



# 융합연구리뷰

Convergence Research Review

**그린수소 생산을 위한 비귀금속 촉매**

박혜성(고려대학교 융합에너지공학과 교수)

**미세플라스틱 제거 기술 관련 연구, 기업, 산업, 정책 동향**

최재우(한국과학기술연구원 물자원순환연구단 책임연구원)

정영균(한국과학기술연구원 물자원순환연구단 박사후연구원)

# CONTENTS

**01** 편집자 주

**03** 그린수소 생산을 위한 비귀금속 촉매

**33** 미세플라스틱 제거 기술 관련 연구, 기업, 산업, 정책 동향

**73** 국가R&D 현황 분석

## 융합연구리뷰

Convergence Research Review

2024 February Vol.10 No.02

발행일 2024년 2월 27일

발행인 임혜원

발행처 한국과학기술연구원 미래융합전략센터  
02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5  
Tel. 02-958-4987 | <https://kist.re.kr/fcsc>

펴낸곳 공간기획 Tel. 044-863-0978



미래융합전략센터  
Future Convergence Strategy Center

## 편집자주

### 화석연료 없이 생산하는 그린수소, 비귀금속 촉매로 경제성을 찾다.

수소는 자동차, 화학, 전력 및 열 생산 등 다양한 분야에서 활용될 수 있는 잠재력을 지닌다. 그중에서도 화석연료 없이 생산하는 그린수소는 신재생에너지로 각광받고 있다.

수소는 생산 과정에 따라 그레이수소, 블루수소, 그린수소로 나뉜다. 그레이수소는 석유화학 공정 부산물 및 천연가스 분해 과정에서 생산되는 수소를 말하고, 블루수소는 이산화탄소를 포집하여 생산한 수소를 말한다. 그린수소는 신재생에너지와 수전해기술을 통해 생산한 수소로, 생산 과정에서 이산화탄소를 배출하지 않기 때문에 진정한 청정에너지라 할 수 있다.

그러나 그린수소 생산을 위한 수전해 설비는 비용 부담이 크다. 수전해 과정에서 주로 사용되는 귀금속 촉매인 백금과 이리듐의 생산 단가가 매우 높기 때문이다. 따라서 경제적인 수소 생산을 위해서는 비귀금속 기반 촉매 개발이 중요하다. 본 호 1부에서는 수전해 반응 환경별로 대표적인 비귀금속 기반 촉매 개발 현황에 대해 알아보려고 한다.

### 늘어가는 미세플라스틱, 채취-분석-제거 기술 개발을 통해 지구를 지키다.

플라스틱은 우리의 일상생활 속 손이 닿는 모든 곳에 있다고 해도 과언이 아니다. 사용하고 난 폐플라스틱은 바다로 떠내려가 해양오염과 같은 환경 문제를 일으킨다.

특히 직경 5mm 이하인 미세플라스틱 문제가 대두되고 있다. 흔히 미세플라스틱이라 하면 생활용품과 화장품에 들어가는 1차 미세플라스틱을 떠올리기 쉽지만, 큰 플라스틱으로부터 마모되거나 쪼개져 나온 2차 미세플라스틱이 대다수이다.

미세플라스틱이 돌아올 땐 우리의 입을 통해 들어온다. 식수나 해산물 등에 알게 모르게 함유된 미세플라스틱은 그대로 체내에 흡수되어 악영향을 끼칠 수 있다.

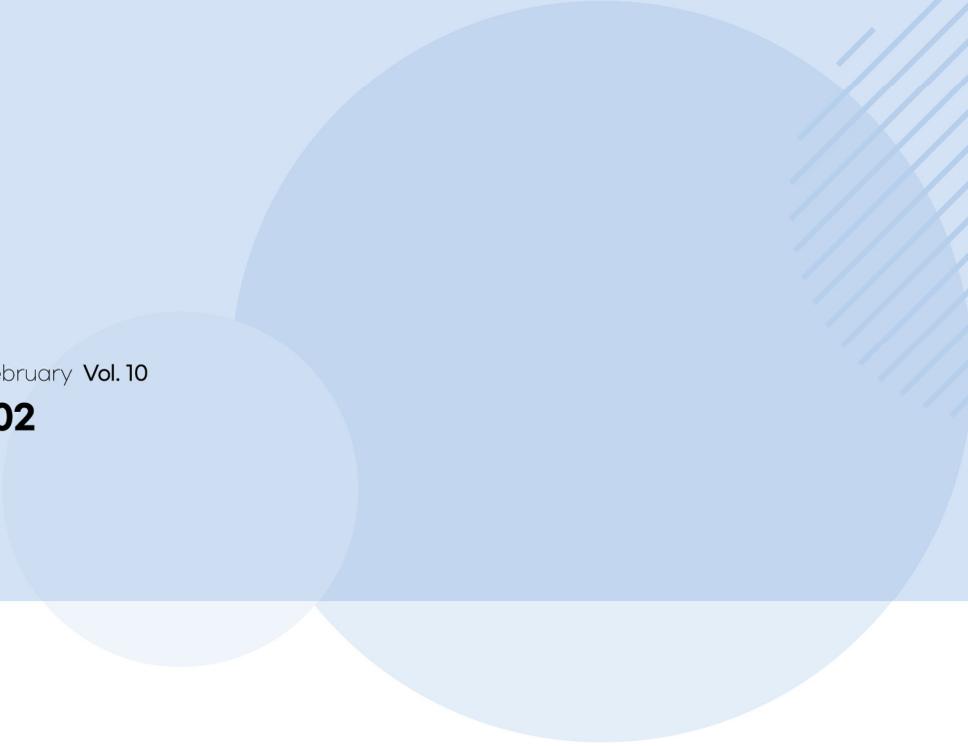
따라서 본 호 2부를 통해 미세플라스틱의 위해성을 인지하고 대책을 마련하고자 한다. 이를 위해 미세플라스틱의 채취부터 분석, 제거에 이르는 기술을 소개하고, 국내외 미세플라스틱 관리 및 탈플라스틱 정책 동향을 정리하였다.



**융합연구리뷰**  
Convergence Research Review

2024 February Vol. 10

**No. 02**



# 1

## 그린수소 생산을 위한 비귀금속 촉매

박혜성

고려대학교 융합에너지공학과 교수

# 1. 그린수소 생산을 위한 비귀금속 촉매

박혜성 (고려대학교 융합에너지공학과 교수)

## I. 서론

기후 재난의 심각성이 날이 증가하고 있는 가운데, 2023년은 기상 관측 이래 역사상 지구 평균 기온이 가장 높은 해로 기록되었다. 인류는 기존 화석연료 기반의 에너지를 재생에너지로 전환하여 이러한 기후 위기와 에너지 위기에 대응하고자 한다. 그린수소는 재생 에너지를 통해 생산되는 수소를 지칭하며, 화석연료에 대한 의존도를 줄이고 온실가스 배출을 감소시키는 데 기여할 것으로 기대되고 있다. 수소는 <그림 1>과 같이 생산 과정에 따라 그레이수소, 블루수소, 그리고 그린수소로 나뉘는데, 수소 생산 과정에서 이산화탄소를 배출할 경우 그레이수소, 이산화탄소를 포집하면 블루수소, 그리고 재생에너지를 통해 수소를 생산하여 이산화탄소를 배출하지 않을 경우 그린수소로 구분하고 있다. 그레이수소와 블루수소는 화석연료가 연관된 생산 과정으로 인해 온실가스를 배출하기 때문에, 그린수소만이 완전한 청정에너지원으로 구분 및 활용할 수 있다. 그러나 그린수소는 태양광, 풍력 등의 재생에너지를 통해 얻은 전기로 물을 전기분해(이하 수전해)하기 때문에, 재생에너지의 발전단가와 수전해 설비 비용에 기인한 높은 수소 생산 단가로 인해 그레이수소나 블루수소보다 경제성이 떨어지는 문제점이 있다. 수전해 설비 비용 비중을 가장 많이 차지하는 요소는 주로 귀금속 기반 촉매 소재로, 환원 전극에서 일어나는 수소 발생 반응(Hydrogen Evolution Reaction, HER)에는 백금, 산화 전극의 산소 발생 반응(Oxygen Evolution Reaction, OER)에는 이리듐이 주로 사용된다. 백금과 이리듐 같은 귀금속의 높은 생산 원가는 수전해 설비 비용을 증가시켜 그린수소의 생산 단가를 높이는 주요 요인이 되기 때문에, 대규모 수소 생산 설비를 구축하는데 있어 큰 걸림돌이 되고 있다. 따라서 경제적인 그린수소 생산을 위해서 지구상에 풍부하게 존재하는 원소재(earth-abundant materials)를 기반으로 귀금속 촉매만큼 우수한 활성과 안정성을 보여줄 수 있는(심지어 더 우수한) 비귀금속 기반 촉매 개발의 중요성이 강조되고 있다. 본 융합연구리뷰에서는 수전해 설비의 종류에 대한 소개를 시작으로, 수전해 반응 환경별로 주목받고 있는 대표적인 비귀금속 기반 촉매 소재 개발 현황에 대해서 소개하고자 한다.

그림 1. 생산 방법에 따른 수소 구분

### 수소에너지 생산 방법



\* 출처: 현대건설 (2022)

## II. 그린수소 생산 설비 종류

수전해는 전기화학 반응을 통해 물을 산소와 수소로 분리하는 반응을 일컬으며, 반쪽 전지 반응(half-cell reaction)은 각각 환원 전극(cathode, 음극)에서의 HER, 산화 전극(anode, 양극)에서의 OER 과정으로 구분된다. 수전해 전기화학 셀에서 외부 전원을 통해 수전해 반응에 필요한 전압(이론적으로 표준 조건에서 최소 1.23 V)이 공급되면 전자는 외부 전기회로, 이온은 전해질을 통해 각각 이동하여 HER과 OER을 발생시킨다. 수전해 설비는 <그림 2>와 같이 전해질의 종류에 따라 알칼리인 수전해(alkaline water electrolysis, AWE or alkaline electrolysis, AEC), 양이온 교환막 수전해(proton exchange membrane water electrolysis, PEMWE), 음이온 교환막 수전해(anion exchange membrane water electrolysis, AEMWE), 그리고 고체산화물 수전해(solid oxide electrolyzer cell, SOEC)로 나뉘며, <표 1>에서 보는 바와 같이 각각의 반응 환경에 따라 HER과 OER의 반응식, 촉매 소재와 셀 구성 요소, 효율 및 작동 전류밀도가 다르게 구분된다.

그림 2. 수전해 설비의 종류



\* 출처: SK E&S (2023)

표 1. 수전해 기술별 차이점 비교

	알칼리인수전해(AWE) 양극: $4OH^- \rightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^-$ 음극: $4H_2O + 4e^- \rightarrow 2H_2 + 4OH^-$	양이온교환막 수전해(PEMWE) 양극: $2H_2O \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^-$ 음극: $4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$	음이온 교환막 수전해(AEMWE) 양극: $4OH^- \rightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^-$ 음극: $4H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- + 2H_2$	고체 산화물 수전해(SOEC) 양극: $2O^{2-} \rightarrow O_2 + 4e^-$ 음극: $2H_2O + 4e^- \rightarrow 2H_2 + 2O^{2-}$
작동 온도(°C)	60~90	50~80	35~50	700~900
작동 전류밀도(mA/cm <sup>2</sup> )	250~450	2,000~3,000	> 450	1,000~2,000
스택 효율(% LHV)	63~71	60~68	> 82	100
시스템 효율(% LHV)	51~60	46~60	> 67.5	> 80
시스템 용량	~20MW(단일 10MW) (~8,000kg_H <sub>2</sub> /day)	~30MW(단일 3MW) (~13,000kg_H <sub>2</sub> /day)	1MW(단일 2.4kW) (410kg_H <sub>2</sub> /day)	- (50kg_H <sub>2</sub> /day)
초기 설치 비용(€/kW)	800~1,500	1,400~2,100	500~600	2,800~5,600
수소생산 압력(bar)	7~30	20~50(350)	35	1~15
내구성(kh)	55~120	60~100	-35	8~20
장점	- 비귀금속 촉매 - 기술 성숙도 ↑	- 고순도 수소(Dry Cathode) - 높은 에너지 밀도 - 고압 운전	- 고전류밀도 운전- 비귀금속 촉매 소재 - 저가, 고순도, 고압 수소 - 높은 공간 효율성(모듈형)	- 높은 에너지 효율- 비귀금속 촉매 소재 - 높은 내부식성(고체 전해질) - 유지 및 보수 용이(전해질 보충 X)
단점	- 수소와 산소 혼합의 위험 - 저순도 수소 및 낮은 에너지 밀도 - 부식환경, 수소 정제 필요	- 비싼 귀금속 촉매 - 비싼 Ti-bipolar 필요 - 높은 스택 및 시스템 가격	- 촉매/전극의 활성/내구성 ↓ - 멤브레인 전도도 및 내구성 ↓	- 높은 운전 온도 - 상용화 기술 개발 필요 - 낮은 시스템 내구성

\* 출처: 가스신문 (2023.08.08.)

먼저 AWE는 수전해 기술 중 가장 기술 성숙도가 높은 기술로, KOH 용액을 알칼리 전해액으로 사용한다. KOH 전해질 내 수산화 음이온(OH<sup>-</sup>)의 이동을 통해 전하가 전달되며, 주로 비귀금속 촉매가 사용된다. 높은 기술 성숙도와 비귀금속 촉매 사용으로 인해 수소 생산 단가가 낮다는 장점이 있으나, 음극과 양극이 격막으로 분리된 구조로 인해 PEMWE 대비 고압 운전이 불가능하고 운전 전류밀도가 낮으며, 느린 응답 특성을 갖는다는 단점이 있다. 하지만, AWE는 비귀금속 촉매가 가장 활발히 연구된 수전해 설비로써 다양한 고성능의 비귀금속 촉매 소재가 보고되고 있다.

PEMWE는 고분자 전해질막, 양이온 교환막을 전해질로 사용하는 기술로, 양성자(H<sup>+</sup>)의 이동을 통해 전하가 전달된다. KOH 용액을 사용하는 AWE와 달리 순수한 물을 원료로 사용하여 고순도의 수소를 높은 전류밀도 운전을 통해 생산한다. On-off 응답 특성도 빠르고 고압/변압 운전 및 시스템의 소형화와 단순화도 가능한 PEMWE의 가장 큰 단점은 고가의 귀금속 촉매와 양성자 교환막을 사용하기 때문에 수소 생산 단가가 높아지게 되어 대용량 수소 생산 시설 구축에 적합하지 않다는 점이다. 기존 AWE를 위해 개발된 비귀금속 촉매는 산 환경에서 내식성이 부족하여 PEMWE에 적용되기 어려우므로 현재 PEMWE에 사용되는 촉매 소재 연구는 이러한 귀금속의 비율을 낮추는 데 집중되고 있다. 때문에 PEMWE 촉매 소재 연구의 궁극적 목표는 PEMWE의 반응 환경에서도 귀금속 촉매와 같은 우수한 촉매 활성과 안정성을 나타내는 비귀금속 촉매 개발로 귀결된다 할 수 있겠다. 최근 산 환경에서도 귀금속에 준하는 높은 활성과 안정성을 가지고 있는 비귀금속 촉매 개발 연구들이 높은 주목을 받고 있다.

AEMWE와 SOEC는 상업화 단계의 AWE와 상용화 단계의 PEMWE와는 달리 아직 기술적 성숙도가 부족한 차세대 수전해 기술로 구분되며, 촉매 소재의 한계보다는 전해질 소재의 한계가 우선 극복되어야 할 이슈로 고려되고 있다. AEMWE는 PEMWE와 같이 고분자 전해질막이 사용되는 점에서는 유사성이 있으나, 전해질로

양성자가 아닌 수산화 음이온이 전달되는 음이온 교환막을 사용한다는 점에서 차이를 보인다. 고분자 전해질막의 사용을 통해 고압/변압 운전과 고전류밀도 운전이 가능한 반면, PEMWE와 달리 수산화 음이온의 존재로 인해 수전해 반응이 알칼리 환경에서 일어나기 때문에 내부식성이 높은 소재의 사용이 강제되지 않아 비귀금속 촉매를 적용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 음이온 교환막은 PEMWE에 사용되는 양이온 교환막에 비해 이온 전도도와 구동 안정성에 대한 신뢰성을 확보하지 못하고 있어 양이온 교환막만큼 높은 이온 전도도와 내구성을 확보할 수 있는 전해질 개발 연구가 필요하다.

SOEC는 700~800°C에서 물을 증기로 변환시키는 전기분해 과정을 통해 그린수소를 생산하는 방법이다. 고온에서 반응이 이루어지는 특징으로 인해 다른 수전해 기술 대비 상대적으로 적은 양의 전기를 필요로 한다. 주로 활용되는 수전해 반응 촉매로는 고온 안정성이 높은 페로브스카이트 산화물(perovskite oxides) 기반의 비귀금속 소재가 있다. SOEC는 세라믹 계열의 고체산화물 전해질(주로 yttria-stabilized zirconia, YSZ)을 이용하기 때문에 부식에 강하고 전해액의 보충이 필요 없어 유지보수가 쉽다는 장점이 있으나, 물을 가열하는 데 있어 추가 열원이 필요하며 전해질 성능 열화 문제가 아직 극복되지 못하고 있어 고온의 구동조건에서 우수한 안정성이 담보된 고체 전해질의 연구가 필요한 상황이다.

### III. 수소 생산 설비 종류에 따른 비귀금속 촉매와 시장 현황

#### 1. 알칼리 환경(AWE, AEMWE)

알칼리 환경(AWE, AEMWE)에서 수전해 반응을 목표로 개발되고 있는 비귀금속 수전해 촉매의 대표적인 소재로는 주로 전이 금속(Mn, Mo, Fe, Co, Ni 등)에 기반한 화합물이 사용되고 있다. AWE의 기술 성숙도가 높은 만큼 다양한 촉매가 보고되고 있으며 HER에서 백금과 유사한 활성을 나타내는 촉매와 OER에서 이리듐보다 더 높은 활성을 보여주는 촉매도 종종 보고되고 있다. 최근 연구 동향은 HER과 OER 모두에 활성인 이 기능성 촉매, 다공성 전도성 금속 지지체에 촉매 직접 합성을 통한 자체지지 전극(self-supported electrode), 대규모 알칼라인 수소 생산 설비, 간단하고 단순한 촉매 합성법 개발 등의 연구가 주로 이루어지고 있다. 일반적으로 알칼리 환경 수전해 촉매 연구의 대상 반응은 상대적으로 HER보다 OER에 초점이 맞춰져 있다. OER은 2 전자 반응인 HER과 달리 4 전자 반응이기 때문에 느린 반응 동역학으로 인해 수전해의 주요 병목 현상으로 작용하여 전체적인 수전해 셀 전압을 높이는 주요한 요인이 된다. 때문에 OER 과전압을 낮출 수 있는 고성능의 촉매 개발 연구가 필연적이다.

AWE의 산업적 적용 또한 활발히 이루어지고 있는데, 국내에서는 지난해 10월 현대엔지니어링이 알칼라인 수전해 기기 생산전문업체인 테크로스와 “알칼라인 수전해 기반 그린수소사업 협력”을 위한 양해각서(MOU)를

체결했다고 밝혔다. 아헤스는 6.5MW급의 수전해 장치를 제조할 수 있는 제조설비를 완비하여 양산하고 있고, 인도 및 중국에 현지 법인을 설립하여 현지화 생산에도 박차를 가하고 있다. 국내 1호 그린수소 실증단지인 제주 행원 수전해 실증단지에는 제주 풍력 발전 단지의 계통 안정성을 확보하기 위해 수소에너지의 2MW급 알칼라인 수전해 설비와 엘캠텍의 스택을 기반으로 하는 선보유니텍의 300kW급 PEM 전해조가 지난해 8월부터 실증 운전에 나섰다. 해외에서는 글로벌 1위 알칼라인 수전해 업체인 Nel ASA(노르웨이)가 2025년까지 노르웨이 Heroya 공장의 수전해 설비 규모를 2GW까지 확대할 전망이라고 발표했다.

AEM 수전해는 AWE와 유사한 반응 환경에서 작동하기 때문에 AWE를 대상으로 개발된 비귀금속 촉매 대부분을 그대로 적용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 신뢰성 높은 음이온 교환막 전해질의 부재로 인해 국내에서는 AEMWE를 상업화에 적용한 기업은 현재 찾아보기 힘든 실정이다. 한화솔루션은 2023년 개발 목표로 AEM 기술을 꼽았고, 2024년 상업화 계획을 발표했다. 해외에서는 2019년 독일 회사 Enapter가 세계 최초의 모듈식 AEM 상용 제품인 EElectrolyser EL 2.1을 발표하였다. 일본은 현재 세계 최대의 음이온 교환막 생산 지역으로, 시장 점유율이 약 47%에 달한다. 그러나 현재 대부분 국가의 AEMWE 기술력은 거의 유사한 수준으로 세대 및 지역 간 격차가 크지 않는 것으로 평가되고 있으며, 문헌에 보고된 연구실 단위의 AEMWE의 성능이 상용화 제품보다 훨씬 뛰어난 상황을 고려해 볼 때 AEMWE의 성능 개선의 여지가 여전히 높다는 것을 알 수 있다.

### 1.1. Alkaline HER 촉매

HER은 2 전자 반응으로 Volmer-Heyrovsky, 또는 Volmer-Tafel 경로로 이루어진다. <그림 3>은 산성과 알칼리 환경의 HER 메커니즘을 모식도로 나타내고 있으며, 자세한 알칼리 환경의 HER 메커니즘은 아래와 같다.

알칼리 환경 HER 메커니즘:

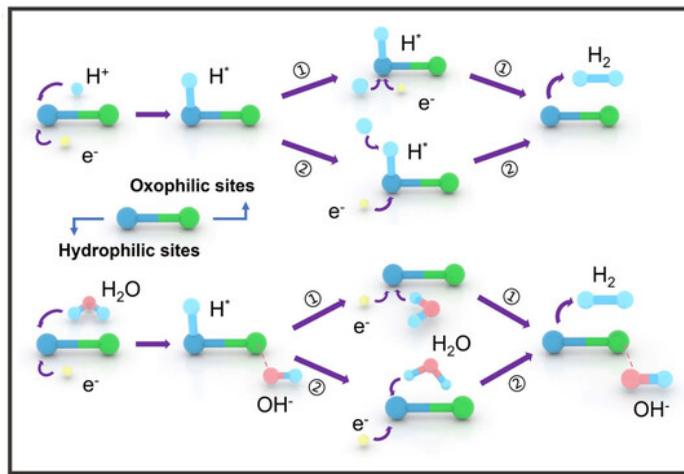


Volmer 반응은 전기화학적 수소 흡착 반응으로 물 분자(H<sub>2</sub>O)가 전자를 공급받으면 촉매 표면에 흡착된 수소 원자(H\*)와 수산화 이온(OH<sup>-</sup>)으로 해리된다. Heyrovsky와 Tafel 반응은 수소 탈착 반응으로 Volmer-Tafel 경로에서는 흡착된 수소 원자와 물 분자가 직접 만나 수소(H<sub>2</sub>)와 수산화 이온(OH<sup>-</sup>)으로 전환되어 촉매 표면에서 탈착되며, Volmer-Heyrovsky 경로에서는 흡착된 두 수소 원자(H\*)가 만나 수소(H<sub>2</sub>)로 전환되어 촉매 표면에서 탈착된다. 촉매의 HER 활성을 평가하는 대표적인 척도로는 수소 흡착 자유 에너지(hydrogen adsorption free energy, ΔG<sub>H</sub>)가 있는데, <그림 4>와 같이 수소 흡착 자유 에너지가 0에 가까울수록 HER 활성이 높은 것으로 평가된다. 이는 흡착된 수소 원자가 쉽게 흡·탈착될 수 있어 원활한 반응이 이루어지기 때문이다. 단일 금속 촉매를

기준으로 HER 활성을 비교했을 때, <그림 4>에서 보이는 바와 같이 백금(Pt)의 수소 흡착 자유 에너지가 가장 0에 가깝고, 때문에 HER 활성 또한 가장 높다 할 수 있다.

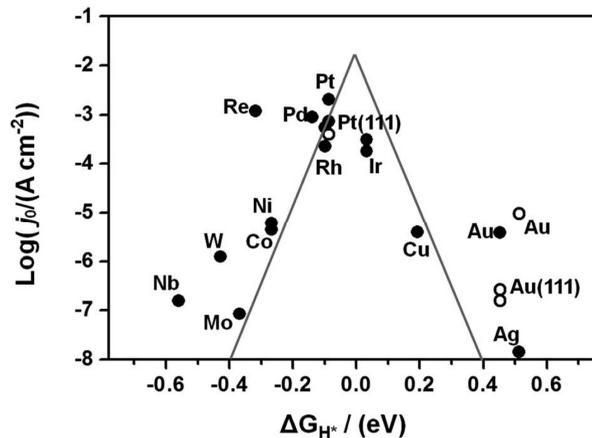
전이 금속 기반 화합물은 비귀금속 기반 촉매의 대표주자로 전이 금속 산화물과 수산화물, 전이 금속 칼코젠 화합물, 전이 금속 질화물, 전이 금속 인화물, 전이 금속 탄화물 등이 유망한 HER 촉매로 보고되고 있다. 단일 물질의 HER 성능은 백금이 가장 높지만, 전이 금속 기반 화합물은 HER 활성을 높이기 위한 여러 전략(상전이, 결함생성, 이종 구조, 비정질화 등)을 도입하여 전자 전도성 향상, 활성 사이트(active site) 형성, 수소 흡착 에너지 최적화 등을 달성하여 백금과 비견되는 높은 HER 활성과 HER 장기 안정성을 보여주고 있다.

그림 3. 수소 발생 반응 메커니즘(상단: 산성, 하단: 알칼리, 중성)



\* 출처: A. Song et al. (2023)

그림 4. 다양한 금속의 HER 볼케이노 플롯(volcano plot)

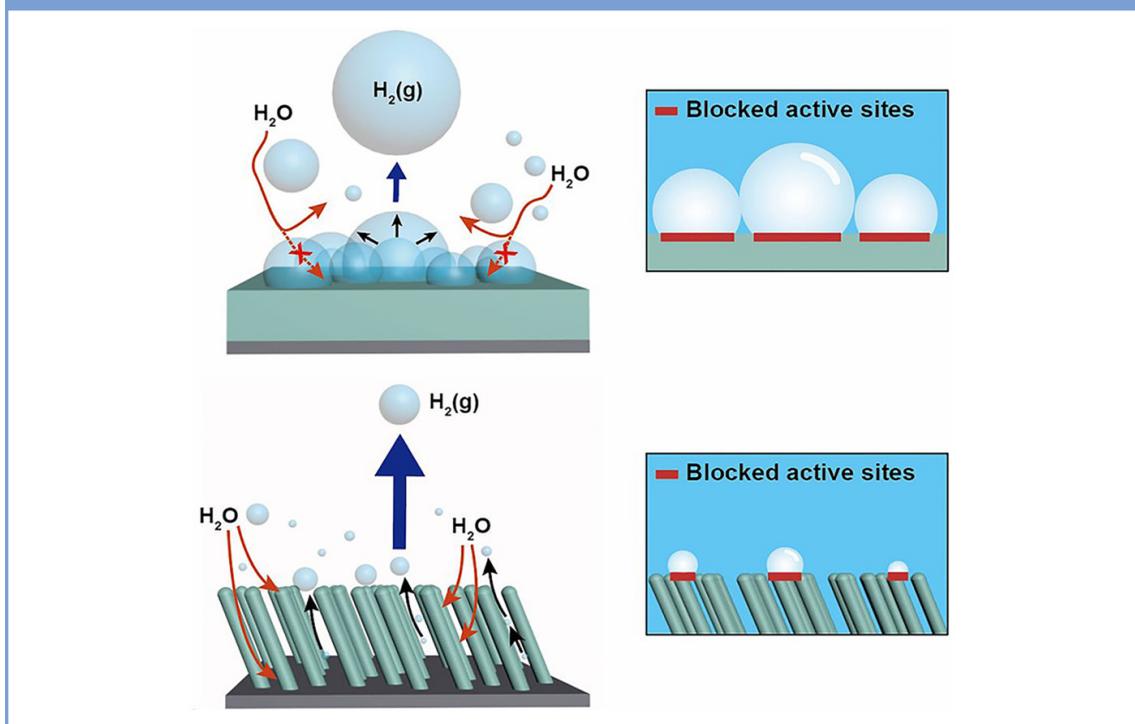


\* 출처: J. Xiong et al. (2021)

최근 POSTECH(포항공과대학교) 연구팀은 <그림 5>와 같이 경사각 증착법(oblique angle deposition, OAD)을 통해 니켈 기반 3차원 나노 막대 촉매 전극 시스템을 개발하여 기존 박막 형상 촉매 전극 대비 HER 효율이 향상된 다공성 니켈 촉매 소재를 개발하였다. OAD 방법을 통해 제조된 니켈 나노 막대의 정렬 구조는 수소의 기포 탈출을 가속할 수 있으며 이는 소스 증기 플럭스(source vapor flux)의 입사각 조절을 통해 여러 각도로 정렬된 니켈 나노 막대 촉매 전극의 HER 성능 비교를 통해 입증되었다.

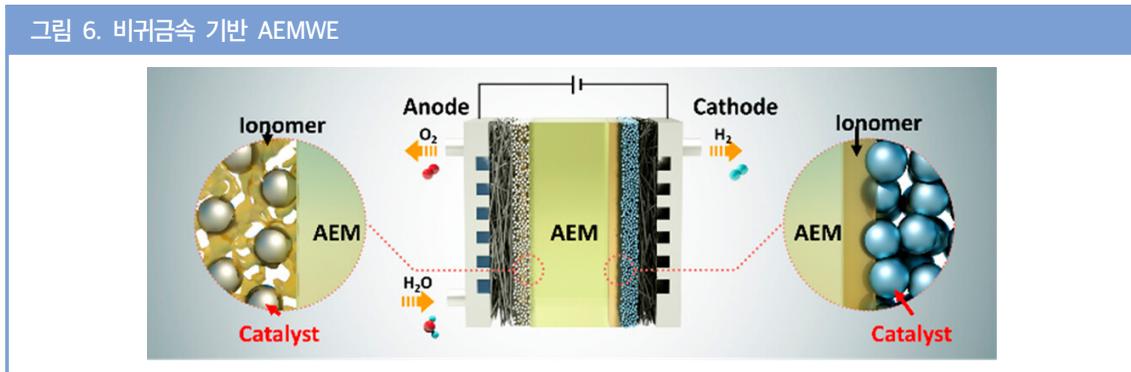
<그림 6>은 비귀금속 촉매를 활용한 AEM 개발 및 귀금속 촉매와의 성능 비교 연구이다. 비귀금속 촉매의 AEMWE의 주요 성능 병목 현상은 환원 전극의 HER 성능인 것으로 밝혀졌으며, 새로운 이오노머(ionomer)인 PBP(branched poly(biphenyl piperidinium))를 개발하고 이를 NiMo HER 촉매 코팅에 사용하면서 귀금속 촉매가 사용된 AEMWE보다 우수한 성능을 나타내는 AEMWE를 개발하였다.

그림 5. 수소 기포 방출을 가속하는 니켈 기반 3차원 나노 막대 촉매 전극 시스템



\* 출처: J. Kim et al. (2023)

그림 6. 비귀금속 기반 AEMWE



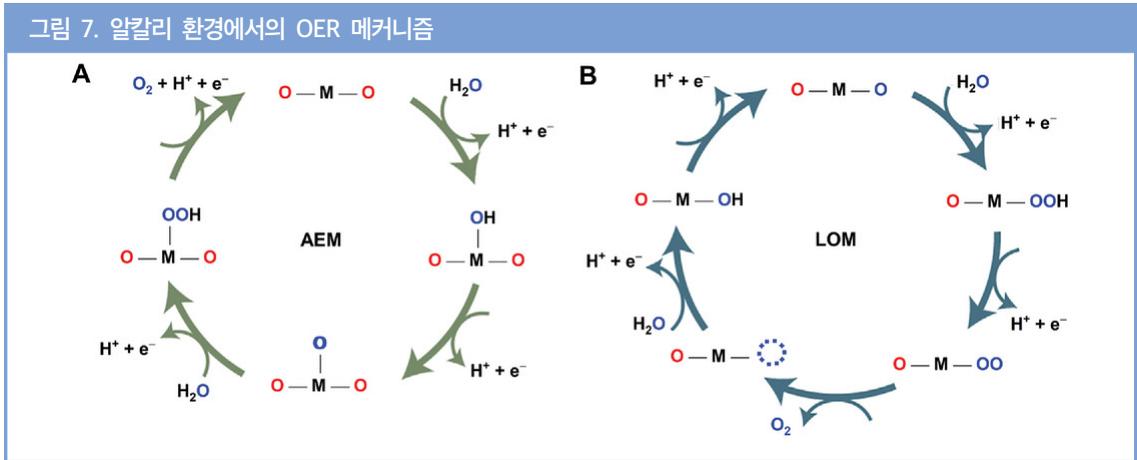
\* 출처: Y. Zheng et al. (2023)

## 1.2. Alkaline OER 촉매

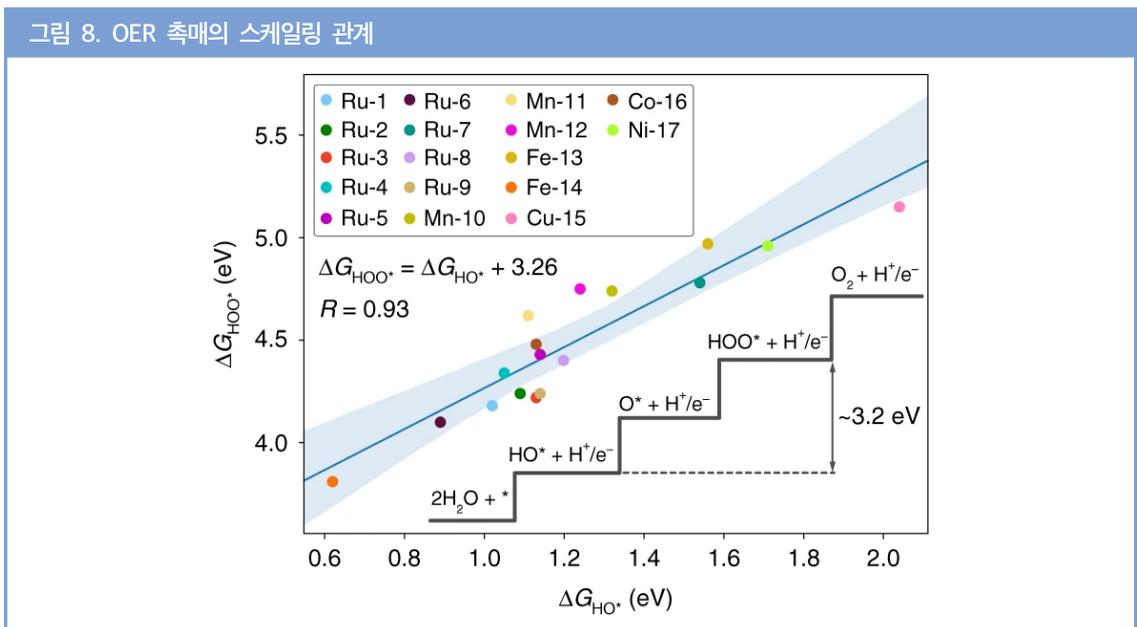
알칼리 환경에서 수전해 반쪽 반응인 OER은 2 전자 반응인 HER과 달리 4 전자 반응에 기인한 느린 반응 동역학으로 인해 수전해의 주요 병목 현상으로 지목되고 한다. 때문에 알칼리인 수전해의 완전 셀 효율은 OER 촉매 성능에 의해 결정된다고 해도 과언이 아니다. 금속 산화물 촉매는 알칼리 환경에서 활용되는 대표적인 OER 촉매로, 귀금속 산화물보다 높은 OER 활성과 안정성을 지닌 지구상에 풍부한 금속으로 이루어진 다양한 종류의 금속 산화물 촉매가 활발하게 보고되고 있다.

알칼리 환경에서 금속 산화물 촉매의 일반적인 OER 구동 원리는 <그림 7>과 같이 AEM (adsorbate evolution mechanism)과 LOM (lattice oxygen evolution mechanism)으로 구분된다. 먼저 수산화 이온(OH<sup>-</sup>)이 금속 활성 부위(M)에 흡착되어 1 전자 산화에 의해 M-\*OH로 생성되고, M-\*OH에서 결합된 양성자(H<sup>+</sup>)와 전자(e<sup>-</sup>)가 제거되면 M-\*O가 된다. 전통적 OER 메커니즘인 AEM에선 M-\*O와 수산화 이온이 반응하여 M-\*OOH를 형성한 후 다른 수산화 이온과 반응하여 산소(O<sub>2</sub>)와 물 분자(H<sub>2</sub>O)를 생성한다. 그에 반해 LOM에선 산화물 촉매의 격자 산소가 O-O 결합에 직접 관여하여 AEM의 흡착 에너지 스케일링 관계(scaling relationship)의 제한 없이 OER 과정에 참여할 수 있다. <그림 8>에 보이는 바와 같이 AEM의 스케일링 관계는 중간체 \*OH와 \*OOH 간의 흡착 에너지가 일정하게 유지되는 현상으로 반응 속도 결정 단계(rate determining step, RDS)를 열역학적으로 제한하기 때문에 AEM을 따르는 금속 산화물 OER 촉매는 OER 활성에 한계가 있다고 여겨져 왔다. <그림 9>에 보이는 바와 같이 최근 몇 년 동안 페로브스카이트 산화물(perovskite oxide), 전이 금속 옥시 수산화물(oxyhydroxide), 스피넬 산화물(spinel oxide)에서 LOM의 발달에 관한 연구가 활발히 이루어져왔다. 페로브스카이트 산화물 촉매에서 표면이 아닌 벌크의 전자 구조를 변경하면 금속-산소 혼성화(metal-oxygen hybridization)와 페르미 준위에 대한 산소 2p 밴드 중심의 증가(O 2p-band center relative to the Fermi level)로 인해 OER 활성이 증가하는 것으로 밝혀졌으며, 실험적으로 OER 반응물 동위원소 질량 분석 측정(isotope measurement) 결과 발생한 산소와 물 분자의 산소 원자가 페로브스카이트 산화물 촉매 표면의 결정 구조 내에서 생성될 수 있음이 밝혀졌다. 이후 산화물 촉매 표면의 결정 구조 내의 격자 산소(lattice oxygen)가 OER 과정에 참여하는 LOM이 제안되어 비귀금속 기반 물질인 페로브스카이트 산화물,

전이 금속 옥시 수산화물, 스피넬 산화물 기반의 고효율 OER 촉매를 설계할 수 있는 기반을 제공하였다. 그러나 LOM을 따르는 금속 산화물 촉매는 결정 구조 내 격자 산소의 지속적인 반응 참여로 인한 표면 재구성 또는 표면 비정질화를 겪기 때문에 구조 안정성이 낮다는 단점 역시 보고되고 있다.

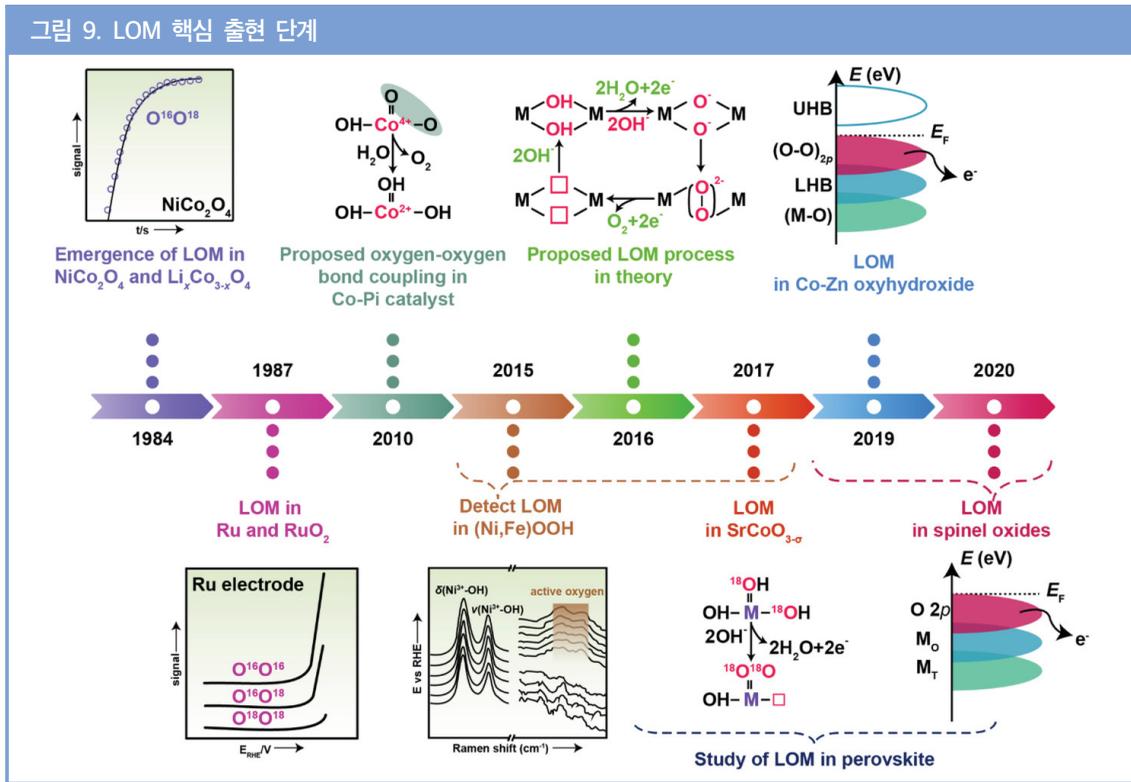


\* 출처: X. Xie et al. (2022)



\* 출처: M. J. Craig et al. (2019)

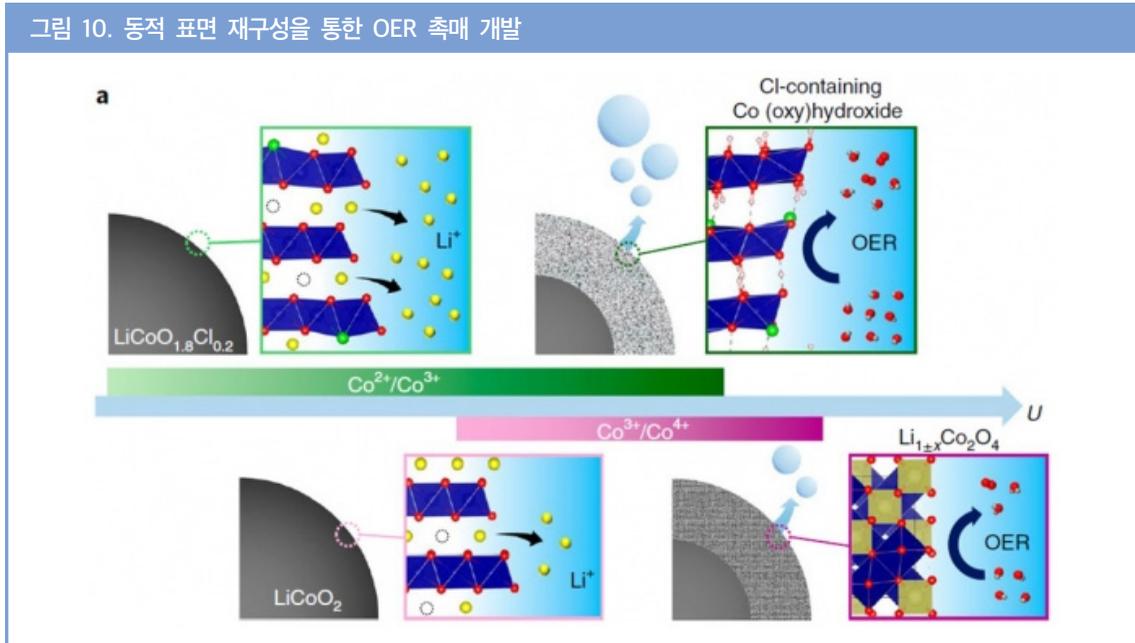
그림 9. LOM 핵심 출현 단계



\* 출처: X. Wang et al. (2022)

산소 발생 반응 중 발생하는 촉매 표면 재구성에 관한 연구 역시 지속적으로 이루어지고 있다. 전이 금속 산화물의 OER 활성을 향상시키기 위해 촉매의 구조-성능 관계에 대한 다수의 OER 활성 설명자(OER activity descriptor)가 제시되었으나, 촉매 표면 재구성은 이러한 설명자가 OER 활성을 예측하기 어렵게 한다. 이러한 촉매의 구조적 변형을 추적하고 재구성된 활성 사이트를 규명하기 위해 다양한 연구가 수행되고 있으며, 촉매 표면 재구성을 활용하고자 하는 연구 역시도 다수 보고되고 있다. 2021년 서울대 연구팀은 <그림 10>에서 보이는 바와 같이 리튬 코발트 산화물의 표면 재구성을 유도하여 OER 효율과 수명을 월등히 향상시킨 연구를 보고하였다. 리튬 코발트 산화물인 LiCoO<sub>2</sub> 표면의 리튬이 OER 중 자유롭게 이동할 수 있다는 사실에 기반하여 리튬 이온의 이동 제어를 통해 표면 재구성을 제어하고자 하였다. LiCoO<sub>2</sub> 내의 산소 이온을 염소 이온으로 치환하면 리튬 이동량이 증가하여 촉매 표면에 새로운 상변이 현상이 발생하고 이러한 상변이가 OER 성능을 향상시키는 것으로 밝혀졌다.

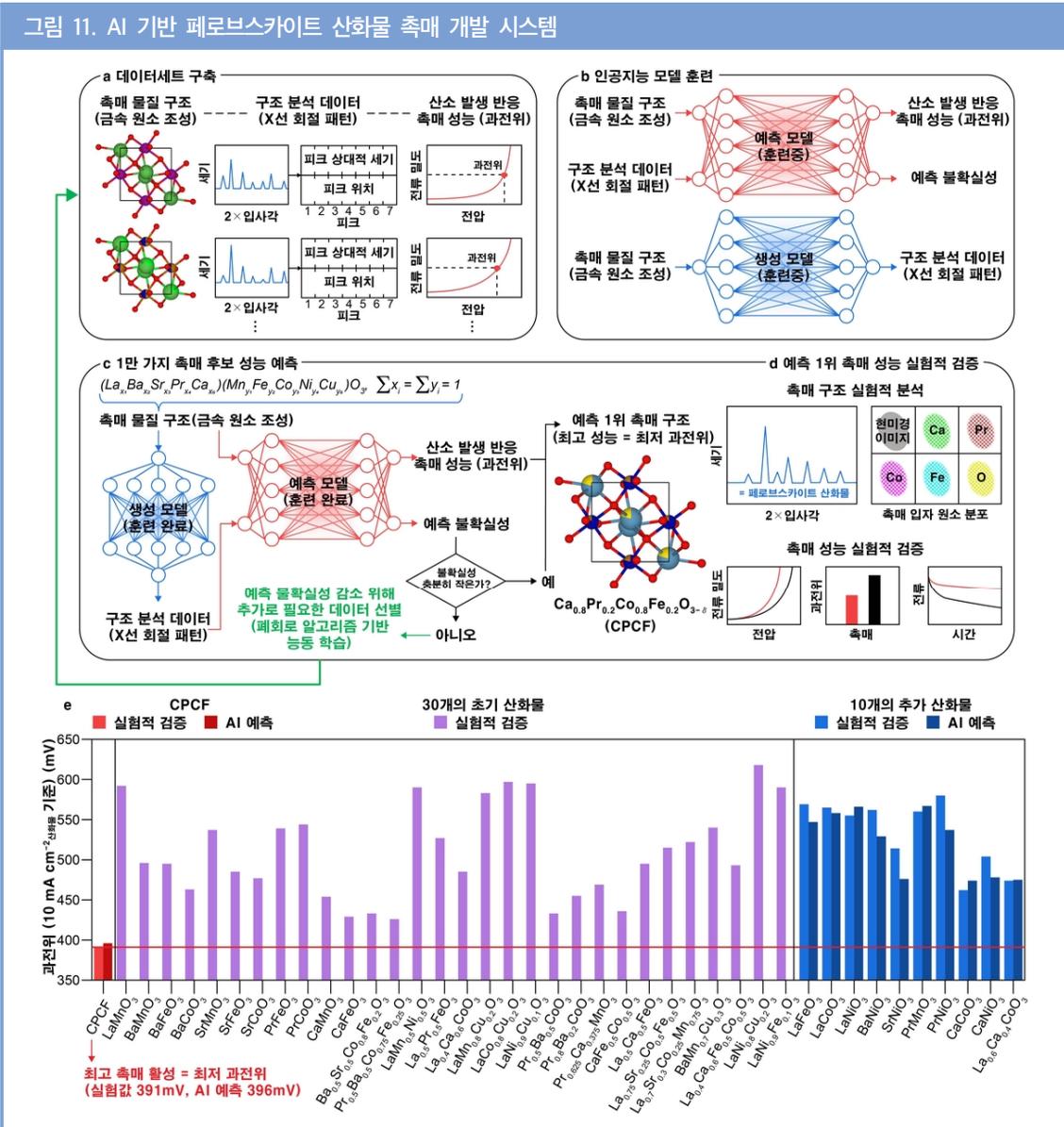
그림 10. 동적 표면 재구성을 통한 OER 촉매 개발



\* 출처: J. Wang et al. (2021)

AI를 활용한 비귀금속 OER 촉매 개발도 활발히 이루어지고 있다. 지난해 11월 구글 딥마인드는 자사 AI 모델을 통해 신소재 개발 과정을 단축할 수 있다고 발표했다. 구글은 딥마인드의 GNoME (Graph Networks for Materials Exploration)를 활용하여 이론적으로는 안정적이거나 실험적으로 구현되지 않았던 결정 구조를 발견했고, 이를 통해 신소재 38만 1000여 개를 합성할 수 있다고 발표했다. 국내에서는 지난해 11월 기초과학연구원의 연구팀이 <그림 11>과 같이 4 금속 페로브스카이트 산화물 촉매의 성능을 예측하는 능동 학습(Active Learning) 기반 AI를 개발하고 OER 성능이 가장 높을 것으로 예상되는 4 금속 페로브스카이트 산화물의 최적 금속 원소 조성을 밝혔다. 가장 성능이 우수할 것으로 예측된 CPCF ( $\text{Ca}_{0.8}\text{Pr}_{0.2}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ )는 과전압 비교 결과 페로브스카이트 산화물 촉매 중 세계 최고 수준의 과전위 성능(396 mV)을 보였다.

그림 11. AI 기반 페로브스카이트 산화물 촉매 개발 시스템



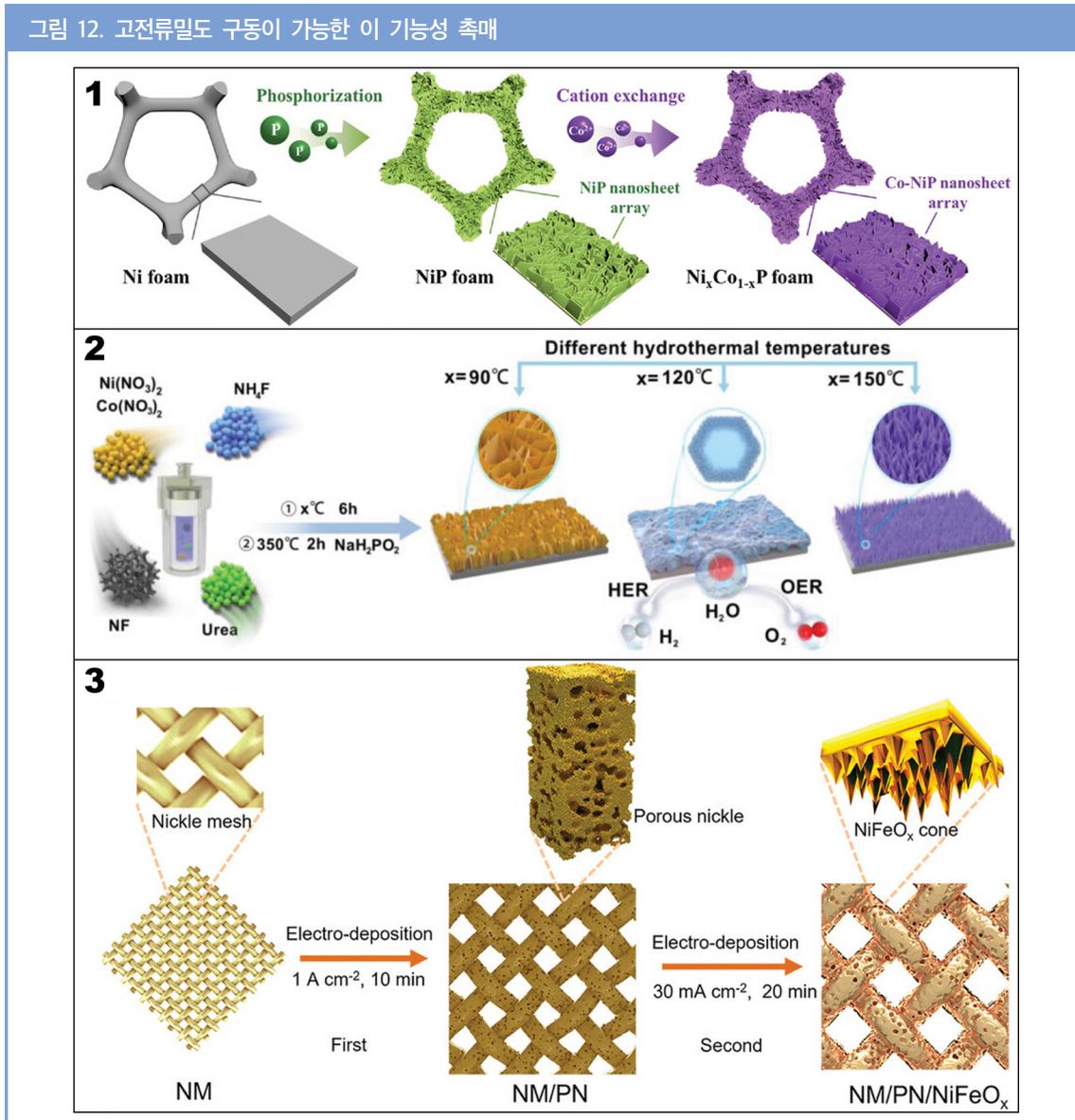
\* 출처: J. Moon et al. (2024)

### 1.3. 이 가능성 촉매

알칼라인 수전해 촉매 연구의 또 다른 연구 동향은 고전류밀도에서 구동 가능한 이 가능성 촉매 개발에 대한 영역이다. 주로 다공성 전도성 전극(Ni, Cu, Fe foam 등)에 촉매를 직접 합성하는 자체지지 전극 형태로 개발되고 있으며, 기존의 촉매와 달리 촉매를 전극에 코팅하기 위한 바인더(binder 또는 이오노머)를 사용하지 않아 전하 전달 저항이 낮고 독특한 나노 구조(나노 막대, 나노 시트 등)를 통해 물질 전달 저항을 낮출 수 있어 원활한 고전류밀도 구동 조건 확보가 가능하다. 또한, HER과 OER에 모두 활성을 나타내는 물질을 기반으로 후보군

소재 선정하기 때문에 알칼라인 수전해 완전 셀(full cell) 성능이 우수한 특징이 있다. 그러나 이러한 촉매들은 일반적으로 수열합성(hydrothermal synthesis)과 같은 방법을 통해 합성되기 때문에 대규모 생산이 제한적이며, 자체 전극의 복잡한 구조로 인해 차세대 수전해 설비인 AEMWE 등과 같은 구조에는 적용하기 힘들다는 단점이 있다. 따라서 이 기능성 자체 전극 촉매를 막-기반 수전해 설비에 적용하기 위한 지속적인 연구개발이 이루어져야 한다. <그림 12>는 최근 보고된 고전류밀도 구동 촉매의 예시로서, 각각의 독특한 나노 구조를 확인할 수 있다.

그림 12. 고전류밀도 구동이 가능한 이 기능성 촉매



\* 출처: S. Bi et al. (2023)

## 2. 산 환경(PEM)

산 환경에서 수전해 반응을 목표로 개발된 비귀금속 기반 촉매 연구는 여전히 연구 초기 단계이다. 수전해 반응 병목 현상의 주된 요인인 OER 반쪽 반응의 경우 기존에 개발된 대다수의 OER 촉매 소재는 산 환경에서 불안정하고, 제어되지 않은 표면 재구성으로 인하여 촉매의 활성 사이트 및 반응 메커니즘에 대한 명확한 규명이 매우 어렵다. 현재까지 이리듐 기반 산화물(특히, IrO<sub>2</sub>)만이 산 환경에서 OER에 적용 가능한 유일한 전기 촉매로 고려되어 왔으나, 최근 이리듐보다 상대적으로 낮은 비용의 물질인 루테튬(Ru)을 활용한 루테튬 기반 산화물 촉매가 잠재적 대안으로 떠오르고 있다. 그러나 이리듐과 루테튬 산화물 촉매 모두 부식 영향에서 완전히 자유롭지 않기 때문에, 산 환경에서 고활성과 고안정성을 모두 갖추고 있는 OER 촉매 개발은 현재 수전해 촉매 연구 분야에서 가장 큰 관심을 받고 있다. 그 일환으로 귀금속의 농도는 줄이면서 활성은 높일 수 있는 촉매가 주로 연구되고 있으며, 비귀금속 기반 촉매도 간헐적으로 보고되고 있다. 산 환경의 비귀금속 OER 촉매 소재는 주로 전이 금속 산화물과 내식성이 높은 금속 화합물이 사용되고 있다. 산 환경 수전해 촉매 연구의 주된 대상반응에 대한 연구 관심도는 알칼리 환경에서와 마찬가지로 OER이 HER보다 훨씬 높다. HER은 낮은 과전압에서 작동하여 비교적 구동 안정성이 높으며 기존에 개발된 HER 촉매 중 산 환경에서 안정적인 촉매가 다수 존재하기 때문이다. 산 환경의 비귀금속 HER 촉매 소재로 가장 각광받는 물질 후보군들은 알칼리 환경의 HER 촉매와 마찬가지로 전이 금속 화합물 기반 소재들이다.

PEMWE는 설비의 소형화 가능, 고전류밀도 구동 가능, 고압/변압 운전 가능, 고순도의 수소 생산 등의 장점에도 불구하고 고가의 귀금속 촉매 및 양성자 교환막 등으로 인해 대규모 수소 생산에 적용되기 어려운 실정이다. 이는 기존 AWE를 위해 개발된 값싼 비귀금속 HER, OER 촉매를 적용할 수 있는 AEMWE 개발의 배경이 되었다. 그러나 최근 산 환경에서도 안정적으로 높은 활성을 나타내는 비귀금속 기반 OER 촉매 소재(Co 스피넬 산화물 등)들에 대한 우수한 연구 결과들이 조금씩 보고되고 있다.

### 2.1. Acidic HER 촉매

산 환경에서의 HER 구동 원리는 아래와 같다.

산 환경 HER 메커니즘:

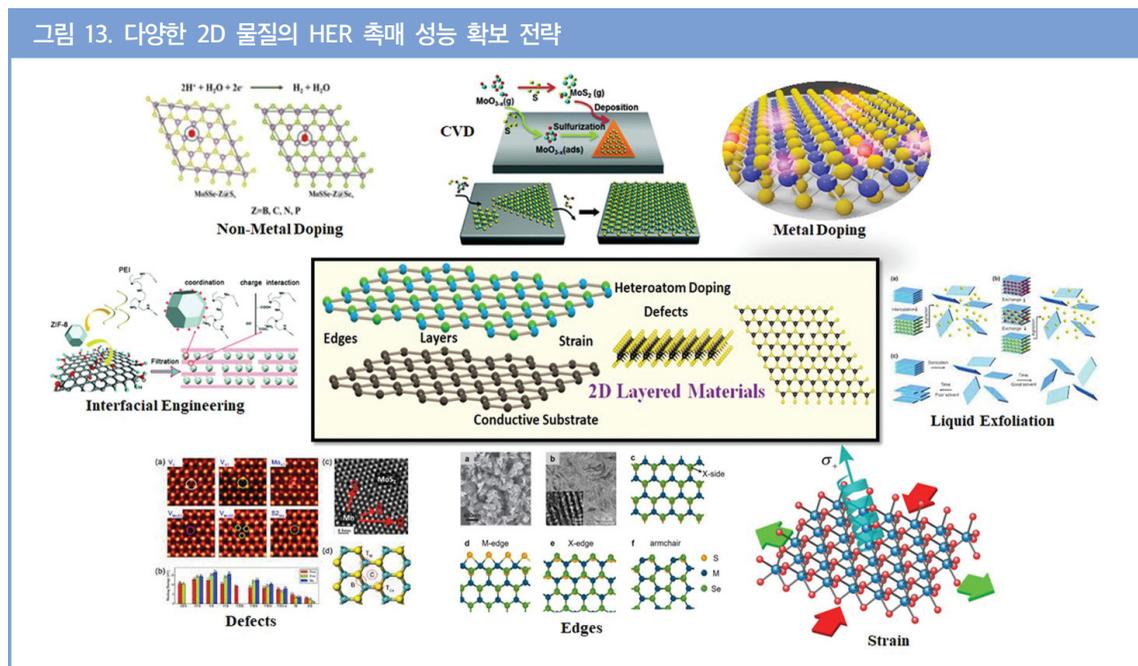


산 환경에서는 풍부한 양의 양성자가 존재하기 때문에 물 분자에서 양성자를 포획하는데 요구되는 높은 에너지를 피하면서 양성자의 전자 획득 및 수소 원자 재결합을 통한 수소 발생이 가능하다. HER 촉매 표면에서 수소 흡착중

$H^*$ 의 흡착과 탈착은 한 쌍의 경쟁 반응이기 때문에  $\Delta G_H$ 가 균형을 이룰수록 HER 활성이 높아지게 된다. 산 환경에서도 단일 물질로는 백금이 가장 활성이 높지만 전이 금속 화합물에 다양한 활성도 향상 전략을 도입하여 백금을 대체하고자 하는 연구는 꾸준히 보고되고 있다.

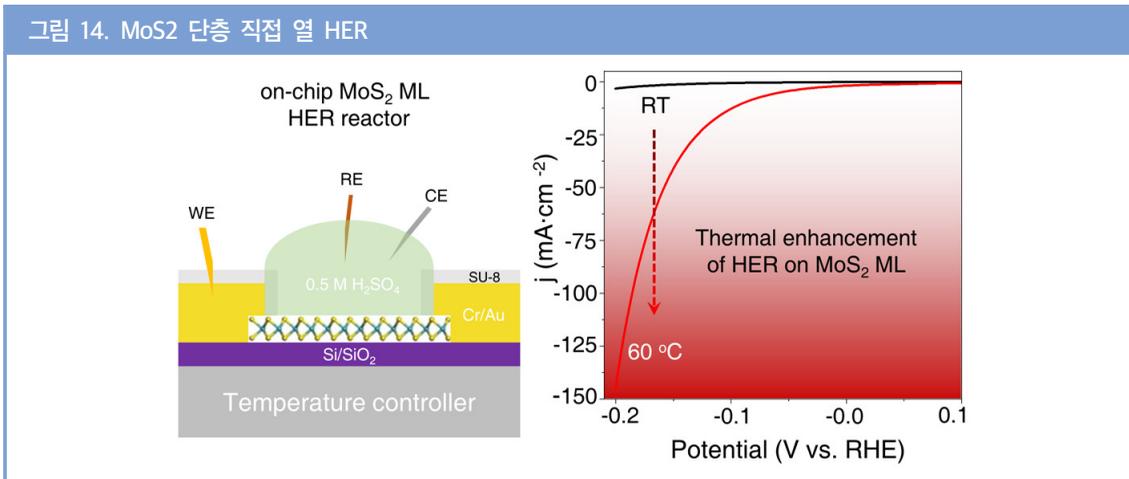
2D 물질(2-dimensional materials)은 독특한 원자 구조에 기반한 물성 조절을 통하여 손쉬운 HER 성능 향상 전략 도입이 가능하므로 산 환경 HER에 유망한 촉매 소재로 주목받고 있다. <그림 13>에서 보이는 바와 같이 전이 금속 칼코젠 화합물(transition metal dichalcogenide, TMD), 그래핀 등 2D 물질의 HER 활성을 증가시키기 위한 다양한 전략들이 보고되고 있다. 그러나 2D 기반 비귀금속 촉매는 여전히 백금 기반 귀금속 촉매 대비 HER 성능이 열등한 것으로 평가되고 있다. 주된 이유로는 비활성 기저면(basal plane), 낮은 전기 전도도, 활성 사이트의 낮은 접근성 등이 있다.

대표적인 2D TMD 물질인  $MoS_2$ 는 가장자리 사이트(edge site)에서는 높은 HER 활성을 보여 백금을 대체할 수 있는 유망한 촉매로 주목받았으나, 비활성 기저면으로 인하여 소재 전체적으로는 느린 HER 동역학을 보여왔다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 가장자리 사이트 노출을 최대화하는 나노 공학(nano engineering), 이종 금속 도핑(doping), 결함 공학(defect engineering), 비정질  $MoS_2$  합성 등의 연구가 진행되고 있다. <그림 14>는  $MoS_2$ 의 비활성 기저면을 활성화하기 위해  $MoS_2$  단층(monolayer) 면에 직접 열을 가하여 HER 성능을 평가한 연구이다. 이 연구에서는  $MoS_2$  단층 촉매의 온도 의존적 HER 활성을 조사하여  $MoS_2$ 의 비활성 기저면이 열에너지를 통해 활성화될 수 있음을 밝혔다.



\* 출처: A. Mondal, A. Vomiero. (2022)

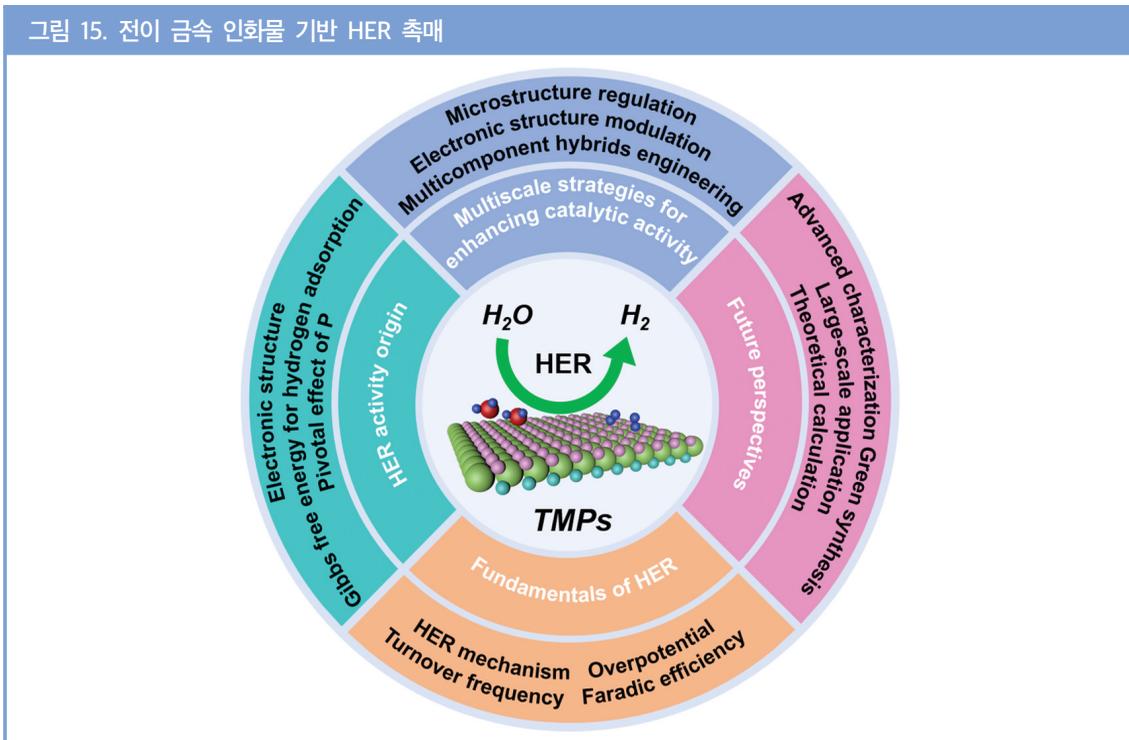
그림 14. MoS<sub>2</sub> 단층 직접 열 HER



\* 출처: J. Qu et al. (2022)

전이 금속 화합물 중 하나인 전이 금속 인화물은 전이 금속의 결정 격자에 인(P) 원자를 삽입하여 형성되는 화합물로, HER에 유망한 촉매 소재로 주목받고 있다. 음전하를 띤 P 사이트는 양성자 흡착 사이트로 활용되며 0에 가까운  $\Delta G_H$ 를 보일 수 있다. <그림 15>는 전이 금속 인화물 기반 HER 촉매의 연구 중점 및 활성 향상 전략에 대해서 보여주고 있다.

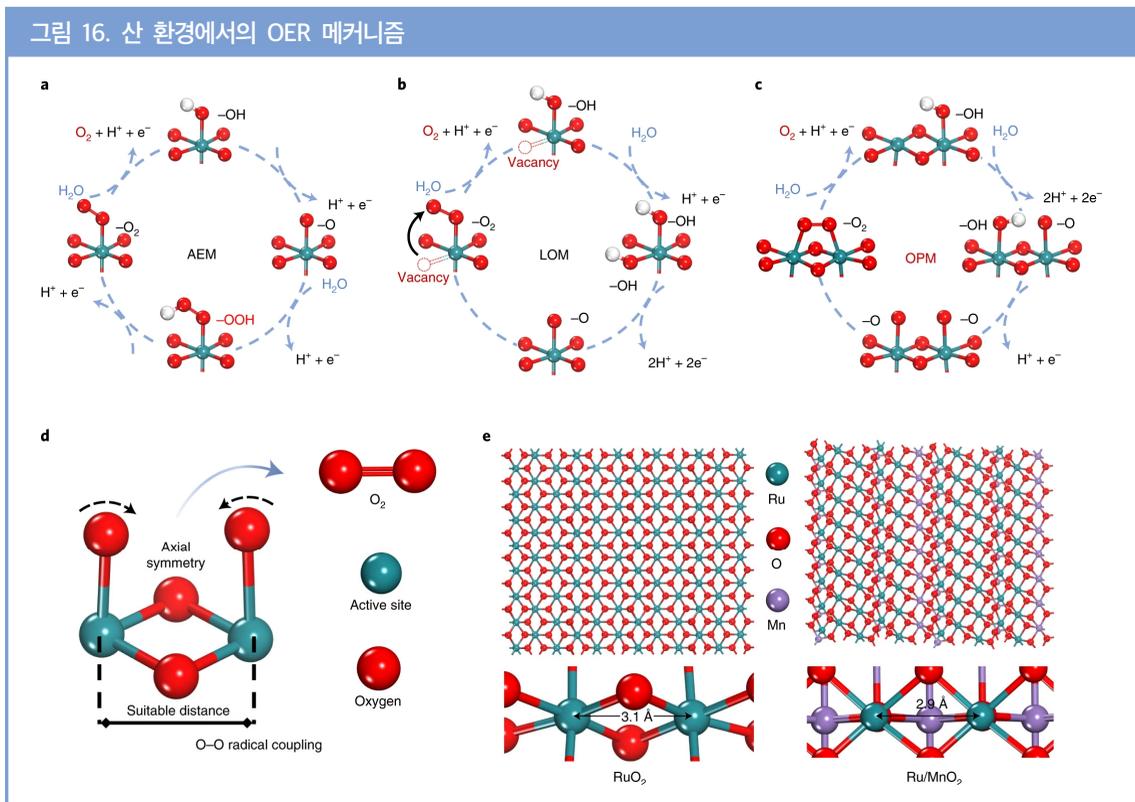
그림 15. 전이 금속 인화물 기반 HER 촉매



\* 출처: D. Liu et al. (2022)

## 2.2. Acidic OER 촉매

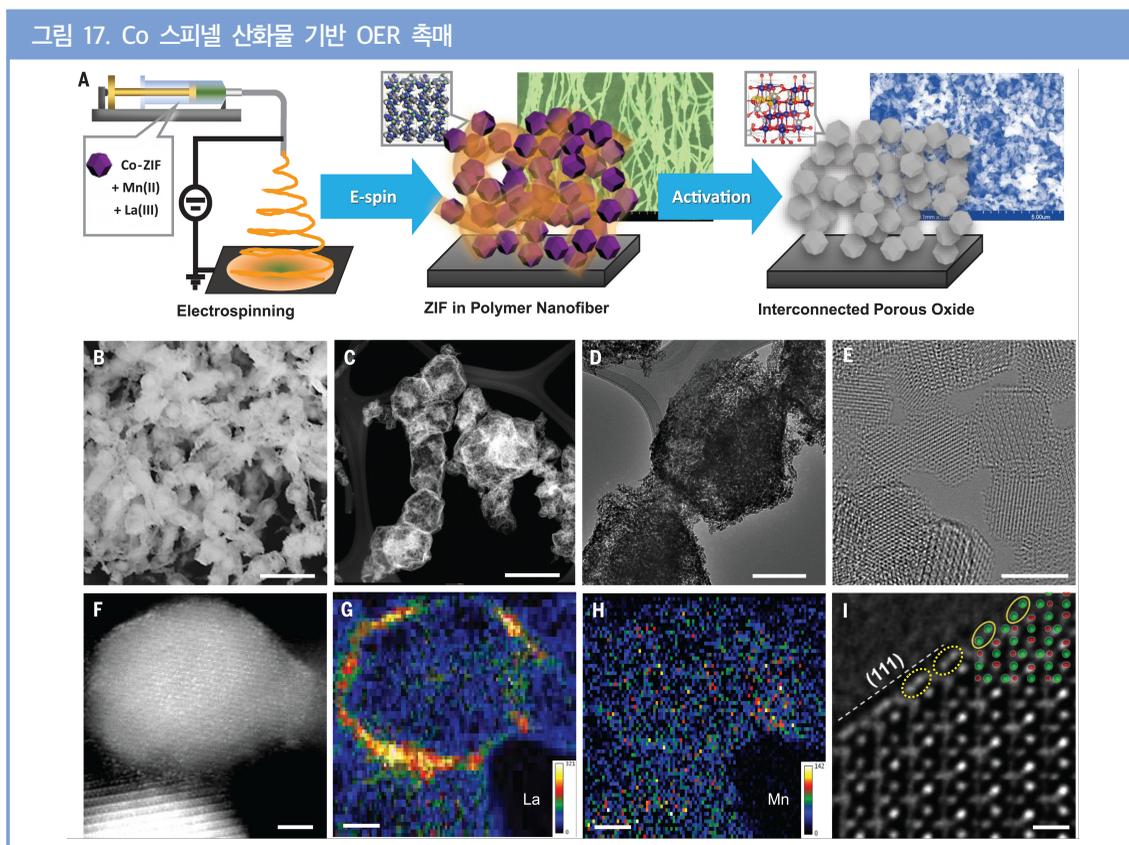
〈그림 16〉은 산 환경에서의 OER 메커니즘을 보여주고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 LOM은 OER 과정에서 활성화된 격자 산소가 반응에 참여하여 O-O 결합을 촉진하여 AEM 대비 높은 OER 활성을 보여주지만, 생성된 산소 빈자리(oxygen vacancy)가 촉매 표면의 구조 안정성을 저해한다. 최근 소개되고 있는 OPM (oxide path mechanism)은 AEM과 LOM보다 더 이상적인 OER 메커니즘으로 제안되고 있으며, 해당 반응에서는 산소 빈자리 및 추가 반응 중간체의 생성 없이 중간체 간의 직접 O-O 라디칼(radical) 결합이 가능하다. 이 메커니즘에 따르면 \*O와 \*OH만이 OER 반응 중간체로 작용하며 적절하게 위치한 활성 금속 사이트가 격자 산소 손실 없이 산소를 발생시키기 때문에 안정성을 저하시키지 않으면서 스케일링 관계를 극복할 수 있다. 중간체의 직접 O-O 라디칼 결합이 허용되기 위해서는 금속 산화물 내의 금속 원자간 적절한 유효거리 확보가 중요한 인자로 작용한다.



\* 출처: C. Lin et al. (2021)

산 환경에서 안정적으로 고성능을 발휘하는 비귀금속 촉매를 개발하는 것은 매우 도전적이나, 그만큼 가치 있는 연구 주제이다. 본 원고에서는 최근 보고된 두 가지의 Co 기반 스피넬 산화물(Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) 촉매를 소개하고자 한다. 첫 번째로 〈그림 17〉은 2023년 Science에 보고된 연구로 PEMWE 산화 전극 적용을 위한 효율적인 Co 스피넬 산화물 OER 촉매에 대한 내용이다. 산 환경에서의 OER 활성 향상을 위해 Co 스피넬 산화물 표면에 이중

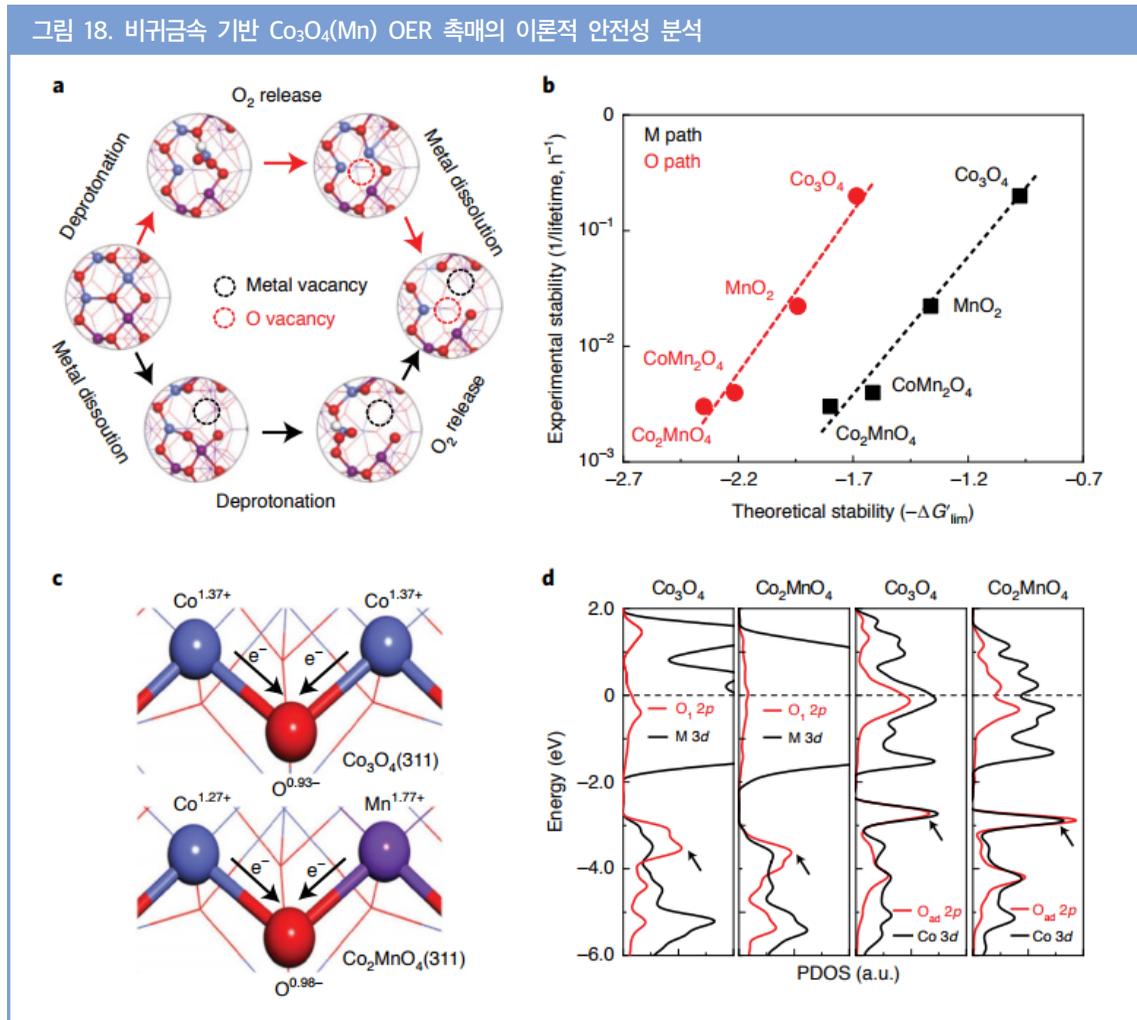
금속(La, Mn)을 도입하여 산소 빈자리 생성 및 결정 구조 변형, 그리고 d-전자 편위화(delocalization)를 유도하였으며, Co 전구체로 Co-ZIF를 선정하여 전기방사를 통해 나노 섬유(nanofiber) 형태로 합성하였다. 개발된 촉매는 PEMWE 적용을 통해 산 환경에서 안정적으로 구동하는 것으로 평가되었으며 DFT (density functional theory) 계산으로 예측된 셀 전위와 pH에 따른 포베 다이어그램(Pourbaix diagram)을 통해 결정 구조의 안정성을 이론적으로 규명하였다.



\* 출처: L. Chong et al. (2023)

다음으로 <그림 18>은 2022년 Nature catalysis에 보고된 연구로  $Co_3O_4$  격자에 Mn을 도입하여 높은 안정성과 활성을 가지는 촉매 개발에 대한 내용이다. 보고된  $Co_2MnO_4$  촉매는 높은 OER 활성을 기반으로 PEM에 주로 사용되는 Pt/Ti 메시(mesh)를 기반으로 사용하여 OER 활성도를 평가하였을 때에도 우수한 성능을 보였다. 또한, DFT 계산을 통하여 촉매 안정성에 대한 원인을 규명하였으며, 격자 산소의 2p 오비탈과 금속의 3d 오비탈 사이의 전자 상호작용을 통한 격자 산소의 열역학적 안정성이 높은 촉매 안정성에 기여하는 것으로 밝혀졌다.

그림 18. 비귀금속 기반 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(Mn) OER 촉매의 이론적 안정성 분석

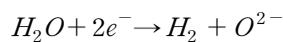


\* 출처: A. Li et al. (2022)

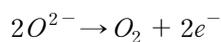
### 3. SOEC

SOEC는 연료극, 전해질, 공기극으로 구성되어 연료극에 Ni 서멧(Ni cermet: 세라믹과 금속의 합금), 전해질에 YSZ, 공기극에 고온 안정성이 높은 페로브스카이트 산화물인 LSCF (La<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>Co<sub>0.2</sub>Fe<sub>0.8</sub>O<sub>x-3</sub>)를 주로 사용한다. Ni 서멧 소재는 장시간 구동 시 니켈의 결정립 조대화(Coarsening)가 일어나 안정성이 떨어지는 문제점이 있다. 아래는 SOEC 연료극과 공기극의 주요 반응식을 보여준다.

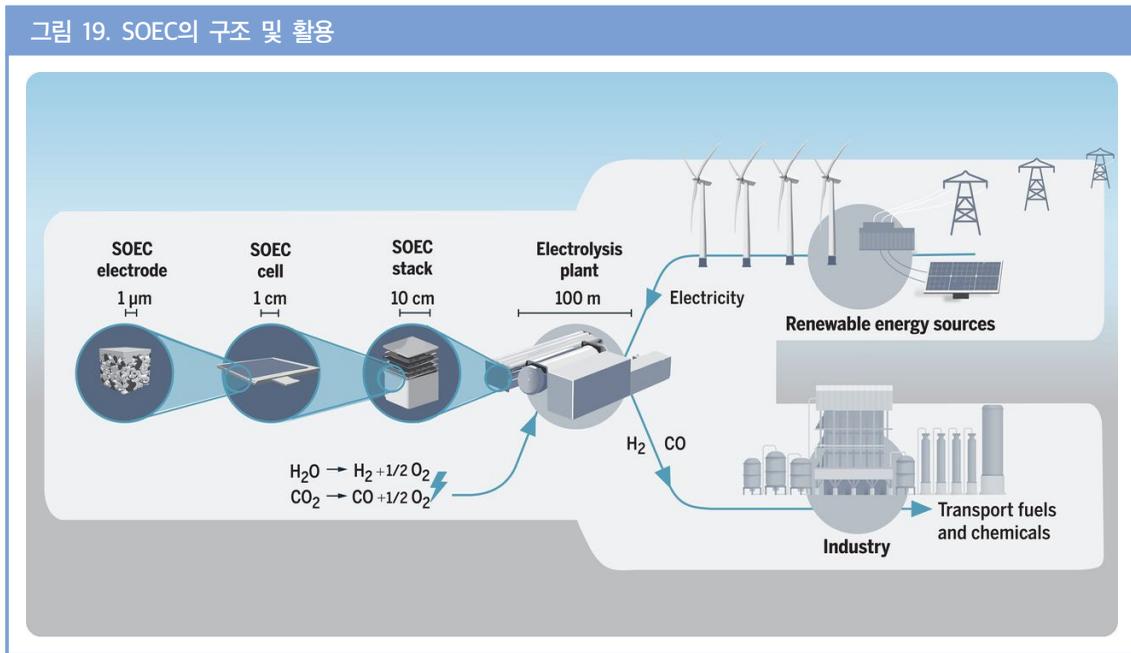
SOEC 연료극:



SOEC 공기극:



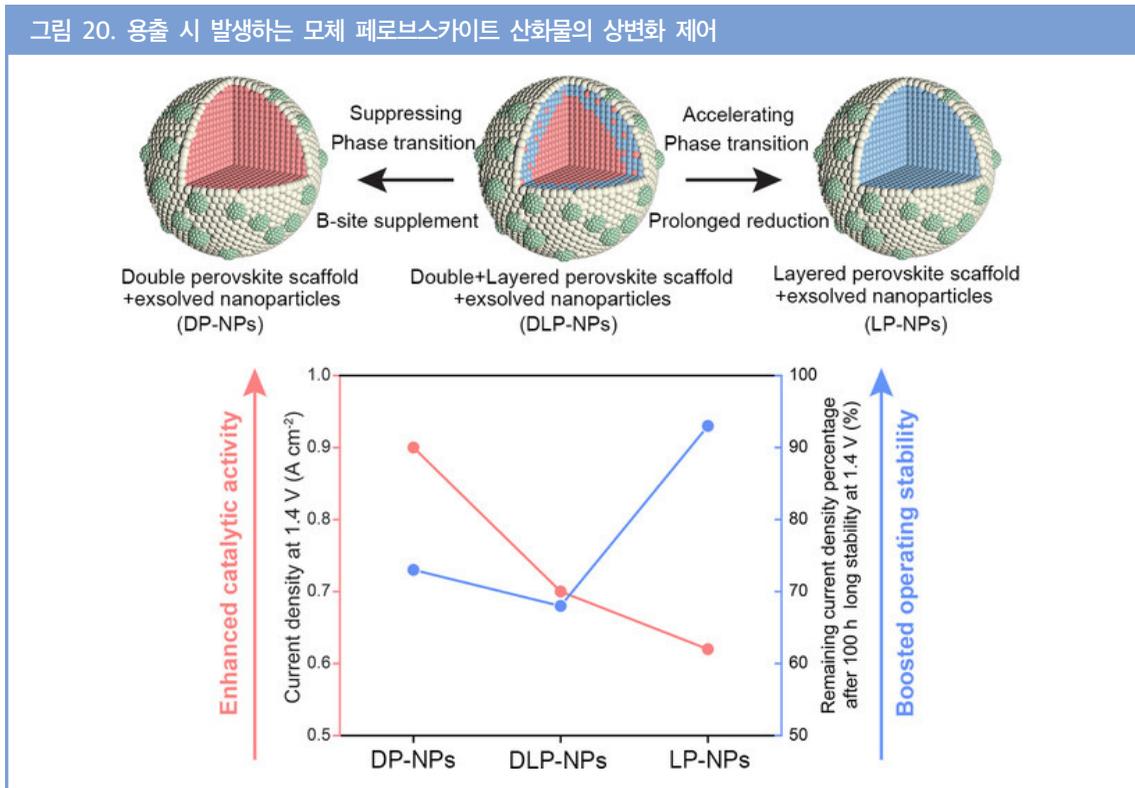
SOEC에 외부 전원을 통한 전압이 인가되면 물 분자가 환원 전극-전해질 계면에서 분해되어 기체상태의 수소이온과 산소이온이 발생한다. 수소이온은 환원 전극에서 수소로 발생하고 산소이온은 전해질을 통해 산화 전극으로 이동하여 산소로 발생된다. 발생한 산소는 산화 전극 기공을 통해 표면으로 배출되며, 발생한 수소는 포집된다. <그림 19>는 SOEC의 구조와 SOEC를 활용한 수소-신재생 에너지 인프라 구조(infrastructure)를 보여주고 있다.



\* 출처: A. Hauch et al. (2020)

최근 SOEC의 공기극인 페로브스카이트 산화물의 용출(exsolution) 현상을 활용한 나노입자 분포 전략이 광범위하게 연구되고 있다. 용출된 나노입자의 크기, 밀도 및 조성 수정을 통한 촉매 활성을 개선한 연구들이 보고되고 있으나, 용출과정에 있어 페로브스카이트 산화물 모체는 상대적으로 주목을 덜 받아왔다. <그림 20>은 페로브스카이트 산화물 Sr<sub>2</sub>Fe<sub>1.2</sub>Ni<sub>0.3</sub>Mo<sub>0.5</sub>O<sub>6-δ</sub> (SFN<sub>3</sub>M)에서 용출 중 페로브스카이트 산화물 모체의 상변화를 제어함으로써 촉매 활성과 안정성을 선택적으로 향상할 수 있음을 보여주는 연구이다.

그림 20. 용출 시 발생하는 모체 페로브스카이트 산화물의 상변화 제어



\* 출처: B.-W. Zhang et al. (2023)

현재 국내·외 SOEC의 주요 시장 동향은 다음과 같다. SK에코플랜트는 미국 블룸에너지, 블룸SK퓨얼셀과 함께 경북 구미에 위치한 블룸SK퓨얼셀 제조공장에 130kW급 SOEC 설비를 구축하고 2022년 국내 최초로 SOEC를 활용하여 그린수소를 생산하는 실증에 성공하였으며, 지난해 12월 산업통상자원부가 진행하는 12.5MW 규모 제주 그린수소 생산 실증사업에 참여해 SOEC 기술을 실증할 계획을 발표하였다. 지난해 11월 한국에너지기술연구원에서는 수증기 유동 특성 최적화 분리판을 설계하여 유동 균일성 확보를 통한 고성능 SOEC 스택을 개발하였다고 발표하였다. 지난해 12월 한국세라믹기술원은 영국 세인트 앤드류스 대학교(University of St Andrews) 및 독일 프라운호퍼 세라믹전문연구소(Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems)와 SOEC 기술 고도화 및 검증을 위한 업무협약을 체결하고, LaGaO<sub>3</sub> 전해질 신소재를 적용한 셀, 초음파 스프레이 신공정 기술은 적용한 셀 제작 계획을 발표했다. 일본 도요타의 자동차부품 공급업체인 덴소는 지난해 7월부터 히로세 공장에서 자체 개발한 SOEC를 활용한 그린수소 생산 시범사업을 시작하였다. 초기에는 외부에서 구입한 녹색 전기를 SOEC 전원으로 사용하고, 2025년부터 히로세 공장에 설치된 자체 태양광 발전 시설에서 생산된 녹색 전기로 대체할 계획이다.

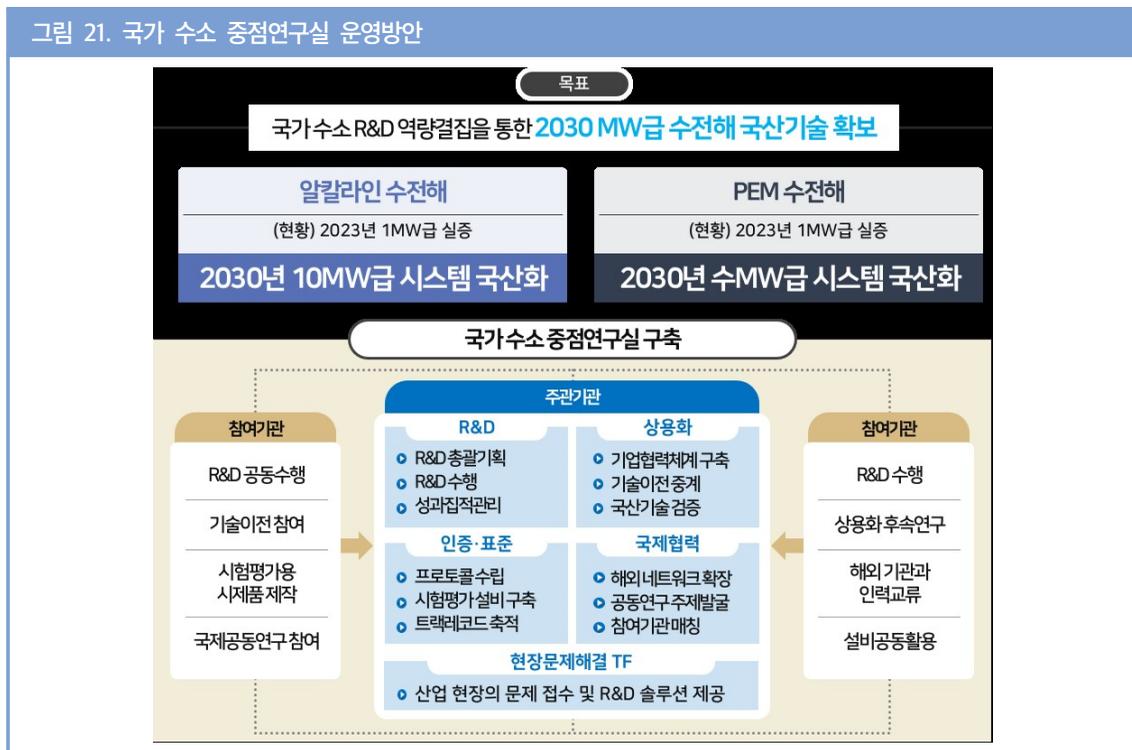
## IV. 국내·외 그린수소 생산 정책 동향

### 1. 국내 그린수소 생산 정책 동향

기후 위기 대응을 위한 파리협정이 채택된 이래 탄소 중립에 관한 논의가 전 세계적으로 확산되어 왔으며, 우리나라 정부 또한, “2050년 탄소 중립”목표 선정 및 2030년 국가 온실가스 감축 목표 상향, 2050 탄소 중립을 견인하기 위한 10대 핵심기술에 수소기술 포함 등 국제사회의 움직임에 발맞춰 탄소 중립 이행을 위한 다양한 노력을 기울이고 있다. 우리나라는 세계 최초로 수소 경제 관련 법률인 “수소 경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률”을 2020년 제정하였고, 이에 근거한 국무총리 소속 수소경제위원회가 2020년 발족하여 개최되고 있다.

국내의 수소산업의 경우 수소전기차, 수소 충전소 및 발전용 연료전지 분야에서는 보급 실적 1위를 선점하고 있으나, 생산, 저장, 운송 등 타 분야에 있어서는 선진국과의 기술격차가 3년에서 7년까지 벌어져 있는 것으로 평가되고 있다. 2023년 12월 열린 제6차 수소경제위원회에서는 청정수소 생산기술의 국산화, 스케일-업, 국산기술표준화를 목표로 수소 생산기술 중 기술 성숙도가 상대적으로 높은 알칼라인 수전해와 PEM 수전해의 성능과 효율성을 높이고 대규모로 상용화할 수 있는 연구 추진 정책을 발표하였다 <그림 21>. 또한, 청정수소 생태계 구축을 위해 수소를 생산·수입하는 과정에서 온실가스 배출량이 일정 수준 이하인 경우 청정수소로 인증하고 인센티브를 지원하는 청정수소 인증제 운영방안이 논의되었다.

그림 21. 국가 수소 중점연구실 운영방안



\* 출처: 과학기술정보통신부 (2023)

## 2. 국외 그린수소 생산 정책 동향

〈그림 22〉에서 볼 수 있듯이, 전 세계 수전해 장치 시장의 규모와 가치가 증가함에 따라, 주요 해외 국가들이 미래 수소 시장을 선점하기 위해 경쟁적으로 관련 정책을 발표하고 있다. 특히, 재생에너지와 천연가스가 풍부한 사우디아라비아를 비롯한 중동 지역 국가들, 호주, 러시아, 칠레는 대량의 수소를 생산하여 수출국의 지위를 확보하는 데에 정책적 역량을 집중하고 있다.

미국은 인플레이션감축법안(IRA) 내 그린수소 생산, 친환경차 구매 세액공제 등 수소산업 활성 정책을 통한 청정수소 생태계 기반 조성을 추진하고 있으며, 청정에너지 표준(CES)에서는 2035년 전력 분야 온실가스 배출량 제로를 목표로 향후 10년 이내에 발전 부문에서의 그린수소 전환 추진을 목표로 하고 있다.

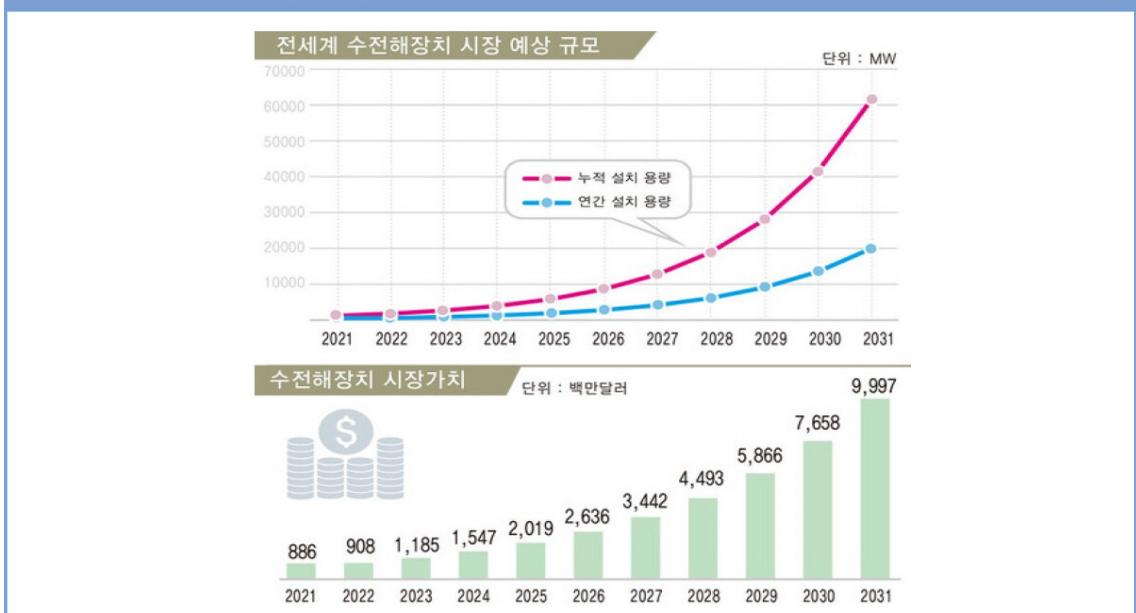
유럽은 러시아·우크라이나 사태 이후 러시아산 천연가스에 대한 의존도를 낮추고 수소 비중을 확대하기 위해 2030년 수전해 40GW 설치를 목표로 하는“RePowerEU”정책을 발표하였다.

일본은 “3E+S(Energy security, Economic efficiency, Environment, Safety)”정책을 발표하고 2030년 수전해를 통한 15GW급 규모의 전력 생산을 통한 청정수소 생산 확대 및 2050년 수소 수요 2천만 톤 확보를 위한 대규모 수소 공급망 및 활용처 구축을 계획하고 있다.

중국은 “수소에너지산업 중장기 발전계획”에서 수소차 보급, 그린수소 생산 등 2035년까지 모든 산업 영역에서 수소 활용을 가속한다는 비전을 제시하였다.

이처럼 글로벌 주요 국가들은 수소 산업의 성장 가능성과 시장 폭발력을 인지하고 선제적으로 관련한 정책 및 산업 육성 방안을 모색하고 있다.

그림 22. 전 세계 수전해 장치 시장 예상 규모



\* 출처: 가스신문 (2023.07.26.)

## V. 결론

전 세계적으로 전통적 화석에너지를 지속적이고 재생가능한 에너지원으로 전환하기 위한 노력이 가속화되고 있다. 태양광, 풍력 등을 통한 재생에너지 발전량은 빠르게 증가할 것으로 예측되며, 신재생 에너지의 보급 또한 급속히 확대될 것으로 보인다. 그러나 재생에너지의 발전량이 대부분 자연발생적인 요인에 의존하기 때문에 발전의 간헐성 문제와 전력 계통 안정성 이슈가 동시에 해결되어야만 한다. 이러한 재생에너지의 한계를 극복하기 위한 다양한 기술들이 제안되고 있으며, 그중 수전해 기술에 기반한 그린수소 생산은 대표적인 보완 기술로 주목받고 있다. 글로벌 수소 경제가 도입기를 지나 성장 초기 단계에 진입한 것으로 평가되고 있는 만큼, 그린수소의 고효율·대량 생산 기술력을 확보하기 위한 다양한 수전해 설비에서 고성능을 발휘할 수 있는 비귀금속 기반 촉매 기술 개발을 통해 그린수소 생산 단가를 낮추는 것이 필수적이다. 그러나 현재 연구실 단위로 개발된 고성능으로 지칭되는 대다수의 비귀금속 촉매는 귀금속 촉매의 성능을 따라잡는 데에 급급하여, 복잡하거나 대량 생산이 제한된 합성 공정으로 인하여 대규모 생산이 제한적인 경우가 많을 뿐만 아니라, 전통적 3 전극 방법으로 평가된 수전해 성능은 실제 수전해 셀에 적용되었을 때 촉매 성능이 100% 발휘될 수 있다는 보장이 없다. 비귀금속 수전해 촉매의 향후 연구 방향은 이러한 문제점들을 해결하여 산업적, 대규모 적용이 가능한 저가의 양산형 촉매를 개발하는 것이 주요하며, 다양한 수전해 설비의 기술 성숙도에 따라 각각의 서로 다른 반응 환경에 적합한 촉매의 개발 필요성 역시 중요할 것으로 보인다.

현재 산업적 그린수소 생산에 활용되는 비귀금속 촉매는 기술 성숙도가 높은 알칼라인 수전해 설비에서만 일부 적용되고 있다. 비귀금속 촉매 적용이 가능한 AEM과 SOEC 수전해는 관련한 전해질 연구가 절대적으로 부족하여 산업화 단계로의 진입이 아직은 요원한 상황이며, 상용화 수준에 근접한 PEM 수전해에서는 산성의 반응 환경 때문에 비귀금속 촉매 적용이 여전히 제한적이다. 따라서 비귀금속 수전해 촉매의 개발 및 연구 역량이 가장 집중되어야 할 곳은 산 환경에서의 우수한 수전해 반응성 확보, 특히 산 환경의 OER 반응에서 안정적으로 고성능을 발휘할 수 있는 비귀금속 기반 촉매 개발이라 할 수 있겠다.

이와 같이 본 융합연구리뷰에서는 다양한 수전해 설비의 특징과 장단점, 그리고 산업 적용 현황을 소개하였으며, 수전해 설비의 각자 다른 반응 환경에 따른 비귀금속 수전해 촉매의 연구 동향과 최신 연구 결과에 대해 소개하였다. 또한, 국내·외 그린수소 시장 및 정책 동향을 소개함으로써 본 원고를 통해 그린수소 생산을 위한 비귀금속 촉매에 대한 전반적인 이해를 돕는 데 도움이 되길 바란다.

### 저자소개 박혜성(Park Hyesung)

#### • 학력

MIT Electrical Engineering Ph.D.  
MIT Mechanical Engineering M.S.  
Illinois State University Physics B.S.

#### • 경력

現) 고려대학교 교수  
前) 울산과학기술원 조/부/정교수  
前) MIT Postdoctoral Associate

## 참고문헌

### 〈국내문헌〉

- 1) 과학기술정보통신부. (2023). 국가 수소 중점연구실 운영방안.
- 2) 김재경. (2018). 친환경 CO<sub>2</sub>-free 수소생산 활성화를 위한 정책연구, 에너지경제연구원.
- 3) 김종우, 이태의. (2022). 청정 수소 생산의 경제성 확보를 위한 수전해의 기술적·제도적 개선 방안 연구, 에너지경제연구원.
- 4) 김지영, 이기영. (2022). 음이온교환막 수전해 촉매기술 동향, 전기화학회지.
- 5) 조현석, 조원철, 김창희. (2018). 저온알칼라인 수전해, 공업화학전망.
- 6) 한국에너지기술연구원. (2022). 글로벌 월간 동향, 2022년 4월.

### 국외문헌:

- 1) A. Hauch et al. (2020). Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis Science, 370, 186.
- 2) A. Li et al. (2022). Enhancing the stability of cobalt spinel oxide towards sustainable oxygen evolution in acid, Nature Catalysis, 5, 109–118.
- 3) A. Mondal, A. Vomiero. (2022). 2D Transition Metal Dichalcogenides–Based Electrocatalysts for Hydrogen Evolution Reaction, Advanced Functional Materials, 32, 2208994.
- 4) A. Song et al. (2023). Recent Progress of Non–Noble Metallic Heterostructures for the Electrocatalytic Hydrogen Evolution, Small Science, 3, 2300036.
- 5) B.–W. Zhang et al. (2023). Phase Transition Engineering of Host Perovskite toward Optimal Exsolution–facilitated Catalysts for Carbon Dioxide Electrolysis, Angewandte Chemie International Edition, 62, 2023055.
- 6) C. Lin et al. (2021). In-situ reconstructed Ru atom array on  $\alpha$ -MnO<sub>2</sub> with enhanced performance for acidic water oxidation, Nature Catalysis, 4, 1012–1023.
- 7) D. Chen et al. (2023). Multiscale Hierarchical Structured NiCoP Enabling Ampere–Level Water Splitting for Multi–Scenarios Green Energy–to–Hydrogen Systems, Advanced Energy Materials, 13, 2300499.
- 8) D. Liu et al. (2022). Rational Design of Transition Metal Phosphide–Based Electrocatalysts for Hydrogen Evolution, Advanced Functional Materials, 33, 2208358.
- 9) J. Kim et al. (2023). Efficient Alkaline Hydrogen Evolution Reaction Using Super-aerophobic Ni Nanoarrays with Accelerated H<sub>2</sub> Bubble Release, Advanced Materials, 35, 2305844.

## 참고문헌

- 10) J. Moon et al. (2024). Active learning guides discovery of a champion four-metal perovskite oxide for oxygen evolution electrocatalysis, *Nature Materials*, 23, 108–115.
- 11) J. Qu et al. (2022). Direct Thermal Enhancement of Hydrogen Evolution Reaction of On-Chip Monolayer MoS<sub>2</sub>, *ACS Nano*, 16, 2921–2927.
- 12) J. Wang et al. (2021). Redirecting dynamic surface restructuring of a layered transition metal oxide catalyst for superior water oxidation, *Nature Catalysis*, 4, 212–222.
- 13) J. Xiong et al. (2021). Insights into the principles, design methodology and applications of electrocatalysts towards hydrogen evolution reaction, *Energy Reports*, 7, 8577–8596.
- 14) L. Chong et al. (2023). La- and Mn-doped cobalt spinel oxygen evolution catalyst for proton exchange membrane electrolysis, *Science*, 380, 609–616.
- 15) M. J. Craig et al. (2019). Universal scaling relations for the rational design of molecular water oxidation catalysts with near-zero overpotential, *Nature Communications*, 10, 4993.
- 16) S. Bi et al. (2023). Multi-Stage Porous Nickel-Iron Oxide Electrode for High Current Alkaline Water Electrolysis, *Advanced Functional Materials*, 33, 2214792.
- 17) Y. Zheng et al. (2023). Anion Exchange Ionomers Enable Sustained Pure-Water Electrolysis Using Platinum-Group-Metal-Free Electrocatalysts, *ACS Energy Letters*, 8, 5018–5024.
- 18) X. Lv et al. (2022). Atomic-Level Surface Engineering of Nickel Phosphide Nanoarrays for Efficient Electrocatalytic Water Splitting at Large Current Density, *Advanced Functional Materials*, 33, 2205161.
- 19) X. Wang et al. (2022). Understanding of Oxygen Redox in the Oxygen Evolution Reaction, *Advanced Materials*, 34, 2107956.
- 20) X. Xie et al. (2022). Oxygen Evolution Reaction in Alkaline Environment: Material Challenges and Solutions, *Advanced Functional Materials*, 32, 2110036.

### 기타문헌:

- 1) SK E&S (2023), 수전해. SK E&S Mediaroom, 2024년 1월 16일 접속, <https://media.skens.com/4952> (05.15.)
- 2) SK에코플랜트 (2022), SK에코플랜트, 애플블룸에너지와 국내 최초 'SOEC' 활용 그린수소 생산 시대 연다. SK ecoplant newsroom, 2024년 1월 16일 접속, <https://news.skecoplant.com/sk-ecoplant/2147/> (02.17.)

## 참고문헌

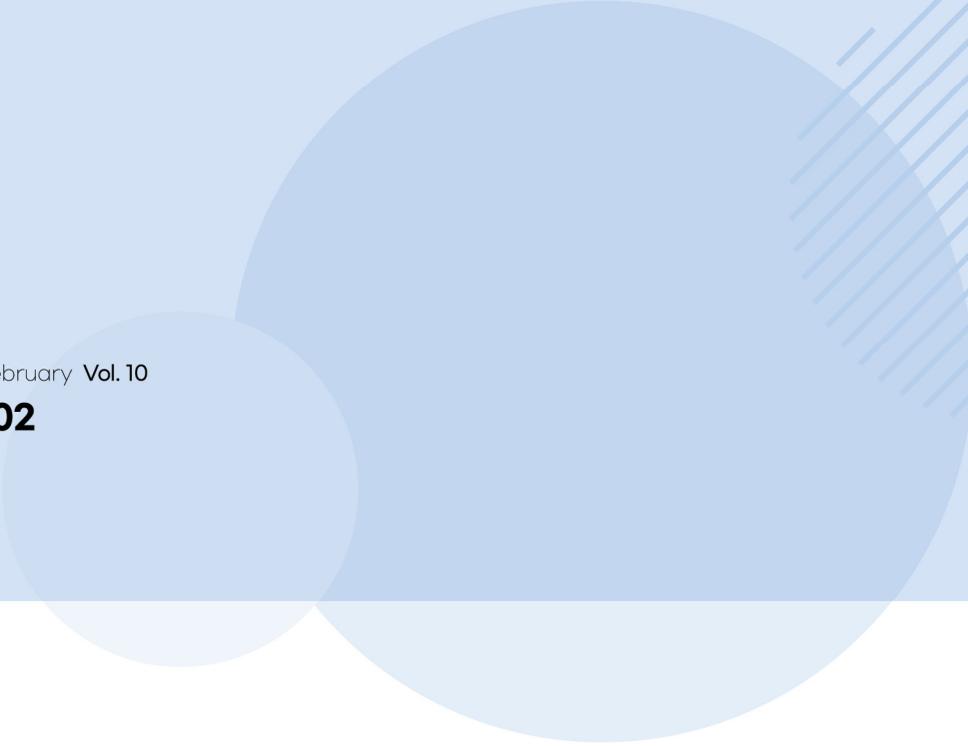
- 3) 가스신문 (2023), 그린수소 정책지원 활발...2031년 61GW 규모 상회할 듯. 2024년 1월 16일 접속, <http://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=111298> (07.26.)
- 4) 가스신문 (2023), 수전해 기술은 고밀도 수소생산과 스택기술이 관건. 2024년 1월 16일 접속, <http://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=111399> (08.08.)
- 5) 동아일보 (2023), 한국세라믹기술원 “고성능 SOEC 핵심기술 개발 중” ... 해외기관과 기술 고도화 추진. 2024년 1월 16일 접속, <https://www.donga.com/news/lt/article/all/20231220/122705966/1> (12.20.)
- 6) 수소뉴스 (2023), ㈜아헤스, 2MW급 알칼라인 수전해 장치 인도 수출. 2024년 1월 16일 접속, <http://www.h2news.co.kr/news/articleView.html?idxno=202980> (12.28.)
- 7) 월간수소경제 (2023), 덴소, SOEC 활용한 그린수소 시범사업 시작. 2024년 1월 16일 접속, <https://www.h2news.kr/news/articleView.html?idxno=11109> (07.12.)
- 8) 조선비즈 (2023), “제주 바닷바람이 ‘청정수소’ 생산한다”... 국내 1호 그린수소 실증단지 가보니. 2024년 1월 16일 접속, <https://biz.chosun.com/science-chosun/technology/2023/09/22/JL3QFIR645G6NHBRAYYZMP5GXA/> (09.22.)
- 9) 현대건설 (2022), ‘화석연료 해방시대’ 탄소중립 앞당기는 현대건설의 청정수소 기술. Hyundai E&C Newsroom, 2024년 1월 16일 접속, [https://newsroom.hdec.kr/kr/newsroom/news\\_view.aspx?NewsSeq=613&NewsType=BRAND&NewsListType=news\\_clist](https://newsroom.hdec.kr/kr/newsroom/news_view.aspx?NewsSeq=613&NewsType=BRAND&NewsListType=news_clist) (08.02.)
- 10) 현대엔지니어링 (2023), 현대엔지니어링, (주)테크로스와 알칼라인 수전해 기반 그린수소사업 협력 MOU 체결. 현대엔지니어링 보도자료, 2024년 1월 16일 접속, <https://www.hec.co.kr/ko/pr/press-news/press-release/7426> (10.31.)



**융합연구리뷰**  
Convergence Research Review

2024 February Vol. 10

**No. 02**



# 2

## 미세플라스틱 제거 기술 관련 연구, 기업, 산업, 정책 동향

**최재우**

한국과학기술연구원 물자원순환연구단 책임연구원

**정영균**

한국과학기술연구원 물자원순환연구단 박사후연구원

## 2. 미세플라스틱 제거 기술 관련 연구, 기업, 산업, 정책 동향

최재우 (한국과학기술연구원 물자원순환연구단 책임연구원)

정영균 (한국과학기술연구원 물자원순환연구단 박사후연구원)

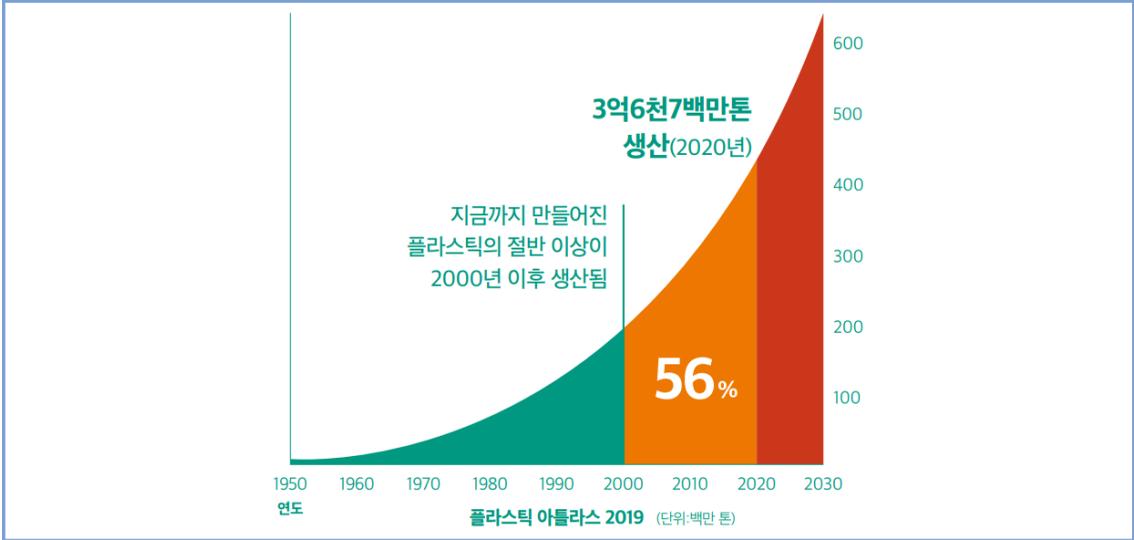
### I. 서론

#### 1. 미세플라스틱의 기원

##### 1.1. 플라스틱 폐기물의 역사

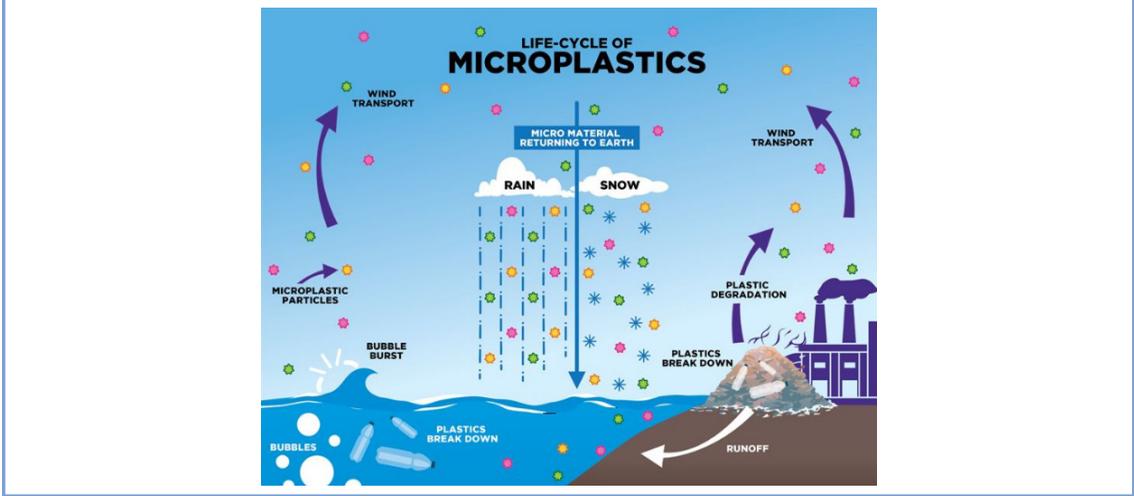
플라스틱은 자연 분해되기까지 많은 시간이 요구되기 때문에 사용량이 증가함에 따라 환경 부담도 증가한다. 플라스틱 대량 생산의 역사는 불과 100년도 되지 않았지만, 플라스틱스유럽(Plastics Europe, 유럽 플라스틱 산업 협회)에 따르면, 2020년 기준 총 플라스틱 생산량이 3억 6,700만 톤(2018년보다 800만 톤 증가)에 달한다고 발표했으며, 2030~2035년에는 2015년 대비 두 배, 2050년에는 세 배로 증가할 것으로 추정된다 <그림 1>. 현재 플라스틱 생산 추세를 고려하면, 2025년에는 해양 내 폐플라스틱의 잔존량이 2억 5,000만 톤에 이를 것으로 예측되며(Jambeck et al. (2015)), 이것은 플라스틱 사용으로 인한 폐플라스틱과 관련된 환경문제를 예고하는 경고로 해석할 수 있다. 이 환경문제와 관련된 우려는 예측뿐만 아니라 해양 동물의 플라스틱 쓰레기에 대한 문제와 해양에 떠다니는 플라스틱 섬의 발견과 같은 환경문제를 통해 현실로 나타났다. 이에 따라 지난 20여 년간 폐플라스틱으로 인한 환경문제를 ‘해양 플라스틱’ 또는 ‘해양쓰레기’로 정의하고, 이에 대한 관리 방안에 대한 논의를 지속해 왔다.

그림 1. 전 세계 플라스틱 생산량



\* 출처: 그린피스 (2021)

그림 2. 노란색, 분홍색, 녹색으로 표현된 미세플라스틱이 육지에서 발생하여 육지와 대기를 통해 순환하는 과정



\* 출처: 디지털비즈온 (2022)

현대의 새로운 환경 오염물질인 ‘미세플라스틱’과 관련된 문제가 점차 심화되면서, 최근에는 정책 대안의 필요성이 시급하다는 목소리가 커지고 있다. 미세플라스틱은 해양 중 폐플라스틱과 함께 전 세계 어디에서나 흔하게 발견되며(그림 2), 생물체와 인간이 섭취하는 식품에서까지 나타나 세포학적 영향을 미칠 가능성이 있다. 이로 인한 인간의 건강에 미치는 영향을 최소화하기 위해서 정책 대안에 대한 국내외에서의 고민이 더욱 깊어지고 있다.

그린수소 생산을 위한 버거급속 촉매

미세플라스틱 제거 기술 관련 연구, 기업, 산업, 정책 동향

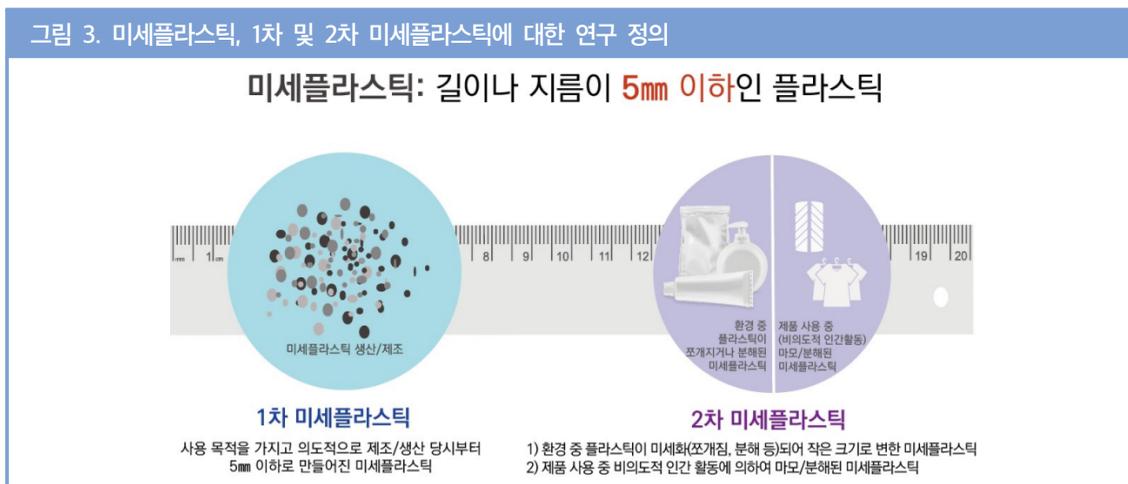
국가R&D 현황 분석

## 1.2. 미세플라스틱의 정의

일반적으로 미세플라스틱은 직경이 5mm 이하의 작은 플라스틱으로 정의되지만, 국제 연합이나 산업계 등 다양한 단체의 성격에 따라 정의를 다양하게 하고 있다. IUPAC(국제 순수·응용 화학 연합)에 의하면 의도적으로 제품에 첨가된 미세플라스틱은 '성능을 향상하거나 비용 절감을 위하여 첨가된 고분자 물질'로 정의하고 있으며, 플라스틱 관련 산업에서는 '고분자 물질을 함유하는 완제품으로 만드는 과정에서 형성될 수 있는 물질'로 정의한다. 2017년 6월 7일 임시회의에서 EU는 미세플라스틱을 다음과 같이 정의했다.

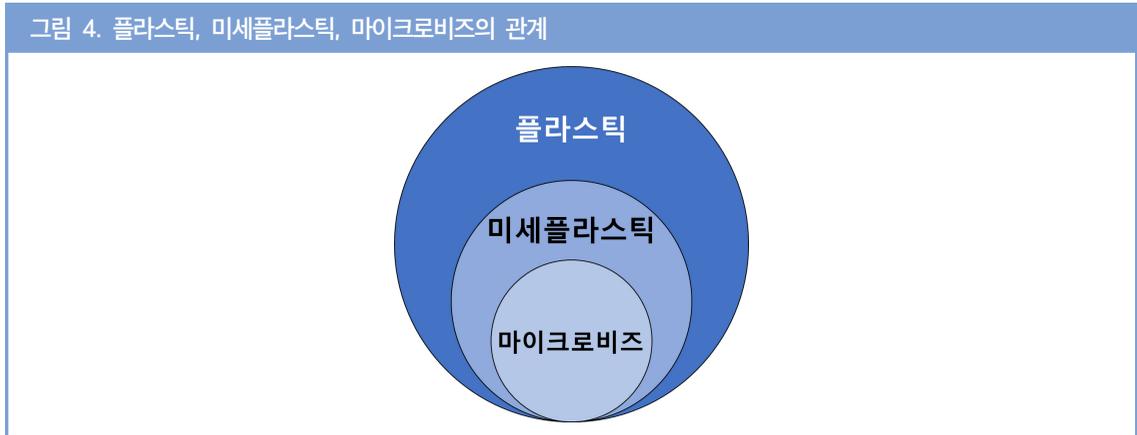
- 인위적으로 만든 플라스틱
- 생분해성과 바이오 기반의 플라스틱
- 불수용성 고체 입자
- 크기가 5mm 이하의 입자(나노스케일의 입자까지 포함)

대부분의 미세플라스틱은 큰 플라스틱 입자로부터 마모되어 생성되므로, 지속적으로 더 작은 입자로 쪼개지는 옥소플라스틱(oxo-degradable plastic)도 이에 포함된다. 미세플라스틱은 조각, 알갱이, 파편, 섬유 등 다양한 형태로 나타나며, 1차 미세플라스틱과 2차 미세플라스틱으로 나눌 수 있다(그림 3). 제조 당시부터 작게 만들어진 미세플라스틱을 1차 미세플라스틱이라고 하며, 1차 미세플라스틱보다 크기가 큰 상태로 제조되었지만 이후에 물리/화학적으로 풍화되어 직경이 5mm 이하인 미세플라스틱을 2차 미세플라스틱이라고 부른다. 대다수의 나라에서 현재 금지하고 있는 미세플라스틱 중 하나는 마이크로비즈(microbeads)로, 바디워시, 치약, 세안용 스크럽 등의 생활용품과 화장품에 사용되는 1차 미세플라스틱의 한 종류를 말한다(그림 4).



\* 출처: 한국환경정책평가연구원 (2019)

그림 4. 플라스틱, 미세플라스틱, 마이크로비즈의 관계



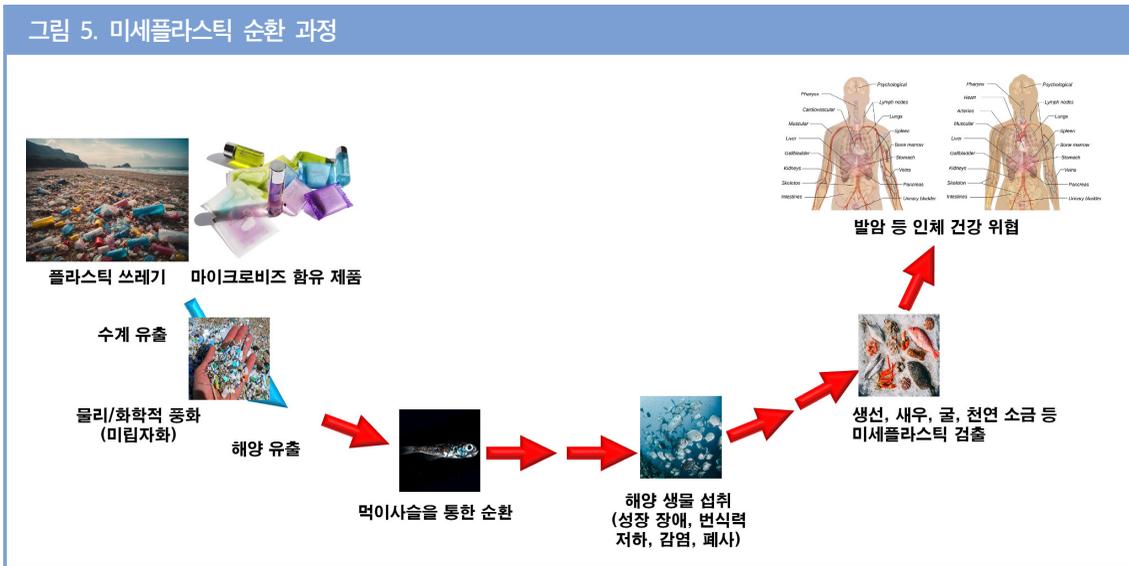
\* 출처: 그린피스 (2016), 재가공

### 1.3. 미세플라스틱 관련 연구의 필요성

최근 유엔환경계획(UNEP)이 생태계 파괴와 해양오염을 심화시키는 미세플라스틱에 대한 제한 정책을 각국 정부에 권고하고 있다. 2017년 7월 G20 정상회담에서는 미세플라스틱 같은 해양 쓰레기가 지구 환경과 인류 건강에 미치는 문제를 다루기 위해 'G20 해양쓰레기 실행계획'을 채택했고, 2018년 9월 바젤협약 작업반 회의에서 미세플라스틱이 포함된 플라스틱 제품에 대한 적절한 예방 조치를 고려 중이라고 언급되기까지 했다. 이로 인한 전 세계적으로 미세플라스틱 관리와 대응 강화에 대한 필요성이 대두되고 있다.

영국의 일간지 '가디언'에서 발표한 미세플라스틱이 14개국 수도물의 83%에서 검출되었다는 보도(2017년 9월) 이후 국내 많은 언론에서는 미세플라스틱이 생태계와 인체 건강을 위협하고 있음을 심각하게 경고하고 있으며, 이에 대한 개선의 필요성을 강조하고 있다. 미국 연구진이 수행한 9개국 11개 브랜드 생수 검사 결과에서는 네슬레퓨어라이프, 아쿠아, 에비앙 등 90% 이상의 제품에서 미세플라스틱이 검출되었고, 심지어는 한 병에서 10,000개의 미세플라스틱 입자가 검출된 경우도 있었다. 국내에서도 수도물이나 일부 생수에서 미세플라스틱이 검출되어 이 문제가 전 지구적인 환경 이슈로 대두되고 있다. 또한, 국내 굴, 담치, 게 표본의 97%에서도 미세플라스틱이 검출되었다는 보고가 있으며, 심지어 한 개체에서 61개 입자가 발견되었다. 이러한 미세플라스틱은 <그림 5>와 같이 해수로 들어가면서 환경 매체 내에서 활동하며, 나일론, 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP), 폴리메타크릴산 메틸(PMMA), 폴리에틸렌 테레프타레이트(PET)와 같은 석유화학 물질로 만들어져 있어 PCB 등의 주변 유해 화학물질, 비프페놀, 중금속 등의 내분비 교란물질이 쉽게 달라붙어 미세플라스틱과 함께 우리 몸의 장기 내부에서 축적된다. 이러한 미세플라스틱과 부착된 흡착물질이 장기 내부에 축적되면, 섬유증, 암, 생식독성, 소화기계 장애 등의 심각한 질환을 유발할 가능성이 제기되고 있다.

그림 5. 미세플라스틱 순환 과정



\* 출처: 동아사이언스 (2018), 재가공

해외에서는 이미 미세플라스틱을 규제 대상 물질로 지정하거나 독성물질로 등재하는 등 다양하고 빠른 대응이 진행되고 있다. ECHA(유럽화학물질청; European Chemical Agency)은 모든 개인용품과 화장품에 포함된 기능성 미세플라스틱을 규제 대상화하기 위한 준비서 작업에 착수했다(REACH Annex XV restriction dossier). 네덜란드는 2차 미세플라스틱 발생과 관련하여 이미 트램프(TRAMP) 프로젝트(2015~2019)를 수행했으며 건강 위해성 평가 기법 등과 관련된 연구가 진행 중이다. 유럽 연합에서는 ‘플라스틱 재활용 기술의 경제성과 품질 향상’, ‘미세플라스틱이 함유된 제품 및 폐기물 저감’, ‘투자과 혁신 유도’, ‘국제간 협력’ 등 다방면의 관리 정책을 연계 및 추진 중이다. 또한 캐나다에서는 2016년 6월 마이크로비즈를 CEPA 1999(Canadian Environmental Protection Act) Schedule 1에 독성물질로 지정하여 미세플라스틱 관리 방안을 수립하였다. 이같이 각국 정부 부처뿐만 아니라 국제기구, 산업계에서도 미세플라스틱 발생을 줄이기 위한 다양한 노력을 기울이고 있다. 이전에 언급한 G20 정상회담(2017년 7월)에서는 ‘G20 해양쓰레기 실행계획’을 채택했고, GESAMP(해양 환경 전문가그룹) 국제 워크숍에서는 미세플라스틱을 세계적인 관심 물질로 지정하였다. 또한 산업계에서는 미세플라스틱 발생 저감을 위해 자발적인 노력을 기울이고 있으며, 그 예로 유럽 연합의 EUATEX(섬유 및 의류 연맹)와 NGO에서는 미세플라스틱 발생 및 오염 정도를 지속해서 관찰하고 미세플라스틱 배출 및 관리 교육을 촉구하고 있다. 그러나 국내에서는 언론 보도를 통해 이제야 미세플라스틱에 대한 사회적 관심이 시작되고 있는 초기 단계로, 구체적인 현황 진단조차 제대로 이루어지지 않았다. 이는 외국과 비교했을 때 국내의 규제와 관리 정책이 매우 미흡하게 진행되고 있다는 실정을 보여준다.

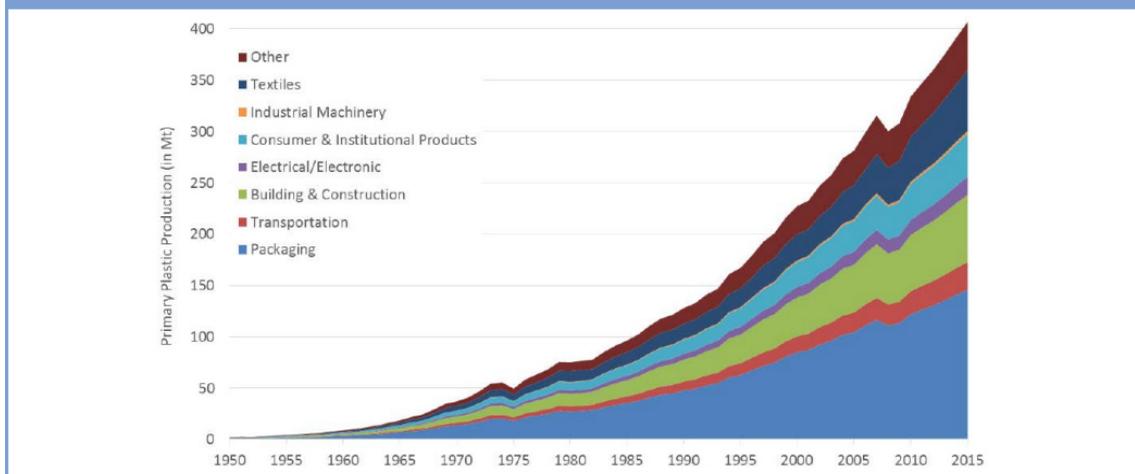
## II. 미세플라스틱 현황과 문제점

### 1. 미세플라스틱 발생 현황과 분포

#### 1.1. 전 세계 플라스틱 폐기물 발생 현황

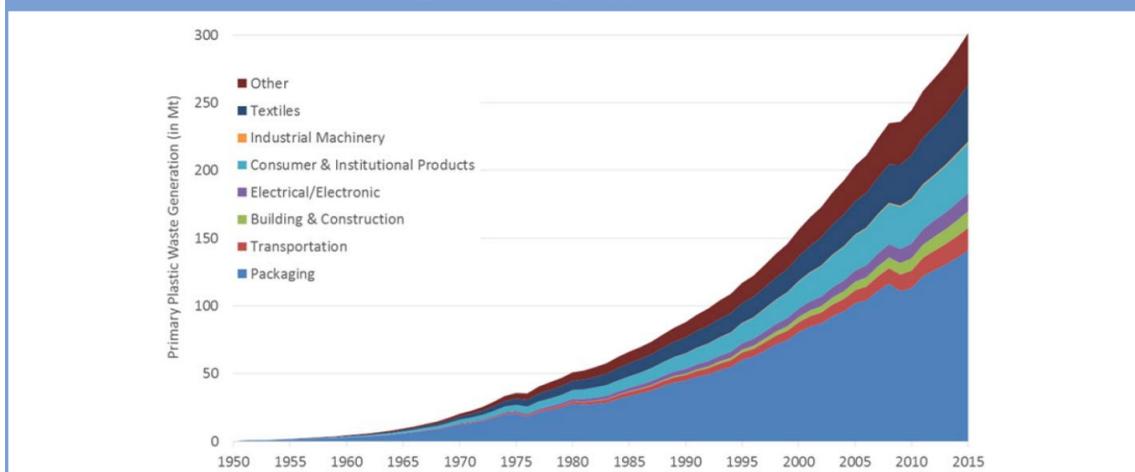
전 세계적으로 1960년대 이후 플라스틱 사용량이 급격하게 증가했다. 1950~2015년 사이 전 세계 플라스틱 생산과 플라스틱 폐기물 발생량과 관련된 통계 자료에 따르면, 65년 동안 플라스틱이 8,300만 톤이 생산되었고 1950년 플라스틱 폐기물은 2백만 톤에서 65년 이후 407백만 톤으로 늘어나 약 200배가 넘게 증가하였다(그림 6). 2015년을 기준으로 플라스틱 폐기물의 발생량은 약 302백만 톤으로 추정된다(그림 7).

그림 6. 1950~2015년 전 세계 용도별 플라스틱 생산량



\* 출처: Geyer et al. (2017)

그림 7. 1950~2015년 전 세계 용도별 플라스틱 폐기물 발생량



\* 출처: Geyer et al. (2017)

플라스틱 폐기물은 포장재가 가장 두드러지게 많았고, 그 외로 건설 계 폐기물과 섬유 폐기물이 높은 비율을 차지했다. 총 6,300만 톤의 플라스틱 폐기물 중 13%(800만 톤)은 소각되었고, 77%(4,900만 톤)은 버려지거나 매립되었던 반면, 10%(600만 톤)만이 재활용된 것으로 조사되었다. 현재의 추세가 지속되는 경우 2050년까지 플라스틱 폐기물 누적 발생량이 330억 톤으로 추정되며, 그중 단지 90억 톤이 재활용, 120억 톤이 소각, 그리고 120억 톤이 버려지거나 매립될 것으로 파악된다(Geyer et al. (2017)).

아시아에서 플라스틱 생산량은 전 세계 생산량의 절반 이상을 차지하며, 중국이 29%로 단일국가 중 전 세계에서 가장 많은 양의 플라스틱을 생산하고 있다(PlasticEurope (2017)). 한편, 2016년 기준 국내 플라스틱 원료 생산량은 21백만 톤으로 조사되었으며, 11백만 톤(수출량을 제외)을 국내에서 사용하고 있고 이에 따른 플라스틱 폐기물은 약 10.1백만 톤이라고 보고되었다(한국환경산업기술원(2018)).

## 1.2. 미세플라스틱의 배출원과 배출량

### 1.2.1. 노르웨이의 미세플라스틱의 배출원과 배출량

노르웨이에서 보고된 초기 미세플라스틱에 대한 배출원과 배출량을 추정한 연구에서는 미세플라스틱 폐기물 배출원 연구 결과를 기준으로 플라스틱을 포함하는 제품의 생산부터 사용, 그리고 유지 및 처분 등 모든 미세플라스틱의 배출 경로를 다룬다(Sundt et al. (2014)). 이 연구에서는 기존 개념과는 다른 방식으로 1차, 2차 미세플라스틱의 배출원을 정의하고 있는데, 1차 미세플라스틱은 생산 과정에서부터 작은 직경을 지닌 미세플라스틱을 포함하고 생산 과정에서 미세플라스틱이 형성될 우려가 있는 공정이나 정상적인 제품 사용 중에 발생하는 섬유 및 마모로 인한 미세플라스틱, 수송 등 비의도적인 배출까지 광범위한 규모의 미세플라스틱으로 정의한다(그림 8). 즉, 저자들은 인간에 의해 만들어졌거나, 제품에 포함된 미세플라스틱이 바다로 배출되는 경우를 1차 배출원으로 정의했고, 외부 자극이나 변화로 인한 미세플라스틱 배출원을 2차 배출원으로 정의했다(그림 9).

그림 8. 1차/2차 미세플라스틱 배출원의 개념

1차 배출원	2차 배출원
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 의도적으로 생산된 미세플라스틱으로 미세플라스틱 자체로 사용되는 배출원</li> <li>- 다른 제품이나 상업, 생산 활동 중에 사용되는 발생원</li> <li>- 사고 또는 의도하지 않은 유출로 인해 배출되는 미세플라스틱 발생원</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 풍화작용 및 미생물의 분해에 의해 작은 플라스틱 조각의 원인이 되는 발생원</li> <li>- 오래된 미세플라스틱이 오염된 토양, 퇴적물로부터 재발생 혹은 재부유한 경우</li> <li>- 동물 활동에 의해 분해되는 큰 플라스틱류</li> </ul>

\* 출처: Sundt et al. (2014)

그림 9. 1차/2차 미세플라스틱 발생원

주요 발생원	하위 그룹	단일 출처 확인
마이크로비즈가 포함된 소비자 제품	각질 제거를 위한 개인 관리 제품	세안 제품 및 보디워시, 치약
	기타 개인 관리 제품	면도 제품, 립스틱, 자외선 차단제, 마스크라 내 미세플라스틱
	기타 소비자 제품	예) 글리터, 미끄럼 방지제, 프린터 토너
미세플라스틱을 함유한 상업용 제품 또는 그 중간체	금속 가공용 연마제	조선소 샌드 블라스팅을 위한 플라스틱 펠릿, 유지 보수 과정, 생산 설비
	기타 공정 연마제	의류, 자동차, 도구 제조 등 산업에서 사용되는 블라스트용 플라스틱
	가공 산업	미세플라스틱을 함유한 특수 화학물질 예) 오일(석유) 및 가스 시추, 섬유 인쇄
	의료 분야	마이크로비즈를 활용한 치아 광택 및 의료 용품

\* 출처: Sundt et al. (2014)

그림 10. 노르웨이의 1차 미세플라스틱 배출 농도 추정 결과

구분	최소	평균	최대
화장품(배출계수: 1%)			
제품 내 미세플라스틱 농도( $C_{mp}$ : g/g)	0.0094	0.42	0.1
제품 1일 사용량( $U_{prod}$ : 1인·g/L)	4.50	4.80	5.20
미세플라스틱 함유 제품의 시장점유도( $F_{pen}$ )	0.005	0.01	0.015
배출 예상 농도( $PEC_{eff}$ : $\mu$ g/L)	0.07	1.7	41
세척 제품(배출계수: 1%)			
제품 내 미세플라스틱 농도( $C_{mp}$ : g/g)	0.1	0.25	0.5
제품 1일 사용량( $U_{prod}$ : 1인·g/L)	0.64	0.68	0.74
미세플라스틱 함유 제품의 시장점유도( $F_{pen}$ )	0.001	0.0025	0.005
배출 예상 농도( $PEC_{eff}$ : $\mu$ g/L)	0.02	0.36	9.8
페인트 및 코팅제(배출계수: 0.005%)			
제품 내 미세플라스틱 농도( $C_{mp}$ : g/g)	0.14	0.2	0.3
제품 1일 사용량( $U_{prod}$ : 1인·g/L)	3.90	5.70	6.50
미세플라스틱 함유 제품의 시장점유도( $F_{pen}$ )	0.09	0.13	0.17
배출 예상 농도( $PEC_{eff}$ : $\mu$ g/L)	0.08	0.63	15
총 배출 예상 농도( $PEC_{eff}$ : $\mu$ g/L)	0.2	2.7	66

\* 출처: van Wezel et al. (2015)

하지만, 산업에서 사용되는 실제 플라스틱의 정량(mass-flow)에 대한 충분한 정보가 있어야 정확도가 높은 미세플라스틱 배출량을 산정할 수 있기 때문에 제한적인 수준에서 배출량을 추정해야 한다. van Wezel et al. (2015)는 작은 크기의 입자를 분석하기 위해 개발된 모델을 사용하여 미세플라스틱 배출량을 추정했다(그림 10). 그러나 제품에 이용되는 미세플라스틱의 양과 종류에 관한 정보가 부족하다는 이유로 확률론적 물질 흐름, 제품 사용주기 모델 등 복잡한 미세플라스틱 배출 모델을 활용하는 데 제한이 있었음을 밝혔다.

그림 11. 미세플라스틱 배출 농도 추정식

$$PEC_{eff} = \frac{C_{mp} \times U_{prod} \times (1 - R_{stp}) \times F_{pen}}{WW_{inh}}$$

$PEC_{eff}$ : 하수처리장에서 예상되는 배출 농도(g/L)  
 $C_{mp}$ : 제품에서의 미세플라스틱 농도(g/g)  
 $U_{prod}$ : 제품의 하루 사용량(g/g)  
 $R_{stp}$ : 하수처리 중 제거된 미세플라스틱 분율  
 $F_{pen}$ : 전체 제품군 중 미세플라스틱을 함유한 제품의 시장 점유도  
 $WW_{inh}$ : 1일 생산 폐수의 양(L/day)

\* 출처: van Wezel et al. (2015)

위 식을 이용하여 미세플라스틱 배출량을 추정했으며, 불확실성을 최대한 줄일 수 있도록 최소, 평균, 최대의 총 세 가지 방향으로 대상 물질별 미세플라스틱 배출량을 추정하였다. 그 결과 1차 미세플라스틱 중 해양으로 배출되는 예상 농도는 0.2 $\mu$ m/L(최소), 2.7 $\mu$ m/L(평균), 66  $\mu$ m/L(최대)로 예측되었다. 또한, 1차 미세플라스틱의 배출 확률이 가장 높은 제품으로 개인 관리 제품, 화장품, 페인트, 세제, 코팅 제품을 제시했다. 또한 제품별 1일 사용량, 1차 미세플라스틱을 포함하는 제품의 협회나 조합 등 유통 기관의 문헌과 시장점유율 등을 활용하여 미세플라스틱 농도 정보를 얻었다. 제품에 사용되는 모든 미세플라스틱이 수계로 배출된다고 가정했을 때, 제품에서 파생된 미세플라스틱 농도, 제품의 하루 사용량 등의 변수를 다음과 같이 정리할 수 있었다(그림 11).

### 1.2.2. 국내 미세플라스틱의 배출원과 배출량

국내 한 연구에서는(이혜성 외(2017)), 인위적으로 미세해진 플라스틱을 환경으로 배출시키는 곳을 미세플라스틱의 1차 배출원으로 정의했고, 각 배출원(개인위생제품, 생산 및 수송 공정, 도로 사용처, 가정배출분진, 세탁, 실외 분진, 인조 잔디, 음식물 같은 폐기물 재활용시설

그림 12. 국내 1차 미세플라스틱 배출 농도 추정 결과

Source group	Annual microplastics (ton/year)
Personal care product discharge	370~410
Commercial product discharge	>100
Production spill Transport discharge	110~105,000
Production discharge	210~8,400
Vessel paint discharge	4,540~8,580
Leisure boat paint discharge	
Structure protective coating discharge	830~6,660
Structure decorative coating discharge	
Structure decorative Coating weathering	
Commercial laundry discharge	100~1,200
Floating device weathering	0.2~1.6
Household dust discharge	3~4,080
Household laundry discharge	1,010~11,480
Building dust discharge	1,080~2.160
Tyre dust discharge	49,600~55,300
Road marker discharge	85
Abrasion of asphalt	4~5
Artificial turf discharge	3,200~5,400
Discharge by fishing gear weathering	485~4,850
Discharge by organic waste treatment	580
Irregular discharge	>100
Discharge by paper recycling	360~1,080
Discharge by waste shredding	>10
Sum	>62,780~215,500

\* 출처: 이혜성 외 (2017), 재가공

등)에서 발생하는 미세플라스틱의 잠재량을 추정하고자 했다. 그러나 배출량 추산을 위해 필요한 우리나라의 인구 수, 제품사용량, 무역량 등 기초 통계 자료가 없을 경우는 필요에 따라 앞서 소개했던 노르웨이의 선행연구(Sundt et al. (2014))와 OECD의 자료를 인용했다. 미세플라스틱의 발생량은 생산량과 배출계수를 곱해 추산되었다(그림 12). 최댓값을 기준으로, 선박 수송에 의한 미세플라스틱 배출량이 가장 많았다는 점과 타이어분진과 가정세탁에 의한 발생량이 그다음 순위로 많았다는 사실을 알 수 있었다.

## 2. 미세플라스틱 문제점

### 2.1. 생태 및 환경 영향

배출된 미세플라스틱이 물리/화학적 영향을 유발할 수 있다는 내용이 다수의 연구에서 입증되었다(Kühn et al. (2015); SAPEA(2019); Wagner et al. (2018)). 미세 플라스틱은 환경과 그 환경에 노출된 생태에도 영향을 준다. 미세플라스틱의 섭취로 인한 먹이 섭취량 감소와 장기 등 내부 손상으로 인한 영향(물리적 영향)과 독성효과를 발생시키는 미세플라스틱에 포함된 물질(화학적 영향)으로 구분할 수 있다(그림 13).

그림 13. 미세플라스틱의 물리/화학적 영향(A: additives, P: pollutants, B:biofilm and biopolymer)

$$PEC_{eff} = \frac{C_{mp} \times U_{prod} \times (1 - R_{stp}) \times F_{pen}}{WW_{inh}}$$

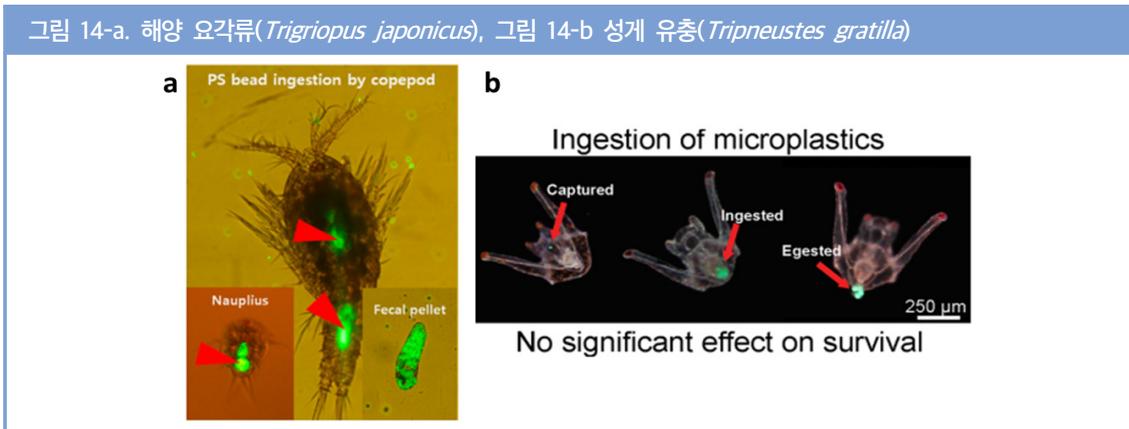
$PEC_{eff}$ : 하수처리장에서 예상되는 배출 농도(g/L)  
 $C_{mp}$ : 제품에서의 미세플라스틱 농도(g/g)  
 $U_{prod}$ : 제품의 하루 사용량(g/g)  
 $R_{stp}$ : 하수처리 중 제거된 미세플라스틱 분율  
 $F_{pen}$ : 전체 제품군 중 미세플라스틱을 함유한 제품의 시장 점유율  
 $WW_{inh}$ : 1일 생산 폐수의 양(L/day)

\* 출처: Scherer et al. (2018)

담수 및 해수에 사는 생물의 미세플라스틱 섭취에 대한 연구가 진행되어왔다. 지난 연구에 따르면(Cole et al. (2013, 2015)), 미세플라스틱에 의해 해양 요각류의 에너지를 고갈시켜 먹이 활동을 둔화시키며, 장기간 미세플라스틱에 노출되는 경우 번식량이 줄어든다고 한다. Lee et al. (2013) 또한 미세플라스틱의 섭취를 통해 해양 요각류의 생존율이 감소되었으며, 미세플라스틱 입자가 작을수록 생존율이 줄어드는 것을 보고했다(그림 14-a).

이와는 반대로 Kaposi et al. (2014)는 마이크로스케일의 polyethylene 미세플라스틱이 성게 유충에게 미치는 영향을 관찰한 결과, 섭취 후 1시간 내 배설되며 해양에서 관찰되는 농도 수준에서의 유의미한 생존율 변화는 없는 것으로 나타났다. 배양 등각류에서도 생물 축적없이 미세플라스틱이 배설되었고, 성장 및 탈피 기간에 영향이 없었다(Hämer et al. (2014))(그림 14-b).

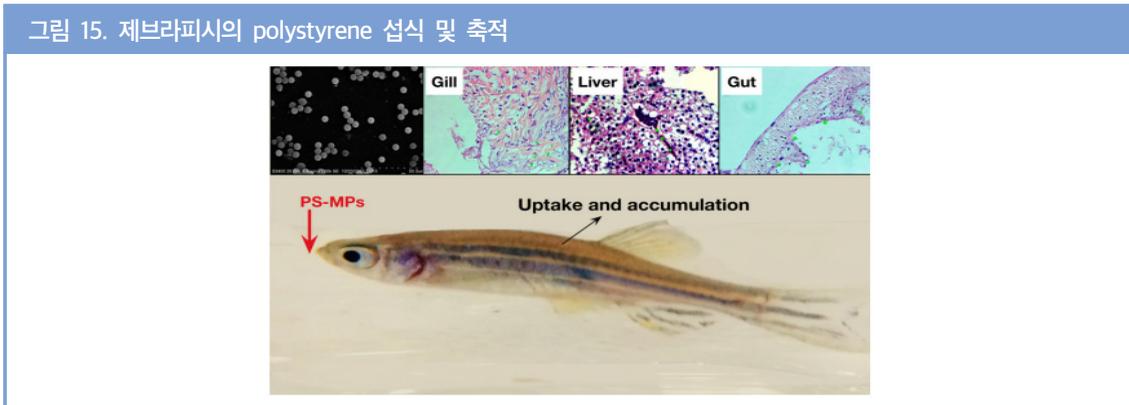
그림 14-a. 해양 요각류(*Trigriopus japonicus*), 그림 14-b 성게 유충(*Tripneustes gratilla*)



\* 출처: (a) Lee et al. (2013), (b) Kaposi et al. (2014)

담수 어류인 제브라피시의 polystyrene 미세플라스틱 섭취와 관련된 실험에서 미세플라스틱의 크기에 따라 축적되는 생체 내 기관이 달랐다. 직경의 크기가 각각 5 μm와 70 nm의 polystyrene 미세플라스틱이 어류의 간에서 지질 축적과 염증 반응을 유발했던 반면(Lu et al. (2016))〈그림 15〉, polyvinyl chloride를 유럽 바다 농도에 노출시킨 경우에 장의 조직학적 변화가 있었다(Pedà et al. (2016)).

그림 15. 제브라피시의 polystyrene 섭취 및 축적



\* 출처: Lu et al. (2016)

미세플라스틱의 물리적 영향과 관련된 연구 결과를 종합하여 요약하면 다음과 같다. 첫째, 미세플라스틱 섭취 여부는 종 특이성이 있다. 담수 생물의 종별 미세플라스틱의 섭취 여부와 관련된 연구 결과를 보면(Scherer et al. (2018)), 물벼룩류는 여과 섭식을 하면서 미세플라스틱의 섭취율이 높았던 반면 섬모충류나 윤충류는 섭취율이 낮아 종별로 차이가 있음을 확인한 바 있다. 둘째, 미세플라스틱의 크기는 물리적 영향의 주요한 요소로 작용한다. 미세플라스틱의 크기가 작을수록 섭취되기 쉽고, 그에 따라 생존율이 저하된다. 또한, 생물 내 축적량이 많아지고 아무리 동일 생물종이라도 입자의 크기에 따라 섭취 여부가 달라짐을 확인했다(Lee et al. (2013); Lu et al, (2016), Scherer et al. (2018)).

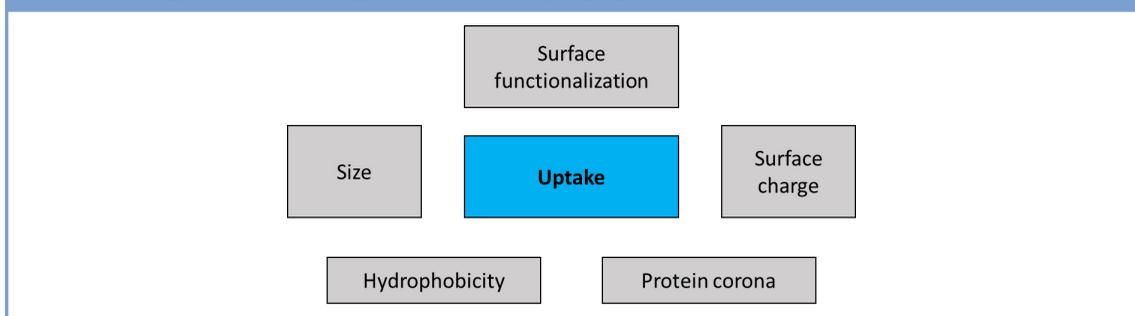
미세플라스틱에 포함된 가소제나 소수성 오염물질 등이 흡착되어 생물의 체내로 이동하는지 여부가 미세플라스틱의 건강 영향 관련 관심 이슈 중 하나이다. 특히 내분비계 교란물질 및 잔류성유기오염물질(예: PAHs, PBDE, PCBs 등)이 미세플라스틱에 흡착된 형태로 생물에 축적되는지 알아보기 위한 다양한 연구가 수행되었다.

미세플라스틱이 바다에서 잔류하는 유기 오염물을 운반 여부를 검토한 연구에 따르면(Andray (2011)), 미세플라스틱의 소수성 표면에 의한 유기 오염물질이 흡착될 수 있는 성질을 고려할 때 섭취 경로를 통한 운반 가능성이 높다는 보고가 있다. 또한, 갯지렁이를 노닐페놀과 페난트렌 오염물질 및 트리클로산 및 PBDE-47 첨가제가 흡수된 미세플라스틱이 약 5% 함유된 모래에 노출된 갯지렁이의 장 조직으로 오염물질과 첨가제를 운반하며 산화 스트레스와 침전물 처리 능력 감소 등과 같은 생물학적 기능 저하를 초래했다(Browne et al. (2013)). 이와 같은 배출된 미세플라스틱이 오염물질 전달 매개체 역할을 증명하는 보고들이 있음에도, 최근에는 그 영향을 입증할 만한 충분한 근거와 연구 사례가 부족하므로 미세플라스틱의 영향과 관련된 연구의 중요성이 높다는 견해가 부정적으로 바뀌는 추세이다.

## 2.2. 인체 영향

인간이 먹는 식품에서 미세플라스틱이 검출되고, 사람의 대변에서 관찰되면서 인간에게 미세플라스틱이 어떤 영향을 미치는지에 관한 관심이 늘고 있다. 그러나 미세플라스틱의 농축 영향이나 미세플라스틱 함유 식품 섭취 후 독성 영향에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다(Toussaint et al. (2019); Wright et al. (2017)). 다만 배출된 미세플라스틱의 유입 경로가 대상 입자 특성의 영향과 세포의 종류의 영향을 받을 것으로 예측된다(그림 16).

그림 16. 미세플라스틱 또는 나노플라스틱의 섭취에 영향을 줄 것으로 예측되는 입자 특성

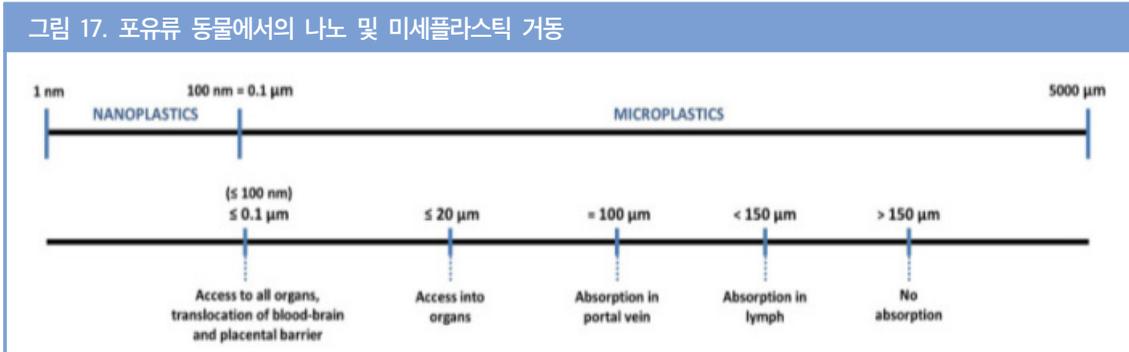


\* 출처: Wright(2017), 재가공

미세플라스틱이 건강에 부정적인 영향을 미치는지 파악하기 위해서는 미세플라스틱의 섭취 후 인체 내 경로를 파악해 내장에 머무는지 여부와 장벽을 가로지르는 전위 발생 여부를 확인해야 한다(Bouwmeester et al. (2015)). 크기가 20 $\mu$ m 이하의 미세플라스틱은 장기를 관통할 수 있다고 알려져 있다(Barboza et al. (2018)). 더 작은 크기( $\leq 0.1 \mu$ m)의 미세플라스틱은 모든 장기에 접근 가능하며 세포막도 통과할 수 있으며, 태반과

혈액뇌장벽을 통과할 수 있다고 보고된 바 있다. 따라서 미세플라스틱의 크기가 작아질수록 잠재적으로 독성을 일으키거나 부정적인 영향을 미칠 것으로 보고 있다(그림 17).

그림 17. 포유류 동물에서의 나노 및 미세플라스틱 거동



\* 출처: Barboza et al. (2018)

지금까지 살펴본 바와 같이, 배출된 미세플라스틱이 인체에 미치는 영향은 불확실하다. 그러나 환경으로 배출되는 미세플라스틱이 지속적으로 증가된다는 점을 고려할 때 미세플라스틱으로 인한 생물과 인체 건강 위해가 우려된다. 모든 영역에서의 합의된 미세플라스틱의 정의와 검출, 독성 시험, 위해성 평가, 실험 연구 등의 표준화된 방법 개발이 필요하다.

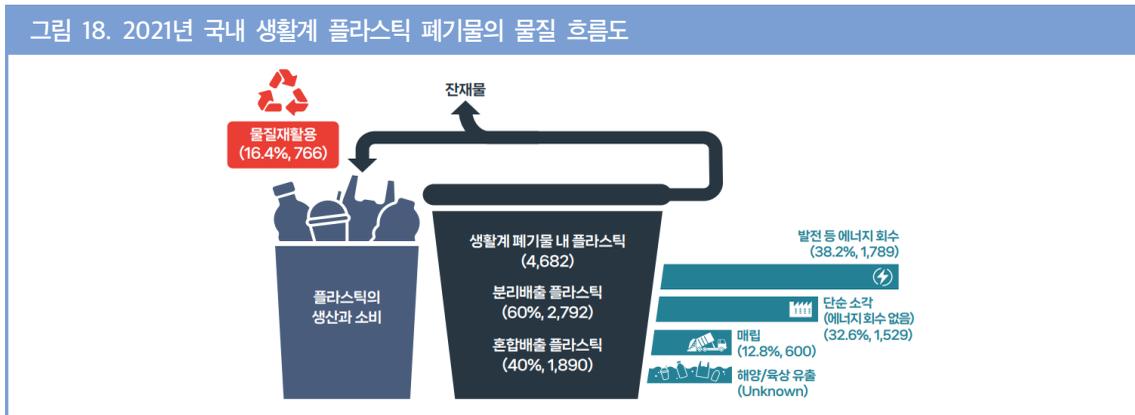
### 2.3. 플라스틱 재활용의 한계

국내 플라스틱 물질 흐름도에 따르면 국내에서 배출된 플라스틱 폐기물은 크게 소각, 재활용, 매립 방식으로 처리된다. 환경부 통계에 의하면 2021년 기준 국내에서 발생하는 플라스틱 폐기물의 약 73%가 재활용되며, 생활계 폐기물의 경우에는 약 57%가 재활용된다. OECD에서 발표한 2019년에 전 세계에서 생산된 플라스틱의 재활용 비율이 9%라는 결과와 유럽 연합에서 발표한 2018년의 플라스틱 재활용률이 32.5%라는 결과와 비교하면 매우 높은 수치다(European Parliament(2018)).

원인은 우리나라와 플라스틱 재활용을 정의하는 범위가 다르다는 점에 있다. 국내 재활용의 기준은 플라스틱 폐기물로부터 에너지를 회수하는 과정을 열적 재활용으로 포함한다. 하지만, 유럽 연합은 폐기물로부터 에너지 회수 과정을 재활용 범위에 포함하지 않으며 플라스틱의 물성을 변화시키지 않고 가공하거나 재사용하는 행위만을 재활용으로 본다. 따라서, EU의 기준에 따라 플라스틱의 재활용률을 다시 추산하면 국내 재활용률은 크게 떨어진다.

이전에 발표된 자료에 따르면, EU 기준 계산법을 활용한 2017년 기준 국내 전체 플라스틱은 약 22.7%만이 재활용되는 것으로 집계된다. 특히 일회용품이 큰 비중을 차지할 것으로 예상되는 생활계 폐기물의 재활용률은 약 13%에 불과했다. 국내 연구팀의 2021년 기준으로 발생된 플라스틱 폐기물 데이터로 동일 계산을 실행한 결과(그림 18), 국내 물질 재활용률은 약간 증가한 수치인 약 27%이며, 생활계 폐기물의 재활용률은 여전히 낮은 16.4%에 불과하다(충남대학교(2019)).

그림 18. 2021년 국내 생활계 플라스틱 폐기물의 물질 흐름도



\* 출처: 충남대학교 (2019)

또 다른 플라스틱 재활용의 한계점으로는, 플라스틱은 생애주기 전반에 걸쳐서 온실가스를 배출한다는 점이다. 석유 원료로부터 플라스틱을 제조하고 가공하는 과정은 물론, 판매, 유통, 그리고 플라스틱 폐기물을 처리하는 공정에서도 온실가스가 배출된다. 2022년 기준 OECD는 전 세계에서 생산되는 플라스틱량이 약 4.6억 톤(2019년)에서 약 12.3억 톤(2060년)으로 증가할 것으로 추산하고 있다. 또한, 늘어난 생산량과 더불어 온실가스 배출량도 18억 톤(2019년)에서 43억 톤(2060년)으로 늘어날 것으로 예측했다(OECD(2022)). 즉, 플라스틱의 사용량이 전 세계적으로 증가함에 따라 배출되는 온실가스의 양이 증가될 전망이다.

미국 환경보호청의 WARM (Waste Reduction Model)은 온실가스 배출/감축량 계산이 가능한 모델이다. 이를 기반으로 플라스틱 폐기물을 소각할 때 온실가스 배출량을 계산한 결과, 2020년 기준 약 260만 톤의 국내에서 소각된 플라스틱 폐기물은 약 520만 톤의 이산화탄소의 발생이 계산되었다. 이는 500MW급 석탄화력발전소가 1년 동안 배출하는 평균 온실가스량의 약 2.6배에 해당한다(Beyond Plastic (2021)).

하지만 이 양은 플라스틱이 발생시키는 총 온실가스의 양에 비하면 아주 일부에 불과하다. 앞서 설명한 것과 같이 플라스틱은 합성-사용-폐기 전 과정에서 온실가스를 배출하고 있기 때문이다. 미국의 환경단체 Beyond Plastic의 추산에 따르면(Beyond Plastic (2021)), 산업에서 플라스틱이 온실가스를 배출하는 10단계를 분석해 배출량을 추산했다. 그결과 2020년 기준 미국 플라스틱 산업은 연간 500MW의 석탄화력발전소 116개와 동일한 온실가스를 배출한다는 결과를 보고했고, 2023년까지 플라스틱 폐기물로 인한 온실가스 배출량이 석탄 발전소를 넘어설 것임을 지적하며 기후변화를 가속화할 것으로 보고 있다. 이처럼 플라스틱과 온실가스, 그리고 기후변화는 별개의 문제가 아니기 때문에 기후문제 해결을 위해서는 플라스틱 문제의 해결 또한 절실히 필요하다.

### III. 미세플라스틱 관련 연구 현황

#### 1. 미세플라스틱 관련 기업 및 발생 산업

미세플라스틱 이슈에 관하여 산업계는 크게 미세플라스틱 사용량을 줄이는 방향과 대체 물질을 개발하는 두 가지 방향으로 대응하고 있다.

첫 번째로, 플라스틱 사용 저감 활동으로 가장 먼저 참여한 것은 화장품과 개인위생용품 관련 업계이다. 2010년대 초반에 마이크로비즈로 인한 위해성과 환경오염 문제 이슈가 생기면서 마이크로비즈 함유 제품에 대한 시민단체의 반발이 커져 갔다. 이에 대한 대응책으로써 유럽을 중심으로 대부분의 다국적 화장품업계는 자발적으로 미세플라스틱 배출 저감 노력을 시작했다(BBC News (2018)). 이 저감 운동은 마이크로비즈를 가장 많이 사용하던 화장품 및 개인위생용품에서 마이크로비즈의 사용은 대부분의 제품에서 단계적으로 중지되고 있거나 중지되었다(그림 19).

그림 19. 화장품 및 의약품 업체의 마이크로비즈 사용 중지 현황

회사명	사용중지 현황
L'oreal <sup>1)</sup>	2017년까지 사용 중지
Johnson & Johnson <sup>2)</sup>	2017년까지 사용 중지
Unilever <sup>3)</sup>	2015년부터 사용 중지
Procter & Gamble <sup>4)</sup>	2018년까지 사용 중지
Colgate-Palmolive <sup>5)</sup>	2014년부터 사용 중지
Crest <sup>6)</sup>	모든 치약제품에서 2017년까지 사용 중지
Beiersdorf <sup>7)</sup>	2015년까지 모든 제품에서 사용 중지

자료: 1) L'Oreal, "L'Oreal commits to phase out all polyethylene microbeads from its scrubs by 2017", 2) Johnson & Johnson, "Microbeads", 3) Unilever, "Micro-plastics", 4) Procter and Gamble, "Microbeads", 5) Colgate-Palmolive, "Our Policy on Ingredient Safety: Earning Your Confidence for Generations, Every Day", Crest, "Frequently Asked Questions About Microbeads", 7) Beiersdorf, "Bye-bye microbeads-Hello progress!".

\* 출처: 한국환경정책평가연구원 (2018)

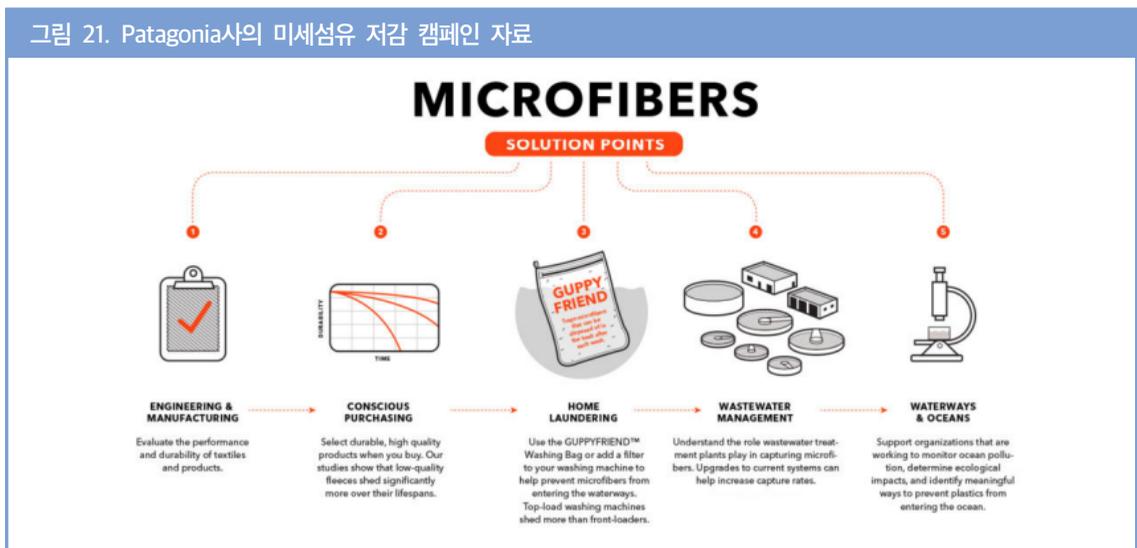
또 다른 예로, 의류 등 합성섬유로부터 형성되는 미세섬유는 최근에 그 심각성이 증가하고 있는 미세플라스틱의 한 종류다. 거의 모든 미세섬유로 구성된 미세플라스틱은 세탁 과정에서 유출된다(Patagonia (2018)). 미세섬유로 인한 환경오염 문제에 대응하기 위하여 유럽에서는 의복 관련 산업체들이 미세섬유를 저감하기 위한 협약을 맺었다(EURATEX (2018)). 이 협약은 우선 미세플라스틱 저감을 위해 유출되는 미세섬유에 대한 정보를 얻기 위하여 미세섬유의 정확한 측정 방법을 만들고 이 연구와 관련된 지식의 공유 및 활성화를 위해 공동으로 노력할 것을 합의했다(그림 20).

그림 20. 유럽 의복 관련 산업체들의 미세섬유 저감 협약



\* 출처: EURATEX (2018)

그림 21. Patagonia사의 미세섬유 저감 캠페인 자료



\* 출처: Peter McBride/Patagonia (2017)

위 사례처럼 의류업체들의 공동 저감 활동과 동시에 개별 업체 차원에서의 저감 노력도 확인된다. 대표적인 사례는 미국 의류업체인 Patagonia이다. 이 기업은 미세섬유가 환경으로 유출되는 양을 줄이기 위하여 소비자 교육, 기술개발, 연구 등에 투자하며 홍보하고 있다(그림 21).

배출된 플라스틱 폐기물의 쪼개짐으로 인해 형성되는 2차 미세플라스틱은 환경에서 검출되는 미세플라스틱 중 높은 비중으로 검출된다. 따라서 미세플라스틱 저감 노력에는 플라스틱 제조업계의 2차 미세플라스틱 저감 노력이 필요하다. 대표적인 사례로는 플라스틱 관련 업체들의 파트너사인 PLASTICS (Plastics Industry Association)를 들 수 있는데, 1991년 Operation Clean Sweep 프로그램을 시작했다. 이 프로그램의 목적은 플라스틱 관련 산업체들이 플라스틱 제품의 운송과 제조 과정 등에서 발생하는 미세플라스틱의 환경으로의 유출을 최소화하는

관리 방안을 마련하도록 돕는 것이었다(Operation Clean Sweep (2024)). 이는 PLASTICS가 유통과 생산 등 플라스틱 생산과 관련된 기업들의 협의체이기 때문에 생산 감소보다는 플라스틱을 포함한 완제품으로부터 발생하는 비의도적인 폐기물 저감에 초점을 맞춘 프로그램이다.

두 번째로, 미세플라스틱을 대체하기 위한 노력이 진행되었다. 다양한 미세플라스틱 중에 가장 먼저 마이크로비즈에 대한 정부차원의 규제와 산업계의 저감 노력이 진행되었기 때문에, 제품 내 의도적으로 미세플라스틱의 사용을 대체하기 위한 노력 또한 마이크로비즈 분야에서 제일 먼저 시행되었다. Burt's Bee나 St. Ives 등의 자연주의 브랜드는 자연에서 유래된 성분인 코코아 껍질과 살구 씨앗 등을 포함한 제품을 판매한다(CBC (2013)). 따라서 화장품업계에서의 미세플라스틱 대체 노력은 신규 물질을 개발하기 위한 노력보다는 경제적으로 적용 가능한 대체물질 탐색 위주로 이루어지고 있다. 대부분의 화장품업계에서는 자연주의 제품을 강조하며 아몬드껍질, 호두껍데기,オート밀, 양귀비 씨, 호호바유 등 또는 셀룰로오스와 경석 등을 대체성분으로 개발 및 활용하고 있다.

또 다른 미세플라스틱 대체 노력의 예로 섬유업체의 미세섬유 대체 노력이 진행되었다. 산업계의 미세섬유 대체 노력은 마이크로비즈와는 다르게 큰 변화가 없는 분야이다. 미세섬유 발생의 주요인인 합성섬유의 경우는 소비자의 선택에 크게 좌지우지될 수 없는 필수인 경우가 대부분이다. 또한, 특수복이나 운동복 등 기능성 의복은 현실적으로 대체 불가능한 제품군이 존재한다. 이러한 이유로 현재 미세섬유의 대체가 가능한 경우는 면이나 마 등 자연에서 유래된 섬유로 대체하는 움직임이 주를 이룬다. 이외 대체 섬유 개발을 위한 연구도 진행 중이나, 대부분 연구 단계에 머물러 있다(Patagonia (2017)).

다른 기타 산업계에서는 2차 미세플라스틱의 원인인 플라스틱을 대체하기 위한 노력이 진행되었다. 일례로 Procter & Gamble (P&G)은 대체 용기로 만들어진 Fairy Ocean Plastic Bottle 제작을 시작했다(그림 22). 이 제품은 재활용된 플라스틱을 40% 포함하는 방식으로 현재 제품으로 판매 중인 세정제나 섬유유연제 같은 플라스틱 용기를 대체하여 자사 제품의 용기로 사용하고자 만들어진 제품이다.

그림 22. P&G의 Fairy Ocean Plastic Bottle 홍보 포스터



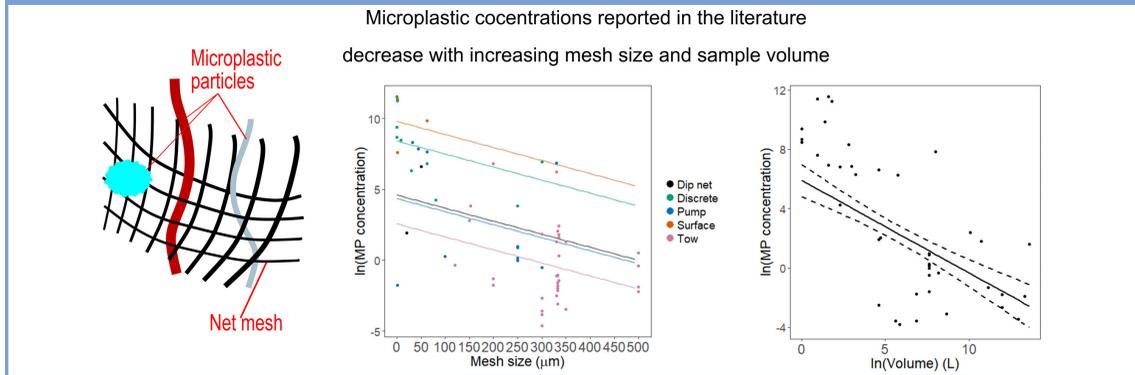
\* 출처: 한국환경정책평가연구원 (2018)

## 2. 미세플라스틱 분석기술

### 2.1. 미세플라스틱 채취방법

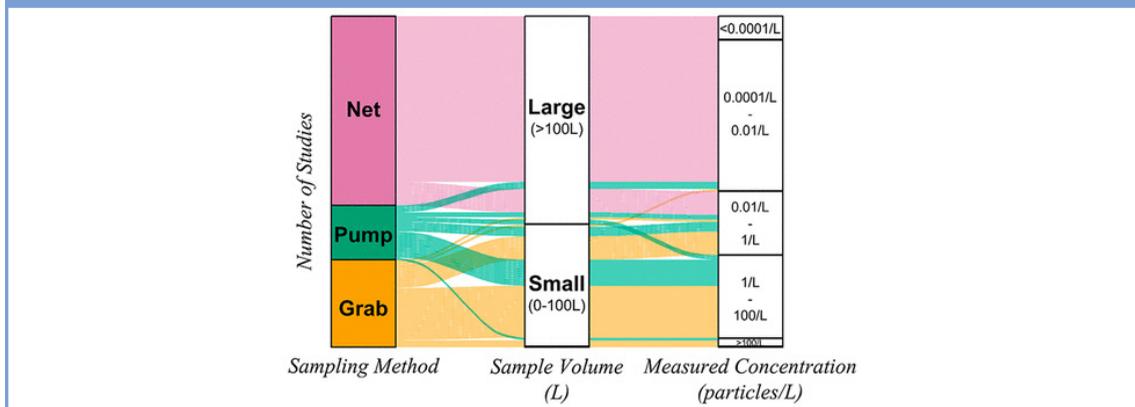
미세플라스틱 농도 분석을 위해서는 다음의 내용이 확인되어야 한다. 시료 분석을 위한 시료 채취 방법이 결과에 영향을 줄 수 있다. 일반적으로 하천 등에서의 시료채취를 위해서는 일정 수량이 그물을 통과하게 하여 시료가 확보되도록 한다(Net method). 이 경우, 미세한 그물망에 적정 크기의 미세플라스틱이 포집될 수 있도록 균일한 입경을 가진 것을 활용하고 있다. 또 다른 방법으로는 채수통을 이용할 수 있다(Grab method). 일정시간 흐름 상태의 하천에서 특정 유량을 흘려 보내면서 채취하는 방법과는 달리 짧은 시간에 매우 작은 크기를 갖는 초미세플라스틱까지 한번에 채취할 수 있다는 장점을 갖는다. 특히, 이 방법은 시료의 보관과 분석을 위한 운반에 매우 용이하다(Watkins et al. (2021)). 한편, 미세플라스틱 농도 분석을 원하는 수원(水源)에 배관 및 펌프를 배치하여 시료를 채수할 수 있다(Pump method). 이러한 다양한 시료채취에 따라 미세플라스틱의 농도에 영향을 줄 수 있음에 대한 결과도 보고된 바 있다(KONETIC (2022)). 즉, 현재 분석방법으로는 시료채취 방법에 의한 미세플라스틱 분석 결과 차이가 상당히 크게 나타날 수 있음을 인지해야 하며, 이를 최소화할 수 있는 연구도 진행이 필요한 상황이다(Covernton et al. (2019); Lisa et al. (2021))(그림 23, 24).

그림 23. 채취 그물망의 그물코 크기 및 채수량에 따른 미세플라스틱 농도 변화 분석 결과



\* 출처: Covernton et al. (2019)

그림 24. 채취 방법에 따른 확보 가능한 시료량과 미세플라스틱 크기 분포



\* 출처: Lisa et al. (2021)

## 2.2. 미세플라스틱 분석방법

미세플라스틱 분석은 총 4가지 공정을 거쳐 이루어진다. 대상 수계로부터 (1)시료를 채수한 후 (2)액상으로부터 미세플라스틱을 추출/분리하고, (3)기기를 통한 정성/정량 분석 및 (4)분류 과정을 통해 분석이 마무리 된다(Mai et al. (2018); Elkhatib and Craver (2020)). 앞의 2-1의 다양한 방법을 통해 시료를 채수하여 확보한 후 분석을 위한 전처리 단계인 추출/분리 작업이 필요하다. 전처리의 첫 과정으로 시료 내 입자성 물질의 분리가 수행되어야 한다. 이 방법은 물질의 비중 차이를 활용하여 적정 밀도를 갖는 용액을 이용하여 플라스틱과 여타 물질을 중력 분리 기법으로 걸러내게 된다. 기반 플라스틱 성상에 따라 적용될 수 있는 용액의 종류의 적용 가능성은 아래 표에 정리하였다(표 1). 일부 플라스틱은 특정 용액에서 분리 가능 수준(±)이므로 반복적 시험을 통해 분리 용액, 반응 시간, pH 영향 등을 고려하여 최적의 분리효율을 확인할 필요가 있다.

표 1 밀도 분리에 적용할 수 있는 용액별 미세플라스틱 종류

플라스틱 종류	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	물 (H <sub>2</sub> O)	염화나트륨 (NaCl)	요오드화 나트륨 (NaI)	브롬화 아연 (ZnBr <sub>2</sub> )
		1.0	1.2	1.6	1.7
Polypropylene	0.9-0.91	◎	◎	◎	◎
Polyethylene	0.92-0.97	◎	◎	◎	◎
Polyamide	1.02-1.05	×	◎	◎	◎
Polystyrene	1.04-1.1	×	◎	◎	◎
Acrylic	1.09-1.20	×	◎	◎	◎
Poly methyl acrylate	1.17-1.20	×	◎	◎	◎
Polyurethane	1.2	×	◎	◎	◎
Polyvinylchloride	1.16-1.58	×	△	◎	◎
Polyvinyl alcohol	1.19-1.31	×	△	◎	◎
Alkyd	1.24-2.10	×	×	◎	◎
Polyester	1.24-2.3	×	×	◎	◎
Polyethylene terephthalate	1.37-1.45	×	×	◎	◎
Polyoxymethylene	1.41-1.61	×	×	△	◎

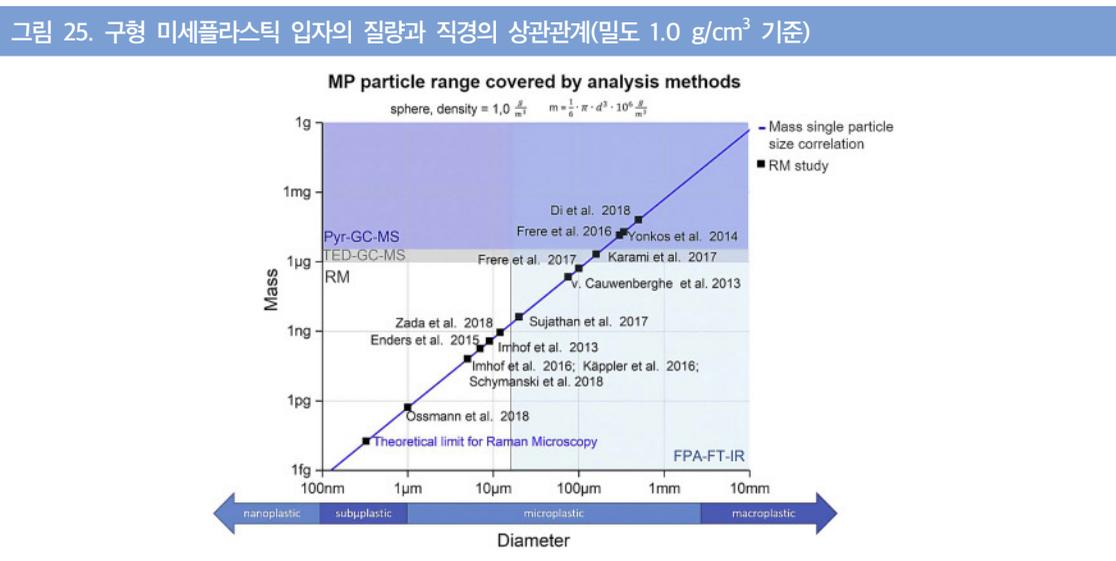
◎: 분리; △: 분리가능; ×: 분리불가

\* 출처: Prata et al. (2019)

시료 내 입자성 무기물과 분리한 뒤 각각의 플라스틱 표면에 부착되어 있는 유/무기 오염물질을 제거해야 한다. 플라스틱 표면의 오염물로 인해 분석 결과에 영향을 최소화하기 위한 과정이 필요한 것이다. 표면 유기물 제거를 위해 사용되는 기법으로는 산/알칼리 약품처리, 산화제, 효소 적용 등이 있다(Dubaish and Liebezeit (2013)). 첫 번째 산/알칼리 약품처리의 경우, 일반적으로 어류 내장 및 토양 내 존재하는 미세플라스틱 분석에 있어 전처리

기법으로 활용된다. 특정 산/알칼리 용액을 적정 농도와 반응 온도에 맞춰 유기물을 효과적으로 제거할 수 있다. 그러나, 알칼리 용액의 경우에는 일부 플라스틱이 분해될 가능성이 있으므로 보다 면밀히 조사한 후 적용할 필요가 있다(Alexandre et al. (2016)). 두 번째 산화제를 적용할 때는 필요한 산화제 종류와 반응 시간, 적정 용량 등의 최적화도 진행해야 보다 정밀한 미세플라스틱 분석 결과를 확보할 수 있다. 일반적으로 널리 사용되는 산화제는 과산화수소이며, 분석하고자 하는 플라스틱에 대한 손상이 거의 없다는 장점이 있다(김성렬 외(2022)). 다음으로는 효소를 활용한 유기물 분해 방법이 있다. 이는 유기물 분해 과정에서 독성이 발생하지 않는다는 장점이 있으나, 플라스틱 표면에 부착되어 있는 유기물의 종류에 따라 효소와의 반응이 낮을 가능성이 있기 때문에 해당 공정에 대한 추가적인 전처리로 산화제를 사용하기도 한다(Eliska et al. (2017)).

미세플라스틱 분석은 어떠한 종류인지, 그리고 그 양이 어느 정도 되는지에 대해 두 가지를 선별적으로 진행되어야 한다. 지금까지는 기준이 되는 분석 방법이 확립되지 않아 다양한 기법들을 시도해가며, 이를 표준화하기 위한 노력이 수행되고 있는 상황이다. 미세플라스틱에 대한 정량적인 분석 방법으로는 광학현미경을 이용하여 미세입자를 개수하는 것이 기본적인 방법이지만, 일부 여과 과정을 배제한 시료에 대해서는 전체 부피를 반영하여 미세플라스틱의 양을 표현하기도 한다(NOAA (2017)). 특히, 미세플라스틱 크기가 5 $\mu\text{m}$  이하에서는 시료당 개수를 기준으로 분석하는 반면, 그 이상의 크기에서는 전체 질량을 기반으로 한 분석이 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 이에 미세플라스틱의 크기에 따라 가장 효율적인 분석방법들을 제시하고 있는 연구들이 발표되고 있다(그림 25).

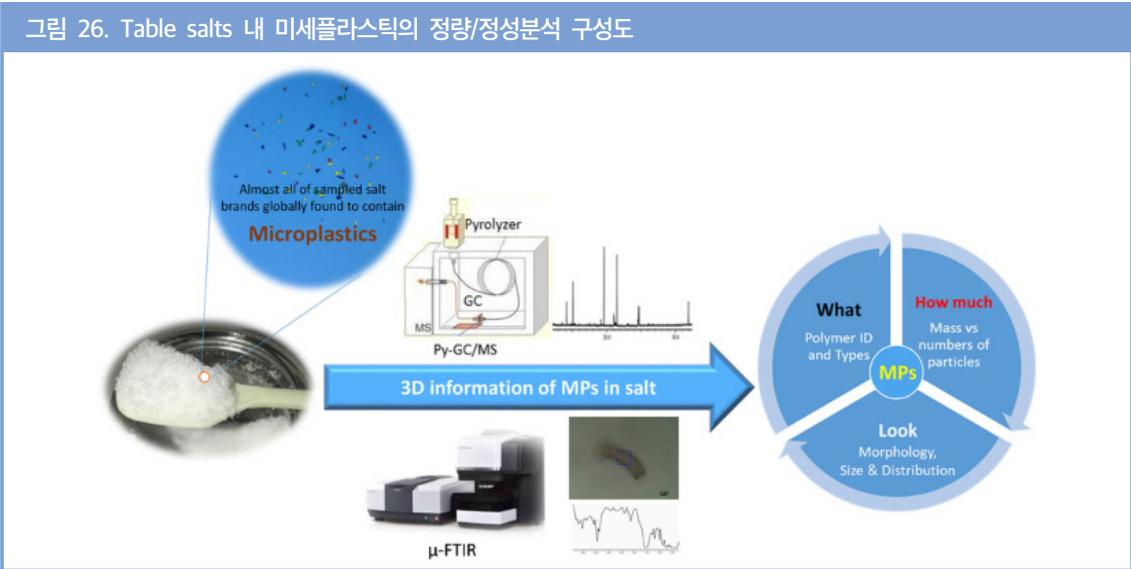


\* 출처: Anger et al. (2018)

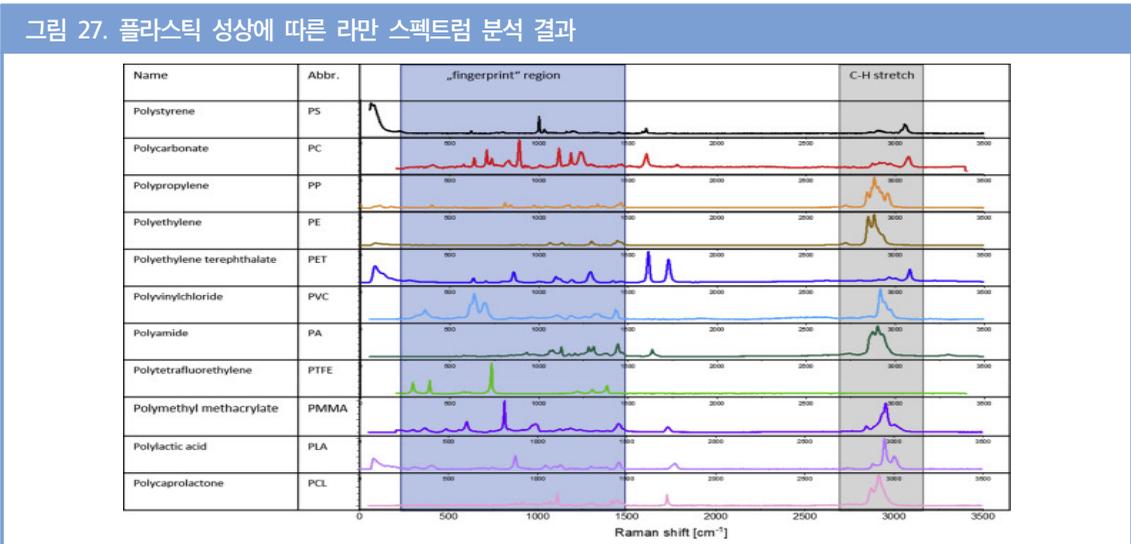
고가의 분석용 장비와 기기 운용자에 대한 고도의 숙련도가 요구되는 Py-GC/MS, TGA-GC/MS 활용한 열분석법(Pico and Barcelo(2020); Majewsky et al. (2016))(그림 26)은 미세플라스틱을 열분해하여 생성된

부산물을 측정하여 시료 내 존재하는 플라스틱 개수를 확인할 수 있다. 이 방법은 미세플라스틱의 양과 그 성상을 함께 측정할 수 있다는 장점을 갖고 있으나, 시료에 대한 전처리가 적절히 진행되지 않을 경우에는 오차가 발생할 수 있다는 점도 유의할 필요가 있다(Nasa et al. (2020)).

정성분석법으로는 비파괴 분광분석을 위해 Raman 분광법(그림 27)과 Fourier 변환 적외선 분광법(FT-IR)이 가장 널리 적용되고 있다. 미세플라스틱을 구성하는 원자들 사이의 화학적 결합의 길이에 의해 결정되는 고유의 진동수를 이용하여 시료의 손상 없이 정성분석이 가능한 기법들이다(Mallow et al. (2020)).



\* 출처: Haiyan et al. (2022)

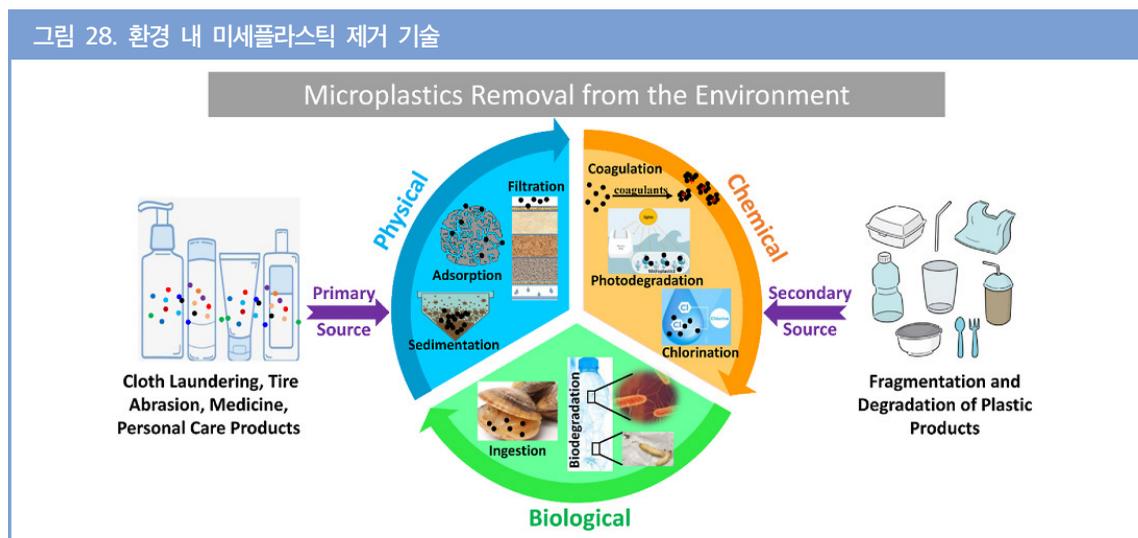


\* 출처: Anger et al. (2018)

미세플라스틱의 정밀한 분석을 위한 다양한 노력이 진행되고 있으나, 샘플 채취에서부터 분석 전처리 단계에 이르는 모든 구간에서 추가적인 미세플라스틱의 증가, 즉, 시료에 대한 오염이 부가로 진행될 가능성이 존재하고 있다. 예를 들면, 채취 단계에서 사용되는 그물 파편이나 시료 채수용 용기, 분석을 위해 보관하는 초자기구, 심지어는 오염 방지를 위해 착용하는 라텍스 글러브에 이르기까지 분석 결과에 영향을 주는 다양한 요인들이 존재(Witzig et al. (2020))하기 때문에 이를 제어하기 위한 기술들도 함께 개발되어야 보다 정확한 미세플라스틱 연구가 가능해질 것이다.

### 3. 미세플라스틱 제거 기술 현황

미세플라스틱을 제거하기 위해 연구되고 있는 다양한 기술들은 일반 수질 정화 기술에서와 같이 물리/화학/생물학적 기법들로 구분될 수 있다(그림 28).



\* 출처: Ahmed et al. (2022)

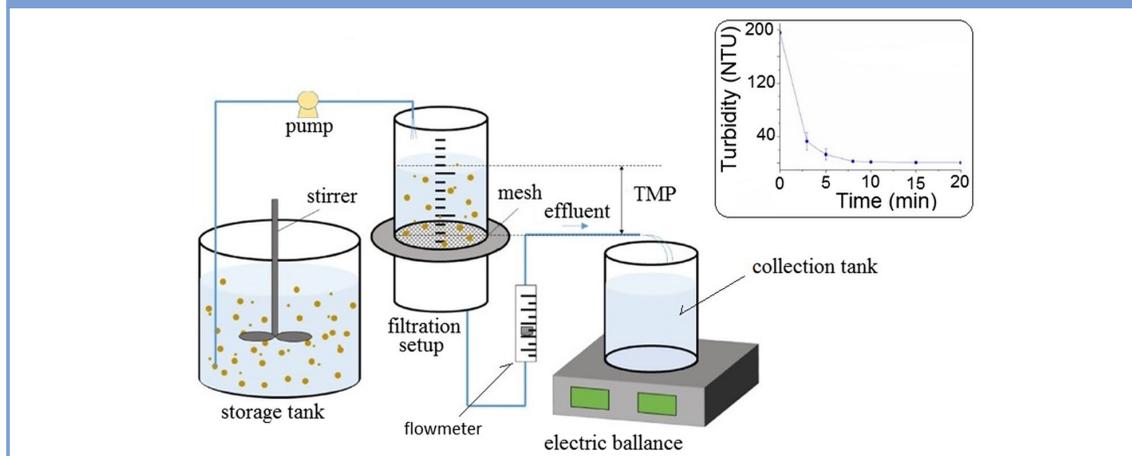
물리적 처리 기술은 대표적으로 여과와 흡착으로 구분될 수 있다. 기존 수처리 설비에 적용된 모래여과 및 한외여과 등은 제거 가능한 미세플라스틱 크기에 제한이 있어 적정 수준 이상의 처리 효율을 기대하기 어렵다. 이에 다양한 기능성 흡착, 여과 소재 개발이 활발하게 진행되고 있다(그림 29). 미세플라스틱이 갖는 표면 전하를 이용하여 반응성 높은 흡착소재 개발 및 기공 크기 제어와 표면 기능성 부어를 통해 미세플라스틱을 효과적으로 걸러낼 수 있는 여과 기술 등이 개발 중이다.

표 2 미세플라스틱 제거를 위한 물리적 처리 기술 연구 사례

미세플라스틱 종류	물리적 기법	제거효율(%)	상세 기술	참고문헌
PS	Adsorption	100	- Magnetic Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> -supported polyoxometalate ionic liquid phase composite; - PS concentration: 1g/L; Adsorbent: 10g/L	Misra et al. (2020)
PE, PET, PA	Adsorption	100	- Magnetic carbon nanotubes - Microplastics: 5g/L; Adsorbent: 5g/L	Tang et al. (2021)
Microplastics	Filtration	95	- Zirconium metal-organic framework-based foam materials - Microplastics: 0.001g/mL; Flow rate 1.2L/h	Chen et al. (2020)
Microplastics	Adsorption	94.5	- Green microalgae - High affinity of the cut surfaces to sorb tiny microplastic particles, selectivity based on microplastics surface charge	Zhang et al. (2017)
Microplastics	Ultrafiltration	37.1	- Pore size: 0.07 μm - Water treatment plant(Indonesia)	Marsano et al. (2022)
Microplastics	Ultrafiltration	78.2	- Material: PES/PVP blend; pore size: 0.1 μm - Wastewater treatment plant(Thailand)	Tadsuwan and Babel (2022)

PS: Polystyrene; PE: Polyethylene; PET: Polyethylene terephthalate; PA: Polyamide

그림 29. 미세플라스틱 제거를 위한 동적 멤브레인 실험 구성과 시간에 따른 탁도 감소 결과



\* 출처: Li et al. (2018)

화학적 처리 기술은 알루미늄이나 철을 기반으로 하는 수용성 응집제를 적용한 응집-침전 기법과 최근 연구 빈도가 증가하고 있는 광촉매를 이용한 미세플라스틱의 무기화 기술이 대표적이다. 응집제를 이용할 경우에는 제거 효율 증대를 위해 polyacrylamide와 같은 응집 보조제를 추가하기도 한다. 그러나, 응집-침전 기법은 미세플라스틱의 크기에 따라 그 효율의 차이가 극명하게 나뉘어지고 그 편차도 크기 때문에 적용 조건을 면밀히

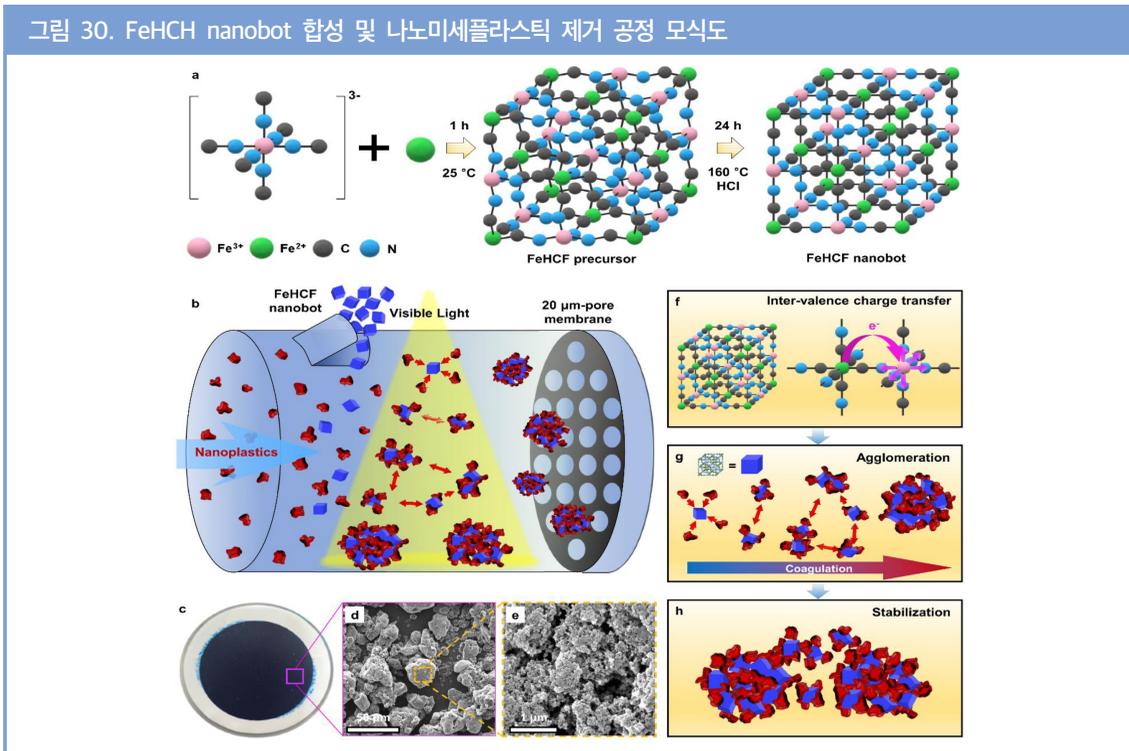
검토하여 기술 활용을 결정할 필요가 있다(KOSEN (2023)). 광촉매에 의한 미세플라스틱의 무기화의 경우, 광조사(irradiation)를 통해 야기된 전자, 산화물, 라디칼 등이 미세플라스틱의 결합구조를 끊어버리는 과정으로써 제거가 가능하다.

표 3 미세플라스틱 제거를 위한 화학적 처리 기술 연구 사례

미세플라스틱 종류	화학적 기법	제거효율(%)	상세 기술	참고문헌
PS	Coagulation/flocculation	98.2~99.4	- Ferric chloride and polyaluminum chloride - PS size: 1 $\mu$ m	Rajala et al. (2020)
PE	Coagulation	~90.9	- FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O combined with 3, 6, 9, 12, 15mg/L polyacrylamide at pH 7 - PE particles: 0.1g	Ma et al. (2019)
PE, PP	Agglomeration	PE: ~99.1 PP: ~99.0	- Alkyltrichlorosilane: 300 $\mu$ l (20min) - PE and PP: 100mg/L	Sturn et al. (2020)
PS	Photodegradation	91.04(WL)	- PS size: 400nm - UV-light 12h; 254nm; TiO <sub>2</sub>	Nabi et al. (2020)
PE	Photodegradation	76(WL)	- PE size: 100~150nm - Ag/TiO <sub>2</sub> ; UV irradiation 4h	Fadli et al. (2021)
PP	Photodegradation	>7(WL)	- PP size: 25mm - ZnO: 1g/L; UV-C irradiation 6h; 50°C	Razali et al. (2020)
LDPE	Photodegradation	90.8(WL)	- Solar irradiation; 240h - Au NPs: 1.0wt% Au/LDPE	Olajire and Mohammed (2021)
HDPE	Photodegradation	71.77(WL)	- LED with visible spectrum; 50h - C, N-TiO <sub>2</sub>	Ariza et al. (2020)
PAN	Chemical coagulation	99.9	- Visible-light-induced electron localization in the FeHCF nanobot lattice - FeHCF nanobots: 0.2g/L - Nanoplastics conc.: 100mg/L	Jung et al. (2023) <그림 30>

PP: Polypropylene; PAN: Polyacrylonitile  
LDPE: Low density polyethylene; HDPE: High density polyethylene  
WL: Degradation efficiency estimated by weight losing

그림 30. FeHCH nanobot 합성 및 나노미세플라스틱 제거 공정 모식도



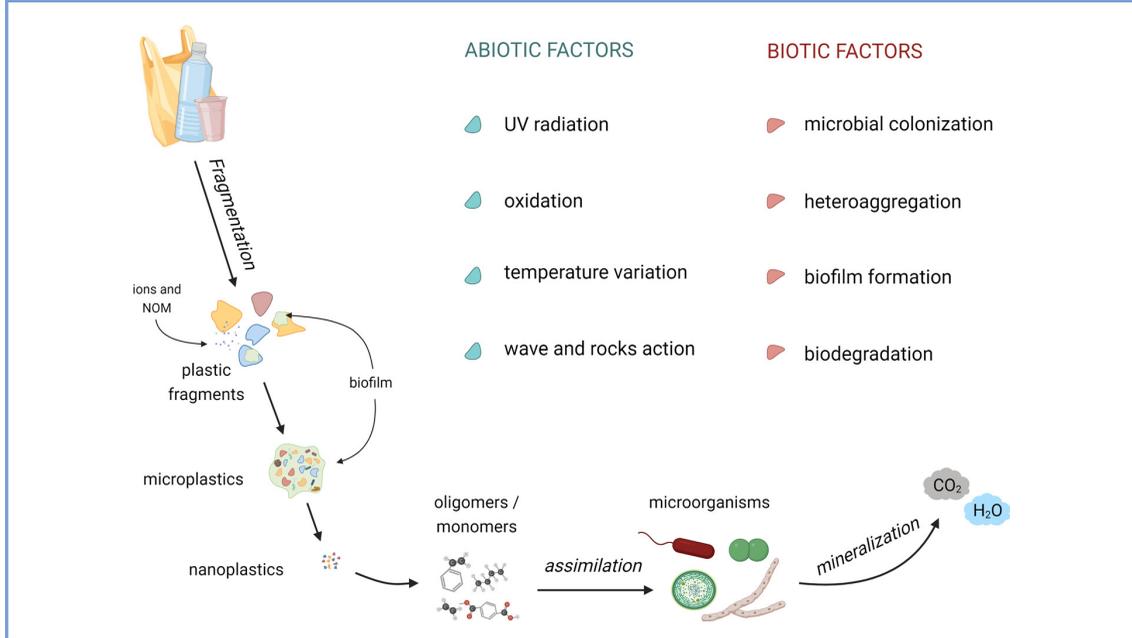
\* 출처: Jung et al. (2023)

생물학적 처리 기술은 미세플라스틱을 섭취하고 소화하는 것으로 알려진 일부 유충들을 발견하게 되면서 연구가 시작되었다. 흔히 애완 조류 및 설치류의 먹이로 사용하고 있는 밀웜(갈색거저리 애벌레)의 경우, polystyrene을 분해 가능한 효소를 위장에서 분비하여 소화시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 특성을 활용하여 소화 효소 및 분해 세균 등을 분리·배양하여 미세플라스틱 제거에 활용하고 있다(그림 31). 그러나, 그 효율이 물리, 화학적 처리 기술과 비교하여 매우 낮아 실제 처리에는 적용되고 있지 않은 실정이다.

표 4 미세플라스틱 제거를 위한 생물학적 처리 기술 연구 사례

미세플라스틱 종류	화학적 기법	제거효율(%)	상세 기술	참고문헌
Microplastics	Activated sludge	16.6	- Influent microplastics conc.: 47.4±7.0 n/L - Effluent microplastics conc.: 34.1±9.4 n/L	Liu et al. (2019)
Microplastics	Biodegradation	43.7	- Hyperthermophilic composting (200ton)	Chen et al. (2020)
PE, PET, PS	Biodegradation	3.0~6.2	- <i>Bacillus gottheilii</i> (growth in a synthetic medium) - Microplastics as the sole carbon source	Auta et al. (2017)
PE	Active ingestion	1.59±0.52	- 24 individuals of Red Sea giant clam - PE size: 53~500μm (12days)	Arossa et al. (2019)
PP	Biodegradation	~17.3	- <i>Pseudomonas</i> sp. ADL15 and <i>Rhodococcus</i> sp. ADL36 (from antarctic soil) - Incubation period: 40days	Habib et al. (2020)

그림 31. 비생물학적/생물학적 요인이 결합된 미세플라스틱 분해과정(잘게 부서진 미세플라스틱은 나노 크기의 더 작은 플라스틱 입자로 분해됨. 이렇게 생성된 나노플라스틱은 비생물학적 요인과 세외 효수에 의해 oligomer와 monomer로 분해된 후 미생물에 의해 탄소원으로 활용되어 mineralization 진행됨)



\* 출처: Anand et al. (2023)

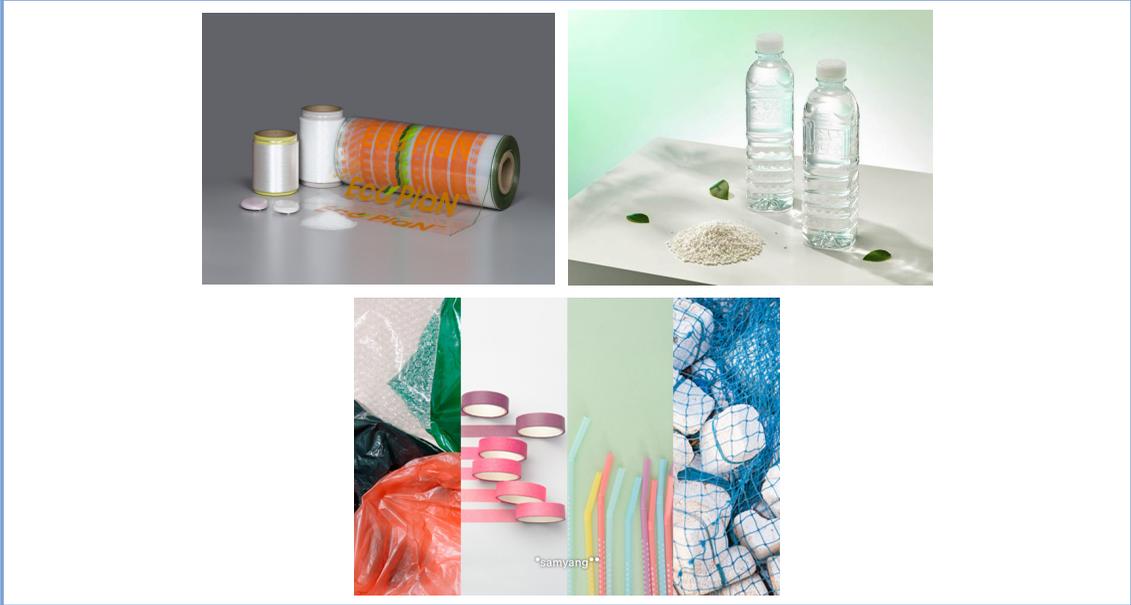
## IV. 국내외 미세플라스틱 관리 및 정책 동향

### 1. 국내 미세플라스틱 관리 동향

우리나라는 아직 실생활에서 발생하는 미세플라스틱을 제한하고자 하는 규제 정도의 관리를 진행 중이다. 실제 생태계에서 물리/화학/생물학적 풍화에 의해 발생하는 미세플라스틱에 대한 대책은 미비한 실정이다. 작년 6월에는 미세플라스틱 사용 및 배출의 규제와 저감/제어 관련 기술 촉진 등에 대한 대응안을 구축하기 위해 ‘미세플라스틱 저감 및 관리에 관한 특별법’이 국회에 발의된 바 있다. 해당 특별법은 세안제나 치약, 화장품 등을 위해 의도적으로 제조된 1차 미세플라스틱과 플라스틱 제품이 풍화되어 형성된 2차 미세플라스틱을 함유한 제품에 대한 판매의 제한과 이를 폐기 시, 미세플라스틱이 배출되지 않도록 하는 내용 등을 포함하고 있다. 이미 정부에서는 세탁세제, 표백제, 섬유유연제 등에 마이크로비즈(microbeads)의 사용을 금지한 바 있다. 그리고, 식약처에서는 ‘화장품 안전기준 등에 관한 규정’을 통해 화장품 생산에 사용되는 원료 물질 중 미세플라스틱을 이용할 수 없도록 규정하였다. 이와 관련하여 미세플라스틱이 함유된 의약외품의 수입과 판매도 금지한 상황이다(KEI 정책보고서(2018)).

또한, 보다 적극적인 미세플라스틱 발생 제한을 위한 생분해성 플라스틱 개발을 통해 기존 폐플라스틱의 처리와 미세플라스틱 유발에 대한 문제를 해결하고자 하는 노력도 진행 중이다. 국내에서는 SK chemical, 삼양사 등의 기업에서 생분해 가능한 플라스틱을 개발하여 이를 활용한 상용 제품을 생산하고 있다.

그림 32. 국내 생산 중인 재이용성 플라스틱(왼쪽 위: SK chemical ‘에코플란’이 적용된 생분해성 포장용 필름; 오른쪽 위: SK chemical ‘Chemical recycle CR-PET’; 아래: 삼양사 ‘PBIAT(Poly Butylene Isosorbide Adipate-co-Terephthalate)’를 이용한 생분해성 플라스틱 제품들)



\* 출처: van Wezel et al. (2015)

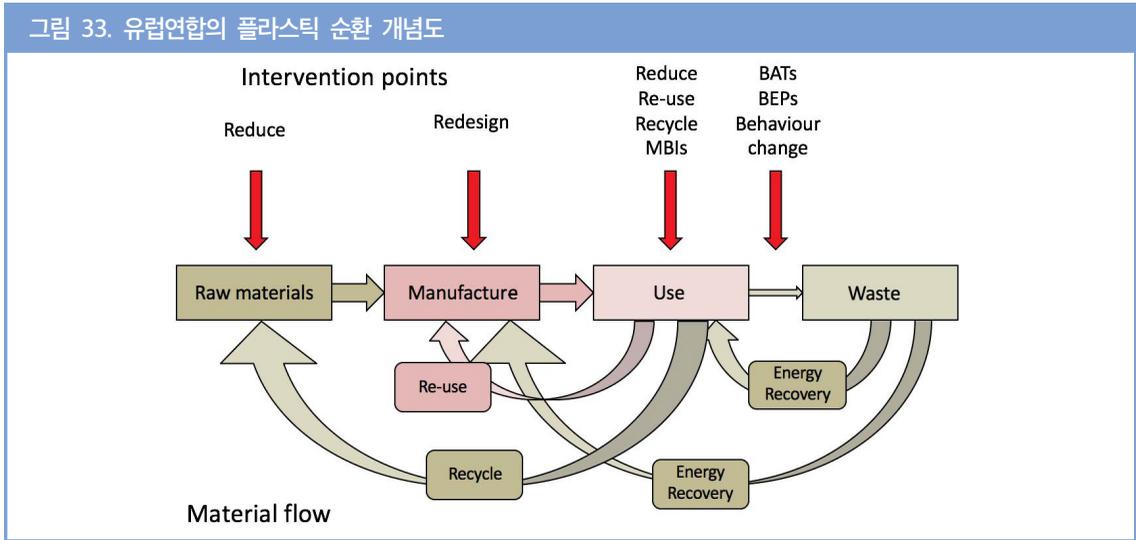
## 2. 국외 미세플라스틱 관리 및 탈플라스틱 정책 동향

각 국가별 미세플라스틱 관리 및 규제 동향은 아래와 같다.

### 2.1. EU(유럽연합)

유럽연합은 ‘Circular Economy Action Plan, 2020’등의 규제 정책을 제시하며, 생분해성 플라스틱 개발 및 이의 사용 독려를 위해 정책 framework를 개발하고 있다. 또한, 비닐 포장재와 일회용 플라스틱에 대한 사용 저감 및 판매금지 조치에 대한 시행령을 발표하였다. 플라스틱 포장재의 경우에는 재활용을 목표를 설정하여 생산자 책임제도를 도입하고자 하는 노력을 하고 있으며, 2023년 하반기에 접어들어 보다 강력한 미세플라스틱 사용 규제를 위해 화장품, 비료, 어린이용 놀이기구 의약품 등 생활용품의 사용되던 미세플라스틱을 단계적으로 제한하기로 발표한 바 있다. 특히, 플라스틱 발생량을 줄이기 위해 2021년부터 ‘플라스틱세’를 부과하고 있으며, 2040년까지 플라스틱 포장재를 100% 재활용 가능한 제품으로 변경하는 목표도 추진 중이다.

그림 33. 유럽연합의 플라스틱 순환 개념도

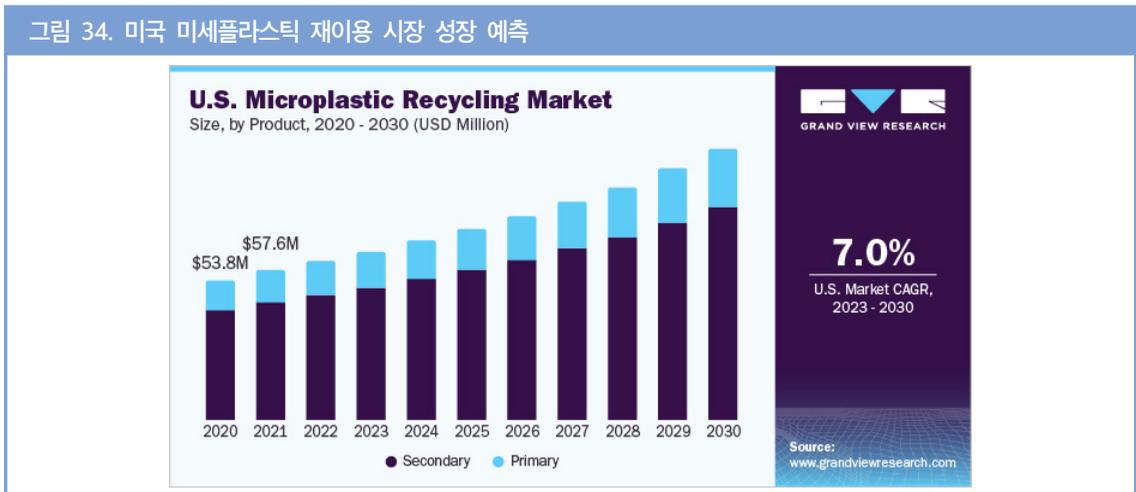


\* 출처: UNEP (2016)

## 2.2. 미국

미국은 많은 양의 폐플라스틱을 수출하고 있는 국가이며, 재활용 보다는 폐기하는 비율이 매우 높기 때문에 이미 2015년부터 주 정부별 1회용품 금지 조치를 강력하게 시행하고 있다. 뉴욕, 시애틀, 샌디에이고, 마이애미, 로스앤젤레스 등 100개가 넘는 도시에서 polystyrene 재질의 일회용 플라스틱 사용을 금지하고 있으며, 하와이를 비롯한 뉴욕, 오리건, 워싱턴 등 9개 주에서 1회용 포장용지에 대해 금지령을 운영하고 있는 중이다. 또한, extended producer responsibility (생산자 책임 재활용) 제도를 시행하여 23년부터 오리건, 콜로라도, 캘리포니아 등의 주에서 운영하고 있으며, 이를 확대하기 위해 법안을 검토 중인 것으로 알려져 있다(Trade Focus(2023)).

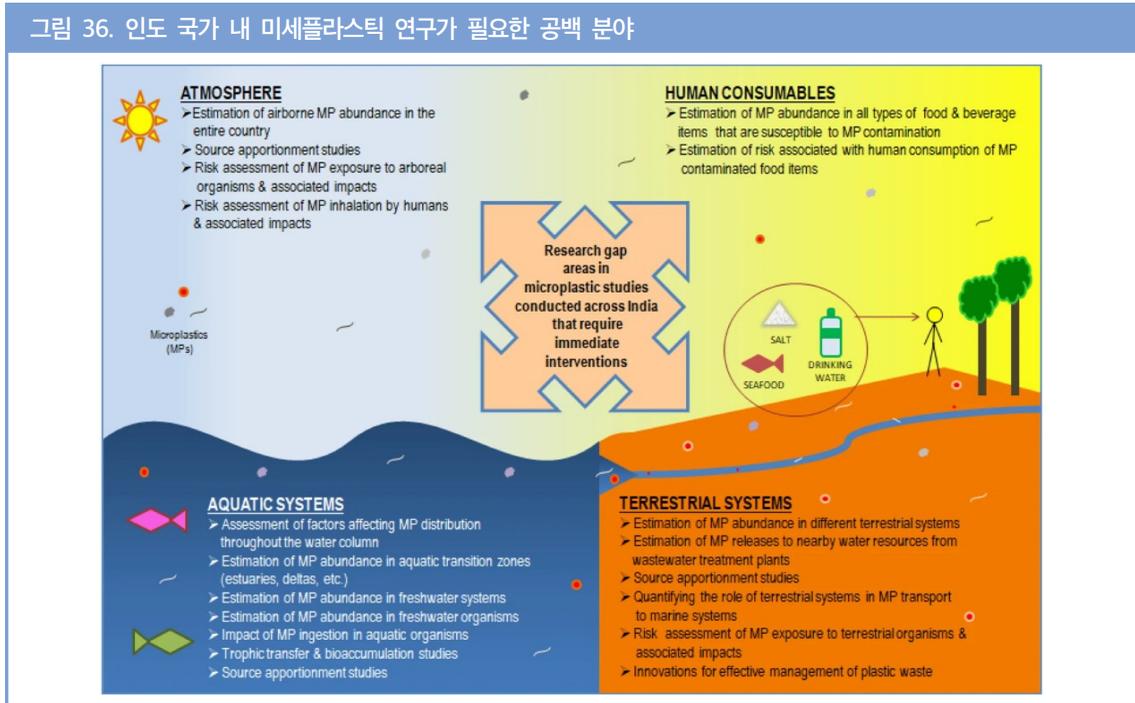
그림 34. 미국 미세플라스틱 재이용 시장 성장 예측



\* 출처: Market Analysis Report (2021)



그림 36. 인도 국가 내 미세플라스틱 연구가 필요한 공백 분야



\* 출처: Mansi et al. (2021)

## V. 결론

지금까지 개발된 플라스틱이 우리 생활에 있어 필수불가결한 원료로 사용되어 온 것은 부정할 수 없는 사실이다. 이를 활용함으로써 다양한 편의와 혜택을 누리왔으나, 쉽게 접할 수 있었던 만큼 너무나 자연스럽게 우리 주변에 축적되어 온 플라스틱 폐기물은 인간의 삶은 물론 범지구적 환경 생태계에도 나쁜 영향을 주기 시작하였다. 미세플라스틱에 대한 분석 표준화 및 처리/재이용 기술 개발도 중요하지만, 플라스틱 자체를 대체할 수 있는 친환경적 물질 개발이 절실한 시점이라 할 수 있다. 편의만을 생각하여 플라스틱 제품들을 무분별하게 사용하고 있던 국민들의 인식 변화가 있어야만 근본적인 해결안 도출이 가능하지 않을까 생각한다. 또한, 정부 및 산업계에서는 생산되는 플라스틱의 전주기적 순환을 검토하고, 이를 효과적으로 관리할 수 있는 대응 방안을 모색해야 한다.

저자소개 **최재우(Choi Jae-Woo)**

• 학력

고려대학교 환경 및 응용지질 이학박사  
고려대학교 환경 및 응용지질 이학석사  
고려대학교 지구환경과학 이학사

• 경력

現) 한국연구재단 국책연구본부 전문위원  
現) Springer Nature 계열 저널 Water Air and Soil Pollution Editorial board  
現) 과학기술연합대학원대학교 에너지-환경융합학과 정교수  
前) 한국과학기술연구원 물자원순환연구단 Star Post Doc.  
前) 서울대학교 지역시스템공학부 Post Doc.

저자소개 **정영균(Jung Youngkyun)**

• 학력

국가연구소대학교 에너지-환경융합 (환경공학전공) 공학박사  
상명대학교 공업화학 공학사

• 경력

現) 대한환경공학회 부위원장  
現) 한국과학기술연구원(연구재단) Post-Doc.  
前) 한국과학기술연구원 Post-Doc Fellowship

## 참고문헌

### 〈국내문헌〉

- 1) 그린피스. (2016). [공동성명서] 대한민국 정부, 화장품, 생활용품 속 미세플라스틱 규제하라!
- 2) 그린피스. (2021). 플라스틱 집콕조사 일회용의 민낯. 플라스틱 배출 기업 조사보고서.
- 3) 김성렬, 길경익. (2022). 전처리 방법에 따른 하수처리장 유입수에서의 미세플라스틱 성상분석 평가. *Journal of Wetlands Research*. Vol. 24, No. 2, 83-92.
- 4) 문철환. (2022). 시료채취 방법이 미세플라스틱 분석 농도에 미치는 영향. KONETIC 국내외 IP 동향 보고서.
- 5) 문철환. (2023). 환경에 존재하는 미세플라스틱의 처리. KOSEN Report.
- 6) 박정규, 서양원, 조지혜, 정다운, 간순영. (2018). 미세플라스틱 관리 동향 및 정책 제언. KEI 정책보고서.
- 7) 이혜성, 김용진. (2017). 우리나라 미세플라스틱의 발생잠재량 추정 - 1차 배출원 중심으로 -. *J. Korean Soc. Oceanogr.* Vol. 22, No. 3.
- 8) 장현숙, 황준석. (2023). 순환경제 탈(脫)플라스틱 시대, 국제 동향과 대응전략. *Trade Focus*, 국제무역통상연구원.
- 9) 충남대학교. (2019). 순환경제로의 전환을 위한 플라스틱 관리전략 연구. 연구보고서.
- 10) 한국환경산업기술원. (2018). 국내외 플라스틱 폐기물 문제 현황 및 해결방안.
- 11) 한국환경정책평가연구원. (2018). 미세플라스틱 관리 동향 및 정책 제언. KEI정책보고서.
- 12) 한국환경정책평가연구원. (2019). 미세플라스틱의 건강 피해 저감 연구.

### 〈국외문헌〉

- 1) Ahmed, R., Hamid, A. K., Krebsbach, S. A., He, J., Wang, D. (2022). Critical review of microplastics removal from the environment, *Chemosphere*, 293, 133557.
- 2) Alexandre, D., Anne-Laure, C., Laura, F., Ludovic, H., Charlotte, H., Emmanuel, R., Gilles, R., Christophe, L., Philippe, S., Arnaud, H., Guillaume, D., Ika, P. P., (2016). Microplastics in seafood benchmark protocol for their extraction and characterization, *Environ. Pollut.*, 215, 223-233.
- 3) Anand, U., Dey, S., Bontempi, E., Ducoli, S., Vethaak, A. D., Dey, A., Federici, S. (2023). Biotechnological methods to remove microplastics: a review, *Environ. Chem. Lett.*, 21, 1787-1810.
- 4) Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment, *Mar. Pollut. Bull.*, 62(8), 1596-1605.

## 참고문헌

- 5) Anger, P. M., von der Esch, E., Baumann, T., Elsner, M., Niessner, R., Ivleva, N. P. (2018). Raman microspectroscopy as a tool for microplastic particle analysis, *Trends Anal. Chem.*, 109, 214–226.
- 6) Ariza-Tarazona, M. C., Villarreal-Chiu, J. F., Hernandez-Lopez, J. M., De la Rosa, J. R., Barbieri, V., Siligardi, C., Cedillo-Gonzalez, E. I. (2020). Microplastic pollution reduction by a carbon and nitrogen-doped TiO<sub>2</sub>: effect of pH and temperature in the photo-catalytic degradation process, *J. Hazard Mater.*, 395, 122632.
- 7) Arossa, S., Martin, C., Rossbach, S., Duarte, C. M. (2019). Microplastic removal by Red Sea giant clam (*Tridacna maxima*), *Environ. Pollut.* 252, 1257–1266.
- 8) Auta, H. S., Emenike, C. U., Fauziah, S. H. (2017). Screening of *Bacillus* strains isolated from mangrove ecosystems in Peninsular Malaysia for microplastic degradation, *Environ. Pollut.* 231, 1552–1559.
- 9) Barboza, L. G. A., Vethaak, A. D., Lavorante, B. R.B.O., Lundebye, A. K., Guilhermino, L. (2018). Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health, *Mar. Pollut. Bul.*, 133, 336–348.
- 10) BBC News (2018), Indonesian study into health risks of microplastics, <https://www.bbc.com/news/health-46844444>
- 11) Beyond Plastic. (2021). The New Coal: Plastics and Climate Change. Available at: <https://www.beyondplastics.org/plastics-and-climate>. Accessed (13 Feb 2023)
- 12) Bouwmeester, H., Hollman, P. C., Peters, R. J. (2015). Potential health impact of environmentally released micro- and nanoplastics in the human food production chain: Experiences from nanotoxicology, *Environ. Sci. Technol.*, 49(15), 8932–8947.
- 13) Browne, M. A., Niven, S. J., Galloway, T. S., Rowland, S. J., Thompson, R. C. (2013). Microplastic moves pollutants and additives to worms, reducing functions linked to health and biodiversity, *Curr. Biol.*, 23(23), 2388–2392.
- 14) CBC. (2013). Facial scrubs polluting Great Lakes with plastic, <http://www.cbc.ca/news/canada/thunder-bay/facial-scrubs-polluting-great-lakes-with-plastic-1.1327850>
- 15) Chen, Y. J., Chen, Y., Miao, C., Wang, Y. R., Gao, G. K., Yang, R. X., Zhu, H. J., Wang, J. H., Li, S. L., Lan, Y. Q. (2020). Metal-organic framework-based foams for efficient microplastics removal, *J. Mater. Chem.* 8 (29), 14644–14652.
- 16) Chen, Z., Zhao, W., Xing, R., Xie, S., Yang, X., Cui, P., Lü, J., Liao, H., Yu, Z., Wang, S., Zhou, S. (2020). Enhanced in situ biodegradation of microplastics in sewage sludge using hyperthermophilic composting technology, *J. Hazard Mater.* 384, 121271.

## 참고문헌

- 17) Cole, M. Lindeque, P., Fileman, E., Halsband, C. Goodhead, R., Moger, J. Galloway, T. S. (2013). Microplastic ingestion by zooplankton, *Environ. Sci. Technol.*, 47(12), 6646–6655.
- 18) Cole, M. Lindeque, P., Fileman, E., Halsband, C., Galloway, T. S. (2015). The impact of polystyrene microplastics on feeding, function and fecundity in the marine copepod *Calanus helgolandicus*, *Environ. Sci. Technol.*, 49(2), 1130–1137.
- 19) [com/news/science-environment-43913597](https://www.com/news/science-environment-43913597)
- 20) Covernton, G. A., Pearce, C. M., Gurney-Smith, H. J., Chastain, S. G., Ross, P. S., Dower, J. F., Dudas, S. E. (2019). Size and shape matter: A preliminary analysis of microplastic sampling technique in seawater studies with implications for ecological risk assessment, *Sci. Total Environ.*, 667(1), 124–132.
- 21) Dubaish, F., Liebezeit, G. (2013). Suspended microplastics and black carbon particles in the Jade system, southern North sea, *Water Air Soil Pollut.*, 224, 1352.
- 22) Elika, M. C., Marie, N., Esther, A. G., Peter, S. R. (2017). A novel density-independent and FTIR-compatible approach for the rapid extraction of microplastics from aquatic sediments, *Anal. Methods*, 9(9), 1419–1428.
- 23) Elkhatib D., Craver, V. O., (2020). A Critical Review of Extraction and Identification Methods of Microplastics in Wastewater and Drinking Water, *Environ. Sci. Technol.*, 54, 7037–7049.
- 24) EURATEX Cross Industry Agreement Press Release. (2018). Industry unites in the fight against microplastic release from the washing of synthetic textiles.
- 25) European Parliament (2018). Single-use plastics and fishing gear: Reducing marine litter.
- 26) Fadli, M. H., Ibadurrohman, M., Slamet, S. (2021). Microplastic Pollutant Degradation in Water Using Modified TiO<sub>2</sub> Photocatalyst under UV-Irradiation. In *Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Tangerang, Indonesia, IOP Publishing Ltd.: Bristol, UK, Volume 1011.
- 27) Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.*, 3(7).
- 28) Habib S., Iruthayam A., Abd Shukor M. Y., Alias S. A., Smykla J., Yasid N. A. (2020). Biodeterioration of untreated polypropylene microplastic particles by antarctic bacteria, *Polymers* 12(11), 2616.

## 참고문헌

- 29) Hämer, J., Gutow, L., Köhler, L., Saborowski, R. (2014). Fate of microplastics in the marine isopod *Idotea emarginata*, *Environ. Sci. Technol.*, 48(22), 13451–13458
- 30) Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771.
- 31) Jung, Y., Yoon, S. J., Byun, J., Jung, K. W., Choi, J. W. (2023). Visible-light-induced self-propelled nanobots against nanoplastics, *Water Res.*, 244, 120543.
- 32) Kaposi, K. L., Mos, B., Kelaher, B. P., Dworjanyn, S. A. (2014). Ingestion of microplastic has limited impact on a marine larva, *Environ. Sci. Technol.*, 48(3), 1638–1645.
- 33) Kühn, S., Rebolledo, E. L. B., Franeker, J. A. V. (2015). Deleterious effects of litter on marine life. *Marine Anthropogenic Litter*, 75–116.
- 34) Lee, K. W., Shim, W. J., Kwon, O. Y., Kang, J. H. (2013). Size-dependent effects of micro polystyrene particles in the marine copepod *Tigriopus japonicus*, *Environ. Sci. Technol.*, 47(19), 11278–11283.
- 35) Li L, Xu G, Yu H, Xing J. (2018). Dynamic membrane for microparticle removal in wastewater treatment: performance and influencing factors, *Sci. Total Environ.*, 627, 332–340.
- 36) Li, H., Wu, Q., Ng, J., Yu, D., Chan, S. H., Li, A. (2022). Identification and quantification of common microplastics in table salts by a multi-technique-based analytical method, *Anal. Bioanal. Chem.*, 414, 6647–6656.
- 37) Liu, X., Yuan, W., Di, M., Li, Z., Wang, J. (2019). Transfer and fate of microplastics during the conventional activated sludge process in one wastewater treatment plant of China, *Chem. Eng. J.* 362, 176–182.
- 38) Lu, Y. Zhang, Y., Deng, Y., Jiang, W., Zhao, Y., Geng, J., Ding, L., Ren, H. (2016). Uptake and accumulation of polystyrene microplastics in zebrafish (*Danio rerio*) and toxic effects in liver, *Environ. Sci. Technol.*, 50(7), 4054–4060.
- 39) Ma, B., Xue, W., Ding, Y., Hu, C., Liu, H., Qu, J. (2019). Removal characteristics of microplastics by Fe-based coagulants during drinking water treatment, *J. Environ. Sci.* 78, 267–275.
- 40) Mai, L., Bao, L. J., Shi, L., Wong, C. S., Zeng, E. Y. (2018). A review of methods for measuring microplastics in aquatic environments, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 25, 11319–11332.

## 참고문헌

- 41) Majewsky, M., Bitter, H., Eiche, E., Horn, H. (2016). Determination of microplastic polyethylene (PE) and polypropylene (PP) in environmental samples using thermal analysis (TGA–DSC), *Sci. Total Environ.*, 568, 507–511.
- 42) Mallow, O, Spcek, S, Schwarzbock, T, Fellner, J, (2020). A new thermoanalytical method for the quantification of microplastics in industrial wastewater, *Environ. Pollut.*, 259, 113862.
- 43) Marsano, B. D., Yuniarto, A., Purnomo, A., Soedjono, E. S. (2022). Comparison performances of microfiltration and rapid sand filter operated in water treatment plant, *OIP Conference Series: Earth Environ. Sci.* 1111, 012048.
- 44) –microfiber–pollution.html.
- 45) Misra, A., Zambrzycki, C., Kloker, G., Kotyrba, A., Anjass, M. H., Franco Castillo, I., Mitchell, S. G., Güttel, R., Streb, C. (2020). Water purification and microplastics removal using magnetic polyoxometalate–supported ionic liquid phases (magPOM–SILPs), *Angew. Chem. Int. Ed.* 59 (4), 1601–1605.
- 46) Nabi, I., Bacha, A. U. R., Li, K., Cheng, H., Wang, T., Liu, Y., Ajmal, S., Yang, Y., Feng, Y., Zhang, L. (2020). Complete Photocatalytic Mineralization of Microplastic on TiO<sub>2</sub> Nanoparticle Film, *iScience*, 23, 101326.
- 47) Nasa, J. L, Biale, G, Fabbri, D, Modugno, F, (2020). A review on challenges and developments of analytical pyrolysis and other thermonalytical techniques for the quali–quantitative determination of microplastics, *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 149, 104841.
- 48) National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) U.S. Department of Commerce (2017). Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments.
- 49) OECD. (2022). Global plastics outlook policy scenarios to 2060. Available at: [https://www.oecd-ilibrary.org/sites/aa1edf33-en/1/3/1/index.html?itemId=/content/publication/aa1edf33-en&csp\\_=ca738cf5d4f327be3b6fec4af9ce5d12&itemlGO=oecd&itemContentType=book](https://www.oecd-ilibrary.org/sites/aa1edf33-en/1/3/1/index.html?itemId=/content/publication/aa1edf33-en&csp_=ca738cf5d4f327be3b6fec4af9ce5d12&itemlGO=oecd&itemContentType=book). Accessed (13 Feb 2023).
- 50) Olajire, A. A., Mohammed, A. A. (2021). Bio–Directed Synthesis of Gold Nanoparticles Using Ananas Comosus Aqueous Leaf Extract and Their Photocatalytic Activity for LDPE Degradation, *Adv. Powder Technol.*, 32, 600–610.
- 51) Operation Clean Sweep 누리집, About the Plastics Industry Association (PLASTICS), <https://opcleansweep.org/about/about-plastics/>

## 참고문헌

- 52) Patagonia, An Update on Microfiber Pollution, <https://www.patagonia.com/blog/2017/02/an-update-on-microfiber-pollution/>
- 53) Patagonia, Synthetic Microfiber Pollution, <https://www.patagonia.com/synthetic>
- 54) Peter McBride/Patagonia, What You Can Do About Microfiber Pollution, <https://www.patagonia.com/blog/2017/06/what-you-can-do-about-microfiber-pollution/>
- 55) Picó Y., Barceló, D. (2020). Pyrolysis gas chromatography–mass spectrometry in environmental analysis: Focus on organic matter and microplastics, *Trends Anal. Chem.*, 130, 115964.
- 56) Plastics Europe (2016). *Plastics – The facts 2017. An analysis of European plastics production, demand and waste data*
- 57) Prata, J. C., da Costa, J. P., Duarte, A. C., Santos, T. R. (2019). Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review, *Trends Anal. Chem.*, 110, 150–159.
- 58) Rajala, K., Grönfors, O., Hesampour, M., Mikola, A. (2020). Removal of microplastics from secondary wastewater treatment plant effluent by coagulation/flocculation with iron, aluminum and polyamine–based chemicals, *Water Res.* 183, 116045.
- 59) Razali, N. A., Abdullah, W. R. W., Zikir, N. M. (2020). Effect of thermo–photocatalytic process using zinc oxide on degradation of macro/micro–plastic in aqueous environment, *J. Sustain. Sci. Manag.*, 15, 1–14.
- 60) Scherer, C., Weber, A., Lambert, S., Wagner, M. (2017). Interactions of microplastics with freshwater biota, Wagner, M., Lambert, S. Eds., *Freshwater Microplastics*, Springer.
- 61) Scheurer, M., Bigalke, M. (2018). Microplastics in swiss floodplain soil, *Environ. Sci. Technol.*, 52(6), 3591–3598.
- 62) Science advice for policy by european academies: SAPEA (2019). *Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society*.
- 63) Sturm, M. T., Herbort, A. F., Horn, H., Schuhen, K. (2020). Comparative study of the influence of linear and branched alkyltrichlorosilanes on the removal efficiency of polyethylene and polypropylene–based microplastic particles from water, *Environ. Sci. Pollut. Control Ser.* 27(10), 10888–10898.

## 참고문헌

- 64) Sundt, P., Schulze, P. E., Syversen, F. (2014). Sources of microplastic-pollution to the marine environment. Norwegian Environment Agency.
- 65) Tadsuwan, K., Babel, S. (2022). Microplastic abundance and removal via an ultrafiltration system coupled to a conventional municipal wastewater treatment plant in Thailand, *J. Environ. Chem. Eng.*, 10 (2), 107142.
- 66) Tang, Y., Zhang, S., Su, Y., Wu, D., Zhao, Y., Xie, B. (2021). Removal of microplastics from aqueous solutions by magnetic carbon nanotubes, *Chem. Eng. J.* 406, 126804.
- 67) Toussaint, B., Raffael, B., Angers-Loustau, A., Gilliland, D., Kestens, V., Petrillo, M., Rio-Echevarria, I. M., Eede, G. V. D., (2019). Review of micro- and nanoplastic contamination in the food chain, *Food Addit. Contam. Part A*, 36(5), 639-673.
- 68) Vaid, M., Mehra, K., Gupta, A. (2021). Microplastics as contaminants in Indian environment: a review, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 28, 68025-68052.
- 69) van Wezel, A., Caris, I., Kools, S. A. (2015). Release of primary microplastics from consumer products to wastewater in the Netherlands. *Environ. Toxic. Chem.* 35(7), 1627-1631.
- 70) Wagner, M., Lambert, S. (2018). Freshwater microplastics, emerging environmental contaminants?, Barceló, D., Kostianoy, A. G. Eds., *The Handbook of Environmental Chemistry*, Springer International Publishing.
- 71) Watkins, L., Sullivan, P. J., Walter, M. T. (2021). What you net depends on if you grab: A meta-analysis of sampling method's impact on measured aquatic microplastic concentration, *Environ. Sci. Tech.*, 55, 12930-12942.
- 72) Witzig, C. S., Földi, C., Wörle, K., Habermehl, P., Pittroff, M., Muller, Y. K., Lauschke, T., Fiener, P., Dierkes, G., Freier, K. P., Zumbulte, N. (2020). When good intentions go bad-false positive microplastic detection caused by disposable gloves, *Environ. Sci. Tech.*, 54(19), 12164-12172.
- 73) Zhang C, Chen X, Wang J, Tan L. (2017). Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: interactions between microplastic and algae, *Environ. Pollut.* 220:1282-1288.

## 참고문헌

### 〈기타자료〉

- 1) 동아사이언스 (2018), '쓰레기대란'에 플라스틱 그냥 버렸다간...미세플라스틱으로 식탁까지 위협.  
<https://www.dongascience.com/news.php?idx=22179> (04.23.)
- 2) 디지털비즈온 (2022), [소부장]미세플라스틱의 불편한 진실 "먹는물 수환경 토양 등 분포실태 조사".  
<https://www.digitalbizon.com/news/articleView.html?idxno=2242470> (03.21.)
- 3) Market Analysis Report (2021). Microplastic recycling market size, share & trends analysis, by product (primary, secondary), by end-use (packaging, agriculture, consumer goods, textile, automotive & transportation), by region, and segment forecasts. 2023-2030. No. 120.  
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/microplastic-recycling-market-report#>



# 3

---

## 국가R&D 현황 분석

### 3. 국가R&D 현황 분석

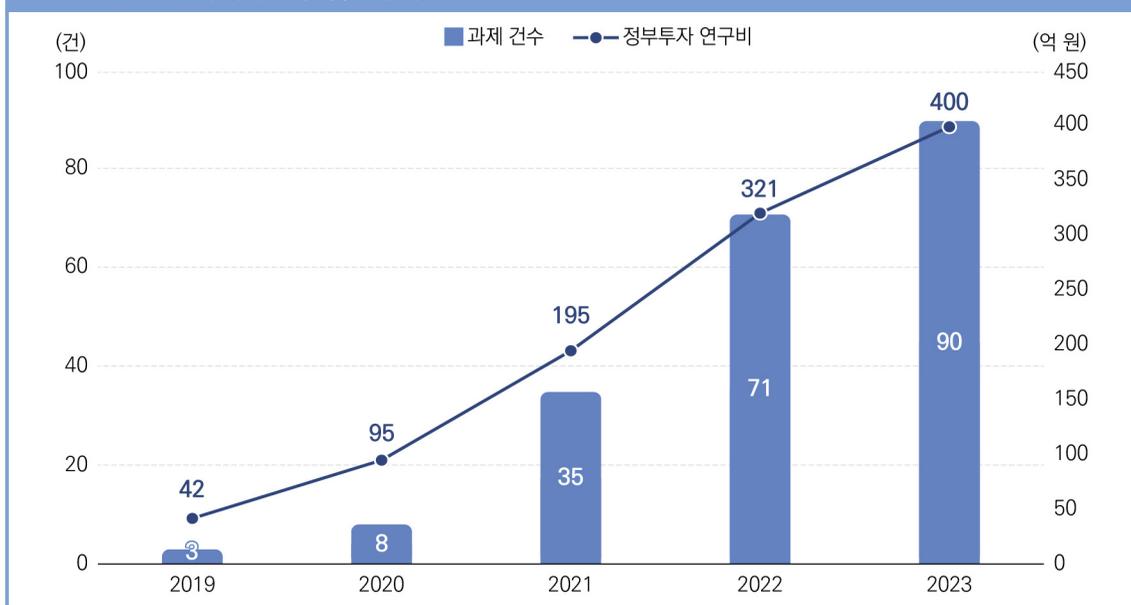
본 호에서 다룬 2개의 주제에 대한 각각의 국가R&D 현황을 살펴보기 위해 국가연구개발 과제 분석을 수행하였다. 정부투자연구비를 기준으로 연구비 규모별 과제수, 연구수행주체, 연구지원부처, 연구개발단계, 주집행지역, 연구분야(국가과학기술표준분류, 미래유망신기술분류) 측면에서의 분석 결과를 제시한다.

#### I. 그린수소 생산을 위한 비귀금속 촉매

■ **(총괄)** 최근 5년간('19~'23) 총 207건의 과제에 대해 1054억 원의 연구비가 투자됨

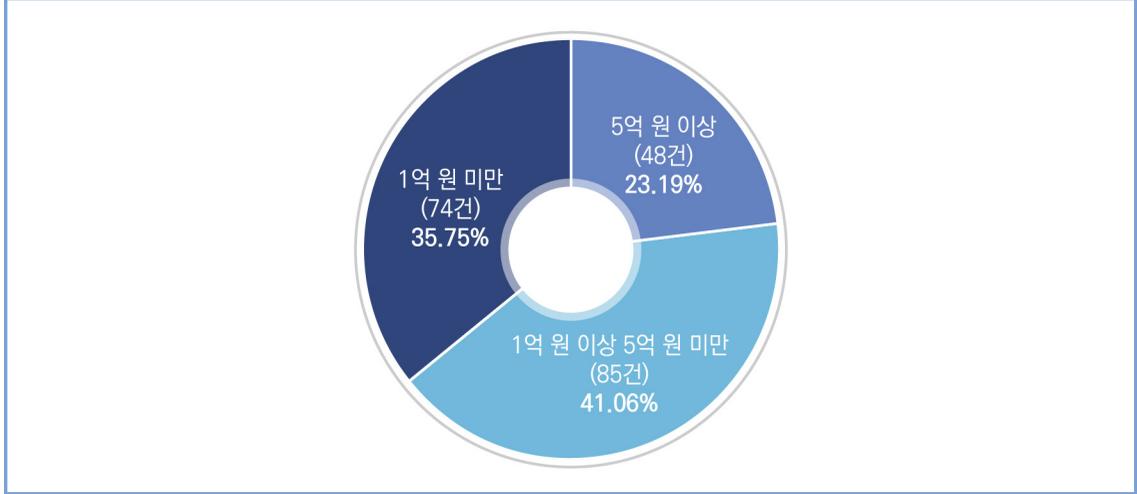
※ 국가과학기술지식정보서비스(NTIS) 플랫폼을 기반으로 관련 국가 연구개발 과제 분석 수행 : 핵심 키워드인 '그린수소 수전해', '그린수소 비귀금속 촉매'로 검색

그림 1. 연도별 연구과제 건수 및 연구비



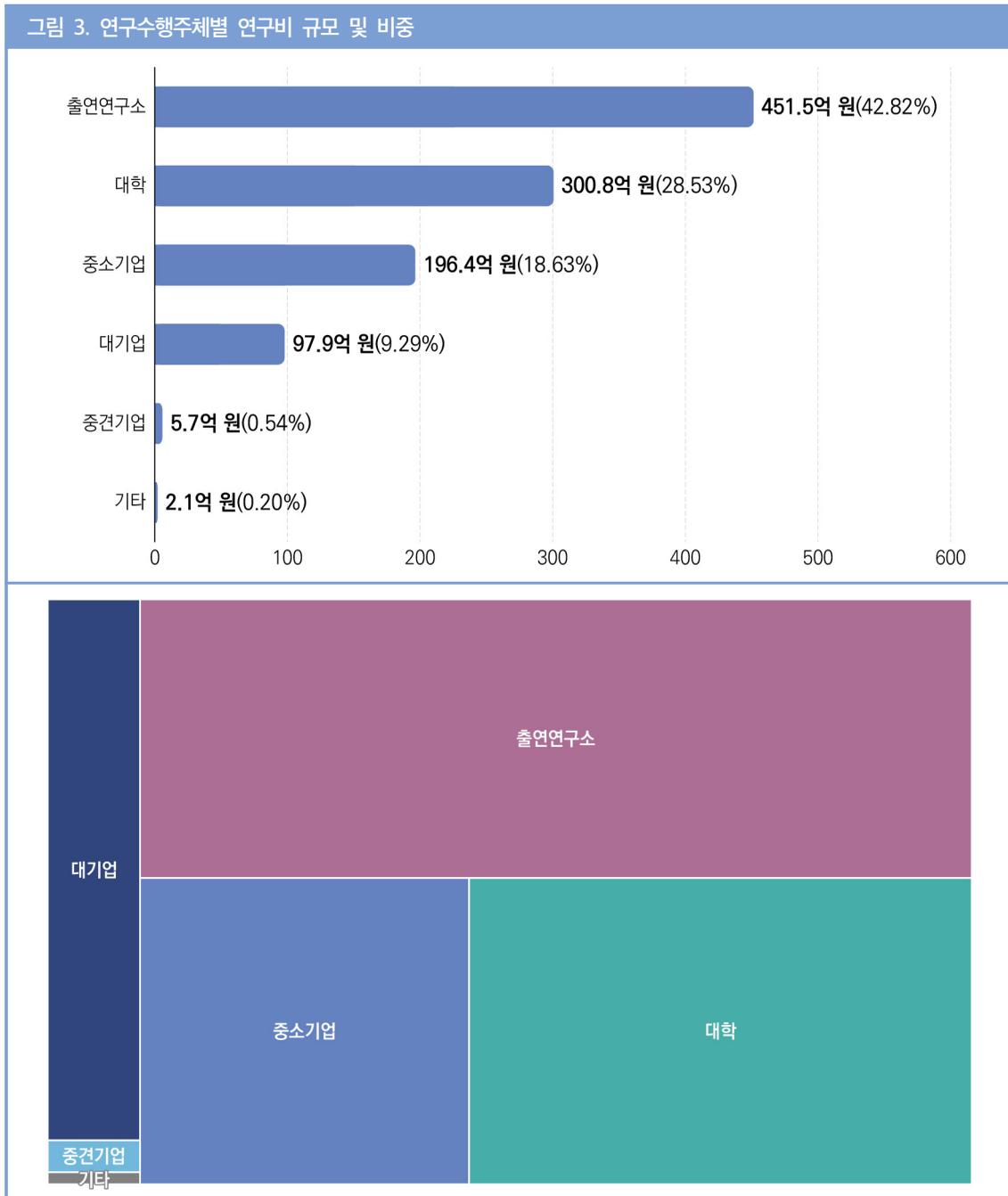
- **(연구비 규모별 과제 수)** 연구비가 1억 원 이상 5억 원 미만인 과제가 41.06%(85건)로 가장 큰 비중을 차지하고, 1억 원 미만인 과제가 35.75%(74건), 5억 원 이상 과제는 23.19%(48건)의 비중을 차지함

그림 2. 연구비 규모별 과제 수 및 비중

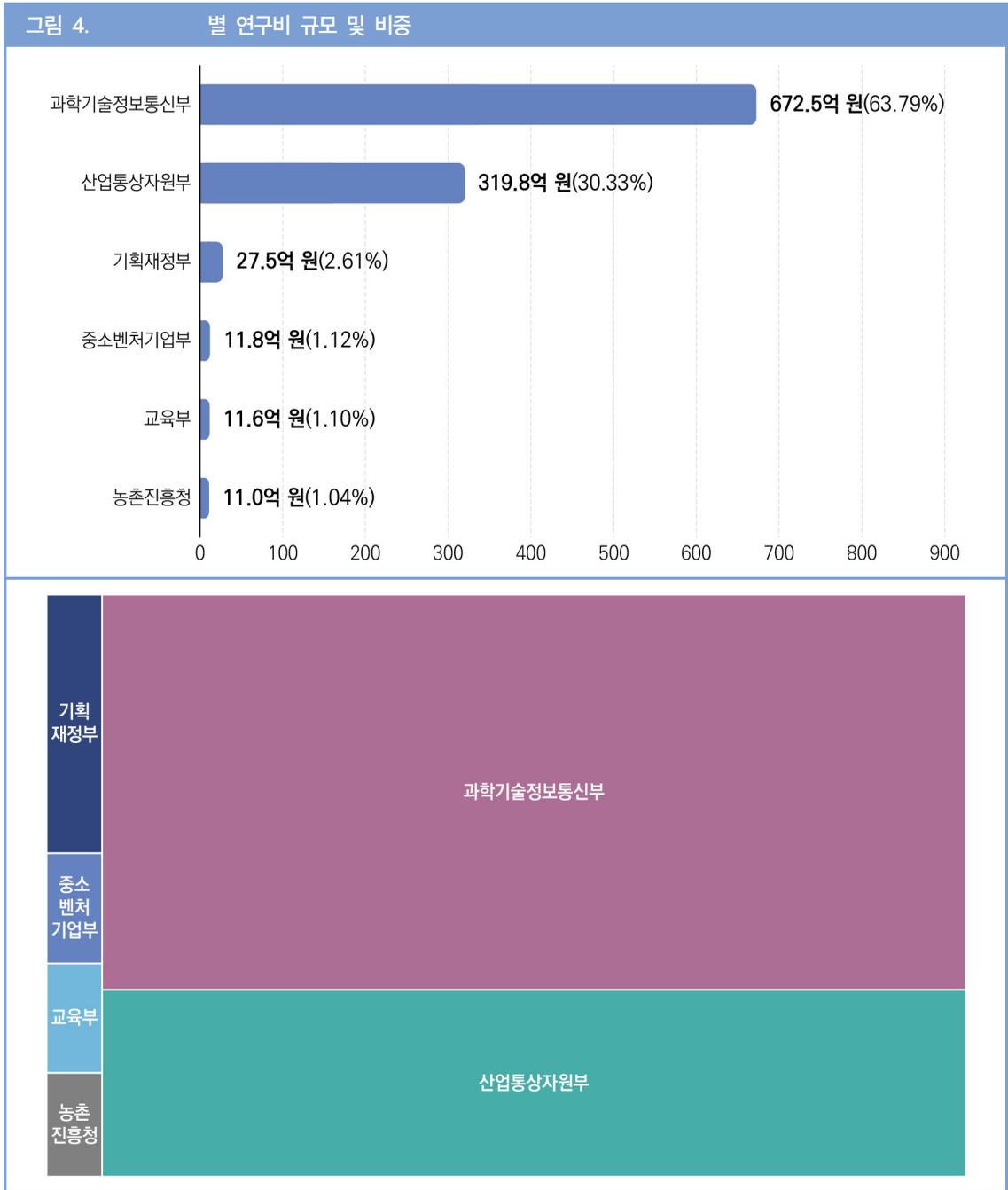


- **(연구수행주체)** 그린수소 생산을 위한 비귀금속 촉매 관련 총 연구비 중 출연연구소가 지원을 받는 연구비의 비중이 42.82%(451.5억 원)로 가장 크고, 대학(28.53%, 300.8억 원), 중소기업(18.63%, 196.4억 원), 대기업(9.29%, 97.9억 원), 중견기업(0.54%, 5.7억 원)순으로 많은 연구비를 지원받고 있음

그림 3. 연구수행주체별 연구비 규모 및 비중

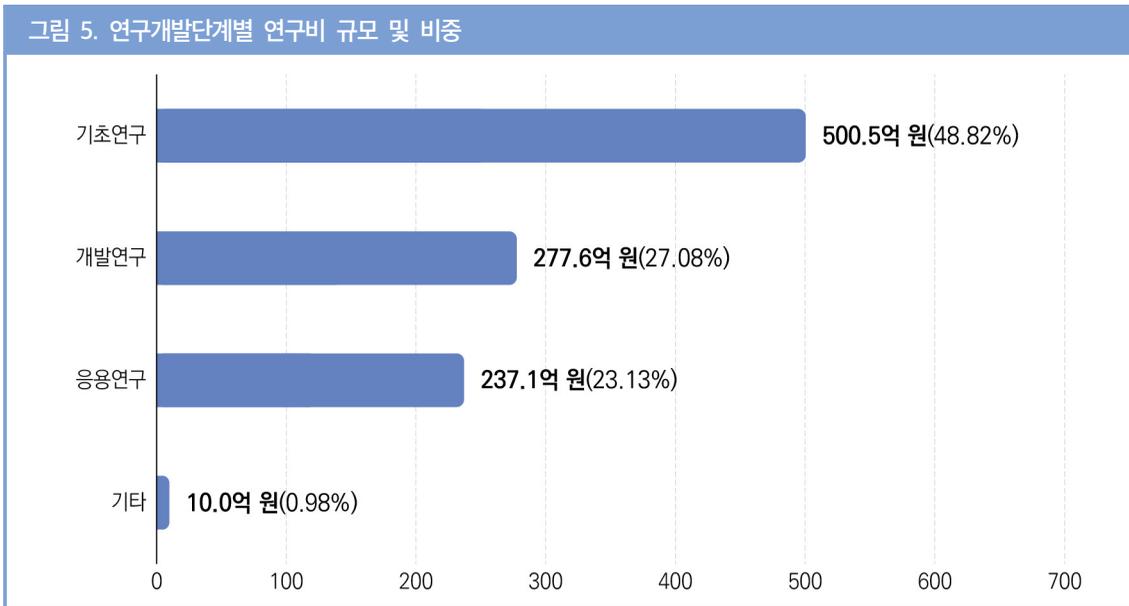


■ (연구지원부처) 총 연구비 중 과학기술정보통신부가 지원하는 연구비의 비중이 63.79%(672.5억 원)로 가장 크고, 산업통상자원부가 지원하는 연구비의 비중이 30.33%(319.8억 원)로 그 뒤를 이음



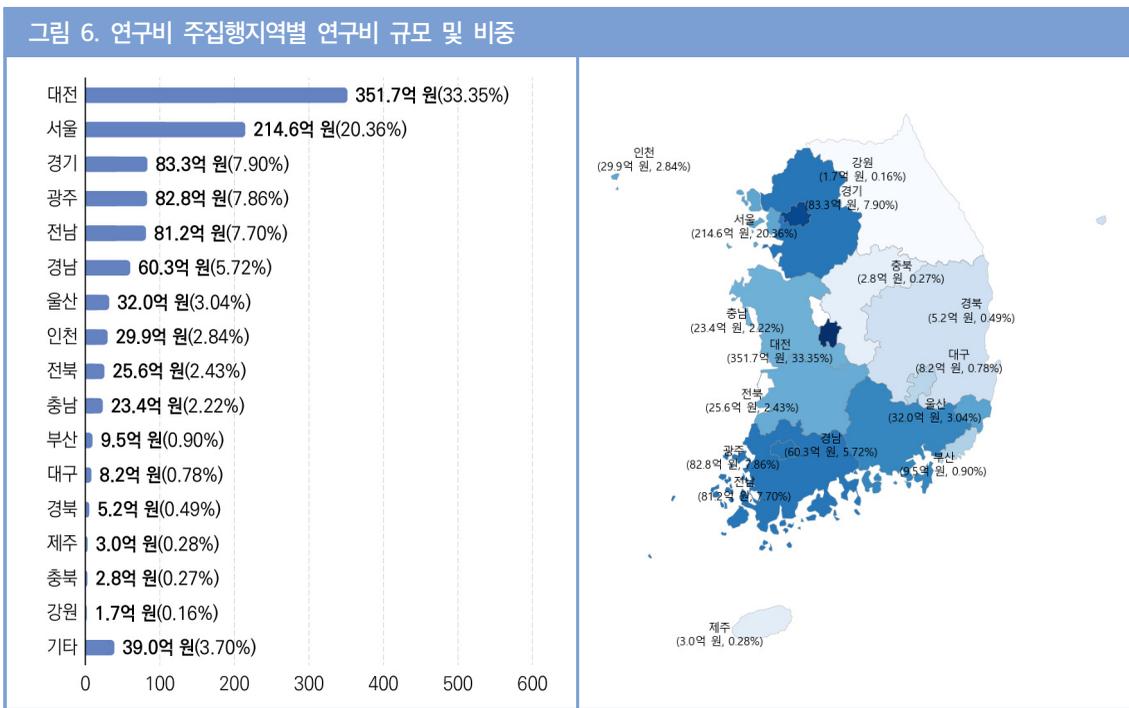
- **(연구개발단계)** 기초연구에 투자되는 연구비 비중(48.82%, 500.5억 원)이 가장 크고, 개발연구(27.08%, 277.6억 원), 응용연구(23.13%, 237.1억 원) 순으로 연구비 비중이 큰 것으로 확인됨

그림 5. 연구개발단계별 연구비 규모 및 비중



■ **(주집행지역)** 대전이 전체 연구비의 33.35%(351.7억 원)를 지원받아 가장 높고, 서울이 20.36%(214.6억 원)로 두 번째로 높으며, 경기(7.9%, 83.3억 원), 광주(7.86%, 82.8억 원), 전남(7.7%, 81.2억 원) 순으로 높게 나타남

그림 6. 연구비 주집행지역별 연구비 규모 및 비중



- **(연구분야)** 그린수소 생산을 위한 비귀금속 촉매 관련 연구비는 국가과학기술표준분류 기준으로 ‘에너지/자원’ 분야, 그리고 미래유망신기술분류(6T) 기준에서는 ‘환경공학기술(ET)’ 분야 위주로 투자되고 있음
  - **(국가과학기술표준분류 분석 결과)** ‘에너지/자원’ 분야의 연구비 비중이 36.08%(368.8억 원)을 차지하며, 이어서 ‘화공’(34.73%, 355억 원), ‘화학’(12.9%, 131.8억 원), ‘재료’(8.12%, 83억 원) 순으로 연구비 비중이 큰 것으로 나타남
    - ※ 연구책임자가 최대 3개까지 지정한 국가과학기술표준분류의 대분류에 대한 각 가중치를 고려한 결과임
  - **(융합과제 분류)** 융합과제에 해당하는 비중은 48.13%(2개 분야 선택 비중: 25.46%, 3개 분야 선택 비중: 22.67%)이며, 총 507억 원의 연구비가 투자됨
    - ※ 융합과제란 연구책임자가 지정한 국가과학기술표준분류의 대분류가 두 개 이상의 분류에 해당하는 과제를 의미함
  - **(미래유망신기술분류(6T) 결과)** 미래유망신기술분류 분석 결과, 환경공학기술(ET) 분야에 투자되는 연구비 비중이 88.62%(934.3억 원)로 가장 큰 것으로 확인되었으며, 다음으로 나노기술(NT)의 연구비 비중 (10.76%, 113.4억 원)이 큰 것으로 확인됨

그림 7. 국가과학기술표준분류별 연구비 규모 및 비중

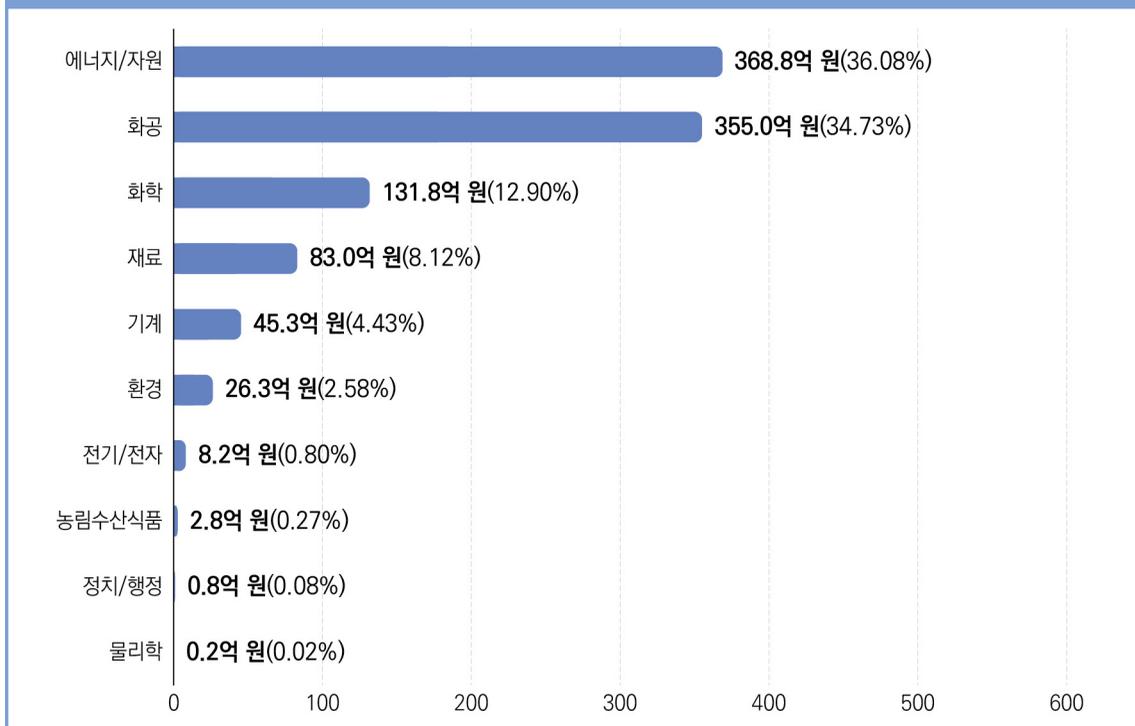


그림 8. 융합 R&D 과제 연구비 규모 및 비중

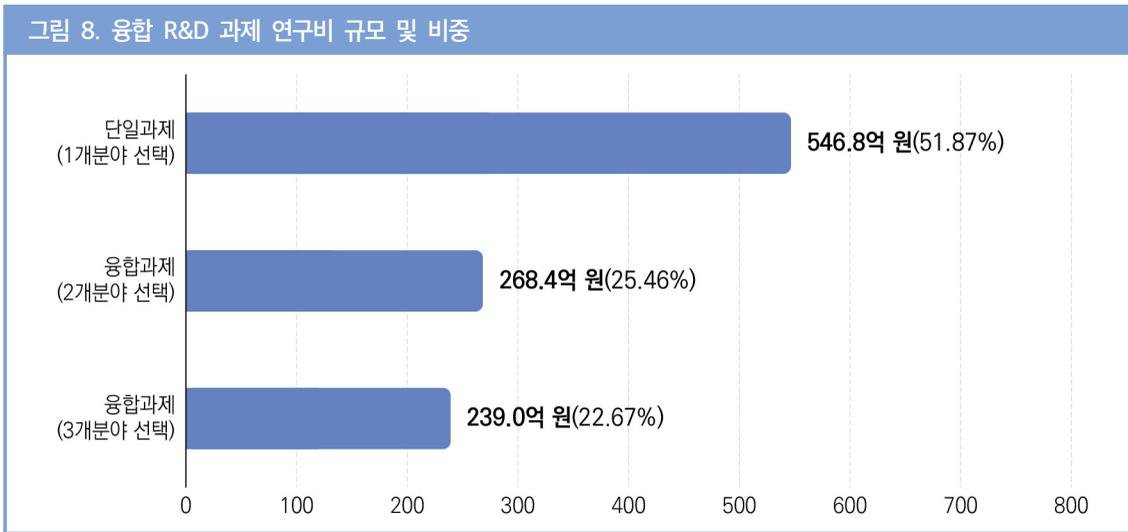
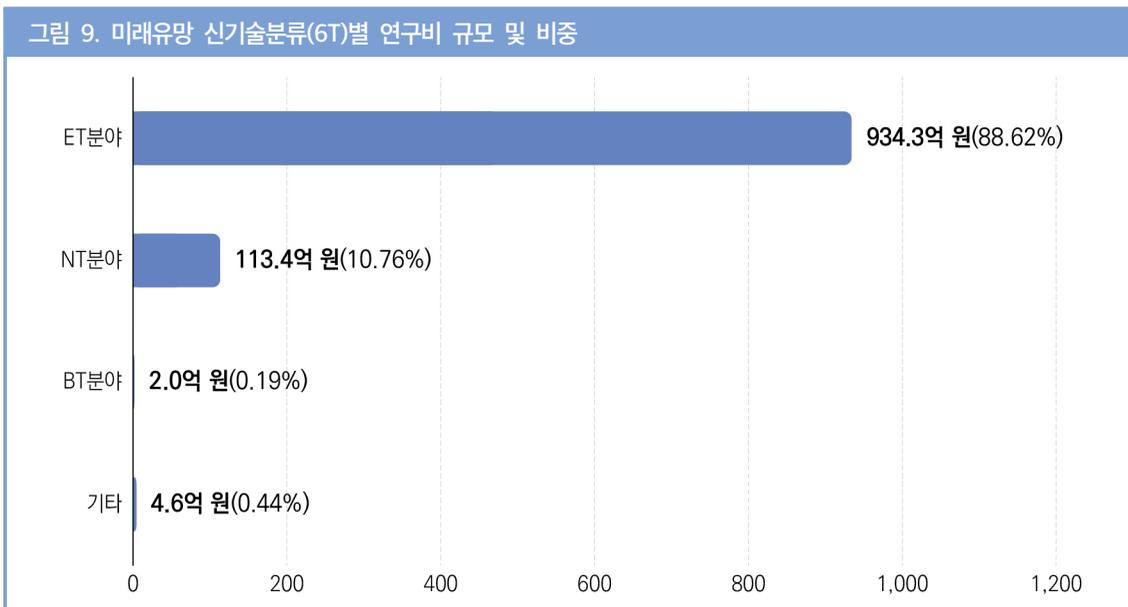


그림 9. 미래유망 신기술분류(6T)별 연구비 규모 및 비중

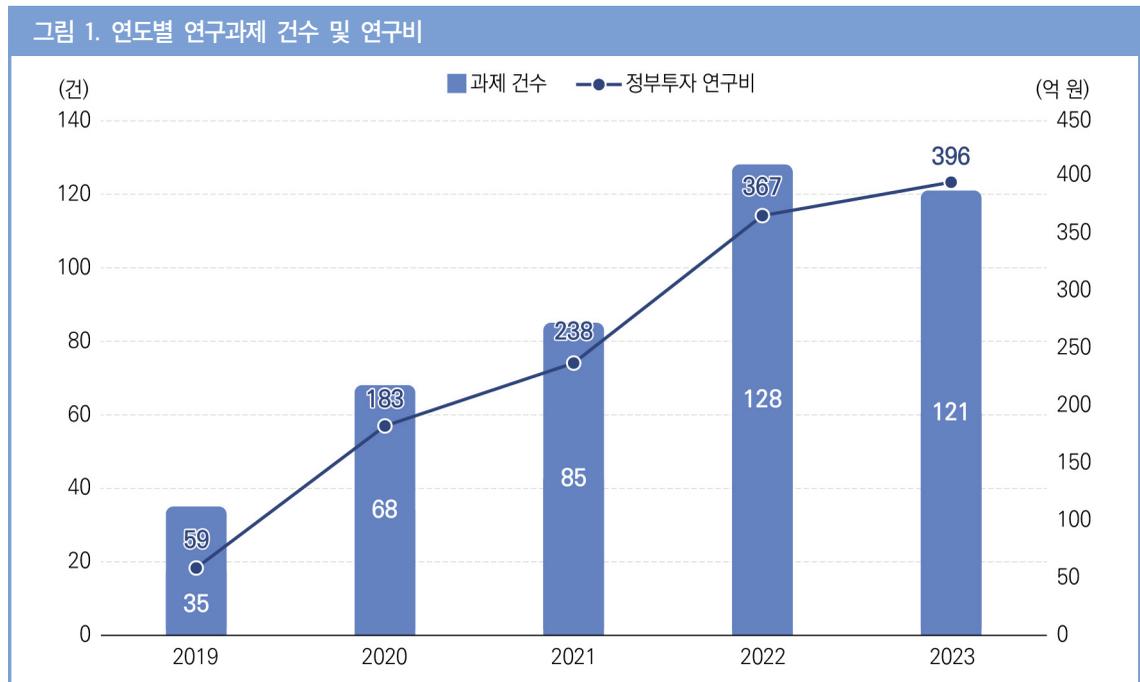


## II. 미세플라스틱 제거 기술 관련 연구, 기업, 산업, 정책 동향

■ **(총괄)** 최근 5년간('19~'23) 총 101건의 과제에 대해 740.5억 원의 연구비가 투자됨

※ 국가과학기술지식정보서비스(NTIS) 플랫폼을 기반으로 관련 국가 연구개발 과제 분석 수행 : 주제 관련 키워드인 '미세플라스틱'에 '저감', '관리', '분석' 중 하나 이상을 포함하는 검색결과 도출

\* 주제와 검색 결과의 관련성을 높이기 위해 각 검색어 간 거리를 5단어 이내로 제한



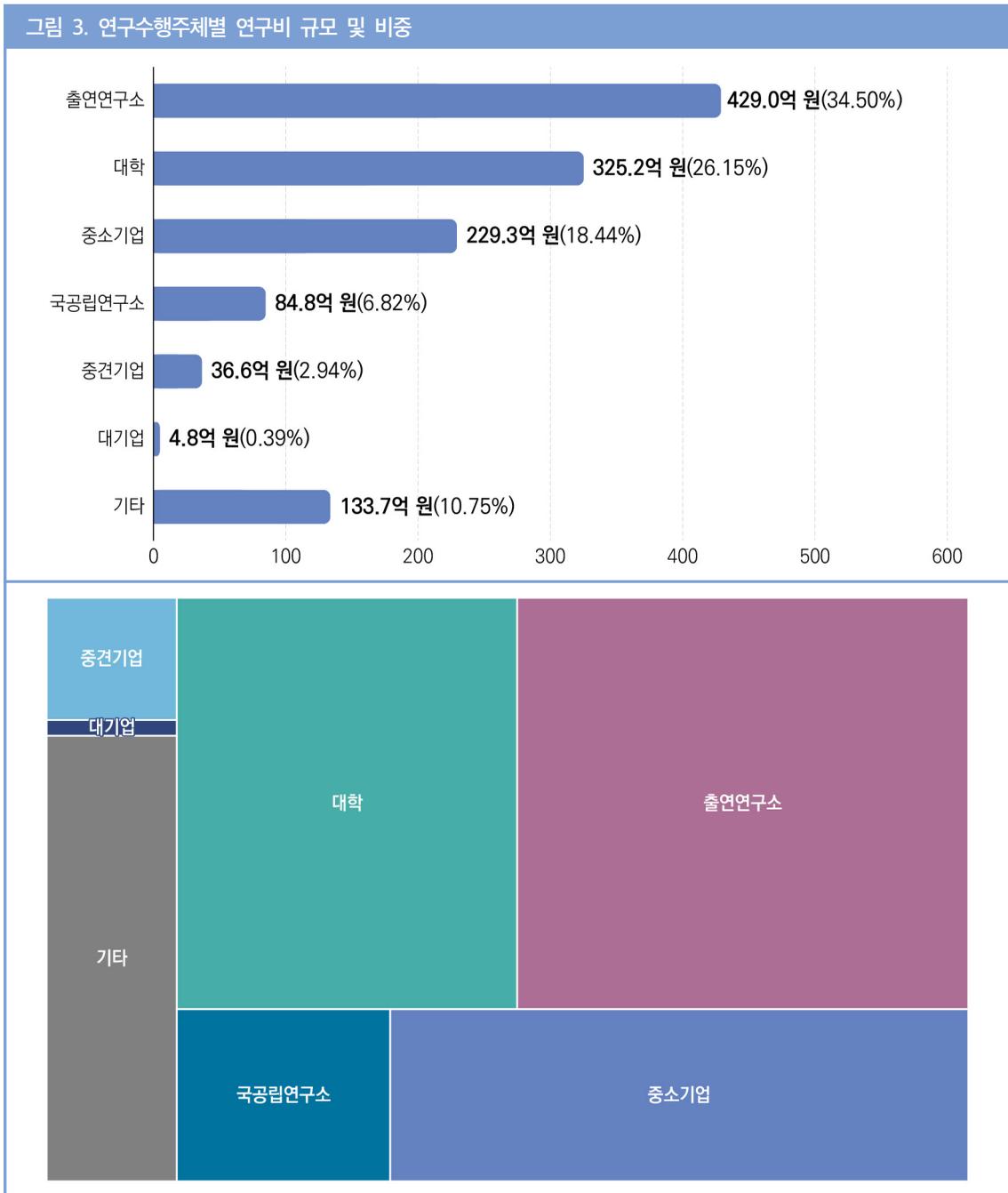
■ **(연구비 규모별 과제 수)** 연구비가 1억 원 이상 5억 원 미만인 과제가 58.81%(257건)로 가장 큰 비중을 차지하고, 1억 원 미만인 과제가 27%(118건), 5억 원 이상 과제는 14.19%(62건)의 비중을 차지함

그림 2. 연구비 규모별 과제 수 및 비중



- **(연구수행주체)** 미세플라스틱 제거 기술 관련 총 연구비 중 출연연구소가 지원을 받는 연구비의 비중이 34.5%(429억 원)로 가장 크고, 대학(26.15%, 325.2억 원), 중소기업(18.44%, 229.3억 원) 순으로 많은 연구비를 지원받고 있음

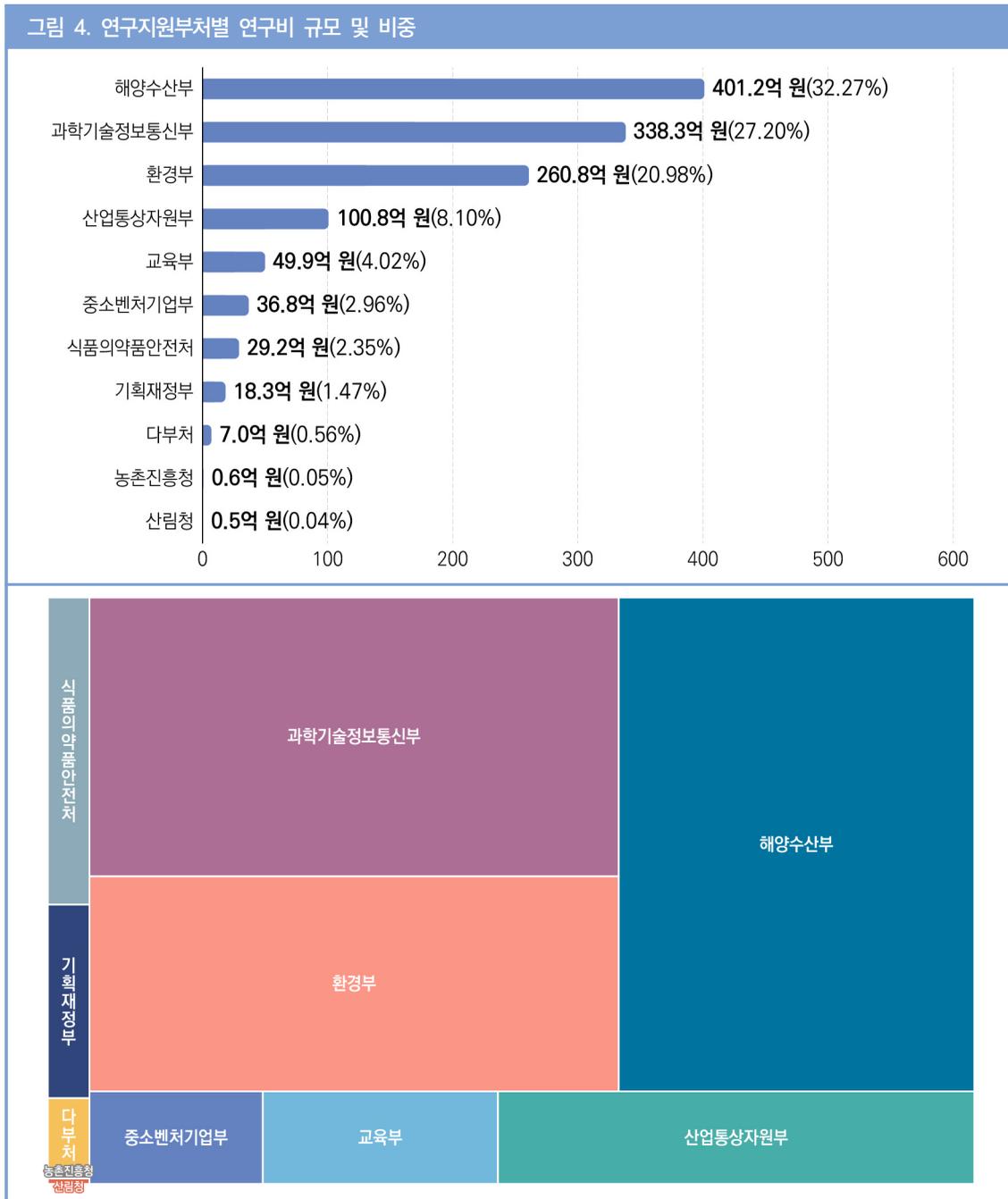
그림 3. 연구수행주체별 연구비 규모 및 비중



- **(연구지원부처)** 총 연구비 중 해양수산부가 지원하는 연구비의 비중이 32.27%(401.2억 원)로 가장 크고, 과학기술정보통신부(27.2%, 338.3억 원), 환경부(20.98%, 260.8억 원), 산업통상자원부(8.1%, 100.8억 원) 순으로 많은 연구비를 지원하고 있음

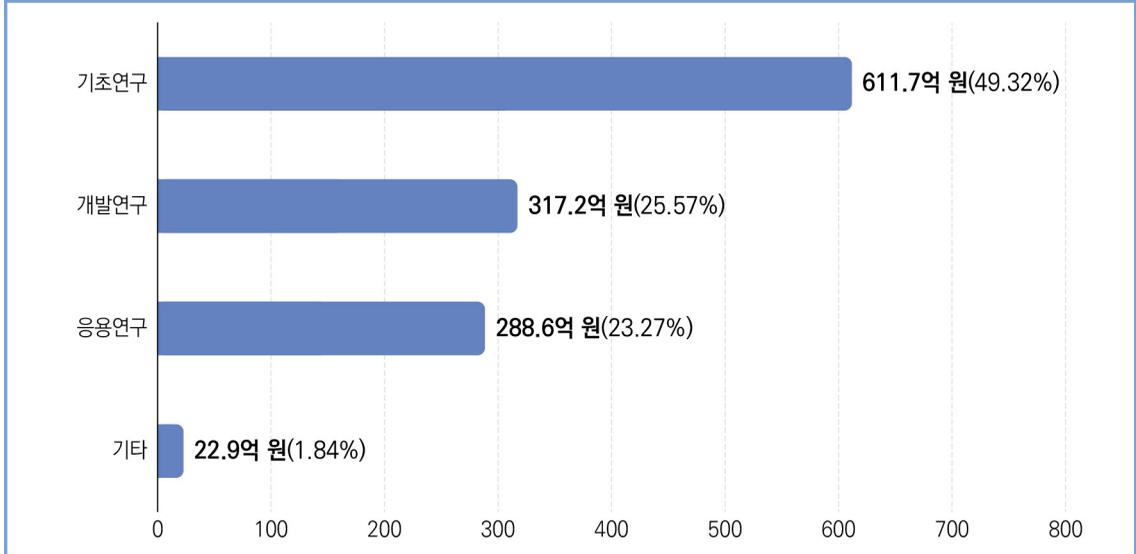
※ 다부처 지원 규모는 7억 원, 비중은 0.56%로 확인됨

그림 4. 연구지원부처별 연구비 규모 및 비중



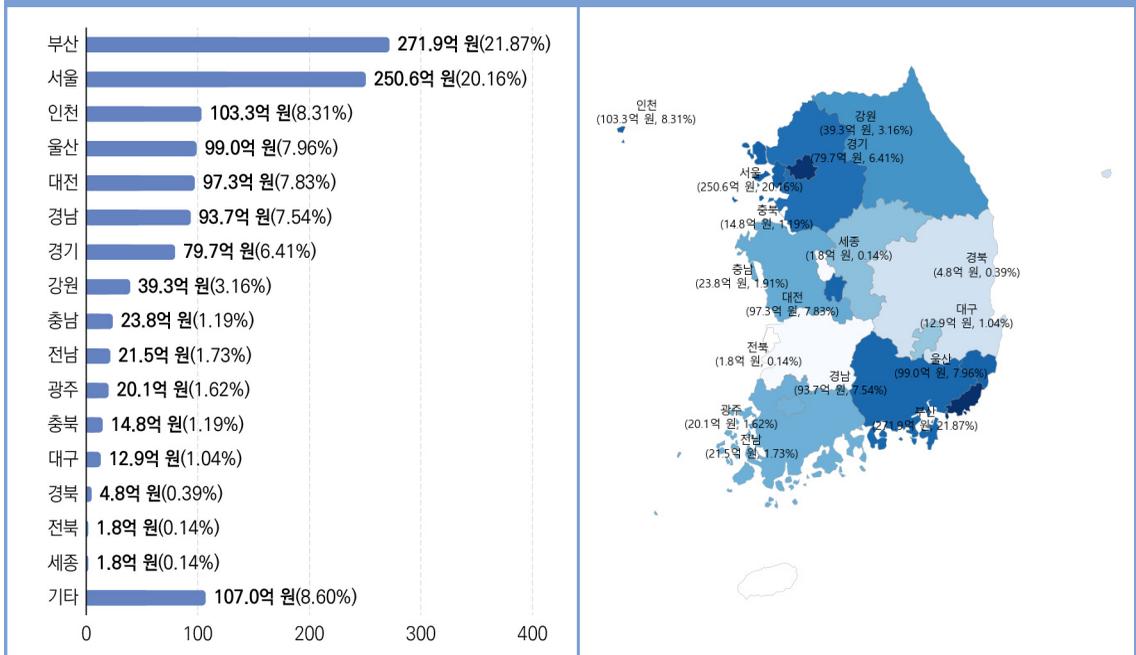
- (연구개발단계) 기초연구에 투자되는 연구비 비중(49.32%, 611.7억 원)이 가장 크고, 개발연구(25.57%, 317.2억 원), 응용연구(23.27%, 288.6억 원) 순으로 연구비 비중이 큰 것으로 확인됨

그림 5. 연구개발단계별 연구비 규모 및 비중



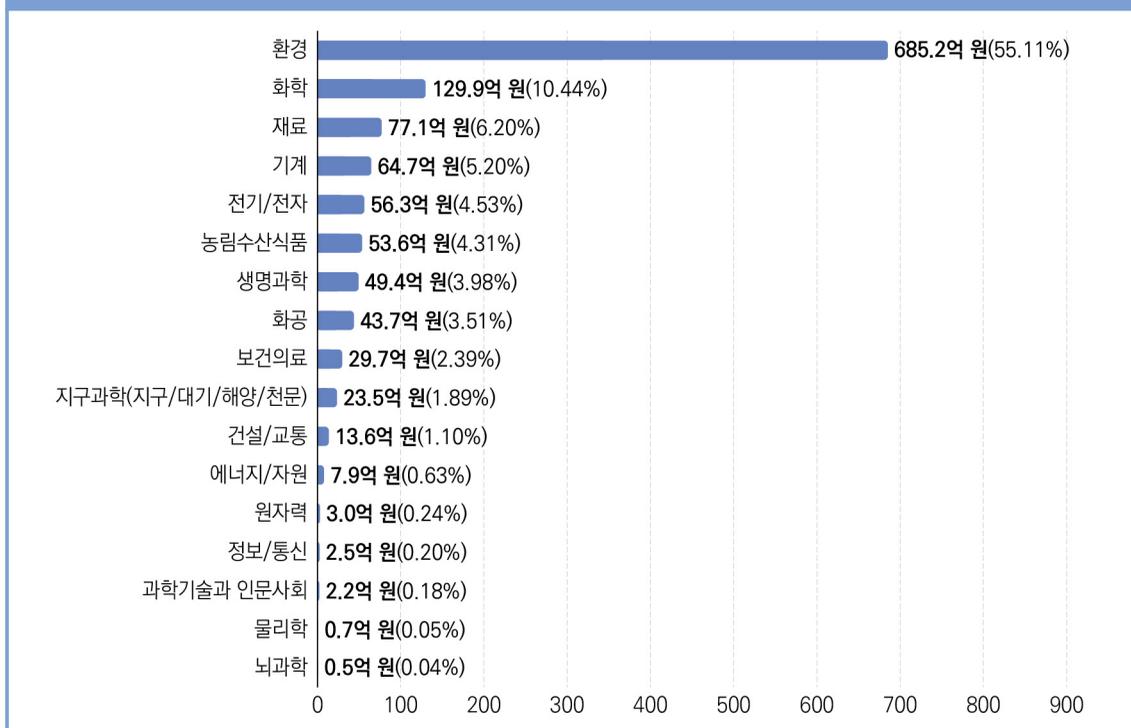
- **(주집행지역)** 부산이 전체 연구비의 21.87%(271.9억 원)를 지원받아 가장 높고, 서울이 20.16%(250.6억 원)로 두 번째로 높으며, 인천(8.31%, 103.3억 원), 울산(7.96%, 99억 원), 대전(7.83%, 97.3억 원) 순으로 높게 나타남

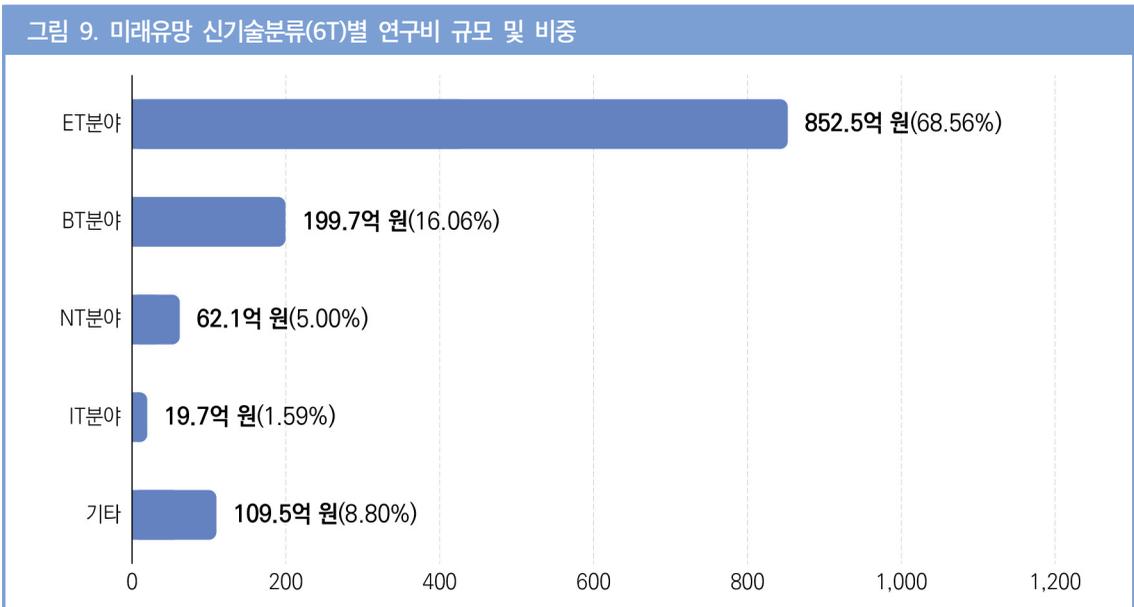
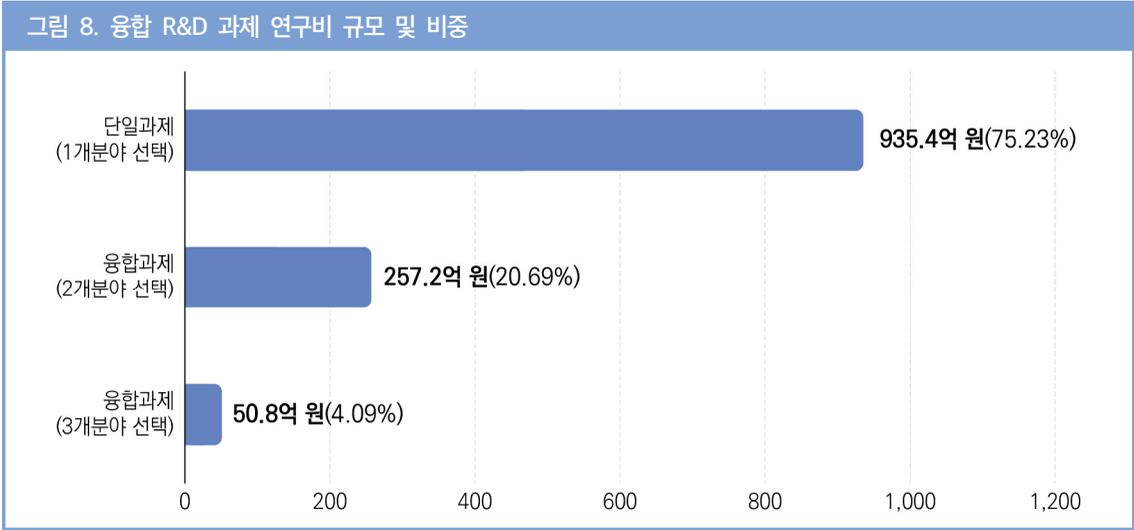
그림 6. 연구비 주집행지역별 연구비 규모 및 비중

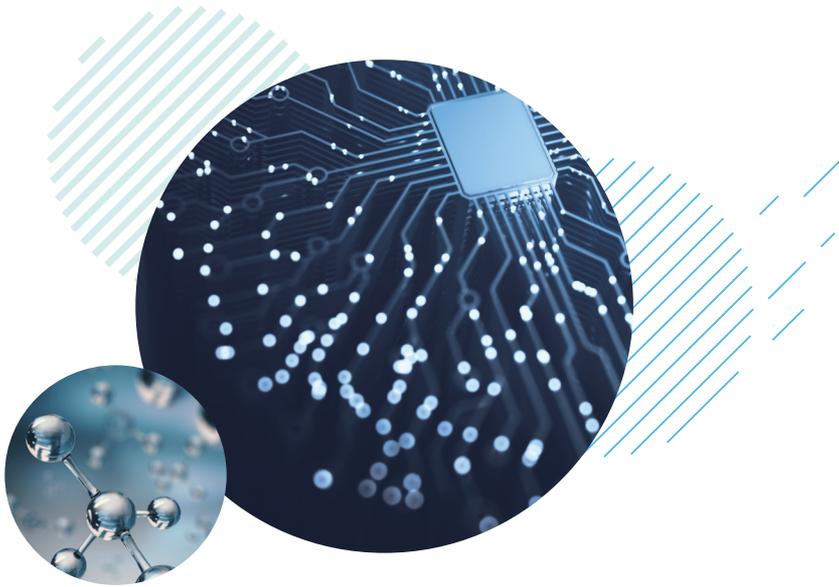


- **(연구분야)** 미세플라스틱 제거 기술 관련 연구비는 국가과학기술표준분류 기준으로 '환경' 분야, 그리고 미래유망신기술분류(6T) 기준에서는 '환경공학기술(ET)' 분야 위주로 투자되고 있음
  - **(국가과학기술표준분류)** '환경' 분야의 연구비 비중이 55.11%(685.2억 원)을 차지하며, 이어서 '화학' (10.44%, 129.9억 원), '재료'(6.2%, 77.1억 원), '기계'(5.2%, 64.7억 원) 순으로 연구비 비중이 큰 것으로 나타남
    - ※ 연구책임자가 최대 3개까지 지정한 국가과학기술표준분류의 대분류에 대한 각 가중치를 고려한 결과임
  - **(융합과제 분류)** 융합과제에 해당하는 비중은 24.77%(2개 분야 선택 비중: 20.69%, 3개 분야 선택 비중: 4.09%)이며, 총 308억 원의 연구비가 투자됨
    - ※ 융합과제란 연구책임자가 지정한 국가과학기술표준분류의 대분류가 두 개 이상의 분류에 해당하는 과제를 의미함
  - **(미래유망신기술분류(6T))** 미래유망신기술분류 분석 결과, 환경공학기술(ET) 분야에 투자되는 연구비 비중이 68.56%(852.5억 원)로 가장 큰 것으로 확인되었으며, 다음으로 생명공학기술(BT)의 연구비 비중 (16.06%, 199.7억 원)이 큰 것으로 확인됨

그림 7. 국가과학기술표준분류별 연구비 규모 및 비중







# 융합연구리뷰

Convergence Research Review



이 보고서는 2024년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 작성되었음.  
(2023M3C1A604340011의 후속과제)





# 융합연구리뷰

Convergence Research Review