되었다.⁷ 경사기능성 적층제조에서는 사용하고자 하는 소재와 응용 분야에 따라 3D 프린팅 공정기술을 선택하고, 구조체의 밀도를 변화시키거나 조성비를 점진적으로 바꾸어가며 경사기능재료를 제조할 수 있다.

본 지상초대석에서는 3D 프린팅 기술을 통해 경사기능재료를 제조하는 원리와 응용에 초점을 맞추어, 이 경사기능재료를 3D 프린팅에 적용하기 위해 진행된 최근 연구들을 소개하고자 한다.

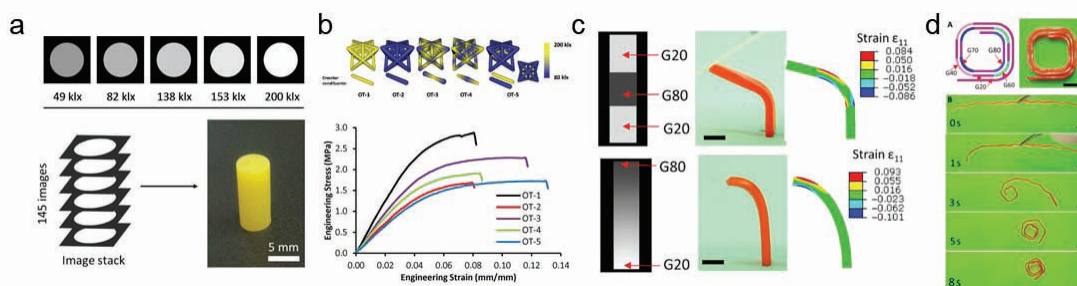
본론

우리는 경사기능재료를 제조하는 3D 프린팅 기술의 종류를 기준으로 다음과 같이 분류하여 소개하고자 한다: (1) 광중합 방식 (Vat-

polymerization), (2) 소재 분사 방식 (Material Jetting), (3) 용융 적층 모델링 방식 (Fused Deposition Modeling), (4) 분말 베드 용융 방식 (Powder Bed Fusion), (5) 바인더 분사 방식 (Binder Jetting). 3D 프린팅 기술의 종류에 따라 적용되는 적층 원리가 다르므로, 경사기능재료를 제조하기 위하여 적층 파라미터 등을 제어하거나 특수한 구조체를 설계하는 연구가 진행되어왔다.

1. 광중합 방식 (Vat-polymerization)

광중합 방식은 하나의 광경화성 수지 레이어(liquid photosensitive resin layer)에 픽셀 단위의 극자외선(UV light)을 조사하여 경화시키는 과정을 반복해나가며 최종산물을 제작한다. 이러한 방식에는 대표적으로 DLP 방식(Digital Light Processing)이 있으며, 주로 광원을 제어하여 경사기능재료를 제조하는 방법이 연구되어 왔다 (그림 1-a,b). 프린팅하는 과정에서 회색조 형태로 빛의 세기(gray-scale light intensity)를 조절하여 레이어를 경화시키면, 약한 세기의 빛을 조사한 부분에는 낮은 경화도를 갖게



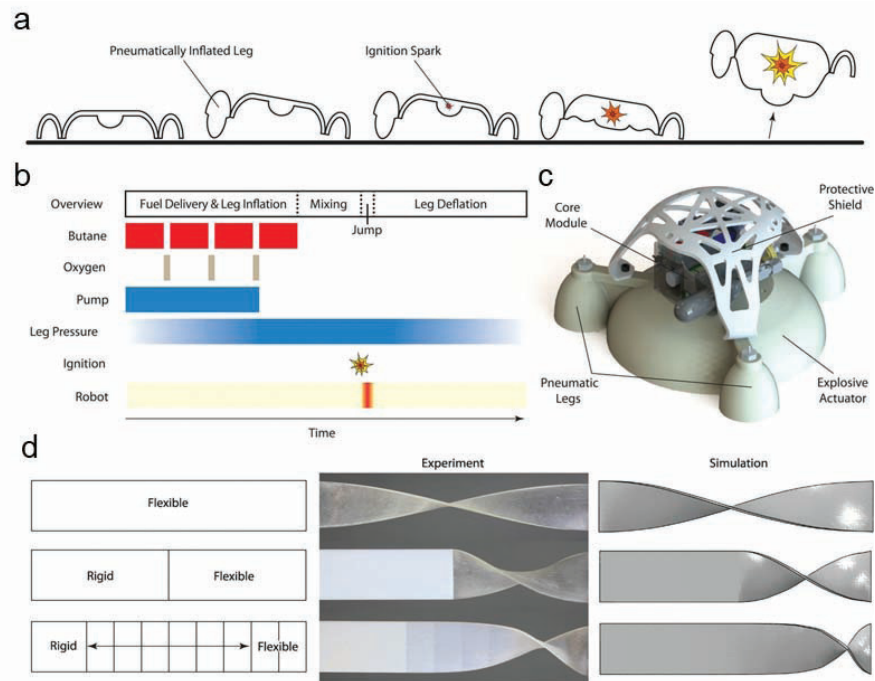
[그림 1] a,b 광중합 방식(Vat-polymerization)을 통해 제조한 경사기능재료 (ACS Appl. Mater. Interfaces, 2016, 8, 29037-29043). c,d 광중합 방식을 통해 제조한 경사기능재료 기반 소프트 액추에이터 (Sci. Adv. 2019, 5, eaav5790).

되고 강한 세기의 빛을 조사한 부분에는 높은 경화도를 갖게 된다.⁸ 이렇게 하나의 재료 내에서 서로 다른 경화도를 갖게 되면, 국부적으로 서로 다른 기계적 강도 특성을 가지게 된다. 높은 경화도의 양 끝단과 낮은 경화도의 중심부를 갖는 불연속적인 구조를 갖는 재료의 경우, 상단에서 하중을 가하게 되면 중심부만 구부러지는 특성을 갖게 된다. 반면, 연속적인 경사 기능 구조를 갖는 재료는 하중이 가해진 지점에 대하여 연속적으로 변하는 곡률을 가지며 구부러지게 된다.

이러한 방법은 단순한 구조체의 3D 프린팅을 넘어서 형상 기억 고분자 프린팅에도 응용할 수 있다 (그림 1-c,d).⁹ 예를 들어, 모서리 부분이 외부 온도 자극에 대해 서로 다르게 반응

하여 접히도록 프로그래밍하면 유리 전이 온도의 조절이 가능한 광경화성 수지를 사용하여 나선형 구조체를 제작할 수 있다. 모서리 부분이 온도 자극에 반응하여 순차적으로 접힐 수 있도록 20%에서 80% 사이의 서로 다른 회색조의 빛을 조사하고, 변형 없이 형태가 유지되어야 하는 평면 부분에는 20%의 회색조의 빛을 조사하여 구조체를 제작한다. 구조체를 일정 온도에서 가열하여 직선의 형태로 만든 다음, 얼음물에 담가 식히는 과정을 통해 직선 형태를 고정할 수 있다. 이후에 이전 온도로 다시 가열하면 구조체는 모서리가 순차적으로 접히면서 나선형 모양으로 되돌아갈 수 있게 된다.

2. 소재 분사 방식 (Material Jetting)



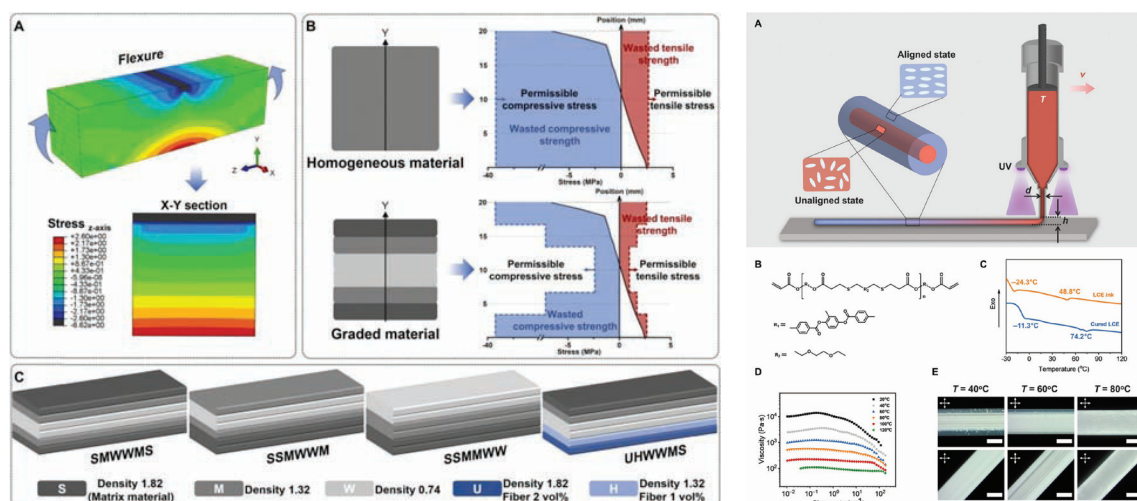
[그림 2] 소재 분사 방식(Material Jetting) 방식으로 제조된 경사기능재료 기반 소프트 로봇. (Science 2015, 349, 161–165)

앞서 언급된 광중합 방식과는 조금 다르게, 소재 분사 방식은 액상 광중합체를 하나의 레이어로 선택적으로 쌓은 후 열원 혹은 극자외선(UV light)을 이용하여 경화시키는 과정을 반복하며 최종산물을 얻게 된다. 이 방식은 여러 개의 사출 헤드를 사용 가능하여 다양한 소재로 연속적인 조성 및 특성을 갖는 경사기능 재료를 제조할 수 있다. 대표적인 예로, 소프트 로보틱스 분야에서 기계적 특성의 경사분포를 제어하여 기계적 성능을 극대화하려는 연구가 진행되어왔다 (그림 2).¹⁰ 해당 연구의 소프트 로봇의 본체는 두 개의 반구가 겹친 구조로 이루어져 있는데, 본체의 하단 반구 구조체는 유연한 기계적 특성을 갖도록 설계하여 본체 내부 가스가 점화된 후 부피 팽창을 통한 발사 추진력을 얻을 수 있다. 반면 상단 반구 구조체는 고무와 같이 유연성을 갖는 구성 요소에서 열가소성 플라스틱처럼 단단한 기계적 특성

을 갖는 구성 요소로 연속적으로 전환되는 경사 구조를 갖도록 설계한다. 이와 같은 설계는 불필요한 팽창 현상을 국부적으로 제어하며 연소 에너지를 지면으로 집중시켜 발사 추진 효율을 높일 수 있다. 또한, 서로 다른 기계적 특성을 갖는 구성 요소들의 연속적인 전환은 구조체의 기계적 성능 저하를 방지할 수 있게 된다. 이러한 결과를 바탕으로 경사기능재료 설계를 통한 소프트 로봇 제작은 효과적인 에너지 전환 능력과 우수한 기계적 성능 및 구동 성능 모두 확보 가능하다는 것을 알 수 있다.

3. 소재 압출 방식 (Material Extrusion)

소재 압출 방식은 단일 혹은 여러 개의 압출기(extruder)를 통해 소재 페이스트를 압출하여 하나의 레이어를 형성하는 과정을 반복하며 적층해나가는 기술이다. 비교적 공정이 단순하고 페이스트 형태로 제조가 가능한 소재라면



[그림 3] a 소재 압출 방식(Material Extrusion)으로 제조된 시멘트 복합재 (Addit. Manuf. 2020, 56, 102911). b DIW 방식으로 제조된 액정 엘라스토머 (Sci. Adv. 2020, 6, eabc0034)

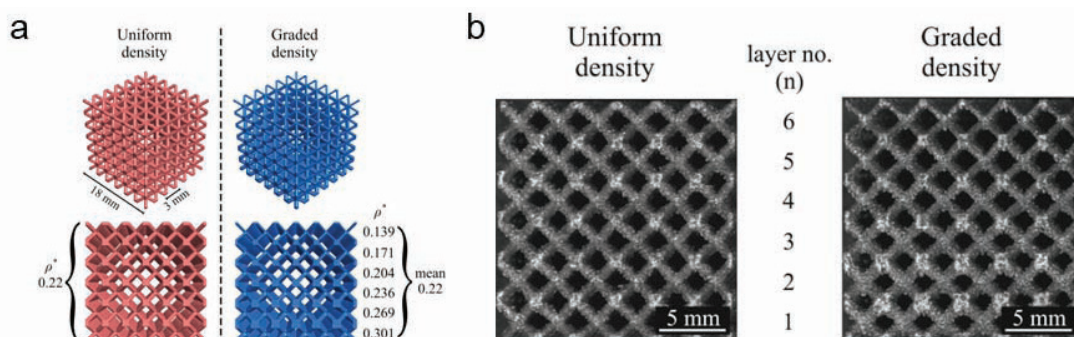
적용이 가능한 프린팅 방식이어서 다양한 분야에 걸쳐 연구가 진행되고 있는데, 그중에서도 경사기능재료를 적용한 하나의 예로 3D 콘크리트 프린팅이 있다 (그림 3-a).¹¹ 공극과 섬유 보강재의 경사분포를 제어한 라멜라 구조(lamellar structure)를 사용하면, 기존 방식으로 제조한 시멘트 복합소재보다 적은 양의 보강재를 사용하며 가벼운 무게와 우수한 기계적 성능을 동시에 확보할 수 있다. 기존 주조 방식을 사용한 시멘트 복합재는 토목 공학적인 관점에서 균질한 기계적 강도를 갖고 있다. 이러한 구조는 굴곡시험(flexure test)에서 최대 인장 응력을 하단 부분이 집중적으로 받게 되고, 내부는 응력을 거의 받지 않게 되므로 재료의 강도 특성이 제대로 구현되기 어렵다. 하지만, 공극과 보강재의 경사분포를 제어하면 시멘트 복합재의 경우 위치별로 받는 응력 수준에 따라 소재 특성을 국부적으로 강화하거나 경량화시킬 수 있게 된다. 즉, 굽힘 시험에서는 인장 강도가 높은 바닥층이 인장 응력을 견딜 수 있도록 설계하거나 압축 시험에서는 압축 강도가 높은 고밀도 층이 압축 응력을 견딜 수 있도록 설계하여 응력을 재분배할 수 있게 되는 것이다.

액정 엘라스토머(liquid elastomer)구조를 DIW 방식(Direct Ink Writing)으로 3D 프린팅하여 다양한 형태의 액추에이터를 제작할 수 있는데, 프린팅 파라미터에 따라 경사 기능 구조를 설계하고 작동 거동(actuation behavior)과 기계적 성능 모두 제어할 수 있다 (그림 3-b).¹² 액정 메조젠 (liquid crystal mesogen) RM257과 사슬 연장제(chain extender) EDDT의 마이클 첨가 반응(Michael addition reaction)을 통해 제조한

프린팅 잉크를 사용하는데, 이때의 중합도는 이 두 물질의 공급 비율에 따라 제어할 수 있다. 가교되지 않은 액정 올리고머(liquid crystal oligomers)와 광 개시제가 포함된 잉크를 먼저 네마틱-등방성 상전이 온도(nematic-isotropic phase transition temperature)에 가깝게 가열한 후 노즐을 통해 필라멘트 형태로 압출한다. 액정 메조젠은 프린팅 경로를 따라 전단 및 신장 흐름에 의해 배열되는데, 이때 필라멘트 내부 코어는 외부 셀보다 느리게 냉각되어 메조젠 배열 정도가 서로 다른 코어-셀(core-shell) 구조를 갖게 된다. 코어와 셀의 크기 비율뿐만 아니라, 프린팅 온도, 노즐과 빌드 플레이트 사이의 간격, 노즐의 내경 등을 조절하여 필라멘트의 열역학적 거동을 제어할 수 있다. 이처럼 경사 기능 액정 엘라스토머 기반 액추에이터를 제작하면, 모듈러스가 크게 다른 소재 간의 계면 근처에서 발생하는 응력 집중 현상을 완화할 수 있다.

4. 분말 베드 용융 방식 (Powder Bed Fusion)

분말 베드 용융 방식은 레이저를 사용하여 베드 상의 분말을 선택적으로 용융시키며 한 층씩 쌓아가는 과정을 반복하여 최종산물을 생산해내는 방식이다. 이러한 방식에서는 주로 레이저의 에너지 밀도(energy density)를 제어하거나 특수한 구조체 디자인 설계를 적용하여 경사기능재료를 제조하는 연구가 진행되어 왔다 (그림 4).¹³ 분말 베드 용융 방식 중 하나인 SLM 방식(Selective Laser Melting)은 수술용 임플란트, 자동차 경량 소재, 항공 우주 소재 분야 등에서 다공성 구조물을 제조하는 데



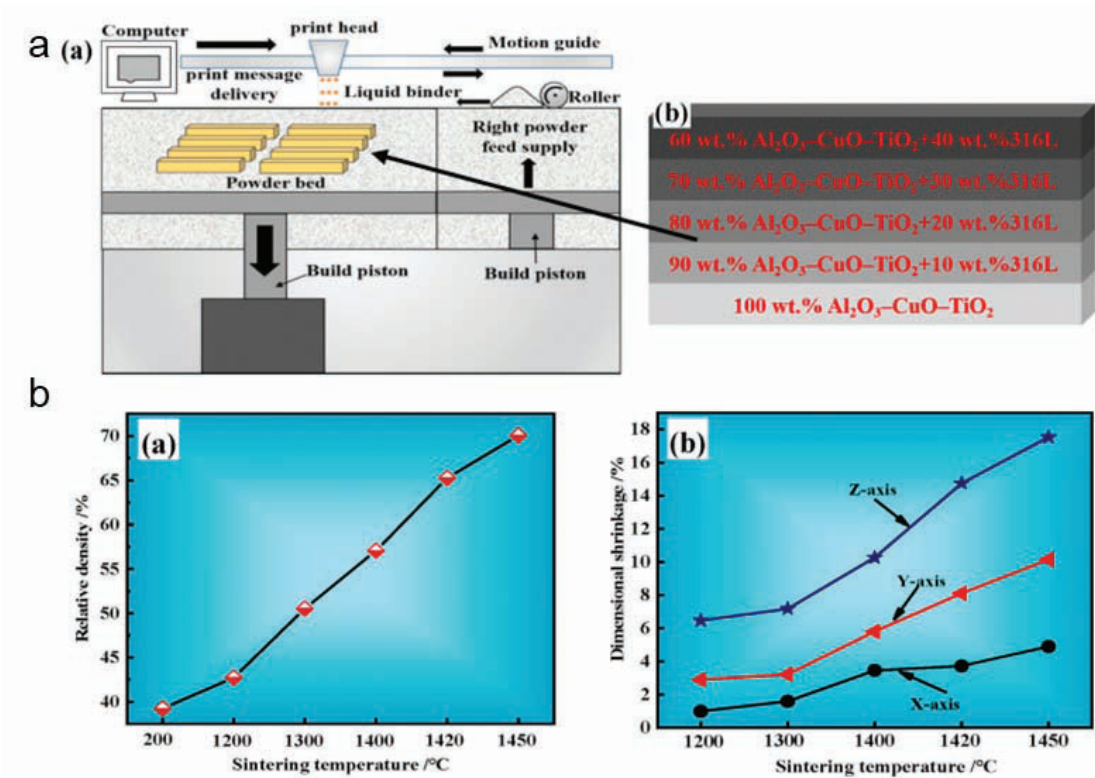
[그림 4] a 균일 격자 구조와 경사기능재료 기반 격자 구조에 대한 CAD 설계. b 균일 격자 구조와 경사기능재료 기반 격자 구조에 대한 현미경 이미지 (Mater. Sci. Eng. A 2016, 670, 264–274).

에 적용되는 3D 프린팅 기술로서, 경사기능재료 제조 기술은 고도의 맞춤형 성능을 갖는 차세대 경량 소재 및 부품 설계 분야에 효과적으로 적용될 수 있다. 예를 들어, 기존 SLM 방식으로 출력한 알루미늄 기반 격자 구조체는 취성파괴거동을 쉽게 보이는데, 경사기능재료로 제조하면 기존의 재료보다 더 우수한 기계적 성능을 확보할 수 있다. 상단에서 하단으로 연속적인 밀도 경사를 갖도록 제조된 알루미늄 경사기능재료에 수직 방향으로 하중을 가하면, 상대밀도가 가장 낮은 상단 층부터 상대밀도가 가장 높은 하단 층으로 순차적으로 붕괴하는 거동을 보이게 된다. 또한, 순간적으로 크게 발생하는 강도 저하를 방지할 수 있게 되어 기존 구조의 압축 붕괴에서 흔히 나타나는 대각선 방향의 전단 밴드(diagonal shear band) 현상도 제거할 수 있다.

5. 바인더 분사 방식 (Binder Jetting)

바인더 분사 방식은 일반적으로 잉크젯 헤드에서 액체의 유기 또는 무기 바인더를 분사하여 베드 상의 분말 입자들을 선택적으로 결합

시키는 원리를 이용한다. 하나의 레이어가 완성되면 그 위에 새로운 분말 레이어를 쌓고 바인더를 분사하는 과정을 반복하며 최종산물을 생산해내는 방식으로, 사용한 소재와 응용 분야에 따라 후처리 과정을 거치기도 한다. 분말 형태의 금속, 세라믹 그리고 고분자 등의 여러 가지 재료를 적용할 수 있다는 장점이 있어서 다양한 분야에 걸쳐 연구가 진행되고 있다 (그림 5).¹⁴ Al_2O_3 세라믹에 316L 스테인리스 스틸의 첨가 비율을 연속적으로 제어하여 설계하면 재료의 인성을 효과적으로 높여 우수한 기계적 특성을 확보할 수 있다. (그림 4-2). Al_2O_3 세라믹은 낮은 밀도, 높은 경도, 우수한 내식성 및 내마모성 등의 장점이 있지만 높은 취성으로 인하여 내충격성이 낮다는 단점이 있어, 인성과 내산화성이 우수한 316L 스테인리스 스틸 소재를 첨가하여 이러한 단점을 보완할 수 있게 되었다. 우수한 기계적 성능을 바탕으로 최근에는 원자로의 부식방지 케이스나 고온의 초음속 엔진의 부품과 같은 극한 환경에서의 사용을 위하여 경사기능재료의 형태로 연구가 진행되어왔다. 예를 들어, 경사기능재료의 하



[그림 5] a 바인더 분사 방식의 시스템과 경사기능재료에 대한 모식도, b 경사기능재료의 상대밀도와 수축률 (Ceramics International 2023)

단에서 상단으로 갈수록 Al_2O_3 세라믹 분말에 CuO/TiO_2 소결 보조제가 혼합된 분말과 316L 스테인리스 스틸 분말의 조성비가 9:1에서 6:4가 되도록 구조를 설계한다. 제조된 경사기능재료는 고온 소결을 통한 후처리 과정을 거치는데, 소결 온도가 증가할수록 높은 상대밀도 값을 갖게 되고 굽힘강도(bending strength) 또한 향상될 수 있다.

맺음말

지금까지 3D 프린팅에 적용 가능한 경사기능재료에 대해 알아보았다. 경사기능재료는 하

나의 구조체 내에 재료의 조성과 특성을 연속적으로 변화시켜, 국부적으로 맞춤형 특성을 갖는 재료로 정의할 수 있다. 경사기능재료의 3D 프린팅을 통하여 여러 재료로 구성된 단일 구조체를 제조할 수 있어 복합소재 기반 구조체의 설계가 용이하다. 또한, 불연속적인 특성을 갖는 소재의 계면에서 발생할 수 있는 박리 및 크랙 현상을 막아 우수한 기계적 특성을 확보할 수 있다. 확보된 우수한 기계적 성능을 목적과 응용 분야에 따라 국부적으로 제어하여 하나의 구조체 내에 두 가지 이상의 특성을 부여하고, 각 위치에서 최대의 성능을 끌어낼 수 있다는 점에서 3D 프린팅 연구개발

가치가 상당히 높은 재료다. 하지만, 3D 프린팅으로 경사기능재료의 정확한 디자인 구현을 이루기 위해선 해결해야 할 문제점이 있다.⁶ 첫째, 단일 재료가 아닌 다양한 재료를 사용하여 복잡한 조성비를 갖는 재료로서 미세구조까지 매우 정밀하게 분포를 분석하고 제어할 수 있어야 한다. 두 번째, 설계한 경사기능재료를 재출력할 때마다 동일한 조성과 성능을 갖도록 하는 3D 프린팅 가이드라인이 정확히 없는 상황이다. 이를 개선하고 고도화된 경사기능재료를 제조하기 위해서는 재료 공학, 항공우주산업, 광학, 야금학 등 여러 분야를 아우르며 융복합적인 접근하기 위한 포괄적인 노력이 필요하다. 이러한 노력을 바탕으로 경사기능재료의 3D 프린팅 관련 시뮬레이션을 진행할 수 있어야 하며, 소재와 설계에 따른 경사기능재료의 성능을 정확히 예측할 수 있는 이론 모델과 소프트웨어에 관한 연구가 함께 진행되어야 할 것이다. 이에 본 저자는 경사기능재료 제조를 위한 3D 프린팅 기술의 발전이 곧 산업계 전체에서 나타나는 복합소재 제조 기술의 고도화를 달성하는 데에 중요한 역할을 할 것이라 기대한다.

참고문헌

- [1] Dawson C, Vincent J F V and Rocca A-M 1997 How pine cones open Nature **390** 668
- [2] Song K, Chang S-S, Roper M, Kim H and Lee S J 2017 A biologically-inspired symmetric bidirectional switch PLOS ONE **12** e0169856
- [3] Zhu Q, Jin Y, Wang W, Sun G and Wang D 2019 Bioinspired smart moisture actuators based on nanoscale cellulose materials and porous, hydrophilic evoh nanofibrous membranes ACS Applied Materials & Interfaces **11** 1440-8
- [4] Lin C-Y and Kang J-H 2021 Mechanical properties of compact bone defined by the stress-strain curve measured using uniaxial tensile test: A concise review and practical guide Materials **14** 4224
- [5] Niino M, Hirai T and Watanabe R 1987 Functionally gradient materials. Journal of the Japan Society for Composite Materials **13** 257-64
- [6] Li Y, Feng Z, Hao L, Huang L, Xin C, Wang Y, Bilotti E, Essa K, Zhang H, Li Z, et al. 2020 A review on functionally graded materials and structures via additive manufacturing: From multi-scale design to versatile functional properties Advanced Materials Technologies **5** 1900981
- [7] Loh G H, Pei E, Harrison D and Monzón M D 2018 An overview of functionally graded additive manufacturing Additive Manufacturing **23** 34-44
- [8] Peterson G I, Schwartz J J, Zhang D, Weiss B M, Ganter M A, Storti D W and Boydston A J 2016 Production of materials with spatially-controlled cross-link density via vat photopolymerization ACS Applied Materials & Interfaces **8** 29037-43

- [9] Kuang X, Wu J, Chen K, Zhao Z, Ding Z, Hu F, Fang D and Qi H J 2019 Grayscale digital light processing 3d printing for highly functionally graded materials Science Advances **5** eaav5790
- [10] Bartlett N W, Tolley M T, Overvelde J T B, Weaver J C, Mosadegh B, Bertoldi K, Whitesides G M and Wood R J 2015 A 3d-printed, functionally graded soft robot powered by combustion Science **349** 161-5
- [11] Geng Z, Pan H, Zuo W and She W 2022 Functionally graded lightweight cement-based composites with outstanding mechanical performances via additive manufacturing Additive Manufacturing **56** 102911
- [12] Wang Z, Wang Z, Zheng Y, He Q, Wang Y and Cai S 2020 Three-dimensional printing of functionally graded liquid crystal elastomer Science Advances **6** eabc0034
- [13] Maskery I, Aboulkhair N T, Aremu A O, Tuck C J, Ashcroft I A, Wildman R D and Hague R J M 2016 A mechanical property evaluation of graded density al-si10-mg lattice structures manufactured by selective laser melting Materials Science and Engineering: A **670** 264-74
- [14] Zhao W, Liu W, Wu J, Wei Q and Ye C 2023 316l-toughened porous al₂o₃-based ceramic functionally graded materials using binder jetting Ceramics International

• 조 수 영 •



2015-2019 건국대학교
유기나노시스템공학과 학사
2019-현재 연세대학교
화공생명공학과 석박사통합과정

• 조 정 호 •



2001 서강대학교 화학공학과 학사
2006 POSTECH 화학공학과 석사, 박사
2008 숭실대학교
유기신소재 파이버공학과 조교수
2012 성균관대학교
나노공학과 부교수, 교수
2019-현재 연세대학교 화공생명공학과 교수

분석 기술의 발달이 밝힌 인류 역사의 미스터리 - 금속을 어떻게 만들 수 있게 되었을까?

이 경 우 (서울대학교 재료공학부 교수)

인류는 지금부터 6000년 정도 전에 산화구리 광석을 제련해서 구리를 만들어 내면서 석기 시대를 벗어나서 금속을 사용하는 시대로 발전하게 되었다. 그런데 광석과 금속 구리는 모양이나 성질이 전혀 다르다. 비록 금속을 만들어 낼 수 있지만 광석은 글자 그대로 돌의 하나이고 겉보기에 나중에 만들어지게 되는 금속과는 전혀 다르다.

지금도 광석을 포함한 돌이 금속과 산소 또는 금속과 황의 화합물이라는 것을 알고 있고, 이 화합물에서 산소 또는 황을 제거하면 금속이 만들어진다는 것을 알고 있지만 처음으로 금속을 만들었던 수천 년 전의 선조들은 19세기에나 발견된 산소의 존재를 알 수 없었기 때문에 광석이 금속의 산화물이라는 것을 상상도 할 수 없었을 것이다. 따라서 다른 계기가 없었다면, 일반적인 돌과 약간 다르긴 하지만 그래도 돌의 하나인 광석에서 모양과 성질이 전혀 다른 금속을 만든다는 생각을 해내는 것은 거의 불가능한 일이었을 것이다.

발전한 정밀 분석 기술은 수천 년 전의 제련 기술자들이 어떻게 광석에서 금속을 만들 수 있었는지 추론할 수 있는 단서들을 제공했다.

처음으로 구리를 만들어 낸 문명은 메소포타미아 지역에 존재했고, 이 지역의 여러 금속 유물, 고대 광산 그리고 고대 제련 장소에 대한 분석이 진행되면서 최초의 제련 기술에 대한 윤곽이 잡히기 시작한 것이다.

현재까지 발견된 고대 구리 제련로와 제련으로 만들어 냈을 것으로 추정되는 구리 유물에 대한 분석 결과를 보면 6000년 정도 전에 구리 제련이 시작되었다는 것이 정설로 받아들여지고 있다. 그런데 종종 더 오래된 유적에서 구리 유물이 출토되고 있어서 구리 제련이 더 일찍 시작되었을 수 있다는 주장도 나오고 있고, 심지어는 인류가 최초로 사용된 것으로 알려진 금보다 구리가 먼저 사용되었을 가능성을 보여주는 유물도 발굴되고 있다. 다만 이렇게 오래된 유적에서 얻어진 구리 유물들은 구리 광석을 제련해서 만들어진 것이 아니고 자연이 만들어 낸 천연구리(native copper)를 모아서 가공한 것으로 밝혀지고 있다.

천연구리가 자연계에 존재하는 이유는 구리 산화물의 환원이 다른 금속보다 상대적으로 쉽다는 구리의 화학적 성질 때문이다. 구리 산화물이 탄소와 같이 있으면 높지 않은 온도에서

환원되어 구리가 될 수 있어서 구리 광석이 산 불에 노출되거나 지질 작용을 받아서 온도가 높아지면 구리로 환원될 수 있다. 인류는 구리를 만들기 전에 이 천연구리를 모아 가공해서 장신구 등을 만들어 사용했다. 이 때문에 아주 오래된 유적지에서도 구리 유물이 발견되고 있으며, Solecki 교수는 기원전 8000년 정도로 추정되는 유적에서 구리 유물을 발견해서 인류는 금보다 구리를 먼저 사용했다고 추정했다¹⁾.

다만 이렇게 얻어진 구리는 주로 장신구로만 사용되었기 때문에 구리 합금이 도구로 문명을 발전시킨 청동기 시대와는 관계가 없다. 그런데 바로 이 천연구리 덕분에 구리를 만드는 아이디어를 얻어서 인류 문명이 청동기 시대를 맞이하게 된 것으로 보인다. 모든 구리 광석은 구리 성분 외에 여러 불순물이 같이 들어 있는데 그 양들이 광산에 따라 조금씩 다르다. 그리고 과거에는 금속을 만들 때 불순물을 없애는 기술이 부족했기 때문에 광석의 불순물들이 대부분 만들어진 구리에 남아 있어서 구리 유물 속의 불순물을 정확하게 분석하면 마치 지문처럼 그 금속을 만든 광석이 어느 광산에서 나온 것인지 알아낼 수 있다.

이러한 분석을 통해서 천연구리 역시 광산에서 채취된 것을 알게 되었다. 예를 들어 Muhly

교수는 터키 남동부에 위치한 차요뉴 테페시(Çayönü Tepesi) 지역의 기원전 7000년경의 신석기 유적 중에 발견된 50개가 넘는 구리로 만든 공예품들에 사용된 구리를 분석해서 이들이 천연구리이며 그 지역에서 20km 정도 북쪽에 있는 에르가니 광산(Ergani Maden)에서 채취된 것을 밝혀냈다. 천연구리가 구리광산에서 만들어지는 것은 놀라운 일이 아니다. 노출된 구리 광석이 산불에 휩싸이게 되면 제련에 필요한 높은 온도가 만들어지고 나무에서 구리를 환원시켜 줄 탄소가 공급되기 때문에 구리가 만들어질 수 있어서 구리 광산 위의 산불은 자연 제련로라고 할 수 있다. 지구상에서 산불은 육상 식물이 나타나기 시작한 4억년 전의 대분기부터 시작되었기 때문에 인류가 나타나기 훨씬 전부터 지구 곳곳에 산불이 만들어 낸 천연 구리가 존재하고 있었다. 인류가 처음 사용한 제련로의 모습도 산불과 유사하게 구리 광석과 나무를 섞어 놓고 나무에 불을 붙여서 만들었다. 이렇게 유사한 것은 우연이 아니고, 아마도 초기 제련 기술자들이 산불이 구리를 만드는 과정을 모방했기 때문일 것이다.

그렇지만 광산에서 천연구리를 채취하던 사람들이 구리의 아래에 있는 돌이나 흙에서 구리가 만들어진다는 생각을 해내고 그 광석을 가져다가 구리 제련을 했을 가능성은 높지 않

1) 최초로 사용된 금속이 금인지 구리인지에 대해서 논쟁하는 것은 큰 의미가 없고 지역에 따라 다를 것이다. 그 이유는 금과 천연구리는 인류가 존재하기 전부터 자연계에 금속으로 존재했기 때문에 지역에 따라서 쉽게 얻어지는 것을 먼저 사용했기 때문이다. 그리고 자연적으로 발견된 것을 그대로 사용한다면 얼마든지 오래된 유물이 발견될 수 있기 때문에 앞으로 계속 더 오래된 금이나 천연구리 유물이 발견될 것으로 보인다.

다. 광석에서 구리를 만들기 위해서는 높은 온도와 탄소 공급원이 필요하기 때문이다. 이론적으로는 탄소가 있으면 300도를 넘는 온도 조건에서 구리가 만들어질 수 있지만 그래도 사용할 만한 구리를 만들기 위해서는 800도 이상의 온도가 필요하며 산불 중에서도 크라운 산불이라 불리는 나무줄기나 뿌리까지 천천히 타들어 가는 산불이 이러한 온도를 만들 수 있다. 그런데 신석기 시대의 선조들에게 800도 이상으로 온도를 올리는 제련로를 만드는 것은 많은 노력과 자원이 필요한 큰 작업이기 때문에 그 광석에서 금속을 만들 수 있다는 것을 확인할 수 없었다면 구리 제련로를 만들어서 구리를 만들려는 시도를 할 수 없었을 것이다.

어떻게 구리 광석에서 구리가 만들어진다는 확신이 들었는지를 보여줄 수 있는 자료들은 없지만 앞에서 설명한 대로 천연구리의 채집되었던 장소가 나중에 구리를 만들 때 구리광산이라는 사실에서 다음과 같은 추론을 할 수 있다. 인류가 천연구리를 채집하던 장소에 큰 산불이 났는데, 그 이후에 다시 가보니 갑자기 천연구리가 많이 만들어져 있는 것을 반복적으로 경험하면서 불이 나면 천연구리가 만들어지는 곳으로 먼저 가서 구리를 채집하려고 했고, 어쩌다 일찍 도착했을 때에 구리가 만들어지고 있는 과정을 관찰할 기회가 생겼을 가능성이 있다. 이러한 경험이 축적되면서 구리광석-불-구리의 연관성을 생각해 냈을 것이다. 큰

산불이 자주 나는 것은 아니기 때문에 이 과정이 한순간에 일어난 것은 아니고 몇 세대에 걸친 경험 누적의 결과일 것이며, 800도 이상의 온도에서 작업할 수 있는 제련로를 만드는 것도 쉬운 일이 아니었기 때문에 천연구리를 사용한 후에도 수천 년이 지나서야 구리를 만들 수 있었다.

초기에는 구리를 만들기 가장 쉬운 구리 산화물(Cu_2O)광석이나 가열하면 쉽게 산화물로 바뀌는 광석(CuCO_3 , $\text{Cu}(\text{OH})_2$, $2\text{CuCO}_3\text{-Cu}(\text{OH})_2$)에서 구리를 만들었다. 이 시기에 만들어진 구리는 강도가 돌에 비해서 그렇게 크지 않았고, 그래서 귀한 재료였던 구리는 주로 장신구나 의례용 도구로 사용되고, 작업을 위한 도구로는 석기가 사용되었다고 추정하는 고고학자들이 많다. 그런데 이 시기에 생산된 구리의 양이 상당히 많다. Muhly 교수의 추정에 의하면 당시 유명한 구리광산이었던 아이 부나르(Ai Bunar) 광산에서 채굴된 광석이 2500톤 정도이고, 이를 사용해서 만들어진 구리가 750톤 정도에 이른다. 이러한 생산량은 장신구나 의례용으로만 소비되기에는 많은 양이다. 이 생산량으로 보면 비록 이 시기의 구리가 돌보다 강하지 않아도 구리는 금속이므로 쉽게 깨지지 않아 무기나 내구성이 필요한 도구로서의 장점이 있기 때문에 이 시기에도 구리가 도구나 무기로도 사용되었을 가능성이 상당히 높다는 것을 보여준다².

2) 다만 이 시기에 구리가 도구로 사용된 유물이 별로 발견되지 않는데, 그 이유는 도구로 사용된 구리는 망가지더라도 녹여서 새로 만드는 주조가 어렵지 않아서 계속 재활용되었기 때문으로 추정된다.

이렇게 구리가 많이 생산되자 광석 소비량이 늘어 청동기 시대가 시작되기도 전에 제련하기 쉬운 구리 광석들은 고갈되기 시작했다. 산화광이 고갈된 광산 아래쪽에는 구리와 황의 화합물인 황화광(Cu_2S , CuFeS_2 등)이 많이 남아 있었지만 산화광을 처리하던 장치로는 황화광을 구리로 만들 수 없었다. 그 대신 비소가 들어간 광석($\text{Cu}_2\text{AsO}_4 \cdot \text{OH}$)을 사용해서 구리를 만들기 시작했는데 이 광석 속에 들어 있는 비소가 구리 속에 용해되면서 구리의 강도를 높여 주는 의도하지 않은 결과를 얻으면서 구리로 만든 도구들이 좋아졌고, 도구의 숫자도 늘어나면서 본격적으로 인류 문명이 빠르게 발전하기 시작했다.

구리에 대한 수요가 계속 늘어나면서 비소가 포함된 광석만으로는 공급이 모자랐다. 제련 기술자들은 매장량이 많은 황화광을 제련해서 사용할 공정을 찾으려 노력하다가 황화광을 대기 중에서 높은 온도로 가열하면 황과 구리가 산소와 반응해서 황은 이산화황이 되고, 광석은 산화물로 바뀌는 것($\text{Cu}_2\text{S} + 1.5\text{O}_2 = \text{Cu}_2\text{O} + \text{SO}_2$)을 알게 되었다. 이렇게 만들어진 산화광은 기존 제련 장치에 투입할 수 있었기 때문에 드디어 황화광을 자원으로 사용할 수 있게 되어 자원 부족 문제가 많이 해소되었다.

그런데 이렇게 만든 구리 금속은 비소가 적기 때문에 구리-비소 합금에 비해서 강도가 약한 것이 문제였다. 만일 비소의 존재와 역할을 알

았다면 비소를 제련해서 별도로 첨가하면 되었겠지만, 당시에는 비소의 존재를 알지 못했기 때문에 쉽게 해결하기 어려운 문제였다. 제련 기술자들의 지속적인 노력 끝에 주석이 구리의 강도를 높인다는 것을 알아내서 주석을 첨가한 청동을 만들었다³. 사실 구리를 강화시키는 효과는 비소가 주석보다 더 크다. 예를 들어서 비소와 주석이 각각 2%씩 구리에 포함되면, 비소는 구리의 강도를 30% 정도 높이지만 주석은 10% 정도 높일 뿐이다. 다만 비소는 4% 이상 첨가되면 더 이상 효과가 없는데, 주석은 10% 이상 첨가해도 계속 강도가 높아지기 때문에 주석이 많이 들어간 청동이 비소가 들어간 합금보다 더 우수한 성질을 가지게 만들고 있고, 주석이 10% 또는 그 이상 들어간 청동이 시대의 주재료로 자리를 잡게 된다.

인류가 철을 어떻게 만들 수 있었는지도 수수께끼이다. 철을 만들기 위해서는 구리보다 훨씬 높은 온도가 필요하기 때문에, 철은 구리와 달리 자연적으로 만들어지는 것은 거의 없다. 다만, 인류는 철을 만들기 전에 운석으로 떨어진 운석철을 가공해서 사용했다. 권오준 박사의 자료 조사에 의하면 철을 부르는 iron이라는 이름의 의미가 “하늘에서 온 것”이라는 뜻이라고 한다. 이는 그 당시 인류는 철은 만들 수 있는 것이 아니고 하늘의 선물로 인식했다는 것을 보여준다.

3) 그런데 광석 중에 불순물로 포함되어 있던 비소나 납과는 달리 주석 성분은 구리 광석과 같이 나오지 않기 때문에 어떻게 구리에 주석을 넣어서 강한 재료인 청동을 만들 생각을 했는지 합리적인 설명은 아직 못하고 있다.

그래서 좋은 품질의 청동이 잘 만들어지고 있던 시기에 왜, 그리고 어떻게 하늘의 금속인 철을 인간이 만들기 위해 제련을 시작하게 되었는지 설명하는 것이 쉽지 않았다. 특히 철을 제대로 만들기 위해서는 적어도 1300도의 온도를 확보해야 하고 이 온도에서 만들어진 고체 상태의 철을 가공하는 것도 어렵다. 더구나 초기에 만들어진 철의 강도는 같은 시기에 만들어지던 청동에 비해서 나은 것이 없기 때문에 여러 어려움을 극복하면서 굳이 철을 만들 이유가 없어 보인다.

이 이유 역시 최신의 분석 기술들과 과학적 지식을 바탕으로 거의 밝혀져 가고 있다. 기원전 2000년부터 철기 시대로 본격적으로 접어들기 시작한 기원전 1500년 사이의 기간에 여러 유적지에서 운석철이 아닌 철이 종종 발견된다. 이 유물들은 철만 나오기도 하지만 철과 구리가 같이 나오는 예도 많다. Maddin 교수는 이러한 발굴 결과와 제련 지식을 더해서 다음과 같은 가설을 제시한다.

청동기 시대가 성숙기에 들어선 기원전 2000년에는 철산화물이나 철황화물이 포함된 구리 황화물 광석을 제련해서 구리를 만들었다. 당시의 제련 온도가 1100도를 넘었기 때문에 구리는 액체 상태로 얻을 수 있었고 슬래그(slag)와 쉽게 분리되었다. 그런데 이때의 제련 조건을 분석해 보면 구리가 환원될 때 철도 같이 환원될 수 있는 조건이 되었기 때문에 철이 종종 만들어졌다. 다만 이때 만들어진 철은 스펀지처럼 구멍이 숭숭나 있고 그 구멍을 슬래그가 채우고 있었다. 이렇게 금속과 슬래그가 섞여

있으면 단조 과정에서 철이 조각조각 나기 때문에 사용할 수 없는데, 이것을 1150도 이상의 온도에 두면 슬래그가 액상으로 바뀌고, 이 상태에서 단조를 하면 슬래그가 빠져나가면서 철을 얻을 수 있었다. 이 경험에서 발전해서 철을 제련하고 가공할 수 있게 되었다.

이 내용을 이해하기 위해서 먼저 구리 광석의 변화를 알아야 한다. 앞서서도 설명했지만, 처음에는 산화광이나 탄산구리 또는 수산화구리와 같이 제련하기 좋은 구리 광석을 사용했고, 그 이후 비소가 들어간 광석을 사용했다. 그렇지만 늘어나는 수요를 공급하기 어려워져 황화광을 사용하는 방법을 찾아내서 황화광을 사용해서 구리를 만들기 시작했다. 그런데 황화광 중에서도 구리의 함유량이 높은 휘동석(Cu_2S)은 빠른 시기에 고갈되었기 때문에 청동기 후기로 오면 철을 포함하고 있는 황동광(CuFeS_2)을 구리 제련의 주원료로 사용할 수밖에 없었다.

광석 속의 철 성분이 제련 과정에서 철로 환원될 가능성은 항상 존재한다. 다만, 높지 않은 온도에서는 철의 환원이 어렵기 때문에 구리가 다 환원되기 전에 철의 환원은 거의 일어나지 않는다. 따라서 구리를 얻고 난 다음에도 철 산화물은 다른 성분들과 함께 슬래그로 불리는 찌꺼기로 남는다. 그런데 청동기 시대 후반으로 가면서 숯의 품질이 좋아지고, 송풍 방법이 개선되면서 노의 온도가 높아지자 상황이 달라진다. 당시 송풍은 공기를 발로 불어 넣는 방법을 썼는데, 이 방법으로는 공기가 일정하게 들어갈 수는 없고, 많았다 적었다 하는

변동이 생긴다. 그런 중에 어쩌다 공기가 아주 많이 들어가게 되면 제련로의 온도가 올라가고, 산소량도 충분해져 철이 환원될 수 있는 조건이 만들어진다. 이 때문에 가끔 철이 구리와 함께 얻어지게 된다. 다시 말해 제련 온도가 전체적으로 상승하면서 구리와 함께 철이 만들어지기 시작했다. 이렇게 구리 제련 과정에서 철을 얻은 경험이 있었기 때문에 철을 만들 필요가 생기면 본격적인 철 제련이 가능했다는 것이다. 초기에 철기를 만들기 시작한 지역이 구리 제련이 활발한 지역이었다는 사실도 이러한 추정을 뒷받침한다.

다음으로는 철이 만들어진 필요성에 대해서 알아보자. Muhler 교수의 분석에 의하면 메소포타미아 지역에 대한 분석 결과, 철기 시대가 시작되던 시점의 철은 청동에 비해서 강도에 큰 차이가 없었다. 게다가 청동은 주조나 단조 등 가공이 쉽지만 철은 가공이 어려웠다. 이런 상황에서 왜 철기 시대로 넘어갔는가에 대해서 크게 세 가지 의견으로 나뉜다. 하나는 철이 청동보다 성질이 우수하기 때문에 당연히 철기 시대로 전환되었다는 것이고, 두 번째는 청동을 만들 수 있는 주석의 공급이 부족해지면서 우수한 청동을 만들 수 없어서 철기로 넘어가게 되었다는 주장, 마지막으로 청동과 철을 같이 만들었지만 철광석이 구하기 쉬워서 철 생산량이 늘어나게 되고, 그 결과 철기가 문명의 주도적인 도구로 자리 잡게 되었다는 주장이다.

필자는 이 중에서 세 번째가 가장 타당하다고 생각한다. 철 제조가 시작된 이후에도 청동의

생산이나 청동기 제작은 계속되었다. 그리고 이 시기에는 아직 철 생산 기술이 충분하게 발전하지 못해서 철과 청동의 강도를 분석해보면 철이 생산되기 시작하고도 한참 동안 청동의 강도가 철 보다 더 컸다. 그렇지만 청동은 자원이 충분하지 못했기 때문에 철을 계속 만들어서 도구로 활용했고, 시간이 지나갈수록 풍부한 자원을 가진 철의 생산이 늘어나고 철 생산 기술이 좋아지면서 철의 우수한 성질이 구현되어 가면서 철의 성질이 청동을 능가하게 되었고, 결국 도구나 무기가 모두 철로 만들어지는 시대로 넘어가게 된 것이다. 거의 모든 지역에서 이러한 천이 과정이 나타나는데 이러한 천이에 대체로 500년 정도 걸렸다.

이 글에서 인류가 구리와 철을 어떻게 만들게 되었는지 살펴보았다. 인류가 석기를 넘어서 금속을 사용할 수 있게 만들어 준 것이 환원이 쉬운 구리 덕분이었으며, 철을 만들어서 문명을 획기적으로 발전시켜 갈 수 있었던 철 만들기가 황동광이라는 철과 구리를 같이 함유하는 광석 때문에 가능할 수 있었다. 이러한 과정에 대한 이해가 가능해진 이유가 재료에 대한 정밀한 분석 기술이 발달했고, 이 기술이 유물에 대한 연구에 활용되면서 역사학계에서 오랜 기간 풀지 못하는 미스터리였던 의문들에 대한 설명을 제시해 주고 있다. 인류 문명의 중요한 계기인 금속 만들기의 비밀이 최신의 정밀 분석 기술의 도움으로 풀려가고 있고, 앞으로도 이러한 분석 기술이 역사 연구 분야에 활용된다면 더 많은 역사의 비밀들을 이해할 수 있게 될 것이다.

극초음속으로 하늘을 날다

한 기 보 (고등기술연구원 수석연구원)

들어가는 말

2022년 6월, 36년 만에 속편으로 돌아온 영화 ‘탑건: 매버릭’이 북미 극장가를 뜨겁게 달구었다. 1986년 세계 많은 이들에게 파일럿의 꿈을 심어준 영화 ‘탑건’의 후속작이기에, 등장하는 항공기에 대한 관심이 굉장했다. 영화에 등장한 항공기는 일명 ‘다크스타’라는 기체로서, 가상이긴 하나 최근 가장 주목받고 있는 극초음속 항공기로 분류된다. 예고편의 실루엣을 토대로 팬들은 미국 록히드 마틴사의 SR-71(블랙버드)와 콘셉트만 공개된 후속 모델 SR-72와 유사하다고 추측했는데, 실제로 다크스타 디자인에는 록히드마틴 개발부서가 참여한 것으로 알려졌다. SR-71은 최고 마하 3.3을 기록한 ‘인류 역사상 가장 빠른 비행기’로 현재는 비싼 운용비 때문에 모두 퇴역했다. 이후 록히드 마

틴사는 ‘블랙버드의 아들’로 최고 마하 6 이상인 전략정찰기 SR-72 콘셉트를 공개하며 2030년 실전 배치를 목표로 하고 있다.

2023년 6월 “세계 극초음속 무기 개발 경쟁”이라는 기사에서, 러시아의 우크라이나 침공, 북한의 연이은 미사일 발사를 통한 위협 수위 증가 등 국제 안보정세가 위중한 가운데 세계 주요국들이 기존 순항미사일을 대체하는 극초음속 미사일의 개발에 나섰다. 미국은 필요시 신속한 군사적 조치를 위한 목적으로, 러시아와 중국은 미국의 미사일 방어망을 무력화하고 정치·군사적 영향력을 약화시키기 위한 수단으로 극초음속 미사일을 개발한다는 내용이다.



[그림 1] 영화 ‘탑건: 매버릭’의 극초음속 항공기 ‘다크스타’ 등장 장면.



[그림 2] SR-71 (블랙버드) 이미지.

극초음속 비행체란

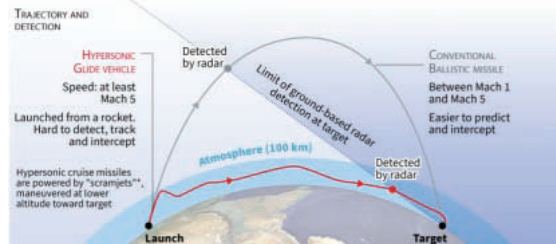
극초음속을 위해 적용되는 추진기관은 스크램제트(scramjet)와 이중 램제트(dual ramjet) 방식이 있다. 스크램제트는 초음속으로 이동해 높은 온도와 압력을 유지하는 산화제인 공기에 곧바로 연료를 분사시켜 점화하는 방식이다. 엔진 작동이 가능한 마하 5까지 가속하기 위해 대형 부스터가 필요하므로 제작에 어려움이 있다. 이중 램제트는 하나의 엔진에서 램제트와 스크램제트의 기능이 복합적으로 이루어지는 구조이다. 부스터 소형화가 가능하여 대부분의 극초음속 순항미사일은 이 방식을 적용하는 것으로 알려져 있다.

기존 탄도미사일은 마하 5의 극초음속으로 비행할 수도 있지만 궤도가 정해져 있고 기동에 제한이 있다. 극초음속 무기는 최소 마하 5의 속도로 비행하며 기동성이 뛰어나고 비행 중에 경로를 변경할 수 있다는 점에서 탄도 미사일과 차별화된다. 극초음속 무기는 음속의 5~25배, 즉 초당 약 1~5마일(1.6~8.0km/s) 속도로 이동할 수 있는 무기로서 수천 킬로미터 떨어진 곳에서 목표물을 타격할 수 있으면서도 현재 미사일 방어망으로는 탐지 및 요격이 어려운 무기로 알려져 있다.

극초음속 무기는 크게 두 가지로 분류된다. 그중 하나인 극초음속 활공체(HGV)는 전술 부스트 글라이드(TBG)로도 부른다. 전략 또는 전술 탄도 미사일이나 이를 탑재한 항공기로부터 속도를 받는 방식에 해당한다. 대략 80,000

Hypersonic weapons

Considered the next generation of arms with conventional or nuclear warheads that are hard to detect and can travel more than five times the speed of sound



[그림 3] 극초음속 비행체 운용 개념도.

피트 높이에서 대기권을 벗어나 마하 20-25 범위의 엄청난 속도를 얻은 후 장거리를 활공하면서 목표물을 향해 정밀하게 탐색하고 기동하며, 활공하는 동안 속도를 낮추지만 여전히 극초음속 범위에 해당하는 마하 5 이상의 속도에 달한다. 활공 중 탐색 및 기동 능력으로 인해 극초음속 활공체는 탐지 및 요격이 어려운 무기 시스템이 된다.

극초음속 순항미사일(HCM)은 탄도미사일의 가속능력과 순항미사일의 기동성을 결합하고 강력한 공기흡입엔진을 탑재한 정교한 미사일이다. 이 미사일은 항공기에서 발사되며, 이후 로켓에서 분리되어 최소 마하 5의 속도로 목표물을 향해 활공한다. 보도에 따르면, B-52 폭격기에 탑재된 미국 극초음속 미사일 AGM-183-ARRW는 공기흡입 유형의 미사일이며 시속 6,200km의 속도에 도달할 수 있는 것으로 알려져 있다.

극초음속 순항미사일의 엔진은 램제트 엔진 또는 스크램제트 엔진으로 고압, 초음속으로 공기를 흡입하여 엔진으로 공기를 흡입하고 연료와 함께 연소시켜 외부로부터 산소를 공급

한다. 이는 제트 엔진의 경우처럼 터빈이 아닌 미사일의 움직임에 의해 연료와 공기의 압축이 이루어지는 자체 구동식 산소 공급 장치이기 때문이다. 이런 분류의 미사일은 추진력 생성에 필요한 산화제를 탑재하지 않고 압축을 위한 터빈이 부족하기 때문에 비행 고도(약 60,000피트)와 작동 범위가 제한된다. 스크램제트 엔진으로 추진되는 공기호흡 미사일은 B-52 항공기나 미사일 등 다른 플랫폼에 의해 고속으로 가속되어야 하는 반면, 무게가 감소하고 움직이는 부품이 없기 때문에 신뢰성, 생산의 단순성 및 단시간에 마하 5 이상의 고속을 개발할 수 있는 능력이 있어 효율성이 높은 것으로 알려져 있다.

이러한 극초음속 무기는 현재 사용 중인 거의 모든 방어 시스템을 회피할 수 있어 극초음속의 기동성이 뛰어난 무기를 발사할 수 있는 능력은 모든 국가에 상당한 이점을 제공한다. 전술한 바와 같이, 미국, 러시아, 중국 등 한반도 주변국에 해당하는 국가들을 중심으로 극초음속 미사일의 개발을 주도하고 있다. 특히, 북한의 무기개발 수준이 향상됨에 따라 이를 억

제 및 방어하기 위한 방안으로 이들 나라들은 대륙간 탄도미사일과 중거리 탄소미사일, 잠수함 발사 탄소미사일 등을 보유한 데 이어 차세대 무기로 극초음속 미사일까지 개발하고 있으며, 일본 또한 극초음속 미사일 개발을 추진하고 있다.

국내외 극초음속 비행체 개발 현황

미국은 2000대 초부터 기존 재래식 글로벌 신속 타격 프로그램의 일환으로 극초음속 무기개발을 추진해왔으며, 개발 초기에는 재정 지원이 상대적으로 제한적이었으나 최근 미 국방부와 의회는 극초음속 무기의 개발 및 배치에 대해 적극적인 관심을 보이고 있다. 대부분의 미국 극초음속 무기는 아직 개발 또는 테스트 단계에 있지만, 적어도 하나의 시스템이 올해 초기 작전 능력에 도달할 것으로 추측된다. 한편 미 국방부는 2020년 3월 20일 보도를 통해 하와이 카우아이에 있는 태평양 미사일 발사장(Pacific Missile Range Facility)에서 실시된 비행시험에서 극초음속 활공체를 성공적으로 테스트했다고 밝혔다.



[그림 4] 극초음속 무기 형태 (왼쪽: 극초음속 활공체, 오른쪽: 극초음속 순항미사일).

러시아는 1980년대부터 극초음속 무기에 대한 연구를 수행해 왔으나, 미국과 유럽의 미사일방어 배치와 2001년 미국의 탄도탄 요격 미사일 규제 조약(Anti-Ballistic Missile Treaty) 탈퇴에 대응하기 위해 개발을 가속화한 것으로 알려졌다. 러시아는 아방가르드(Avanguard)와 3M22 지르콘(Tsirkon or Zircon)이라는 2개의 극초음속 무기 프로그램을 추진하고 있

다. 아방가르드는 대륙간 탄도미사일(ICBM)에서 발사되는 초음속 비행체로, 사실상 '무제한 사정거리'를 가진다고 한다. 러시아는 최신형 ICBM인 사르마트(Sarmat)에서 아방가르드를 SS-19 Stiletto ICBM에서 시험 발사한 것으로 알려졌다. 2011년과 2019년 사이에 실패와 성공이 혼재한 다수의 시험 비행을 실시한 것으로 추정된다. 한편 지르콘은 마하 6에서 8 사이의 속도로 이동할 수 있는 함정발사 초음속 순항미사일으로써, 지상과 해상 목표물을 모두 타격할 수 있다고 한다. 2018년 12월에 지르콘 시험을 성공적으로 수행하고 2023년에 실전 운용될 것으로 알려졌다.

중국의 극초음속 무기의 개발 배경은 러시아와 마찬가지로 미국의 미사일 방어체제 구축, 미국의 극초음속 무기개발과 같은 특정 안보 위협에 대처하기 위한 것으로 알려져 있다. 2014년부터 최소 9차례에 걸쳐 DF-ZF 극초음속 비행체의 시험을 실시한 바 있는 것으로 전해졌다.

북한은 2021년 1월 극초음속 활공 전투부(탄두)에 대한 설계를 끝냈다고 공개적으로 발언해, 관련 개발 가능성을 시사한 바 있다. 2021년 9월 28일, 활공탄 형태의 궤적으로 추정되는 미사일을 발사했고, 수일 후에 해당 미사일을 '화성-8'형이라고 밝힌 바 있으며, 사정거리는 450km를 넘었으며 고도는 30km 이하였다고 한다. 2022년 1월 5일, 새로운 극초음속 미사일 2형을 시험 발사하였으며 700km를 마하 5의 속도로 비행했다고 한다. 이는 탄두부

의 형상이 납작한 글라이더형인 화성-8과 달리 원뿔형인 것으로 보아 미국의 LRHW 활공탄두인 C-HGB와 비슷한 것으로 화성-8형보다 기술적으로 진보한 미사일이라는 주장이 있다. 이후 1월 11일, 극초음속 미사일이 마하 10의 상승 속도를 갖춘 뒤 활공하고 240km의 선회 비행까지 거쳐 1,000km 밖의 표적 타격에 성공했다고 주장하였다.

세계 주요 군사강국들이 앞다투어 군사안보질서의 판도를 바꾸는 차세대 게임 체인저(Game Changer, 어떤 일에서 결과나 흐름의 판도를 뒤바꿔 놓을 만한 중요한 역할을 한 인물이나 사건, 제품)로 극초음속 무기를 개발 중인 가운데, 우리 군도 극초음속 무기체계의 개발과 관련하여 2000년부터 산학공동으로 다양한 연구를 진행하고 있는 것으로 알려져 있다. 국회입법조사처에 의해 발표된 내용에 따르면, '극초음속 무기체계 국제개발동향과 군사안보적 함의'에서 우리 군도 극초음속 무기체계의 개발과 관련하여 2004년부터 국방과학연구소가 주도적으로 관련 연구를 진행하고 있는 것으로 알려져 있다고 밝혔다. 또한 국방과학연구소는 2004년부터 2007년 액체 램제트 추진기관 개발, 2010~2012년 HYPAR 퓨전형 극초음속 핵심기술 응용연구 실시, 2011~2017년 초고속 공기흡입엔진 특화연구실 설치를 통한 각종 관련 연구의 성공적인 수행 등의 성과를 획득하였으며 2018년부터 마하5 이상의 지상발사형 극초음속 비행체를 개발하고 있으며 2023년까지 비행시험을 완료할 계획이 예정돼 있다고 소개했다. 그러면서 장기적으로 볼 때

군사안보적 차원에서 극초음속 무기개발 경쟁은 지속적으로 심화될 것으로 예상됨에 따라 동시에 국제적 규제의 필요성도 제기될 가능성이 높으며, 이에 극초음속 무기 실험금지과 같은 새로운 국제무기통제협정이 논의되기 전에 선제적으로 관련 기술을 확보함으로써 향후 동북아 및 국제군사안보질서에서 우위를 달성해 나가는 것이 중요하다고 제언했다.

앞으로의 극초음속 비행체

극초음속 무기는 속도, 기동성 및 낮은 고도로 인해 탐지 및 방어를 회피할 수 있어 향후 핵무기를 대체하여 군사안보질서 및 전쟁의 판

도를 바꾸는 일명, 차세대 ‘게임 체인저’가 될 수 있다는 전망과 동시에 초음속 무기가 아직까지 핵무기를 대체할 수 있을 만큼의 효과적인 전략무기가 될 만한 실제적인 근거가 없어 이를 반박하는 의견도 있다. 그럼에도 불구하고 극초음속 무기가 지형 및 기술 우위와 같은 다양한 옵션을 제공할 수 있다는 점, 그리고 이를 통해 전략화시킬 수 있다는 점에서 향후 각국 군사안보에 상당한 영향을 줄 것으로 판단된다. 앞으로 극초음속 무기개발 경쟁은 더욱 치열해질 것으로 보이므로 극초음속 무기 개발에는 막대한 시간과 비용이 소요될 것으로 예상되는 만큼 국가 차원에서 장기적인 계획을 수립할 필요가 있는 것으로 사료된다.

남성들의 피임법 성공할까?

진 정 일 (고려대학교 명예교수, 전 IUPAC 회장)

들어가기

한 젊은이가 퇴근 후에 샤워를 마친 후 자기 팔뚝에 젤을 바른다. 보습제가 아니고 피부에 바르는 남성용 피임약이다. 아직 2세를 갖기 원하지 않는 젊은 부부는 오늘 밤에도 임신의 걱정에서 벗어나 만족스러운 둘만의 밤을 가질 수 있게 되었다. 이런 날이 곧 찾아오고 있는 듯싶다.

왜 피임은 주로 여성의 책임이어야 하나? 피임약의 여러가지 부작용으로부터 여성들을 해방시켜야 하지 않을까? 지난 수십년간 남성들의 피임법에 관한 연구들이 진행되어 왔다. 남

성들이 사용해 온 피임법은 콘돔의 사용, 정관 수술, 질외사정 등이 있으나 모두 불편한 방법으로 잘 지켜지지 않는 단점을 지닌다. 정관수술의 경우 수술 부위가 완전하지 않거나, 복구수술이 100% 성공적이지 못한 단점도 있다.

콘돔의 사용은 가장 쉽고 부작용이 적은 좋은 피임법이다. 사용법에 서툴러 콘돔의 피임 실패율이 10~20%에 이른다. 찢어짐이 가장 큰 실패 원인이다. 이를 방지하기 위하여는 끝 부분의 돌출부를 비틀어 공기를 제거한 후 사용하기를 권장한다. 물론 콘돔 사용 때문에 성감이 줄어들든다 던가 집중력이 떨어짐은 감내해야 하는 단점이다. 그러나 콘돔 사용은 성병 감염을 예방할 수 있는 방법이기도 하다. 여성의 배란기를 피하고 경구피임약을 복용하고 남성이 콘돔을 사용하면 피임 효과는 100% 기대할 수 있다.

콘돔과 관련된 재미있는 역사적 이야기 하나를 짧게 소개한다. 콘돔은 이탈리아의 해부학자 팔로피우스가 매독 감염 방지를 위해 1504년 린넨을 사용해 처음 만들었고 지금 같은 고무 제품은 1844년부터 사용되어 왔다. 콘돔의 사용은 기원전 3000여년 경 초기 이집트 왕조 시대로 거슬러 올라간다. 당시 콘돔은 돼지나 염소의 맹장이나 방광을 이용해 만들었다. 당시의 그림이나 조각품을 보면 음경에 주머니를



출처: C & EN, Gina Vitale, Nov. 21, 2022

씩은 모습을 볼 수 있다. 그러나, 당시는 피임 목적이 아니었고 성기가 벌레에 물리지 않도록 하는 보호 장치로 사용했다고 한다. 피임이 넓게 사회적 관심사로 떠오른 것은 19세기 이후이다.

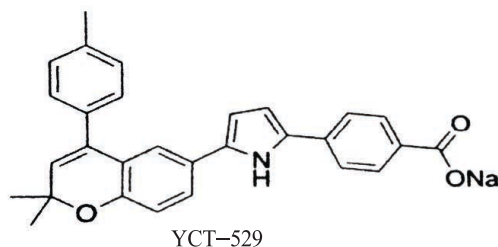
최근에 개발 중인 남성 피임법

남성의 피임방법으로 여러가지 시도가 있었으나 지금까지 성공에 미치지 못했다. 그러나 최근에 몇 가지 새로운 진전을 보여주고 있으며 그들을 항목별로 소개하려 한다.

1. 비호르몬 필(pill) - 경구 피임약

최근까지 남성들을 위한 경구 피임약은 남성성 호르몬인 테스토스테론을 타깃으로 한 주로 호르몬성 피임약 개발이 주를 이루어 왔다. 그러나 이 방법은 몇 가지 부작용을 유발해 사용이 권장되지 못하고 있다. 즉 체중의 증가를 초래하며, 우울증을 유발하며 저밀도리포 단백질(LDL) 콜레스테롤을 증가시킨다. 이런 부작용을 피하기 위해 최근 들어 비호르몬적인 방법에 의학계가 관심을 갖게 되었다. 한 예로 미국 미네소타 대학의 Aunda Georg는 레티산(retinoic acid)의 수용체 알파(RAR- α (retinoic acid receptor alpha))라는 단백질에 주목했다. 이 단백질은 핵산수용체 중 한 종류로, 세포 성장, 세포분열(정충형성 포함), 태아 발달 등에 중요한 역할을 하는 비타민A의 일종인 레티산에 결합한다. 쥐를 갖고 한 실험에서 RAR- α 를 불능케하면 불임을 유발함을 발견했다. 다른 연구팀 중에는 RAR- α , β , γ 등 세

RAR를 모두 불능케하는 경구용 화합물도 개발했으나, Georg 팀은 부작용을 최소화하기 위해 RAR- α 를 선택적으로 억제할 화합물의 구조를 설계하고 합성하여 후보물질을 100여나 만들었다. 그들이 찾아낸 가장 우수한 RAR- α 억제 화합물은 YCT-529 였다. 이 화합물은 RAR- α 에 강하게 결합해 레틴이 RAR- α 에 결합하지 못하게 하여 정충 생산에 관여하는 유전자의 발현을 막는다.

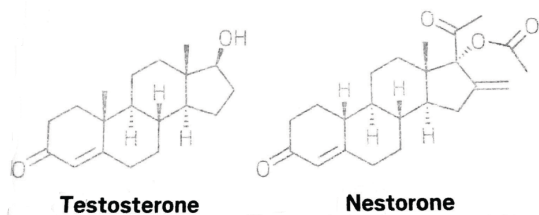


YCT-529는 RAR- β , γ 보다 RAR- α 를 약 500배나 효과적으로 억제한다. 수컷 쥐에 YCT-529를 경구로 4주를 먹이면 정충수를 극적으로 감소시켜 피임을 99%나 성공했다. 다행히 부정적 부작용은 관찰되지 않았다. 약을 중단하면 4~6주 후에는 다시 임신이 가능했다. 현재는 사람들에게 실험 중이며, 한편으로 YCT-529의 유도체에 대한 연구도 더 깊이 진행되고 있다. YCT-529의 부작용에 대한 연구도 더 자세히 진행되고 있다. RAR- α 가 고환 이외의 장소에서도 발현되므로 YCT-529와 유사화합물들이 특히 심장과 눈 등에 원치 않는 면역적 영향을 미칠 가능성에 유의하고 있다.

2. 경피적(피부에 바르는) 젤 – Nestrone/ Testosterone(NES/T) Gel

한 남성이 아침 샤워 후 자기 목 가까이 어깨에 젤을 바른다. 피부 보호를 위한 화장품이 아니고 바르는 남성용 피임젤이다. 이제 이 남성은 자기 짝과 임신 걱정없이 사랑을 나눌 준비를 마친 셈이다. 이 바르는 젤은 NES/T 젤이라 불리우는데, NES는 네스트론(nestorone, 합성 프로게스틴(progestin, 항체호르몬))을, T는 합성 테스토스테론(testosterone, 남성호르몬)의 약자들이다. 네스트론은 정충 개수를 줄이며 남성 호르몬 생성을 억제한다.

합성 테스토스테론은 젤에 넣으면 남성 혈액의 남성 호르몬 레벨을 안정화시켜 성욕 감퇴 등의 부작용을 줄여줌과 동시에 고환의 남성 호르몬 양을 줄여 불임이 되게 한다. NES/T 젤은 여러 곳에서 사람들을 상대로 임상 실험이



왼쪽: 활발한 정충, 오른쪽 IACI
(soluble adenylyl cyclase inhibitor) 존재 시 정충

진행 중이며 빠르면 금년 내에 그 사용이 허락될 것으로 예상된다.

NES/T 젤의 임상실험은 2018년 12월에 미국 국립아동보건인간발달 연구소(NICHHD)가 부부 420쌍을 대상으로 시작했으며, 그 실험결과는 매우 고무적이었다. NES/T 젤의 약효는 3일 정도 지속된다고 한다.

3. 남성용 경구 피임약 – 인도네시아의 젠다루사(Gendarussa)와 TAI-11861

인도네시아 파푸아섬 원주민들에게는 재미있는 풍습이 있다. 첫날 밤 신랑이 젠다루사라는 관목의 잎을 물에 끓여 먹어 신부가 임신을 하지 못하도록 한다. 결혼 지참금을 지불하기 전에는 신부의 임신을 방지하기 위해서다. 즉 젠다루사 잎은 자연적인 피임약을 포함하고 있는 셈이다. 인도네시아 아이랑가 대학 밤밤 프라조고 박사 연구팀은 젠다루사 추출물의 성분으로 경구용 남성 피임약을 알약으로 개발하였다. 그들 연구 결과에 따르면 성관계 1시간전에 이 피임약을 먹으면 99%의 피임 효과를 얻는다고 한다. 현재까지는 젠다루사가 정자의 힘을 감소시켜 난자에 도달할 수 없게 만드는 것이 피임의 원리로 알려져 있으나 그 정확한 메카니즘은 더 많은 연구를 필요로 한다. 그러나 추출물의 정확한 조성 및 각 성분의 약리작용(부작용 포함)에 관한 정보가 더 밝혀지기 전에는 광범위한 이용까지는 시간이 많이 걸릴 것이 예상된다. 현재 젠다루사는 인도, 말레이시아, 스리랑카 등의 숲에서 많이 발견된다. 젠다루사 잎 추출물은 Spermatozoan hyaluroni-

dase 효소를 경쟁적으로 가역적 억제하는 능력을 지니고 있음이 밝혀졌다. 이런 까닭에 젠다루사가 많은 관심을 끌고 있다.

최근에 미국 뉴욕의 웨일 코넬 의대의 Melanie Balbach가 이끄는 연구팀은 고환과 정자에서 활성인 아데닐릴 시클라제(adenylyl cyclase, SAC)를 억제 또는 차단하는 신물질 TDI-11861을 발견했다. 가용성 아데닐 시클라제는 정자의운동을 조절하는 효소로 정자의 성숙과 이동에 중요한 메신저 물질을 생성하는 과정에 관여한다. TDI-11861 화합물은 고환과 정자에서 AC를 일시적으로 억제하는 능력을 지닌다. 수컷 쥐에 이 활성 성분을 투여하면, 정자가 적어도 2시간 30분 동안 운동을 중지하며 불임 상태를 유지했다. 약물을 투여한 지 8시간 후에 일부 수컷 쥐는 다시 생식능력을 되찾았고 24시간 후에는 모두 정상으로 돌아왔다.

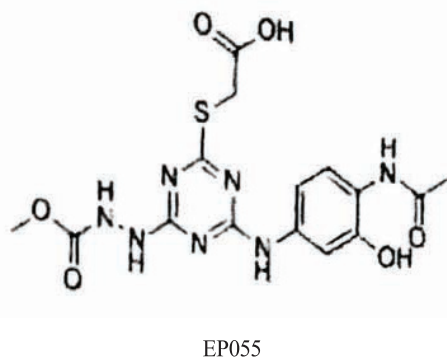
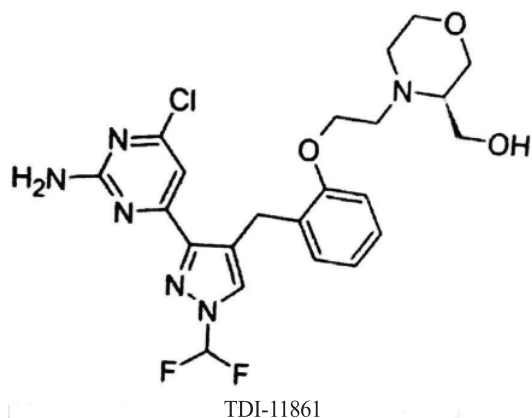
그러나 이 방법은 사람에게 적용하려면 고려하여야 할 점들이 있다. 사정 후 정자가 자궁경부를 통해 자궁에 들어가면 며칠동안 생존하며 수정될 수 있다. SAC는 몇 시간 동안만 능력을 보여주기 때문에 정자가 자궁경부를 통과

하지 못하게 막아야 한다. 질의 산성 환경에서는 빠르게 죽기 때문이다. Balbach 팀 등은 다른 동물들을 대상으로도 실험을 하고 있으며 인간 임상 실험이 곧 뒤따를 것으로 알려져 있다. 물론 TDI-11861이 그대로 사용될 것인지 아니면 일부 구조적 변경이 필요한지는 후어나 밝혀지리라 믿는다.

4. 정자의 이동을 막는 피임법

미국의 벤처 기업인 에핀파마(Eppin Pharma)는 2018년 4월에 정자에 들러붙어 이동성을 감소시키는 EP055라는 약물을 피임약으로 개발했다고 발표한 바 있다.

원숭이를 대상으로 한 연구에서 효과적인 피임 능력을 관찰했다. 또한 투약을 중지한 지 18일 후에야 생식 능력을 회복했다. EP055는 부고환의 단백질분해효소 억제 유전자(EPPIN)에 결합해 정자의 운동성을 감소시켜 남자 세



포 속으로 침투하는 능력을 떨어트린다. 정자의 운동성을 감소시키는 약은 정자 생산을 증

단시키는 약보다 약 효과가 신속한 장점을 지닌다. 정자 표면 단백질 EPPIN은 분명히 비호르몬적 피임법의 타겟으로 전망이 밝다. Cornell 대학의 벡(Jochen Buck)과 레빈(Lonny Levin)도 유사한 접근법으로 남성들의 피임약을 개발하고 있다. 그들이 실험하고 있는 약은 시클릭 인산아데노신(Cyclic adenosine monophosphate, CAMP) 생산을 막아 정자의 수영 능력을 없앤다.

5. 기타 남성 피임법 - 베이슬젤(또는 바살젤, Vasel Gel)

비영리 기관인 파세무스 재단(Parsemus Foundation, 미국)이 Revolution Contraceptive 및 NEXT 생명과학(Life Sciences)와 공동개발한 남성 피임 방법으로 고분자 젤을 수정관에 주사해 정자는 차단하나 사정은 허락하는 비호르몬적 피임 방법이 있다.

고분자젤은 스티렌과 말레산(SMA)의 교대 공중합체로 DMSO에 용해시켜 놓았다. 이 고분자는 수정관에서 히드로젤을 만들어 부드러운 젤 꼴로 사정관 벽에 들러붙는다. 토끼를 실험동물로 사용했을 때 매우 효과적인 방법임이 밝혀졌으며, 금년 말 경에 인간을 상대로 한 실험에 들어갈 듯 하다. 바살젤을 제거하면 원상태로 복구된다. 인도에서 10년 이상을 실험해오고 있다. 인도에서는 구하(Sujoy K. Guha, IIT Kharapur) 주도 하에 바살젤과 동

일한 접근법을 사용해 남성용 피임법을 개발하고 있으며 RISUG(reversible inhibition of sperm under guidance)라는 제품명으로 알려져 있다.

미국 예일대 의대 교수인 정(Chung Jean-Ju, 세포생물학사) 박사는 Cat Sper라고 짧게 부르는 Cation channels of sperm 단백질에 관한 연구에 전념하고 있다. Cat Sper를 생산하는 유전자를 비활성화시켜 정자의 운동력을 감소시키고 난자의 침투를 막으면 피임이 가능하다는 아이디어로 세계적 관심을 끌고 있다.

맺는말

남성들을 위한 피임법 개발의 필요성을 새삼 강조할 필요가 없다. 지난 20여년 이상을 안심 피임법 개발에 여러 연구진들이 투신해왔으며 10여년 전부터 중요하게 생각하게 된 비호르몬적 피임법이 세계적 관심을 끌게 되었다. 호르몬적 방법에는 여러가지 부작용이 관찰되었으나, 비호르몬적 방법은 훨씬 부작용이 적다고 보고되고 있다. 따라서 앞에서 설명한 비호르몬적 방법을 이용한 남성피임이 곧 가능해지리라 믿는다. 이미 임상실험을 FDA로부터 허가받아 남성들을 상대로 실험이 여러 곳에서 진행되고 있다. 희망적인 생각으로는 앞으로 5년 내에 비호르몬적 남성용 피임법이 상용화되리라 믿는다. 이런 날이 오면 주로 여성들이 짐을 지고 있는 피임의 부작용에서 벗어날 수 있으리라 믿는다.

1. (사)한국전기화학회 정회원 가입

1998년 2월 설립된 (사)한국전기화학회가 2023년 6월 1일 본 회의 이사회 승인으로 정회원으로 가입하여, 총 6개 정회원 학회로 연합회의 규모가 커졌으며 또한, 한국전기화학회의 성원은 학회장님을 제17차 화학연합 포럼의 연사로 초빙하여 “화학산업에서 전기화학의 역할”을 주제로 강연을 듣는 뜻깊은 자리도 마련했다.

THE KOREAN
ELECTROCHEMICAL
SOCIETY

한국전기화학회

[연혁]

- 1998. 2. 12. 창립총회 개최
- 1998. 12. 28. 전기화학회지 창간호(Vol. 1, No. 1) 발간
- 2010. 5. 31. 기술지 "E. Chem Magazine" 창간호(Vol. 1, No. 1) 발간
- 2010. 9. 3. 영문지 "JECST" 창간호(Vol. 1, No. 1) 발간

[회원수] 11,499

[주요 학술활동]

〈학술지〉

- ㉠ Journal of Electrochemical Science and Technology (JECST)
- ㉡ 전기화학회지(Journal of the Korean Electrochemical Society, JKES)
- ㉢ E. Chem Magazine

〈학술대회〉 - 춘 · 추계로 학술대회 개최

2. 제17차 화학연합 포럼 개최

- 일 시: 2023년 6월 1일(목)
- 장 소: 프레지던트호텔 19층 아이비홀
- 주 제: 화학산업에서 전기화학의 역할
(Electrochemistry in Chemical Industry)



화학연합회 소 식

[프로그램]

17:20~17:30 접수

사회: 박종욱 총무이사

17:30~17:40 개회사: 김희택 회장

17:40~18:30 (성영은 / 한국전기화학회 회장,
서울대학교 화학생물공학부 교수)

18:30~19:00 질의응답

3. 2023년 한국화학관련학회연합회 특별심포지엄

- 일 시: 2023년 11월 10일(금)
- 장 소: 광주 김대중컨벤션센터 L(302)
- 주 제: 첨단화학소재공정 심포지엄 (Advanced Chemical Materials & Processing Symposium)

[프로그램]

좌 장: 서영웅 (한양대학교)

12:30~12:50 2SL-1 이정현 (고려대학교)
마랑고니 유도 폴리아마이드 나노분리
막 형성 (Marangoni instability-driven for-
mation of polyamide nanofilm membranes)

12:50~13:10 2SL-2 이창현 (단국대학교)
과불소계 이오노머의 위기와 기회
(Risks and opportunities of
perfluorinated onomers)

13:10~13:30 2SL-3 김정욱 (광주과학기술원)
tRNA 변형 효소의 구조 생화학
(Structural biochemistry of
tRNA modifying enzymes)

13:30~13:50 2SL-4 손해정 (한국과학기술연구원)
고분자 필름의 나노구조 제어를 통한
신축성 전자소자 개발(Development of

stretchable electronic devices by control of
nanostructures of polymer film)

13:50~14:10 2SL-5 남수지 (한국전자통신연구원)
모노리식 3차원 적층을 위한 100nm 이
하의 채널길이를 갖는 고성능 p형 텔루
륨 박막트랜지스터 (High performance
p-type Tellurium thin-film transistors with
sub-100nm channel length for monolithic
3-dimensional integration)

14:10~14:30 2SL-6 유필진 (성균관대학교)
p-페닐렌디아민 가교 바인더-전해질
일체형 초분자 설계 및 이의 리튬이차
전지 응용 (p-Phenylenediamine-bridged
binder-electrolyte-unified supramolecules
for versatile lithium secondary batteries)



4. 제15회 ‘화학산업의 날’ 기념행사

화학산업의 발전과 경제성장에 기여한 화학산업인의 공로를 포상하고자 한국화학관련학회연합회와 한국석유화학협회가 주최하는 제15회 ‘화학산업의 날’ 기념행

사를 10월 31일 롯데호텔 그랜드볼룸(2층)에서 개최했다. 화학산업 발전에 기여한 공로로 KPX케미칼(주) 최재호 대표이사가 은탑산업훈장을 받았으며, 에쓰오일(주) 정동건 부문장이 동탑산업훈장을 수상하는 등 39명에 대해 정부포상이 수여됐다.

〈유공자 포상 명단〉

	소속	성명	직위	비 고
은탑산업훈장	KPX케미칼(주)	최재호	대표이사	
동탑산업훈장	에쓰오일(주)	정동건	부문장	
산업포장	에프로티움(주)	김정상	부사장	
대통령표창 (2명)	부산광역시청	김동현	지방서기관	
	(주)캠트로스	이동훈	대표이사	
국무총리표창 (3명)	Sk이노베이션(주)	김일수	담당	
	(주)LXMMMA	김창호	공장장	
	연세대학교	박철민	교수	
	전라남도청	강원구	주무관	
	한화토탈에너지스(주)	고민수	팀장	
	SK이노베이션(주)	김기엽	PM	
	한국바스프(주)	김대호	상무	
	대한유화(주)	김동준	책임연구원	
	연세대학교	김병수	교수	
	금호석유화학(주)	김중호	부장	
	한화솔루션(주)	김창열	과장	
	한진케미칼(주)	김철형	대표이사	
	한국과학기술연구원	김희숙	책임연구원	
	SK이노베이션(주)	박민규	PL	
	롯데케미칼(주)	박지현	본부장	
	(주)모다모다	배형진	대표이사	
	디엘케미칼(주)	성덕훈	상무	
	(주)에이케이지	신진웅	대표이사	
	한양대학교	신흥수	교수	
산업통상자원부 장관표창 (34명)	금호석유화학(주)	양건호	상무	
	HD현대케미칼(주)	유세영	책임매니저	
	성균관대학교	유희진	교수	
	롯데케미칼(주)	이규선	부문장	
	TKG휴켄스(주)	이영석	수석	
	금호피앤비화학(주)	이용준	차장	
	고등기술연구원	이진욱	연구전문위원	
	(주)LG화학	이호경	상무	
	(주)태창화학	임성빈	대표이사	
	(주)굿솔루션	장도훈	대표이사	
	(주)에이치알에스	정진수	부사장	
	한국화학연구원	전남중	책임연구원	
	(주)LG화학	최병우	파트장	
	한국화학연구원	최원춘	책임연구원	
	고려대학교	최정규	교수	
	TKG휴켄스(주)	함중우	책임	
	한화토탈에너지스(주)	허순규	상무	
	한화솔루션(주)	허충일	팀장	

화학연합회 소 식



5. 2024년도 수석부회장 조원일 박사 추천

연합회 정관 제10조에 의거하여 2025년도 담당학회인 한국전기화학회 추천으로 조원일 박사(한국과학기술연구원)가 수석부회장으로 추천되었다.

6. 2024년 신년교류회 안내

- 일 시: 2024년 1월 10일 (수) 오후 3시
- 장 소: 한국과학기술회관 12층 SC컨벤션 아나이스홀

[회의록]

[2023년 제2차 이사회 회의록]

- 일 시: 2023년 6월 1일(목요일) 오후 5시
- 장 소: 프레지던트호텔 19층 아이비홀
- 참 석: 이사: 김희택, 김병국, 김윤희, 남산, 박종욱, 신석민, 심상준, 유필진, 윤호규, 이동훈, 이진원, 정옥상, 정진석, 조우석 (14명), 감사: 이준영 (1명)

1. 성원 보고

– 재적 이사 18명 중 참석 이사 14명, 감사 1명 참석으로 정관 제24조 1항에 규정된 이사회 개최에 필요한 정족수(재적 이사 과반수)가 성원되었음을 보고하고 한국화학관련학회연합회 2023년 제2차 이사회 개최를 선언함.

2. 개회선언

– 김희택 회장이 한국화학관련학회연합회 2023년 제2차 이사회 개최 선언 및 개회사를 함.

3. 2023년 상반기 회무 보고

– 박종욱 총무 이사가 2023년 2.21.~6.1일까지의 주요 회무와 사업계획을 보고함. (회의자료 P2.)

4. 한국전기화학회 정회원 가입 승인 건

- 박종욱 총무이사가 정회원 가입 승인 안건을 보고하고 안건으로 상정함. (회의자료 P2.)
- 한국전기화학회의 연합회 참여를 적극적으로 환영하고 동의함. (이진원 이사)
- 김희택 회장이 참석이사들의 제정에 따라 한국전기화학회의 가입을 최종적으로 승인 함.

- 1) 한국전기화학회 정회원 승인
- 2) 한국전기화학회 연혁 · 회원 수 · 학술활동 정보 공유함
- 3) 정회원 수 변동에 따른 연합회 담당 학회 순서 확정함. (회의자료 P3.)

5. 정관 개정(안) 심의 건

— 박종욱 총무이사가 정관 개정(안) 심의 안전에 대하여 설명하였으며, 참석이사들이 개정(안)에 대해 심의 후 참석이사 전원의 찬성으로 정관 개정(안)을 총회에 상정하기로 함.

6. 기타 토의

7. 폐회

— 김희택 회장이 이사회 폐회를 선언함.

[제1차 운영이사회 회의록]

- 일 시: 2023년 10월 12일 목요일 12시
- 장 소: 판교 호무랑
- 참석자: 김희택 회장, 박종욱 총무이사, 송옥

1. 보고사항

→ 박종욱 총무이사가 연합회 사업 일정을 간략하게 보고함

1) 회의 일정

(1) 제1차 편집운영이사회 개최

- 일 시: 2023년 1월 30일(월) 오후 4시
- 장 소: 토즈 강남컨퍼런스점
- 내 용: 7명의 편집운영이사가 참석하여 화학연합 15권 1호 발간에 대해 논의 하고 1호, 2호 발간 준비의 세부 담당자 설정함

(2) 제1차 이사회 및 제35차 총회 개최

- 일 시: 2023년 2월 21일(화) 오후 6시
- 장 소: VIP참치
- 내 용: 2022년 사업 및 재무 결산, 수정예산(안) 의결

(3) 제2차 이사회 개최

- 일 시: 2023년 6월 1일(목) 오후 5시
- 장 소: 프레지던트호텔 19층 아이비홀
- 내 용: ① 한국전기화학회 정회원 가입 승인
② 정관개정 - 한국전기화학회가 정회원으
로 가입하여 정관 제12조(임원의 선임방법)
에 근거하여 임원의 수를 늘려야 함.

(4) 2024년 수석부회장

- 조원일 박사 (한국전기화학회 / 한국과학기술연구원)

(5) 임시총회 (서면회의) 개최

- 회신기간: 2023년 6월 12일(월) ~ 19일(월)
- 내용: 정관개정-신규 단체(한국전기화학회)의 가입으로 정관개정의 필요성이 생겨 전제 대의원 70명 중 대의원 45명의 찬성으로 정관 제12조의 개정(안)을 승인 함.

(6) 감독청에 6월 20일 정관 변경 신청해서 6월 23일 개정 승인 받음

(7) 제2차 편집운영이사회 개최

- 일 시: 2023년 8월 18일(금) 오후 4시
- 장 소: 토즈 강남컨퍼런스점
- 내 용: 6명의 편집운영이사가 참석하여 화학연합 15권 2호 발간에 대해 논의함

2) 사업일정

(1) 신년교류회 개최

- 일 시: 2023년 1월 6일(금) 오후 3시
- 장 소: 한국과학기술총연합회관 12층 SC컨벤션 아나이스홀

화학연합회 소식

(2) 제17차 화학연합 포럼 개최 (6/1)

- 주 제: 화학산업에서 전기화학의 역할
(Electrochemistry in Chemical Industry)
- 연 사: 성영은 (한국전기화학회 학장 / 서울대학교 교수)
- 장 소: 프레지던트호텔 19층 아이비홀

(3) 화학연합 15권1호 발간 (6/9)

- 인쇄부수: 1,550부 단체발송: 1,499부

(4) 화학연합 15권1호 e-book 발행: 5개 학회 뉴스레터 및 회원 메일 발송 요청

(5) 제15회 화학산업의 날 포상 후보자 추천 (6/8) 및 포상 내용

성명	소속	직위	포상
유필진	성균관대학교	교수	장관표창
이진욱	고등기술연구원	연구전문위원	

3) 2023년 연합회 상반기 수입·지출 및 하반기 수입·지출 [첨부자료]

→ 박종욱 총무이사가 연합회 상반기 수입·지출에 대해 보고하고 하반기 수입과지출내용에 대해 검토한 후 계획대로 집행하기로 함.

2. 연합회 하반기 회의 일정 및 사업계획

1) 회의 일정 토의

(1) 자문위원회 회의 개최 건

- 일 시: 미정
- 내 용: 자문위원과 현·차기 회장, 총무이사가 참석해서 2023년도 사업보고 후 차기 임원이 2024년 예산 및 사업계획 보고 후 자문위원 의견 청취
→ 11월 15(수), 16(목), 22(수), 23(목) 회람 후 참석 인원이 많은 날을 회의 일로 선정하여 공지하고, 참석하시는 위원들께 드릴 기념품을 준비하기로 함.

(2) 제2차 이사회 및 제36차 총회 개최 건

- 일 시: 미정
- 내 용: 2023년도 사업 보고 및 2024년도 임원, 사업계획 및 예산 승인
→ 12월 5(화), 6(수), 7(목)을 회람 후 참석 인원이 많은 날을 이사회 개최일을 정하고, 회의장소 예약 후 이사들께 회의 안내 공지하기로 함.

(3) 편집운영이사회 송년모임 건

- 일 시: 미정 (11월 초에 일정 회람 예정)
- 내 용: 화학연합 15권2호 업무 분담 확인
→ 편집위에 일임하기로 함

2) 사업일정

(1) 제15회 화학산업의 날 포상 행사

- 일 시: 2023년 10월 31일(화)
- 장 소: 롯데호텔서울크리스탈볼룸(2F) 오후 5시
- 내 용: 화학산업 발전에 공이 큰 유공자 포상
→ 예년과 같이 회장님이 연합회를 대표하여 참석하기로 함

(2) 한국화학관련학회연합회 특별심포지엄 개최

- 일 시: 2023년 11월 10일(금) 광주 김대중컨벤션
- 장 소: 광주 김대중컨벤션 L(302)
- 주 제: 첨단화학소재공정 심포지엄

→ 점심 식사는 11시 30분으로 장소 정해서 예약 후 연사들께 공지하기로 함

(3) 미래화학인재상 - 7개 영재과학고등학교에 추천 공문 발송 예정 (11월)

학교	
서울과학고등학교	경기과학고등학교
대구과학고등학교	대전과학고등학교
광주과학고등학교	한국과학영재학교
경남과학고등학교	

→ 일정에 맞춰 진행하기로 함

(4) 화학연합 15권 2호 인쇄본 및 e-book 발간 예정
(12월 초)

→ 일정에 맞춰 발간하기로 함.

2) 15권 2호 원고 마감 시한 : 10월 31일(화), 9월 31일
섭외 리스트 사무국으로 공유

3) 2023년도 화학연합 15권 표지 검토 건

[첨부파일 참조]

– 한국전기화학회의 정회원 가입으로 화학연합
표지 수정

[제2차 편집운영이사회 회의록]

- 일 시: 2023년 8월 18일 (금요일) 오후 4시
- 장 소: 토즈 강남컨퍼런스점
- 참석자: 유필진 수석 편집운영이사, 김정욱, 서영웅,
손해정, 이창현, 조정호 편집이사

1. 보고사항

(1) 화학연합 15권 1호 인쇄본과 e-book 발간 완료
(6/3)

2. 편집회의 안건

1) 이사별 연간 담당 업무 건

– 1차 편집회의 때 논의 한 내용(1/30) 대로 진행

3. 한국공업화학회 학술대회 특별세션 관련

1) 심포지움 일정 및 프로그램

2) 강연자료 사무국 전달 기한:

10월 25일 (수요일) → 강연자료는 제작하지 않기로 함.

3) 한국공업화학회 추계학술대회 참가등록여부:

심포지움에 참가하는 위원들은 일괄적으로 연합회
에서 참가 등록할 예정임. → 원안대로 결정함.

4. 기타 토의

1) 3차 편집운영이사회 일정

→ 11월경에 일정 회람하기로 함.

2024 신년교류회

한국화학관련학회연합회 회장 김병국

대한화학회 회장 이필호

한국고분자학회 회장 김윤희

한국공업화학회 회장 이동훈

한국세라믹학회 회장 조우석

한국화학공학회 회장 이진원

한국전기화학회 회장 이재준

일시 : 2024년 1월 10일(수요일) 오후 3시

장소 : SC컨벤션 강남점 아나이스홀
(한국과학기술관 12층) 2호선 강남역 12번 출구

오시는 길

서울시 성북구 안암로 119 한국화학회관 3층

Tel: 02-925-5271 / Fax: 02-925-5727 http://www.kucst.org E-mail: kucst@kucst.org

2023 대한화학회



신 석 민 (대한화학회 회장)

1. 제132회 학술발표회, 총회 및 기기전시회 개최 결과

1) 일시: 2023.10.25~27

2) 장소: 광주 김대중컨벤션센터

3) 주요일정

10월 25일(수)	
13:00~18:00	<ul style="list-style-type: none"> • [동진썬미켄-미래혁신 화학심포지엄] <ul style="list-style-type: none"> - 화학이 만드는 우리 인생의 이야기 (BKCS 연계 심포지엄) - 4차 산업혁명 시대 화학교육의 선진화를 위한 최신 화학 소개 - Sub-nm 급 반도체용 소재 혁신 위한 화학의 역할 - 엔트로피 접근법을 통한 고성능 다성분계 거대분자 소재 - 상 전이 거동에 대한 융합적 이해 • KCS-ACS Applied Bio Materials Research Publications Summit 심포지엄 • 젊은 화학자 특별심포지엄 • IBS 심포지엄
10월 26일(목)	
09:00~18:00	<ul style="list-style-type: none"> • 구두 발표 • 총회 • 기조강연 • 분과회 심포지엄 • 포스터 발표 및 기기전시회
10월 27일(금)	
09:00~18:00	<ul style="list-style-type: none"> • 이태규 학술상 수상 기념 강연 • KCS-RSC Joint 심포지엄 • 분과회 심포지엄 • 포스터 발표 및 기기전시회 • 중·고등학생 대상 진로 특강 • 미래화학자 연구발표회

4) 수상인

- 이태규 학술상: 최철호(경북대학교)
- 기술진보상: 황규영(삼성전자 SAIT)
- 초중등학교화학교사상: 박지훈(부산과학고)
- 우수박사학위논문상:
 - 김태희(연세대, ETH Zurich),
 - 이경진(서울대), 전소연(고려대),
 - 최지수(대구경북과학기술원)
- 우수지부상: 울산지부
- 화학경영자상: 이준혁((주)동진썬미켄)
- KCS-Wiley 젊은화학자상:
 - 임종우(서울대), 이윤미(연세대)
- Sigma-Aldrich 화학자상:
 - 고두현(성균관대), 김병수(연세대)
- 아이센스 여성화학자상: 윤재숙(성균관대)
- 공로패(Kcho2023 여름학교 교장)
 - : 강은주(경희대)



(포스터 발표 및 기기전시회)



(총회)



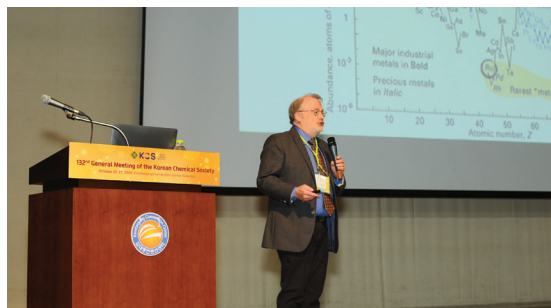
(대한화학회 회장)



(기조강연)



(ACS 심포지엄)



(RSC 심포지엄)



(이태규 학술상 수상)



(아이센스 여성화학자상 수상)



(Sigma-Aldrich 화학자상 수상)



(KCS-Wiley 젊은화학자상 수상)



(평의원회)



(2022-2023 운영위원)

2. 2024년 임원, 운영위원회, 각급 위원회

1) 임원

- 이사 – 이필호 (강원대학교, 회장),
신석민 (서울대학교, 전임회장),
강성호 (경희대학교),
구상호 (명지대학교),
김경규 (성균관대학교),
김민 (충북대학교),
김성환 (경북대학교),
김지만 (성균관대학교),
김형민 (국민대학교),
문봉진 (서강대학교),
신승훈 (한양대학교),
신은주 (순천대학교),
오한빈 (서강대학교),
이재준 (동국대학교),
이혁 (한국화학연구원),
정영미 (강원대학교),
조규봉 (서강대학교),
허정석 (충남대학교),
홍창섭 (고려대학교)
- 감사 – 이희승 (KAIST),
임현석 (POSTECH)

2) 운영위원회

회장	이필호	(강원대)	
차기회장	*회장 선출 규정에 의거하여 2024년에 선출 예정		
부회장 (7인)	오한빈	(서강대, 총무)	홍창섭 (고려대, 기획)
	신승훈	(한양대, 학술)	조규봉 (서강대, 홍보)
	박진균	(부산대, 국제협력)	이 혁 (화학연, 산학협력)
	박현주	(조선대, 교육)	
실무이사 (20인)	김형민	(국민대, 총무)	박성진 (인하대, 총무)
	김현우	(KAIST, 총무)	정광섭 (고려대, 기획)
	김두리	(한양대, 기획)	안현서 (연세대, 기획)
	송창식	(성균관대, 학술)	조은진 (중앙대, 학술)
	김석희	(서울대, 학술)	이현수 (서강대, 홍보)
	문회리	(이화여대, 홍보)	이준석 (한양대, 홍보)
	홍승우	(KAIST, 국제협력)	윤명한 (GIST, 국제협력)
	조소환	(POSTECH, 국제협력)	한수봉 (화학연, 산학협력)
	남기엽	(파로스아이바이오, 산학협력)	임상민 (KIST, 산학협력)
	김현우	(POSTECH, 교육)	이안나 (전북대, 교육)

3) 각급위원회 위원장

- 국제협력위원회 - 최철호 (경북대학교)
- 기금위원회 - 문봉진 (서강대학교)
- 여성위원회 - 정영미 (강원대학교)
- 연구실안전위원회 - 황승률 (화학물질안전원)
- 연구윤리위원회 - 구상호 (명지대학교)
- 정보화사업위원회 - 송재규 (경희대학교)
- 출판위원회 - 류도현 (성균관대학교)
- 학술위원회 - 임만호 (부산대학교)
- 학술지 간행위원회 - 이영호 (POSTECH)
- 한만정학술상위원회 - 정옥상 (부산대학교)
- 화학교육위원회 - 박현주 (조선대학교)
- 화학 대중화위원회 - 김태영 (GIST)
- 화학세계 편집위원회 - 조규봉 (서강대)
- 화학술어위원회 - 이동환 (서울대학교)
- 화학올림피아드위원회 - 양성익 (경희대학교)
- 화학전공 인증위원회 - 장우동 (연세대학교)

3. 2024년 주요 일정

1) 133회 학술발표회, 총회 및 기기전시회

- 일 시: 2024.4.24.~4.26
- 장 소: 수원 SCC

2) 134회 학술발표회, 총회 및 기기전시회

- 일 시: 2024.10.16.~10.18
- 장 소: 대구 EXCO

3) 화학올림피아드 2024 계절학교 (겨울학교)

- 일 시: 2024.1.8~1.20
- 장 소: POSTECH

(여름학교)

- 일 시: 2024.7.29.~8.10
- 장 소: 미정

4) 제56회 국제화학올림피아드 대회 참가

- 일 시: 2024.7.21~7.30
- 장 소: Riyadh, Saudi Arabia

5) 화학포스터 · 시화전

- 일 시: 2024년 4월 중

2023 한국고분자학회



김 교 현 (한국고분자학회 회장)

1. 2023 고분자포럼

- 주제: 친환경 고분자 소재

- 일시: 5월 19일(금) ~ 20일(토)
- 장소: 롯데리조트부여
- 참석자: 총 97명
- 후원사: 동우화인켐, 롯데케미칼(주),
(주)이녹스첨단소재, (주)KCC, (주)수림교역

2. 제31회 고분자아카데미 개최

- 일시: 7월 10일(월) ~ 11일(화)
- 장소: 부경대학교 대연캠퍼스 공학1관
다목적홀
- 참석자: 총 189명
(일반 74명, 특별회원사 16명,
학생 및 중소기업 99명)



3. 한국고분자학회 2024년도 수석부회장 및 24대 평의원 선거 결과 (온라인투표 실시)

- 1) 2023년 8월 28일(월) 수석부회장 선거결과
평의원(총 318명) 유권자(303명) 중 232명
이 투표를 하여 권용구 교수(인하대학교)
후보자가 2024년도 수석부회장 당선.
- 2) 제24대 평의원 (임기: 2024.1.1. ~
2025.12.31.)으로 총 325명 (당연직 14명)
선출.

4. 제26회 고분자신기술강좌 개최

- 일시: 10월 11일(수)
- 장소: 제주컨벤션센터
- 참석자: 총 95명
(강좌 I - 48명, 강좌 II - 47명)
- 주제:
I - 전고체 배터리 계면과 콜로이드 기술
II - 의료용 고분자 특성 분석 및 최신 동향

5. 2023 추계 정기총회 및 학술대회 개최

- 일시: 2023년 10월 11일(수)~14일(토)
 - 장소: 제주컨벤션센터
 - 발표논문수: 1,382편 (초청강연 207편,
구두발표 169편, 포스터발표 1,006편)
- 어느 때보다 청명한 가을 하늘을 맞이한 아름
다움이 가득한 섬 제주에서 2023년 고분자학
회 추계 정기총회 및 학술대회가 총1,382편(초

청강연 207편, 구두발표 169편, 포스터 1,006
편)의 논문발표와 2,550여명 참가로 역대 최대
등록을 기록하며 성공적으로 개최되었다.

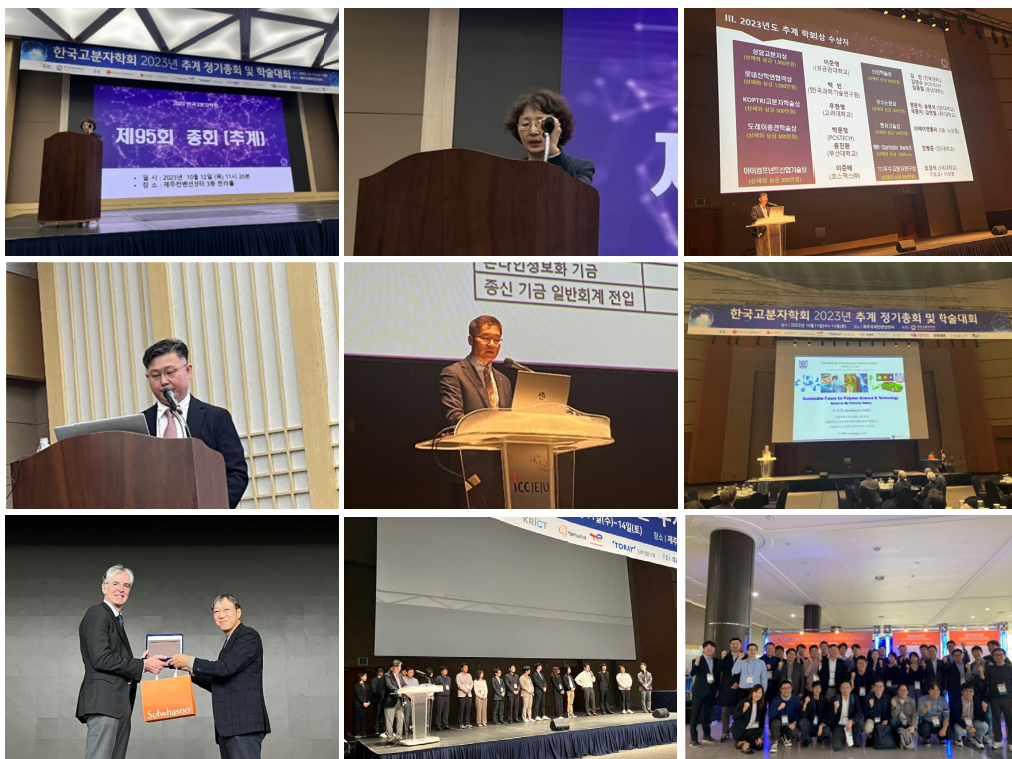
금번 학술대회는 대학원생, 학문후속세대(박
사후 연구원) 및 신진연구자들의 연구발표가 대
폭 확대되는 변화로 첫째날 수요일 오후부터
13개의 회장에서 활발한 발표와 토론이 진행되
었고, 토요일 오전에도 3개의 세션에서 온/오프
라인으로 훌륭한 발표들이 수행되는 등 질적 양
적으로 더욱 발전된 프로그램을 선보이며, 더욱
풍성하고 지속적인 고분자 연구에 이바지하며
발전하고 있음을 확인할 수 있었다.

학회 둘째날 오전에 열린 정기 총회에서는 김
윤희 수석부회장 외 149명(위임 50명 포함)의
출석으로 개최하여 2024년 예산(안), 2024년도
임원(안), 24대 평의원(안), 2024년도 사업계획
(안)이 만장일치 찬성으로 통과되었고 추계학
회상 시상식과 신입 펠로우회원 수여식 및 회
무보고가 있었다.

본 학술대회에서는 고분자의 전통적 활용부
터 새로운 응용, 다양한 기타 소재와의 융합까
지 우리 생활과 산업에서의 핵심소재인 고분자
의 미래를 제시하는 강연들로 구성되었다. 뉴
욕대학교의 David J. Pine교수와 서울대학교
차국현교수의 기초강연과 4개 부문위원회(분
자전자, 의료용, CAMA, 에코소재)를 포함한
19개의 일반발표분야 세션, 그리고 롯데케미
칼, LG화학 및 한국화학연구원 후원세션을 포
함한 12개의 특별발표분야 세션을 통해, 각 분
야의 전문성을 가지는 회원분들께서 최신 연
구동향 및 결과를 발표해주셨다. 특히 3개 부
문위원회를 포함하여 international 세션에서 대

만, 영국, 중국, 말레이시아, 호주 등 총 16분의 해외 연사분들을 모시고 우수한 연구결과를 공유함으로써 활발한 국제적인 학술교류의 장을 이룰 수 있었고 앞으로 고분자학회를 이끌고 발전시켜 주실 24분의 신진연구자분들께서 최신 고분자 연구결과를 발표해주셨다. 아울러, 이번 학회 기간동안 총 23개 업체의 기업홍보 부스(26 부스)가 운영되며 여러 다양한 기업들의 채용 및 연구장비와 시약에 대한 홍보가 활발히 이루어졌고 경품 추첨 행사에서는 기업홍보 부스를 방문한 회원들을 대상으로 (주)세진 씨아이가 후원한 맥북 에어를 비롯하여 아이패드 및 문화상품권, 스타벅스 상품권들이 80여 명에게 전달되었다.

이번 2023년 추계 정기총회 및 학술대회는 모든 회원분들의 열정적인 참여와 안정적인 학회 운영을 위해 도와주신 모든 후원사들 및 관계자분들을 통해 성공적으로 마무리될 수 있었다. 다양한 발표를 구성해 주신 학술위원님과 바쁘신 가운데 우수한 발표를 해주신 발표자 분들께 감사드립니다. 또한 시작부터 마무리까지 안정적인 학회 운영을 위해 수고해주신 사무국과 학회장이 효율적으로 진행될 수 있도록 조율하고 노력해 주신 운영이사님들, 무엇보다도 고분자학회를 아껴주시고 활발한 참여로 학술대회를 더욱 빛내주신 학회 회원님들께 감사드립니다.



6. 2023년 추계 학회상 수상자

명칭	금액	성명(소속)
상암고분자상	상패와 상금 1,000만원	이준영(성균관대학교)
롯데화학협력상	상패와 상금 1,000만원	박 민(한국과학기술연구원)
KOPTRI고분자학술상	상패와 상금 500만원	우한영(고려대학교)
아이컴포넌트산업기술상	상패와 상금 500만원	이준배(코스맥스)
도레이중견학술상	상패와 상금 500만원	박문정(POSTECH), 윤진환(부산대학교)
신진학술상	상패와 상금 200만원	김 민(전북대학교), 김연수(POSTECH), 임종철(충남대학교)
TCI우수고분자연구상	상패와 상금 300만원	오경석(연세대학교) (지도교수: 이상영)
우수논문상	상장과 상금 100만원	영문지: 송영석(단국대학교) 국문지: 김연철(공주대학교)
벤처기술상	상장과 상금 100만원	노상철(에이엔폴리)
MR-Springer Award	상패와 상금 500유로	진형준(인하대학교)
최우수논문발표상	상장과 상품	[구두(영어)] 권용현(연세대학교) 손정민(경북대학교) [구두(일반)] 박세환(서강대학교) 박진우(울산과학기술원) 이은지(고려대학교) 이주호(한국과학기술연구원) [구두(토론)] 기태윤(광주과학기술원) 김완태(한국과학기술원) 안정만(한양대학교) [포스터] 강민주(한국과학기술원) 김관호(연세대학교) 권하늬(한국생산기술연구원/고려대학교) 김다빈(숭실대학교) 김윤영(충남대학교) 김지윤(울산과학기술원) 김지홍(한양대학교)

명칭	금액	성명(소속)
최우수논문발표상	상장과 상품	[포스터] 박규림(연세대학교) 박민지(한양대학교) 박영서(한국과학기술원) 박정연(고려대학교) 신시아(한국과학기술원), 유경수(서울시립대학교) 윤여명(부산대학교) 이동준(대구경북과학기술원) 이진훈(울산과학기술원) 장우재(숭실대학교) 전연지(한국과학기술원) 최윤제(연세대학교) 한동엽(포항공과대학교)
우수논문발표상	상장과 상품	[구두(영문)] Gabriella Pasya Irianti(충남대학교) 백다혜(울산과학기술원) 오경석(연세대학교) 유도현(동국대학교) [구두(일반)] 김용주(한양대학교) 오승준(부산대학교) 임해랑(포항공과대학교) 홍지현(한국과학기술원) 이동근(한양대학교) 유지수(울산과학기술원) 최재원(포항공과대학교) 최준규(광주과학기술원) [구두(코스맥스)] 김상희(숭실대학교) 김정민(인천대학교) 전이강(포항공과대학교) [포스터] 강민지(고려대학교) 강성은(명지대학교) 구윤정(중앙대학교) 김건우(한국과학기술원) 김경규(부산대학교) 김성민(충남대학교) 김정규(고려대학교/KIST) 김진형(성균관대학교) 김태훈(서울대학교)

명칭	금액	성명(소속)
우수논문발표상	상장과 상품	노성훈(한양대학교)
		맹성규(한국과학기술원)
		박사람(한국화학연구원)
		박소영(울산대학교)
		박재형(광주과학기술원)
		변종현(충남대학교)
		손재림(한국과학기술원)
		우인선(한국기술교육대학교)
		윤수성(인하대학교)
		유동엽(한국과학기술연구원/고려대학교)
		이재욱(경북대학교)
		임도현(성균관대학교)
		임성준(울산과학기술원)
		전병학(연세대학교)
		전찬혁(서강대학교)
		정수정(숙명여자대학교)
		최성규(광주과학기술원)
		추수민(중앙대학교)
		태성관(서울대학교)
		한 별(부산대학교)
		한승희(한국과학기술연구원)
		홍지예(건국대학교)

11월 17(금)

주제I : 고분자 에너지 소재분석 (Organizer: 이기라 총무이사)		
09:30~10:50	Introduction to Advanced Synchrotron-based X-ray Characterization Techniques for Battery Materials Research	박성민 연세대학교
11:00~12:20	AC Field(유전체이완분광법) 및 Oscillatory Shear(레오미터) 측정을 통한 고분자전해질 분석	최우혁 인하대학교
13:40~15:00	고분자소재의 전기화학적 특성 분석과 이차전지 응용	권지연 KIST
15:10~16:30	엑스선 영상기술을 이용한 배터리소재 분석	임 준 포항공속기연구소
주제II : 기능성 고분자 '소재분석시간' (Organizer: 류두열 전무이사)		
09:30~10:50	고분자 소재의 생분해도 측정 및 평가방법	곽효원 서울대학교
11:00~12:20	기체분리막 특성 평가 및 분석	지원석 전남대학교
13:40~15:00	DMA를 활용한 기능성 고분자 소재 분석	위정재 한양대학교
15:10~16:30	시분해 광전자분광분석을 활용한 전도성 고분자 분석법	임종철 충남대학교

7. 제45회 고분자기기분석 개최

- 일시: 2023년 11월 16일(목)~17일(금)
- 장소: 한국화학연구원 대강당
- 프로그램

11월 16(목) (Organizer: 류두열 전무이사)		
09:30~	등 록	
10:10~10:20	개회사	이상수 한국고분자학회부회장
	축 사	이영국 한국화학연구원 원장
10:20~12:00	고분자 분석의 개요	최길영 한국화학연구원
11:00~12:20	TEM을 이용한 고분자 소재 분석	이은지 GIST
13:40~15:00	방사광 기반 x-선 산란 및 회절을 이용한 고분자 소재 분석	안형주 포항공속기연구소
15:10~16:30	고분자 열분석의 이론 및 적용	김 현 한국화학연구원
16:40~18:00	NMR기법을 사용한 고분자 구조 및 운동성 분석	한옥희 KBSI

8. 2024년도 학회주관 사업

	학회사업	일시	장소
1	동계워크샵	1. 8(월) - 9(화)	곤지암리조트
2	제27회 고분자 신기술 강좌	4.3(수)	제주컨벤션센터
3	춘계총회 및 연구논문발표회	4. 3(수) - 5(금)	제주컨벤션센터
4	2024 고분자 포럼	5. 17(금) - 18(토)	부여롯데리조트
4	제32회 고분자 아카데미	7. 8(월) - 9(화)	부경대학교 대연캠퍼스
7	제28회 고분자 신기술 강좌	9. 30(월)	부산컨벤션센터
8	추계총회 및 연구논문발표회	9. 30(월) - 10. 2(수)	부산컨벤션센터
9	제46회 고분자 기기분석	11. 6(수) - 7(목)	한국화학연구원

2023 한국공업화학회



심상준 (한국공업화학회 회장)

1. 2023 한국공업화학회 추계 총회 및 학술대회 개최

- 일자 및 장소: 11/8(수)~11/10(금),
김대중컨벤션센터
- 규모
[참가자] 2,400여명
[논문발표] 1,690편

2023 추계 총회 및 학술대회가 11월 8일(수)~10일(금) 2박3일에 걸쳐 광주 김대중컨벤션센터에서 개최되었다. 총 1,690편(구두 발표 320편 및 포스터 발표 1,370편)의 논문이 발표되었으며, 추계 학술대회 중 역대 최대 규모인 2,400명 이상이 참석한 가운데 성대하게 진행되었다. 이로써 올해 춘계 및 추계 학술대회는 6,000명 이상이 참석하여 국내 정상급 학술대회답게 질과 양 모든 면에서 좋은 모습을 유지하였다.

특히 이번 대회는 화학산업 규제 혁파 특별 심포지엄과 3개의 기술교육세미나(“공업화학

과 기능성 소재: 2D 구조체 합성에서 응용까지”, “전기화학 분석이론 및 응용”, “환경 에너지 그린나노촉매 핵심기술”)를 비롯하여, 기초 연사로 Shi-Zhang Qiao 교수(The University of Adelaide)가 “Electrocatalytic Refinery for Production of Fuels and Chemicals” 주제를, 선양국 교수(한양대학교)가 “High-Energy Ni-Rich Layered Cathode Materials for Electric Vehicles” 주제로 강연을 했다.

동시에 각 분과회와 위원회에서 진행한 산업체의 연구동향, 최근 핵심연구개발 이슈들에 관한 특별 심포지엄, 미래 창조 한국의 성장동력을 이끌어갈 미원상사신진과학자포럼, 대학생 및 전문대학생 실험 캠프, 우수외국인연구자 세션을 포함한 학생우수논문발표, 포스터발표 그리고 기기전시 등 다양한 프로그램들로 신기술과 연구에 관한 많은 정보와 지식을 공유할 수 있는 산 학 연 학술교류의 장이 되었다.



〈평의원 및 임원회의 개회사: 심상준 회장〉



〈화학산업 규제혁파 특별 심포지엄〉



〈기조강연: Prof. Shi-Zhang Qiao (The University of Adelaide)〉



〈기조강연: 선양국 교수(한양대학교)〉



〈대학생 및 전문대학생 실험 캠프〉



〈전시부스〉



〈포스터 발표장〉



〈등록대〉



2. 2023 추계 평의원 및 임원 회의

- 일시 및 장소: 11/8(수) 17:00,
홀리데이 인 광주호텔 컨벤션홀

지난 11월 8일 홀리데이 인 광주호텔 컨벤션홀에서 2023 추계 평의원 및 임원 회의가 개최되었다. 춘계 이후의 본부 및 각 분과회, 위원회, 지부의 주요 회무 보고가 있었으며, 심의 안건으로 2024년도 사업계획 및 예산 심의와 임원 제청이 통과되어 총회에 상정하였다.

3. 2023 추계 총회

- 일시 및 장소: 11/9(목) 11:20,
김대중컨벤션센터 다목적홀

지난 11월 9일 김대중컨벤션센터 다목적홀에서 총회를 개최하였다. 춘계 이후의 본부 및 각 분과회, 위원회, 지부의 주요 회무 보고가 있었으며, 심의 안건으로 2024년도 사업계획 및 예산 심의와 임원 인준이 참석자 전원 찬성으로 통과되었다.

4. 2023 추계 학술대회 수상자 및 감사패 수여자

구분	수상자
감사패(2)	Prof. Shi-Zhang Qiao(The University of Adelaide) 선양국 교수(한양대학교)
제16회 한국공업화학상	박종욱 교수(경희대학교)
제2회 자원미래기술상	유필진 교수(성균관대학교)
제21회 대주기술상	박영호 고문(아모레퍼시픽)
제20회 대주산학연협력상	조정호 교수(연세대학교)
제5회 대주인공지능 4차산업기술혁신상	황성원 교수(인하대학교)
제1회 대주바이오학술상	정규열 교수(포항공과대학교)
제11회 동남합성이의갑회장상	유효종 교수(한양대학교 에리카)
제11회 경인양행김동길회장상	신동식 부교수(숙명여자대학교)
제2회 미원상사미래여성인재상 (연구계및산업계)	안진주 선임연구원 (한국화학연구원)
제1회 예코파워텍우수연구자상	고은주 학술연구교수(경희대학교)
제2회 JIEC Most Influential Paper Award	(국내)고민재 교수(한양대학교) (해외 공동수상) Prof. Muhammad Maqbool (The University of Alabama at Birmingham) Qasim Khan(Shenzhen University) Muhammad Ikram (University Lahore)

구분	수상자
제15회 미원상사 신진과학자상(10)	남대현 조교수(DGIST) 박기호 조교수(전남대학교) 박인혁 조교수(충남대학교 분석과학기술대학원) 양동수 조교수(고려대학교) 이성수 선임연구원(KIST) 이은호 조교수(금오공과대학교) 이인규 조교수(부산대학교) 이종욱 조교수(국립순천대학교) 이찬현 조교수(울산대학교) 황종국 조교수(아주대학교)
제4회 코스맥스우수연구상(2)	강동규(한양대학교 석박통합과정) 이혜성(연세대학교 석박통합과정)
제5회 우수봉사상(2)	안재성(전남대학교) 정유혁(전남대학교)



〈제21회 대주기술상: 박영호 교수(아모레퍼시픽)〉



〈제20회 대주산학연협력상: 조정호 교수(연세대)〉



〈제16회 한국공업화학상: 박종욱 교수(경희대)〉



〈제5회 대주인공지능 4차산업기술혁신상: 황성원 교수(인하대)〉



〈제2회 재원미래기술상: 유필진 교수(성균관대)〉



〈제11회 동남합성이의갑회장상: 유효종 교수(한양대메리카)〉



〈제11회 경인양행김동길회장상: 신동식 교수(숙명여대)〉



〈제15회 미원상사신진과학자상 수상자〉



〈제2회 미원상사미래여성인재상: 안진주 박사(한국화학연구원)〉



〈제4회 코스맥스우수연구상 수상자〉



〈제1회 에코파워텍우수연구자상: 고은주 학술연구교수(경희대)〉



〈제5회 우수봉사상 수상자〉



〈제2회 JIEC MIPA: 고민재 교수(한양대)〉

5. 그 외 학술행사

(1) 글로벌 이슈에 대한 공업화학의 기회와 도전 특별 심포지엄

- 일자 및 장소: 6/29(목)~30(금), 강원대학교 삼척캠퍼스 그린에너지관 국제회의장
- 주관: 한국공업화학회 공업화학편집위원회 [위원장: 이기세 교수(명지대)]



(2) 제15회 하계 Workshop

- 일자 및 장소: 7/10(월)~12(수), 평창 알펜시아리조트
- 주제: 지속가능성과 과학기술 혁신을 위한 공업화학



(3) 여성인재육성위원회 하계 워크숍

- 일자 및 장소: 8/10(목)~11(금), 호암교수회관 컨벤션센터
- 주관: 국립환경과학원, 한국공업화학회 여성인재육성위원회 [위원장: 김은주 박사(DGIST)]

(4) 탄소중립과 ChatGPT시대의 공업화학 특별 심포지엄

- 일자 및 장소: 8/23(수)~24(목), 여수 유담마리나호텔 그랜드볼룸
- 주관: 한국공업화학회 공업화학전망 편집위원회 [위원장: 김상범 교수(경기대)]



(5) 제3회 그린에너지 소·부·장(소재·부품·장비) 세미나

- 일자 및 장소: 8/24(목)~25(금), 경상국립대학교(온·오프라인 하이브리드)



- 주관: 한국공업화학회,
경상국립대학교 그린에너지융합연구소

(6) 제28회 도료 코팅 기술 심포지엄

- 일자 및 장소: 11/24(금),
한양대학교(ERICA) 컨벤션
- 주제: Advances in Coating Technology 2023
- 주관: 한국공업화학회 도료·코팅분과회
[분과회장: 김주영 교수(강원대)]

(7) 한국공업화학회-한국막학회 공동심포지엄

- 일자 및 장소: 12/14(목)~15(금),
한국화학연구원 디딤돌프라자
- 주제: 탄소중립 실현을 위한 차세대
청정에너지 생산 저장 및 활용 기술

6. 2024년 주요 일정

행사명	일자	장소
학회 2024 운영과 발전을 위한 워크숍	1/11(목)~12(금)	대전 롯데시티호텔
춘계 총회 및 학술대회	5/8(수)~10(금)	부산 벅스코
하계 워크숍	7/15(월)~17(수)	추후공지
추계 총회 및 학술대회	10/30(수)~11/1(금)	광주 김대중컨벤션센터
신 구 임원 상견례 및 송년모임	12/9(월)	양재동 엘타워

7. 2024 임원(이사, 감사)

직책	성명	소속 및 직위
회장	이동훈	(주)켄트로스 대표이사
수석부회장	성영은	서울대학교 화학생명공학부 교수
부회장(학계)	강미숙	영남대학교 화학과 교수
	김상범	경기대학교 화학공학과 교수
	박광웅	중앙대학교 화학신소재공학부 교수
	박종욱	경희대학교 화학공학과 교수
	이우걸	단국대학교 화학공학과 교수
	이호원	제주대학교 화학공학과 교수

직책	성명	소속 및 직위
부회장(연구계)	강진규	대구경북과학기술원 에너지융합연구부 책임연구원
	김기현	한국전자통신연구원 초실감메타버스연구소 실감디스플레이연구실 책임연구원
	김정훈	한국화학연구원 C1가스탄소융합센터 연구위원
	박선민	한국세라믹기술원 우주항공융복합소재센터 수석연구원
	유복열	KIST 물질구조제어연구센터 연구전문위원
	최창식	고등기술연구원 플랜트엔지니어링본부 수석연구원
부회장(산업계)	홍영택	한국화학연구원 화학소재본부 책임연구원
	김진동	(주)레이크머티리얼즈 대표이사
	서병희	아모레퍼시픽 R&I 센터 CTO
	심재원	재원산업(주) 대표이사
	임일지	대주전자재료(주) 대표이사 사장
	조남웅	(주)대명케미칼 대표이사
감사	황성관	엠에프씨(주) 대표이사
	이기세	명지대학교 환경에너지공학과 교수
	김영기	한경대학교 화학공학과 교수
	전무이사	신승한 한국생산기술연구원 친환경융합소재연구부문 수석연구원
	총무이사	임상혁 고려대학교 화공생명공학과 교수
	기획이사(선임)	봉기완 고려대학교 화공생명공학과 교수
재무이사(선임)	이경진	충남대학교 응용화학공학과 교수
	조직이사(선임)	황성원 인하대학교 화학공학과 교수
	조직이사(부선임)	배준원 동덕여자대학교 응용화학 교수
	재무이사(부선임)	주지봉 건국대학교 화학공학부 교수
	재무이사(부선임)	우상혁 중앙대학교 화학신소재공학부 부교수
	학술이사(총계)(선임)	최정규 고려대학교 화공생명공학과 교수
학술이사(추계)(부선임)	오준학	서울대학교 화학생명공학부 교수
	조정호	연세대학교 화공생명공학부 교수
	이은지	광주과학기술원 신소재공학부 교수
	홍보이사(선임)	한양대학교 재료화학공학과 교수
	홍보이사(부선임)	한국화학연구원 분리막연구센터 책임연구원
	국제협력이사(선임)	성균관대학교 화학공학/고분자공학부 교수
국제협력이사(부선임)	박종혁	연세대학교 화공생명공학과 교수
	김현철	서강대학교 화공생명공학과 교수
	김기범	(주)경인양행 연구소 이사
	이혜진	경북대학교 화학과 교수
	편집이사(공업화학)(선임)	

직책	성명	소속 및 직위
편집이사 (공업화학)(부선임)	이재영	광주과학기술원 지구·환경공학전공 교수
편집이사 (JIEC)(선임)	유효중	한양대학교 재료화학공학과 교수
편집이사 (JIEC)(부선임)	박성영	한국교통대학교 화공생물공학과 교수
편집이사 (공업화학전망) (선임)	서지훈	고려대학교 신소재공학과 교수
편집이사 (공업화학전망) (부선임)	김일태	가천대학교 화공생명공학과 교수
편집이사 (JIEC자매지)(선임)	김태현	한양대학교 재료화학공학과 교수
편집이사 (JIEC자매지) (부선임)	이현호	명지대학교 화학공학과 교수

8. 2024 운영위원회

직책	성명	소속 및 직위
전무이사	신승한	한국생산기술연구원 친환경융합소재연구부문 수석연구원
총무이사	임상혁	고려대학교 화공생명공학과 교수
기획이사(선임)	봉기완	고려대학교 화공생명공학과 교수
기획이사(부선임)	이경진	충남대학교 응용화학공학과 교수
기획이사	고현협	울산과학기술원 에너지화학공학과 교수
	윤순도	전남대학교 화공생명공학과 교수
	전주원	국민대학교 응용화학부 부교수
조직이사(선임)	황성원	인하대학교 화학공학과 교수
조직이사(부선임)	배준원	동덕여자대학교 응용화학공학과 교수
조직이사	엄영호	부경대학교 고분자공학과 조교수
재무이사(선임)	주지봉	건국대학교 화학공학부 교수
재무이사(부선임)	이상혁	중앙대학교 화학신소재공학부 부교수
재무이사	박정원	서울대학교 화학생물공학부 부교수
	윤상준	한국화학연구원 분자막연구센터 선임연구원
학술이사 (총계)(선임)	최정규	고려대학교 화공생명공학과 교수
학술이사 (총계)(부선임)	오준학	서울대학교 화학생물공학부 교수
학술이사(총계)	박성준	성균관대학교 화학공학/고분자공학부 부교수
	이동욱	울산과학기술원 에너지및화학공학부 교수
	조계용	부경대학교 공업화학전공 부교수

직책	성명	소속 및 직위
학술이사 (총계)(선임)	조정호	연세대학교 화공생명공학부 교수
학술이사 (총계)(부선임)	이은지	광주과학기술원 신소재공학부 교수
학술이사(총계)	박종혁	한국과학기술연구원 책임연구원
	박현지	아주대학교 분자과학기술학과 조교수
	정재현	숭실대학교 화학공학과 부교수
홍보이사(선임)	이화성	한양대학교 재료화학공학과 교수
홍보이사(부선임)	이장용	한국화학연구원 분자막연구센터 책임연구원
홍보이사	김명진	경북대학교 수소 및 신재생에너지학과 조교수
	하민정	광주과학기술원 신소재공학부 조교수
국제협력이사(선임)	박호석	성균관대학교 화학공학/고분자공학부 교수
국제협력이사 (부선임)	박종혁	연세대학교 화공생명공학과 교수
국제협력이사	박대환	충북대학교 공업화학부 부교수
	방석호	성균관대학교 화학공학/고분자공학부 부교수
	윤창민	한밭대학교 화학생명공학과 조교수
	인수일	대구경북과학기술원 에너지공학전공 교수
산학연협력이사 (선임)	김현철	서강대학교 화공생명공학과 교수
산학연협력이사 (부선임)	김기범	(주)경인양행 연구소 이사
산학연협력이사 (연구계)	백연경	한국재료연구원 분말세라믹본부 선임연구원
	송태호	한국화학융합시험연구원 글로벌본부 본부장
	송호준	한국생산기술연구원 친환경융합소재연구부문 수석연구원
산학연협력이사 (산업계)	이재환	미원상사(주) 기능소재사업부 사업부 이사
	이준배	코스맥스(주) 이사
산학연협력이사 (학계)	박현웅	경북대학교 에너지공학부 교수
	유승호	고려대학교 화공생명공학과 부교수
	유필진	성균관대학교 화학공학/고분자공학부 교수
편집이사 (공업화학)(선임)	이혜진	경북대학교 화학과 교수
편집이사(공업화학) (부선임)	이재영	광주과학기술원 지구·환경공학전공 교수
편집이사 (공업화학)	김상훈	한국과학기술연구원 물질구조제어연구단 책임연구원
	김정원	강원대학교 에너지자원화학공학과 교수
	엄성현	고등기술연구원 수소에너지솔루션센터 수석연구원
	최진섭	인하대학교 화학공학과 교수
편집이사 (JIEC)(선임)	유효중	한양대학교 재료화학공학과 교수
편집이사 (JIEC)(부선임)	박성영	한국교통대학교 화공생물공학과 교수

직책	성명	소속 및 직위
편집이사(JIEC)	고문주	건국대학교 화학공학부 교수
	김정규	성균관대학교 화학공학/고분자공학부 부교수
	김중래	부산대학교 화공생명공학부 교수
	김형일	연세대학교 건설환경공학과 부교수
	박기태	건국대학교 화학공학부 조교수
	박영권	서울시립대 환경공학과 교수
	엄태식	홍익대학교 화학공학과 조교수
	원왕연	고려대학교 화공생명공학과 부교수
	이기봉	고려대학교 화공생명공학과 교수
	이윤성	전남대학교 화학공학부 교수
	이재상	고려대학교 건축사회환경공학부 교수
	이철진	중앙대학교 화학신소재공학부 부교수
	허윤석	인하대학교 생명화학공학부 교수
편집이사 (공업화학전망) (선임)	서지훈	고려대학교 신소재공학과 교수
편집이사 (공업화학전망) (부선임)	김일태	가천대학교 화공생명공학과 교수
편집이사 (공업화학전망)	김효원	한국에너지공과대학교 교수
	박세규	광운대학교 화학공학과 교수
	양민호	단국대학교 에너지공학과 교수
	이정태	경희대학교 식물환경신소재공학과 부교수
	임정아	한국과학기술연구원 차세대반도체연구소 책임연구원
편집이사 (JIEC자매지)(선임)	김태현	한양대학교 재료화학공학과 교수
편집이사 (JIEC자매지) (부선임)	이현호	명지대학교 화학공학과 교수
편집이사 (JIEC자매지)	김석	부산대학교 화공생명공학부 교수
	최중훈	중앙대학교 융합공학부 교수

9. 2024 위원장

직책	성명	소속 및 직위
공업화학편집	남상용	경상국립대학교 나노신소재공학부 고분자공학전공 교수
JIEC편집	이준엽	성균관대학교 화학공학/고분자공학부 교수
공업화학전망편집	이창현	단국대학교 에너지공학과 교수
JIEC자매지(가칭)편집	이상호	국민대학교 건설시스템공학부 교수
교육	윤성훈	중앙대학교 융합공학부 교수
국제협력	이종휘	중앙대학교 화학신소재공학부 교수
산학연협력	오병근	서강대학교 화공생명공학과 교수
술어제정	남성찬	한국에너지기술연구원 기후변화연구본부 책임연구원

직책	성명	소속 및 직위
여성인재육성	양성운	충남대학교 유기재료공학과 교수
연구윤리	여민경	경희대학교 환경학 및 환경공학과 교수
운영	신승한	한국생산기술연구원 친환경융합소재연구본부 수석연구원
중장기발전	김진웅	성균관대학교 화학공학/고분자공학부 교수
포상	성영은	서울대학교 화학생물공학부 교수
학술	김주현	부경대학교 고분자공학과 교수

10. 2024 분과회장

직책	성명	소속 및 직위
고분자	이현정	국민대학교 신소재공학부 교수
나노	심봉섭	인하대학교 화학공학과 교수
도료·코팅	김주영	강원대학교 신소재공학과 교수
디스플레이	이태우	서울대학교 재료공학부 교수
무기재료	박종남	UNIST 바이오메디컬공학과 부교수
생물공학	김중래	부산대학교 화공생명공학부 교수
생체재료	박성영	한국교통대학교 화공생물공학과 교수
석유화학·재생연료	하정명	한국과학기술연구원 청정에너지연구센터 책임연구원
에너지저장·변환	이상영	연세대학교 화공생명공학과 교수
전기화학	김점수	동아대학교 화학공학과 교수
정밀화학	전종호	경북대학교 응용화학공학부 교수
촉매	서영웅	한양대학교 화학공학과 교수
콜로이드·계면화학	최시영	KAIST 생명화학공학과 조교수
펄프·제지	정명준	전북대학교 목재응용공학과 부교수
화학공정	원왕연	고려대학교 화공생명공학과 부교수
화학물질 안전·위해성	김선미	한국화학연구원 화학분석센터 선임연구원
환경·에너지	허윤석	인하대학교 생명화학공학부 부교수

11. 2024 지부장

직책	성명	소속 및 직위
강원	권병완	강원대학교 삼척캠퍼스 에너지자원화학공학과 조교수
광주·전남	홍창국	전남대학교 화학공학부 교수
대구·경북	정인우	경북대학교 응용화학학과 교수
대전·세종·충남	채호정	한국화학연구원 화학공정연구본부 책임연구원
부산·울산·경남	이정규	동아대학교 화학공학과 교수
전북	성병기	(주)한농화성 연구소장(이사)
제주	목영선	제주대학교 생명화학공학과 교수
충북	이지훈	한국교통대학교 나노화학소재공학과 교수

2023 한국세라믹학회



김병국 (한국세라믹학회 회장)

1. 2023년도 춘계학술대회 및 총회 개최

- 일시: 2023년 4월 12일(수) ~ 14일(금)
- 장소: 라마다프라자 제주호텔
- 발표논문수: 1,062편

4월 12일(수)부터 3일간 라마다프라자제주 및 오리엔탈호텔에서 열린 2023년 춘계학술대회는 일반 세션 9개에 더하여 12대 국가전략기술 핵심소재를 메인 테마로 하는 총 58개 세션에서 1,062편의 발표 논문으로 구성되어 1,800명이 넘는 인원이 참석하여 활발한 논의가 이루어졌고 젊은 연구원들과 대학원 학생들의 미래를 위한 학술 교류의 장을 만들었다.



〈무인등록대〉



〈세라미스트의 밤〉



〈일반세션 및 특별세션〉



〈포스터세션〉



〈전시부스〉

2. 2023년도 추계학술대회 및 총회 개최

- 일시: 2023년 10월 18일(수) ~ 20일(금)
- 장소: 서울 코엑스
- 발표논문수: 997편

1) 10월 18일(수)부터 3일간 서울 코엑스에서 열린 2023년 한국세라믹학회 추계학술대회에서는 일반 세션 9개에 더하여 “국가전략기술, 산업계에 묻다”를 메인 테마로, “국가전략기술 · 초격차 미래산업재료” 분야 총 50개 세션에서 997편의 논문이 발표되고 국제화를 위한 노력의 일환으

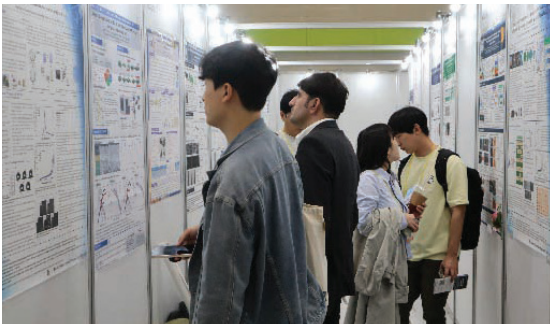
로 Journal of Asian Ceramic Societies 심포지엄, Asia-Oceania Ceramic Federation (AOCF) 심포지엄, 미국세라믹학회 한국챕터 심포지엄 등을 편성하였으며 유럽세라믹학회와의 정기적인 인력 교류를 위한 MOU를 체결하였다. 이번 학술대회에는 총 1700명에 달하는 많은 인원이 참석을 하였으며, 학술대회 전기간 병행운영되는 영어세션, KCerS 포스터 스피치어워드 및 KCerS 주니어 리셉션도 신설하여, 세라믹 분야 차세대 연구자들을 위한 다양한 발표 기회와 전문적인 강연을 제공하였다.



〈기조강연〉



〈일반세션 및 특별세션〉



〈포스터세션〉



〈세라미스트의 밤〉



〈유럽세라믹학회 MOU 체결〉

3. 2023년도 학회상 수상자

포상명	수상자 성명	수상자 소속
공로상	남산	고려대학교
학술상	이종호	한국과학기술연구원
기술상	김종우 유도준	SK엔펠스 (주)센텍코리아
학술공로상	한병동	한국재료연구원
학술진보상	박대환 명재하 임원빈	충북대학교 인천대학교 한양대학교
기술진보상	정인철	(주)소울머티리얼
SK엔펠스 산학연구상	이순일 교수 연구실(창원대학교)	

포상명		수상자 성명	수상자 소속
학술공로상		변재철	연세대학교
공로상		황진명	인하대학교
		이영국	한국화학연구원
		김형준	한국과학기술연구원
성육상		이해원	두산H2이노베이션
KICET 학술연구상		강기석	서울대학교
젊은세라미스트상 PACRIM		김미소	성균관대학교
대주신진과학자상		정창규	전북대학교
SK엔펠스 산학연구상		문경석	경상국립대학교
진명상		이연승	한밭대학교
진명상(신진)		김다빈	토론토대학교
양송논문상		장정호	한국세라믹기술원
학술기여상	금상	이강택	한국과학기술원
	은상	전석우	고려대학교
	동상	김승민	한국과학기술연구원
특별상 (JCR Q1 진입)		윤당혁	영남대학교
		홍성현	서울대학교
		김일두	한국과학기술원
		장호원	서울대학교
		김수영	고려대학교
		박대환	충북대학교
		명재하	인천대학교
산업통상자원 장관상(상진) “세라믹의 날” 시상		이승환	한국생산기술연구원
		황선경	서울대학교

4. 2024년도 학술대회 및 총회

1) 춘계학술대회 및 총회

- 일시: 2024년 4월 17일(수) ~ 19일(금)
- 장소: 부산 BEXCO

2) 추계학술대회 및 총회

- 일시: 2024년 10월 16일(수) ~ 18일(금)
- 장소: 서울 COEX

5. 2024년도 학회지 발간 사업

1) Journal of the Korean Ceramic Society (국제학술지)

제 61권 1~6호 발행(1, 3, 5, 7, 9, 11월 발행)

2) 세라미스트 (국내학술지)

제 27권 제 1~4호 발행(3, 6, 9, 12월 발행)

2023 한국화학공학회



류 승 호 (한국화학공학회 회장)

1. 2024년도 한국화학공학회 운영진

◀ 제55대 임원(이사회) ▶

구 분	성 명	소 속	직 위
회 장	이진원	서강대학교	교수
수석부회장	김방희	제이엔케이히터(주)	대표이사
학술부회장	한중희	한국에너지공과대학교	교수
산업계부회장	이종구	LG화학	CTO(부사장)
지부부회장	고영수	공주대학교	교수
감 사	이동현	성균관대학교	교수
	이원규	강원대학교	교수
이 사	김민찬	제주대학교	교수
	김우재	이화여자대학교	교수
	김종학	연세대학교	교수
	김희연	한국에너지기술연구원	책임연구원
	문준혁	고려대학교	교수
	박해경	한서대학교	교수
	송광호	고려대학교	교수
	엄영순	한국과학기술연구원	책임연구원
	이도창	한국과학기술원	교수
	장호식	한화토탈에너지스	부사장(연구소장)

◀ 제55대 임원(운영위원회) ▶

구 분	성 명	소 속	직 위
회 장	이진원	서강대학교	교수
수석부회장	김방희	제이엔케이히터(주)	대표이사
학술부회장	한중희	한국에너지공과대학교	교수
산업계부회장	이종구	LG화학	CTO(부사장)
지부부회장	고영수	공주대학교	교수
총무이사	김우재	이화여자대학교	교수
	이도창	한국과학기술원	교수
재무이사	문준혁	고려대학교	교수
	문종호	충북대학교	교수
조직이사	김종학	연세대학교	교수
	이기봉	고려대학교	교수
학술이사	강태욱	서강대학교	교수
	박호석	성균관대학교	교수
	홍수린	차 의과학대학	교수
	김영기	포항공과대학교	교수
	김우열	한국에너지공과대학교	교수
	제정호	부산대학교	교수
	이효민	제주대학교	교수
	최인수	강원대학교	교수
	유필진	성균관대학교	교수
	고현협	울산과학기술원	교수
기획이사	김수현	고등기술연구원	책임연구원

구 분	성 명	소 속	직 위
사업이사	엄영순	한국과학기술연구원	책임연구원
	박은덕	아주대학교	교수
	백준현	숙명여자대학교	교수
	임형규	강원대학교	교수
	김석기	아주대학교	교수
국제이사	박영준	광주과학기술원	교수
	박정원	서울대학교	교수
	이상헌	이화여자대학교	교수
	이규복	충남대학교	교수
산학이사	김희연	한국에너지기술연구원	책임연구원
	엄문호	GS칼텍스	책임연구원
	최장욱	서울대학교	교수
	원왕연	고려대학교	교수
	오상준	한화토탈	전무
홍보이사	연영주	강릉원주대학교	교수
	이은정	경북대학교	교수
	전영시	전남대학교	교수
	정용진	한국교통대학교	교수

2. 2023년도 여름 특별 심포지엄 성공적 개최

2023년도 여름 특별 심포지엄은 7월 12일(수)부터 14일(금)까지 델피노리조트(속초)에서 한국화학공학회 본부 주관으로 개최되었습니다. ‘새로운 시작: 다시 도약하는 화학공학, 경계를

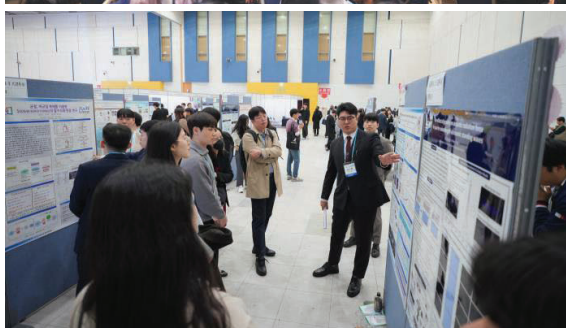


넘어 미래로’라는 주제 아래 3개의 강연이 진행되었고, 앞으로 화학공학이 나아가야 할 바에 대해 다시 한번 정리하고 생각할 수 있는 좋은 기회가 되었습니다.

3. 2023년도 가을 총회 및 국제 학술대회

한국화학공학회 2023년도 가을 총회 및 국제 학술대회는 “새로운 시작: 다시 도약하는 화학공학, 경계를 넘어 미래로”라는 주제로 대전 컨벤션센터에서 10월 25일(수)부터 27일(금)까지 개최되었습니다. 이번 학술대회에서는 국제 심포지엄의 성격에 맞추어 Solar Fuels 와 Chemicals에 대한 International Symposium과 “Beginning New Era of Chemical Engineering: Leaping Again over the Boundary toward the Future”라는 주제 하에 새롭게 도약하는 기술로서의 화학공학을 보여주는 다양한 기술 심포지엄과 세션이 구성되었습니다. 이번 학술대회에서 1,545편의 논문이 발표되었으며, 총 4,046명이 참석하여 성황리에 개최되었습니다.

이번 학술대회에서는 11명의 해외석학 강연이 진행되었으며, 금호석유화학, 롯데케미컬, SK지오센트릭, LG화학 후원으로 탄소중



립 ESG 가치확산을 위한 화학공학 대학생 한마당인 Chem Frontier Fun&Fun Festival이 열렸다. 또한 지속가능성과 탄소중립 및 신재생 에너지를 주제로 한 특별 심포지엄이 한국화학공학회와 에스-오일 과학문화재단, GS칼텍스, LG화학, SK이노베이션, 한화솔루션/한화토탈에너지스, HD현대오일뱅크 등 여러 기업의 공동주관 하에 열렸습니다. 이 외에도 계산화학, 기능성 소재/반도체 및 전자재료, 생체모방 탄소자원화기술, 수소 생산, 저장 및 활용기술, 이산화탄소 분리 및 활용기술, 이차전지소재 및 공정 기술, 탄소저감 공정기술/스마트공정, 화학공학일반의 8가지 주제로 구두 발표와 포스터 발표가 진행되었습니다. 또한, 4개의 Tutorial, 제33차 CEO 포럼, 여성위원회, 전문대학위원회, 한국에너지기술연구원, 한국화

학연구원, 에너지·환경소재공정조합설계연구단의 심포지엄이 학술회의 주제에 맞춰 구성되어 학술 및 인적 교류가 가능했습니다.

4. 2023년도 가을 총회 및 국제 학술회의 학회상 수상자 명단

학 회 상 (기금출연)	성 명	소 속
학술상 (GS칼텍스(주))	김민찬	제주대학교 화학공학과 교수
기술상 (OCI(주))	김영섭	도레이첨단소재 FILM 사업본부장
여성화공인상	엄영순	한국과학기술연구원 책임연구원

학 회 상 (기금출연)	성 명	소 속
범석논문상 (제7대 회장 故이재성 교수)	이창준	부경대학교 안전공학과 교수 논문제목: 주성분 분석과 서포트 벡터 머신을 이용한 폴리스티렌 중합 반응 기 이상 진단 모델 개발
심강논문상 (제19대 회장 故박원규 교수)	이지은	전남대학교 화학공학부 조교수 논문제목: Optimization of high-energy ball milling process for uniform p-type Bi-Sb-Te thermoelectric material powder
석명우수화공인상 (석명과학재단(제28대 회장 故권석명 부회장))	전종기	공주대학교 화학공학부 교수
형당교육상 (제33대 회장 이현구 교수와 그 문하생)	강정원	고려대학교 화공생명공학과 교수
윤창구상 (제19대 총무이사 故윤창구 박사 기념사업회)	임종구	GS칼텍스 팀장/부장
박선원 학술상 (박선원 교수)	임영일	한경대학교 화학공학과 교수
양정 생물화공상 (장호남 교수와 문하생)	차형준	포항공과대학교 화학공학과 교수
최창균 이동현상부문상 (제24대 총무이사 故최창균 교수 유가족)	교 육 부 문	
	류원선	홍익대학교 화학공학과 교수
	학 술 부 문	
우성일 재료상 (제7대 재료부문위원장 우성일 교수)	임도진	부경대학교 화학공학과 교수
	용기중	포항공과대학교 화학공학과 교수

5. 제55대 임원 워크숍 / 제1차 이사회 및 운영위원회

- 일시: 2024년 1월 11일(목)~12일(금)
- 장소: 곤지암리조트

6. 2024년도 총회 및 학술대회

■ 봄 총회 및 학술대회

- 일시: 2024년 4월 24일(수)~26일(금)
- 장소: 제주국제컨벤션센터

■ 가을 총회 및 국제 학술대회

- 일시: 2024년 10월 16일(수)~18일(금)
- 장소: 부산 BEXCO

7. 2023년도 제34차 CEO 클럽 조찬간담회

- 일시: 2023년 12월 5일(화)
- 장소: 인터컨티넨탈 서울 코엑스 30층 '주피터'
- 참석대상: CEO 클럽 회원

8. 2024년도 학회지 발간 사업

- Korean Chem. Eng. Res. (국문학술지)
제62권 제1~4호 발행(2, 5, 8, 11월 발행)
- Korean J. Chem. Eng. (영문학술지)
제41권 제1~12호 발행(매월 발행)
- 기술정보지(NICE)
제42권 제1~6호 발행(2, 4, 6, 8, 10, 12월 발행)

2023 한국전기화학회



성 영 은 (한국전기화학회 회장)

2024년도 한국전기화학회 운영진

1) 제 14대 임원(이사회)

구분	성명	소속
회장	이재준	동국대
산학협력부회장	김명환	LG에너지솔루션
	남학현	아이센스
	김윤창	삼성SDI
	이장원	SK이노베이션 배터리연구원
	박태성	한국전지산업협회
	오정강	엔캠
	김병욱	동진세미캠
	노권선	포스코퓨처엠
부회장	김동원	한양대
	윤원섭	성균관대
	송승완	충남대
	이혜진	경북대
	이재영	GIST
	이윤성	전남대
감사	정택동	서울대
	구회진	엔캠
총무이사	김현수	KERI
	김수길	중앙대
총무위원	임희은	KIST
	임종우	서울대
홍보이사	임태호	숭실대
	이진우	KAIST
홍보위원	조창신	POSTECH
	전일	성균관대
	정동영	KAIST
재무이사	이호준	DGIST
	이종원	한양대

2) 제 14대 임원(위원회)

구분	성명	소속
학술연구위원장	박진수	상명대
위원	이기영	인하대
	정원석	한경대
	김양래	광운대
	권영국	UNIST
	이민아	KIST
	김용태	전남대
	이세현	성신여대
	남대현	DGIST
산학협력위원장	임성열	경희대
	이영기	ETRI
위원	최성호	KRICT
	최익규	삼성SDI
	김제영	LG에너지솔루션
	선희영	SK Innovation
	김정환	포스코퓨처엠
	조성찬	삼성디스플레이
	김진욱	동진세미캠
	유상길	(주)엔캠
	홍영진	민테크
	김한준	CISOLID
	서명수	CORN
	김종은	씨엔피솔루션즈
	김영권	전북테크노파크
	전석우	고려대
	이용민	DGIST
	남경완	동국대
	서인석	전북대
	박상호	동신대

구분	성명	소속
교육·인력양성위원장	황성필	고려대
위원	장병용	부경대
	김병권	이화여대
	안현서	연세대
	박준희	충북대
	양승재	인하대
	윤하나	에기연
국문지편집위원장	봉성울	공주대
위원	류지현	한국공학대
	서민지	한국교원대
	한동훈	가톨릭대
	주형국	단국대
	조용현	순천향대
	최용욱	KITECH
영문지발전위원장	최창순	동국대
	윤원섭	성균관대
위원	김기재	성균관대
	김동하	이화여대
	김주훈	경희대
	박민식	경희대
	이동일	연세대
	이용민	DGIST
기술지편집위원장	박현웅	경북대
위원	문준영	인천대
	송정훈	포스코홀딩스
	이흥경	DGIST
	강병우	포항공대
	조현석	KIER
	김명진	경북대
	강순형	전남대
	김정규	성균관대
	김민	전북대
	백세웅	고려대
국제협력위원장	박호석	성균관대
위원	박원철	서울대
	박종혁	연세대
	송현곤	UNIST
	석정돈	KRICT
	최우혁	인하대
	권지연	KIST
	심지민	서울대
	박정진	KIST
	양우석	성균관대
	심욱	KENTECH
	이세찬	KIER
여성위원회위원장	변해령	KAIST
위원	서정숙	전남대
	황윤정	서울대
	신민정	성신여대
	조아라	강원대
수상위원장	양해식	부산대

구분	성명	소속
위원	권성중	건국대
	김진영	서울대
	김용태	POSTECH
	김웅	고려대
	박용준	경기대
	장종현	KIST
	김희탁	KAIST
	정경윤	KIST

3) 제 14대 임원(분과)

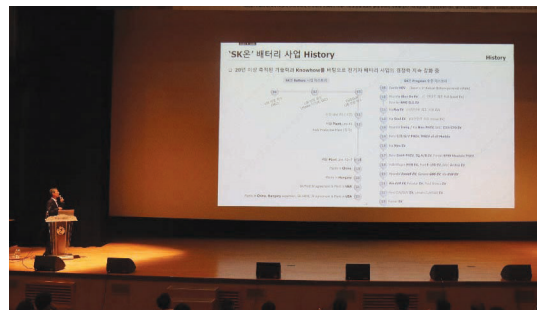
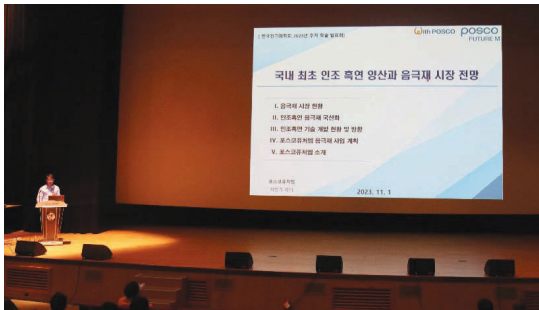
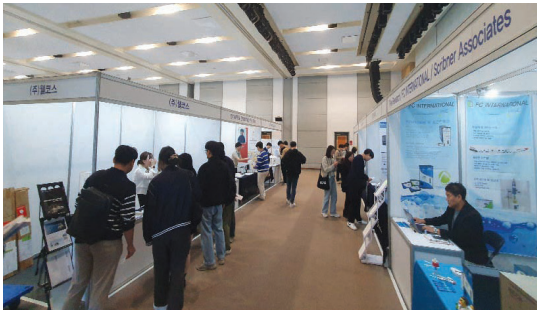
구분	성명	소속
물리전기화학	장병용	부경대
	안현서	연세대
바이오/분석전기화학	신익수	송실대
	배제현	충남대
	임홍철	상지대
이차전지	이창석	서울여대
	남상철	포스코 미래기술연구원
	이종원	한양대
	정훈기	KIST
연료전지	류원희	숙명여대
	김용태	POSTECH
	조성기	KIST
광전기화학	안지환	POSTECH
	민병권	KIST
	박종혁	연세대
	오지훈	KAIST
	김형주	KRICT
	김우열	KENTECH
	오형석	KIST
	김영훈	국민대
커패시터	김형석	KIST
	김현경	강원대
재료전기화학	강순형	전남대
	심욱	KENTECH
	남대현	DGIST
	진경석	고려대
환경전기화학	김상훈	KIST
	주형국	단국대

4) 제 14대 임원(지부)

구분	성명	소속
부산·울산·경남	하윤철	KERI
호남	이윤성	전남대

2. 2023년도 춘계 총회 및 학술발표회

- 일시: 2023년 11월 1일(수) - 3일(토)
- 장소: 여수엑스포컨벤션센터





3. 2023년도 추계 총회 및 학술발표회 학회상 수상자 및 감사패 수여자 명단

학회상(기금출연)	수상자	소속
기조강연 감사패	선희영	SK온
	Kang Xu	Solid Energy Systems
한국전기화학상	오승모	UNIST
아이센스 학술상(아이센스)	신익수	송실대
JECST 우수논문상	장병용	부경대
이차전지분과 학술상	이상영	연세대
이차전지분과 신진연구자상	김종순	성균관대
	곽원진	UNIST
연료전지분과 학술상	조한익	건국대
	신태호	KRICT
연료전지분과 신진연구자상	명재하	인천대
	임태호	송실대
광전기화학분과 신진연구자상	조한희	UNIST
환경전기화학분과 학술상	이기영	인하대
학생발표 경진대회 대상	정나현	POSTECH
학생발표 경진대회 최우수상	이진희	인하대
	이현태	DGIST
학생발표 경진대회 우수상	강민주	고려대
	구분호	서울대
	김수빈	GIST
	김태민	고려대
	박종원	DGIST
	신석민	UNIST
	이지호	서울대
	조수근	서울대
	진송	KIMS, GIST
	황려윤	KBSI, 충남대
	홍정수	중앙대
	나재도	건국대
	김원영	연세대
	이효빈	DGIST
	김수환	DGIST
	임민홍	DGIST
	노지훈	DGIST
	김미연	RIST
	현혜정	서울대
	김한결	인하대
우수포스터상	유성보	강원대
	허정연	경북대
	이소연	DGIST
	이정우	성균관대
	강주희	영남대
	손지윤	동아대
	장홍준	중앙대
	안진호	성균관대

학회상(기금출연)	수상자	소속
우수포스터상	손준표	연세대학
	정재엽	KETI, 고려대
	김준태	KIST, 한양대
	전서영	숙명여대
	임종민	KIST, 고려대
	백주은	KIER, 충북대
	윤성호	인하대
	이진이	KIMS
	김지환	송실대
	허인철	한양대 ERICA 캠퍼스
	유하영	KIST, GIST
	공상혁	KIST, 고려대
	마아현	부산대
	조영인	GIST
	박연주	KIMS, 부산대
	박종혁	상명대
	강동훈	KIER, 부산대
	김지영	인하대
	배수안	GIST
	김옥희	해군사관학교
	이정아	KAIST
	나병철	KITECH, 한양대
	김지원	KAIST
	정석훈	송실대
	유동근	순천대
	이경아	서울대, IBS
	이수환	KIER, 충남대
	성보석	금오공대
	김한솔	KIST, 고려대
	이은준	고려대
	권연주	KIMS
	송현비	상명대
	이지윤	성균관대
	박승희	조선대
	최형욱	성균관대
	강지훈	UNIST

4. 2023년도 학회지 발간 사업

– 전기화학학회지 (국문지)

- 제26권 1~4호(2,5,8,11월 발행)

– Journal of Electrochemical Science and Technology (영문지)

- 제14권 1~4호(2,5,8,11월 발행)

– E.Chem (기술지)

- 제14권 1~2호(5,11월 발행)

5. 한국전기화학회 분과 행사

– 물리전기화학분과

1) 제 7기 전기화학학교

- 행사 일자: 2023년 1월 16일(월) ~ 1월 17일(화)
- 행사 장소: 서울대 관악캠퍼스 26동 B1층 101

2) 한국전기화학회 물리전기화학분과-대한 화학회 전기화학분과 합동 동계 심포지엄 2023

- 행사 일자: 2023년 2월 16일(목) ~ 2월 17일(금)
- 행사 장소: 부산 해운대 페어필드 바이 메리어트 호텔

3) 제 8기 전기화학학교

- 행사 일자: 2023년 6월 22일(목) ~ 6월 23일(금)
- 행사 장소: 서울대학교 자연과학대학 28동 101호

– 이차전지분과

1) 2023 이차전지분과 동계워크숍

- 행사 일자: 2023년 2월 23일(목) ~ 2월 25일(토)
- 행사 장소: 파르나스 호텔 제주

2) 2023년도 전지기술심포지엄

- 행사 일자: 2023년 8월 17일(목) ~ 8월 18일(금)
- 행사 장소: 서울 세종대학교 광개토관

– 연료전지분과

1) 2023년도 수전해 및 연료전지 인력양성 교육

- 행사 일자: 2023년 8월 28일(월) ~ 8월 28일(월)
- 행사 장소: KIST 본관 존슨강당

2) 2023년도 수소·연료전지 심포지엄

- 행사 일자: 2023년 8월 29일(화) ~ 8월 29일(화)
- 행사 장소: KIST 본관(A1) 존슨강당

– 재료전기화학분과

2023하계 워크숍: 전기화학기반 에너지신기술

- 행사 일자: 2023년 7월 31일(월) ~ 8월 01일(화)
- 행사 장소: 전남대학교 공과대학4호관 코스모스홀

– 커패시터분과

2023년 초고용량 커패시터 기술동향 동계 심포지엄

- 행사 일자: 2023년 2월 23일(목)
- 행사 장소: 대전 화학연구원 디딤돌 프라자 4층 강당



한국화학연구원

1. 새로운 항암제 개발을 위한 국내 최초 '에텍(ATTEC)'플랫폼 기술 개발

- 전 세계적으로 주목받는 TPD 기술의 일종인 에텍(ATTEC) 플랫폼 기술 개발 및 유효 물질 도출
- 공동연구 기업 찾아 인터비즈 포럼서 소개 ... 향후 다양한 항암제 및 희귀질환 치료제 개발 계획
- 한국화학연구원(원장: 이영국)은 기존 표적 항암제로 치료할 수 없는 암을 치료하기 위한 '에텍(ATTEC, AuTophagosome-TEthering Compound)' 플랫폼 기술을 개발했다. 연구원은 연구결과를 5일 '인터비즈 바이오 파트너링&투자 포럼'*에서 소개해, 다양한 항암제 개발을 위한 공동연구 기업을 찾는다.

* 국내 제약·바이오·벤처·스타트업기업, 출연연, 대학, 보건의료관련기관 등이 보유하고 있는 유망기술 등에 대해 실수요자와의 기술이전, 라이선싱, 공동연구, 투자유치 등을 통한 실용화 연계 가능성을 높여 기술 확산 및 상업화를 촉진하기 위한 포럼(주최 : 인터비즈 바이오 파트너링&투자포럼 조직위원회, 주관 : 한국대학기술이전협회, 한국발명진흥회, 한국보건산업진흥원, 한국산업기술평가관리원, 한국생명공학연구원, 한국연구소기술이전협회, 한국특허기술진흥원, 한국특허전략개발원, 한국화학연구원, 순천향대학교, 과학기술사업화진흥원, 대구경북첨단의료산업진흥재단, 첨단의료바이오연구원, 한국신약개발연구조합)

- 암 등의 질병 유발 및 활성화와 관련이 있는 여러 가지 단백질 중 기존 표적 항암제나 치료제로 치료할 수 없는 질병 단백질의 비중이 높은 편이다. 따라서 이를 치료하기 위한 새로운 기술의 필요성이 널리 알려져 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 가운데 최근 타겟 단백질 분해 기술

질병 관련 단백질

기존의 저분자 약물이
저해 가능한 단백질

13%

약물표적으로
적합하지 않은 단백질
25%



기존 약물로 저해가 불가능한

"UNDRUGGABLE" 단백질

62%

인 ‘TPD* 기술’이 전세계적으로 주목받고 있다.

* Targeted Protein Degradation

- 사람은 대략 30~60조 개의 세포로 이루어져 있으며, 이 세포 안에 다양한 기능을 가진 단백질들이 상호작용하며 생명현상이 일어나간다. 세포 내 단백질은 끊임없이 새로 생기고 없어지기를 반복하는데, 쓸데없는 단백질이 생기면 인체는 여러 시스템을 통해 이를 분해한다. 이러한 인체 내 단백질 분해 시스템은 크게 ‘프로테아좀’과 ‘리소좀’ 기전으로 나눌 수 있는데, 이를 이용해서 치료제를 개발하는 것을 ‘TPD 기술’이라고 한다.

- ‘TPD 기술’에는 ‘프로테아좀’ 기전을 이용한 ‘프로탁’(PROTAC, Proteolysis Targeting Chimera) 기술과 ‘리소좀’ 기전을 이용한 ‘에텍’(ATTEC) 기술 등이 있다. ‘프로탁’ 기술은 치료제 다수가 임상 진행 중에 있지만 크기가 큰 단백질은 분해할 수 없다는 한계가 있다. ‘리소좀-오토파지’ 시스템을 이용한 기술은 ‘프로탁’이 분해할 수 없는 큰 물질까지 분해할 수 있어 ‘프로탁’을 보완할 수 있는 기술로 떠오르고 있다. 관련 연구가 2016년 노벨생리의학상을 받는 등 세계적인 관심도가 높은 상황이다.

* 쓸모없거나 손상된 단백질이 생기면 그 주위를 동그랗게 싸는 막이 생기고, ‘리소좀’이라는 단백질이 막 안으로 들어와 손상된 단백질을 분해하는 생체 시스템

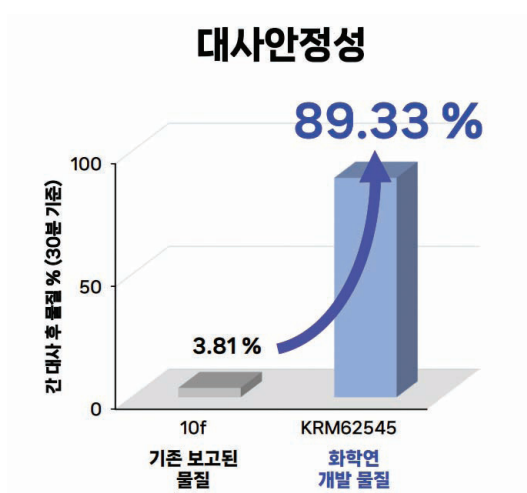
- 화학연 김성환 · 정관령 · 김도연 · 이규명 박사 연구팀은 이러한 ‘리소좀-오토파지’ 시스템을 이용한 기술의 한 종류인 ‘에텍

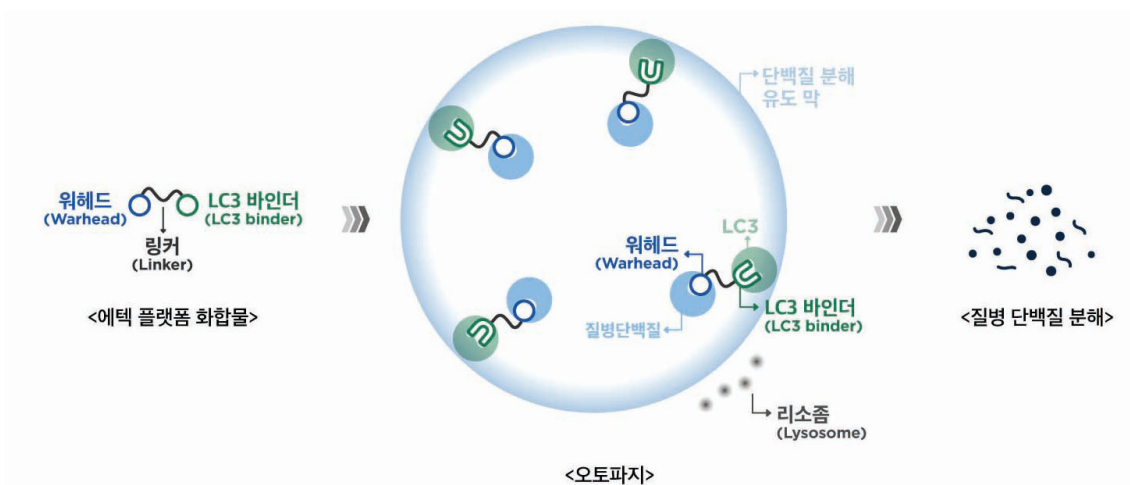
(ATTEC)‘ 기술의 가치와 가능성에 주목하여 2020년부터 ‘에텍’ 기술을 연구하기 시작한 끝에, 2023년 새로운 ‘에텍’ 플랫폼 기술을 개발했다.

- 기존에 알려진 ‘에텍’ 기술을 활용한 항암 타겟 화합물은 간에서 대부분 분해되어 약물로 살아남은 비중이 3.81%로 대사안정성*이 매우 낮다. 이는 세포에서만 증명이 가능한 수준으로, 생체 내 실험을 거쳐 약으로 이어지기에는 무리가 있었다. 따라서 대사안정성을 극대화하면서, 생체 내 실험이 가능한 기술을 개발하는 것이 관건이었다.

* 대사안정성(microsomal stability)은 신약개발의 핵심 지표 중 하나다. 사람에게 투여되는 약물은 간에서 대사가 이루어져 간이 약물을 분해하는데, 이를 얼마나 잘 피해 혈액에 약물로 존재할 수 있는지 알려주는 지표다.

- 이에 화학연 연구팀은 새로운 ‘에텍’ 플랫폼 기술을 개발해 대사안정성을 높였다. 연구팀이 개발한 ‘에텍’ 플랫폼을 활용하면, 대





사 안정성이 90%에 육박해 체내에서 약물로서의 역할을 할 수 있는 물질을 개발할 수 있다.

- 에텍 플랫폼은 세 가지 부분으로 구성되어 있다. 질병 유발 단백질에 결합하는 부분인 ①‘워헤드’(Warhead), 단백질 분해 유도 막의 안쪽 단백질에 결합되는 부분인 ② ‘LC3 바인더’(LC3 binder), 그리고 이 둘을 연결하는 ③‘링커’(Linker)다.
- 이중 LC3 바인더는 개발이 어려워 현재 알려진 것이 수 중에 불과하다. 연구팀은 화학연만의 LC3 바인더를 확보해 새로운 에텍 플랫폼을 국내 최초로 구축했다. 이를 통해 항암효과를 가지면서 생체 내 실험이 가능한 수준으로 대사안정성을 끌어올린 화합물을 도출했다.
- 체내에 ‘에텍’ 플랫폼 기술로 합성된 치료제가 들어가면, 질병 단백질과 약의 워헤드 부분이 결합하고, 분해 유도 막을 구성하는 LC3 단백질과 ‘LC3 바인더’가 결합하여, 리소좀-오토파지 기전의 분해 유도 막 안으

로 질병 단백질을 넣어준다. 환자의 경우 질병 단백질이 자연적으로 없어지지 않기 때문에, 이렇게 체내의 ‘리소좀-오토파지’ 시스템을 활용할 수 있는 약으로 질병 단백질을 분해하는 것이다.

- 본 플랫폼 기술은 다양한 질병 치료제 개발에 적용할 수 있다. 질병 종류에 따라 워헤드 부분만 바꿔서 합성하면 된다. 연구팀은 현재 본 플랫폼을 활용해 전립선암 치료제 유효물질을 도출했으며, 특허 출원 후 항암제 외에도 희귀질환 치료제 등 다양한 질병 치료제로 개발할 계획이다.
- 화학연 이영국 원장은 “이번 성과는 2019년 처음 논문에 보고된 리소좀-오토파지 활용 에텍 기술의 가능성을 선제적으로 파악하여 국내에서 처음 소개하는 연구결과로, 향후 본 플랫폼을 통해 신규 항암제와 희귀질환 치료제 등 다양한 질병치료제를 개발할 수 있기를 기대한다.”고 말했다.
- 연구팀은 후속 연구로 개발 화합물 (KRM62545)을 이용한 동물 유효성 평가



실험 및 선도물질 개발을 위해 국가신약개발과제 등을 준비하고 있다. 향후 기술의 성숙도를 높여 5년 이내에 '에텍' 기술로 임상에 진입한 후보물질을 개발할 계획이다.

- 이번 연구는 한국화학연구원 기본사업의 지원을 받아 수행됐다.

2. 기존 대비 2배 이상 향상된 세계 최고 성능의 CO₂ 전환용 음이온교환막 소재 기술 개발

- 이산화탄소를 일산화탄소로 전환하는 전기화학공정의 핵심 소재인 고성능 고내구성 음이온교환막 개발
- 과학기술 분야 국제학술지 ACS Energy Letters 2023년 4월호 논문 게재
- 탄소중립 및 기후변화의 해결 방법 중 하나로 이산화탄소의 활용 기술이 주목받고 있는 가운데, 국내 연구진이 세계 최고 성능과 내구성을 확보한 전기화학적 이산화탄소 전환용 음이온교환막 소재 기술을 개발했다.
- 한국화학연구원(원장 이영국) 이장용 박사 연구팀과 한국과학기술연구원(원장 윤석진) 원다혜·이웅 박사 연구팀은 이산화탄소(CO₂)를 유용한 화학 원료인 일산화탄소(CO)로 전환하기 위한 전기화학 공정 핵심 소재의 성능과 내구성을 기존 해외 소재 대비 월등히 향상시켰다.
- 연구팀이 개발한 음이온교환막 소재는 향후 전기화학적 이산화탄소 전환 공정의 상용화를 앞당길 수 있을 것으로 기대된다.

또한 유사한 전기화학 장치인 수전해, 연료전지 등에도 폭넓게 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

- 일산화탄소는 알코올, 플라스틱 등 다양한 화학제품의 기초물질로서, 중요한 산업원료이다. 따라서 기후변화의 주요 원인으로 손꼽히는 이산화탄소를 유용한 자원인 일산화탄소로 전환하기 위한 여러 기술이 개발되고 있다.
- 그 중 전기화학적 전환 공정은 에너지를 적게 소비하고 공정이 간단하여 차세대 CCU* 기술로 주목받아, 관련 상용화 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

* 이산화탄소 포집 및 활용(Carbon Capture and Utilization)

- 전기화학적 이산화탄소 전환 공정의 상용화를 위해서는 공정을 이루고 있는 '음극 소재', '양극 소재', '음이온교환막 소재*'의 성능이 모두 좋아야 하지만, 그중 음이온교환막 소재는 기술적 난이도가 높아 연구개발이 더디게 이루어져 공정의 상용화에 걸림돌이 되어왔다.

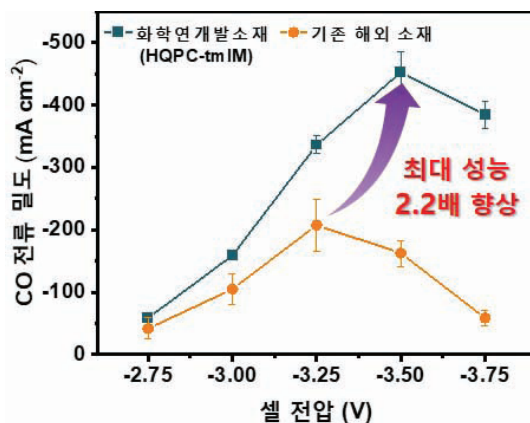
* 음극의 이온을 양극으로 이동시키는 전해질

- 특히 음이온교환막은 첫째로 음극의 음이온을 양극으로 잘 이동시키는 ▲성능이 좋아야 하고, 둘째로 공정에 적용했을 때 고온에서 안정적으로 오래 버틸 수 있는 ▲내구성이 좋아야 한다. 그러나 이러한 특성을 모두 만족시키는 소재 개발이 어려운 실정이었다.
- 현재 연구용으로 쓰이는 음이온교환막은 전량 해외 수입에 의존하는데, 열에 취약하



여 내구성이 떨어지고, 이온전도가 낮아 성능도 좋지 않다. 그럼에도 불구하고 소재 개발의 기술적 난이도가 높아 이를 뛰어넘는 소재가 개발되지 못했다.

- 이에 공동연구팀은 분자량을 키우는 기술을 적용해 튼튼한 ‘폴리카바졸계’ 고분자 소재를 만들고, 여기에 음이온이 잘 통과하는 화학적 특성을 부여해, 성능과 내구성이 모두 좋은 전기화학적 이산화탄소 전환용 음이온교환막을 국내 최초로 개발했다.
- 일반적으로 고분자 소재는 분자량이 클수록, 즉 사슬처럼 반복적으로 연결된 분자 덩어리가 클수록 내구성이 좋다. 이를 ‘고분자량화 기술’이라고 하는데, 연구팀은 화학연만의 특허 보유 기술을 통해 음이온교환막의 소재를 튼튼하게 만들었다. 실험결과, 기존 소재가 열적 안정성이 낮아 상온에서만 구동하는 것과 달리, 신규 개발 소재는 60℃의 구동 조건에서도 150시간 동안 안정적으로 작동할 수 있었다.
- 또한 연구팀은 고분자 소재에 유연한 나뭇가지 형태의 화학구조를 가진 ‘테트라메틸이미다졸륨기’를 도입해, 음극에서 반응 결과물로 생성된 수산화음이온(OH⁻)이 양극으로 잘 이동할 수 있도록 했다. 이를 통해 소재의 핵심 성능인 이온전도도를 향상시켰다.
- 개발 소재는 기존 해외 소재보다 2배 이상 향상된 일산화탄소 생산 성능을 기록하였다. 동일 조건(1KW 스택*, 1일)에서 기존 소재를 적용하면 하루에 최대 약 1.6kg의



▲ 기존 해외 소재와 신규 개발 소재의 전류밀도 그래프. 전류밀도는 일산화탄소 전환 성능, 즉 동일 에너지를 썼을 때 일산화탄소가 일산화탄소로 얼마나 많이 전환되느냐를 나타낸다. 그래프에서 모든 전압 값에서 전류밀도가 기존 해외 소재보다 화학연 개발 소재가 최대 2.2배 더 높은 것을 보여준다.

일산화탄소를 생산할 수 있는 반면에, 화학연 개발 소재를 공정에 적용하면 하루에 최대 약 3.6kg의 일산화탄소를 최종 생산할 수 있다.

* 1kw의 전기를 활용하는 전환공정 장치

- 또한 신규 개발 소재와 기존 상용소재가 적용된 장치를 컴퓨터 시뮬레이션으로 각각 확인하여, 실제 실험 결과를 이론적으로 규명할 수 있었다. 이를 통해 이산화탄소 전환 성능 향상을 위한 음이온교환막의 핵심 설계 요건을 명확하게 이론화했다.
- 한국화학연구원 이영국 원장은 “이번 기술 개발로 선진국과의 에너지 분야 핵심 전해질 소재 기술 격차를 줄일 수 있을 뿐 아니라, 향후 유관 기업과의 기술이전 및 상용화 추진을 통해 차세대 CCU 혁신 기술 개발의 지렛대가 되기를 기대한다.”고 말했다.



- 이번 연구결과는 과학기술 분야 국제학술지 'ACS Energy Letters' (IF: 22.0) 2023년 4월호에 발표되었다.
- 한편 본 연구는 한국화학연구원과 과학기술정보통신부 '유용물질 생산을 위한 Carbon to X 기술개발사업'의 지원을 통해 수행됐다.

3. 효율과 대면적화 두 마리 토끼 동시에 잡은 태양전지 반사방지 코팅 소재 기술 개발

- 빛 투과율 높여 태양전지 효율 향상시키는 대면적화 코팅 기술 개발, 향후 차량용 디스플레이 등 응용 기대
- 과학기술 분야 국제학술지 Advanced Functional Materials 2023년 6월호 표지 논문 게재
- 태양전지, 디스플레이 등에 쓰이는 반사방지 코팅 소재 시장이 빠르게 성장하고 있는 가운데, 빛을 잘 투과시켜 기존보다 태양전지 효율을 높이면서 대면적으로도 제조할 수 있는 새로운 코팅 소재가 개발됐다.
- 한국화학연구원(원장 이영국) 이상진 박사, UNIST(총장 이용훈) 김진영 교수 공동 연구팀이 개발한 새로운 태양전지용 반사방지 코팅 소재는 향후 다양한 종류의 태양전지에 상용화될 수 있으며, 태양전지 외에도 스마트폰, 컴퓨터 등의 첨단 디스플레이의 빛 반사 방지 코팅 소재로 다양하게 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

□ 태양전지는 빛 에너지를 전기 에너지로 바꾸주는 원리로 구동된다. 따라서 반사되지 않고 투과되는 빛의 양이 많을수록 태양전지의 효율이 높아진다. 그러므로 태양전지의 반사 방지 코팅 필름은 전체 빛 투과율을 높여 태양전지의 효율을 높일 수 있는 중요한 소재다. 그러나 지금까지 투과율을 높이면서 대면적화가 가능한 반사 방지 코팅 소재를 만들기 어려워 주로 코팅 대신 특정 필름을 제조해 기판 위에 추가로 붙여야 하는 복잡한 공정을 거쳐야 했다.

□ 반사 방지 코팅 소재는 대부분 박막 형태의 아주 얇은 필름이다. 원재료 덩어리로부터 얇은 필름을 만들기 위해 상용화 과정에서 '스퍼터링*'이라는 공정을 활용한다.

* 스퍼터링(Sputtering) : 진공 상태에서 전기를 통해 에너지를 갖는 양이온을 원재료(음극)에 충돌시키는데, 이때 원재료의 원자 또는 분자가 튀어나와 아주 얇은 막 형태로 주위에 부착되는 공정

• 스퍼터링 공정은 전기를 사용하므로 전기가 잘 통하지 않는 재료는 상용화에 적합하지 않다. 반사 방지를 위해서는 빛의 굴절률*이 낮은 소재가 필요한데, 이러한 소재들은 대부분 전기가 잘 통하지 않는다. 이 문제를 해결하기 위해 스퍼터링 공정에 고주파 전원을 도입해 코팅할 수 있지만, 고주파 방식은 넓은 공간에 높은 에너지를 균일하게 주입하기 힘들어서 대면적 양산 코팅 공정에 적용하기가 매우 어렵다.

* 굴절률은 물질에서의 빛의 속도 차이를 나타내는데 낮은 굴절율을 가지는 재료(대표적으로 유리, 1.5 수준) 위에 높은 굴절율을 가지는 재료를 코팅하면 반사가



증가하는 효과가 나타난다. 따라서, 유리를 기판으로 사용하는 기기들은 유리보다 훨씬 낮은 굴절율 (1.4 이하)을 가지는 재료로 코팅해야 반사방지 효과가 우수하게 나타난다.

- 따라서 ▲굴절율이 낮아 빛 투과율을 향상시키면서도 ▲스퍼터링 공정을 활용해 대면적으로 만들 수 있는 두 가지 상충된 속성을 동시에 만족하는 코팅 소재가 개발된 적이 없다.
- 이에 연구팀은 불소 고분자 소재에 전도성 첨가제를 주입한 방식으로, ▲태양전지 효율을 높이면서 ▲대면적 상용화도 가능한 새로운 코팅 소재 기술을 개발했다.
- 연구팀은 빛 투과율이 높고 굴절률이 매우 낮은 소재로 불소 고분자 소재를 선택했다. 여기에 전기를 통하게 하기 위해 전도성 물질인 탄소나노튜브*를 첨가해 새로운 코팅 소재를 만들었다. 이 소재는 상용화에 걸림

돌이 되었던 고주파 스퍼터링 방식이 전혀 필요 없고 일반 스퍼터링 방식을 사용하기 때문에 대면적으로 코팅 필름을 쉽게 제조할 수 있다.

* 탄소나노튜브 : 원통형 모양의 나노 구조를 지니는 탄소의 형태. 전기 전도 특성이 우수하다.

- 또한 연구팀은 코팅 과정에서 코팅 소재 속의 불소 물질이 태양전지에 도핑되면 전지의 효율 향상에 도움이 된다는 것을 발견했다. 연구팀은 스퍼터링 공정에서 비스듬히 기울여 코팅해, 코팅 소재 속의 불소 물질이 태양전지의 전하수송층*에 일부 스며들게 했다. 실험 결과, 태양전지의 전하 이동도가 코팅 전보다 45% 향상된 것으로 나타났다. 또한 새로운 코팅 소재는 발수 성능이 좋아 비가 오면 태양전지 표면을 스스로 깨끗하게 세척하는 효과도 가지고 있다.



▲ [그림] 화학연의 반사방지 코팅을 적용한 필름은 기존 필름에 비해 바닥의 글자가 선명하게 보이는 효과를 나타낸다(좌). 화학연 롤투를 장비로 제작된 코팅소재의 투명도(우)



* Electron Transport Layer, ETL, 페로브스카이트 태양 전지를 이루고 있는 소재 층 중 하나로, 빛에 의해 생성된 전기를 수송하는 역할을 한다.

- 개발된 코팅 소재를 페로브스카이트 태양 전지에 적용해 테스트한 결과, 유리 기판의 가시광선 영역에서 평균 빛 투과율이 3.2%p 높아졌으며, 최종 태양전지의 효율은 적용 전 24.17%에서 적용 후 25.30% 효율로 1.13%p가 증가한 것으로 나타났다. 태양전지 효율은 0.1%p를 올리기 위해서도 전세계적으로 많은 연구가 진행되고 있기 때문에 유의미한 결과로 볼 수 있다.
- 연구팀은 본 기술에 대한 국내외 특허를 바탕으로, 보유 중인 스퍼터링 공정 장비와 롤 투롤 장비를 통해 필름 폭이 700mm인 파일럿 스케일 수준의 롤투롤 연속 코팅 소재 시범 제조 기술을 확보했다. 후속 연구를 통해, 현재 대기업에서 실제로 생산하고 있는 필름 규모의 3m(10G급) 폭의 디스플레이 코팅 공정에도 적용이 가능하다.
- 이번 연구결과는 과학기술 분야 국제 학술지 ‘어드밴스드 펄서널 머티리얼즈 (Advanced Functional Materials (IF: 19))’ 6월호 표지논문*으로 게재됐다.

* 논문명 : Highly Improved Photocurrent Density and Efficiency of Perovskite Solar Cells via Inclined Fluorine Sputtering Process, Adv. Func. Mater. 2023, 33, 2301033(비스듬한 불소 스퍼터링 공정에 의한 페로브스카이트 태양전지의 광전류 밀도와 효율 특성 향상)

- 화학연 이영국 원장은 “반사 방지 코팅 소재 시장이 빠르게 커지고 있지만 국내 기술이 매우 부족한 상황에서, 이번 기술은 태양전지를 비롯한 차량용 디스플레이 등

첨단 디스플레이 코팅 소재로도 응용 가능해 국내 첨단 소재 기술 발전에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.”라고 말했다.

- 한편 본 연구는 한국화학연구원 기본사업, 산업통상자원부 소재부품기술개발사업의 지원을 받아 수행됐다.

4. 국가전략기술 이차전지 초격차 기술 확보를 위한 정부출연연구기관 업무협약(MOU) 체결

- 한국화학연구원, 한국에너지기술연구원, 한국전기연구원, 한국과학기술연구원, 기관 간 차세대 이차전지 분야 출연(연) 역할 수행 및 연구 협력 활성화 추진
- 현재 이차전지에 대한 각국의 공급망 확보 및 기술 선점 경쟁이 점차 심화되는 가운데, 국가 과학기술 발전을 책임지는 ‘정부출연연구기관’ 4개 기관이 이차전지 초격차 기술 확보를 위한 업무협약(MOU)을 체결했다.
- 8월 29일(화) 오전 11시, 대전 한국화학연구원 디딤돌플라자에서, 차세대 이차전지 분야 4개 정부출연연구기관인 한국화학연구원(원장 이영국), 한국에너지기술연구원(원장 이창근), 한국전기연구원(원장 김남균), 한국과학기술연구원(원장 윤석진)의 기관장 및 주요 관계자 등 10여 명이 참여한 가운데 업무협약식이 개최되었다.
- 이날 업무협약식을 계기로, 향후 4개 기관은 차세대 이차전지 분야와 관련된 출연연의 역할을 확대하고 기관 간 연구를 활성화



하여, 이차전지 초격차 기술 확보 기반을 마련할 계획이다.

- 정부는 올해 ‘국가전략기술 육성에 관한 특별법’ 제정을 통해 이차전지를 포함한 전략 기술 육성에 필요한 제도적 기반을 마련하였고, 민·관 전문가로 구성된 국가전략기술 특별위원회에서 이차전지 분야 세부 중점기술을 도출하였다.
- 또한 과학기술정보통신부 주관으로 국가전략기술 포럼을 개최하여 이차전지 분야 전문가들과 산·학·연·관 협업 방안 논의 및 이차전지 관련 연구를 수행하는 4개 출연연(화학연, 에너지연, 전기연, KIST)의 연구 현황 공유 등도 이뤄진 바 있다.
- 이번 협약은 올해 정부가 추진한 이차전지 분야 제도적 지원 기반 마련 및 산·학·연·관 협업 방안 논의 등의 노력들과 연계하여, 기관 간 전략적인 역할 수행 및 상호 협력을 강화하기 위해 추진되었다.
- 4개 출연연은 차세대 이차전지 분야 역할 확대를 위해 기관별 고유 기술을 기반으로 공동협력 의제를 발굴하고, 연구 협력 활성화를 위해 기관 간 연구 정보·성과 현황의 적극적 공유 및 융합연구사업 수행을 위해 협력할 계획이다.
- 업무협약식을 마치고, 오후 1시부터는 각 기관별 주요 연구진이 모여 기관 간 융합연구 추진 등을 논의하는 자리가 이어져, 차세대 이차전지 혁신 소재 및 플랫폼 요소 기술 확보를 위한 협력 방안을 모색하였다.
- 4개 기관은 이차전지 연구개발 분야에서 전 주기(소재, 셀, 모듈, 시스템)에 걸친 공통

기반 기술과 함께 기관별 고유의 기술 역량을 보유하고 있어, 이번 협약이 ‘이차전지 초격차 기술 확보’라는 공동 목표에 도달하기 위한 기술적 공백 해소 및 시너지 창출에 도움이 될 것으로 기대된다.

- 화학연 이영국 원장은 “전 세계적으로 중요한 이차전지 분야에서 출연연의 역량을 결집하고 서로 보완하여, 국민들이 실질적으로 필요로 하는 기술을 개발하는 모범사례가 되길 기대한다.”라고 말했다.

5. 한국화학연구원, 창립 제47주년 기념 행사 개최

- 이영국 원장 “기후변화, 에너지 및 식량 위기 등에 대응하는 화학 기술 개발을 통해 화학산업 발전 및 경쟁력 제고 역할 수행”
- 화학(연) 창립 기념 포상 13개 단체, 83명 시상 등
- 한국화학연구원(원장 이영국)은 9월 1일 (목) 오전 10시 30분 창립 제47주년 기념 행사를 행정동 강당에서 개최했다.
- 한국화학연구원 이영국 원장은 이날 기념사에서 “올해는 대덕연구개발특구가 출범 50주년이자, 화학연도 창립 47주년으로 50주년을 향해 달려가고 있는 의미있는 해이다.”라고 말하며, 올해 창립기념일을 화학연이 국내를 넘어 세계 최고의 글로벌 연구기관으로 도약하기 위한 계기가 되도록 기관 차원의 적극적인 노력을 당부했다.
- 이를 위해 연구원은 정부에서 중점적으로



추진하고 있는 12대 국가전략기술 확보와 전 인류적 과제인 ‘탄소중립’ 실현을 위한 수소 및 CCU 원천기술 개발 등을 위한 정책 추진을 통해 글로벌 경쟁력을 확보할 것이라 말했다.

- 국가전략기술 확보를 위해서는 원장 직속 조직인 ‘국가전략기술추진단’을 신설하여, 연구원의 주요 연구 분야와 밀접한 연관이 있는 ‘이차전지’, ‘수소’, ‘반도체 · 디스플레이’ 및 ‘첨단바이오’ 분야의 연구역량 확보를 위한 전략 수립을 추진하는 체계를 구축할 계획을 밝혔다.
- 특히, 최근 이차전지 분야 초격차 기술 확보를 위해 화학연을 포함한 4개 정부출연연구기관 간의 업무협약(MOU)을 체결하였다. 이를 통해 화학연이 강점인 분야의 기술로드맵 및 연구 협력 전략을 마련하고, 기관간 연구를 활성화하는 등 지속적으로 협업하여, 이차전지 초격차 기술 확보 기반을 마련할 계획이다.
- 또한 정부의 2050 탄소중립추진전략에 따른 ‘탄소중립’ 실현을 위해 원장 직속의 ‘탄소중립전략센터’를 두고 국가 탄소중립 정책 수립 지원 및 이에 따른 연구원의 탄소중립 정책 · 전략을 동기화할 예정이라고 말했다.
- 화학연은 이와 관련하여 올해 말 여수에 ‘탄소중립화학공정실증센터 촉매제조 실증시설’을 1차로 완공할 것이며, 내년 말에는 CCU 실증시설 등을 완공할 계획이다. 본 실증센터는 국내 최초의 탄소중립 분야 실증전문 조직으로 다양한 탄소중립 원천기

술이 상용화로 이어져 2050년 국가 탄소중립 달성에 크게 기여할 수 있을 것으로 전망한다.

- 아울러 ▲‘화학소재 · 물질 실증화 평가센터’, ‘화학소재부품 상생기술협력센터’ 등 국가 화학소재 · 부품 연구개발 성과 확산 및 기술협력의 주요 인프라 구축, ▲경영철학 및 전략을 바탕으로 한 기관 운영 계획 수립, ▲기본사업 개편과 연계한 조직 개편을 통한 유연하고 효율적인 기관 운영 기반 마련, ▲산 · 학 · 연 및 글로벌 협력에 대한 정부 정책 및 기관 운영계획을 반영한 국내외 공동연구와 인력교류 활성화, ▲안전 생활화를 통한 우리나라에서 가장 안전한 직장 만들기 등을 모든 구성원이 합심하여 이룩해 나가자고 말했다.
- 마지막으로, “‘위기(危機)’라는 단어에서 ‘위(危, 위태로움)’를 ‘기(機, 기회)’로 바꿀 주체는 바로 지난 47년간 연구원을 발전시켜온 모든 구성원”이라고 격려하며, 구성원 모두의 역량과 잠재력을 한데 모아 세계적인 성과를 창출하고, 대 · 내외적인 협력 활성화를 통해 우리 연구원을 세계 우수 연구원과 어깨를 나란히 하는, 세계 최고의 연구원으로 만들어 나가기를 촉구하였다.
- 한편, 화학연은 매년 창립기념식에 우수한 단체와 개인에게 포상을 실시하는데, 올해는 가장 우수한 단체를 선정하는 ‘연구대상’에 ‘친환경신물질연구센터’가, 가장 우수한 성과를 도출한 연구자에게 수여하는 ‘올해의 KRICT인상’에는 ‘전남중 책임연구원’이 선정되었다. 이외에도 12개 단체 및 82



명에게 창립기념 포상을 실시하였다.

- 창립기념 행사가 종료된 후 역대 창립기념 포상 수여 단체 및 개인의 사기 진작 및 자긍심을 고취하기 위해 ‘명예의 전당’ 현판 수여식을 개최하였다.

6. 공기 중 악취가스 검출과 물 속의 미세 오염물질 분해 모두 가능한 고성능 환경 센서 개발

- 기존 대비 전력소모를 줄이고 수중 미세 화합물의 효율적 분해도 가능한 고성능 센서 소재 개발
- Journal of Materials Chemistry A 2023년 9월호 표지 논문 게재
- 우리나라에서 간혹 사망자가 발생하는 유해가스 누출 사고 및 최근 해외의 종이빨대에서 유해물질이 검출된 연구 결과 등으로 인해 유해가스·물질에 대한 우려와 관심이 커지는 가운데, 국내 연구진이 고성능 환경 센서 기술을 개발했다.
- 한국화학연구원(원장 이영국) 조동휘·이정오 박사 연구팀, 한국과학기술연구원(원장 윤석진) 장지수 박사 공동 연구팀은 최근 발표된 연구 논문을 통해, 상온에서 낮은 전력 소모로 ▲공기 중에 누출될 수 있는 유해가스인 황화수소* 검출과, ▲폐수 속 염료 등 오염 물질의 분해에 모두 적용 가능한 ‘광촉매 특성을 갖는 금속산화물 반도체 가스 센서’ 개발에 성공했다고 밝혔다.

* 황화수소 : 달걀 썩는 냄새가 특징인 유해가스로, 축사 또는 화장실 옆 정화조 등에서 누출된 황화수소에 고

농도 중독 시 신경마비나 사망 위험 존재

- 이번 기술 개발로 환경 센서 핵심 소재가 유해가스 감지, 오염물질 저감 등 다양한 용도로 제품화되는데 기여할 수 있을 것으로 전망된다.
- 가스 센서 기술은 다양한 방식이 있는데, 그 중 반도체식 기술은 주로 금속산화물인 센서 소재가 어떤 가스와 반응할 때 전기적 특성이 변화하는 원리를 이용한다. 이 방식은 유해가스에 대한 높은 민감도, 빠른 반응속도, 양산성 등의 우수한 장점이 있다.
- 다만 가스가 활발히 반응하기 위해서는 센서 소재를 수백 ℃까지 히터로 가열하는 활성화 과정이 필요한데, 이때 ▲「많은 전력이 소모된다는 단점과, 높은 온도에서는 ▲「모든 가스가 반응해서 특정 가스만 선별하기 어렵다는 필연적인 한계가 있었다.
- 이에 공동 연구팀은 ▲낮은 전력으로도 작동되는 센서 소재 제작을 위해 히터 가열 방식이 아닌 「빛」을 통해 열을 발생시키는 ‘광활성화’ 방식을 적용하고, ▲특정 가스에만 반응하도록 「4가지 성분이 포함된 나노 촉매」를 센서 표면에 균일하게 합성함으로써 문제를 해결했다.
- 연구팀은 금속산화물의 일종인 이산화티타늄을 센서 재료로 삼고 우선 「전력 효율을 높이기 위해, 첨단 나노 반도체 기술을 이용해 빛이 최대한 잘 흡수될 수 있는 규칙적인 정렬 형태의 ‘3차원 나노-셸 구조’*를 만들었다. 이 구조에선 기존보다 전력 소모가 1/100 정도인 mW 수준의 빛을 집중시키



는 것만으로 높은 열이 발생하여, 히터를 통한 가열이 없어도 센서 소재 활성화가 가능했다.

* 3차원 나노-셀 구조 : 조개껍데기처럼 얇은 반구 형태(셀 구조)를 매우 작게(나노 단위로) 만들되, 평면(2차원)이 아닌 입체(3차원)적으로 쌓아놓은 모습

- 그리고 「특정 가스만 선별적으로 감지하기 위해, 센서 소재 표면에 「특정 가스에 반응하는 금속 나노 촉매」를 합성했다. 이 때 나노 촉매를 이루는 원소가 다양할수록 여러 종류의 가스 중에서 특정 가스만 선택적으로 반응하는데 더 유리해진다. 이는 인터넷에서 검색 조건을 여러 개 설정할수록 정확성이 높아지는 방식과 유사하다고 볼 수 있다. 이번 연구에서는 ‘백금, 팔라듐, 니켈, 코발트’의 4가지 원소를 첨가하자 유해가스 중 ‘황화수소’만 선택적으로 잘 반응했다.
- 이렇게 이산화티타늄 센서 소재 표면에 나노 촉매를 합성하는 과정에도 앞서 제작했던 빛을 잘 흡수하는 ‘3차원 나노-셀 구조’가 활용됐다. 센서 표면에 나노 촉매로 바뀐 금속이온 재료를 넓게 펼친 후 강한 빛을 짧게 집중시키면, ‘3차원 나노-셀 구조’ 덕분에 1,200도 가까이 급격히 온도가 상승하며 이산화티타늄 센서 소재 표면에 나노 촉매가 균일하게 합성되는 원리도 규명한 것이다.

- 한편, 연구팀은 해당 센서가 갖는 또 다른 특징으로서, 수중에서 오염 물질을 줄일 수 있다는 결과도 검증하였다. 센서의 재료로 쓰인 이산화티타늄은 광촉매*로 활용

되는 대표적인 화합물로서, 수중이나 대기 중 오염물질을 광촉매로 분해할 때 많이 다뤄지는 소재이다.

* 광촉매 : 빛을 받아들여 화학 반응을 촉진시키는 물질

- 이번 연구에서 활용된 이산화티타늄은 그 표면에 나노 촉매가 합성된 상태에서도 효율적인 광촉매 특성을 보였다. 연구 결과 특히 물 속에 극미량으로 존재하는 염료나 PFOA* 등 미세 오염 물질을 0.18mg/cm²의 소형 센서 소재로도 분해**할 수 있었다.

* PFOA : 코팅프라이펜, 종이컵 등에 코팅 용도로 활용되나, 자연적으로는 잘 분해되지 않아 인체에 축적 시 질병 유발 가능성이 있는 유해물질

** 염료 분해 : 0.01mM (10-5mol/L) 수준을 광촉매 반응으로 5시간 만에 72% 분해
PFOA 분해 : 0.2mM (2×10-4mol/L) 수준을 광촉매 반응으로 12시간 만에 42.5% 분해

- 기존의 기술은 분말 형태의 광촉매를 오염수에 투입·반응시킨 후 전량 회수가 어려워 광촉매의 양이 줄어드는 단점이 있는 반면, 이번 기술은 소형화된 환경 센서를 오염수에 넣었다가 꺼내면 건조 후 재활용할 수 있어 효율적으로 오염물질 저감이 가능한 장점이 있다.
- 이번 기술 개발로, 환경 센서 관련 기업과의 적극적인 협업을 통해 실내·외 환경질 모니터링 뿐만 아니라, 필요에 따라 해당 오염원을 저감시키는 핵심기술로써 사용자의 삶의 질 개선에 크게 기여할 수 있을 것으로 전망된다.
- 화학연 이영국 원장은 “이번 연구를 통해 개발한 기술은 황화수소 탐지 및 수중의 오염물질 분해 등 국민의 건강한 삶을 위



한 기술로서, 앞으로 추가적인 연구를 통해 다양한 유해가스, 유해물질에도 적용될 수 있는 플랫폼 기술이 될 것으로 기대한다.”라고 말했다.

- 이번 연구결과는 재료화학 분야의 권위적인 국제학술지인 ‘Journal of Materials Chemistry A(IF : 11.9)’ 2023년 9월호 표지 논문으로 선정됐다.
- 또한 이번 연구는 한국화학연구원 기본사업, 다부처공동사업의 지원을 받아 수행됐다.

7. 화학연, 2023년 국가연구개발 우수성과 100선 3건 선정

- 폐폴리스타이렌(스티로폼) 화학적 재활용 촉매 공정 기술(황동원 박사팀)
- 암모니아에서 저비용으로 수소 생산이 가능한 촉매 기술(채호정 박사팀)
- 원하는 바이오원료만 추출 가능한 인공세포 개발 관련 합성생물학 기술(이주영 박사팀)
- 한국화학연구원(원장 이영국)에서 개발한 탄소중립, 수소, 첨단 바이오 관련 기술이 과학기술정보통신부가 발표한 ‘2023년 국가연구개발 우수성과 100선’ 중 에너지·환경 분야와 생명해양 분야 성과로 총 3개 선정됐다.
- 2023년 국가연구개발 우수성과 100선에 선정된 화학연 기술은 ‘폐폴리스타이렌(스티로폼) 재활용 관련 촉매 기술(황동원 박사팀)’, ‘암모니아에서 저비용으로 수소 생산이 가능한 촉매 기술(채호정 박사팀)’, ‘원하는 바이오원료만 쉽게 생산·추출할 수 있

는 인공세포 개발 관련 합성생물학 기술(이주영 박사팀)’이다.

* 폐폴리스타이렌 연속식 해중합 촉매 공정 기술(이전 및 사업화(황동원 박사팀))

* 암모니아로부터 고효율 수소 생산 촉매 기술(채호정 박사팀)

* 합성생물학 기반 On-demand, All-in-one 기능을 탑재한 신개념 인공세포 첨단화 기술 개발(이주영 박사팀)

- 3개의 우수성과 중에서 ‘폐폴리스타이렌 재활용 관련 기술’은 일반 국민이 투표한 10개의 ‘사회문제해결성과’ 중 하나로 뽑혀, 국민에게 유용하다고 체감되는 기술로서 관심을 끌었다. 나머지 2개의 기술도 12대 국가전략기술 중 ‘수소’와 ‘첨단바이오(합성생물학)’ 분야의 기술로서, 화학연은 다양한 분야에서 우리나라의 미래 경쟁력 강화에 기여하고 있다는 모습을 이번 기회에 다시 보여주었다.

- 첫 번째로 에너지·환경 분야에서 선정된 화학연 황동원 박사팀 연구성과는 사용 후 폐기되는 폐폴리스타이렌(스티로폼)을 화학적으로 재활용하는 과정에서 저가의 친환경적인 촉매를 활용했다. 기존 방식에 비해 낮은 온도에서 분해하고 스타이렌 원료를 연속 생산 가능한 장점이 있다. 해당 기술은 2022년 8월 롯데케미칼(주)에 기술이전되어, 현재 실증화 및 사업화를 위한 공동연구를 진행 중이며, 폐플라스틱 오염 저감과 화학산업의 탄소중립 목표 달성에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.
- 두 번째로 에너지·환경 분야에서 선정된 화학연 채호정 박사팀 연구성과는 암모니아로부터 저비용으로 수소를 생산해내



는 촉매 공정 기술로서, 기존의 비싼 귀금속 촉매 대신 저렴한 비귀금속 소재를 활용하면서 암모니아 분해 공정의 효율을 높인 기술이다. 향후 높은 온도의 열원 공급이 가능한 제철, 시멘트 등의 산업공정과 연계한 수소 생산 응용 공정 개발이 이뤄질 것으로 기대되고 있다. 관련 기술은 2022년 2월 응용촉매 B-환경(Applied Catalysis B-Environmental)에 논문이 게재되었다.

- 마지막으로 생명해양 분야에서 선정된 화학연 이주영 박사팀 연구성과는 인공세포 속 특정 바이오원료가 세포 밖으로 자동으로 분비되도록 신호 시스템을 인공적으로 설계하는 합성생물학 기술이다. 기존의 방식은 세포 속 바이오원료를 얻기 위해 세포 파괴·분해·특정 원료 추출 등 복잡한 공정이 필요한데 비해, 관련 성과는 한번에

(one-step) 세포 속 바이오원료를 원하는 경로로 자동으로 수송하여 세포 밖으로 분비할 수 있는 세계 최초·최고의 기술이다. 향후 다양한 인공세포 속 여러 바이오 원료를 추출하는 미생물 세포 공장에 활용하는 플랫폼 기술로서 바이오 산업 발전의 가속화에 기여할 것으로 전망되고 있다. 해당 성과는 2022년 5월 네이처 커뮤니케이션즈(Nature Communications)에 논문이 게재되었다.

- 한국화학연구원은 Chemistry for Us(우리를 위한 화학), Chemistry for EARTH(지구를 위한 화학) 비전 아래, 탄소자원화, 첨단 화학소재, 의약바이오, 미래융합화학 연구분야 등에서 국가 화학산업을 선도하는 미래 원천 기술을 개발하고 있다.



경상국립대학교 화학과 유기반도체 재료 연구실 (Organic Semiconducting Materials Lab, GNU)

김 윤 희 (경상대학교 화학과 교수)

주소 : 경상남도 진주시 진주대로 501 경상국립대학교 화학과 352동 429호
전화 : 055-772-1491
이메일 : ykim@gnu.ac.kr
홈페이지 : <https://gnuosml.wixsite.com/ykimosml>

1. 연구실 소개

유기반도체 재료는 실리콘 기반의 무기물 반도체를 대체할 기술로, 유연성, 경량성, 경제성, 생산성, 뛰어난 성형가공성 및 분자 구조 제어를 통한 광전자적 특성의 용이성 등의 많은 장점으로 차세대 전자 재료로 주목받고 있다. 기존의 유기반도체 재료는 낮은 전하이동도 및 내구성의 문제로 실제 기술 적용에는 많은 어려움이 따를 것으로 알려져 있었으나 최근 들어 고성능 유기반도체의 개발과 다양한 소자 관련 기술 혁신으로 실리콘 반도체 못지않은 성능을 갖춘 유기 반도체 재료들이 보고되고 있다. 유기반도체 재료는 유기박막트랜지스터 (OTFTs) 이외에도 유기발광다이오드 (OLEDs), 유기태양전지 (OPVs), 유기광다이오드 (OPDs)와 같이 다양한 분야에 적용할 수 있으며 앞으로도 그 응용 분야는 점차 확대되어 갈 것이다.

본 “유기반도체 재료 연구실”에서는 다양한

유기 전자 기술 중에서도 유기발광다이오드, 유기태양전지, 유기박막트랜지스터에 적용할 수 있는 다양한 단분자, 고분자를 소자 요구 특성에 맞춰 전문적으로 설계하고 합성하는 연구를 진행하고 있다. 대표적으로 유기발광다이오드 분야에서는 전문성을 인정받아 2011년부터 삼성디스플레이-경상국립대 OLED 센터를 유치하였으며, 고성능의 청색 발광 소재를 비롯하여 다양한 전자 재료를 제공하고 활발한 인적, 물적 교류를 하고 있다. 또한, OLED 기술 분야에서 가장 이슈가 되고 있는 고성능의 청색 소재 개발을 위해 국내외의 여러 석학들과 공동연구를 진행하고 있으며 매년 세계 최고 수준의 성능을 보여주는 소재 개발로 관련 기술 개발에 기여하고 있다. 최근에는, 유기태양전지 소자를 구성하는 여러 층 중, 빛을 전기로 변환하는 광활성층에 적용할 수 있는 전자 억셉터 소재에 대해 연구하고 있다.

Organic Light Emitting Diode (OLEDs)

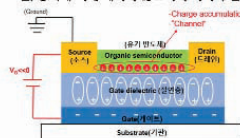
- *OLEDs (Organic Light Emitting Diodes)

이것을 핵산에 연결된 단백질을 통하여 신자의 새로운 재조합(recombination)하여
 높은 상태의 여기자(exciton)를 합성하고, 이 여기자가 분해되면 높은 상태의
 여기자 분해(decay)하는 전자의 이동하는 것을 관찰하고 있으며 (소)



이미지 출처 : 삼성디스플레이 뉴스룸

- Channel층에 유기반도체 층을 사용한 박막 트랜지스터, 제작 공정이 간단하고 비용이 저렴, 충격에 의해 깨지지 않고 구부러져나 접을 수 있어 미래의 산업에 필수적인 요소



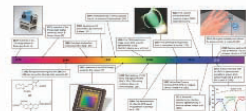
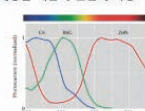
미미지 출처 : 노디스플레이 블루그, 삼성디스플레이 뉴스룸

① NADH, ② ubiquinone, ③ ubiquinol, ④ cytochrome c, ⑤ oxygen, ⑥ water

물가 상승전제와 전기료 인상은 불가
전도에는 추가 물가절감절전 조건의 첫걸음이었으며, 물가의 안정에 따라 나오는 전기와 온수요금 달하는 평균을 20년에 전기요금 발전시킨다. 온수요금
는 1.5배에 달하는 물가인상과 전기요금에 대한 전기요금 1.5배 인상, 2.0배의 전기요금 인상, 3.0배에 달하는 물가인상은 불가하다.

이미지 출처: 과학동아

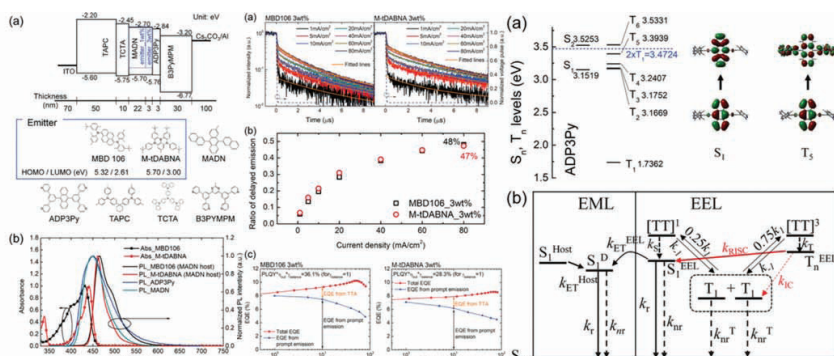
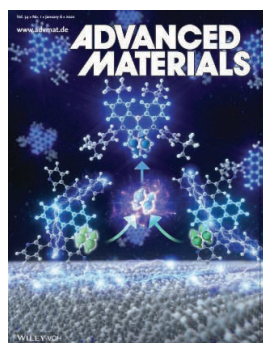
- 유기물 기반의 포토다이오드는 UV로부터 Near IR 까지의 좋은 흡수스펙트럼을 가지고 높은 photogeneration yield, 상대적으로 낮은 온도의 공정능력을 통해 광학 이미징 및 생체용합 제물이 현실화 가능



2. 주요 연구 분야

유기 발광다이오드는 유기물 반도체의 여러 특성 중 우수한 발광 특성을 이용한 디스플레이 기술로, 유기물에 전류를 흘려주면 유기물의 밴드 갭에 해당하는 에너지만큼의 빛을 스스로 내는 자체 발광형 기술이다. 기존 디스플레이 기술인 LCD와는 달리 백 라이트가 필요 없어 구조가 단순하고 매우 얇을뿐더러 가벼운 디스플레이의 구현이 가능하다. 또한 우수한 발광 효율을 기반으로 높은 휘도를 갖고, 넓은 시야각, 빠른 응답속도로 인해 고화질의 영상을 생동감 있게 표현할 수 있다. 이렇듯 우

Bulletin of Korean Chemical Science and Technology • 135

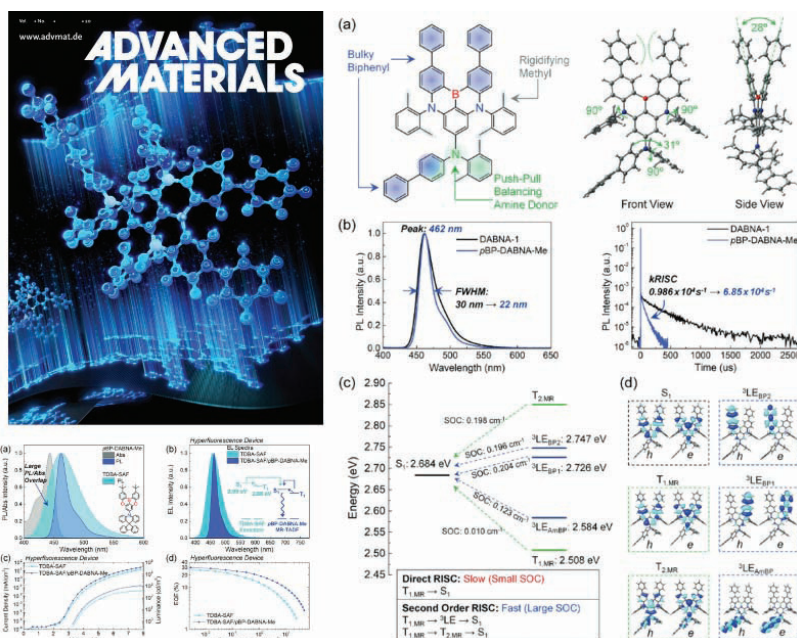


[그림 2] 형광 소재의 이론적 효율 한계를 뛰어넘는 OLED 소자

을 사용하는 형태이다. 인광 소재는 S_0 에너지 준위에서 S_1 로 여기된 전자가 T_1 에너지 준위로 계간전이(단일항에서 삼중항으로 이동하는 에너지전이)되어 다시 S_0 에너지 준위로 돌아갈 때 발생하는 에너지를 발광의 형태로 이용하게 되어 내부 양자 효율이 100%이다. 형광 소재는 인광 소재와는 달리 최대 내부 양자 효율이 25% 밖에 미치지 못해 절대적인 효율이 낮게 측정된다. 한편 인광 소재의 경우 일반적으로 금지된 계간전이를 발생시키기 위해 가격이 비싼 중금속을 이용해야 한다는 경제적인 문제와 함께 낮은 수명 특성 등의 문제점을 가지고 있어 아직까지도 청색 발광 소재로는 형광 소재가 이용되고 있다. 형광 소재의 단점으로는 에너지 전이가 단일항간에서만 일어나기 때문에 OLED 소자의 내부 양자 효율이 녹색, 적색의 인광 소재에 비해 1/4 정도로 낮은 점이다. 최근 본 연구실에서는 새로운 효율 향상층 (Efficiency Enhancement Layer, EEL) 개발로 형광 소재의 단점으로 지적되던 이론적 효율의 한계를 뛰어넘는 OLED 소자를 구현하는 연구 결과를 논문으로 발표하였다. (*Adv.*

Mater., 2022, Inside front cover)

또한 본 연구실에서는 최근 OLED 재료에서 가장 많은 관심을 받고 있는 “열 활성 지연 형광” 일명 TADF(Thermally Activated Delayed Fluorescence) 발광 메커니즘을 가지는 소재에 대한 많은 연구와 함께 많은 우수논문들을 발표하며 국내 TADF 소재 부분을 선도하고 있다. 분자 내에서 도너와 억셉터 부분의 비틀림에 따라 분리된 HOMO와 LUMO는 T_1 에너지 준위와 S_1 에너지 준위를 가깝게 만들어 실온에서도 역계간전이가 이루어지게 한다. “열 활성 지연 형광”이라고 불리는 이 TADF 기술은 인광 메커니즘과 동일하게 삼중항을 사용하기 때문에 이론적으로 100%의 내부 양자효율을 가질 수 있어 발광 효율이 일반적인 형광 소재에 비해 매우 높게 나타난다. 본 연구실에서는 단단한 구조를 통해 분자 내 진동으로 인한 에너지 손실을 줄이고, 분자의 높은 수평배향률을 통해 높은 효율의 청색 TADF 물질을 보고한 연구 결과 (*Adv. Mater.*, 2020) 및 분자간 상호작용을 방해하는 작용기를 통해 우수한 색 순도를 갖고 도펀트 물질의 높은 도핑 농도에



[그림 3] 분자간의 상호작용을 효과적으로 억제하여 색순도를 향상시킨 고효율 청색 TADF 소재

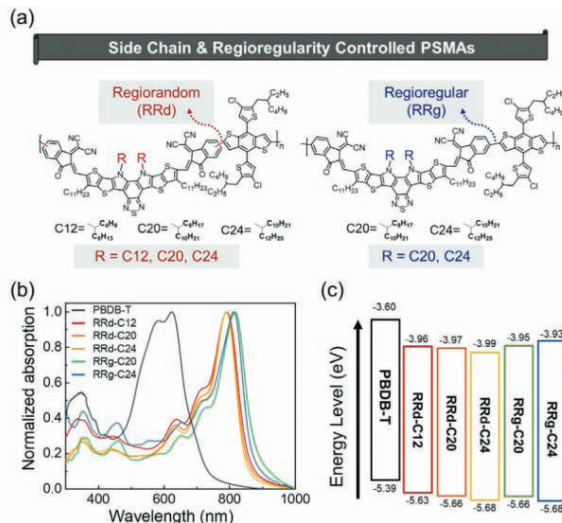
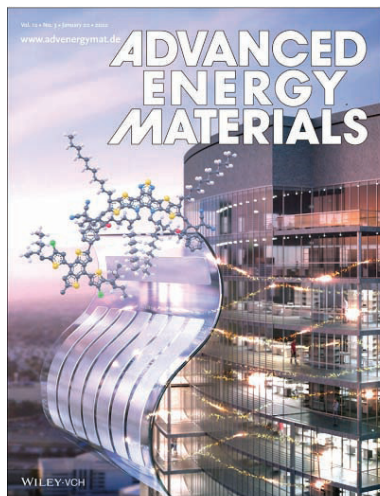


그림 4. 분자간 상호작용을 방해하는 작용기를 가져 높은 도핑농도에서도 안정적인 청색 TADF소재

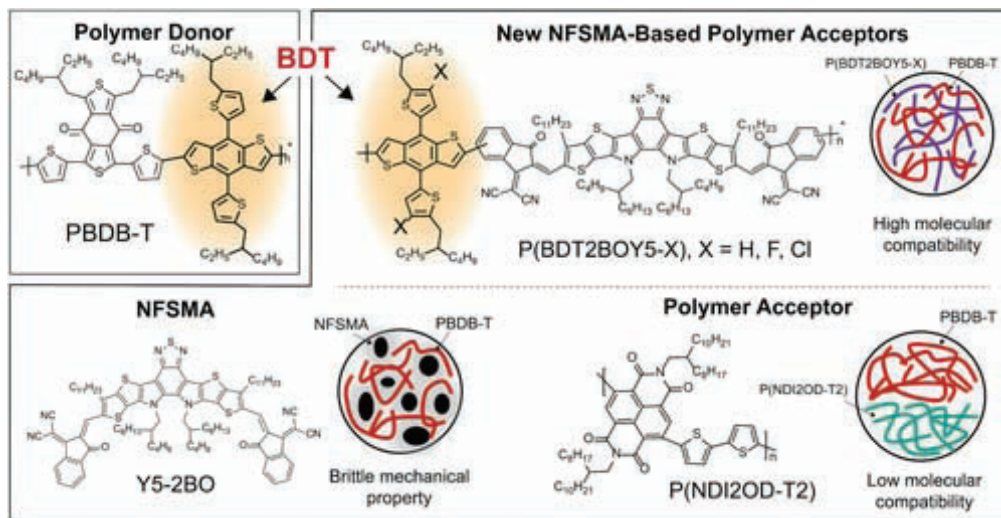
도 색의 변화가 없이 높은 효율을 나타내는 새로운 초형광 소재 개발이라는 우수한 연구 결과를 보고하였다. (*Sci. Adv.* 2023, *Adv. Mater.* 2022, Back cover / *Small*, 2022, Cover)

2.2 유기 태양전지 (Organic Photovoltaics, OPVs)

현재 유기 태양전지는 과거 폴리렌 기반 엑셉터 물질의 단점을 가지지 않으면서 높은 효율을 지니는 Y6 단분자 엑셉터 물질을 기반으로 한 연구가 중요하다. 본 연구실에서는 Y6 단분자를 기반으로 한 단분자 유도체들의 합성에



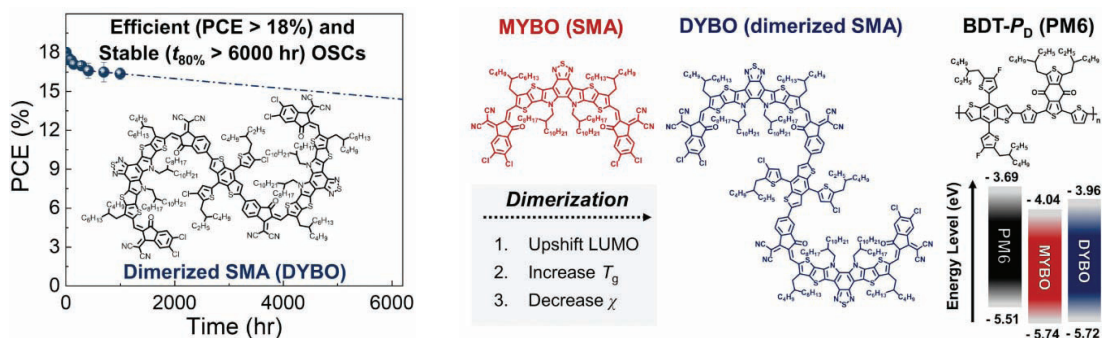
[그림 5] 체계적인 결사슬 및 백본 엔지니어링을 통해 유기 태양전지 성능을 극대화한 연구



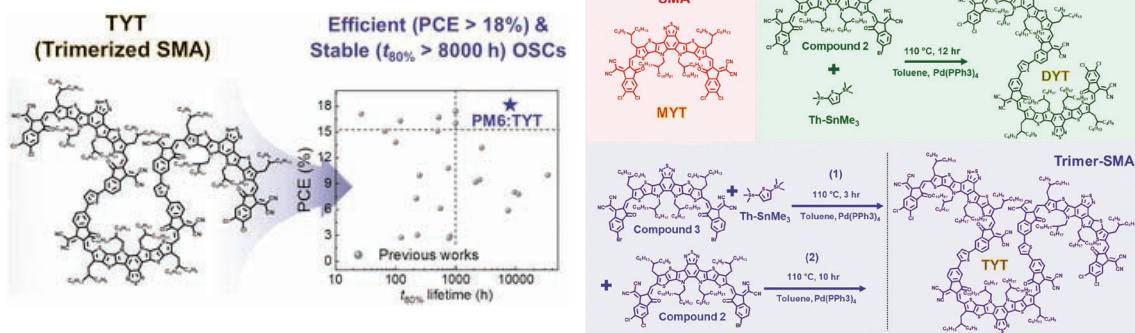
[그림 6] 동일한 단위체를 통해 안정성을 높인 유기 태양전지

관한 연구는 물론, 이를 고분자 형태로 연결한
 엑셉터 고분자에 관한 연구를 수행하여 그 결
 과를 보고하였다. 유기 태양전지의 광 활성층

에선 도너 역할을 하는 물질과 엑셉터 역할을
 하는 물질의 배열이 성능에 중요한 영향을 미
 치는데, 일반적으로는 도너 물질과 엑셉터 물



[그림 7] SMA의 이합체가 SMA 기반 유기태양전지의 안정성을 크게 향상시킨 연구

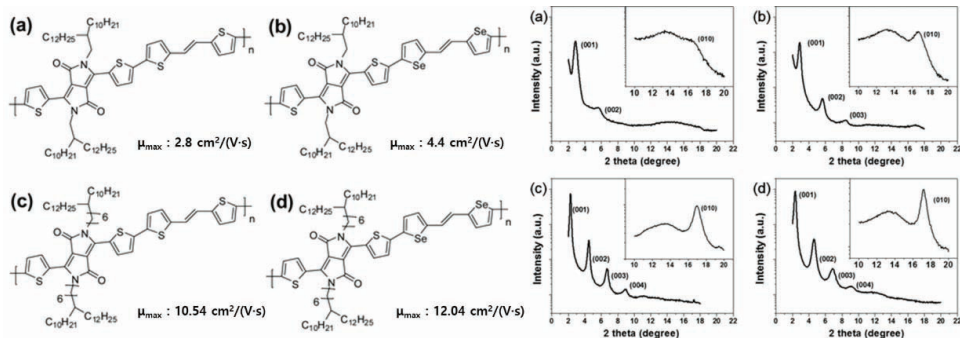


[그림 8] SMA의 삼합체가 SMA 기반 유기태양전지의 안정성을 크게 향상시킨 연구

질의 낮은 친화도로 인해 각각 물질의 자가 조립이 일어나 유기 태양전지의 성능과 안정성이 떨어지게 된다. 이를 해결하기 위해 도너 고분자와 엑셉터 고분자에 동일한 단위체를 도입하여 상호간의 친화도를 높여서 나타나는 안정한 배열을 통해 유기 태양전지의 성능을 끌어올릴 수 있음을 보고하였다. (*Adv. Energy Mater.* 2022, Cover / *Adv. Energy Mater.* 2022)

또한 현재 SMA(Small Molecule Acceptor) 기반 유기태양전지의 전력변환효율은 획기적으로 높아졌으나 상용화에는 장기적인 안정성이 부족하다. 본 연구실에서는 SMA의 이합체와

삼합체가 SMA 기반 유기태양전지의 안정성을 크게 향상시킨다는 결과를 보고하였다. 소자내 광활성층을 구성하는 엑셉터 소재로 구성된 SMA, 즉 단일 공여 단위인 벤조다이싸이오펜에 의해 공유 결합된 SMA 단위를 포함하는 분자 구조를 가진 올리고머 엑셉터를 개발하여, 고효율 특성은 유지하면서도 열적으로, 광학적으로 매우 안정한 고성능 유기 태양 전지 기술들을 개발하였다. (*Joule.* 2023 / *Energy & Environmental Science.* 2023)



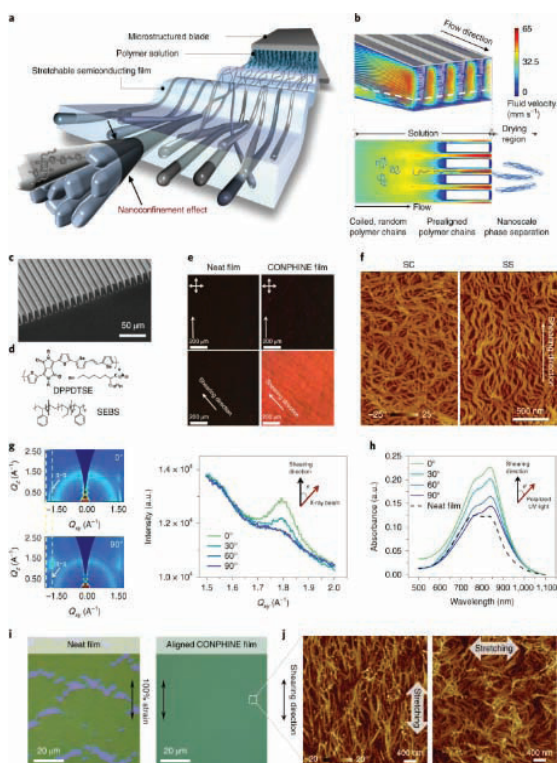
[그림 9] 세계 최고의 이동도를 가지는 유기 박막 트랜지스터 소재

2.3 유기 박막 트랜지스터 (Organic Thin Film Transistors, OTFTs)

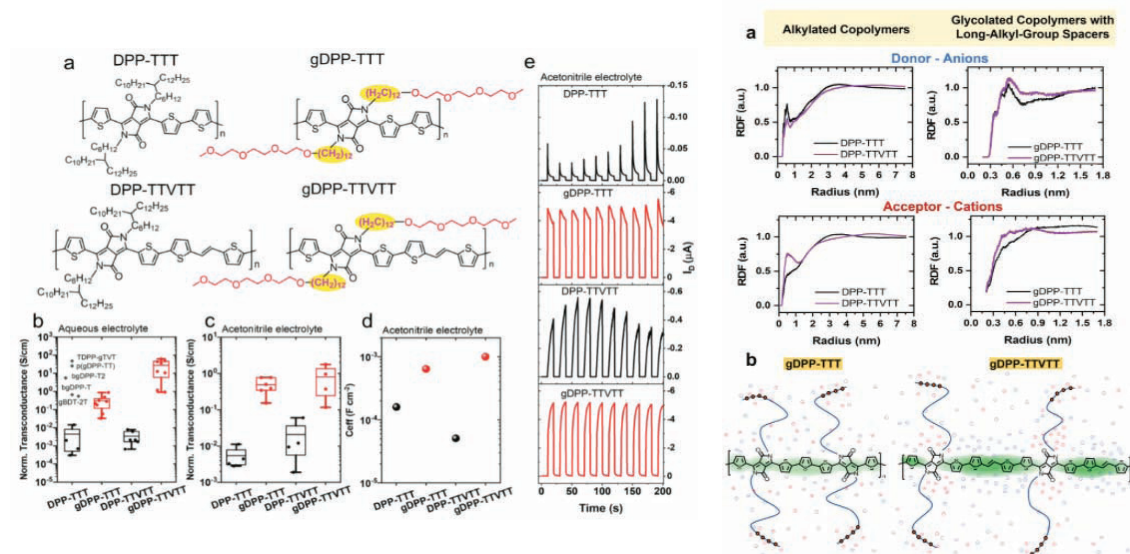
유기 박막 트랜지스터는 유기 물질로 이루어진 소자에서 전기적 신호를 통해 전류의 흐름을 제어하는 기술로, 기존의 실리콘으로 대표되는 무기물 트랜지스터가 가지지 못한 경제성, 경량성, 유연성을 가지는 소재로 주목받고 있다. 유기 박막 트랜지스터에서의 중요 요소는 전하이동도와 온-오프 비율이다. 트랜지스터의 효과를 잘 발휘하기 위해서는 양의 전하를 가지는 정공과 음의 전하를 가지는 전자가 원활하게 전달될 수 있어야 하기 때문에 전하이동도가 중요하며, 동시에 트랜지스터에서 전류의 흐름을 켜다 켜다 하는 스위치 작용을 발휘하기 위해서는 소자에 전압이 가해지지 않을 때와 가해지지 않을 때의 차이를 나타내는 온-오프 비율 또한 중요하다고 할 수 있다.

본 연구실에서는 다이케토피롤로피롤 유도체를 중심으로 한 유기 고분자 물질의 측면 알킬 사슬을 바꾸어 고분자 박막에서의 분자구조 배열을 전하 이동에 효율적인 배열로 변화시키면서 전하이동도가 향상되었고, 이와 같은 결과를 통하여 세계 최고의 이동도를 가지는 유기

박막 트랜지스터 물질을 합성하고 그 결과를 보고하여 우수한 성과를 냈다. 또한 해당 물질을 기반으로 국내뿐 만이 아니라 해외 여러 우



[그림 10] 스트레처블 유기 박막 트랜지스터 구현



[그림 11] OEET에 적용하여 우수한 성능을 보인 유기 반도체 소재

수한 연구진들과의 공동연구를 통하여 외부에서 스트레치에 강한 스트레처블 유기 박막 트랜지스터를 구현할 수 있다는 뛰어난 연구 결과를 보고하였다. (*Science* 2023, *Nat. Mater.* 2019, *Science*, 2017) 최근에는 이들 소재를 OEET (organic electrochemical transistor)에 적용하여 우수한 성능을 나타내는 결과를 보고하였다 (*Adv. Mater.* 2022).



[그림 12] 유기반도체재료연구실 단체사진

• 김윤희 •



학력 및 경력

- 1986.3~1987.2 한국과학기술원 화학과(전공)
(이학석사과정)
- 1987.3~1990.2 한국과학기술원 화학과(전공)
(이학박사)(지도교수: 최삼권)
- 2012.1~2022.12 Scopus 발간 Macromolecular
Research(SCI J) 편집위원
- 2011.12~현 재 삼성 디스플레이/경상대 OLED 센터장
- 2016.3 ~ 현 재 경상대학교
분자재료화학의인재양성사업단 단장
- 2017.1 ~ 현 재 한국고분자학회 총무이사,
전무이사, 감사, 부회장,
수석 부회장
- 2019.10~2021.9 한국연구재단 국책본부 전문위원
- 2019.11~2022.11 국가과학기술지문위 소부장
기술특별위원회 위원/기술자문단 위원
- 2023.1 ~ 현 재 ACS 한국 지부장
- 2021.1 ~ 현 재 한국공학한림원 회원
- 2006.9 ~ 현 재 경상대학교 화학과 교수



에너지 변환 및 저장 연구실 (Energy Conversion & Storage Laboratory, ECSL)

박 종 혁 (연세대학교 화공생명공학과 언더우드 특훈교수)

주소 : 서울특별시 서대문구 연세로 50 GS칼텍스 산학협력관 304호
전화 : 02-2123-8329
이메일 : lutt@yonsei.ac.kr
홈페이지 : <https://sites.google.com/view/econsto/home>

1. 연구실 소개

최근 화석연료 사용에 따른 이산화탄소 배출량 증가, 환경오염 및 기후 변화 문제로 인해 청정에너지 개발에 대한 필요성이 대두되고 있다. 수소는 지구상에 풍부한 물로부터 얻을 수 있으며 높은 에너지 밀도(141.9MJkg^{-1})와 운송 및 저장의 용이성 등의 다양한 장점을 갖고 있어 화석연료를 대체할 수 있는 신재생에너지로 주목받고 있다. 그러나 현재의 수소 생산 기술 대부분은 천연가스를 이용한 수증기 개질법에 의존하고 있다. 이 방법은 부생가스로 과량의 이산화탄소를 배출할 뿐만 아니라 고온 고압의 높은 에너지가 필요하므로 진정한 의미의 청정에너지로서의 수소 생산 기술에 관한 연구가 필요하다. 전기와 태양광 등의 에너지를 활용한 물 분해 기술은 탄소를 배출하지 않고 친환경적으로 물로부터 수소를 생산할 수 있는 기술로 활발히 연구되어왔다.

에너지 변환 및 저장 연구실(Energy

Conversion & Storage Laboratory)은 2008년에 설립되어 뛰어난 아이디어와 도전적인 실험정신을 바탕으로 에너지 변환과 저장을 위한 다양한 에너지 소재 및 디바이스 개발 연구를 수행하고 있다. 본 원고에서는 특히 광활성을 갖는 반도체 물질을 활용하여 미래의 친환경적인 에너지 솔루션을 도출해내기 위한 연구를 소개하고자 한다.

본 연구실의 주제는 크게 다음과 같이 구분된다.

- 1) 높은 태양광-수소 전환율을 위한 광전극 소재 및 수전해 광전기화학 셀 개발
- 2) 페로브스카이트 태양전지 기반 PEC 디바이스 디자인
- 3) H_2O_2 생산, glycerol 산화 반응 등 고부가가치 화합물 생산을 위한 광전기화학 촉매 개발

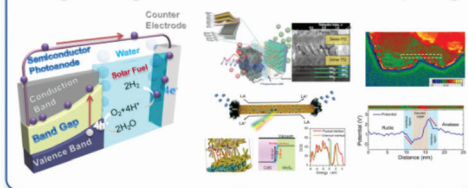
에너지 변환 및 저장 연구실에서는 촉매의 광-수소 전환율을 비롯하여 흡광 성능, 선



Energy Conversion & Storage Lab

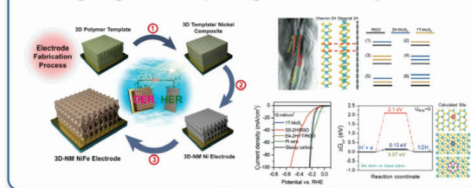
Photoelectrochemical Cells

• Engineering PEC Cells for Solar Water Splitting



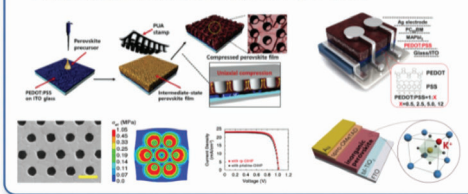
Electrochemical Water Splitting

• Designing Water Splitting Electrocatalysts



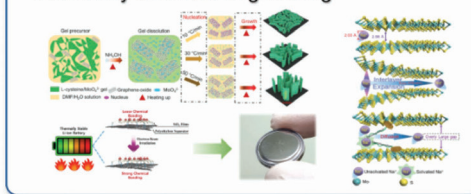
Perovskite Solar Cells

• Fabrication and Modification of PSCs



Li & Na Ion Batteries

• Secondary Batteries Engineering



[그림 1] 에너지 변환 및 저장 연구실 연구 개요

택도, 내구성 등을 종합적으로 평가하여 고성능의 광전기화학 촉매 소재 개발 및 원천 기술 확보를 추구하고 있다. 본 연구실은 다양한 연구진과의 협력 연구를 통해 Energy & Environmental Science, Advanced materials, Joule, Nature communications 등을 비롯한 에너지 저장 및 변환 분야의 SCI급 저널에 총 360여 편의 학술논문을 게재하였으며, 100여 건의 국내외 특허를 등록하는 등 활발한 연구 활동을 이어가고 있다.

2. 연구 분야 및 연구내용

본 연구실은 다양한 광활성 에너지 소재의 나노 구조체 및 이종 접합체 합성 기술, 표면 선

택적 환원 엔지니어링을 통한 소재의 물리화학적 특성 제어 등의 연구실의 핵심기술을 활용해 촉매 특성을 최적화하고, PV-EC 또는 PV-PEC 텐덤 구조 기반 고효율 광전기화학 디바이스 제작과 고부가가치 산물 생산을 위한 촉매 소재 개발을 통해 원천기술을 확보하고 에너지 변환 시스템의 성능을 향상시키는 것이 목표이다.

2-1. 고성능 수전해용 광전기화학 셀 개발

풍부한 에너지원인 태양에너지를 활용한 물분해 기술은 크게 Photocatalyst(PC), Photovoltaic-electrochemical cell(PV-EC), Photoelectrochemical cell (PEC)로 분류될 수 있다. 광촉매(PC) 시스템은 일반적으로 광활성

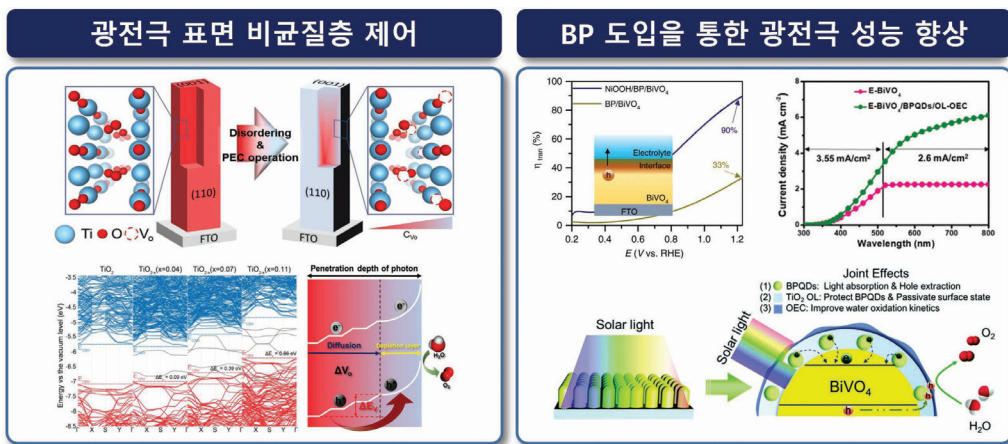


을 갖는 반도체 입자가 전해질에 분산된 형태로 사용된다. 광촉매에 빛이 조사되면, 고유의 밴드갭 이상의 에너지를 갖는 광자를 흡수하여 전자여기에 의한 전자-정공쌍을 생성한다. 이렇게 생성된 정공과 전자는 반도체 입자 표면의 띠급음으로 발생한 전위차에 의해 서로 다른 방향으로 이동하면서 전하 분리가 일어나고, 입자 표면에서 각각 산화/환원 반응에 참여하게 된다. 비교적 단순한 동작 원리를 갖는 광촉매(PC) 시스템은 광흡수, 전하 수송, 안정성 면에서 많은 부족함을 가지며 약 1%의 낮은 광-수소 전환효율의 한계를 갖는다. 반면 PV-EC는 빛을 흡수하여 전기에너지를 생산하는 태양전지로부터 생성된 전기에너지를 화학에너지로 변환하는 전기화학 촉매로 구성된 시스템으로, 높은 광-수소 전환효율을 보이지만, 시스템의 복잡성으로 인해 생산 및 운용 비용이 높은 것이 단점이다.

PEC 시스템은 PV-EC 시스템과 다르게 빛 흡수와 수전해 반응이 광촉매 물질로 만들어진

하나의 광전극에서 발생해 비교적 간단한 시스템으로 구성된다. PEC 광전극의 광여기 전하는 외부회로로 연결된 상대전극으로 이동하게 된다. 이를 통해 전하의 재결합이 억제되며 전하 분리가 효율적으로 이루어져 높은 광-수소 변환 효율을 기대할 수 있다. 또한 광촉매 시스템과 달리 산화, 환원 반응이 각각 다른 전극에서 발생하기 때문에 생성물의 분리가 용이한 장점을 갖는다. 이러한 특성으로 인해 PEC 시스템을 활용한 물분해 분야는 1972년 TiO_2 소재를 활용한 연구를 시작으로 많은 주목을 받아왔다.

본 연구실에서는 상용화가 가능한 고효율의 광전극을 구현하기 위해 Li-EDA 용액을 활용하여 TiO_2 광전극 물질 표면의 결함을 선택적으로 유도하는 연구를 수행해왔다. 이를 통해 광전극 표면에 비결정질 층을 형성하여 전극 소재의 전기 전도도를 향상시키고 전자 확산 길이를 증가시켜 높은 물 분해 성능을 달성하였다.



[그림 2] 고성능 PEC 광전극 소재 개발

또한 본 연구실은 높은 정공 수송(mobility) 특성을 갖는 p-type 반도체인 black phosphorene(BP)을 활용해 BiVO₄ 기반 광전극의 성능을 개선하는 연구를 수행하였다. 광전극과 조촉매의 접합 계면에 BP층을 도입하여 p-n 접합에 의한 전기장을 형성하여 정공 추출 특성을 향상시켰으며, 후속 연구에서 식각 처리로 넓은 표면적을 갖는 BiVO₄ 전극 표면에 2D BP가 아닌 black phosphorous quantum dots(BPQDs)를 도입하여 광전극 물질의 흡광 성능을 극대화할 수 있었다. 이에 TiO₂ overlay와 조촉매를 추가적으로 도입함으로써 광전극의 높은 안정성과 6.2mA/cm²의 높은 광전류밀도를 달성하여 고효율의 광전기화학적 물분해 시스템을 구현하였다.

2.2 페로브스카이트 기반 PEC 디바이스 개발

납 할라이드계 페로브스카이트(LHPs)는 경제적이고 쉽게 합성이 가능하며, 높은 흡광 성능을 가지고 있어 고성능의 태양전지뿐만 아니라 기존의 금속산화물 기반 광전극을 대체할 수 있는 유망한 물질로 평가받는다. LHPs의 작은 밴드갭은 금속산화물보다 넓은 파장대의 빛을 흡수할 수 있을 뿐만 아니라 충분한 양의 전하를 촉매 물질에 전달할 수 있으며, 제어 가능한 밴드갭의 최적화를 통해 다양한 촉매 물질로써 활용될 수 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 LHPs는 수분에 매우 민감하여 매우 낮은 수분 안정성을 갖는다. 이로 인해 LHPs를 수전해 디바이스로 직접 사용하는 것은 한계가 있다.

이러한 문제점에 대응하기 위해 다양한 연

구에서 LHPs 기반 광전극 표면에 필즈 메탈(Field's metal, FM)이나 니켈 기반의 보호층을 도입하여 수분 안정성을 향상시키려는 시도가 이루어졌다. 그러나 이러한 시도들은 FM의 낮은 녹는점과 니켈 접촉 계면에서의 높은 저항 등에 의해 구동 환경에서의 장기적인 안정성과 높은 성능을 보장하지 못하였다.

본 연구실에서는 페로브스카이트 PV 전지와 3D OER 전기촉매를 결합한 일체형 구조의 광전극 디바이스를 제작하는 연구를 수행하고 있다. 전기촉매가 로딩된 니켈폼과 PV전지의 접촉계면에 Conductive carbon powder(CCP)를 도입하여 페로브스카이트를 성공적으로 인캡슐레이션함과 동시에 계면의 접촉 저항을 줄여 전하의 손실을 최소화하는 시스템을 구성하였고, 이를 통해 24.26mA/cm²의 높은 광전류밀도와 9.16%의 ABPE, 높은 안정성을 확보하였다. 또한, 수소 발생 반응에 적합한 전이금속 인화물 전기촉매가 결합된 페로브스카이트 광양극을 추가적으로 도입하여 무전원(unbiased) 수전해 장치를 성공적으로 구현하였다.

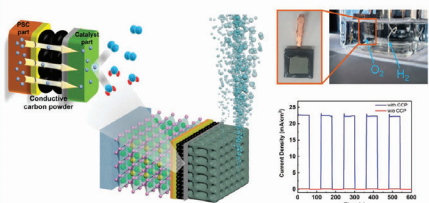
2.3 고부가가치 화합물 생산

전기화학적 또는 광전기화학적 산소 발생반응(OER)은 낮은 반응속도를 가질 뿐 아니라 높은 과전압을 필요로 하는 특성 때문에 PEC 또는 PC 시스템의 전체 물 분해 반응의 성능을 저하시킨다고 알려져 있다. 이에 따라 최근에는 산소 발생 반응을 과산화수소(H₂O₂) 또는 Dihydroxyacetone(DHA)과 같은 산소보다 경제적 가치가 높은 고부가가치 산물 생성 반응으로 대체함으로써 전체 산화·환원 반응의 경

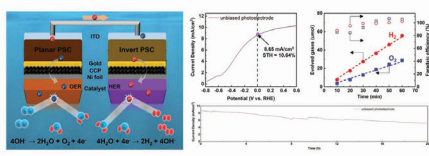


페로브스카이트 PV-PEC 시스템

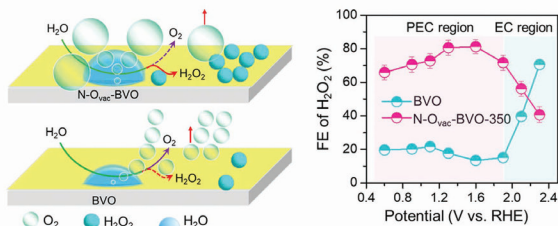
일체형 구조의 광전극 디바이스



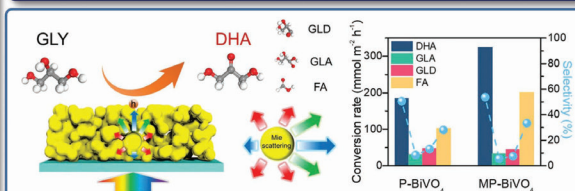
무전원 수전해 디바이스



광전기화학적 H₂O₂ 생산



광전기화학적 글리세롤 전환



[그림 3] 페로브스카이트 PV-PEC 시스템 및 고부가가치 산물 생산 모식도

제성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

광전기화학적 과산화수소 생산 반응의 경우 OER 보다 빠른 반응속도뿐만 아니라 산물의 가치가 높고, 기상 혹은 액상 산물의 분리 공정이 더 간단하다는 장점을 갖고 있다. 하지만, 동시에 낮은 광전환 효율과 과산화수소 생산에 대한 낮은 선택도 및 생산 속도 등의 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 과산화수소 생산 반응에 높은 활성을 갖는 것으로 알려진 BiVO₄ 기반 광전극의 경우, 광변환 효율을 증가시키기 위해 이원자 도핑, 표면 패시베이션, 이중접합 구조 도입 등의 다양한 전략이 연구되어왔다.

본 연구실에서는 BiVO₄ 기반 광전극의 광전환 효율뿐만 아니라 반응 산물의 선택도를 높이는 연구를 수행해왔다. 특히, 높은 H₂O₂ 선

택도를 달성하기 위해서는 광전극 표면에서 정공 제거제(hole scavenger) 역할을 하는 액상 과산화수소를 반응 표면에서 분리시키고, 산소발생 반응을 억제해야한다. 본 연구실은 이러한 경쟁 반응을 억제하기 위해 광식각(photo etching) 공정을 활용하여 BiVO₄ 광전극 표면에 산소 결함을 형성하고, 질소 처리를 통해 표면의 젖음성을 하락시켰다. 이를 통해 산소 기체의 방출 속도를 조절하여 전극 표면에서의 산소 기체와 액상 과산화수소의 비율을 효과적으로 제어하였다. 결과적으로 과산화수소 분해 반응과 산소 발생 반응을 억제하여 최대 81.2%의 패러데이 효율과 높은 과산화수소 생산 속도를 보이는 광전극을 제조하였다. 이러한 연구를 통해 광전극 표면의 미세환경 제어의 중요성을 밝히고 경쟁 반응 억제를 위한 광전극 개발의 가이드라인을 제시하였다.

한편, 바이오디젤의 생산량이 증가함에 따라 그 생산공정의 주요 부생 산물인 글리세롤의 연간 생산량 역시 증가하고 있다. 그러나 글리세롤의 매우 낮은 경제적 가치로 인해 다양한 촉매를 활용하여 글리세롤을 산화시켜 고부가가치 화합물을 합성하는 연구가 활발히 진행되어왔다.

전기화학적 또는 광전기화학적 글리세롤 산화는 기존 물분해 반응의 산소 발생 반응을 대체하여 전체 반응에 필요한 에너지 소비를 줄일 수 있을 뿐 아니라 안전한 반응 환경 등의 장점으로 효율적으로 고부가가치 산물을 생산하는 공정으로 주목받고 있다. 일반적으로 다양한 반응조건에 따라 글리세롤 산화반응을 통해 glyceric acid(GLA), glyceraldehyde(GAD), dihydroxyacetone(DHA), glycolic acid(GCA) 등의 산물을 얻을 수 있으며, 그중 DHA는 킬로그램 당 \$150의 매우 높은 가치를 갖는다.

본 연구실에서는 BiVO₄ 기반 광전극을 활용하여 글리세롤 산화반응을 통해 DHA를 생산하는 연구를 진행하고 있으며, 간단한 열처리

공정을 거침으로써 BiVO₄ 기반 광전극의 다공성 나노구조를 제어해 빛의 미 산란 (Mie scattering) 효과를 강화하였다. 이를 통해 기존 BiVO₄ 기반 광전극의 부족한 흡광 성능을 개선하였으며, 글리세롤 산화반응에 광음극으로 활용하여 6.04mA/cm²의 광전류밀도와 325.2mmolm⁻²h⁻¹의 높은 DHA 생산속도를 달성하였다.

3. 연구실의 비전

본 연구실은 에너지의 변환과 저장을 위한 다양한 소재의 특성을 분석하고, 이를 기반으로 다양한 전략을 통해 기존 소재와 차별성을 갖는 차세대 에너지 소재를 개발하고 원천기술을 확보하고자 한다. 이를 통해 고성능/고안정성의 광 기반 청정에너지원 생산 시스템 기술을 선점하고, 미래의 환경문제와 자원 고갈 문제를 해결하는데 새로운 패러다임을 제시할 수 있을 것이라 기대한다.

•• 박종혁 ••



학력 및 경력

1995-1999 연세대학교 화공생명공학 학사
1999-2001 한국과학기술원 화공생명공학 석사
2001-2004 한국과학기술원 화공생명공학 박사
2004-2005 Univ. Texas at Austin, Post-doctoral Fellow
2005-2007 LG화학 선임 연구원
2007-2008 ETRI 선임 연구원
2008-2014 성균관대학교 부교수
2014-2015 Stanford University Visiting associate professor
2015-현재 연세대학교 언더우드 특훈교수



연료전지 에너지혁신연구센터

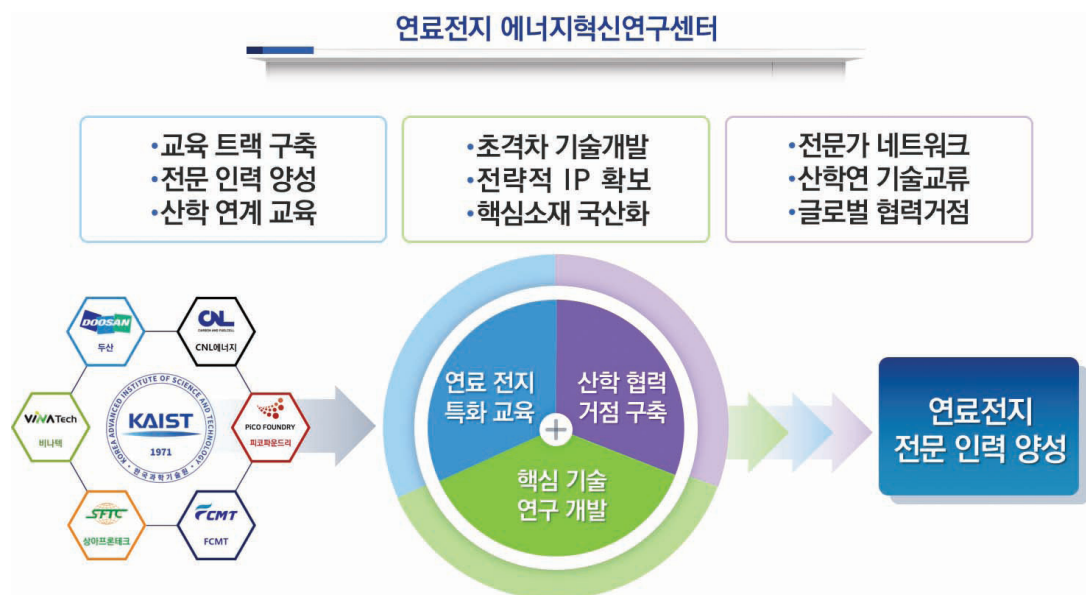
조 은 애 (한국과학기술원 신소재공학과 부교수)

주소: 대전광역시 유성구 대학로 291 응용공학동 2402호
전화: 042-350-3317
이메일: eacho@kaist.ac.kr
홈페이지: <https://ecsm-kaist.net:50568/>

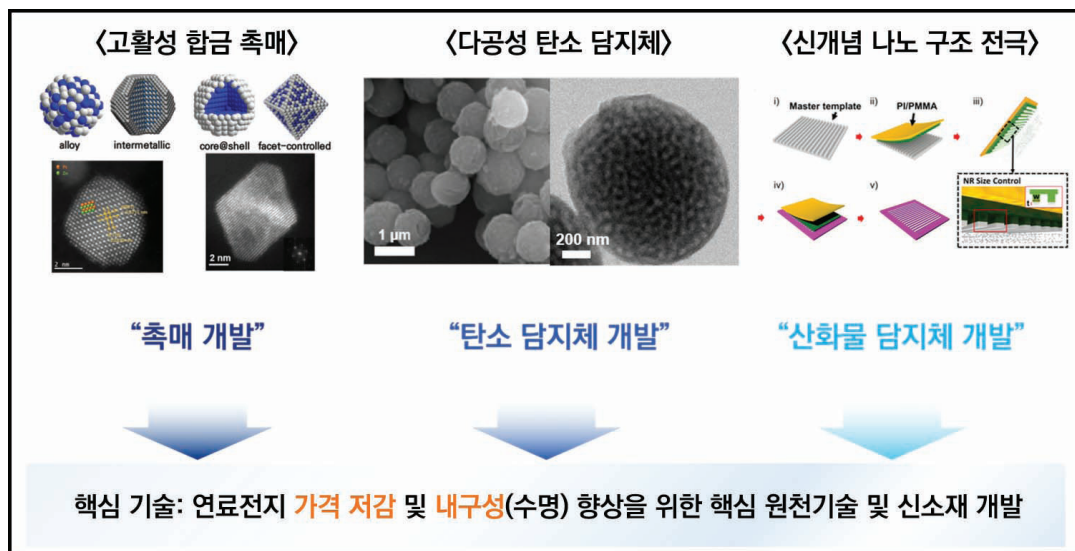
1. 연구센터 소개

글로벌 탄소중립 이행과 에너지 안보 위협으로 인해 향후 전개될 산업에 미칠 불확실성의 충격을 최소화하기 위해서는 에너지자립이 필수적이다. 연료전지 에너지혁신연구센터는

2021년에 설립되어 에너지자립을 위한 연료전지 전문 인력의 지속적인 양성과 동시에 연료전지 및 수소에너지 분야의 핵심 소재 국산화를 위한 기반 기술 연구를 수행하고 있으며 산·학·연 협력을 통해 수요 기반의 맞춤형 기술 개발을 진행하고 있다[그림 1].



[그림 1] 에너지혁신연구센터 추진전략



[그림 2] 에너지혁신연구센터 연구 개요

본 연구센터는 연료전지 핵심 원천기술 개발을 위한 전략으로 (1) 백금 사용량 저감을 위한 고활성 합금 촉매, (2) 고성능 MEA 제조를 위한 다공성 탄소 담지체 구조 개발, (3) 연료전지용 신개념 나노 구조 전극 제조 기술을 개발하고 있으며, 궁극적으로는 핵심 원천기술에 대한 최고 수준의 연구를 유지하기 위해 노력하고 있다[그림 2]. 이러한 연구를 기반으로 연료전지 에너지혁신연구센터에서는 Nature communications, small, ACS catalysis를 비롯한 연료전지 재료화학 분야의 여러 SCI급 저널에 학술 논문을 게재하며 활발한 연구 활동을 펼치고 있다.

2. 연구 분야 및 연구내용

2-1. 백금 사용량 저감을 위한 고활성 합금 촉매

연구목표

백금기반 촉매의 가격 절감을 위한 촉매 활성 향상과 동시에 촉매의 내구성 증대를 목표로 연료전지 구동 환경에서의 형태 안정성이 우수한 촉매합성 기술을 개발하고 있다.

연구내용

연료전지 시스템의 효율과 수명을 향상시킬 수 있는 고활성 고내구성 촉매를 개발하기 위하여, 본 연구센터는 새로 개발한 촉매를 intermetallic화 하는 공정과 촉매의 불균일성을 제어하는 기술을 활용하고 있다. 연료전지 촉매 중 가장 보편적으로 활용되는 Pt-M 촉매를 대량 합성하고 연료전지에 적용하기 위한 연구를



수행하고 있으며, 그 중에서 특히나 백금 담지량이 높은 고담지 촉매의 개발에 노력을 기울이고 있다. 저담지 촉매를 연료전지 시스템에 사용하면 과도하게 두꺼운 촉매 전극층으로 인하여 반응물질 전달 속도 저하, 생성 물질 배출 지연, 촉매 활용도 저하 등과 같은 다양한 문제가 발생할 수 있어 고담지 촉매의 개발이 필요하다. 그러나, 고담지 촉매의 경우 열처리를 진행하는 과정에서 나노입자 간의 응집 현상이 심해져서 촉매의 전기화학적 활성 표면적의 감소를 초래할 수 있으므로, 이러한 응집 현상을 억제하면서도 고담지 촉매를 대량 합성하는 기술이 요구되고 있다.

본 연구센터에서는 백금 담지량이 30 wt% 이상인 고담지 촉매에 대하여 한 번에 대량합성하는 데 성공하였으며, 소량 합성한 촉매군과 큰 차이 없이 안정하게 합성되는 것을 특성 분석을 통해 확인하였다[그림 3]. 더 나아가 전이금속의 용출을 방지하고 구조를 안정화하기 위하여 Core@Shell 구조를 합성하는 기술을 개발 중이며, 합성 과정의 단계별로 촉매군의 열

역학적 안정성 및 촉매 활성화 정도를 비교함으로써 연료전지 적용 가능성을 검토하고 향후 연관기업의 상업화 프로세스 가속화에 힘쓰고 있다.

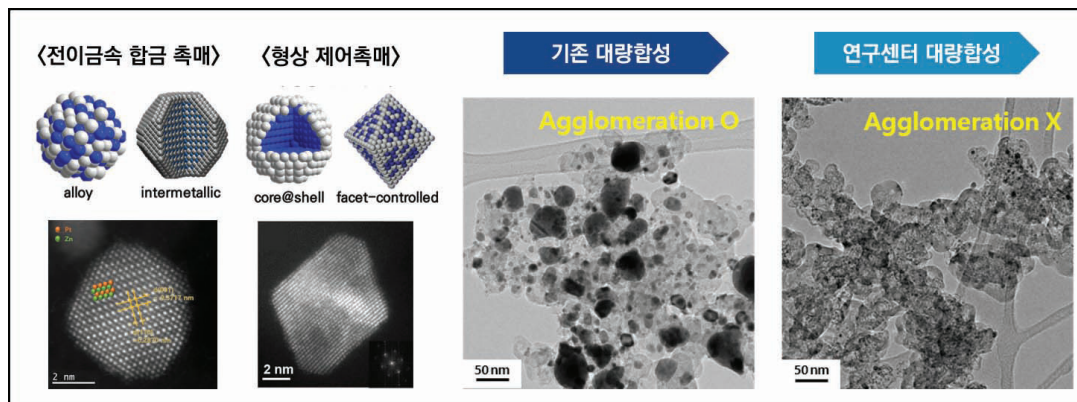
2-2. 고성능 MEA 제조를 위한 연료전지용 다공성 탄소 담지체 구조 개발

연구목표

담지체 입자 합성 조건을 조절하여 다공성 탄소 입자 기공의 열린 정도 제어하고, 이를 통해 연료전지 구동 중의 물질 수송 및 전기화학 성능을 극대화하는 것을 목표로 하고 있다. 더불어, 합성한 탄소 입자의 기공과 입자 특성 간의 상관관계를 연구하여 고효율의 저백금 탄소 복합체를 개발하는 것을 목표로 한다.

연구내용

연료전지 촉매의 구성요소인 탄소 지지체는 그 기공 구조가 연료전지 성능에 큰 영향을 미칠 수 있어 다양한 방식으로 다공성 탄소 재료



[그림 3] 대량 합성된 고효율 합금 촉매

를 설계하는 연구가 진행되고 있다. 특히 본 연구진은 산소환원반응을 위한 다공성 탄소 재료를 형성하기 위해 나노 구조 도메인을 갖는 블록 공중합체를 템플릿으로 사용하여 메조다공성 탄소 지지체를 합성하는 방법을 개발하고 있다. 에멀전 내에서 블록 공중합체가 자가 조립될 때 유기용매가 증발하는 속도를 조절함으로써 입자의 기공이 열린 정도를 조절할 수 있다. 블록 공중합체 사슬들의 배열이 열역학적으로 안정해지기 전에 용매를 빠르게 증발시키면 열린 기공이 형성되지만, 용매를 천천히 증발시킬수록 계면에너지의 영향으로 인해 닫힌 기공이 형성된다[그림 4].

기공이 열린 정도에 따른 탄소 입자의 특성 분석 및 연료전지 셀 성능 평가를 진행하고 있으며 본 연구를 통해 탄소 지지체의 기공이 열린 정도가 연료전지 구동 시 물질 수송과 연료전지 성능에 끼치는 영향을 평가할 수 있을 것이라 기대한다.

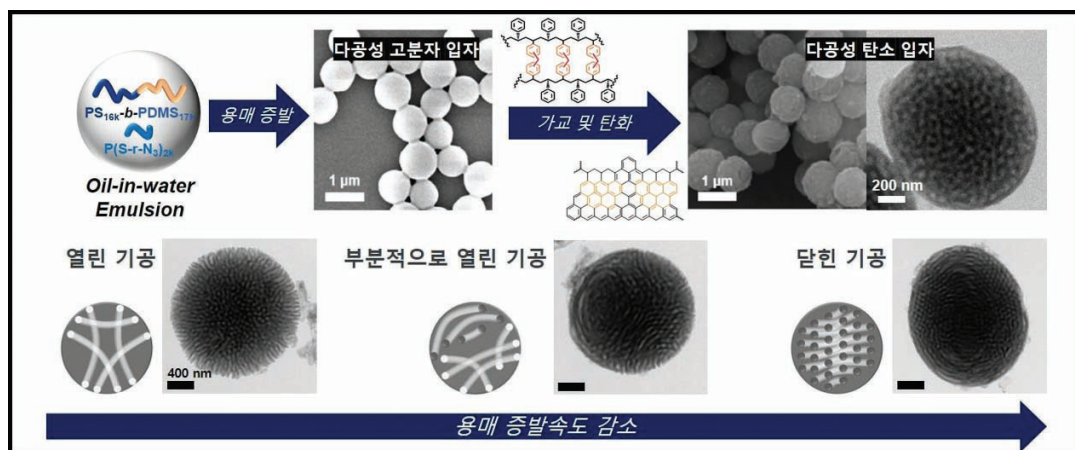
2-3. 연료전지용 신개념 나노 구조 전극 제조 기술

연구목표

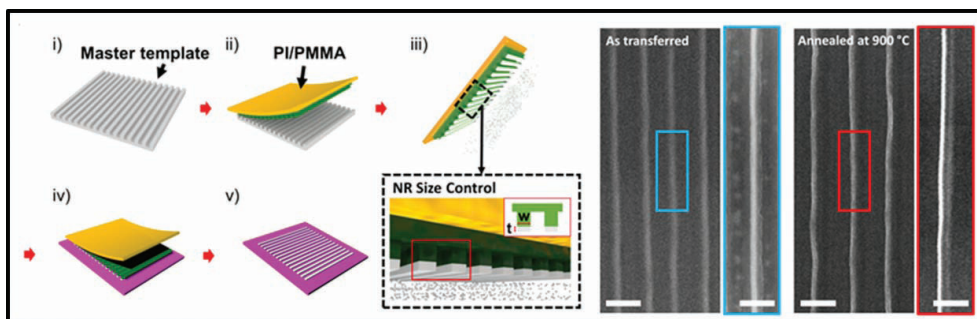
본 연구의 주요 목표는 선행 연구 기술인 solvent-assisted nanotransfer printing (S-nTP) 방법을 기반으로 하여 3차원 금속산화물 나노 복합 담지체를 제작하는 기술을 개발하는 것이다. 더불어 연료전지 성능과 내구성을 향상시키기 위해 내구 구조, 간격, 크기 등 다양한 파라미터를 최적화하여 새로운 3차원 산화물 나노아키텍처 담지 소재를 개발하고자 한다.

연구내용

금속산화물 담지체의 3차원 나노 구조화는 적은 양의 촉매로도 넓은 전기화학적 활성 면적을 확보할 수 있다는 이점과 촉매와 담지체 사이 강한 전자적 상호작용을 통해 촉매의 전자 구조를 변형시켜 고유 활성을 크게 증가시킬 수 있다는 이점을 가진다. 그러나 금속산화물 담지체는 탄소계 담지체에 비해 전기전도성



[그림 4] 블록 공중합체 자가조립과 화학적 가교를 이용한 다공성 탄소 입자



[그림 5] 산화물 담지체의 3차원 구현을 위한 증착 공정

이 낮다는 한계를 가지고 있어 이를 극복하는 것이 필수적이다.

본 연구진은 기존 S-nTP 공정에 연속 증착 공정과 고온 열처리 공정을 추가하여 금속산화물의 전기전도성을 향상시켰다. S-nTP를 활용한 제작 공정 중에 다양한 구조적 파라미터를 조절함으로써 선폭, 주기, 간격 등이 다양한 금속산화물 담지체를 제작할 수 있으며, 담지체의 두께도 조절할 수 있다[그림 5]. 고성능 촉매 전극을 개발하기 위해 반응물/생성물의 크기에 따라 이러한 구조적 파라미터를 최적화하는 연구를 진행하고 있다. 이 최적화 과정으로 인해 물질 전달 효율과 전기화학적 활성 면적 활용 효율이 동시에 극대화될 것으로 기대한다.

로 하고 있다. 이에 따라 핵심 기술 개발을 통해 국내 연료전지 소재 산업을 촉진하고 사업화를 지원하며, 수요기업에 특화된 맞춤형 기술을 개발하고자 부단한 노력을 기울이고 있다. 이를 위해 (주)두산과 같은 기업들이 협력하고 있으며, 정기적으로 기술 교류를 통해 산학협력 네트워크를 구축하고 있다. 이를 통해 궁극적으로 연료전지 부문에서의 가격 경쟁력과 성능을 강화하여 세계의 연료전지 시장에 진출할 가능성을 높이하고자 한다. 이는 연료전지 시스템의 국산화율을 높이고 국가 연료전지 기술의 독립성과 자립성을 높이는 데 기여할 것으로 기대된다.

*이 연구는 산업통상자원부 한국에너지기술평가원의 에너지 인력양성사업을 통해 6년간 72억 원을 지원받아 진행 중이다.

3. 센터의 비전

본 연구센터는 에너지인력양성사업의 일환으로 연료전지 분야와 관련된 새로운 교육 트랙을 구축하고 친환경 에너지 분야 전반에 걸쳐 수요기업에서 필요로 하는 지식과 경험을 갖춘 석/박사급 연구인력을 다수 배출할 것을 목표

• 조은애 •



학력 및 경력

1992~2002	한국과학기술원 재료공학과 학사/석사/박사
2002~2014	한국과학기술연구원 연료전지연구센터 책임/선임/연구원
2014~현재	한국과학기술원 신소재공학과 부교수

● ● 한국화학관련학회연합회 제25대 임원 ● ●

회 장	김희택(한양대학교 특임교수)		
수석 부회장	김병국(한국과학기술연구원)		
부 회 장	신석민(서울대학교 화학부)	김교현 (롯데그룹 화학군)	
	심상준(고려대학교 화공생명공학과)	류승호(이수화학 대표이사)	
감 사	이상원(고려대학교 화학과)	이준영(성균관대학교 화학공학부)	
이 사	박종욱(경희대학교 화학공학과)	유필진(성균관대학교 화학공학/고분자공학부)	
	정옥상(부산대학교 화학과)	성재영(중앙대학교 화학과)	
	윤호규(고려대학교 신소재공학부)	김윤희(경상대학교 화학과)	
	조성용(경인양행㈜ 대표이사 사장)	이동훈(㈜캠트로스 대표이사)	
	남산(고려대학교 신소재공학부)	조우석(한국세라믹기술원)	
	이진원(서강대학교 화공생명공학과)	정진석(울산대학교 화학공학부)	

● ● 화학연합 편집운영이사회 ● ●

편집위원장	유필진(성균관대학교 화학공학/고분자공학부)		
편집이사	김정욱(광주과학기술원 화학과)	남수지(한국전자통신연구원 실감디스플레이연구그룹)	
	이창현(단국대학교 에너지공학과)	김진영(서울대학교 재료공학부)	
	서영웅(한양대학교 화학공학과)	이정현(고려대학교 화공생명공학과)	
	조정호(연세대학교 화학생명공학과)	황성원(인하대학교 화학공학과)	
	손해정(한국과학기술연구원 차세대태양전지연구센터)		

● ● 자문위원회 ● ●

박원훈	한국과학기술한림원 총괄부원장	이분수	인하대학교 화학과
윤기현	연세대학교 세라믹공학과	심상철	경북대학교 명예교수
이철수	고려대학교 화학공학과 명예교수	김봉식	영남대 화학공학부 명예교수
이호인	서울대학교 화학생물공학부	이홍림	연세대 세라믹공학과
윤민중	충남대학교 화학과	김화용	서울대학교 화학생물공학부
최길영	한국화학연구원 신뢰성평가센터	이윤식	서울대학교 화학생물공학부
김해두	재료연구소 분말재료연구본부	강한영	충북대학교 화학과
이승중	서울대학교 화학생물공학부	김정안	경희대학교 화학과
이철태	단국대학교 화학공학과	김득중	성균관대학교 신소재공학부
최종길	연세대학교 화학과 명예교수	김우식	경희대학교 화학공학과
차국현	서울대학교 화학생물공학부		

● ● 전문위원회 ● ●

총무재정	위원장	심상준(고려대학교 화공생명공학과)		
	부위원장	김진웅(성균관대학교 화학공학/고분자공학부)		
	위원	성재영(중앙대학교 화학과)	강영종(한양대학교 화학과)	
		권도균(한국항공대학교)	강태욱(서강대학교)	
산학협력	위원장	김교현(롯데그룹 화학군)	김병국(한국과학기술연구원)	
	부위원장	이기라(포항공과대학교 화학공학과)	조우석(한국세라믹기술원)	
	위원	추현아(한국과학기술연구원)	신승한(한국생산기술연구원 청정화학응용소재그룹)	
		이철진(중앙대학교)		
기획홍보	위원장	신석민(서울대학교 화학부)		
	부위원장	이광렬(고려대학교 화학과)		
	위원	류두열(연세대학교 화공생명공학부)	봉기원(고려대학교 화공생명공학과)	
		이순일(창원대학교)	서명원(서울시립대학교)	
학술,출판	위원장	류승호(이수화학 대표이사)		
	부위원장	정진석(울산대학교)	이상수(한국과학기술연구원 소프트웨어융합소재연구센터)	
		정택동(서울대학교 화학과)	최정규(고려대학교 화공생명공학과)	
		변재철(연세대학교 화공생명공학부)		

● ● 한국화학관련학회연합회 정회원 · 특별회원 ● ●

1. 정회원: 6개 화학관련 학회

학회명	회장	소속	홈페이지
대한화학회	신석민	서울대학교 화학부	http://www.kcsnet.or.kr
한국고분자학회	김교현	롯데그룹 화학군	http://www.polymer.or.kr
한국공업화학회	심상준	고려대학교 화공생명공학과	http://www.ksiec.or.kr
한국세라믹학회	김병국	한국과학기술연구원	http://www.ceramics.or.kr
한국화학공학회	류승호	이수화학 대표이사	http://www.kiche.or.kr
한국전기화학회	성영은	서울대학교 화학생명공학부	https://www.kecs.or.kr/

2. 특별회원: 7개 화학관련학회 산업체 및 연구기관

회원명	기관장	홈페이지
한화토탈에너지스 주식회사	김중서	http://www.hanwha-total.com
(주)LG화학	신학철	http://www.lgchem.com
한국석유화학협회	신학철	http://www.kpia.or.kr
한국화학연구원	이영국	http://www.kRICT.re.kr
GS칼텍스(주)	허세홍	http://www.gscaletx.com
고등기술연구원	김덕중	http://www.iae.re.kr/
(주)동진씨미켐	이부섭, 이준혁	https://www.dongjin.com/main/

화학연합

제15권 제2호 (통권 65호)

2023년 11월 30일 인쇄
2023년 12월 4일 발행

발행인 김 회 택
발행처 사단법인 한국화학관련학회연합회
서울시 성북구 안암로 119 한국화학회관 3층
TEL : (02) 925-5271 FAX : (02) 925-5272
E-mail : kucst@kucst.org WEB : <http://www.kucst.org>

인쇄 한림원(주)
서울특별시 중구 퇴계로 51길 20, 1303(오장동, 넥서스타워)
TEL : (02) 2273-4201 FAX : (02) 2266-9083
WEB : www.hanrimwon.com

정가: 3,500원

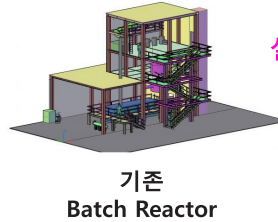
※ 판본이나 잘못된 책은 구입에서 교환해 드립니다.



Corning® Advanced-Flow™ Reactors

1. Flow Chemistry

연속 흐름 시스템에서 화학 반응은 특정한 일정 유속에서 단일 챔버, 튜브 또는 마이크로 반응기로 주입되는 두 개 이상의 다른 반응물의 연속 공급 흐름으로 시작되어 반응이 일어나고, 생성물을 포함하는 화합물이 배출구에서 수거됩니다.



설치 및 운영 공간

축소



“연속 흐름 반응기는 최선의 투자”

안전성	운영비 절감	친환경 공정
<ul style="list-style-type: none"> 중대재해법 대비 안전한 양산 시스템 완벽한 반응 재현성 (품질 안정 관리) 사고 예방 (폭발, 부식, 독성, 인체 유해, 화재) 	<ul style="list-style-type: none"> 설치 공간 축소 Seamless Scale-Up 혁신적 경쟁력 (Low Cost) 인건비 및 원료 절감 (스마트 제조 공정) 	<ul style="list-style-type: none"> 환경 보호 녹색 화학 구현

2. Corning AFR Design

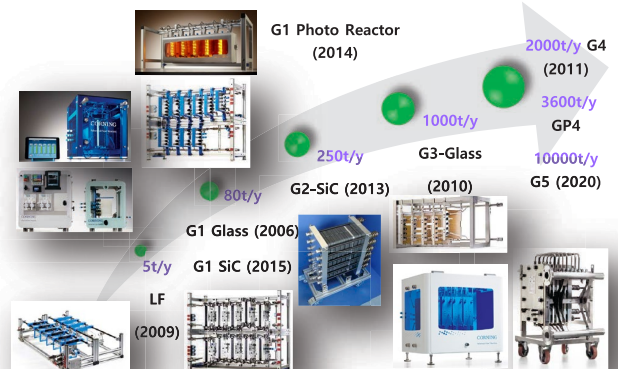


- 반응 형태
 - Lab & LF AFR – 액체/액체, 액체/기체
 - G1 이상 AFR : 액체/액체, 액체/기체, 액체/기체/고체
- 장비 구성
 - 원료 공급 시스템 / 반응 시스템
 - 온도 제어 시스템 / 기타 Accessory
- 적용 온도 범위
 - 50°C ~ 200°C
- 적용 압력
 - Up to 18 bar (@ RT)

3. 적용사례

Reaction Type	Reaction Scheme	Reaction Type	Reaction Scheme
Oxidation		Rearrangement reaction	
Hydrogenation		Michael addition reaction	
Nitration		Peroxide preparation	
Fluorination		Low temperature reaction	
Chlorination		Grignard Reaction	
Bromination		Epoxy methyl chloride preparation	
diazo-reaction		coupling reaction	
Cyclo-oxidation		methylation	
Neutralization reaction	Acid + Base → Salt	Cyclization reaction	
Hydrolysis reaction		Polymerization	
condensation reaction		Photocatalytic reaction	

4. AFR 제품군



Success Story with WELL E&C

TEL : 031-426-5316 / FAX : 031-426-5317 / www.wellcorp.co.kr

제7회 한국도레이 과학기술상 및 펠로십 공모

2024. 4. 1.(월) - 6. 30.(일)

한국 과학기술의
미래를 이끌어 갈
우수한 과학자·공학자를
기다립니다!

시상 2024년 10월 예정

문의 사무국 02-3279-1273, 1032

www.koreatoraysf.org

응모서류 다운로드

ktsf@koreatoraysf.org

이메일 접수

한국도레이 과학기술상

대상

- 대한민국 국적으로 국내 대학, 연구기관 등에 소속된 분
- 세계적 수준의 연구업적, 현저한 발견, 기술의 진보를 주로 국내에서 이룩한 과학자/공학자
- 소속된 기관에서 전일제 (Full-time job)로 근무하는 분

분야

- 화학 및 재료 기초분야 1명
- 화학 및 재료 응용분야 1명 등 총 2명

포상

- 각 분야별 상금 1억원 및 상패

심사

- 수상 후보의 평생 동안의 업적을 대상으로 심사

한국도레이 펠로십

대상

- 대한민국 국적으로 국내 대학, 연구기관 등에 소속된 분
- 화학 및 재료 분야에 종사하는 과학자/공학자로 모집공고일 기준 관련분야 박사학위 취득 후 10년 미만인 분
- 해당 과제의 타 기관 지원 이력이 없는 분(중복지원 불가)

분야

- 화학 및 재료 기초분야 2~3명(또는 팀)
- 화학 및 재료 응용분야 2~3명(또는 팀) 등 총 5명(또는 팀)

지원

- 과제별 최대 5천만원/년, 최대 3년 지원

심사

- 독창적인 아이디어가 돋보이는 도전적인 과제
- 기금을 사용하여 연구 진척이 기대되는 과제

'TORAY'

한국도레이과학진흥재단

공익법인 한국도레이과학진흥재단은 과학의 발전과 인재 육성을 위해 노력하고 있습니다.