

2024년 석학 커리어 디시전스 과학기술정책제언

세계적 수준의 나노기술 연구: 장기적이고 안정적인 지원의 결실

현택환(공학부 정회원, 서울대학교)

KAST 한국과학기술학원  
The Korean Academy of Science and Technology

2024년 석학 커리어 디시전스  
과 학 기 술 정 책 제 언

# 세계적 수준의 나노기술 연구: 장기적이고 안정적인 지원의 결실

현택환(공학부 정회원, 서울대학교)



KAST 한국과학기술학원  
The Korean Academy of Science and Technology

KAST 한국과학기술학원  
The Korean Academy of Science and Technology



9 791186 795941  
ISBN 979-11-86795-94-1

이 사업은 복권기금 및 과학기술진흥기금의 지원을 통한 사업으로 우리나라의 공익적 가치에 기여하고 있습니다.

**발행처**  
한국과학기술한림원  
031) 726-7900  
kast@kast.or.kr

**발행인**  
유옥준

**발행일**  
2024년 12월

**홈페이지**  
<http://www.kast.or.kr>

**디자인/인쇄**  
경성문화사



이 보고서의 모든 저작권은 한국과학기술 한림원에 있습니다.

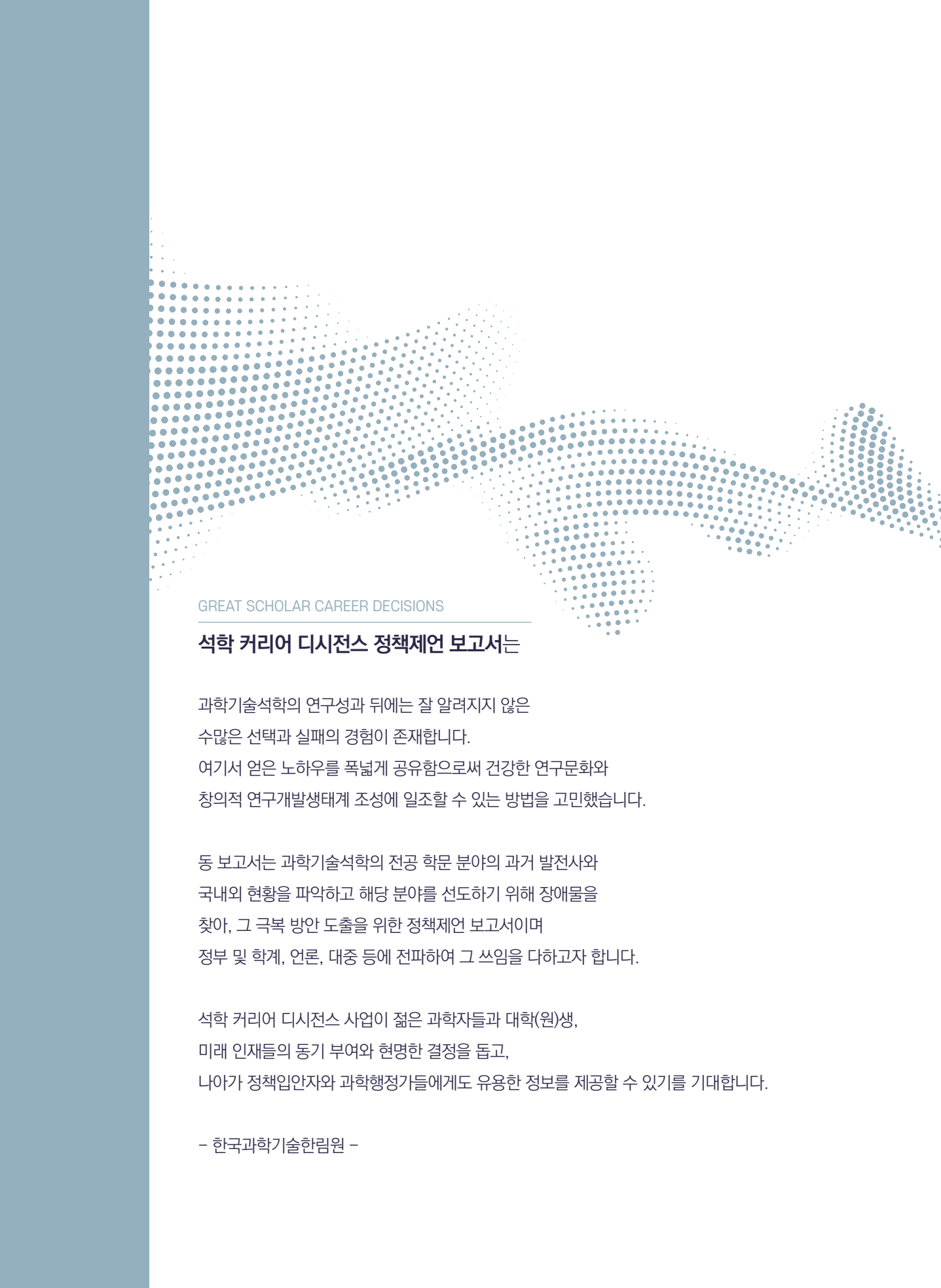
## **KAST** 한국과학기술한림원은

대한민국 과학기술분야를 대표하는 석학단체로서 1994년 설립되었습니다.  
우리나라 과학기술계를 대표하는 석학집단으로서,  
1,000여명의 과학기술분야 석학들이 한국과학기술한림원의 회원이며,  
대한민국이 과학기술 선진국으로 도약하여  
글로벌 난제를 해결할 수 있는 최첨단 과학기술 업적을 창출할 수 있도록  
창의와 도전의 연구개발 생태계를 만드는 데 기여하고자 합니다.

### 한국과학기술한림원 더 알아보기

-  **홈페이지** [www.kast.or.kr](http://www.kast.or.kr)
-  **블로그** [kast.tistory.com](http://kast.tistory.com)
-  **포스트** [post.naver.com/kast1994](https://post.naver.com/kast1994)
-  **페이스북** [www.facebook.com/kastnews](https://www.facebook.com/kastnews)





GREAT SCHOLAR CAREER DECISIONS

## 석학 커리어 디시전스 정책제언 보고서는

과학기술석학의 연구성과 뒤에는 잘 알려지지 않은  
수많은 선택과 실패의 경험이 존재합니다.  
여기서 얻은 노하우를 폭넓게 공유함으로써 건강한 연구문화와  
창의적 연구개발생태계 조성에 일조할 수 있는 방법을 고민했습니다.

동 보고서는 과학기술석학의 전공 학문 분야의 과거 발전사와  
국내외 현황을 파악하고 해당 분야를 선도하기 위해 장애물을  
찾아, 그 극복 방안 도출을 위한 정책제언 보고서이며  
정부 및 학계, 언론, 대중 등에 전파하여 그 쓰임을 다하고자 합니다.

석학 커리어 디시전스 사업이 젊은 과학자들과 대학(원)생,  
미래 인재들의 동기 부여와 현명한 결정을 돕고,  
나아가 정책입안자와 과학행정가들에게도 유용한 정보를 제공할 수 있기를 기대합니다.

- 한국과학기술한림원 -



**현택환**  
서울대학교 교수  
(한국과학기술한림원 정회원)

현택환 서울대 석좌교수는 1997년 서울대학교 화학생물공학부에 부임한 뒤 27년간 크기와 모양이 일정한 나노 입자와 관련 나노소재의 합성 및 응용에 관한 연구를 수행해 왔다. 2002년 한국연구재단의 창의적연구지원사업에 선정되어 산화물나노결정 창의연구단 단장을 9년간 역임하였다. 2012년에는 기초과학연구원(IBS) 나노입자연구단장으로 임명되어 장기간의 안정적인 연구비를 기반으로 도전적인 연구를 해왔고, 국내·외 최고의 연구진과 활발한 공동 연구를 통해 세계적 수준의 연구 결과를 꾸준히 발표함으로써 명실상부한 세계 정상급 나노소재 연구자로 인정받고 있다.

2001년 현택환 교수 연구실에서는 승온법을 통한 균일한 나노입자를 대량으로 생산하는 표준 합성 방법을 세계 최초로 개발하였고, 지금도 대학 연구실과 산업현장에서 널리 사용되고 있다. 그가 수행한 나노 입자 연구의 중요성과 폭넓은 영향력을 인정받아 2011년 세계 100대 화학자 명단에 37위로 등재되었고, 2014년부터 2024년까지 화학/재료과학 분야에서 세계 상위 1% 연구자(Highly cited researcher)로 매년 선정되었다. 2020년에는 노벨상 수상 유력 후보군으로 간주되는 Citation Laureate in Chemistry에 2023년 노벨화학상을 수상한 Mounji Bawendi 교수와 함께 선정되었다. 한국공학한림원 대상 (2022), 대한민국최고과학기술인상 (2016), IUVSTA Prize for Technology (2016), 삼성호암공학상 (2012), 포스코-청암 과학상 (2008) 등을 수상하였고, 2023년에는 미국재료학회에서 Kavli Foundation Frontiers of Materials Research Lecturer로 초청되어 강연하였다. 한국과학기술한림원(KAST)과 한국공학한림원(NAEK)의 정회원, 미국공학한림원(NAE)과 스웨덴왕립공학한림원(IVA)의 국제회원, 영국 왕립화학회(RSC)와 미국 재료학회(MRS)의 펠로우이다. 현택환 교수는 2010년부터 2020년까지 화학 분야 최고 학술지인 미국화학회지 (JACS)의 부편집장을 역임하였고, 2025년 3월부터 ACS Nano의 부편집장으로 활동할 예정이며, ACS Central Science, Advanced Materials, Nano Today, Small 등 국제 저명 학술지의 편집위원이기도 하다.



**세계적 수준의 나노기술 연구:  
장기적이고 안정적인 지원의 결실**

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| 1. 나노기술의 태동과 의미                                  | 04  |
| 2. 균일한 나노입자 양산의 중요성과 승온법의 발명                     | 16  |
| 3. 나노입자 합성 기술 현황                                 | 22  |
| 4. 나노입자의 응용기술 현황                                 | 28  |
| 5. 세계적 수준의 나노기술연구를 위해 필수적인<br>국가 연구 지원의 지속성과 안정성 | 68  |
| 6. 나노과학 및 나노기술 발전을 위한 정책 제언                      | 76  |
| 7. 기술확산 및 기술사업화                                  | 84  |
| 8. 국가별 나노기술 추진 현황                                | 92  |
| 9. 결론 및 전망                                       | 104 |
| 참고 문헌                                            | 109 |



# 1

## 나노기술의 태동과 의미

- 나노기술의 필요성
- 나노입자의 개요
- 2023년 노벨화학상을 수상한 양자점 연구와 응용 기술

## 나노기술의 태동과 의미

### 101 나노기술의 필요성

최근 인류 사회는 유례없는 속도의 기술 발전과 사회 변화의 흐름 속에 놓여있다. 급격한 AI 기술의 발전과 에너지 부족, 기후 변화 및 환경 오염, 감염병 및 난치성 질환 등과 같은 주요 안건들은 사회 및 산업에 전반적으로 영향을 끼치고 있는 중요한 거대 담론들이다.

OpenAI의 ChatGPT 서비스가 촉발한 AI 산업에 대한 폭발적인 관심은 반도체 부족 현상과 장기적인 전력 수급 문제를 심화시켰다. AI 산업과 반도체 산업은 뗄 수 없는 관계이다. 거대 언어모델(LLM)과 같은 AI 모델에 막대한 양의 데이터를 학습시키고, 이를 바탕으로 추론 과정을 거치기 위해선 수많은 반도체가 필요하다. 마이크로소프트, 메타, 구글, 아마존과 같은 글로벌 빅테크 기업들은 엔비디아로부터 AI 데이터 센터에 활용할 그래픽 카드를 확보하기 위해 수십억 달러를 지출하며 출혈 경쟁을 벌이고 있다. 앞으로 AI 산업이 성장함에 따라 반도체 산업의 중요성은 훨씬 더 커질 것이다.

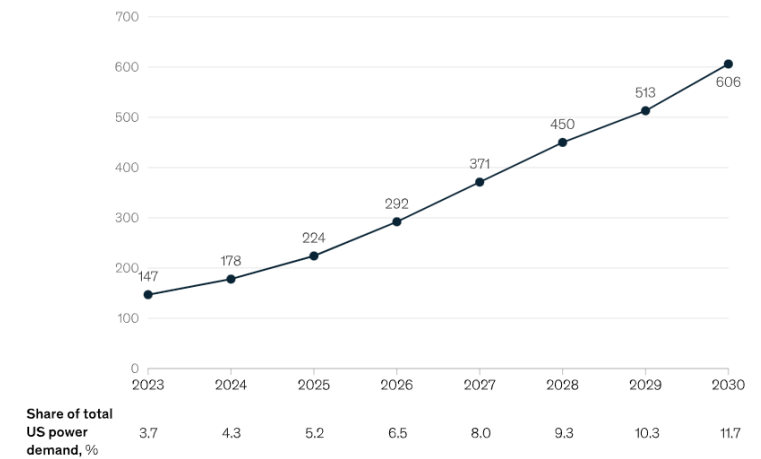
이렇게 구축된 데이터 센터들의 전력 소비 규모 또한 막대하다. 현재 AI 데이터 센터들은 미국 전력 수요의 3~4%를 차지한다. 최근에는 아마존, 오라클과 같은 글로벌 IT 기업들이 하나둘씩 기가와트에 달하는 AI 데이터 센터의 건설 계획을 발표하면서 전력 수요는 급격하게 증가할 것으로 예상된다. 맥킨지에 의하면 AI 데이터 센터에 의한 전력 소모는 2030년까지 11~12% 규모로 급격히 증가할 것으로 보인다(그림 1.1).

그림 1.1 급격히 늘어나고 있는 AI 산업의 전력 수요

**Demand for power for data centers is expected to rise significantly in the United States.**

Terawatt-hours (TWh) of electricity demand, medium scenario

US data center energy consumption, TWh

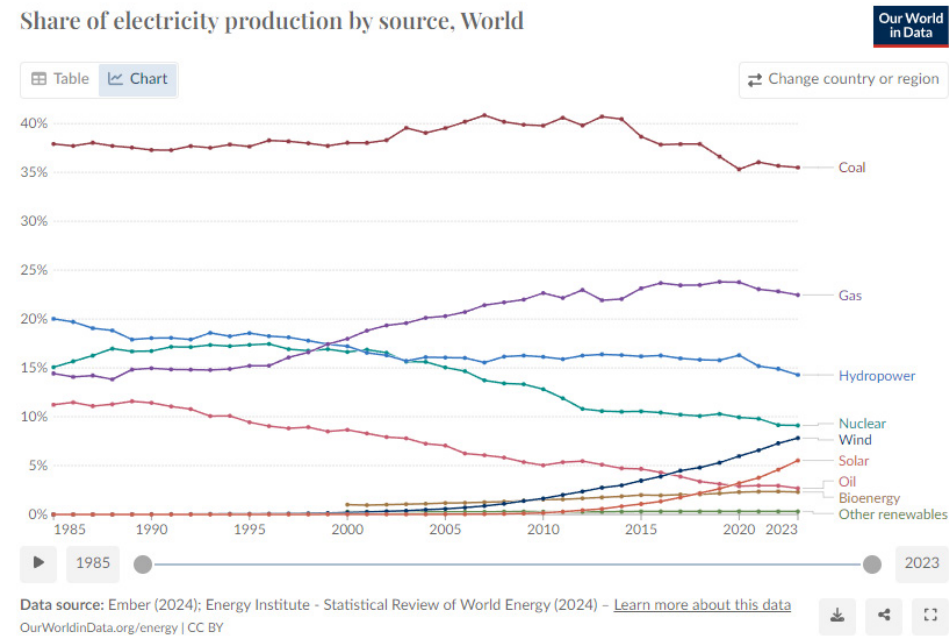


출처: 맥킨지<sup>1</sup>

전력 수급 문제는 기후 변화 문제와 결부되어 국제 사회에 친환경 에너지로의 전환을 강제하고 있다. 최근 태양광, 수력, 풍력 등 친환경 에너지원의 비율이 많이 증가하였으나, 전 세계 전력 생산의 50% 이상은 석탄, 천연가스와 같은 화석 연료에 의존하고 있다(그림 1.2). 이산화탄소를 대기 중으로 배출시키는 화석 연료 사용은 지구 온난화의 주범으로 꼽힌다. 전 세계 195개국은 2015년 파리기후 변화협약을 통해 산업화 이전과 비교하여 지구 평균 기온 상승을 1.5℃ 이내로 유지하는 것을 목표로 하였으나, 지난해 2월부터 올해 1월까지 처음으로 연 평균 기온이 이를 벗어난 것으로 관측됐다. 상승 폭이 2℃를 넘어가면 극심한 기후 변화, 해수면 상승, 생태계 지형 변화 등 치명적인 영향을 끼칠 수 있다. 이미 국토의 1/3이 잠긴 2022년 파키스탄 홍수 사태, 2024년 상하이를 초토화한 태풍 '버빙카' 등과 같은 극단적인 사례들이 빈번하게 일어나고 있다.

<sup>1</sup> <https://www.mckinsey.com/industries/private-capital/our-insights/how-data-centers-and-the-energy-sector-can-sate-ais-hunger-for-power>

그림 1.2 연도 및 에너지원별 전력 생산 비율

출처: Ember<sup>2</sup>

지구 온난화는 기후뿐만 아니라 인간의 건강에도 직, 간접적인 손해를 끼치고 있다. 높은 기온 및 기후 재난은 전염병이 확산하기 쉬운 환경을 제공하며, 대기 오염과 가뭄은 각각 호흡기 질환과 영양실조의 발병률을 높인다. 과학기술이 발전함에 따라 인류 사회가 풍족해지면서 전 세계 인류의 기대 수명이 1950년 49세에서 2023년 73세까지 증가하였고<sup>3</sup>, 건강하게 나이 드는 데 대한 관심이 높아져 의료 및 건강 관리 산업은 점점 확대되고 있다. 하지만 노령화 현상으로 암, 알츠하이머, 파킨슨병에 걸린 환자들의 수 또한 급격하게 증가하고 있으며, 이를 해결하기 위해 과학, 의료 분야에서 갖은 노력을 하고 있다.

인류는 이렇게 다양한 방면에서 거대한 위기와 기회를 동시에 마주하고 있다. AI 및 반도체, 지구 온난화 및 에너지, 의료와 건강 관리 문제는 일견 무관한 것처럼 보이며, 각 분야에 특화된 기술로만 해

<sup>2</sup> <https://ourworldindata.org/electricity-mix><sup>3</sup> <https://ourworldindata.org/grapher/future-life-expectancy-projections>

결할 수 있을 것처럼 보인다. 하지만, 수많은 산업 분야에서 마치 약방의 감초처럼 활용될 수 있는 기술이 있으니, 바로 나노기술이다. 나노기술은 현재의 기술 수준으로는 한계에 부딪힌 다양한 문제의 해결을 제공할 수 있는 도우미 기술이다(그림 1.3).

그림 1.3 나노기술의 다양한 응용



출처: 1. Kote Puerto, 2022; 2. Michael Foursert, 2021; 3. gtu.net, 2023; 4. Samsung, 2017; 5. Zbynek Burival, 2018; 6. Philips

AI 산업의 핵심이 되는 GPU와 같은 반도체 칩은 매우 작은 소자들로 구성된다. 실리콘, 실리콘 질화물, 각종 금속의 산화물들이 수 나노미터에서 수십 나노미터 크기의 소자로 가공되는 과정에서 나노기술이 핵심적인 역할을 담당한다. 극자외선(EUV)으로 미세한 패턴을 형성하는 포토리소그래피, 나노미터 두께의 박막을 증착하는 공정 등에 정밀한 나노기술이 활용되며, 반도체 표면을 평탄화하는 CMP 공정에 나노입자가 쓰이기도 한다. 앞으로 정보통신 기술이 발전하면서 반도체 소자의 크기 감소에 대한 수요와 필요성은 점차 증가할 것이며, 미래에 실리콘 소자가 물리적 한계에 도달할지라도, 2D 나노소재와 같은 다양한 나노 물질들이 이를 대체할 잠재력을 가지고 있다.

에너지 환경 분야에서도 이차전지, 태양광 발전, 수소연료전지, 친환경 수소 생산 등에 나노기술이 널리 활용된다. 리튬이온배터리에는 나노 실리콘, 그래핀이 음극재로 활용되어 배터리의 효율을 높이며, 차세대 배터리로 평가받는 리튬-황 배터리, 전고체 배터리 개발에서도 나노 물질이 활용된다. 백금 기반의 나노촉매는 수소 에너지 산업에서 중심이 되는 수소연료전지에서 수소 이온과 산소를 반응시켜

물을 생성함으로써 에너지를 발생시키며, 수전해 장치에서는 물로부터 친환경 수소를 생성한다.

의료 및 건강 관리 분야에서는 산화철 자성 나노입자를 MRI 조영제로서 활용하는 진단 기술이 미국 FDA의 승인을 받았다. 최근 유행하였던 코로나19의 백신에 지질 나노입자가 이용되면서, 나노 물질이 유전체 등을 전달하는 약물 전달 수단으로써 다양한 질병의 치료에 이용될 가능성을 열어주었다. 체내에서 일어나는 산화-환원 반응을 돕는 효소와 비슷하게 기능하는 나노입자들이 현재 알츠하이머, 파킨슨병과 같은 난치성 질환의 치료와 패혈증과 같은 응급 상황에서의 치료제로써 활발히 연구되고 있다. 금, 은 기반의 전도성 나노 와이어는 하이드로겔이나 신축성 고분자와 함께 다양한 바이오 메디컬 장치로 응용될 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

지금까지 살펴보았듯이, 나노기술은 필요한 분야에서 적재적소에 활용될 수 있는, 잠재력이 무궁무진한 기술이다. 과학기술이 앞으로 더욱 발전함에 따라 물리적인 한계에 도달하는 분야는 점점 많아질 것이다. 이때마다 나노기술은 기존 거시 세계에서 불가능했던 것을 가능하게 하면서 세상의 다양한 문제들을 해결할 수 있을 것이다.

## 102 나노입자의 개요

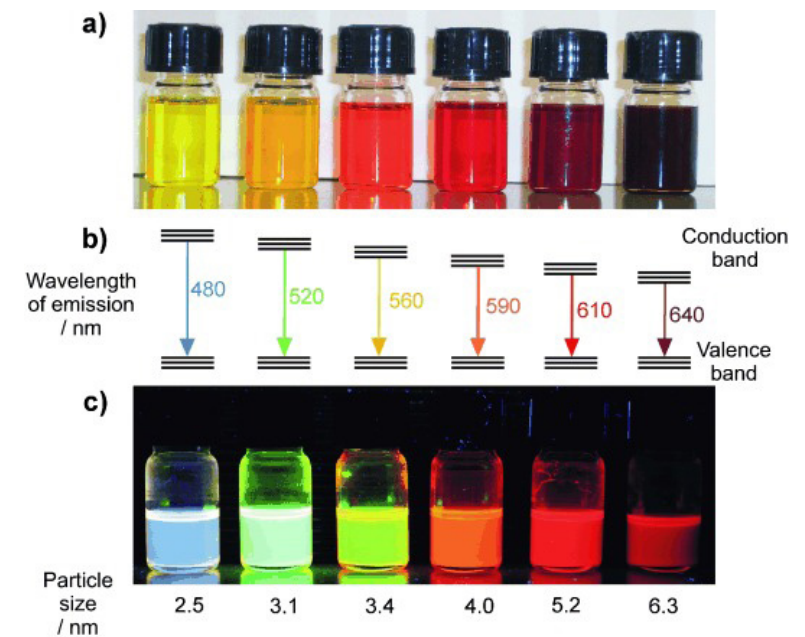
나노라는 단어는 난쟁이를 뜻하는 고대 그리스어 나노스(nanos)에서 유래되었다. 1나노미터는 10억분의 1미터를 뜻하며, 이는 사람 머리카락의 8만분의 1에 해당하는 매우 작은 크기이다. 나노기술이란 최소 한 차원이 1~100나노미터의 크기를 갖는 물질을 다루는 것을 의미한다. 물질의 크기가 나노미터 규모로 작아지면 표면적이 기하급수적으로 증가하여, 표면의 넓이가 중요한 응용 분야에 큰 이점이 된다. 이에 더 나아가 크기가 작아지면, 연속적이었던 전자의 에너지 레벨이 불연속적으로 변하는 양자구속효과(quantum confinement effect)로 인해 전자 및 광학적 특성이 기존과는 큰 차이를 가지게 되면서 전혀 다른 물리, 화학적 특성을 보인다. 나노기술은 나노 물질의 새로운 특성을 활용함으로써 다양한 분야의 기술적 한계를 돌파하는 것을 목표로 삼는다.

나노입자는 수십~수천 개의 원자들로 이루어진 1~100나노미터 크기의 물질로, 나노기술 분야에서 핵심적인 물질군 중 하나이다. 나노입자는 원래의 벌크(bulk) 상태에서 나타나지 않은 새로운 특성을 띠게 된다. 예를 들어, 금 나노입자는 금과 달리 빨간색을 띠며, 양자점(quantum dot) 나노입자는 입자의 크기에 따라 발광하는 빛의 색이 달라, QLED와 같은 차세대 디스플레이의 핵심 재료로 활용되

고 있다. 한편, 새로운 특성을 보이지 않아도 나노입자는 부피 대비 매우 넓은 표면적을 가지고 있어 촉매, 약물 전달에 널리 활용되고 있다.

나노입자는 주요 구성 원소에 따라 분류할 수 있는데 크게 탄소 기반의 유기물로 만들어진 유기 나노입자와 탄소를 제외한 무기물로 만들어진 무기 나노입자로 나뉜다. 유기 나노입자는 지질, 고분자, 단백질 등으로 구성되며, 생체 내 독성이 적어 의료 분야에 널리 활용된다. 무기 나노입자는 구성 원소에 따라 세부적으로 금속 나노입자, 반도체 나노입자, 세라믹 나노입자로 나뉜다. 금속 나노입자는 금속 원소로만 이루어졌으며, 예시로 백금 나노입자는 수소연료전지나 화학 공정의 촉매로 활용되고, 금 나노입자는 바이오센서 및 영상의학 기술에 활용된다. 반도체 나노입자(양자점)는 금속 및 비금속 원소로 이루어졌으며, 약 2~10nm 크기의 나노결정으로 원소의 종류나 나노입자의 크기에 따라 전기, 광학적 특성을 조절할 수 있다(그림 1.4). CdSe와 InP 나노입자는 높은 색 순도로 인해 차세대 디스플레이 재료로 활용되고 있으며, 반도체 나노입자의 예측과 합성은 2023년 노벨화학상을 받기도 했다.

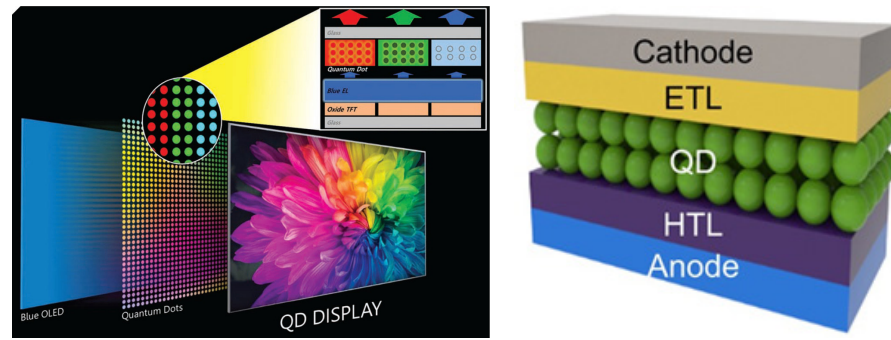
그림 1.4 크기에 따른 양자점의 색상 변화



출처: Goesmann & Feldmann, 2010.



그림 1.5 (a)광발광 형태의 양자점 디스플레이의 일반적인 구조(좌) 및 (b)전계발광 QLED의 일반적인 구조(우)



출처: (a) Smith et al., 2020; (b) Choi et al., 2018.

양자점 발광소자(Quantum Dot Light Emitting Diode: QLED)는 양자점을 발광층으로 사용하는 디스플레이 기술로, 국내외 학계 및 산업계에서 활발히 연구가 진행되고 있으며, 뛰어난 색 재현력, 높은 밝기, 긴 수명 등 우수한 성능으로 기대를 모으고 있다. 좁은 의미의 QLED는 양자점에 전기장을 가하여 전자(electron)와 정공(hole)을 주입하고, 이들이 재결합하면서 빛을 방출하는 전계발광(electroluminescence) 소자를 의미한다(그림 1.5). 전계발광 방식의 QLED 기술의 실용화는 아직 연구개발 단계에 있으며, 현재는 양자점이 LED 백라이트에서 나오는 빛을 흡수하여 순수한 색의 빛으로 재발광하는 광발광(photoluminescence) 방식의 양자점 디스플레이가 상용화되어 있다.

세라믹 나노입자는 금속의 산화물, 카바이드 등 낮은 전도도를 갖는 나노입자이지만, 원소의 종류에 따라 다양한 특성을 갖고 다방면에 활용된다. 태양전지에 활용되는 페로브스카이트 나노입자, MRI 조영제로 FDA 승인을 받은 산화철 나노입자, 광촉매로 활용되는 이산화티타늄 나노입자 등이 대표적인 예시들이다.

### 03 2023년 노벨화학상을 수상한 양자점 연구와 응용 기술

스웨덴 왕립과학원 노벨위원회는 2023년 노벨화학상 수상자로 미국 컬럼비아대 교수 Louis Brus, 러시아 출신의 물리학자 Alexei Ekimov, 미국 MIT 교수 Moungi Bawendi 등 3명의 양자점 연구자를 선정하였다. 1981년 반도체를 연구하던 Ekimov 박사는 아주 작은 염화구리 결정이 내부에 존재하는 비정질 유리에 빛을 쏘았을 때 내부의 염화구리 결정 입자 크기가 작을수록 유리가 흡수하는 빛의 파장이 짧아지는 것을 발견했다. 이 당시에는 발견된 입자가 유리 속에 존재하여 독립적인 입자로 합성이 어려웠다. 1983년 Brus 교수는 수용액 내에서 황화카드뮴(CdS) 나노입자를 합성하여 콜로이드 상태로 존재하는 양자점을 처음으로 구현하고 입자 크기에 따라 광학적 성질이 달라지는 양자효과를 입증하였다. Brus 교수의 합성법은 용매인 물의 끓는점이 낮아 원하는 크기의 정제된 양자점을 얻기 어려운 단점이 있었다. Brus 교수와 함께 양자점 합성법을 연구했던 Bawendi 교수는 이 문제를 해결하고자 고온주입법을 통한 열분해 반응을 고안했다. 300도 이상의 온도를 견딜 수 있는 계면활성제 용액을 고온으로 가열하고 유기금속 전구체와 음이온 전구체 혼합용액을 주입하여 양자점의 핵을 만든 다음, 전구체 용액 주입으로 온도가 낮아진 용매를 다시 가열하여 온도를 올리는 방법이다. 이를 통해 핵이 점차 성장하도록 하고 원하는 지점에서 가열을 중단하여 양자점의 크기를 조절할 수 있었다.

양자점은 다양한 나노기술 중 핵심 분야로 응용 가능성이 무궁무진하다. 노벨위원회는 세 사람의 연구가 TV, LED 조명, 세포와 장기의 매핑, 체내 종양 조직 추적 등에 활용되고 있으며 미래에는 유연 전자 소자, 작은 센서, 얇은 태양 전지, 암호화된 양자 통신 등에 기여할 것이라고 발표하였다(The Royal Swedish Academy of Sciences, 2023). 양자점을 비롯한 나노기술 연구가 본격적으로 시작된 건 1990년대의 일이다. 2019년 국제학술지 '네이처 나노테크놀로지'는 미국 정부가 20년간 추진해 온 국가나노기술개발전략(NNI)의 의의를 평가하는 논설에서 나노기술이 상용화되어 실재하는 사례로 QLED TV 디스플레이를 첫째로 꼽았다(Nature Nanotechnology, 2019). 최근 노벨상 수상 트렌드는 노벨이 이야기했던 유연, 즉 인류에게 도움이 되는 연구를 실천한 이에게 상을 수여하는 것이다. 상용화까지 이뤄지지 않으면 노벨상을 잘 수여하지 않는다는 의미에서 2023년 양자점 연구의 노벨화학상 수상에는 현재의 QLED 디스플레이 기술 성과가 나오게끔 연구개발을 이끌어간 삼성전자의 사업 추진과 성공이 상당한 역할을 했다고 본다. 실제로 소니가 카드뮴 양자점을 활용한 TV를 2014년 출시하였으나, 중금속인 카드뮴의 유해성을 제거하지 못하고 생산을 곧 중단했다. 2010년대 초반까지만 해도 카드뮴이 함유되지 않은 양자점은 발광효율이 매우 낮아 디스플레이 응용이 어려운 것으로 알려

저 있었다. 삼성종합기술원의 장은주 박사가 이끈 연구 개발팀이 발광효율과 안정성이 높은 비(非)카드뮴 양자점 기술을 독자 개발하여 TV 디스플레이에 적용한 기술 혁신은 학계에서도 예상하지 못한 지점에 도달했다는 데 큰 의미가 있다. 나노입자의 크기를 정밀하게 조절하고 양자점을 안정적으로 생산할 수 있는 기술을 개발하여 노벨화학상을 수상한 Bawendi 교수는 최근 삼성디스플레이의 초청으로 한국을 방문하여 가진 세미나에서 양자점 기술이 초고화질 디스플레이 분야에서 빠르게 발전하고 있으며 미래에는 바이오이미징, 광센서 등 다양한 응용 기술로 확대될 것으로 예측하였다. 관련 언론 보도에 따르면 삼성디스플레이는 양자점을 패널에 내재화한 QD-OLED 개발에 성공한 후 2021년 말 본격적인 양산에 돌입했으며 현재 프리미엄 TV 및 모니터 제품에 QD-OLED를 공급하고 있다. 올해 신제품인 3세대 QD-OLED에는 진화된 패널 구동 기술과 인공지능(AI) 기술이 접목돼, R·G·B 각각의 밝기를 합친 최대 밝기를 3,000니트(nit)까지 높였다고 밝혔다(홍상범, 2024.9.5).

# 2

## 균일한 나노입자 양산의 중요성과 승온법의 발명

## 균일한 나노입자 양산의 중요성과 승온법의 발명

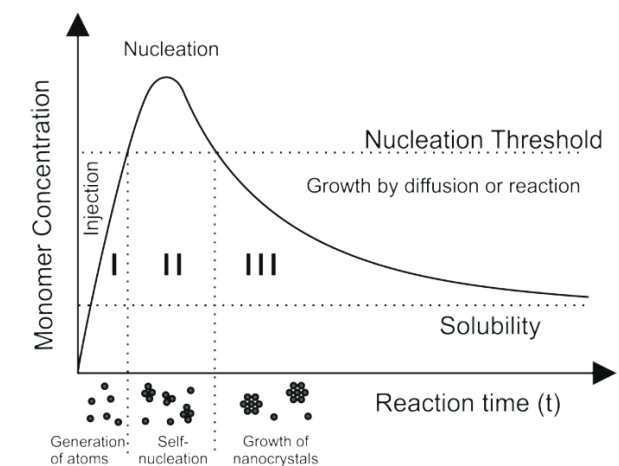
나노입자의 전기적, 광학적 재료 특성은 나노입자의 크기와 모양에 따라 크게 달라지기 때문에 QLED와 같은 디스플레이 소재나 전기 화학, 광화학 촉매로 나노입자를 활용하는 경우 그 균일성이 촉매나 소자의 효율에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 바이오 의료 분야에 응용될 때도 나노입자의 세포 흡수 및 생체 조직 내 분포, 세포 독성이나 체내에서 제거되는 경로에 나노입자의 크기와 모양이 결정적인 영향을 준다. 따라서, 나노입자를 성공적으로 응용하기 위해서는 합성 과정에서 나노입자의 크기 분포를 좁힐 수 있도록 나노입자를 분리하는 과정이 추가로 필요한데, 여러 번의 나노입자 분리 과정을 거쳐야 한다면 나노입자 양산의 효율성이 매우 낮아진다. 따라서, 지름의 표준편차가 5% 이하인 균일한 크기의 나노입자를 대량으로 양산하는 기술은 나노입자를 성공적으로 바이오 기술과 의료 분야, 에너지 기술과 소자 개발에 응용하고 생산 공정을 효율화하는 데 필수적이다.

콜로이드 합성법을 이용한 나노입자의 합성은 나노입자의 크기 제어를 위해 유기용매에 나노입자의 전구체와 계면활성제를 분산시켜 반응시키는 합성법이다. 1993년 MIT의 문지 바웬디(Moungi G. Bawendi) 교수 연구팀에 의해 균일한 CdSe 나노입자의 콜로이드 합성이 보고된 후로 지난 30여 년 동안 균일한 나노입자를 합성하는 매우 효과적인 방법으로 쓰였다. 1993년 보고된 CdSe 나노입자의 합성법은 계면활성제를 포함한 용매를 고온으로 가열한 후 유기금속 전구체를 빠르게 주입하는 방법으로 이루어졌고, 전구체를 고온의 용매에 주입했기 때문에 '고온 주입법(hot injection process)'으로 불린다(Murray et al., 1993). 고온의 용매에서 빠르게 나노입자의 핵이 형성되고 전구체의 확산으로 제어되는 성장(diffusion-controlled growth)이 이루어지기 때문에 균일한 나노입자의 성장이 가능하다. 고온 주입법의 이론적인 배경은 1950년 LaMer에 의해 제안된 나노입자의 핵 형성(nucleation)과 성장(growth)이 분리될 때 균일한 나노입자가 형성될 수 있다는 LaMer 이론이다(그림 2.1). 이 이론에 따르면 순간적으로 넣어준 전구체가 전구체의 과포화를 이루어 핵 형성을 빠르게 유도함으로써 나노입자의 균일성을 확보하게 된다. 특히, 고온 주입법에서 필수적인 올레산 및 올레일아민과 같은

긴 사슬 계면활성제(long chain surfactants)는 성장하는 나노입자의 표면에서 확산 장벽(diffusion barrier)으로 작용하여 전구체가 나노입자의 표면으로 이동하는 속도를 늦추는 역할을 한다. 따라서, 급격한 핵 형성과 확산으로 제어되는 성장을 모두 이룰 수 있는 고온 주입법은 다양한 유형의 나노입자 합성에 널리 적용되었다.

1993년 고온 주입법이 발명된 이후 이 방법으로 다양한 나노입자를 합성하는 데 성공했지만, 나노입자를 대량으로 양산하여 나노기술로 응용하기에는 한계가 있었다. 우선, 나노입자 합성의 상용화를 위해서는 배치(batch) 간 변동성을 줄여 재현 가능성을 높여야 하는데 고온 주입법은 배치 간 변동성이 큰 방법이었다. 가열된 계면활성제 용액에 전구체가 포함된 용액을 주입하게 되면 갑작스러운 온도 변화 및 농도 기울기가 생기는데, 소규모 실험실 배치에서는 이러한 불균일성이 빠르게 사라지고 균일한 반응 조건으로 바뀔 수 있다. 하지만, 대규모 배치에서는 불균일한 온도 및 농도 분포가 안정화되기까지 비교적 오랜 시간이 소요된다. 즉, 대량 생산할 때 고온주입법을 쓰게 되면 배치 간 변동성이 커질 뿐만 아니라, 합성 과정 중 불균일한 온도와 농도 때문에 나노입자의 크기 분포가 증가할 가능성이 매우 높아진다. 고온 주입법으로 합성한 나노입자의 크기 분포를 줄이기 위해 나노입자를 크기에 따라 분리하고 선택하는 공정을 추가할 수 있지만 이 경우 나노입자 합성에 걸리는 시간과 비용이 많이 늘어난다. 따라서 고온 주입법으로 한 번에 합성할 수 있는 나노입자의 양은 1g 이하에 불과했다는 한계가 있었고 대량 생산이 가능한 새로운 합성법이 필요했다.

그림 2.1 균일한 나노입자 합성 원리의 이론적 배경인 LaMer 이론



출처: LaMer & Dinegar, 1950.

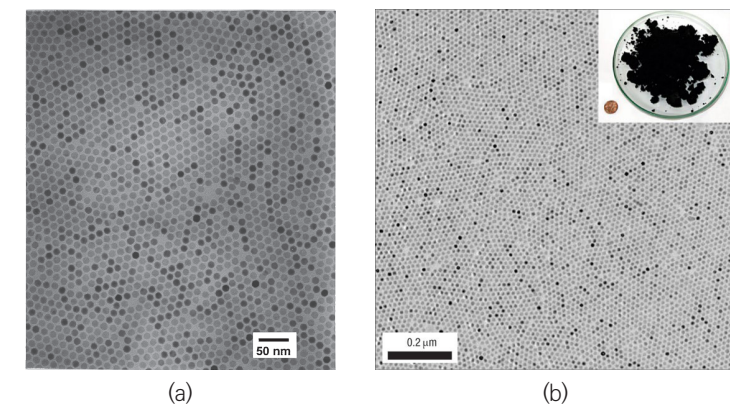


2001년 서울대학교 현택환 교수 연구팀은 고온 주입법을 대체할 수 있는 균일한 산화철 나노입자의 합성법을 발명했다. 고온의 계면활성제 용액에 전구체를 주입하는 대신, 유기 금속 전구체와 계면활성제를 저온의 비휘발성 용매에서 먼저 용해한 후 용액을 가열했다. 100°C에서  $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 와 올레산을 혼합하여 철-올레산 착화합물을 먼저 준비한 후에 반응 용액을 300°C로 가열하면 균일한 철 나노입자가 얻어지고, 트리메틸아민옥사이드를 이용하면 철 나노입자가 추가로 산화되어 최종적으로 균일한 산화철 나노입자를 합성할 수 있었다(그림 2.2a). 특히, 나노입자의 전구체인  $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 와 계면활성제인 올레산의 비율을 조절하여 균일한 나노입자의 크기를 4nm에서 11nm까지 정교하게 제어할 수 있었다. 고온 주입법과 비교했을 때 이 방법의 가장 큰 특징은 저온에서 합성에 필요한 재료를 혼합한 후 고온으로 가열하는 것만으로도 크기 선택 과정이 필요 없는 매우 균일한 크기의 나노입자를 합성할 수 있다는 것이다. 전구체를 고온에서 주입하는 방법과 구분하기 위해 이 방법은 후에 '승온법(heat-up process)'으로 명명되었고, 유기 금속 전구체를 이용한 승온법을 통해 다양한 크기, 모양, 조성의 나노입자가 성공적으로 합성되었다. 산화철 나노입자의 경우 이후 핵 매개 성장(seed-mediated growth)을 이용해 6nm부터 13nm까지 1nm 간격으로 정밀하게 크기를 제어하여 균일한 크기의 나노입자를 합성할 수 있었고, 유기 금속 착화합물의 혼합물을 사용해 균일한 망간 페라이트 및 코발트 페라이트 나노입자도 합성할 수 있었다. 그러나  $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 와 같은 유기 금속 전구체를 사용하는 공정은 비용이 많이 들고 상업화가 어려울 뿐 아니라, 합성 중 일산화탄소를 방출하여 질식을 유발할 수 있다는 단점이 있었다. 따라서 유기 금속 전구체를 대체해 비용을 절감하고 합성의 유독성을 낮출 방법이 개발될 필요가 있었다.

2004년 서울대학교 현택환 교수 연구팀, 미국 라이스 대학교 비키 콜빈(Vicki L. Colvin) 교수 연구팀(Yu et al., 2004), 아칸소대학교 샤오강 펑(Xiaogang Peng) 교수 연구팀(Jana et al., 2004) 등 세 개의 연구팀은 승온법을 이용해 철-올레산 착화합물로부터 균일한 산화철 나노입자를 합성하는 방법에 대해 각기 보고했다. 이 새로운 승온법은  $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 와 같이 비싸고 유독한 전구체를 사용하지 않고, 대신 금속 염화물과 올레산 나트륨과 같이 저렴하고 환경친화적인 물질을 이용했다는 점에서 나노입자의 양산을 가능하게 만든 중요한 발견이었다. 2004년 보고된 세 가지 합성법은 유사하면서도 철-올레산 착화합물을 준비하는 방식에 조금 차이가 있었다. 서울대학교 현택환 교수 연구팀은 철(III) 염화물과 올레산 나트륨을 친수성/소수성의 혼합 용매에서 70°C에서 4시간 동안 가열하여 철-올레산 착화합물을 준비했다. 이렇게 준비된 철-올레산 착화합물을 계면활성제와 함께 끓는점이 높은 유기 용매에 혼합한 후 320°C에서 열분해하여 균일한 산화철 나노입자를 합성했는데, 사용된 유기용매의

종류(끓는점)에 따라 5nm부터 22nm까지 다양한 크기의 나노입자를 성공적으로 합성할 수 있었다. Vicki Colvin 교수 연구팀과 Xiaogang Peng 교수 연구팀은 철-올레산 복합체의 열분해를 통해 균일한 산화철 나노입자를 합성했다는 점에서 유사하지만,  $\text{FeOOH}$  또는 철 염화물과 올레산을 반응시켜 철-올레산 복합체를 준비하는 과정에서 차이가 있었다. 독립적으로 보고된 세 연구팀의 합성 방법은 반응 온도와 시간이 매우 유사하며 결과적으로 생성된 나노입자의 크기도 비슷했다. 이렇게 개발된 금속-올레산 착화합물을 이용한 승온법은 단일 배치에서 최대 40g에 이르는 균일한 나노입자의 대량 합성을 가능하게 했다(그림 2.2b). 현택환 교수 연구팀이 기술 이전한 승온법으로 한화석유화학은 2009년에 파일럿 규모의 단일 배치로 1kg 이상의 균일한 10nm 크기의 산화철 나노입자를 성공적으로 생산했다고 발표하기도 했다.

그림 2.2 승온법을 이용해 합성한 균일한 산화철 나노입자의 전자현미경 사진



출처: (a) Hyeon et al., 2001; (b) Park et al., 2004.

금속-올레산 착화합물을 이용한 승온법은 그 후 산화철 나노입자의 합성에서 크롬 산화물, 망간 산화물, 코발트 산화물, 그리고 니켈 산화물까지 전이 금속을 기반으로 한 균일한 산화물 나노입자의 합성법으로 일반화되었다. 승온법은 새로운 종류의 나노입자를 발견하고 대량으로 양산할 수 있는 길을 열어주었는데, 예를 들면 코발트-올레산 착화합물을 이용한 승온법을 이용하면 자연에서 안정적인 암염(rock salt) 구조의 CoO 결정 구조 대신 나노 크기 효과로 인해 생성 에너지가 상대적으로 높은 우르자이트(wurtzite) 구조를 가지는 CoO 나노입자를 합성할 수 있었다. 또한, 여러 종류의 금속을 함께 포함하는 다중 금속 올레산 착화합물을 이용하면 승온법으로 다중 금속 산화물 나노입자도 합성할 수 있었다. 승온법은 이후 세륨 산화물, 란타넘 플루오라이드 나노입자의 합성에도 효과적인 것으로 밝혀졌고, 끊임없이 응용 범위를 넓혀가며 많은 종류의 나노입자 합성을 가능하게 했다.

# 3

## 나노입자 합성 기술 현황

- 승온법을 이용한 산화물 나노입자 합성 기술 현황
- 승온법을 이용한 금속 나노입자 합성 기술 현황
- 승온법을 이용한 반도체 나노입자 합성 기술 현황

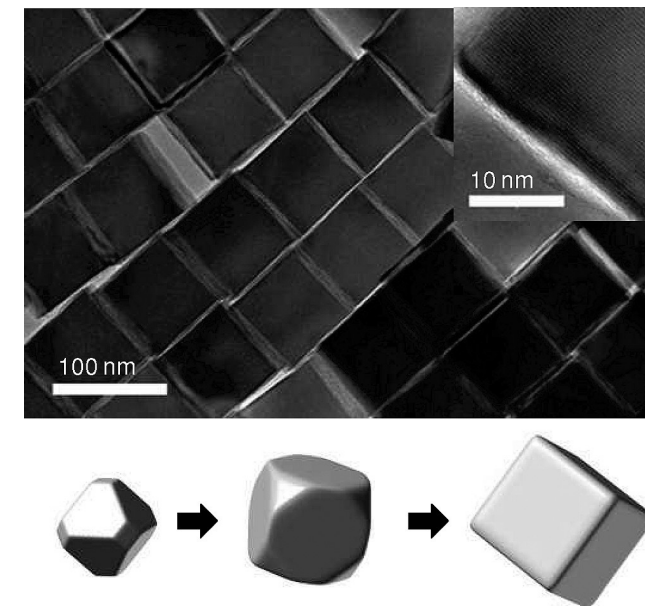
## 나노입자 합성 기술 현황

### 101 승온법을 이용한 산화물 나노입자 합성 기술 현황

승온법은 초기엔 산화철 나노입자의 대량 합성에 효과적인 것으로 알려졌으나, 이후 다양한 전이 금속 산화물 나노입자의 합성법으로 일반화되어 널리 적용되었다. 현재 산화철, 산화망가니즈, 산화코발트와 같은 전이 금속 산화물 나노입자에서는 승온법이 표준 합성법으로 받아들여지고 있다. 철-올레산 착화합물을 전구체로 하는 합성법 이외에 다양한 전구체로 합성이 가능하다는 것이 밝혀졌는데, 예를 들면 금속-아세틸아세톤 착화합물은 그 안정성과 비교적 저렴한 비용으로 승온법을 이용한 나노입자의 합성에 널리 쓰이게 되었다. 금속-아세틸아세톤 착화합물을 사용하더라도 나노입자가 형성되는 원리는 결국 반응 중 아세틸아세톤 착화합물과 올레산의 반응으로 금속-올레산 착화합물이 형성되는 점에서 금속-올레산 착화합물을 먼저 준비한 후 진행하는 승온법과 유사하다. 처음 보고되었을 때보다 더욱 작은 1.5nm 산화철 나노입자부터 훨씬 큰 79nm의 산화철 나노입자까지 크기를 제어할 수 있는 등 합성 방법도 한층 발달했으며(그림 3.1), 따라서 나노입자의 전자기적 성질을 포함한 물리화학적 성질을 더욱 정교하게 조절할 수 있게 되었다.

또한, 3d 전이 금속 산화물을 넘어 더 많은 범위의 산화물 나노입자를 합성할 수 있는 졸-겔 방법을 이용한 승온법도 새로 개발되었다. 일반적인 졸-겔 방법을 통해 산화물 나노입자를 합성하면 크기가 불균일한 나노입자들이 생성된다. 이러한 단점을 보완하여 나노입자 표면에 확산 장벽을 만들어서 졸-겔 방법에서도 균일한 나노입자를 합성할 수 있게 되었다. 예를 들어, 지르코늄 아이소프로폭사이드와 지르코늄 염화물을 트리옥틸포스핀 옥사이드 용매 340℃에서 반응시켜 4nm 크기의 균일한 지르코니아 나노입자를 합성하기도 했다. 이때, 긴 사슬의 트리옥틸포스핀 옥사이드 분자들이 나노입자의 금속 핵에 결합하여 확산 장벽으로 작용한다. 그 외에 산화세륨(세리아) 나노입자 또한 비슷한 방식으로 승온법을 이용해 균일하게 합성할 수 있었다.

그림 3.1 승온법을 이용한 79nm 크기의 산화철 나노입자 합성



출처: Kim et al., 2009.

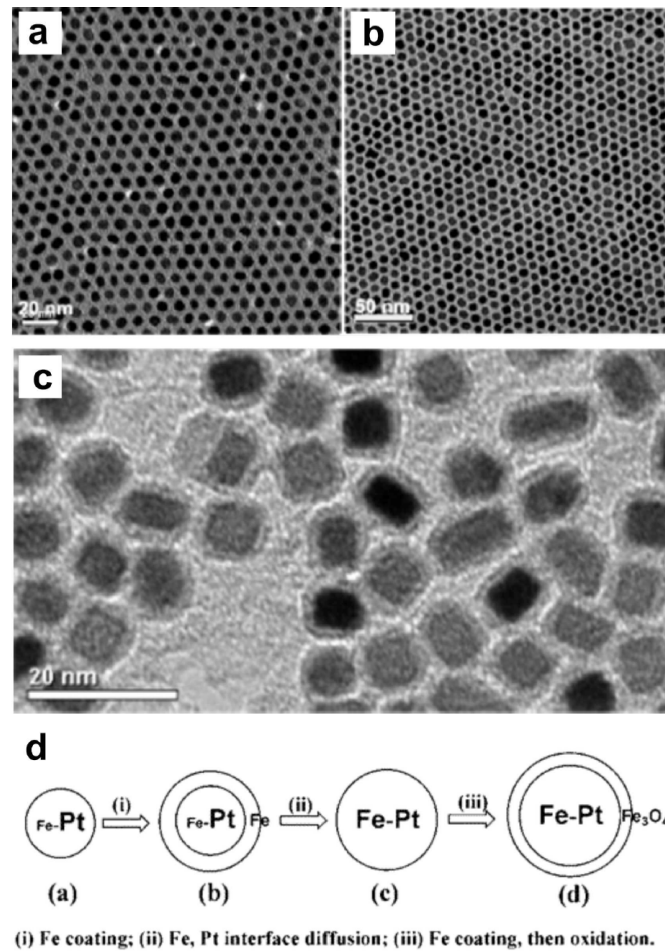
### 102 승온법을 이용한 금속 나노입자 합성 기술 현황

승온법의 원리는 금속-유기 리간드 복합체를 만들고 온도를 올려 열분해를 통해서 나노입자를 만드는 것이다. 위 원리는 산화물뿐만 아니라 금속 나노입자의 합성에도 응용되었다. 실제 산업에서 촉매로 많이 쓰이는 팔라듐(Pd)을 나노입자로 만들기 위해서는 우선 Pd-트리옥틸포스핀 복합체를 합성한다. 이후, 승온법을 이용해 온도를 올리면 복합체가 열분해 되면서 팔라듐 나노입자를 얻을 수 있다. 이때, 추가 반응물인 올레일아민을 사용하면 팔라듐 나노입자의 크기를 조절할 수도 있다. 마찬가지로 촉매로 많이 쓰이는 백금(Pt)을 나노입자로 합성하기 위해서는 암모늄 테트라클로로플래티네이트를 테트라메틸암모늄 브로마이드와 폴리비닐피롤리돈과 섞어서 백금 복합체를 먼저 만들어준다. 이 용액을 160℃에서 2시간 동안 가열해서 열분해를 유도하면 백금 나노입자가 합성된다.



귀금속인 팔라듐과 백금 금속 나노입자 이외에도 전이 금속인 철과 코발트 나노입자도 비슷한 방법으로 합성할 수 있다. 또한 단일 전이 금속 나노입자뿐만 아니라 합금 나노입자도 승온법을 이용하여 합성할 수 있다. 예를 들어,  $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 와  $\text{Pt}(\text{acac})_2$ 을 혼합하고 유기 리간드와 함께 전구체를 만들어서 250°C에서 열분해하면 FePt 나노입자가 형성된다. 전구체를 만들 때 들어가는 철과 백금의 비율을 조절하면 FePt 이외에도  $\text{Fe}_3\text{Pt}$  또는  $\text{Fe}_7\text{Pt}_3$ 와 같은 다양한 철-백금 합금 나노입자를 합성할 수 있다(그림 3.2).

그림 3.2 승온법을 이용한 금속 & 합금 나노입자 합성



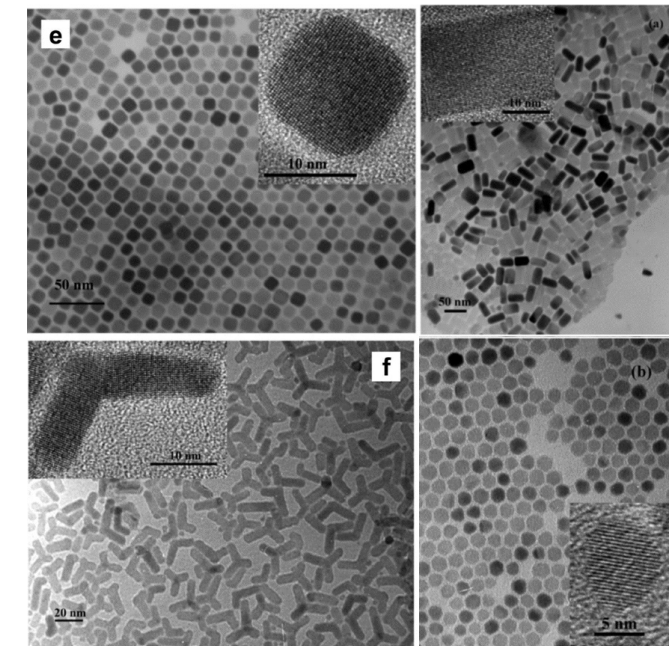
출처: Chen, Liu & Sun, 2004.

### 03 승온법을 이용한 반도체 나노입자 합성 기술 현황

승온법을 응용해서 금속 산화물 이외에도 반도체 나노입자를 콜로이드 합성법으로 합성할 수 있다. 산화물 나노입자의 합성과 비슷하게 금속염화물과 올레일아민을 90°C 진공상태에서 반응시켜 전구체를 우선 준비한다. 이후 황을 넣어주고 220°C로 가열하여 열분해를 일으키면 균일한 금속 황화물 나노입자를 합성할 수 있다. 이 방법을 이용하면 균일한 크기의 PbS, ZnS, CdS, MnS 나노입자를 성공적으로 합성할 수 있다. 또, 황원소 대신에 알켄싸이올을 황의 전구체로 사용하여도 균일한 황화물 반도체 나노입자를 합성할 수 있다(그림 3.3).

반도체 나노입자를 합성할 때 반응물의 반응성 차이를 이용하여 코어/셸 나노입자를 합성할 수도 있다. InP/ZnS 코어/셸 반도체 나노입자의 경우 승온법을 이용하면 두 번의 공정을 거치지 않고 한 번의 공정으로 합성할 수 있다. 모든 전구체를 한 반응기에 넣고 온도를 높이면 인듐과 인 전구체의 높은 반응성으로 먼저 InP가 형성되고, 이후에 상대적으로 반응성이 낮은 ZnS 셸이 미리 생성된 InP 나노입자의 표면에서 성장하여 InP/ZnS의 코어/셸 구조를 형성하게 된다(Li & Reiss, 2008).

그림 3.3 승온법을 이용한 반도체 나노입자 합성



출처: Joo et al., 2003.

# 4

## 나노입자의 응용기술 현황

- 의약
- 양자점 및 이를 활용한 발광 다이오드 소자
- 에너지 소자

## 나노입자의 응용 기술 현황

### 101 의학

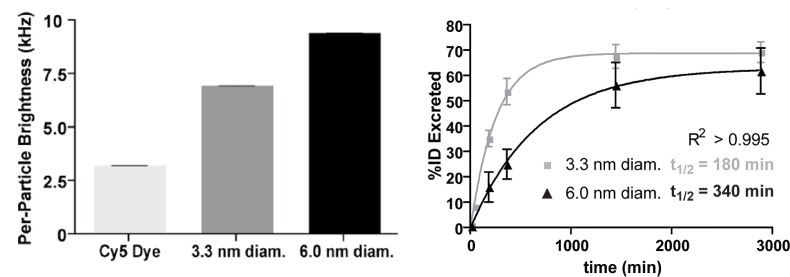
#### 4.1.1. 진단

##### 4.1.1.1. 빛 기반 진단

빛 기반 진단은 비교적 저렴하고 휴대 가능한 기기를 활용하여 높은 해상도로 세포나 조직의 이미지를 실시간으로 얻을 수 있다는 점에서 큰 관심을 받고 있다. 이에 나노입자를 활용한 빛 기반 진단 기술이 많이 개발되었는데, 대표적으로 실리카 나노입자가 높은 광학 투과도, 안정성, 로딩 용량을 보이기 때문에 가장 많이 사용되었다. 실리카 나노입자를 사용하여 염료를 로딩시키면, 염료가 독자적으로 존재할 때 비해 밝기나 안정도가 증가한다는 연구가 많이 보고되었다.

미국 코넬대학교(Cornell University) Ulrich Wiesner 교수 연구팀은 'Cornell-dots(C-dots)'라는 실리카 나노입자 기반의 형광 염료를 개발하였다. C-dots는 크기가 작아서 우리 몸에 들어가면 소변으로 빠져나올 수 있어 실리카 나노입자의 장기(long-term) 독성 영향을 배제할 수 있다는 장점이 있다. 이는 현재 나노입자를 활용한 빛 기반 진단 기술 중 가장 뛰어난 성과를 보인 연구라 할 수 있고, 실리카 나노입자 중 유일하게 FDA 승인을 받은 물질이다. C-dots는  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{124}\text{I}$ 와 같은 방사성동위원소를 추가 로딩함으로써 양전자 방출 단층촬영에도 활용될 수 있다.

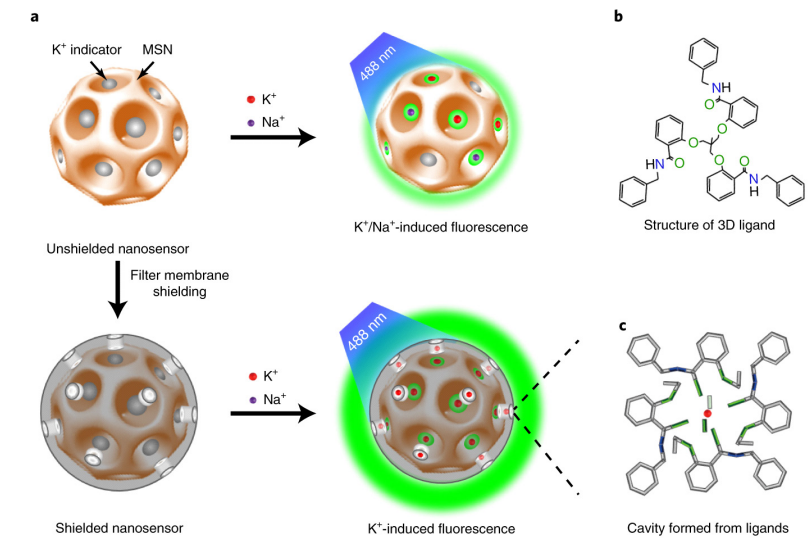
그림 4.1 소변 배출이 가능할 정도로 매우 작은 실리카 나노입자 기반의 형광 염료 연구



출처: Lin et al., 2009.

서울대학교 현택환 교수 연구팀은 실리카 나노입자를 활용하여 특정 물질만을 감지할 수 있는 시스템을 개발하였는데, 대표적으로 뇌세포 외부에 있는 칼륨 이온을 선택적으로 감지함으로써 뇌전증을 진단하는 연구를 보고하였다. 이는 기존 칼륨 프로브가 칼륨 이온과 나트륨 이온을 구분할 수 없다는 한계를 해결하기 위해 칼륨 프로브를 담지한 실리카 나노입자 표면에 칼륨 이온만 선택적으로 통과시킬 수 있는 막을 결합한 시스템이다. 이 막은 칼륨 이온과 나트륨 이온의 크기를 구분함으로써 둘 중 칼륨 이온만을 통과시킬 수 있다. 뇌전증이 심할 경우 세포 외부 칼륨 이온 농도가 매우 높아지기 때문에 이를 감지함으로써 뇌전증을 진단할 수 있다.

그림 4.2 실리카 나노입자 기반의 칼륨 프로브 연구



출처: Liu et al., 2020.

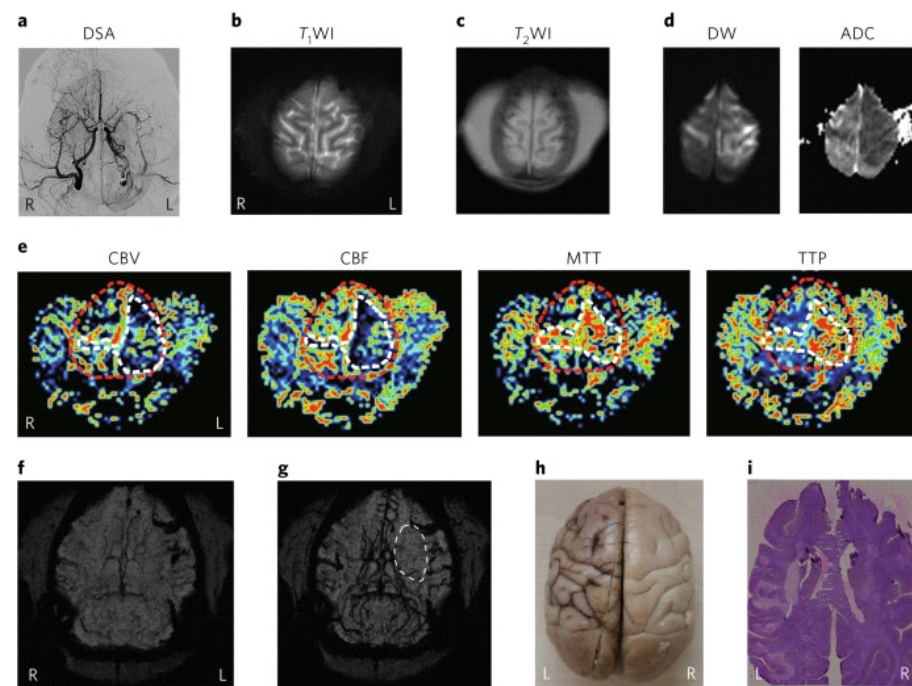
##### 4.1.1.2. 자기장 기반 진단

빛 기반 진단은 대부분 에너지가 높은 빛, 즉 파장이 짧은 빛에 의존하기 때문에 실제 몸에 사용되기에는 투과성 측면에서 한계가 있는데, 자기장 기반 진단은 이러한 문제를 극복할 수 있어 그동안 매우 많은 연구가 진행되었다. 특히, 나노입자 중 산화철 나노입자는 크기에 따라 자기적 성질이 달라지면서 T1, T2 MRI 조영제로 모두 사용할 수 있어 많은 관심을 받아왔다. 산화철 나노입자가 2~3nm일 때에는 상자성과 유사한 성질을 가져 T1 MRI 조영제로 사용 가능한데, 크기가 더 커지면 초상자성, 페리 자성을 나타내면서 T2 MRI 조영제로 사용 가능하다.



서울대학교 현택환 교수 연구팀은 최초로 산화철 나노입자가 2~3nm일 때 T1 MRI 조영제로 사용할 수 있음을 밝혔다. 특히 대량 합성에도 성공하였고, 비글(개), 마카크(원숭이)와 같은 대동물에서 안정성을 입증함으로써 임상 가능성을 높였다. 가돌리늄 기반의 기존 T1 MRI 조영제는 저분자라서 혈액 내에서 빨리 제거되어 효과적인 이미징을 할 수 없는 단점을 산화철 나노입자가 개선할 수 있었다.

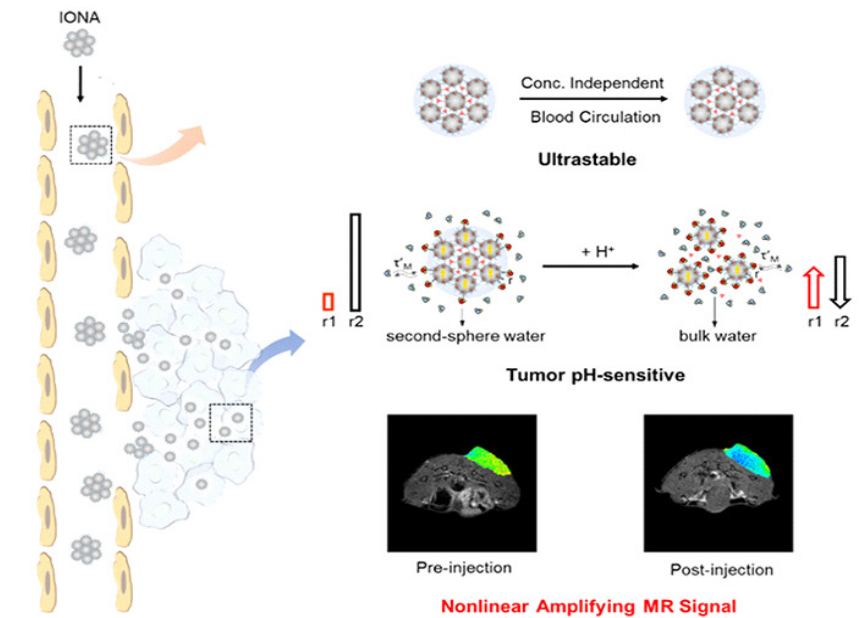
그림 4.3 산화철 나노입자 기반의 MRI 조영제를 활용한 대동물 이미징 연구



출처: Lu et al., 2017.

서울대학교 현택환 교수 연구팀은 특정 물질에 반응하여 신호가 바뀌는 molecular MRI용 조영제 개발에도 힘썼는데, 대표적으로 pH에 따라 산화철 나노입자의 결합 정도를 바꾼 연구를 진행하였다. 2~3nm 산화철 나노입자 사이를 히드라존 결합으로 연결하면 크기가 커진 효과가 나타나서 T2 MR 조영 효과가 나타나는데, 산성 조건에서는 결합이 분해되면서 2~3nm 입자가 독자적으로 존재하게 되어 T1 MR 조영 효과를 보인다. 이는 암의 미세환경이 약한 산성을 띠는 점을 이용하여 암 진단용 MRI 조영제로 사용되었다.

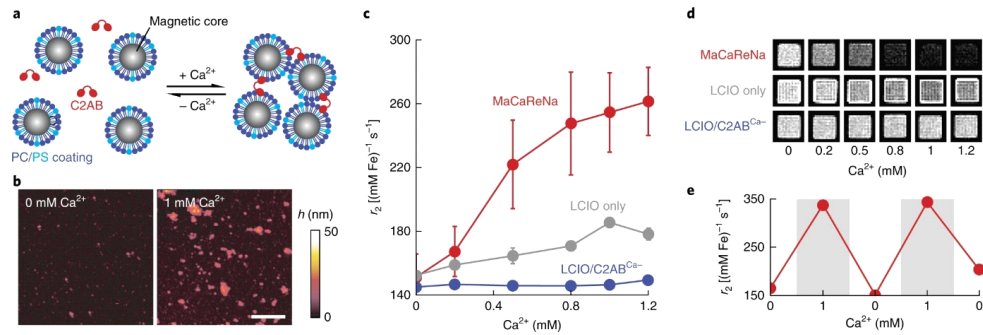
그림 4.4 pH에 따라 신호가 바뀌는 산화철 나노입자 기반의 MRI 조영제 연구



출처: Li et al., 2019.

미국 MIT의 Alan Jasanoff 교수 연구팀은 molecular MRI 조영제 개발에 있어서 특히 뇌에 사용하는 functional MRI(fMRI)와 관련하여 많은 연구를 진행하였는데, 대표적으로 뇌 신호 전달에 많은 영향을 주는 칼슘 이온에 반응성이 높은 fMRI 조영제를 개발하였다. 산화철 나노입자 표면에 칼슘 이온과 결합할 수 있는 물질을 노출하여 칼슘 이온이 있을 때 산화철 나노입자가 뭉칠 수 있는 시스템을 제안하였다. 산화철 나노입자 뭉침으로 크기가 커지는 효과가 나타나면서 T2 MRI 조영 효과가 더욱 극대화되는 원리로, 이를 통해 뇌의 칼슘 이온을 측정함으로써 뇌 활동 정도를 분석하였다.

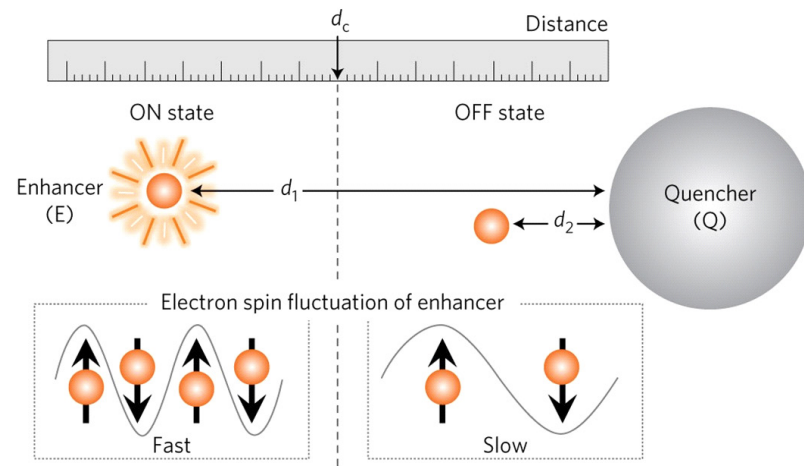
그림 4.5 칼슘 이온에 따라 신호가 바뀌는 산화철 나노입자 기반의 MRI 조영제 연구



출처: Okada et al., 2018.

연세대학교 천진우 교수 연구팀은 molecular MRI의 민감도를 더 향상하기 위해 magnetic resonance tuning(MRET) 개념을 도입하였는데, 이는 T2 조영제와 T1 조영제가 서로 근처에 있을 때 T1 조영 효과가 없어진다는 점을 활용한 것이다. 조영제 간의 거리는 다양한 방식으로 조절될 수 있는데, 대표적으로 단백질의 접힘 정도 조절, 리간드의 결합 및 분해 등이 있다. 이는 펄스 공명 에너지 전이에서부터 비롯된 개념을 자기장에 적용한 최초의 연구이다.

그림 4.6 MRET 기반의 molecular MRI 조영제 연구



출처: Choi et al., 2017.

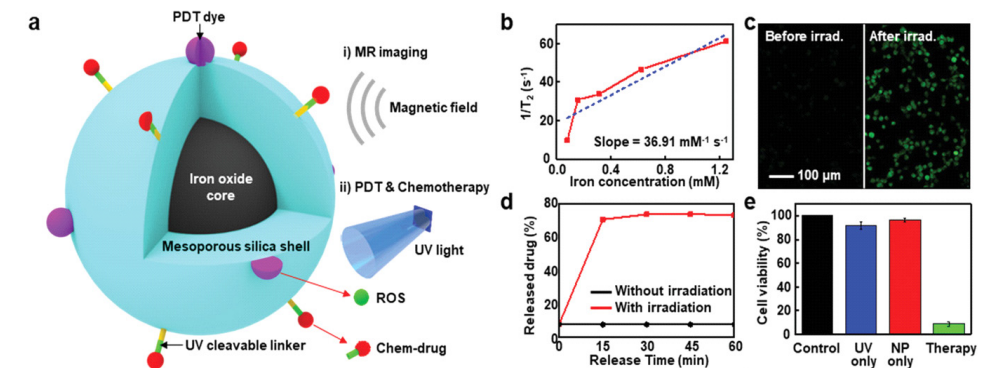
#### 4.1.2. 항암치료

암은 여러 난치병 혹은 불치병 중 사망 원인 1위에 해당하는 질병으로, 암을 치료하고자 하는 노력은 오래전부터 매우 활발하게 이루어졌다. 대표적인 항암제로는 화학항암제, 면역항암제, 대사항암제 등이 있다. 화학항암제는 비교적 값이 저렴해 현재까지 가장 많은 환자에게 시도될 수 있었지만, 암세포에만 특이적으로 작용하는 것이 아니라서 부작용이 크고, 암세포가 화학항암제에 대한 저항성을 갖게 되어 효과가 떨어지는 것이 큰 문제이다. 이에 환자 자체의 면역 시스템을 활용하여 면역 세포들이 강력하게 암을 죽일 수 있도록 설계한 면역항암제가 많은 인기를 누리고 있는데, 이는 환자 맞춤형으로 개발해야 해서 아직 너무 비싸다는 한계가 있다. 이러한 점에서 암세포에 특이적인 물질대사를 표적화(targeting)하여 큰 부작용 없이 다양한 환자에게 적용할 수 있는 대사항암제가 차세대 항암제로 각광받고 있다. 여기에서는 나노입자를 기반으로 한 화학항암제, 면역항암제, 대사항암제에 대한 연구를 소개하고자 한다.

##### 4.1.2.1. 화학항암제

서울대학교 현택환 교수 연구팀은 특정 자극에 반응하여 화학항암제를 방출하는 약물 전달 시스템을 개발하였다. 빛을 쬔었을 때 나노입자와 화학항암제 결합이 끊어지면서 화학항암제가 암세포에 전달되는 시스템에 투명한 재료의 마이크로니들을 추가하여 높은 에너지의 빛을 깊은 곳까지 도달시킬 수 있었다.

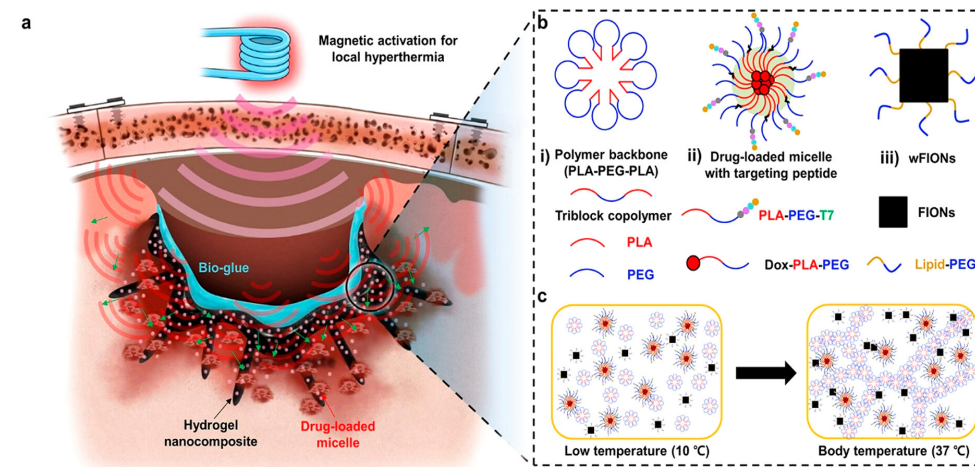
그림 4.7 빛에 의해 조절되는 약물 전달 시스템 연구



출처: Lee Y et al., 2021.

한편, 뇌암 치료 후 잔존 암으로 인해 재발 우려가 높은 문제를 해결하고자 하이드로젤을 활용한 화학항암제 전달 방법을 개발하였다. 수술 부위에 주입할 수 있는 하이드로젤에 포함된 화학항암제가 장기간에 걸쳐 전달될 수 있도록 뇌의 성질에 맞게 하이드로젤의 물성을 조절하였다.

그림 4.8 하이드로젤을 활용한 약물 전달 시스템 연구

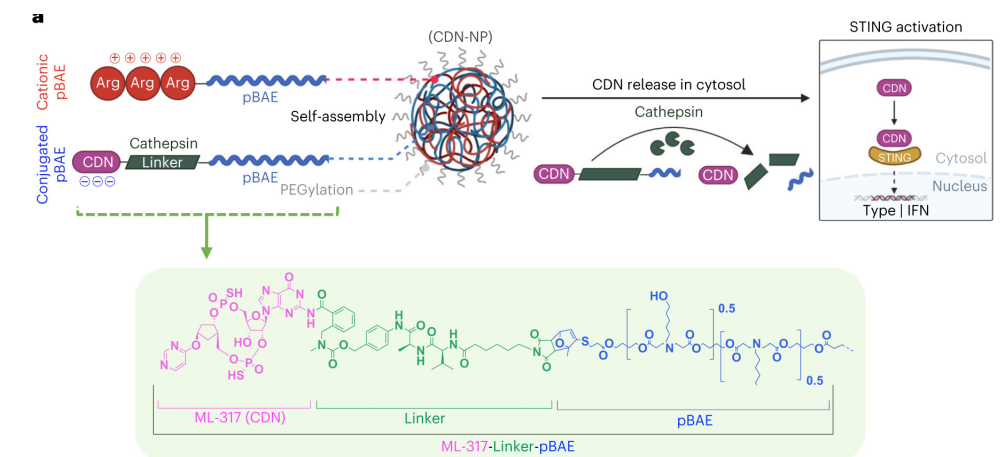


출처: Kang et al., 2023.

#### 4.1.2.2. 면역항암제

미국 하버드대학교 Natalie Artzi 교수 연구팀은 sensor stimulator of interferon genes(STING)를 활용한 면역항암제를 개발하였다. STING은 면역 세포들을 리크루팅 혹은 활성화할 수 있고 자연살해세포의 기능을 향상시키며 T 세포 기반의 암 치료 효과를 극대화할 수 있는 장점이 있다. 대표적인 STING 작용제인 cyclic dinucleotide(CDN)는 음전하성 저분자 물질로, 암의 세포질까지 전달하는 기술이 필수적이다. 이와 관련하여 자기조립이 가능한 양전하성 고분자와 CDN을 연결해 주되, 암에 들어가서 cathepsin에 의해 그 연결이 끊어지는 시스템을 설계하였다. 연결이 끊기면 CDN이 방출되고, 양전하성 고분자에 의해 라이소좀 팽창이 유도되면서 세포질로 CDN이 도달하게 된다.

그림 4.9 STING 작용제 전달을 위한 고분자 나노입자 연구

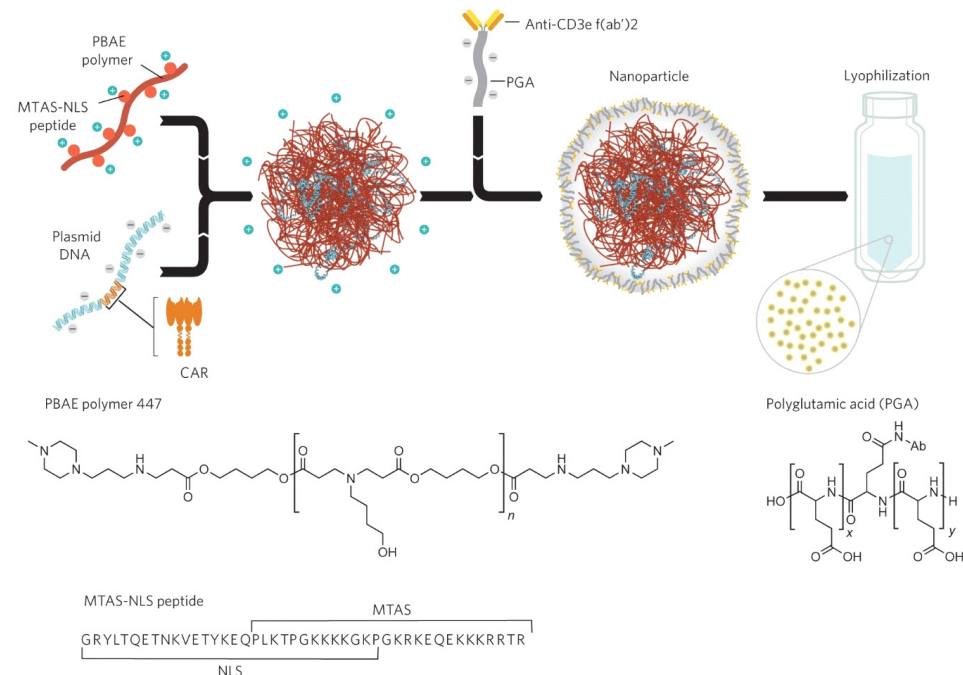


출처: Dosta et al., 2023.

미국 워싱턴대학교 M. T. Stephan 교수 연구팀은 T 세포를 유전적으로 변형시킨 chimeric antigen receptor(CAR) T 기반의 면역항암제를 위해 림프구를 특이적으로 표적화하는 고분자 나노입자를 활용하였다. CAR를 프로그래밍할 수 있는 DNA를 사용하였고, 이에 우선 세포질 도달을 위해 양전하성 고분자, 핵 도달을 위해 특정 서열의 펩타이드를 사용하였다. 림프구를 표적화할 수 있는 항체를 추가로 나노입자 표면에 노출시켜 림프구에 특이적으로 작용하는 시스템을 고안하였다.



**그림 4.10** 림프구에 특이적으로 작용하는 CAR-T 치료제 개발을 위한 고분자 나노입자 연구

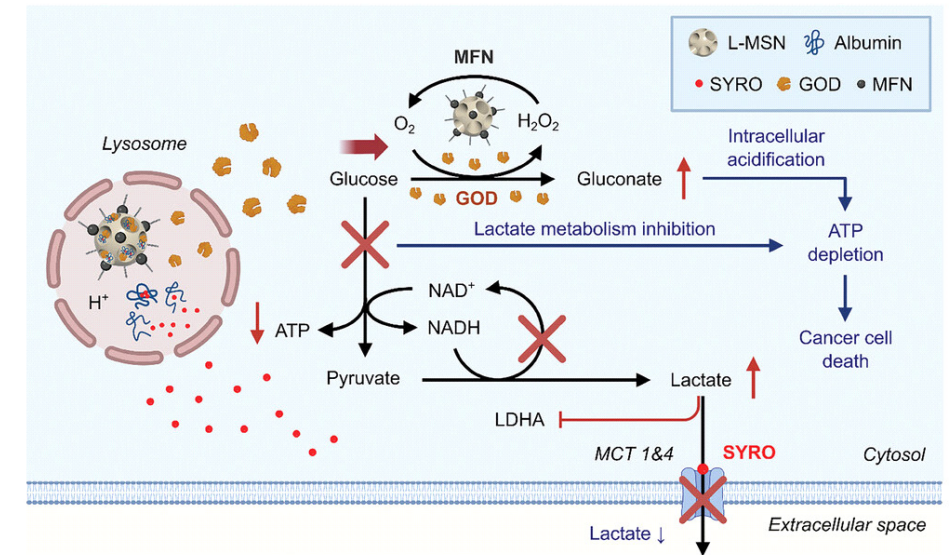


출처: Smith et al., 2017.

#### 4.1.2.3. 대사항암제

서울대학교 현택환 교수 연구팀은 암세포의 에너지 생산에 젖산 발효와 알칼리성 세포 내부 환경이 필수적인 점에 착안하여 새로운 암 치료법을 개발하였다. 젖산 수송 전달체를 저해하면, 세포 내부에 젖산이 축적되면서 젖산 발효가 막히고 포도당이 쌓이게 되는데, 포도당 산화효소를 통해 많은 양의 글루콘산을 합성하면서 젖산 발효 억제와 세포 내부 산성화를 유도하는 것이다. 이를 위해 화학항암제와 단백질 기반 항암제를 동시에 전달해야 하는데, 큰 기공의 메조다공성 실리카 나노입자를 사용하였고, 이때 작은 크기의 화학항암제를 위해 알부민 단백질을 추가적인 전달체로 이용하였다.

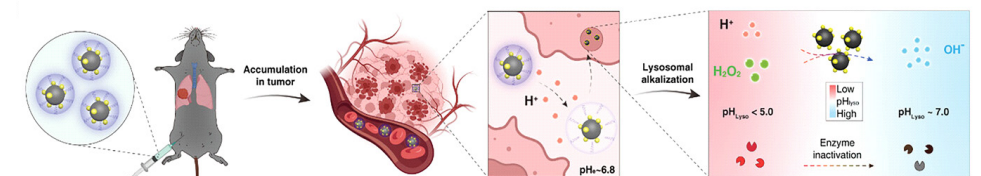
**그림 4.11** 젖산 발효 억제와 세포 내부 산성화를 통한 암 치료 연구



출처: Lee B et al., 2023.

서울대 현택한 교수 연구팀은 암세포의 원활한 물질대사를 위해서는 라이소좀의 기능이 중요함에 착안하여 암세포의 라이소좀을 억제함으로써 암을 치료하는 연구를 진행하였다. 이를 위해 산화철 나노입자와 세리아 나노입자가 결합된 형태를 사용하였는데, 산화철 나노입자는 암세포 라이소좀의 강한 산성 환경에서 과산화수소로부터 수산화 라디칼을 생성하고, 세리아 나노입자는 수산화 라디칼을 수산화 이온으로 바꾸는 역할을 한다. 이에 따라 암세포에서 특이적으로 라이소좀이 알칼리화됨을 확인하였고, 라이소좀 기능 억제로 인해 자기포식 작용이 일어나지 않아서 부작용 없이 암뿐만 아니라 전이된 암까지 치료할 수 있음을 밝혔다.

**그림 4.12** 암세포 라이소좀 억제를 통한 암 치료 연구



출처: Pan et al., 2024.

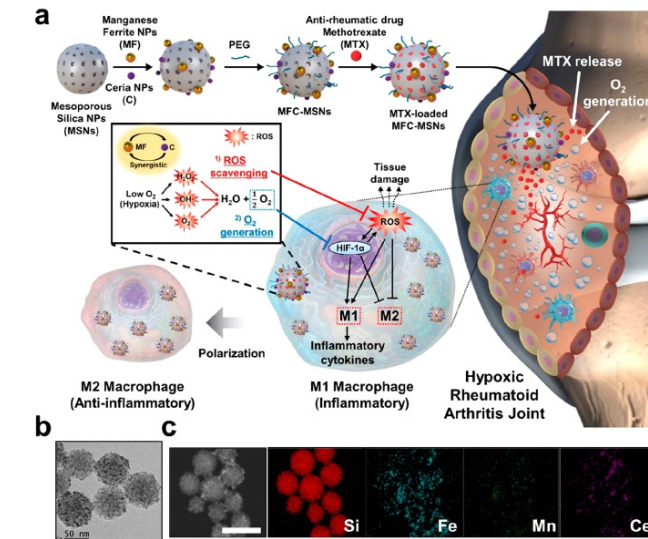
### 4.1.3. 나노촉매 기술을 이용한 의약 기술

촉매의 성질을 지니는 나노 물질을 활용한 의약 기술은 무기 나노 화학 분야와 바이오의 의약학 분야가 결합된 첨단 융합 학문으로 분류할 수 있다. 대표적인 예로, 촉매의 성질을 지니는 다양한 금속 산화물 계열 나노입자는 체내에서 산소 계열 분자들이나 활성산소를 생성·제거하는 과정에 보조적 역할을 담당하거나 직접적인 반응을 진행하는 매개체로 작용할 수 있다. 이러한 물질이 관여하는 화학 반응이 생체 내에서 진행되도록 유도하고, 더 나아가 실제 의약품으로 개발하고자 하는 학문적인 연구들이 진행되고 있다. 촉매의 성질을 지닌 나노 구조체와 기존 약물을 같이 활용하거나, 새로운 복합체를 형성하거나, 이를 기반으로 한 화학적, 생물학적 변형을 통해 새로운 물질을 개발하여 의약적 가치를 창출하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

#### 4.1.3.1. 활성산소 제거를 위한 항산화 나노촉매 기술

서울대 현택환, 김병수, 국민대 이노현 교수의 공동 연구팀에서는 2019년 망간 페라이트(manganese ferrite)와 세리아 나노입자가 코팅된 다공성 실리카 나노입자(MFC-MSNs)를 개발하여 류마티스 관절염을 치료하는 데 성공하였다. 류마티스 관절염의 경우, 관절 활막에서 나타나는 산소 부족은 HIF-1 $\alpha$  발현을 증가시키고 활성산소 생성을 유도하여 염증을 악화시킨다. 개발된 MFC-MSNs은 활성산소 제거와 산소 공급을 통해 염증성 M1 대식세포를 줄이고 항염증성 M2 대식세포를 유도하였다. 세리아 나노입자는 망간 페라이트가 산소를 생성하는 과정에서 생기는 중간체 산화물질들을 제거하여 M1에서 M2 대식세포로의 전환을 촉진했다. MFC-MSNs를 류마티스 관절염이 유도된 쥐 모델에 투여한 결과, 저산소증과 염증이 완화되었고, methotrexate 약물을 같이 전달하여 지속적으로 방출함으로써 치료 효과를 증대시켰다.

그림 4.13 MFC-MSNs의 디자인과 구조 및 류마티스 관절염의 효과적 치료 과정 모식도

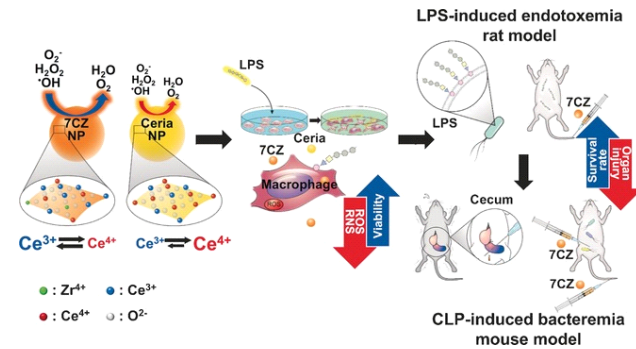


출처: Kim J et al., 2019.

서울대 현택환, 이승훈 교수 연구팀에서는 활성산소 제거 능력이 향상된 세리아-지르코니아 나노입자를 개발하였다. 세리아 나노입자의 경우  $Ce^{3+}$ 와  $Ce^{4+}$  산화 상태의 존재 비율 등이 활성 산소를 제거하는 데 중요한 역할을 하며, 특히  $Ce^{3+}$ 는  $O_2^-$  및 OH 라디칼을 제거하여 염증 반응 및 세포 사멸을 억제한다. 이 연구에서는 기존에 합성되었던 세리아 나노입자보다 표면에서 높은  $Ce^{3+}/Ce^{4+}$  비율을 가지며,  $Ce^{4+}$ 에서  $Ce^{3+}$ 로 보다 빠르게 전환되는 세리아-지르코니아 나노입자를 합성했다. 세리아-지르코니아 나노입자는 활성산소 제거 성능이 크게 향상되어 소량으로도 염증 세포를 조절하는 데 효과적이었다. 또한, 두 가지 패혈증 모델에서 사망률과 전신 염증을 줄이는 데 효과적임을 입증했다. 이 결과는 세리아-지르코니아 나노입자가 활성산소 관련 염증성 질환 치료에 유망한 치료제임을 시사한다.

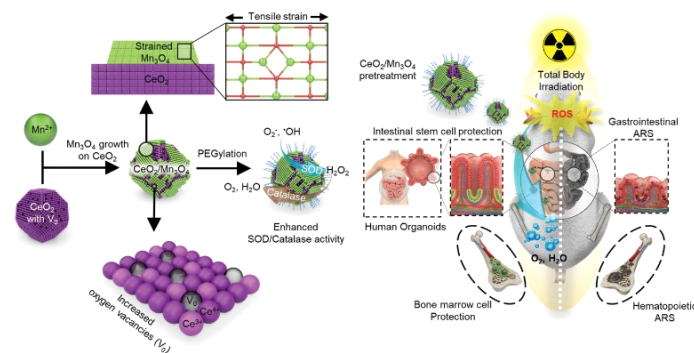


그림 4.14 세리아-지르코니아 나노입자의 활성 제거 작용 메커니즘 및 패혈증 치료 효과



출처: Soh et al., 2017.

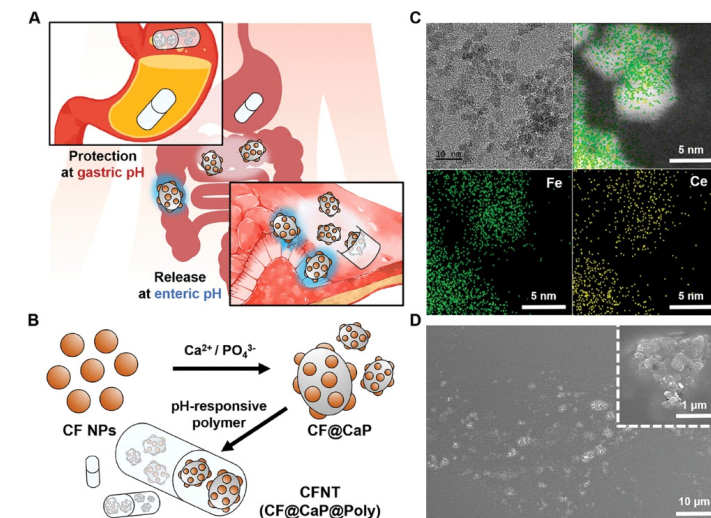
활성산소 제거 능력 향상을 위한 다른 전략으로 현택환, 박경표 교수 연구팀에서는  $\text{CeO}_2/\text{Mn}_3\text{O}_4$  나노입자를 개발하여 전신 방사선 보호에 활용하였다. 항산화 특성을 가진 나노소재는 활성 산소종 관련 질병 치료에 유용하게 쓰일 수 있으나, 실제 임상 적용을 위해서는 저용량의 투여에서도 그 효과를 유지하고 독성 부작용을 최소화하는 것이 중요하다. 이 연구에서는  $\text{CeO}_2/\text{Mn}_3\text{O}_4$  나노결정의 표면 변형을 유도하여 촉매 활성을 높인 항산화제를 개발하였다. 망간 산화물( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ )층이 세리아( $\text{CeO}_2$ ) 나노결정의 표면에 형성되면서 산소 배출로 인한 산소 결핍 구조가 증가해 촉매 성능이 향상되었다. 이 나노결정은 장내 줄기세포를 방사선으로 인한 활성산소 손상으로부터 보호하며, 소량으로도 전신 급성 방사선 증후군을 예방하고 생존율을 높이는 효과를 보였다.

그림 4.15  $\text{CeO}_2/\text{Mn}_3\text{O}_4$  나노입자의 개발 및 방사선 유도 활성산소 기반 손상의 보호 효과

출처: Han et al., 2020.

위에서 소개한 세리아 기반 나노입자는 다양한 염증성 질환 치료에 유의미한 효과를 보였으나, 안전성 문제와 제한된 전달 시스템으로 임상 적용에 어려움이 있다. 염증성 장 질환은 특성상 장내 면역 체계를 조절하는 다양한 치료법이 필요한데, 김치경 교수, 현택환 교수, 소민 박사 연구팀에서 기존 세리아 나노입자보다 촉매 활성이 강화되고 독성 위험이 낮은 철-세리아 나노입자를 합성하여 경구용 제형으로 개발하였다. 철-세리아 나노입자는 칼슘 인산염으로 응집되어 pH 보호성 고분자로 코팅된 철-세리아 나노 정제(nanotablet) 형태로 추후 가공되었다. 이러한 나노 정제는 덱스트란 황산나트륨으로 유도된 장염 모델에서 대식세포와 호중구 등 면역 세포의 염증 반응을 억제하고, 항염증성 사이토카인 생성을 촉진하며, 염증 경로의 주요 전사 인자를 감소시켜 장염 증상을 완화했다.

그림 4.16 철-세리아 나노 정제의 위장관 내 작용 메커니즘 및 화학적 구조



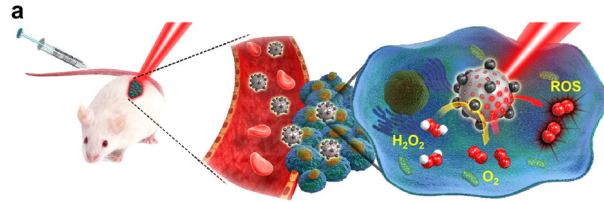
출처: Baik et al., 2024.

#### 4.1.3.2. 항암 치료를 위한 나노촉매 기술

대표적인 암 치료 방식인 광역학 요법 치료의 경우, 산소 농도에 대한 의존도가 높기 때문에 암세포의 저산소증으로 인해 치료 효과가 제한적이다. 이를 해결하기 위해 2017년 현택환, 최승훈, 이노현 교수 연구팀에서는 망간 페라이트 나노입자가 박힌 다공성 실리카 나노입자(MFMSNs)를 개발하였다. MFMSNs의 경우 펜톤 반응을 통해 산소를 지속해서 생성하여 저산소 상태를 완화하고, 소량의 나노입자로도 PDT의 치료 효과를 향상시킬 수 있었다. 또한, MFMSNs는 자기공명영상(MRI)에서 효과적인

인 T2 조영제로 작용하여 체내에서의 추적이 가능하다. 이 연구는 암 치료를 위한 치료 및 진단이 결합된 약제로서의 MFMSNs의 잠재력을 입증하였다.

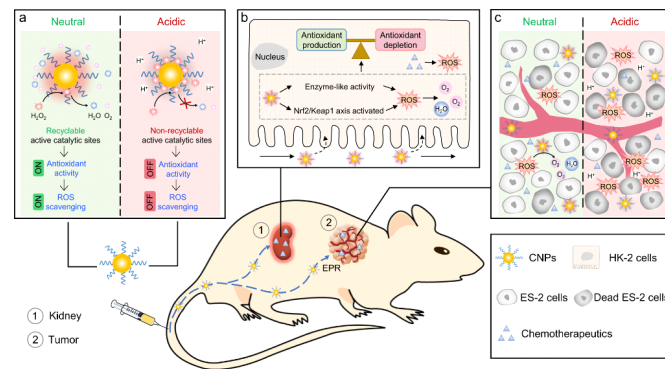
그림 4.17 MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 나노입자가 박힌 다공성 실리카 나노입자의 광역학 요법 치료 향상 효과 및 MRI T2 조영제로서의 기능



출처: Kim J et al., 2017.

급성 신장 손상(acute kidney injury: AKI)은 화학요법을 받는 암 환자에게 흔히 발생하는 치명적인 부작용으로, 주로 활성산소에 의한 신장 세포 손상과 관련이 있다. 현재 활성산소의 인위적 관리는 화학요법으로 유발되는 AKI의 위험을 줄이는 전략이지만, 이는 항암 효과를 감소시킬 수 있는 문제가 있다. 2021년 중국 저장대 룽대순 교수 연구팀은 화학요법과 간섭 없이 촉매 활성을 조절하여 AKI를 예방할 수 있는 세리아 나노입자를 활용하였다. 세리아 나노입자는 신장 피질에서 활성산소를 분해하고, Nrf2/Keap1 신호 경로를 활성화하여 산화환원 균형을 회복하며, 이를 통해 신장 세뇨관을 보호한다. 반면, 종양 미세환경의 산성 조건에서는 세리아 나노입자의 촉매 활성이 억제되어 항암제에 의한 활성산소 생성을 통해 암세포를 공격하고, 이를 세리아 나노입자가 방해하지 않는다. 이처럼 세리아 나노입자는 상황에 따라 촉매 활성을 조절하여 암 환자의 급성 신장 손상 예방 및 치료에 큰 가능성을 보인다.

그림 4.18 세리아 나노입자의 촉매 활성 조절 및 체내 활성산소와의 반응



출처: Weng et al., 2021.

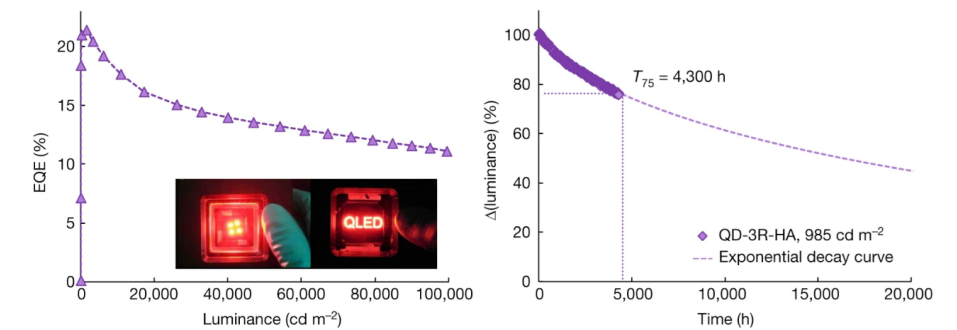
## 02 양자점 및 이를 활용한 발광 다이오드 소자

### 4.2.1. 친환경 양자점

국내외 연구기관 및 기업들은 양자점 발광소자 기술 발전에서 중요한 과제 중 하나인 중금속이 포함되지 않은 친환경 양자점 개발에 주력하고 있다. 초기 양자점 소재는 카드뮴(Cd)이나 납(Pb)과 같은 중금속을 포함한 양자점을 주로 활용하여 연구가 이루어져 왔으나, 이들은 인체 및 환경에 유해성을 지니, 유럽을 비롯한 전 세계 각국에서는 상용화된 제품에 중금속 사용의 규제를 강화하고 있다. 이에 따라 비(非)중금속 양자점에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

인듐(In), 아연(Zn), 구리(Cu)와 같은 금속을 기반으로 하는 양자점은 중금속 기반 양자점을 대체할 친환경 양자점 소재로 주목받고 있으며, 이와 관련하여 삼성과 같은 국내 기업들이 선두에 있다. 삼성전자 종합기술원은 2019년에 적색 인듐 인화물(InP) 양자점을 이용하여 적색 LED를 보고하였으며(Won et al., 2019), 2020년에는 청색 칼코겐화 아연(ZnTeSe) 기반 양자점을 이용하여 청색 LED에서 높은 소자효율을 달성하였다(Kim T et al., 2020).

그림 4.19 삼성 종합기술원에서 보고한 고효율 친환경 적색 양자점 발광소자



출처: Won et al., 2019.

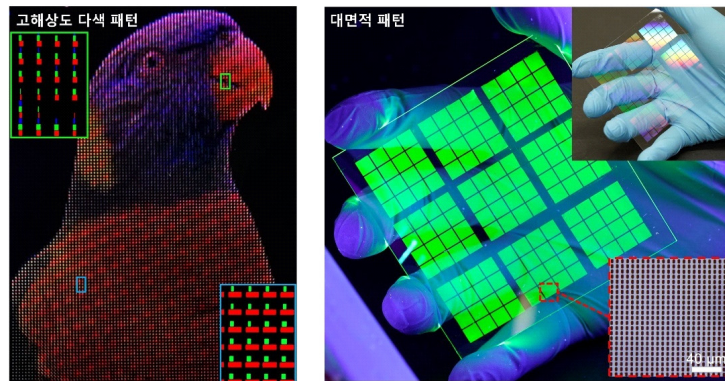
### 4.2.2. 양자점 발광 다이오드

기존 초기 양자점 발광소자 연구는 단색 양자점을 스핀코팅한 박막을 사용한 단색 발광소자에 초점을 맞추었다. 하지만 디스플레이에서 실제로 활용하기 위해서는 서로 다른 색상의 양자점을 교차 오염 없이 화소화할 수 있는 패터닝 기술이 필요하다. 특히, 최근에는 디스플레이 기술의 발달에 따라 높

은 화질의 디스플레이가 시장에서 선호되고 있을 뿐만 아니라, AR/VR 응용을 위한 초고해상도 디스플레이 개발 필요성이 대두됨에 따라 더 높은 해상도 디스플레이 기술 개발이 중요해지고 있다.

현재 상용화된 광발광 방식의 양자점 화소는 주로 잉크젯 프린팅 방식으로 제작되고 있다. 이 방법은 수백 나노미터에서 수십 마이크로미터의 두께를 지니는 두꺼운 양자점 필름을 제작하는 데 적합하지만, 전계발광 소자에 필요한 얇고 균일한 양자점 발광층(20~30nm 두께)을 제작하기는 어려운 실정이다. 이를 해결하기 위해 포토리소그래피 공정과 스템핑 전사인쇄법 등이 제안되었다. 이 과정에서 양자점 화소의 해상도뿐만 아니라, 패터닝된 양자점 박막의 구동효율을 높이는 것이 중요한 과제이다. 최근에는 UNIST-DGIST-IBS 나노입자연구단 공동연구진이 전하 전달층과 양자점을 동시에 패터닝하는 전사인쇄 기술을 개발하여 높은 해상도뿐만 아니라 이론효율에 근접한 양자점 발광소자 효율을 동시에 달성한 사례가 있다(Yoo et al., 2024).

그림 4.20 UNIST-DGIST-IBS 나노입자연구단 공동연구진이 보고한 양자점 초고해상도 패터닝 기술

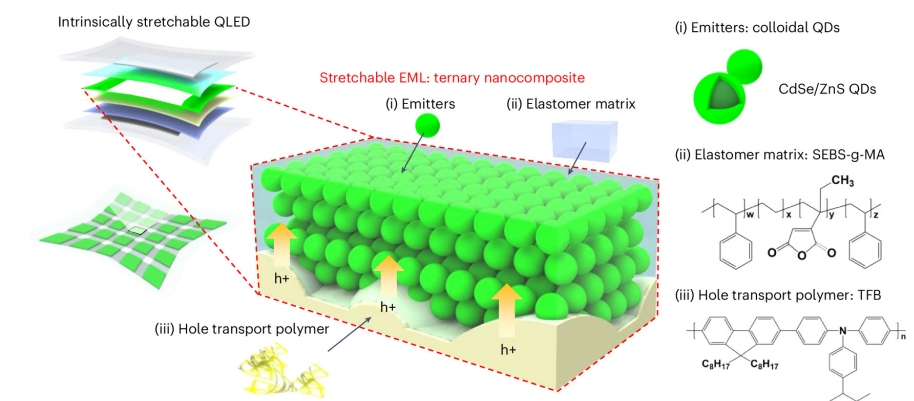


출처: Yoo et al., 2024.

양자점 발광소자는 주로 20~30nm 두께의 단층~이중층의 양자점 박막을 발광층으로 활용한다. 이에 따라 기판 및 봉지층을 제외한 양자점 발광소자 자체의 두께가 300nm 이하로 매우 얇게 제작될 수 있다. 소자의 두께가 얇을수록 굽힘 등의 변형 시 소자에 가해지는 굽힘응력이 약해지므로 유연전자소자 제작에 유리하다. IBS 나노입자연구단은 매우 얇은 양자점 소자를 유연한 기판 및 봉지막 위에 제작하여 입을 수 있는 형태의 유연 양자점 발광소자를 개발한 바 있다(Choi et al., 2015). 또한 이를 웨어러블 기기와 결합하여 웨어러블 디스플레이로 활용하거나(Kim J et al., 2017), 투명하고 유연한 양

자점 발광소자를 보고한 사례도 있다(Choi et al., 2018). 하지만 신축성이 결여된 양자점 박막은 신축 변형 시 박막에 균열이 발생하여 성능이 열화되는 문제가 있었다. 이를 해결하기 위해 IBS 나노입자연구단-UNIST-DGIST 공동연구진은 양자점과 탄성 고분자의 복합체를 개발하여 신축성을 지닌 양자점 발광소자를 보고한 바 있다(Kim DC et al., 2024).

그림 4.21 IBS 나노입자연구단-UNIST-DGIST 공동연구진이 개발한 신축성 양자점 복합소재 및 소자



출처: Kim DC et al., 2024.

## 03 에너지 소자

### 4.3.1. 친환경 에너지 생태계의 필요성

1.1장에서도 설명한 바와 같이 산업화 이후 급격히 증가한 화석에너지 사용량의 증가와 4차 산업혁명으로 일컬어지는 컴퓨터 기술의 발전으로 인한 기술 발전과 에너지 사용량 증가(그림 1.1)의 엄청난 가속화로 인하여 여러 환경 문제가 대두되고 있다. 이 중 가장 큰 골칫거리는 이산화탄소 배출량 증가로 인한 온실효과의 증가와 일산화탄소, 질소산화물, 황산화물, 휘발성 유기 화합물의 배출에 따른 대기오염의 가속화 문제이다. 현대사회의 에너지 생산은 화석연료 사용에 크게 의존하므로(그림 1.2) 엄청난 양의 대기오염 물질 방출을 수반한다. 지난 10년 동안 배출량이 꾸준히 증가한 이산화탄소는 연간 340억 톤 이상이 전 세계적으로 배출되고 있으며 (그림 4.22), 질소산화물은 수십만 톤, 황산화물과 휘발성 유기화합물의 경우 수만 톤이 연간 배출되고 있다 (그림 4.23).



그림 4.22 연간 이산화탄소 배출량 (1950~2023)

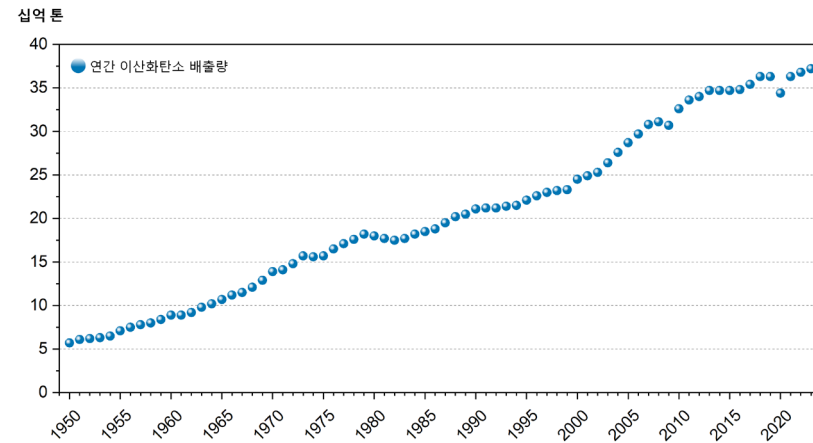
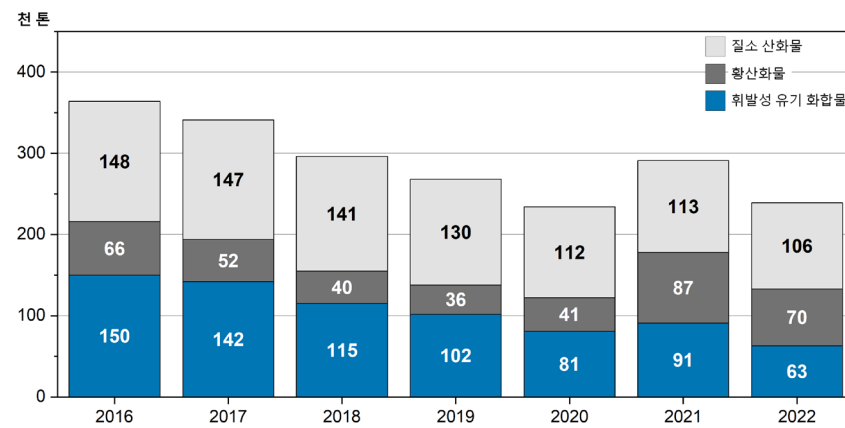
출처: 국제에너지기구(IEA)<sup>4</sup>.

그림 4.23 연간 대기오염가스 배출량 (2016~2022)

출처: 셰브론(Chevron)<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023/emissions-grew-in-2023-but-clean-energy-is-limiting-the-growth>

<sup>5</sup> chevron-sustainability-report-2022, <https://www.chevron.com/-/media/shared-media/documents/chevron-sustainability-report-2022.pdf>, p. 64;  
chevron-sustainability-report-2020, <https://www.chevron.com/-/media/shared-media/documents/chevron-sustainability-report-2020.pdf>, p. 52.

1997년 교토의정서부터 2015년 파리협정, 2021년 글래스고 기후 합의에 이르기까지 국제 사회의 노력에도 불구하고 연간 이산화탄소 배출량은 지속해서 증가하였고 자동차의 배출가스 감축에 관한 유럽의 규제강화에도 불구하고 대기오염 물질 배출량 역시 여전히 상당한 수준으로 유지되고 있다. 모든 문제점은 전 세계 산업 전반에 깊이 뿌리내린 화석에너지 중심의 발전 방식에서 기인한다고 볼 수 있으며 그 결과 전 세계가 친환경 대체 에너지 발전 방식으로의 전환에 박차를 가하고 있다.

대표적인 대체 에너지 발전 방식으로는 최근 몇 년 사이에 크게 주목받고 있는 전기화학적 에너지 생산을 들 수 있다. 이 방식은 화석 연료에 대한 의존을 줄이고, 재생 가능 에너지원의 활용을 극대화하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 첫 번째로, 수전해(water electrolysis)는 전기를 사용해 물을 수소와 산소로 분해하는 기술로, 수소를 연료로 활용할 수 있어 청정 에너지원으로 주목받고 있다. 이 과정에서 탄소 배출이 거의 없고, 재생 가능한 전력과 결합하면 '그린 수소' 생산이 가능하다. 연료전지(fuel cell)는 산소와 수소 간의 화학 반응을 통해 전기를 생성하는 장치로, 고효율 및 친환경적인 에너지 생산이 가능하다. 특히, 연료전지는 수소 경제의 핵심 기술로, 수송 분야와 산업용 에너지원으로 널리 활용되고 있다. 또한, 배터리 기술은 전기차(EV)를 포함한 여러 분야에서 전력 저장과 사용을 가능하게 한다. 특히, 리튬이온배터리를 기반으로 한 전기차는 화석 연료를 사용하는 내연기관차를 대체하며, 탈탄소화를 위한 주요 수단으로 자리 잡고 있다. 배터리는 또한 재생 가능 에너지의 간헐성을 보완하는 에너지 저장 장치로도 사용되어, 안정적인 전력 공급에 기여한다. 이러한 전기화학적 에너지 생산 기술들은 지속 가능한 에너지 전환을 촉진하며, 탄소중립 사회로의 전환에 있어 중요한 역할을 하고 있다.

다음으로는 아직 상용화 단계에 도달하지는 못했지만 가장 이상적인 친환경 에너지 생산이 가능한 광(光)화학적 에너지 생산 반응을 들 수 있다. 이 에너지 생산 시스템은 전기화학적 에너지 생산 방식과 매우 유사하지만, 외부에서 생산한 전기에너지를 사용하는 대신 깨끗하고 무한한 태양에너지를 직접적으로 사용할 수 있다는 큰 장점이 있다. 이 광화학적 에너지 생산 반응을 통하여 물을 분해하여 수소를 만들 수 있고, 이산화탄소를 다른 탄소 에너지원들로 환원시킬 수 있으며, 점점 더 큰 환경 문제로 지목되고 있는 플라스틱 폐기물을 분해하여 수소를 생산할 수 있다. 이때 태양에너지가 화학 반응에 효율적으로 사용될 수 있도록 전환해 주는 과정에 광촉매 물질이 주요한 역할을 하게 된다. 활발히 진행 중인 고효율 광촉매 개발 연구에 나노입자 관련 기술이 큰 영향을 미치고 있다.

### 4.3.2. 전기촉매로서의 나노입자

나노입자는 전기촉매 분야에서 기존의 촉매보다 우수한 성능을 보이며, 주로 나노입자가 지닌 고유한 물리적, 화학적 특성에 기인한다.

#### 4.3.2.1. 나노입자의 표면적 대 부피 비율의 중요성

나노입자가 전기촉매로서 가지는 주요 장점 중 하나는 높은 표면적 대 부피 비율이다. 나노입자는 크기가 작을수록 상대적으로 큰 표면적을 가지며, 이는 전기화학 반응에서 매우 중요한 역할을 한다. 전기화학 반응은 주로 촉매 표면에서 일어나기 때문에, 나노입자의 표면적이 크다는 것은 더 많은 활성 사이트가 존재한다는 것을 의미한다. 이러한 활성 사이트는 반응물이 흡착되어 반응을 시작할 수 있는 지점으로, 촉매 성능을 결정짓는 중요한 요소다.

#### 4.3.2.2. 나노입자의 전자 구조 변화

나노입자의 크기가 매우 작아지면 '양자 구속 효과'가 나타나며, 이는 나노입자의 전자 구조에 직접적인 영향을 미친다. 크기에 따라 변화하는 나노입자의 전자 구조는 특정 촉매 반응의 활성화 에너지를 조절할 수 있기 때문에 매우 중요한 의미를 가진다.

#### 4.3.2.3. 나노입자의 독특한 표면 화학

나노입자는 표면에서 벌크 소재와 다른 독특한 표면 화학적 특성을 보인다. 나노입자의 표면 원자는 입자의 중심에 있는 원자보다 상대적으로 더 높은 에너지를 가지며, 이는 촉매 반응에서 중요한 역할을 한다. 표면 에너지가 높은 나노입자는 반응물이 표면에 흡착될 때 더 큰 결합 에너지를 제공하여 반응을 촉진할 수 있다. 예를 들어 나노입자의 표면에 특정 결함이나 비정상적인 원자 배열이 존재할 때, 이는 반응성의 향상으로 이어질 수 있다. 현택환 교수 연구실에서는 독특한 물리적 화학적 성질을 지닌 다양한 나노입자를 디자인하여 성공적으로 합성하였으며, 이를 다양한 전기화학 촉매 반응에 응용하였다.

### 4.3.2.3.1. 수전해 반응에서의 나노입자

#### 4.3.2.3.1.1. 수소 발생 반응 (Hydrogen Evolution Reaction: HER)

수소 발생 반응(HER)은 수전해의 중요한 부분으로, 전기화학적 반응을 통해 물( $H_2O$ )로부터 수소( $H_2$ )를 생성하는 과정이다. 이 반응은 지속 가능한 청정 에너지원인 수소를 얻기 위한 핵심 기술로, 연료전지, 물 분해 장치 등에서 필수적인 역할을 한다. 특히 수소 경제의 실현을 위해서는 고효율 수소 발생 촉매가 매우 중요한 역할을 하고 있다.

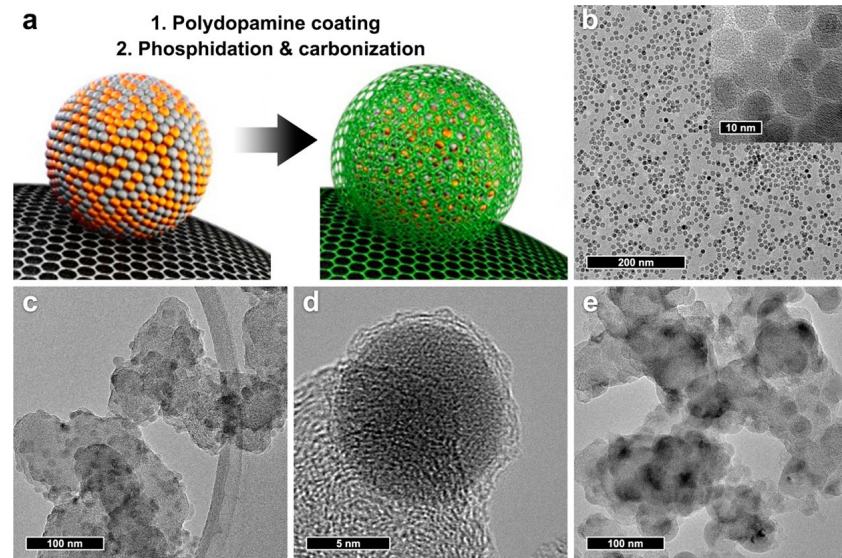
중국 서안교통대 Mingshang Jin 연구 그룹에서 백금(Pt)을 사용해 뛰어난 수소 발생 반응의 전기촉매를 합성해서 Nature 지에 보고하였다. 백금의 전기촉매 성능은 격자 구조가 변함에 따라 성능이 증가하며, 팔라듐(Pd) 기반 나노큐브에 Pt 쉘을 증착하고, 인(P)을 도입하고 빼는 과정을 통해 격자 변형을 조절할 수 있었다. 이를 통해 수소 발생 반응에서 변형-활성 사이의 상관관계를 밝혔으며, 이 접근법은 Pt 및 다른 금속 촉매의 성능 최적화에 활용될 수 있을 것으로 보인다(He et al., 2021).

미국 스탠퍼드대 Xiaolin Zheng 교수 연구팀은 몰리브덴 이황화물( $MoS_2$ )을 사용하여 수소 발생 반응 전기촉매를 합성했다. 이론적 및 실험적 결과에 따르면, 몰리브덴 이황화물에서 황의 결함(S-결함)은 몰리브덴 이황화물의 기저면에 새로운 촉매 활성 사이트를 형성하며, 이 사이트는 페르미 준위 주변의 갭 상태가 수소가 노출된 몰리브덴(Mo) 원자에 직접 결합할 수 있게 해준다. 또한, S-결함이 있는 표면에 변형을 가하면 수소 흡착 자유 에너지를 조절할 수 있어 촉매 활성을 미세하게 조절할 수 있다. 적절한 S-결함과 변형의 조합은 수소 흡착 자유에너지를 0 eV로 맞출 수 있으며, 이를 통해 몰리브덴-황화물 기반 촉매 중 가장 높은 본질적인 수소발생 반응의 활성을 달성할 수 있었다(Li et al., 2016).

현택환 교수 연구실에서는 값비싼 백금 기반 촉매의 대안으로 저렴한 철 인화물( $FeP$ ) 나노입자를 전기촉매로 사용하여 수소 발생 반응 연구를 진행했다. 기존 비백금 촉매의 활성 저하가 나노입자 표면의 산화로 이루어진다는 것을 DFT 계산을 통해 알아내었고, 탄소 껍질이  $FeP$  나노입자의 산화를 방지하여 수소 발생 반응조건에서 높은 안정성을 유지할 수 있음을 입증했다. 또한, 탄소껍질로 코팅된  $FeP$  나노입자는  $10\text{ mA/cm}^2$ 에서 71 mV의 낮은 과전압을 나타내며, 상업용 백금 촉매와 유사한 성능을 보였다. 또한 산성 조건에서 최대 10,000사이클 동안 성능 저하 없이 장기적인 내구성을 보여주었다. 이 연구는 대규모 수소 생산을 위한 촉매의 대량 생산이 가능하다는 점에서도 중요한 의의를 가지고 있다.



그림 4.24 FeP 촉매 합성 개요 및 전자현미경 이미지



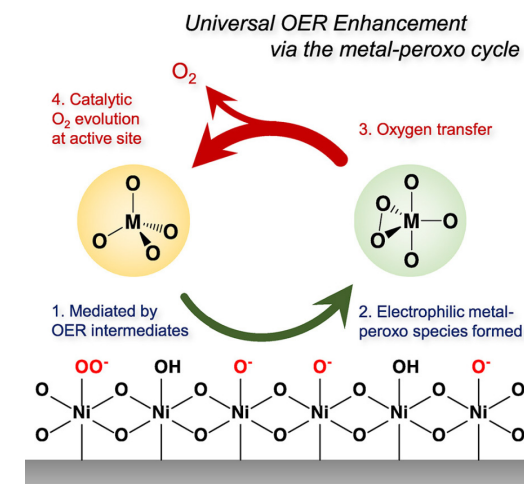
출처: Chung et al., 2017.

#### 4.3.2.3.1.2. 산소 발생 반응 (Oxygen Evolution Reaction: OER)

산소 발생 반응(OER)은 물을 분해해 산소( $O_2$ )를 생성하는 과정으로, 물 분해와 같은 전기화학적 반응에서 중요한 반응이다. OER은 연료전지, 수전해와 같은 재생 가능 에너지 시스템에서 핵심 역할을 한다. 이 반응은 4개의 전자가 관여하는 다단계 반응으로, 매우 높은 에너지 장벽을 가지고 있어 뛰어난 성능의 전기화학 촉매의 도움 없이는 자발적으로 일어나기 어렵다.

현택환 교수 연구팀은 촉매 설계에 새로운 접근 방식을 도입하여 초기 전이 금속(d0-옥소 음이온)이 포함된 산화환원 사이클을 통해 알칼리성 환경에서의 OER을 가속화할 수 있다는 것을 밝혔다. 특히, 과산화수소( $H_2O_2$ )와 OER 중간체에 의해 유도된 금속-퍼옥소(peroxo) 사이클을 통해 OER 성능이 향상되었으며, 철-니켈 기반 촉매에서 뛰어난 전류 밀도를 기록했다. 이를 통해 텅스텐산염이 변형된 철-니켈 수산화물( $W/FeNiOOH$ ) 촉매가 2.0 V 전압에서  $7.87 \text{ A/cm}^2$ 의 높은 성능을 발휘했다.

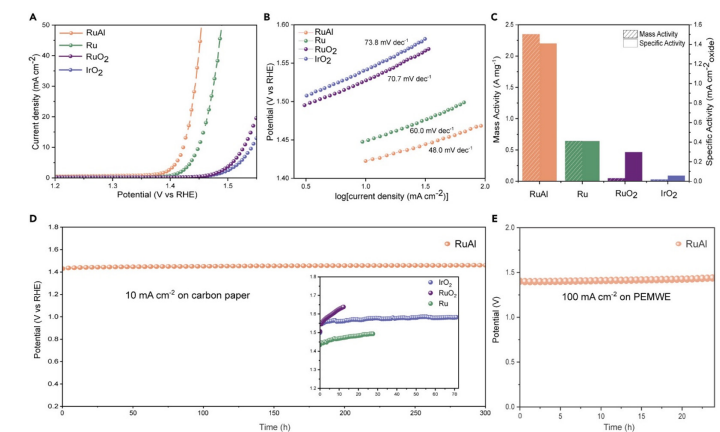
그림 4.25 금속-퍼옥소 사이클을 통한 OER 메커니즘



출처: Lee HS et al., 2023.

또한, 이리듐을 최소화하거나 사용하지 않기 위해, 알루미늄(Al)을 루테튬-이리듐 산화물( $RuIrO_x$ )에 도입했다. 알루미늄 도핑은 Ru-O 혼성 궤도의 전자 구조를 조정하여 산소 중간체의 흡착 에너지를 변화시키고, O-O 결합 형성을 촉진해 성능을 향상시켰다. 최적화된 Al 도핑  $RuIrO_x$ 는  $10 \text{ mA/cm}^2$ 에서 178 mV의 낮은 과전압으로,  $100 \text{ mA/cm}^2$ 에서 300시간 이상 높은 활성도를 유지하는 데 성공했다.

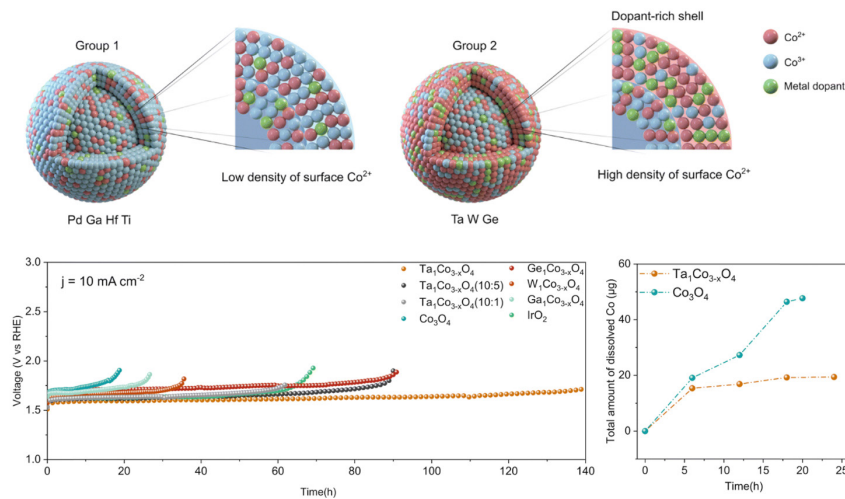
그림 4.26 RuAl 촉매의 산성 OER 성능 그래프



출처: Lee K et al., 2023.

코발트 스피넬 산화물(CSO)에 금속을 도입하는 것은 촉매 성능을 향상시키는 유망한 전략으로 떠오르고 있다. 하지만 초기 전이 금속 및 준금속 전구체가 쉽게 통제되지 않는 특성 때문에, CSO 내에서 단원자 상태로 도입하는 데 어려움이 있었다. 현택환 교수 연구실에서는 Hf, Ta, W, Ti, Pd, Ga, Ge와 같은 다양한 도펀트를 원자 규모의 도입하는 접근법을 제시하며, 이러한 금속 양이온들이 CSO 내에서 안정화되는 원자적 위치를 밝혀내었다. 특히, Ta, W, Ge와 같은 금속은 CSO의 핵심보다는 표면에서 더 높은 안정성을 보여주었으며, 이는  $\text{Co}^{2+}$ 가 풍부한 표면을 형성해 촉매 활성도와 보호 기능을 동시에 제공하는 역할을 한다. 이러한 특성을 활용하여, Ta가 도핑된  $\text{Co}_3\text{O}_4$ 는  $10 \text{ mA/cm}^2$ 에서 378 mV의 매우 낮은 과전압을 기록하였으며, 산성 전해질에서 140시간 이상 동안 촉매 활성을 유지했다.

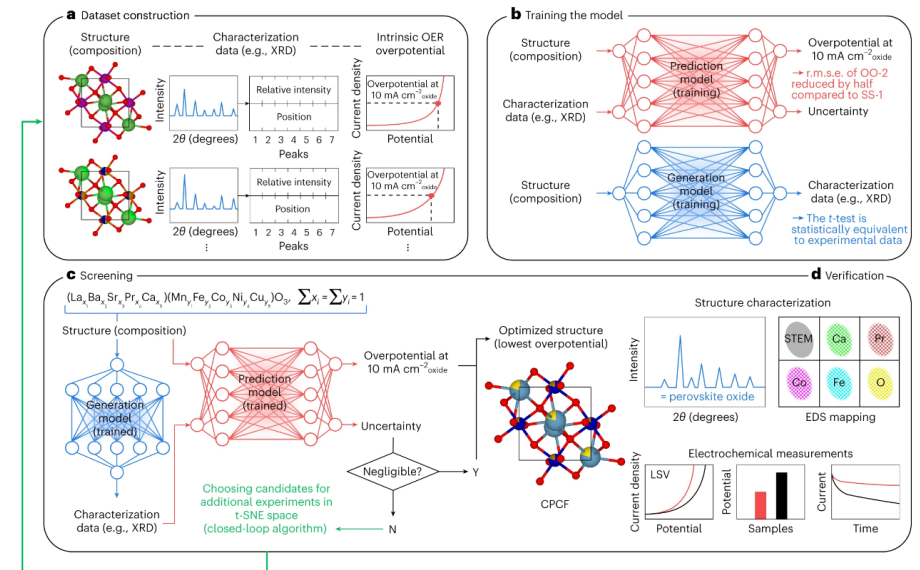
그림 4.27 원자 규모 도핑을 통한 CSO 합성 개요 및 CoTa 촉매의 장기 안정성 그래프



출처: Lee K et al., 2024.

페로브스카이트 산화물은 구조적으로 유연하고 조성 변화를 쉽게 조절할 수 있어 OER 촉매로 주목받고 있다. 이론적 연구가 활발히 이루어지고 있지만, 여전히 대부분의 촉매 개발 과정은 연구자의 경험과 주관에 의존한 실험적 접근에 의해 진행되고 있다. 이에 대해 현택환 교수 연구실에서는 촉매 활성과 상관관계가 큰 물성 설명자를 기반으로 한 머신러닝을 통해, 최적의 성능을 보일 것으로 예상되는 다중 금속 페로브스카이트 산화물 촉매를 설계했다. 그 결과  $10 \text{ mA/cm}^2$ 에서 현재까지 보고된 페로브스카이트 기반 촉매 중 가장 낮은 391 mV의 과전압을 달성하였다.

그림 4.28 머신러닝을 통한 페로브스카이트 촉매 모델링 모식도



출처: Moon et al., 2024.

#### 4.3.2.3.2. 산소 환원 반응 (Oxygen Reduction Reaction: ORR)

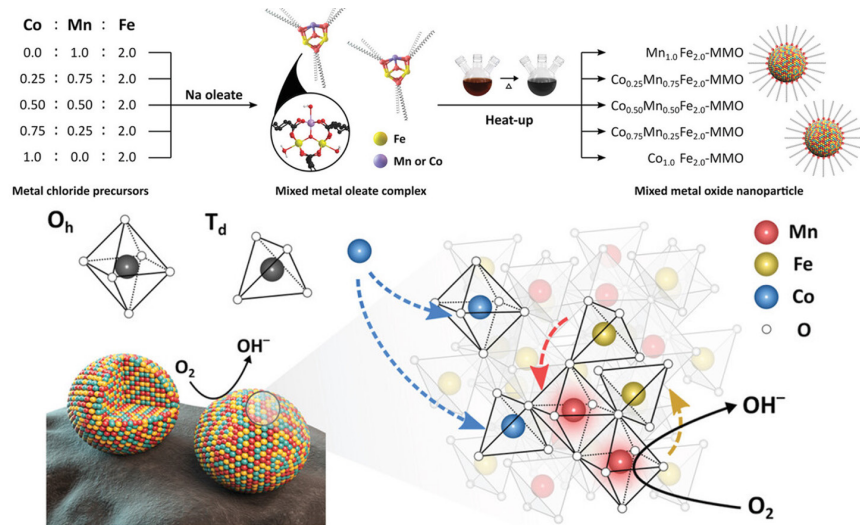
##### 4.3.2.3.2.1. 연료전지 (4전자 ORR)

산소 환원 반응(ORR)은 연료전지에서 에너지를 생산하는 핵심 과정으로, 성능, 효율성, 내구성에 큰 영향을 미친다. 현재 ORR에 주로 사용되는 촉매는 백금(Pt) 기반으로, 뛰어난 전기화학적 성능을 제공하지만, 높은 비용과 희소성으로 인해 상업적 사용에 제한이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 백금 사용을 줄이거나 대체할 수 있는 촉매 개발이 중요해졌으며, 최근에는 비백금 기반 촉매(PGM-free catalysts)가 주목받고 있다.

현택환 교수 연구실에서는 Mn, Co, Fe로 구성된 스피넬 구조의 다중 금속 산화물(MMO) 나노입자를 활용해 산소 환원 반응(ORR) 촉매의 혁신을 이루었다. 특히 코발트(Co)가 ORR에서 중요한 역할을 하며, Co가 도입된 촉매는 높은 전류 밀도와 낮은 반파 전위를 기록했다. Co는 촉매의 팔면체 자리 증가와 Mn 자리에 전자 상태 변화를 일으켜 ORR 활성을 높였다. 최적화된  $\text{Co}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}\text{Fe}_2\text{-MMO}$  나노입자는 0.904 V(RHE 대비)의 반파 전위와 0.9 V에서 46.9 A/g의 질량 활성도를 보이며 안정적인 성능을 나타냈다.



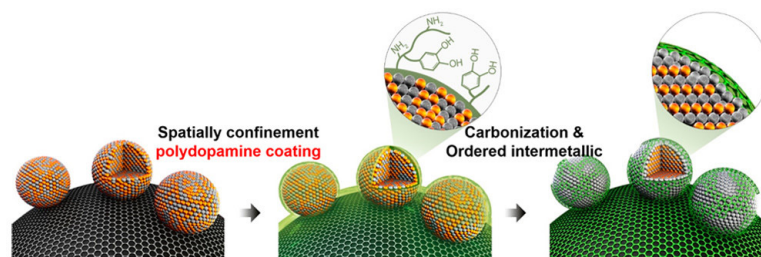
그림 4.29 Mn, Co, Fe 스핀넬 구조의 다중 금속 산화물 합성 개요 및 ORR 반응 메커니즘 모식도



출처: Kim J et al., 2022.

나노입자는 촉매 활성도가 높지만, 연료전지 가동 중 산화, 용해, 응집 등으로 인해 안정성 문제를 겪는다. 이를 해결하기 위해 나노입자를 보호하는 코팅이 제안되었으나, 활성 사이트를 차단할 수 있으므로 성능이 저하될 수 있다는 단점이 있었다. 이에 현택환 교수 연구실에서는 질소 도핑된 탄소 겹질로 코팅된 PtFe 상간 나노입자를 개발해, 장기적인 안정성과 높은 활성도를 유지하는 촉매를 합성했다. 폴리도파민 코팅을 통해 나노입자가 응집되지 않도록 방지했으며, 얇은 겹질(1nm 이하) 덕분에 반응 물질이 쉽게 투과해 촉매 활성도가 유지되었다. 이 촉매는 상용 Pt/C 촉매에 비해 질량 활성도는 11.4배, 특히 활성도는 10.5배 더 높았고, 100시간 동안 안정성을 유지했다.

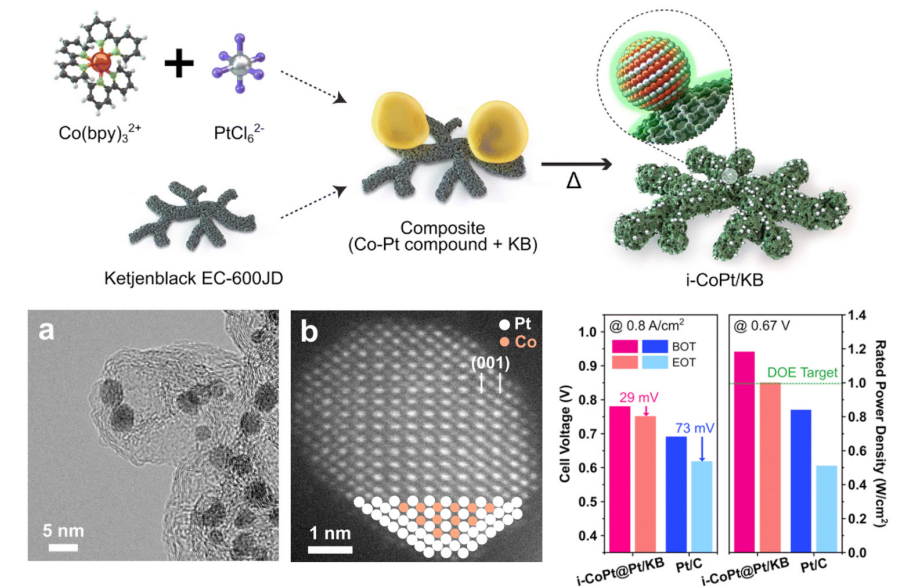
그림 4.30 폴리도파민 코팅을 통한 상간 FePt 나노입자 합성 개요



출처: Chung et al., 2015.

더 나아가, 양성자 교환막 연료전지(PEMFC)의 산업적 적용에서는 촉매 활성, 산소 전달, 양성자 전도가 주요 성능 요소로 작용한다. 이를 해결하기 위해서는 촉매 설계와 정교한 합성 방법이 필요하다. 현택환 교수 연구실은 이러한 문제를 해결하기 위해 [Co(2,2'-bipyridine)]<sub>3</sub>[PtCl<sub>6</sub>] 이중 금속 화합물을 열분해하여, 5nm 이하의 상간 Pt-Co 나노입자를 탄소 보호층으로 덮어 합성했다. 이 나노입자는 변형된 Pt-스킨을 형성해 높은 활성을 나타내며, 질소 도핑 메조다공성 탄소 지지체와 안정화된 코발트가 결합되어 산소 전달과 양성자 전도를 촉진한다. 이 촉매는 단일 전지에서 1.18 W/cm<sup>2</sup> 및 5.9 W/mgPt의 전력 밀도를 달성했고, 성능 측정 종료 시점에 0.8 A/cm<sup>2</sup>에서 29 mV의 전압 손실만을 기록했다. 이 연구는 미국 에너지부(DoE)의 2025년 목표를 초과하는 성과를 보여주며, PEMFC의 산업적 적용에 한 발 더 가까이 다가섰다.

그림 4.31 PtCo 나노입자 합성 개요와 투과 현미경 이미지 및 연료전지 성능 그래프



출처: Yoo et al., 2023.

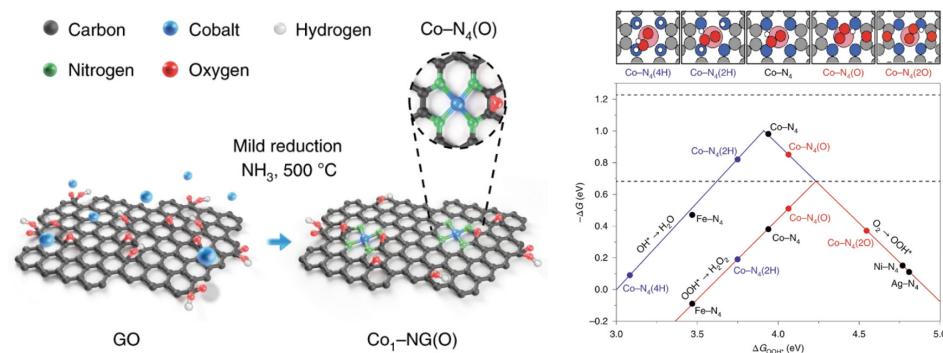
#### 4.3.2.3.2. 과산화수소 생성 반응 (2전자 ORR)

과산화수소는 환경 친화적인 산화제로 주목받고 있다. 기존의 산업적 과산화수소 생산은 안트라퀴논 공정을 사용하지만, 이는 에너지 집약적이라 환경에 부담을 주는 공정이며, 비싼 팔라듐 촉매를 사

용한다는 단점이 있다. 이에 비해 2전자 ORR을 통한 전기화학적  $\text{H}_2\text{O}_2$  생산은 에너지 절약과 환경 보호라는 두 가지 목표를 동시에 달성할 수 있는 대안으로 부각되고 있다. 2전자 산소 환원 반응(ORR)은 산소 분자( $\text{O}_2$ )가 두 개의 전자를 받아들여 과산화수소( $\text{H}_2\text{O}_2$ )를 생성한다.  $\text{H}_2\text{O}_2$ 는 산화제, 살균제, 그리고 다양한 화학 반응에서 중요한 중간체로 사용되기 때문에 산업적으로 매우 중요한 화합물인데, 이 반응은 4전자 ORR에서 물( $\text{H}_2\text{O}$ )을 생성하는 반응과 비교하여 더 적은 에너지를 필요로 한다는 장점이 있다. 전기화학적 과산화수소 생산의 핵심은 반응 경로를 제어하여 산소가 완전히 물로 환원되지 않고 중간 단계인 과산화수소로 멈추게 하는 것이다.

현택한 교수 연구실에서는 단원자 코발트를 활용하여 전기화학적 과산화수소 생산 연구를 진행하고 있다. 2020년에는 DFT 계산 결과 기반으로,  $\text{Co-N}_4$  구조의 촉매 특성을 조정하여 메탈로엔자임의 구조 의존적 촉매 특성을 모방할 수 있음을 발견했다. 이 원리를 이용해 질소 도핑된 그래핀에 산소량을 조절하여 최적화된  $\text{Co-N}_4$  단일 원자 전기촉매를 설계 및 합성하였으며, 이 촉매는  $\text{H}_2\text{O}_2$  생산에서 0.65 V(RHE 기준)에서  $2.8 \text{ mA/cm}^2$ 의 전류 밀도와  $155 \text{ A/g}$ 의 성능을 보였다. 또한 110시간 동안 성능 감소 없이 안정적으로 작동했다.

그림 4.32  $\text{Co}_1\text{-NG(O)}$  촉매 합성 개요 및 계산 화학적 2전자 ORR 성능 예측 결과

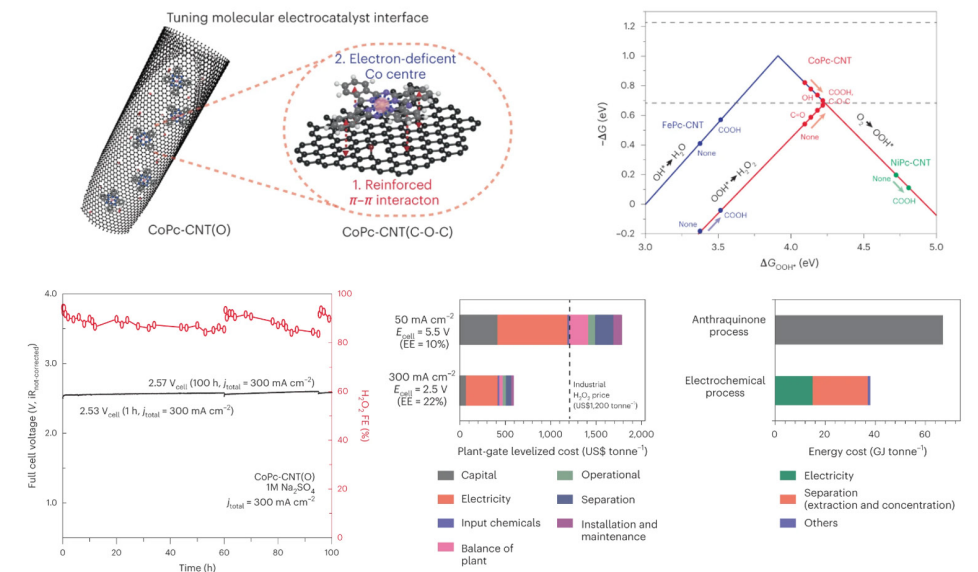


출처: Jung et al., 2020.

최근에는 미국 노스웨스턴대학교의 Edward Sargent 그룹과 함께 전기화학적 과산화수소의 산업 스케일 생산에 활용할 수 있는 연구를 진행했다. 지금까지의 나노입자를 활용한 전기촉매의 성능은  $300 \text{ mA/cm}^2$  이상을 달성하지 못했다. 이번 연구에서는 계산 과학 결과에 따라 거대 분자를 활용한

합성법을 제안하여, 코발트 프탈로시아닌(cobalt phthalocyanine) 촉매를 사용하여 산소 기능기를 포함한 탄소 나노튜브에 결합하였다. 이 방법으로 코발트 프탈로시아닌의 흡착이 향상되어 응집을 방지하며, 산소 작용기와 상호작용으로 코발트의 전자 밀도를 낮추어  $\text{H}_2\text{O}_2$  중간체와의 상호작용을 최적화했다. 이 촉매는  $300 \text{ mA/cm}^2$ 에서 280 mV의 과전압을 기록했으며, 중성 매질에서 초당 50회 이상의 TOF를 보여, 이전에 보고된 최고 성능  $\text{H}_2\text{O}_2$  전기촉매보다 10배 높은 활성을 나타내었으며, 100 시간 이상 안정적으로 유지되었다.

그림 4.33  $\text{CoPc-CNT(O)}$  합성 개요와 계산 화학 및 장기 안정성 성능과 에너지 분석 결과 그래프



출처: Lee BH et al., 2023.

#### 4.3.2.3.3. 이산화탄소 환원 반응 ( $\text{CO}_2$ Reduction Reaction: $\text{CO}_2\text{RR}$ )

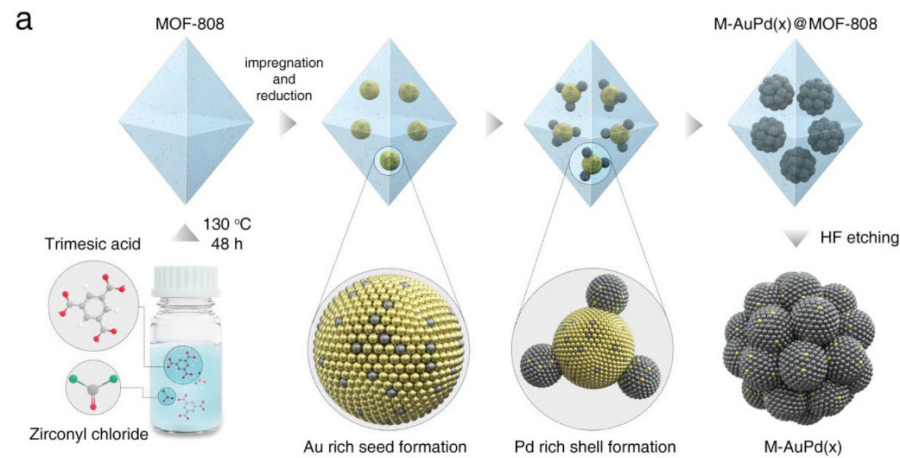
이산화탄소의 전기화학 환원 반응(Electrochemical  $\text{CO}_2$  Reduction Reaction)은 이산화탄소( $\text{CO}_2$ )를 전기 에너지를 이용해 화학적으로 유용한 물질로 변환하는 반응이다. 이 과정에서  $\text{CO}_2$ 는 일련의 전자전달 과정을 통해 일산화탄소( $\text{CO}$ ), 메탄( $\text{CH}_4$ ), 에틸렌( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), 메탄올( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) 등 다양한 화합물로 전환될 수 있다. 이는 화석 연료에 의존하지 않고  $\text{CO}_2$ 를 재활용할 수 있는 방식으로, 기후 변화 완화와 탄소 자원화에 중요한 기술로 주목받고 있다.



Edward Sargent 그룹에서는 이산화탄소의 전기화학 환원 반응 연구를 이끌고 있다. 특히 구리 기반 촉매를 활용해 CO<sub>2</sub>에서 고부가가치 화합물인 에틸렌을 고효율로 생산하는 기술을 개발했다. 이를 통해 산업적으로 쓰이는 전류 밀도 수준에서 이산화탄소가 성공적으로 전환되었으며, 반응 조건을 최적화해서 고부가가치 화합물을 선택적으로 생산하는 데 있어 중대한 발전을 이루었다.

2021년 현택환 교수 연구실에서는 팔라듐(Pd)을 활용해서 이산화탄소를 포름산으로 선택적으로 환원시키는 연구를 진행했다. 팔라듐 나노입자 사이의 금속 상호작용을 활용하여 팽창된 팔라듐 나노입자에 원자단위로 분산된 금을 합성한 결과, 포름산 생산의 성능, 선택도, 안정성이 모두 크게 향상되었다. 또한, Pd 표면의 팽창은 반응 중간체를 안정화하고, 원자단위로 분산된 금은 활성점을 막는 CO 피독(poisoning)을 방지할 수 있었다. 그 결과 Pd/C 촉매와 비교해서 26배 높은 부분 전류 밀도와 31배 높은 질량 활성도를 나타냈으며, 99% 이상의 패러데이 효율을 기록했다.

그림 4.34 단원자 금이 도핑된 팔라듐 나노입자 합성 개요



출처: Bok et al., 2021.

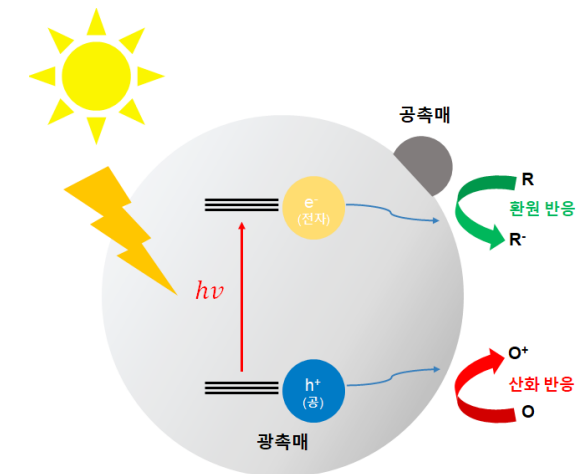
### 4.3.3. 광(光)화학적 에너지 생산과 나노입자

#### 4.3.3.1. 광촉매 반응의 원리

태양에너지는 아마 지구에서 사용할 수 있는 가장 강력한 에너지원일 것이다. 태양빛의 광자에너지를 화학에너지로 전환하기 위해서는 화학 반응에서의 결합 형성에 사용될 수 있는 전하 캐리어(charge carrier)의 생성이 필요한데 광촉매 물질이 이 역할을 하게 된다. 생성물의 상(phase)과 촉매

의 상이 다른 불균일 광촉매 반응(heterogeneous photocatalysis)에서는 특정 밴드갭(bandgap) 에너지를 가지는 반도체 물질(semiconductor)들이 광촉매로 사용된다. 이러한 반도체 물질은 각 물질의 고유한 밴드갭 에너지보다 큰 에너지를 가지는 파장의 광자 에너지를 흡수하여 전하 캐리어인 전자-정공 쌍(electron-hole pair)을 형성할 수 있다. 이때 빛을 흡수하여 전자대(valence band)의 전자는 전도대(conduction band)로 광여기(photoexcitation)되고 전자의 빈자리인 공을 전자대에 남겨놓게 된다. 생성된 전자, 정공은 각각 전도대와 전자대의 에너지 준위에 따라 특정 화학물질의 환원 반응 혹은 산화 반응에 사용될 수 있게 된다. 반응 환경과 목표하는 생성물에 따라 불균일 광촉매 반응에는 여러 가지 공촉매 물질이 사용될 수 있으며 대표적으로 이산화티타늄, 티탄산 스트론튬, 산화 아연, 카본나이트라이드 등이 있다. 이러한 불균일 광촉매 반응은 1972년 Akira Fujishima 교수와 Kenichi Honda 교수가 Nature 지에 보고한 이산화티타늄 전극을 이용한 전기화학적 물의 광분해(water photolysis) 연구 이후로 크게 주목을 받고 현재까지 꾸준히 연구되고 있다(Fujishima & Honda, 1972).

그림 4.35 불균일 광촉매 반응의 작동 원리



출처: 이찬우, 2024

#### 4.3.3.2. 광촉매 반응에서의 나노입자 활용

전기화학적 에너지 생산 반응에64서의 전기촉매와 마찬가지로 광촉매 반응으로의 나노입자 활용은 기존의 벌크 시스템과 비교하여 많은 장점이 있다. 광촉매 물질로 사용되는 반도체 물질의 경우, 실

제 반응에 참여할 수 있는 부분은 반응물과 직접적으로 접촉할 수 있는 촉매의 표면이다. 촉매가 기존 수백 마이크로미터 이상의 벌크 크기에서 수백 나노미터 이하의 나노입자 크기로 바뀌게 되면 물질의 표면-부피 비가 매우 커지고 같은 질량의 촉매를 사용해도 촉매 반응의 효율이 비약적으로 증가할 수 있다. 이와 더불어 나노입자는 벌크 물질과 비교하여 표면에 더 많은 결함(defect)을 가지고 있어 촉매 반응에서 높은 반응성을 보이는 장점이 있다. 광촉매 반응에서 반도체 물질과 함께 사용되는 공촉매(co-catalyst)의 관점에서도 나노입자의 형태를 가진 경우 더 높은 표면 노출 비로 원자 사용 효율(atomic utilization efficiency) 향상을 달성할 수 있다. 이와 같은 나노입자 촉매 시스템의 활용은 광촉매 수소 발생 반응과 이산화탄소 환원 반응, 페플라스틱의 광개질(photoreforming)을 통한 수소 생산 반응 등 다양한 광화학적 에너지 생산 반응의 효율 향상에 크게 기여하였으며 현재에도 활발하게 연구되는 분야이다.

#### 4.3.3.2.1. 광촉매 수소 발생 반응에서의 나노입자

광촉매 수소 발생 반응은 광화학적 에너지 생산 분야에서 가장 활발히 연구되어 온 분야로, 광여기로 생성된 전자를 이용하여 물을 환원시켜 수소를 생성하는 반응이고 이때 전자대에 남겨진 공은 메탄올, 에탄올 등 여러 화합물의 환원 반응으로 제거된다. 따라서 이 반응은 광촉매 환원 반응의 성능을 탐구하는 연구 분야라 할 수 있고 높은 실용성을 가지는 광촉매적 수전해 반응이나 페플라스틱 광개질을 통한 수소 생산 반응에서의 성능 향상 기반을 마련하기 위한 중요한 연구 분야이다. 광촉매 수소 발생 반응에서 가장 많이 사용되는 백금이 담지된 이산화티타늄 촉매 시스템은 1978년 Bernhard Kraeutler 교수와 Allen J. Bard 교수의 보고 이후 활발히 연구된 불균일 촉매이다(Kraeutler & Bard, 1978). 이산화티타늄의 경우, 빛을 흡수하여 높은 효율로 전자-정공 쌍을 만들 수 있고 생성된 전자-정공 쌍이 재결합하여 광발광하는 것을 전자-정공 분리를 통해 상당 수준 억제할 수 있는 특성을 가졌다. 높은 일함수(work function)를 갖는 백금 공촉매는 이산화티타늄으로부터 쉽게 전자를 가져올 수 있고 이는 전자-정공 재결합을 더욱 억제하는 역할을 하며 백금의 적절한 에너지 준위로 인하여 광촉매 수소 발생 반응의 효율성을 크게 높인다.

나노입자를 광촉매 수소 발생 반응에 활용한 기념비적 연구 중 하나는 2011년 UC Berkeley의 Samuel S. Mao 연구팀이 Science 지에 발표한 검은 이산화티타늄을 이용한 광촉매 반응 논문이다. 고온 고압 수소 처리를 통하여 이산화티타늄 표면에 다량의 산소 결함 및 disorder가 생성된 검은 이산화티타늄 나노입자는 기존의 자외선 영역의 빛만 흡수하여 이용할 수 있는 이산화티타늄의 한계점을

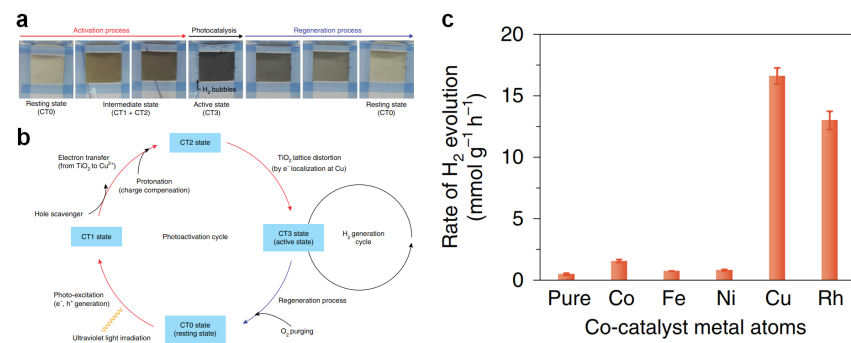
극복하고 가시광선 영역의 빛까지 이용할 수 있는 특징점을 나타내었다. 백금 나노입자를 공촉매로 담지한 후 광촉매 수소 발생 반응에 적용한 결과 태양광에서 수소로의 에너지 전환효율 24%라는 그 당시 가장 높은 성능을 달성할 수 있었다(Chen et al., 2011).

여러 개의 금속 원자들이 모여서 만든 수 나노미터 크기의 입자인 나노클러스터(nanoclusters) 시스템은 수십~수백 나노미터 크기의 나노입자보다 높은 원자 사용 효율을 나타내며 특정한 결정 구조를 가질 수 있는 나노클러스터의 경우, 구성 원자 치환을 통하여 특정 원자가 유발하는 전자 구조 변화와 이로 인하여 촉매 반응에서 특정 원자가 나타내는 원자 효과를 연구하는 데 중요한 모델 시스템이 될 수 있다. 2023년 현택환 교수 연구팀은 셀레놀(selenol) 리간드로 안정화된 은 나노클러스터의 중심부 원자를 선택적으로 금 원자로 치환한 후 해당 클러스터들을 이산화티타늄 나노입자의 공촉매로 사용하여 광촉매 수소 발생 반응에 적용하였을 때 성능이 크게 증가했음을 보여주는 연구를 진행하였다. 은 나노클러스터의 중심 원자를 선택적으로 금 원자로 치환했을 때 은 나노클러스터의 결정구조가 변화하지 않았기 때문에, 연구팀은 금 원자가 포함된 나노클러스터를 이산화티타늄 나노입자의 공촉매로 사용하였을 때 광촉매 성능이 향상되는 이유를 금 원자가 나타내는 원자 효과에 집중하여 다양한 분광학 측정과 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석할 수 있었다(Bootharaju et al., 2023).

나노클러스터보다 크기가 더 줄어들어 금속 원자 단 한 개가 공촉매 역할을 할 수 있는 시스템을 단원자 촉매라고 지칭한다. 최근 촉매 분야에서 가장 크게 주목받는 단원자 촉매 시스템은 수십~수백 나노미터 크기의 나노입자 기반 촉매와 비교하면 큰 장점을 가지고 있다. 단원자 촉매에서는 촉매 지지체에 담지시킨 금속 원자 하나가 촉매 반응에서의 활성 자리로 사용될 수 있어서 원자 사용 효율을 극대화하게 된다. 기존의 나노입자에서는 금속 원자 간 결합의 영향이 지배적이기 때문에 상대적으로 드러나지 않던 금속-지지체 결합이 단원자 촉매에서는 극대화되고, 그 결과 나노입자 공촉매 시스템에서는 기대할 수 없었던 특이한 촉매 거동이 나타날 수 있으며 이는 상당한 촉매 성능의 향상으로 이어질 수 있다. 이와 같이 단원자 촉매는 적은 양의 금속 원자 사용으로도 높은 촉매 성능을 달성할 수 있는 잠재력을 가지고 있어 성능 대비 촉매 생산 비용이 중요한 산업 부문에서 큰 경쟁력을 가질 수 있다. 학문적 관점에서 단원자 촉매는 지지체의 원자에 금속 원자가 배위되어 있는 형태가 균일 촉매(homogeneous catalyst)에서 중심 금속 원자가 리간드에 배위된 형태와 유사하여, 균일 촉매와 불균일 촉매의 중요한 연결점으로 여겨지고 있다. 실제로 이 특징을 이용하여 고효율의 균일 촉매를 불균일 촉매 시스템으로 옮겨오려는 많은 연구가 세계적으로 진행되어 오고 있다. 광촉매 수소 발생 반응에서 고효율을 나타내는 단원자 촉매 합성에 관해 2019년 현택환 교수 연구팀은 중요한 연구 결과

를 발표하였다. 다양한 금속 원자를 이산화티타늄 나노입자 표면에 단원자 형태로 담지하는 합성법과 이때 만들어진 단원자 촉매에서 발생하는 특이한 광화학 성질을 분석한 연구이다. 해당 합성법으로 만든 구리 단원자/이산화티타늄 촉매는 일반 이산화티타늄 나노입자에서보다 34배 높은 광촉매 수소 발생 성능을 나타내었다. 비용이 저렴한 구리 단원자 기반 촉매가 백금 나노입자를 공촉매로 한 이산화티타늄 촉매에 준하는 높은 수소 발생량을 나타낼 수 있었던 이유는 (1) 구리 단원자/이산화티타늄 촉매가 빛을 흡수하고 생성된 전자가 구리 원자를 환원시키고 (2) 그 결과 형성된 구리 원자 주위의 분극 장(polarization field)이 이산화티타늄의 격자 구조를 변형시켜 촉매의 색상이 흰색에서 검은색으로 변화하였으며 (3) 가시광선 영역의 빛을 폭넓게 흡수함으로써 기존 자외선 영역보다 활용 파장 영역이 늘어나 뛰어난 성능 향상으로 이어졌기 때문이다. 이 연구는 나노입자 시스템에서 기대하기 힘들었던 특이한 광화학 성질을 나타내는 단원자 촉매의 장점을 보여준 좋은 사례라고 평가할 수 있다.

그림 4.36 구리 단원자/이산화티타늄 촉매의 특성과 광촉매 수소 발생 반응 성능



출처: Lee BH et al., 2019.

#### 4.3.3.2.2. 광촉매 이산화탄소 환원 반응에서의 나노입자

광촉매 이산화탄소 환원 반응은 기후 위기의 주원인인 이산화탄소를 직접 환원하여 일산화탄소, 포름산, 메탄, 아세트알데하이드 등과 같은 연료를 생산할 수 있어 많은 연구가 진행되고 있으며, 촉매 성능의 향상에 나노입자가 큰 역할을 하고 있다. 2019년 현택환 교수 연구팀은 앞서 소개한 구리 단원자/이산화티타늄 촉매를 기체상의 이산화탄소 광환원 반응에 적용하였고 일반 이산화티타늄 나노입자 및 구리 나노입자/이산화티타늄 촉매와 비교하여 메탄 생산 성능이 각각 66배와 6배 향상되었음을 보였다. 담지된 구리 단원자가 주변 이산화티타늄 표면의 산소 음이온을 부분적으로 환원시킨 결과 표면

에 산소 공(vacancy)을 만들게 되며 이 산소 공들이 이산화탄소 환원 반응 중에 생성되는 여러 중간체를 안정화함으로써 성능이 증가할 수 있었다고 연구팀은 분석하였다(Lee BH et al., 2022).

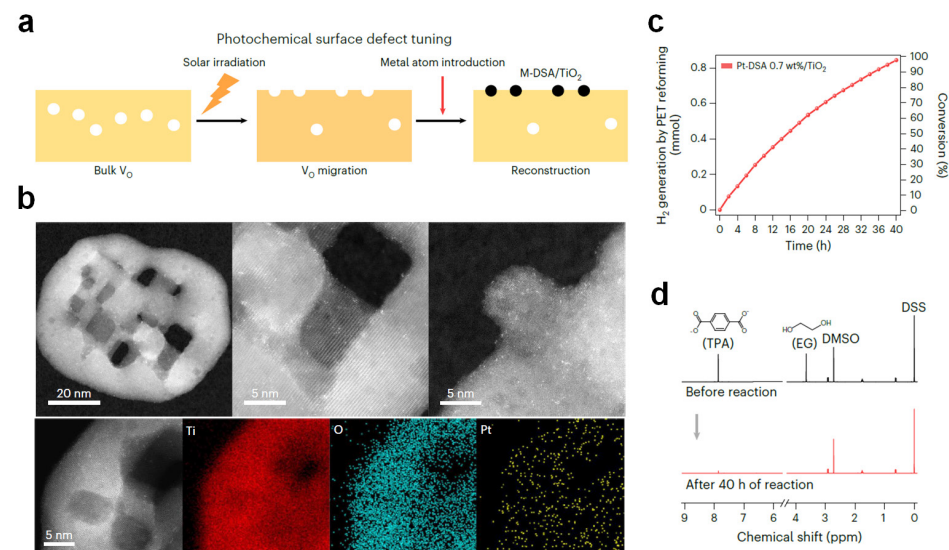
#### 4.3.3.2.3. 페플라스틱 광개질을 통한 수소 생산 반응에서의 나노입자

앞서 소개한 광촉매 수소 발생 반응은 빛을 이용하여 귀중한 에너지원인 수소를 생산할 수 있다는 점에서 매력적이지만, 에너지원으로 사용될 수 있는 메탄올, 에탄올 등의 화합물을 사용해야 한다는 한계점을 가지고 있다. 따라서 실용성을 확보하고 진정한 의미의 친환경 수소 생산을 위해서는 다른 화학 물질의 도움 없이 오직 물만 이용하여 수소를 생산할 수 있어야 한다. 하지만 물의 광분해 반응에서 공(hole)을 사용하여 물을 산화시키는 반응( $2\text{H}_2\text{O} + 4\text{h}^+ \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2$ )에 필요한 표준 환원 전위는 1.23 V vs NHE로 매우 높아 열역학적으로 매우 불리하여 수소 생산 성능은 현실적으로 산업환경에 적용할 수 있는 수준에 미치지 못한다.

이에 대한 대안으로 최근 가장 크게 주목받고 있는 방식은 페플라스틱 광개질을 통한 수소 생산 반응이다. 지난 20년 동안 전 세계 플라스틱 생산량은 2배 이상 증가한 것과 비교하여 오직 9%의 플라스틱 폐기물만이 재활용되었고 50% 정도의 플라스틱은 매립되고 20%는 소각된 것으로 파악되었다. 플라스틱을 소각하는 과정에서 많은 양의 다양한 대기 오염 가스가 발생하고 매립 시에는 토양을 망가뜨리며 분해되는 과정에서 수많은 마이크로플라스틱이 잔류하게 되어 동물의 몸속에 쌓이는 등 심각한 생태계 피해를 유발하고 있어서 플라스틱 폐기물 처리에 대한 사회적 관심이 증가하고 있다. 적절한 전처리 과정(예: 강염기 처리)을 통해 플라스틱은 단량체(monomer)로 분해될 수 있다. 일상생활에서 가장 많이 사용되는 PET(polyethylene terephthalate)의 경우 에틸렌 글라이콜과 테레프탈산으로 분해되며 생분해성 비닐백의 소재로 많이 사용되는 PLA(poly-lactic acid)의 경우 젖산으로 분해된다. 단량체인 에틸렌 글라이콜과 젖산은 하이드록시기(-OH)나 카르복실기(-COOH)를 가지고 있는 탄화수소인데 광촉매 수소 발생 반응에서 연구되었던 여러 공 제거 물질들과 비슷한 형태이며 실제로 물보다 훨씬 빠르게 광촉매에 생성된 공을 제거하여 수소가 생산되는 전자 반응이 수월하게 일어나게 한다. 1980년 일본 오사카대학 Tomoji Kawai 교수와 도쿄공대 Tadayoshi Sakata 교수 연구팀에 의해 Nature 지에 처음으로 보고된 개념이며(Kawai & Sakata, 1980), 최근 캠브리지 대학의 Erwin Reisner 교수 연구팀에 의해 실증적인 페플라스틱 광개질을 통한 수소 발생 반응으로 정립되었다. 2018년에 발표한 연구에서 황화카드뮴 기반 광촉매 물질을 이용하여 PET, PLA, PUR(polyurethane) 중합체를 광개질하여 수소를 효율적으로 생산할 수 있음을 보였으며, 특히 실제

페트병을 갈아서 강염기 조건에서 광개질 반응을 진행하고 효과적으로 수소를 생산해 내었다(Uekert et al., 2018). 여기에서 더 나아가 2024년 현택환 교수 연구팀은 폐플라스틱 광개질 반응에서 훨씬 향상된 성능을 보이는 원자 분산 촉매의 합성에 관한 연구를 발표하였다. 광화학적 산소 결함 조절을 통해 이산화티타늄, 산화아연, 산화 세륨과 같은 촉매 지지체 위에 백금, 이리듐, 구리를 원자 단위로 분산시킬 수 있는 합성법에 대해 보고하였다. 환원 가능한 여러 산화물 물질에 빛을 조사하면 물질 내부에 존재하는 산소 결함이 표면으로 이동하게 되고 금속 원자들이 이를 결합 자리로 이용하여 산화물 표면에 결합하도록 하는 방식이다. 이렇게 합성한 원자 분산 백금/이산화티타늄 나노입자 촉매는 광개질 반응에서 98%의 PET 반응물을 수소로 전환하는 세계 최고효율을 나타내었다.

그림 4.37 광화학적 산소 결함 조절을 통한 원자 분산 촉매의 합성과 폐플라스틱 광개질 반응 성능



출처: Lee CW et al., 2024.



# 5

**세계적 수준의 나노기술연구를 위해  
필수적인 국가 연구 지원의  
지속성과 안정성**

- 현택환 교수의 장기 과제 사례
- 성공적 연구의 요인
- 학문 후속 세대 육성과 우수 신진 연구자 정착 지원 방안

## 세계적 수준의 나노기술연구를 위해 필수적인 국가 연구 지원의 지속성과 안정성

세계적 수준의 연구단은 단기간에 완성되지 않는다. 하나의 분야를 깊게 탐구하고 미해결 문제를 발굴하고 이를 해결하는 과정은 깊은 배경지식과 지대한 인내와 심도 있는 토의, 첨단 방법론이 결합되어야 가능하다. 이러한 세계적 수준의 연구 성과를 달성하기 위해서는 국가의 지속적인 지원이 필요하다. 이 지면을 빌어 장기적인 안정적 과제지원이 어떻게 세계적 수준의 연구단을 탄생시킬 수 있었는지 나노분야의 대표적인 연구자인 현택환 교수의 사례를 들어 설명하고, 이어서 신진 연구자 지원 정책 및 연구비 지원 방향에 대해 제언하고자 한다.

### 101 현택환 교수의 장기 과제 사례

현택환 교수는 2002년 한국연구재단의 창의적연구지원사업에 선정되어 산화물나노결정 창의연구단 단장으로 9년간 연구를 수행하였다. 이후 2012년, 기초과학연구원 나노연구단 단장으로 선정되어 현재까지 연구비를 지원받고 있다. 이처럼 장기적인 안정적 연구비 확보를 통해 연구의 유행을 좇기보다 심도 있는 기초 연구를 수행함으로써 세계 최고 수준의 나노소재 연구실로 성장할 수 있었다.

#### 5.1.1. 창의적연구진흥사업

2001년 승온법을 통한 균일한 나노입자의 합성방법을 세계 최초로 개발한 세계적 연구 성과를 바탕으로 현택환 교수는 2002년에 연간 약 7억 원을 9년 동안 지원하는 창의적연구진흥사업의 단장으로 선정되었다. 창의적연구진흥사업(現 리더연구사업)은 그 당시 가장 큰 규모로 장기간에 걸쳐 지원하는 개인 연구 과제로서, 세계적인 수준의 연구자를 양성하기 위해서는 장기적인 안정적인 연구과제가 필요하다는 취지에서 만들어진 과제였다. 현택환 교수 연구실은 9년의 안정적인 연구비를 기반으로 도전적인 연구를 수행하여 세계적인 수준의 연구 결과를 지속적으로 발표, 세계적 수준의 나노소재 연구실로 성장하였다.

#### 5.1.2. 기초과학연구원 나노입자연구단

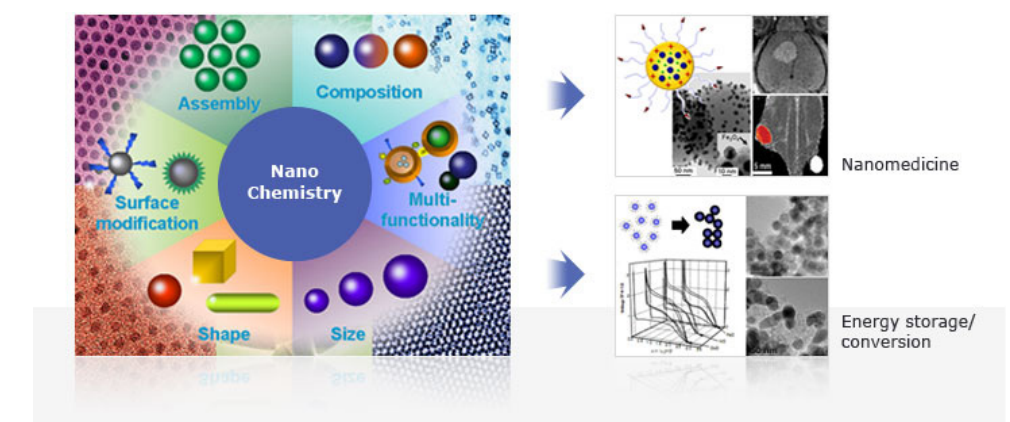
##### 기초과학연구원이란

세계적으로 잘 알려진 기초과학 연구기관 중에는 독일의 막스플랑크연구소와 일본의 이화학연구소가 있다. 설립된 지 100년이 넘는 이 두 기관은 독일과 일본뿐 아니라 전 세계의 기초과학을 선도하고 있으며 다수의 노벨상 수상자를 배출하였다. 대한민국에도 이들 연구소와 같은 세계를 선도하는 연구소가 필요하다는 의견이 대두되어, 2012년에 기초과학연구원이 설립되었다. 기초과학연구원은 과학기술정보통신부 산하의 기초과학 특화 연구기관이다. 2012년에 13개의 연구단으로 기초과학연구소가 시작하였고 현재는 32개 연구단과 2개의 연구소를 보유한 대규모 기관으로 확장되었다.

##### 기초과학연구원 나노입자연구단

기초과학연구원 나노입자연구단은 나노입자의 합성과 응용에 초점을 맞추어 연구한다. 입자 크기와 연관된 독특한 성질 덕택에 수많은 분야에서 응용될 수 있는 나노입자를 정밀 합성하여 의료, 에너지와 유연소자 분야에서 나노입자의 무궁무진한 가능성을 열어가고 있다. 응용성의 극대화를 위해서는 나노입자의 대규모 합성 공정을 개발하는 한편 원자 수준에서의 제어가 필요하므로 이를 위해 입자 성장 메커니즘에 관한 기초연구를 수행하고 있다.

그림 5.1 기초과학연구원 나노입자연구단의 연구 분야



출처: Daishun Ling, 2014

### 기초과학연구원을 통해 노벨상 수준의 과학자로 자리매김

2020년 9월에 현택환 교수는 노벨상 후보군이라고 알려진 Clarivate Citation Laureates 24명 중에 포함되었다. 2022년 한국공학한림원 대상 수상자, 2023년 12월 스웨덴 왕립공학한림원 국제회원, 2024년 2월 미국 공학한림원 국제회원으로 선정되었다. 이는 장기간의 안정적인 연구비 지원을 통해 진행한 심도 있는 연구를 수행한 결과라고 할 수 있다. 기초과학연구원의 지원을 통해 성장할 수 있었던 배경에는 장기간의 연구비 지원, 적극적인 협업, 첨단장비 도입, 그리고 차세대 리더 양성이 있다고 하겠다.

## 102 성공적 연구의 요인

### 5.2.1. 장기간의 안정적 연구비 지원

연구의 유행을 따라가기보다 하나의 분야를 집중해서 파고들고 심도 있게 연구할 때 세계적 수준의 연구가 탄생한다. 기초과학연구원은 국내에서 검증된 세계적 수준의 연구자들에게 장기간의 안정적 연구비 지원을 통해 긴 안목으로 연구를 수행할 수 있게 하여 노벨상 수준의 연구가 가능하게 만들고 있다. 현택환 교수는 장기적이고 안정적인 연구 지원 환경에서 연구자의 자율성이 보장되고 창의성이 극대화되어 선도적인 연구가 가능했음을 보여주는 대표적인 사례로, 연구 지원의 지속성과 안정성이 국가과학기술 발전을 위한 핵심 요소임을 분명하게 보여준다.

### 5.2.2. 협업

기초과학연구원은 연구단 내외부 간의 협업을 강조한다. 특히 나노입자연구단은 지난 12년간 여러 우수한 연구진과의 협업을 통해 세계 수준의 연구를 진행하였다. 전기화학분야에서 성영은 교수와 협업하여 연료전지 전극용 나노소재, 합성용 전기화학 촉매 등을 개발하고 유연소자 분야에서 김대형 교수와 협업을 통해 나노소재를 함유한 다양한 유연소자를 제조하여 의료 및 헬스케어 분야에 응용하였으며 반도체 나노입자를 도입하여 유연 QLED를 제조하는 데 성공하였다. 이와 같이 뛰어난 첨단 연구 결과는 협업에 의해서 가능하였다.

### 5.2.3. 첨단장비

연구란 새로운 가설을 세우고 실험으로 그것을 검증하고 분석하는 것이다. 연구가 고도화된 현대에는 단순한 장비로는 첨단 연구의 실현 및 분석이 쉽지 않다. 예를 들어, 나노입자의 분석에 가장 기본적인 장비는 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope: TEM)인데, 최소 10억 원 이상이며, 나노입자를 원자수준으로 분석하려면 최소 30억 원 이상의 TEM 장비가 필요하다. 현택환 교수는 창의연구단 및 기초과학연구원 선정 초기에 TEM을 도입하여 나노입자 연구를 가속할 수 있었다. 실험 후 신속하게 분석 결과를 얻을 때, 효과적인 연구를 할 수 있다. 연구 환경의 차이는 기술적 격차를 심화시킨다. 기초과학연구원 지원을 통해 세계 연구진과의 기술적 격차를 줄일 뿐 아니라 세계를 선도하는 연구자가 될 수 있었다.

### 5.2.4. 젊은 학자들의 성장

현택환 교수는 연구단에 유능한 젊은 교수들을 연구단에 참여하게 하고 그들을 지원함으로써 대한민국의 미래를 이끌어갈 세계적 연구자로 성장하는 데 발판을 마련하였다. 대표적으로 서울대학교 화학생물공학부 김대형 교수와 박정원 교수가 있다. 1977년생인 김대형 교수는 2012년 서울대학교에 임용된 직후 현택환 교수(IBS 나노입자연구단 단장)의 아낌없는 지원을 받아 연구 역량을 유감없이 발휘하여 유연 전자 소자 분야에서 세계적인 연구자가 되었다. IBS 나노입자연구단의 팀 리더를 거쳐 2017년에는 나노입자연구단의 부단장으로 임명되었고, 나노소재를 합성하는 현택환 교수의 연구팀과 긴밀한 협업을 통해 최상의 연구 성과를 보여 주었다. 나노복합체 바이오 전자 소자, 기능성 하이드로겔, 전자 피부와 웨어러블 기기, 무선-최소침습적 유연 소자, 휘어지고 접을 수 있는 신축성 디스플레이, 로봇 비전 시스템, 고분자 기반의 소형 촉매 장치 등을 개발하였으며, 2018년부터 매년 “세계에서 가장 영향력 있는 연구자 리스트”인 Highly Cited Researcher에 선정되었다(클래리베이트 애널리틱스, 재료과학 분야). 1981년생인 박정원 교수는 2016년에 임용되고 나서 2020년 액상 투과전자현미경 분야 연구로 세계 최고의 과학학술지 사이언스 표지 논문을 발표했고 화학분야 최고 학술지에 10여 편 이상의 논문을 게재하여 나노과학 분야를 이끌어갈 차세대 과학자로 인정받고 있다. IBS 나노입자연구단의 연구위원으로 활동하고 있으며, 한국연구재단의 기초연구사업, 삼성미래기술육성사업 등의 연구 과제를 성공적으로 수행하였고 2020년에는 젊은과학자상을 수상하였다. 이처럼 기초과학연구원의 지원을 통해 젊은 학자들이 성장하였으며, 이들과의 활발한 협업을 바탕으로 연구단은 새로운 차원으로 도약할 수 있었다.

## 103 학문 후속 세대 육성과 우수 신진 연구자 정착 지원 방안

대한민국이 발전하기 위해서는 과학 및 공학 분야에서 뛰어난 학문 후속 세대를 양성해야 한다. 여기서 학문 후속 세대의 정의는 박사후 연구원과 학계에 첫발을 내딛는 신입교수까지 포함한다. 뛰어난 학문 후속 세대의 양성에는 지속적인 재정적 지원이 필요하다. 현재 많은 우수한 학생들이 의료계를 선택하는데, 이는 금전적인 보상이 주어지기 때문이다. 의료계 쏠림 현상을 완화하여 우수 인재를 이공계로 유치하기 위해서는 이공계 학문 후속 세대에 대한 적절한 보상이 마련되어야 한다.

### 5.3.1. 박사후 연구원 정착

대한민국에는 우수한 인적 자원이 전부라 해도 지나치지 않는데, 우수 인재가 복지가 좋은 외국 기업으로 가거나 보상이 높은 의료계로 집중되는 현상이 나타난다. 최근에는 박사학위 취득 후 외국 학교나 기업으로 옮기는 흐름이 나타나고 있어 인재 유출을 방지하기 위해 학문 후속 세대인 박사후 연구원의 지원이 필요하다. 중국은 해외에 있는 우수 인재를 파격적인 지원책을 통해 다시 중국으로 끌어들이었다. 대한민국도 이러한 정책을 세워 실행해야 대한민국의 과학기술을 발전시킬 수 있다.

### 5.3.2. 신입교원 대상 연구비 지원 정책

신임교원 대상 연구비 지원 정책은 우수신진 지원과 집단과제의 신입교수 참여 의무화가 있다. 우수신진 지원의 경우 박사 졸업 후 7년 이내 혹은 만 39세 이하의 연구자를 대상으로 간접비 제외 최대 연 2억 5천만 원까지, 최대 5년간 지원하는 사업이다. 한국연구재단의 집단연구과제인 기초연구실과 선도연구센터에 신입교수의 참여가 의무화되어 있다. 기초연구실의 경우 개척형은 2명 이상의 신임교원이, 심화형 및 융합형은 1명 이상의 신임교원이 필수적으로 참여해야 한다. 이러한 신임교원 대상 연구비 지원 정책을 통해 신임교원에게 연구비를 지원할 수 있도록 한다.

### 5.3.3. 신임연구자 지원 방향

저변을 넓게 금액은 다양하게 해야 한다. 특히 생애 첫 연구를 회복시켜야 한다. 생애 첫 연구는 처음으로 임용된 신임연구자가 연구실을 시작할 수 있게 해주는 소중한 연구과제로, 이를 통해 신임교원이 독립된 연구자로서의 길을 걸을 수 있다. 신진 연구자 대상의 소규모 과제가 없어진다면 지도교수에게 의지하게 되어 독립된 연구자로서의 성장이 늦어지게 된다. 초기 정착 연구비가 절실한 신진 연구자

와 비수도권 지역의 연구자를 위한 안정적인 지원 체계 구축은 연구 저변의 확대에 필수적인 정책으로, 잠재력 있는 연구자의 능력이 사장되지 않도록 하는 중요한 역할을 하게 될 것이다. 한편, 신진 연구자 평가 시에 지도교수와 독립성을 척도로 평가해야 한다. 미국에서는 지도교수와 유사한 연구를 하고 있으면 정년 보장 심사를 통과하지 못한다. 우리나라도 신진연구자의 연구과제 평가 시에 독자적이며 참신한 연구 제안에 높은 점수를 준다면, 첨단 분야의 세계적 과학자를 양성할 수 있을 것이다.



# 6

## 나노과학 및 나노기술 발전을 위한 정책 제언

- 학계
- 정부
- 산업계

## 나노과학 및 나노기술 발전을 위한 정책제언

### 101 학계

#### 6.1.1. 기초 연구 지원 강화

학계는 나노과학의 근본적인 이론과 현상을 이해하는 데 중점을 두는 기초 연구에 대한 지원을 강화해야 한다. 나노 물질의 물리적, 화학적 특성을 규명하고 새롭게 관찰된 현상과 작용을 설명하는 기초 연구는, 응용 연구와 산업적 활용의 토대를 제공하는 필수 요소다. 학문적 호기심에서 출발한 기초 연구가 나노과학의 눈부신 발전의 기반이 되었고, 앞으로 나노기술이 가져올 혁신의 돌파구가 될 것이다.

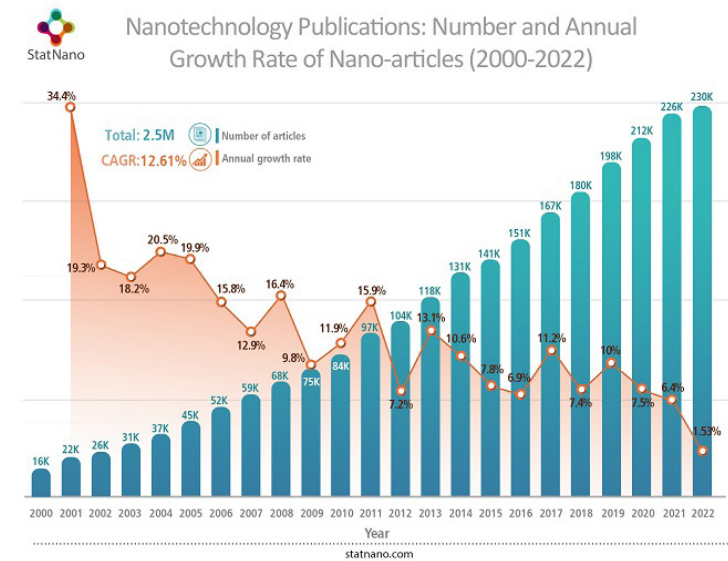
#### 6.1.2. 다학제적 연구 촉진

학제 간 연구는 각 분야 지식의 단순 결합이 아니며, 다양한 분야의 학자들이 함께 참여하여 서로 다른 접근 방식으로 기존에 없던 혁신적인 문제 해결책을 제시할 수 있다. 이를 위해 학계는 연구자가 학문의 경계를 넘나들며 자유롭게 협력할 수 있는 환경을 조성해야 하며, 이러한 학제 간 연구 협력의 성과를 높이 평가하고 인정하는 체계를 통해 그 중요성을 더욱 부각해야 한다.

#### 6.1.3. 국제 공동 연구 강화

나노과학 및 기술 관련 출판 논문 수는 지난 20년 동안 10배 넘게 성장하였다(그림 6.1). 학계는 국제 공동 연구의 강화를 통해 글로벌 연구 네트워크에 참여하여 해외의 최신 연구 동향을 파악하고, 다양한 연구자들과 협력함으로써 연구의 질적 수준을 높일 수 있다.

그림 6.1 2000-2022 연도별 나노과학 출판 논문 수



출처: statnano<sup>6</sup>

이를 위해 학계는 국제 학술 교류 지원 프로그램을 확장하여, 국내 연구자의 해외 연구기관 방문 및 해외 연구자의 국내 연구기관 방문을 통해 상호교류의 경험을 축적하도록 장려해야 한다. 이러한 경험은 연구 경쟁력 향상뿐 아니라, 국제적 파트너십을 구축하여 연구 성과의 국제적 확산을 도모함으로써 학계의 영향력을 확대할 수 있다.

#### 6.1.4. 연구 윤리와 책임 의식 확립

새로운 나노기술과 산업의 접목이 진행되면서 윤리적 문제와 안전성 문제가 야기될 수 있다. 학계는 이러한 문제에 대해 충분한 논의를 진행하고, 윤리 기준과 연구 책임 의식의 확립에 힘써야 한다. 연구 과정에서 발생할 수 있는 다양한 윤리적 문제에 대해 대응할 수 있는 교육 프로그램을 확대하고, 연구자들이 이를 인지하고 실천할 수 있도록 해야 한다.

<sup>6</sup> [https://statnano.com/news/72240/Nanotechnology-Publications-Number-and-Annual-Growth-Rate-of-Nano-articles-\(2000-2022\)](https://statnano.com/news/72240/Nanotechnology-Publications-Number-and-Annual-Growth-Rate-of-Nano-articles-(2000-2022))

## 102 정부



### 6.2.1. 장기적 관점의 연구 지원 체계 구축

정부는 나노과학 연구가 장기적으로 안정적인 지원을 받을 수 있도록 정책적 일관성을 유지해야 한다. 노벨상은 연구발표부터 상을 수상하기까지 평균 20년 이상 소요된다. 나노과학 역시 그 특성상 단기간에 실질적인 성과를 내기 어려울 수 있으나, 그 잠재력은 매우 크다. 정부는 연구비 지원이 지속적으로 이루어질 수 있도록 장기적인 연구 계획을 수립해야 하고, 연구 성과를 평가하는 기준도 장기적인 영향력을 고려하여 설계해야 한다.

### 6.2.2. 첨단 연구 인프라 센터 구축

정부는 나노과학 연구를 지원하기 위해 첨단 연구 인프라를 구축해야 한다. 나노과학은 고도의 정밀성을 요구하는 분야로, 이를 수행하기 위한 고가의 실험 장비와 첨단 시설이 필수적이므로, 국가에서 운영하는 첨단 연구센터나 실험실을 설립하여 연구자들이 이를 공동으로 활용하는 방식을 추구해야 한다.

특화 분야 및 지역별 서비스 거점으로 과학기술정보통신부는 나노종합기술원(대전)과 한국나노기술원(수원)을, 산업통상자원부는 나노융합기술원(포항)과 나노기술집적센터(광주, 전주)와 나노공정기술센터(대구)를 구축·운영하고 있다. 이처럼 국가 기관에서 운영하는 나노인프라 외에 공공 및 대학에도 나노인프라가 구축되어 있으나 주로 반도체 관련 분야에 치중되어 있다. 이는 반도체 관련 장비가 상당수 초고가인 관계로 이에 대한 수요가 많기 때문으로 풀이된다. 바이오 특화단지인 전남 바이오클러스터에는 나노바이오연구센터가 구축되어 있다.

국내 나노관련 지원 기관으로 국가나노기술정책센터(서울), 나노기술연구협의회(서울), 국가나노인프라협의체(대전), 나노안전성기술지원센터(대전), 나노융합산업연구조합(수원), 한국탄소나노산업협회(서울)가 있다. 이같이 다양한 기관이 있음에도 불구하고 중소기업의 경우 정보의 부족으로 이러한 기관의 도움을 받지 못하는 경우가 있을 수 있다. 정부가 기업에게 one-stop으로 도움을 제공할 수 있는 시스템을 구축·운영한다면 우리나라의 나노관련 기업에 큰 도움이 될 것이다. 이러한 시스템은 연구의 질을 높이고, 다양한 분야의 연구자들이 최신 기술을 이용할 수 있도록 하여, 국내 나노과학 연구의 전반적인 수준을 끌어올리는 데 기여할 것이다.

### 6.2.3. 인재 양성 및 교육 지원 확대

정부는 나노과학 분야의 우수한 인재를 양성하기 위해 적극적으로 교육과 훈련 프로그램을 지원해야 한다. 나노과학의 발전을 위해서는 이론적 지식과 함께 고도의 기술적 역량을 갖춘 전문 인력이 필요하다. 이를 위해 대학과 연구기관에서는 나노과학 관련 교육과정과 연구 프로그램을 강화하고, 정부는 이러한 프로그램이 안정적으로 운영될 수 있도록 재정적 지원을 제공해야 한다.

### 6.2.4. 연구 윤리 및 안전성 규제 마련

정부는 나노과학 연구에서 발생할 수 있는 윤리적 문제와 안전성 이슈에 대해 명확한 규제와 기준을 마련해야 한다. 나노소재가 인체와 환경에 미치는 영향은 아직 충분히 연구되지 않았기 때문에, 정부는 이를 사전에 평가하고 예방할 수 있는 제도를 구축할 필요가 있다. 이를 통해 나노과학이 안전하게 발전하고, 연구 성과가 사회적으로 신뢰받을 수 있도록 하는 것이 중요하다.

## 103 산업계



### 6.3.1. 산학 협력 활성화

산업계는 학계와의 긴밀한 협력을 통해 나노과학 연구 성과를 실질적인 상용화로 연결해야 한다. 나노기술은 다양한 산업 분야에서 혁신적인 제품을 개발할 수 있는 잠재력을 가지고 있는 도우미 기술로서, 이를 실현하기 위해서는 학계의 기초 연구와 산업계의 응용 기술이 결합되어야 한다. 이를 위해 기업은 학계와의 공동 연구를 활성화하고, 기술 이전을 통해 연구 성과를 상용화할 수 있는 기반을 마련해야 한다. 산학 협력의 확대는 연구와 산업 양쪽에 큰 시너지를 창출할 수 있는 중요한 요소다.

### 6.3.2. 기술 상용화 및 투자 확대

산업계는 나노과학의 연구 성과를 실질적인 제품과 서비스로 전환하기 위해 적극적인 투자를 확대해야 한다. 나노기술은 의료, 전자, 에너지 등 다양한 산업 분야에서 응용될 가능성을 가지고 있으며, 이를 상용화하기 위한 자본과 자원이 필수적이다. 기업은 학계와 연계하여 학술 가치가 높지만 상업화 단계가 낮은 나노기술(TRL 1-4 단계)의 상용화를 위해 필요한 자금을 투입하고, 상업적 가치가 있는 연구 성과(TRL 6-9 단계)로 발전시켜 산업 현장에 적용할 수 있는 기반을 구축할 구체적인 계획을 수

립할 필요가 있다. 이를 통해 나노기술이 새로운 시장을 창출하고 세계 시장을 선점하여, 기업의 경쟁력을 높이는 데 기여할 수 있다.

### 6.3.3. 인재 확보 및 전문 인력 교육

산업계는 나노기술을 실질적으로 산업에 적용할 수 있는 고도로 훈련된 전문 인재를 확보하는 데 노력을 기울여야 한다. 나노기술은 매우 복잡하고 정교한 분야이므로, 이 기술을 다룰 수 있는 인재를 산업계에서 충분히 확보하는 것이 중요하다. 인재 양성은 기술 상용화의 성공 여부를 좌우할 수 있으며, 산업계가 필요로 하는 전문 역량을 갖춘 인재들을 배출함으로써 기업의 성장과 기술 개발에 기여할 수 있다.

### 6.3.4. 나노기술 관련 규제 준수 및 안전 관리

나노기술의 상용화 과정에서 발생할 수 있는 안전성 문제를 예방하기 위해, 산업계는 관련 규제를 철저히 준수해야 한다. 나노소재는 예상치 못한 안전성 문제가 발생할 수 있으므로 이를 사전에 방지하기 위한 엄격한 안전 관리 체계를 마련하는 것이 필수적이다. 기업은 나노소재가 인체와 환경에 미치는 영향을 면밀히 평가하고, 이를 바탕으로 안전한 제품을 개발하는 데 집중해야 한다.



# 7

## 기술확산 및 기술사업화

- 정의
- 기술확산 및 기술사업화의 필요성
- 기술사업화의 현 상황
- 기술이전 사업화 프로세스에 대한 이론적 고찰
- 우리나라의 상황
- 대학/정부출연연구기관 기술사업화 협력 제고 방안
- 첨언

## 기술확산 및 기술사업화

### 1 정의

- **기술확산:** 국가 기술혁신 시스템에서 어떤 매개 기구나 채널을 통하여 기술 지식이 교류됨으로써 경제 활동의 주체가 혁신된 지식을 공유해 가는 과정.
- **기술사업화:** 기술을 이용하여 제품을 개발·생산 또는 판매하거나 그 과정의 관련 기술을 향상시키는 것.
- **기술사업화의 성공:** 개발기술의 확산과 활용을 통해 경제적 부가가치가 창출된 경우, 또는 기술 개발비용(기술이전비용 포함)과 생산투자 및 판매비용보다 많은 수익을 확보하여 손익분기점을 넘었을 경우.

### 2 기술확산 및 기술사업화의 필요성

공공부문 R&D에서 창출된 연구 성과는 혁신의 원천 중 하나에 해당하는 것으로, 기술확산 및 기술사업화는 다음과 같은 관점에서 필요성을 갖는다.

- ① 경제적 성장 촉진: 기업의 생산성 향상, 신규 시장 창출을 통해 경제 성장 촉진
- ② 혁신의 촉진: 연구개발 결과의 상용화를 통해 시장에 혁신적인 제품과 서비스를 제공
- ③ 일자리 창출: 신생 기업/산업이 생겨 일자리 창출 및 지역 경제 긍정적인 영향
- ④ 지식 전파: 기업 간의 협력/네트워킹 촉진, 지식/정보 공유를 통해 전체 산업 경쟁력 향상에 기여
- ⑤ 사회적 문제 해결: 기술이 사회적 문제 해결에 혁신적인 해결책 제공, 지속 가능한 발전에도 기여

이에, 정부는 기술확산 및 사업화를 위한 정책과 프로그램을 마련하여 기업들이 기술을 쉽게 활용하고 상용화할 수 있도록 지원해야 한다.

### 3 기술사업화의 현 상황

이같이 혁신의 원천으로 인식되며 정부의 R&D 투자가 확대되었음에도 불구하고, 국민 기대를 충족하는 경제·사회적 사업화 성과창출은 미흡하다는 지적은 꾸준히 제기되고 있다. 지난 20년간 관계자들은 기술사업화 저해 요인 중 하나로 이해관계 차이를 지적하고 있으며 이를 해소하기 위한 협력 강화가 필요하다고 주장한다. 여기서 언급된 '차이'는 기술의 시장성에 대한 견해 차이, 참여주체 간 역량, 투자에 대한 견해 차이 등이 포함된다. 근본적으로 기술사업화는 '공급자-중개자-수요자' 간 양방향 활동이기에 협력이 원활하지 않을 시 사업화 속도가 지연되고 대형 성과창출이 어려워진다.

### 4 기술이전 사업화 프로세스에 대한 이론적 고찰

기술이전 사업화는 아이디어의 착상부터 매출 발생까지 이어지는 장기적인 과정이므로 기술이전 사업화 프로세스를 체계적으로 정리하여 모델화한 연구가 다수 존재한다. 대표적으로 국제경영개발원(IMD) 교수인 줄리가 1997년에 제시한 '5단계(subprocess) 4전이(bridge) 이론'인 Jolly의 모델이 있는데, 이 모델에서는 각 기술사업화 단계가 이해관계자 요구를 충족시킴과 함께 '자원'이 함께 동원되어야만 단계별 전이가 일어날 수 있다고 본다. 따라서 기술사업화를 추진할 때 이해관계자 간의 협력이 중요하게 된다.

OECD의 자료에 따르면 기술이전 사업화는 기본적으로 '공급자-수요자' 간 양방향의 과정이며 공급자, 수요자 간에는 '정보의 비대칭, 이해관계자'의 상충으로 인한 부문을 원활하게 하기 위하여 '중개조직'이 존재한다. 따라서 기술이전 사업화의 성패는 이해관계자의 활동을 원활하게 해주는 구조 형성에 있으며 중앙정부와 부처는 관련 인프라를 구축하는 역할을 추진하게 된다.

2000년대에 들어 연구자(TLO(중개자)/기업/투자자의 이해관계에 따른 연구도 진행된 바 있다. 최종적으로는 연구개발성과를 통한 경제적 이득 획득이라는 목적은 유사하다(표 7.1).

표 7.1 기술이전 사업화 이해관계자별 특성

|              | 행동                   | 1차 동기                       | 2차 동기               | 관점       |
|--------------|----------------------|-----------------------------|---------------------|----------|
| 연구자          | 새로운 지식의 발견           | 과학 커뮤니티 내 인지도<br>(논문, 연구자금) | 재무적 이득<br>연구자금 추가확보 | 과학적      |
| TLO<br>(중개자) | 연구자와 기업가 간의<br>거래 창출 | 대학 지식재산권의<br>보호 및 판매        | 기술확산<br>연구자금 추가확보   | 관료적      |
| 기업           | 신기술의 사업화             | 재무적 이득                      | 사적기술의 관리            | 조직적/기업가적 |
| 투자자          | 투자 대상의 발굴            | 실질적 투자 수익(지분에 따른 배당) 실현     |                     | 조직적/기업가적 |

출처: 박종복, 2008

## 105 우리나라의 상황

### 7.5.1. 대학 및 정부출연연구기관

대학과 정부출연연구기관(출연연)은 공공R&D 투자의 67%(2021년 기준)를 차지하고 있으며 17개 지자체 R&D 네트워크의 중심으로 알려져 있다. 대학/출연연 전담조직은 소속기관 구성원의 기술사업화를 지원하면서 내부 및 외부 기술사업화 협력조직, 내부 연구자, 외부 수요기업 등과 협력하고 있다.

기술사업화 지원조직은 기술이전촉진법에 따른 전담조직(TLO, Technology Licensing Organization) 가운데 공공부문 기술이전 사업화 촉진 관련 업무를 추진하고 있는 대학과 출연연 내부의 기술사업화 지원조직으로 정의된다. 내부협력기관으로는 기술지주, 창업보육센터 등이, 외부협력기관으로는 기술이전조직, 특구, 지역클러스터, 민간 컨설팅, 액셀러레이터 등이 있다.

### 7.5.2. 국가연구개발사업 기술사업화를 둘러싼 환경

공공부문 기술사업화는 R&D 및 성과확산 인프라를 포함하며, 다수 부처가 관계법령을 제정하고 있다. 각 법령의 종합조정 기능은 없으며 부처별 추진하고자 하는 정책 특색에 맞춰 개별적으로 제정되어 있다. 즉, 종합조정 기능 없이 다양한 부처가 5~6개 법으로 사업화를 지원하고 있어(표 7.2) 흩어진 자원의 효율적 활용을 위한 협력이 더욱 중요하다. 이해관계자 간의 공통적 규칙은 협업의 기반이기 때문에 관계자 간 권한과 책임, 수익배분 등에서 갈등을 방지하고 상호 호혜성을 제고할 수 있는 정책 간 조화 마련이 필요하다.

표 7.2 부처별 기술사업화 규정

| 부처  | 주요 기술사업화 법령                                          |
|-----|------------------------------------------------------|
| 과기부 | 과학기술기본법, 국가연구개발혁신법, 연구개발특구법, 연구산업진흥법, 지식재산기본법, 성과평가법 |
| 산업부 | 기술이전촉진법, 산업기술혁신촉진법,                                  |
| 중기부 | 중소기업창업지원법, 벤처투자법, 벤처육성법                              |
| 교육부 | 산학협력촉진법                                              |
| 특허청 | 특허법, 발명진흥법                                           |
| 기 타 | 중여세법, 이해충돌방지법, 부당청탁 및 금품수수 방지법 등                     |

## 106 대학/정부출연연구기관 기술사업화 협력 제고 방안

2010년 이후 국내에서도 기술사업화와 관련하여 많은 연구가 있어 왔다. 그 중 기술사업화 협력 방안에 대하여 요약하면 다음과 같다. (박지원 외, 2015)

### ① 이해관계자 간 사업화에 대한 장기적 비전 공유

- 대학/출연연 특화 기술 중심, 또는 지역 전략산업과 연계한 선택과 집중이 필요하다.
- 대학/출연연 조직은 창업 관련 인큐베이션, 투자, 네트워킹 등 비즈니스 중심 기능으로 변모해야 한다.

### ② 이해관계자 간 관계를 조율하는 리더십

- 조직 내 리더십의 의지로 '비전 공유, 명확한 업무분담, 자원공유' 등이 이뤄질 수 있는 시스템이 필요하다.
- 의사결정 기능을 어떠한 조직에서 가질 것인가에 대해 협업의 주도자를 명확하게 지정해야 한다.

### ③ 거버넌스 체계 효율화

- 정부 지원사업 사업에 맞춰 대학/출연연 조직을 운영하기보다 테마 중심 거버넌스 체계를 마련해야 한다.
- 필요한 경우, TLO, 기술지주회사 간 통합 또는 업무위탁 등 유연한 거버넌스 운영도 허용해야 한다.

④ 사업화 지원조직의 전문인력 제고

- 기술이전 사업화 지원조직 장기 근속자가 CBO(Chief Business Officer) 등 책임자 자리에 오를 수 있는 경력 설계가 필요하다.
- 전문인력 유인체계 마련, 기술사업화 전문직군 등을 고려해야 한다.

⑤ 공통의 규칙에 대한 점검

- ‘성과귀속, 수익의 배분, 투자계획’ 등에서 갈등이 발생하지 않도록 법제 및 내부 규정 정비가 필요하다.
- 모호한 영역에서는 공식/비공식적 대화, 정책제언을 통해 이해 및 조정이 필요하다.

⑥ 공동의 재정 지원

- 재정 지원 시 ‘사업화 지원조직-연구자-기업’ 등 이해관계자 간 함께 참여할 수 있는 기획이 필요하다.

## 107 **첨연**



서울대학교는 연간 1,000건 정도의 특허를 출원하고 있으나, 이에 비해 전문인력은 턱없이 부족한 상황이다.

대학 중에서는 국내에서 가장 많은 전문인력을 보유하고 있다는 서울대 산학협력단에 소속된 변리사는 5명 정도로, 서울대 산단이 실질적으로 수행할 수 있는 업무는 특허 관리 및 기술이전 시의 계약 관리 정도이다. 따라서 능동적으로 수요자를 탐색하여 기술이전을 추진할 여력은 전혀 없다고 보아도 무방하다.

이에 비해 미국 MIT는 연간 200~300건 정도의 특허를 출원하고 있으며, 박사급 기술평가 전문인력만 30명 이상이 소속되어 있다. 산술 평균으로 보면, 특허 전문인력 1인이 연간 담당하는 특허의 수는 서울대가 200건, MIT가 10건으로, 서울대에서 특허를 관리하는 수준이 낮을 수밖에 없는 구조이다.

이는 우리나라가 특허의 질보다 양에 치중하고 있는 것으로, 향후 특허 전략에 변화가 있어야 할 것으로 사료된다.



# 8

## 국가별 나노기술 추진 현황

- 대한민국
- 미국
- 중국
- 일본
- 유럽연합
- 독일

국가별 나노기술 추진 현황

101 대한민국

8.1.1. 개요 및 추진

과학기술정보통신부는 ‘나노기술개발촉진법’에 따라 2008년 「제1기 국가나노기술지도」 수립을 시작으로 10개 관계부처와 협력하여 5년마다 향후 10년의 나노기술지도를 수립하고 있다(이대길 외, 2024). 2021년 수립된 나노기술 분야 최상위 계획인 「제5기 나노기술종합발전계획(’21~’30, 5+5)」의 적극 이행을 위해 나노기술개발 중장기전략과, 대내외 경제·사회·기술 환경변화에의 선제적 대응, 나노분야 연구개발의 전략적 방향을 설정하고 있다.

8.1.2. 추진 현황

「제4기 국가나노기술지도」는 지난 제1기~제3기의 한계로 지적되었던 점들(표 8.1)에 대한 개선과 함께, 나노기술이 딥테크(Deep Technology)라는 특징점을 살려 그간 축적한 나노기술 연구·개발 역량 활용을 극대화하고자 하였다.

표 8.1 제1기~제3기 국가나노기술지도의 의의 및 한계

| 구분                      | 의의 및 한계                                                                         |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 제1기 국가나노기술 지도 (’08~’17) | (의의) 나노기술 분야 최초 기술지도로 국가 차원의 나노기술 현황 파악에 기여<br>(한계) 나열식 지도에 가까워 정책 수립 시 참고에 한계  |
| 제2기 국가나노기술 지도 (’14~’25) | (의의) 나노기술로 구현되는 최종제품 중심 기술지도 작성 시도<br>(한계) 정보의 시각화·조직화가 이루어지지 않아 적절한 정보 제공 제한적  |
| 제3기 국가나노기술 지도 (’18~’27) | (의의) 미래 사회 실현에 나노기술의 중추적 역할 및 방향 제시<br>(한계) 전략적·사전적 기술지도의 병렬 진행으로 연계성 및 일관성 제한적 |

8.1.3. 참고 사항 - 기초과학연구원

기초과학연구원에서는 나노소재에 대한 기초 연구와 의료 및 에너지 등 다양한 분야의 응용 기반 연구를 수행하는 6개의 연구단을 운영하고 있다(표 8.2).

표 8.2 나노 관련 기초과학연구원 연구단 운영 현황(2023년)

| 연구단명            | 주요 연구내용                                     | 연구착수     | 비고             |
|-----------------|---------------------------------------------|----------|----------------|
| 나노입자            | 화학적 방법을 이용한 나노입자 합성, 어셈블리, 에너지 및 의료 응용      | 2012.08. | 나노바이오          |
| 원자제어<br>저차원 전자계 | 원자수준에서 창조되고 제어된<br>인공 저차원 전자계에서의 새로운 양자물성연구 | 2013.06. | 나노소재           |
| 다차원<br>탄소재료     | 새로운 탄소동소체의 디자인, 합성 및 특성분석                   | 2013.11. | 나노소재           |
| 나노의학            | 나노과학을 이용한 생명현상의 관찰, 이해 및 의학적 응용연구           | 2015.12. | 나노바이오          |
| 양자나노과학          | 표면 위 단일 원자의 양자 상태 및 기능 제어                   | 2017.01. | 나노소재           |
| 반데르발스<br>양자 물질  | 새로운 반데르발스 양자 물질 합성과 양자 소자 연구                | 2022.02. | 나노구조 /<br>나노소자 |

※ 기초과학연구원 연구운영비 지원(기초과학연구단 사업(장바·시스템 구축비 포함)) : (’23년) 6개 과제 41,511백만 원(나노기술분야)

102 미국

8.2.1. 개요 및 추진 체계<sup>7</sup>

국가나노기술개발전략(National Nanotechnology Initiative: NNI)은 2003년에 승인된 21세기 나노기술 연구개발법에 의한 미국 정부의 연구 개발(R&D) 전략으로, 20개 연방 부처, 독립 기관과 위원회가 참여한다. NNI의 공식적인 조직 구조에는 국가과학기술심의회(National Science and Technology Council: NSTC)의 나노과학기술분과위원회(Nanoscale Science, Engineering, and Technology: NSET), 나노기술환경보건영향작업반(Nanotechnology Environmental and Health Implications: NEHI) 및 국가나노기술조정실(National Nanotechnology Coordination Office: NNCO)이 포함된다. NEHI 실무 그룹에 참가하는 기관은 NNI의 환경, 건강 및 안전 연구 전략을 발전시키기 위해 협력하고, NNCO는 NSET와 각 기관의 나노기술 커뮤니티에 기술 및 행정 지원을 제공한다.

<sup>7</sup> <https://www.nano.gov/national-nanotechnology-initiative>

### 8.2.2. 추진 전략

NNI가 출범한 이후, 지금까지 6차례의 NNI 전략계획(안)을 발표하였으며, 현 6기 NNI 전략계획(안)은 NNI 생태계의 변화에 대응하고 나노기술 커뮤니티의 현재와 미래의 요구를 보다 잘 지원할 수 있도록 재설계되었다. 향후 5년 동안 기관과 커뮤니티를 안내하기 위한 목표와 목적은 다음과 같다.

### 8.2.3. 추진 목표 및 현황

#### 목표1: 미국의 나노기술 연구·개발 분야에서 세계 선두 유지

지식의 경계를 확장하는 기초적 발견부터 새로운 제품을 가능하게 하고 사회적 난제를 해결하는데 도움이 되는 응용 및 중개적 혁신에 이르기까지 나노기술 연구·개발에 대한 지원을 핵심으로 한다.

#### 목표2: 나노기술 연구·개발의 상용화 촉진

정보를 공유하고 사용자 시설에 대한 접근을 촉진하며 공공-민간 파트너십을 통해 자원을 활용 및 상업화에 중요한 국제표준 활동에 참여함으로써 상용화를 촉진한다.

#### 목표3: 나노기술 연구, 개발 및 배포를 지속 가능하게 지원할 수 있는 인프라

NNI에 참여하는 기관은 도구 개발, 시설의 구축 및 유지, 사이버 자원의 생성 및 보급에 대한 발전을 지원한다.

#### 목표4: 대중 참여 유도 및 나노기술 인력 확대

맞춤형 커리큘럼 개발과 인턴십 프로그램, NNI가 지원하는 연구센터와 커뮤니티 칼리지의 협력으로 기술 인력양성을 촉진하고 있다.

#### 목표5: 나노기술의 책임 있는 개발 보장

NNI 설립 초기부터 필수적인 부분이자 목표로, 나노기술 개발의 윤리적, 법적, 사회적 영향(ELSI)과 나노기술 관련 환경, 보건, 안전(nanoEHS) 영향에 대한 이해, IDEA와 책임 있는 연구 수행과 같은 오래된 고려 사항이 포함된다.

### 8.2.4. 참고 사항 - 국가나노기술개발전략(NNI) 예산

2024년 예산안은 응용 중심 연구·개발에 대한 투자를 늘리면서 역대 최고 수준인 21억 6,000만 달러를 NNI에 요청하였다. 2001년 출범 이후 누적 NNI 기금은 총 430억 달러 이상이다. 예산 순위에 따른 부처별 예산(단위: 백만 달러)은 국립보건원(NIH) 825.7, 에너지부(DOE) 506.5, 국립과학재단(NSF) 428.3, 국방부(DOD) 276.2 이다.

## 03 중국(국가나노기술정책센터, 2024)

### 8.3.1. 개요

중국은 나노기술의 글로벌 발전을 촉진하는 국가 중 하나로서 줄곧 나노기술의 연구개발을 중시해 왔다. 1980년대에 중국 자연과학재단이 나노기술을 계획한 후 지속해서 지원하고 있다. 과학기술부의 ‘973’ 계획과 ‘863’ 계획도 나노기술 관련 사업을 지원하였다.

‘973’ 계획: 나노소재/나노구조, 나노전자공학, 나노소자/나노특수기능 소재, 나노바이오기술 등

‘863’ 계획: 나노정보소재/소자, 나노바이오소재, 나노환경소재, 나노에너지소재, 나노특수기능소재, 나노바이오융합 연구

2001년 중국은 국가나노과학기술지도조정위원회를 설립하였고, ‘10차 5개년 계획’ 기간 동안 과학기술부는 국가 3대 과학기술 계획 및 기타 관련 연구계획을 전면적으로 배치했다.

### 8.3.2. 나노기술 연구개발 추진 현황

중국의 나노연구는 다방면에서 다양한 채널로 지원한 결과 비약적으로 발전하였다. 전반적인 연구 개발 수준은 세계 선진국 수준에 진입하였고 일부 방향의 연구성과는 글로벌 선두를 차지하고 있다. 기초연구 측면에서 중국은 나노분야에서 발표된 SCI 논문 수가 세계 상위권에 진입했다. 2007년 논문 총수는 미국과 비슷한 수준에 이르렀고 현재, 일부 분야를 제외하면 미국을 앞지른 상태이다. 응용 연구 측면에서는 특허 출원 및 등록 상황으로 볼 때 중국의 나노기술 연구개발도 세계 선진 수준에 도달했다.

## 104 일본(국가나노기술정책센터, 2024)

### 8.4.1. 개요

일본의 과학기술정책은 최상위 계획인 과학기술기본계획을 근간으로 추진된다. 일본 과학기술 기본계획은 과학기술기본법(1995년 제정·공표)에 따라 5년 주기로 수립된다. 기본계획은 일본의 과학기술 및 이노베이션에 관한 중장기적인 방향과 목표를 제시하고, 정부의 과학기술정책 및 연구개발 정책에 대한 기반을 마련하는 중요한 역할을 하고 있다. 5년 주기로 기본계획을 갱신함으로써 일본은 변화하는 과학기술 환경에 대응하고, 새로운 도전과제에 대한 대응 방안을 수립하며, 국가의 과학기술분야의 경쟁력을 강화하고 지속적인 발전을 이루어 내고 있다.

1996년부터 제1기 과학기술기본계획(1996~2000)을 시작으로 현재 일본 정부는 제6기 과학기술·이노베이션 기본계획(2021~2025)을 추진하고 있으며, 2023년 일본 정부의 과학기술 관련 예산 중 문부과학성이 전체의 약 48%, 경제산업성이 15%로 두 기관을 합하면 전체의 63%가 과학기술에 투자되고 있다.

### 8.4.2. 일본 나노기술 연구개발 동향

2023년 3월, 일본 과학기술진흥기구(JST)와 연구개발전략센터(CRDS)는 나노기술·재료분야(2023) 연구개발 부감 보고서를 발간하였다. 일본 국내외 사회·경제 및 과학기술 연구개발·정책 동향을 파악하여 연구개발 전략 수립의 기초자료로 활용하기 위한 것으로, 나노기술·재료분야를 7개로 구분 및 12개의 연구개발 영역을 분석하고 향후 방향성을 검토하였다. 특히, 연구개발영역은 사회의 변화, 과학기술의 흐름, 산업/안전보장 3가지의 중요한 영역으로 설정하였다.

### 8.4.3. 주요기관

#### 물질·재료연구기구(NIMS)

물질·재료연구기구(NIMS)는 물질·재료에 관한 기초·기반적 연구활동을 실시하는 일본 내 유일한 공공 연구기관으로 일본의 물질·재료연구의 핵심적인 역할을 담당한다. NIMS는 2001년부터 중기 계획과 목표를 설정하기 시작하였으며, 최근 계획으로는 2023년 2월에 향후 7년간의 중장기 계획(2023년 4월 1일~2030년 3월 31일)을 수립하였다.

### 이화학연구소(RIKEN)

이화학연구소(RIKEN)는 일본 유일의 자연과학 종합연구소로 물리학, 공학, 화학, 수리·정보과학, 계산과학, 생물학, 의과학 등의 분야 관련 연구를 진행하고 있다. RIKEN은 ① 정보통합본부, ② 과학 허브산연본부, ③ 개척연구본부/주임연구원 연구실, ④ 전략센터, ⑤ 기반센터 등 5개로 구성되어 있다. 동 연구센터 안에는 18개의 연구 개발팀이 주제별로 연구를 진행하고 있다.

## 105 유럽연합

### 8.5.1. 유럽 나노기술 정책 개요

현재 유럽연합에는 나노기술만을 위한 전용 지원 정책은 따로 존재하지 않으며, 나노기술은 핵심 기반기술(KET) 정책 등 더 광범위한 산업 정책 분야에서 다루어지고 있다 (European Commission, 2011).

#### 8.5.1.1. 나노과학기술 실행계획 2005~2009

나노기술에 관한 유럽연합의 처음이자 마지막 정책으로, '안전하고 통합적이며 책임감 있고 지속 가능한' 나노기술 개발이라는 EU의 방향성과 정책적 틀을 확립하였다. 이때 주요 과제로 지목된 연구 개발 투자 증대, 혁신을 통한 상업화 촉진, 인적 자원 개발의 필요성 등은 여전히 나노기술이 포함된 여러 포괄적인 정책 분야에서 계속해서 다루어지고 있다.

#### 8.5.1.2. 핵심기반기술(KET) 정책

유럽연합이 핵심기반기술(KET)로 지정한 기술은 첨단제조기술, 첨단(나노)소재, 생명공학, 마이크로·나노 전자공학 및 광자, 인공지능, 보안·연결 기술 등 총 6가지이다. 유럽연합은 KET의 개발을 위해 Horizon Europe 프로그램 등 다양한 연구, 개발, 혁신, 산업정책을 통해 이를 지원하고 있다.

#### 8.5.1.3. 유로나노포럼(Euro Nano Forum)

유럽연합 내 나노기술에 관한 정책적 논의는 2003년부터 유로나노포럼(Euro Nano Forum)을 통해 추진되어 오고 있다.



### 8.5.2. 유럽연합 내 나노기술 관련 규제

유럽연합은 나노 안전성에 대한 접근방식으로 나노물질의 전체 생애주기에 걸쳐 안전성을 보장하는 ‘safe-by-design’ 접근법을 채택하고 있다.

### 8.5.3. 유럽연합 첨단소재 전략 배경

#### AMI2030 이니셔티브

AMI2030을 주도하는 4개의 창립멤버는 EMIRI(에너지소재산업연구이니셔티브), EUMAT(유럽 첨단공학소재기술플랫폼), SUSCHEM(지속가능화학을 위한 유럽기술플랫폼), MANUFUTURE(제조 산업을 위한 유럽기술플랫폼)이며, AMI2030은 유럽연합 집행위원회와 선언문에 서명한 560여 개의 파트너의 지원을 통해 추진되고 있다.

#### 그린딜산업계획

기후중립산업의 경쟁력을 강화하고 기후 중립으로의 빠른 전환을 지원하기 위한 계획이다.

### 8.5.4. 정리

2024년 3월 우리나라의 호라이즌 유럽 준회원국 가입 협상이 타결됨에 따라 우리나라는 2025년부터 유럽연합의 연구혁신 프레임워크 프로그램인 호라이즌 유럽에 준회원국으로 참여할 예정이다.

한-EU 파트너십을 통해 유럽연합 집행위원회와 반도체 공급망에 대한 정보 교환을 추진하고, 유럽연합 칩공동사업단(Chips JU)과의 반도체 공동연구를 추진하고 있으며, 이러한 협력이 이번 준회원국 가입과 첨단소재 전략에 따라 첨단소재 및 나노기술분야에서도 더욱 확대될 것으로 기대할 수 있을 것이다.

## 106 독일

### 8.6.1. 개요

독일 연방정부는 나노기술분야를 발전시키고, 나노기술이 독일의 6대 미래 핵심 과제(디지털 경제와 사회 조성, 지속 가능한 경제 및 에너지, 혁신적인 노동환경, 건강한 삶, 지능형 모빌리티, 시민의 안전)를 해결하는 데 기여할 수 있도록 5년 단위 범부처형 지원 정책 ‘액션 플랜 나노테크놀로지 2020’ (2016-2020)을 추진하였다.<sup>8</sup>

### 8.6.2. 독일 나노기술의 발전 배경

독일의 주요 기업은 연구기관과의 긴밀한 협력을 통해 기술혁신과 상업화를 추진하고 있으며, 이러한 기술개발을 토대로 독일의 나노기술산업은 지속해서 발전하고 있다.

**BASF:** 세계 최대 화학기업. 나노기술을 이용한 다양한 제품과 소재 개발

**Bayer:** 글로벌 의약품 및 농업화학기업. 나노의학 및 나노바이오기술을 활용한 연구와 개발

**Evonik:** 전문화학기업. 나노소재 및 나노코팅 기술에 관한 연구 및 개발

독일 내 연구기관은 다수의 Max Planck 연구소, 나노기술 및 재료분야의 연구를 수행하는 Fraunhofer Society, 나노 및 복합소재에 관한 연구와 개발을 하는 Leibniz Institute for New Materials(INM), 대형 연구기관으로, 나노기술 및 소재연구에 관심이 있는 여러 센터를 포함하는 Helmholtz Association 등이 존재한다.

### 8.6.3. 주요 연구 프로젝트 현황

#### 8.6.3.1. 나노 이니셔티브 (Nano in Germany eV)

독일 나노기술연구의 핵심 원동력으로, 나노전자공학, 나노물질, 나노생명공학 및 나노광학과 같은 다양한 분야의 프로젝트에 자금을 지원한다.

#### 8.6.3.2. 나노기술 클러스터 (Cluster Nanotechnologie)

나노기술 클러스터는 비즈니스, 과학, 정치 및 교육분야의 나노기술 역량을 연결하는 네트워크이다.

<sup>8</sup> BMBF 재료 연구 촉진을 위한 핵심 보고서. 2022.

#### 8.6.3.3. 산업 및 사회를 위한 재료혁신(WING)

BMBF(Bundesministerium für Bildung und Forschung: 연방교육연구부) 프로그램으로, 자동차, 우주항공 및 의료와 같은 산업의 과제를 해결하기 위해 나노기술 및 첨단 재료를 포함한 다양한 분야의 R&D 프로젝트를 지원한다.

#### 8.6.4. 정리

BMBF의 나노 이니셔티브 및 관련 정책이 독일 나노기술의 성장과 발전에 크게 기여했지만, 연구 자금 조달, 기술규제 및 제한적인 응용분야 등의 여전히 제도적 한계를 지니고 있다. 하지만 기업, 학계, 정부 간의 협력을 강화하여 나노기술분야의 혁신을 촉진할 것으로 예상된다.



# 9

## 결론 및 전망

## 결론 및 전망

나노과학은 소재의 구조나 패턴의 크기가 100nm 이하인 경우에 보이는 특별한 현상을 연구하는 학문이다. 나노 크기 영역은 빛의 파장이나 전하 캐리어의 물질 파장, 플라즈몬 공명 현상이 관찰되는 거리 범위, 큰 생체분자의 크기 등을 포괄한다. 나노구조는 부피에 비해 표면적이 매우 넓어 벌크 구조에서는 보지 못한 새로운 물성을 나타내며, 그 물성을 연구하여 활용하는 나노기술은 소재의 성능을 크게 향상시키는 한편, 완전히 새로운 응용 분야를 창출해 왔다. 나노기술은 반도체 물리, 유기/무기화학, 분자생물학, 생명공학 등을 도구로 사용하여 전자 기기, 공업용 촉매부터 정밀 의학, 양자 기술에 이르기까지 두루 응용되고 있다. 나노과학은 우리의 세계가 당면한 문제와 연관된 다양하고 새로운 현상과 광범위한 소재, 응용 기술의 탐색을 통해 매우 다른 성격의 여러 학문 영역을 폭넓게 아우르는 학제 간 연구의 대표 분야로 인정받고 있다.

지질 나노입자 연구의 가치가 코로나19 백신 개발을 통해 빛을 발하고 양자점(퀀텀닷) 연구자가 2023년 노벨화학상을 수상하면서 지난 30여 년 동안 발전해 온 나노과학기술의 르네상스가 열리고 있다. 지질 나노입자처럼 수많은 임상시험 데이터가 축적되어 온 제형이 아니었다면, mRNA를 이용하는 백신의 신규성과 맞물려 코로나19 백신의 신속한 개발과 초거대 규모 임상 적용이 불가능했을 것이다. 약제가 안전하게 체내에 투여되고 표적 질병 조직에 도달하여 그 효능을 긴 시간 동안 유지할 수 있는 새로운 제형의 의약 개발이 최우선 과제이며, 이와 더불어 성공적인 개발과 승인을 위해서는 나노입자의 특성 분석, 생산 규모 증대, 안전성 평가 등 데이터 축적을 위한 기초 연구의 중요성이 높아진다고 하겠다. 양자점 시장에서는 상용 제품이 급격하게 증가하는 추세이며 이미 상용화된 디스플레이 시장이 점차 확대되고 양자컴퓨팅 개발 등의 이유로 양자점에 대한 수요가 증가하고 있다.

기후 변화로 인해 지구 곳곳에서 폭염의 기록이 연일 경신되었던 2024년 여름으로 미루어 볼 때, 나노기술의 발전이 가져올 가까운 미래의 모습은 에너지, 기후, 환경 등의 요소와 밀접한 연관이 있을 것으로 예상하게 된다. 나노과학기술은 이산화탄소 배출 저감, 수분해 광촉매 개발, 정수 처리, 재활용

을 통한 물질 순환 촉진 등 다양한 경로를 통해 지속 가능한 사회 구현에 이바지할 것이다. 환경에 영향을 적게 미치는 이동 수단 개발에 필요한 고강도 경량 소재 연구, 안정적인 에너지 공급과 에너지 생산 비용 절감, 그린 수소 생산 등 에너지·환경 부문의 중요 연구 과제가 나노기술과 밀접히 연관되어 있다. 위협적인 현실로 다가온 기후 변화 시대에 대응하기 위해서는 우리나라가 처한 현실에 적합한 나노과학기술 분야 최신 연구과제의 발굴과 정부 부처의 일관된 지원이 필수적이다.

KISTEP에서 2024년 2월에 발간한 2022년 기술수준평가 결과보고서에 따르면 한국의 소재·나노 분야의 기술 수준은 전 세계 4위권에 해당한다(이희권 외, 2024). IBS 나노입자연구단의 단장인 입장에서 바라본다면 2000년대의 창의적연구진흥사업, 2011년부터 시작된 기초과학연구원(IBS) 등 20여 년에 걸친 대규모 국가연구지원사업의 학술적 성과가 현재 기술 수준 달성에 큰 역할을 했으리라 판단할 수 있다. 나노소재 관련 기술은 나노융합2020 사업 추진 이후에 대규모 투자가 미흡한 상황이었어서 이에 대한 정부의 연구비 투자가 필요하다는 진단이 이 보고서에 담겨 있으며, 응용연구개발 역량에 비해 상대적으로 기초연구개발 역량이 취약한 것으로 분석하였다. 2022년 기준 중국(5위)과 한국의 기술 수준은 대동소이한 것으로 평가되었는데, 보고서에 제시된 논문과 특허의 증가 추세로 볼 때 2년이 지난 지금은 양국의 순위가 역전되었을 가능성도 있다. 한층 고도화된 물질 제어 기술이 필요한 첨단 나노소재 연구의 특성상 연구비 규모 확대와 배분 효율의 제고가 절실히 되는 부분이다.

미국은 오랜 기간 축적되어 온 나노과학기술의 영향력이 코로나19 백신의 성공으로 입증되고 양자점 연구자의 2023년 노벨화학상 수상이 부스터가 되면서 국가 차원의 나노과학기술 연구 지원 모멘텀을 꾸준히 이어가고 있다(The National Nanotechnology Initiative, 2024). 매년 발행되는 NNI 예산 보고서에는 예산 배분 현황과 함께 기초, 응용, 인프라 구축 등의 5개 분야에서 미국 내 각 국립연구센터가 지원받아 수행 중인 나노과학기술 연구 현황이 종합적으로 정리되어 있다. 기술 장벽을 뛰어넘게 만드는 나노기술 탄생의 배경은 장기간에 걸쳐 쌓은 기초 연구이므로 2024년에도 가장 많은 예산(45%)을 기초 연구에 배정했음을 보고서에서 알 수 있다. 기후 변화의 이해와 기후 위기 완화, 청정 에너지 연구, 지속 가능한 나노제조기술 연구, 나노소재와 생체시스템 간의 계면 현상에 관한 연구, 나노소재의 가공 공정과 관련된 기초 물리 현상 연구 등 단시간 내 응용기술로 이어지기 어렵지만 각 분야 기술 혁신의 바탕이 되는 연구를 국가에서 대규모 예산으로 지원하는 것이다.

한편, 대한민국 국가나노기술정책센터에 게시된 정책연구보고서 목록을 살펴보면 2022년 이후 발간된 정책연구보고서는 “탄소중립 실현을 위한 CCU 및 나노기술 동향(2024)” 1건으로, 체계적이고 일원화된 나노기술정책과 종합 예산 관리의 부재 상황이라 할 만하다. 나노기술 및 정책 정보 중 최근 1년간 관련 정책을 모아 보면, 세계적 석학과의 공동연구개발을 통한 국내 기업의 쿼텀닷 디스플레이 연구 지원(산업부), 양자과학기술 분야 육성과 지원 방안을 모색할 쿼텀 프론티어 전략협의회 구성(과기정통부), 12대 국가전략기술 육성에 관한 제1차 국가전략기술 육성 기본계획(‘24~’28) 발표(과기정통부), 세계 최고수준(Top-Tier) 연구기관 간 협력플랫폼 구축 및 공동연구지원 사업(과기정통부), 국가 수소 중점연구실 출범(과기정통부), 무기발광 산업육성 얼라이언스 개최(산업부), 온실가스 감축목표 이행을 위한 이산화탄소 포집·활용 초대형 사업 추진(과기정통부), 친환경 모빌리티용 고성능 차세대 배터리 기술개발 사업(산업부, 대기업이 과제 주관), 국가기술표준원의 나노전기전자 기술의 국제표준화 추진(산업부), IBS 나노의학연구단-독일 막스플랑크 의학연구소의 나노의학 국제 연구 플랫폼 구축, 나노기술 적용 의약품 개발지원(식약처) 등을 직접 관련된 정책으로 꼽을 수 있다.

앞에 열거된 정책을 포함해 최근 1년간 국내 정책 동향에 해당하는 약 100건의 게시물을 국가나노과학기술정책의 현실로 간주하고 분석해 보면, 나노과학기술 분야의 정책 지원은 국가 주력사업으로 전폭적인 지원을 받는 반도체 분야에 매우 편중되어 있으며 학계보다는 산업계 주도 연구와 해당 산업 육성에 훨씬 많은 국가 예산이 편성되어 있음을 알 수 있다. 반면 지난 1년간 국가나노기술 R&D 성과 관련 뉴스 게시물 500여 건은 대부분 여러 대학과 국가지원연구센터, 정부출연연구소 소속 연구팀의 성과이다. 신진 연구 인력이 풍부한 대학과 그곳에 설치된 국가지원연구센터의 눈부신 성과는 나노과학기술의 뿌리에 해당하는 학계의 기초 연구 수행에 더욱 탄탄한 국가의 지원이 뒷받침되어야 함을 입증한다. 튼튼한 뿌리가 자라나야 풍성한 열매를 맺을 수 있다는 상식에 기반해 보면 국가나노과학기술 정책이 향후 어느 부문에 집중되어야 할지 분명해 보인다.

미래에 다가올 문제를 해결하는 연구에는 최신 경향을 쫓기보다 한발 앞서 나가는 선구안이 필요하다고 하겠다. 대한민국이 미래의 첨단 나노과학기술을 선도하려면 국가지원연구과제 선정 과정에서 한층 도전적이고 신규성이 높은 연구 제안서 발굴과 신진 연구 인력 지원이 절실히 요구된다. 저성장/탈성장 시대에 접어들면서 침체되고 있는 제조업의 수출경쟁력 향상에도 꾸준한 관심과 투자가 필요하겠지만, 빠르게 변화하는 세계에서 유력하고 새로운 과학기술 분야에, 특히 인적 자원에 대해 과감한 지원을 아끼지 않는 기초의 유연한 국가 재정 운용이 미래의 국가 경쟁력을 견인할 것이다.



참고문헌

국가나노기술정책센터(NNPC). 2024. 중국의 2050 나노과학기술발전 로드맵.

국가나노기술정책센터(NNPC). 2024. 2023 일본 나노기술 정책 동향 조사 분석 연구.

박종복. 2008. 기술사업화 이론과 기술경영 적용방안. 산업연구원(KIET).

박지원, 윤수진, 박범수. 2015. 공공R&D 이전기술의 사업화 성공요인 분석 및 성과제고 방안. 기술혁신학회.

이대길, 문희성, 이차연, 채은실, 나중주, 최경호, 김덕기, 함혜민, 박재민, 이경엽, 이태걸, 공순덕, 박혜선, 정연주, 이준영, 정연진. 2024. 2023 나노기술연감. 과학기술정보통신부.

이희권, 박창현, 정의진, 이성훈, 권민성, 박면규, 김우찬. 2024. 2022년 기술수준평가 결과보고서. 한국과학기술기획평가원(KISTEP).

홍상범. 2024.9.5. 삼성디스플레이, 양자점 화학적 생산에서 발전 이론 노벨상 수상자 MIT 바덴디 교수 초청 세미나 개최. 양자신문, <https://www.quantumtimes.net/news/articleView.html?idxno=54279>.

Baik, S., Kim, H., Lee, Y., Kang, T., Shin, K., Song, C., Park, O. K., Kang, B., Lee, N., Kim, D., Choi, S. H., Kim, S. H., Soh, M., Hyeon, T., & Kim, C. K. 2024. Orally Deliverable Iron–Ceria Nanotablets for Treatment of Inflammatory Bowel Disease. *Advanced Healthcare Materials*, p. 2401994.

Bok, J., Lee, S. Y., Lee, B. H., Kim, C., Nguyen, D. L. T., Kim, J. W., Jung, E., Lee, C. W., Jung, Y., Lee, H. S., Kim, J., Lee, K., Ko, W., Kim, Y. S., Cho, S. P., Yoo, J. K., Hyeon, Y., & Hwang, Y. J. 2021. Designing Atomically Dispersed Au on Tensile–Strained Pd for Efficient CO<sub>2</sub> Electrorreduction to Formate. *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 143, No. 14, pp. 5386–5395.

Bootharaju, M. S., Lee, C. W., Deng, G., Kim, H., Lee, K., Lee, S., Chang, H., Lee, S., Sung, Y. E., Yoo, J. S., Zheng, N., & Hyeon, T. 2023. Atom–Precise Heteroatom Core–Tailoring of Nanoclusters for Enhanced Solar Hydrogen Generation. *Advanced Materials*, Vol. 35, No. 18, p. 2207765.

Chen, M., Liu, J. P., & Sun, S. 2004. One–Step Synthesis of FePt Nanoparticles with Tunable Size. *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 126, No. 27, pp. 8394–8395.

Chen, X., Liu, L., Yu, P. Y., & Mao, S. S. 2011. Increasing Solar Absorption for Photocatalysis with Black Hydrogenated Titanium Dioxide Nanocrystals. *Science*, Vol. 331, No. 6018, pp. 746–750.

Choi, J. S., Kim, S., Yoo, D., Shin, T. H., Kim, H., Gomes, M. D., Kim, S. H., Pines, A., & Cheon, J. 2017. Distance–Dependent Magnetic Resonance Tuning as a Versatile MRI Sensing Platform for Biological Targets. *Nature materials*, Vol. 16, No. 5, pp. 537–542.

Choi, M. K., Yang, J., Hyeon, T., & Kim, D. H. 2018. Flexible Quantum Dot Light–emitting Diodes for Next–generation Displays. *npj Flexible Electronics*, Vol. 2, No. 1, p. 10.

Choi, M. K., Yang, J., Kang, K., Kim, D. C., Choi, C., Park, C., Kim, S. J., Chae, S. I., Kim, T. H., Kim, J. H., Hyeon, T., & Kim, D. H. 2015. Wearable Red–Green–Blue Quantum Dot Light–Emitting Diode Array using High–Resolution Intaglio Transfer Printing. *Nature Communications*, Vol. 6, No. 1, p. 7149.

Choi, M. K., Yang, J., Kim, D. C., Dai, Z., Kim, J., Seung, H., Kale, V. S., Sung, S. J., Park, C. R., Lu, N., Hyeon, T., & Kim, D. H. 2018. Extremely Vivid, Highly Transparent, and Ultrathin Quantum Dot Light–Emitting Diodes. *Advanced Materials*, Vol. 30, No.1, 1703279.

Chung, D. Y., Jun, S. W., Yoon, G., Kim, H., Yoo, J. M., Lee, K. S., Kim, T., Shin, H., Sinha, A. K., Kwon, S. G., Kang, K., Hyeon, T., & Sung, Y. E. 2017. Large–Scale Synthesis of Carbon–Shell–Coated FeP Nanoparticles for Robust Hydrogen Evolution Reaction Electrocatalyst. *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 139, No. 19, pp. 6669–6674.

Chung, D. Y., Jun, S. W., Yoon, G., Kwon, S. G., Shin, D. Y., Seo, P., Yoo, J. M., Shin, H., Chung, Y. H., Kim, H., Mun, B. S., Lee, K. S., Lee, N. S., Yoo, S. J., Lim, D. H., Kang, K., Sung, Y. E., & Hyeon, T. 2015. Highly Durable and Active PtFe Nanocatalyst for Electrochemical Oxygen Reduction Reaction. *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 137, No. 49, pp. 15478–15485.

Dosta, P., Cryer, A. M., Dion, M. Z., Shiraishi, T., Langston, S. P., Lok, D., Wang, J., Harrison, S., Hatten, T., Ganno, M. L., Appleman, V. A., Taboada, G. M., Puigmal, N., Ferber, S., Kalash, S., Prado, M., Rodríguez, A. L., Kamoun, W. S., Abu–Yousif, A. O., & Artzi, N. 2023. Investigation of the Enhanced Antitumour Potency of STING Agonist after Conjugation to Polymer Nanoparticles. *Nature Nanotechnology*, Vol. 18, No. 11, pp. 1351–1363.

European Commission. 2011. Work Programme 2012 – Cooperation Theme 4 – NMP.

Fujishima, A., & Honda, K. 1972. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature*, Vol. 238, No. 5358, pp. 37–38.

Goesmann, H., & Feldmann, C. 2010. Nanoparticulate Functional Materials. *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 49, No. 8, pp. 1362–1395.

Han, S. I., Lee, S. W., Cho, M. G., Yoo, J. M., Oh, M. H., Jeong, B., Kim, D., Park, O. K., Kim, J., Namkoong, E., Jo, J., Lee, N., Lim, C., Soh, M., Sung, Y. E., Yoo, J., Park, K., & Hyeon, T. 2020. Epitaxially Strained CeO<sub>2</sub>/Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanocrystals as an Enhanced Antioxidant for Radioprotection. *Advanced Materials*, Vol. 32 No. 31, p. 2001566.

He, T., Wang, W., Shi, F., Yang, X., Li, X., Wu, J., Yin, Y., & Jin, M. 2021. Mastering the Surface Strain of Platinum Catalysts for Efficient Electrocatalysis. *Nature*, Vol. 598, No. 7879, pp. 76–81.

Hyeon, T., Lee, S. S., Park, J., Chung, Y., & Na, H. B. 2001. Synthesis of Highly Crystalline and Monodisperse Maghemite Nanocrystallites without a Size–selection Process. *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 123, No. 51, pp. 12798–12801.

Jana, N. R., Chen, Y., & Peng, X. 2004. Size–and Shape–Controlled Magnetic (Cr, Mn, Fe, Co, Ni) Oxide Nanocrystals via a Simple and General Approach. *Chemistry of Materials*, Vol. 16, No. 20, pp. 3931–3935.

Joo, J., Na, H. B., Yu, T., Yu, J. H., Kim, Y. W., Wu, F., Zhang, J. Z., & Hyeon, T. 2003. Generalized and Facile Synthesis of Semiconducting Metal Sulfide Nanocrystals. *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 125, No. 36, pp. 11100–11105.

Jung, E., Shin, H., Lee, B. H., Efremov, V., Lee, S., Lee, H. S., Kim, J., Antink, W. H., Park, S., Lee, K. S., Cho, S. P., Yoo, J. S., Sung, Y. E., & Hyeon, T. 2020. Atomic–Level Tuning of Co–N–C Catalyst for High–Performance Electrochemical H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Production. *Nature Materials*, Vol. 19, No. 4, pp. 436–442.

Kang, T., Cha, G. D., Park, O. K., Cho, H. R., Kim, M., Lee, J., Chu, J., Koo, S., Hyeon, T., Kim, D. H., & Choi, S. H. 2023. Penetrative and Sustained Drug Delivery Using Injectable Hydrogel Nanocomposites for Postsurgical Brain Tumor Treatment. *ACS Nano*, Vol. 17, No. 6, pp. 5435–5447.

Kawai, T., & Sakata, T. 1980. Conversion of Carbohydrate into Hydrogen Fuel by a Photocatalytic Process. *Nature*, Vol. 286, No. 5772, pp. 474–476.

Kim, D. C., Seung, H., Yoo, J., Kim, J., Song, H. H., Kim, J. S., Kim, Y., Lee, K., Choi, C., Jung, D., Park, C., Heo, H., Yang, J., Hyeon, T., Choi, M. K., & Kim, D. H. 2024. Intrinsically Stretchable Quantum Dot Light–Emitting Diodes. *Nature Electronics*, Vol. 7, pp. 365–374.

Kim, D., Lee, N., Park, M., Kim, B. H., An, K., & Hyeon, T. 2009. Synthesis of Uniform Ferrimagnetic Magnetite Nanocubes. *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 131, No. 2, pp. 454–455.

Kim, J., Cho, H. R., Jeon, H., Kim, D., Song, C., Lee, N., Choi, S. H., & Hyeon, T. 2017. Continuous O<sub>2</sub>-Evolving MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticle-Anchored Mesoporous Silica Nanoparticles for Efficient Photodynamic Therapy in Hypoxic Cancer. *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 139, No. 32, pp. 10992-10995.

Kim, J., Kim, H. Y., Song, S. Y., Go, S. H., Sohn, H. S., Baik, S., Soh, M., Kim, K., Kim, D., Kim, H. C., Lee, N., Kim, B. S., & Hyeon, T. 2019. Synergistic Oxygen Generation and Reactive Oxygen Species Scavenging by Manganese Ferrite/Ceria Co-decorated Nanoparticles for Rheumatoid Arthritis Treatment. *ACS Nano*, Vol. 13, No. 3, pp. 3206-3217.

Kim, J., Ko, W., Yoo, J. M., Paidi, V. K., Jang, H. Y., Shepit, M., Lee, J., Chang, H., Lee, H. S., Jo, J., Kim, B. H., Cho, S. P., van Lierop, J., Kim, D., Lee, K. S., Back, S., Sung, Y. E., & Hyeon, T. 2022. Structural Insights into Multi-Metal Spinel Oxide Nanoparticles for Boosting Oxygen Reduction Electrocatalysis. *Advanced Materials*, Vol. 34, No. 8, p. 2107868.

Kim, J., Shim, H. J., Yang, J., Choi, M. K., Kim, D. C., Kim, J., Hyeon, T., & Kim, D. H. 2017. Ultrathin Quantum Dot Display Integrated with Wearable Electronics. *Advanced Materials*, Vol. 29, No.38, 1700217.

Kim, T., Kim, K. H., Kim, S., Choi, S. M., Jang, H., Seo, H. K., Lee, H., Chung, D. Y., & Jang, E. 2020. Efficient and Stable Blue Quantum Dot Light-Emitting Diode. *Nature*, Vol. 586, No. 7829, pp. 385-389.

Kraeutler, B., & Bard, A. J. 1978. Heterogeneous Photocatalytic Decomposition of Saturated Carboxylic Acids on Titanium Dioxide Powder. Decarboxylative Route to Alkanes. *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 100, No. 19, pp. 5985-5992.

LaMer, V. K., & Dinegar, R. H. 1950. Theory, Production and Mechanism of Formation of Monodispersed Hydrosols. *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 72, No. 11, pp. 4847-4854.

Lee, B. H., Gong, E., Kim, M., Park, S., Kim, H. R., Lee, J., Jung, E., Lee, C. W., Bok, J., Jung, Y., Kim, Y. S., Lee, K. S., Cho, S. P., Jung, J. W., Cho, C. H., Lebègue, S., Nam, K. T., Kim, H., In, S. I., & Hyeon, T. 2022. Electronic Interaction Between Transition Metal Single-atoms and Anatase TiO<sub>2</sub> Boosts CO<sub>2</sub> Photoreduction with H<sub>2</sub>O. *Energy & Environmental Science*, Vol. 15, No. 2, pp. 601-609.

Lee, B. H., Park, S., Kim, M., Sinha, A. K., Lee, S. C., Jung, E., Chang, Y. J., Lee, K. S., Kim, J. H., Cho, S. P., Kim, H., Nam, K. T., & Hyeon, T. 2019. Reversible and Cooperative Photoactivation of Single-Atom Cu/TiO<sub>2</sub> Photocatalysts. *Nature Materials*, Vol. 18, No. 6, pp. 620-626.

Lee, B. H., Shin, H., Rasouli, A. S., Choubisa, H., Ou, P., Dorakhan, R., Grigioni, I., Lee, G., Shirzadi, E., Miao, R. K., Wicks, J., Park, S., Lee, H. S., Zhang, J., Chen, Y., Chen, Z., Sinton, D., Hyeon, T., Sung, Y. E., & Sargent, E. H. 2023. Supramolecular Tuning of Supported Metal Phthalocyanine Catalysts for Hydrogen Peroxide Electrosynthesis. *Nature Catalysis*, Vol. 6, No. 3, pp. 234-243.

Lee, B., Park, O. K., Pan, L., Kim, K., Kang, T., Kim, H., Lee, N., Choi, S. H., & Hyeon, T. 2023. Co-Delivery of Metabolic Modulators Leads to Simultaneous Lactate Metabolism Inhibition and Intracellular Acidification for Synergistic Cancer Therapy. *Advanced Materials*, Vol. 35, No. 46, p. 2305512.

Lee, C. W., Lee, B. H., Park, S., Jung, Y., Han, J., Heo, J., Lee, K., Ko, W., Yoo, S., Bootharaju, M. S., Ryu, J., Nam, K. T., Kim, M., & Hyeon, T. 2024. Photochemical Tuning of Dynamic Defects for High-Performance Atomically Dispersed Catalysts. *Nature Materials*, Vol. 23, No. 4, pp. 552-559.

Lee, H. S., Shin, H., Park, S., Kim, J., Jung, E., Hwang, W., Lee, B. H., Yoo, J. M., Antink, W. H., Lee, K., Lee, S., Na, G., Suh, K., Kim, Y. S., Lee, K. S., Yoo, S. J., Sung, Y. E., & Hyeon, T. 2023. Electrochemically Generated Electrophilic Peroxo Species Accelerates Alkaline Oxygen Evolution Reaction. *Joule*, Vol. 7, No. 8, pp. 1902-1919.

Lee, K., Shim, J., Jang, H. Y., Lee, H. S., Shin, H., Lee, B. H., Bootharaju, M. S., Lee, K. S., Lee, J., Lee, S., Lee, Y. H., Lee, C. W., Jung, Y., Deng, G., Yoo, S., Back, S., Sung, Y. E., & Hyeon, T. 2023. Modulating the Valence Electronic Structure using Earth-Abundant Aluminum for High-Performance Acidic Oxygen Evolution Reaction. *Chem*, Vol. 9, No. 12, pp. 3600-3612.

Lee, K., Shim, J., Ji, H., Kim, J., Lee, H. S., Shin, H., Bootharaju, M. S., Lee, K. S., Ko, W., Lee, J., Kim, K., Yoo, S., Heo, S., Ryu, J., Back, S., Lee, B. H., Sung, Y. E., & Hyeon, T. 2024. Tailoring Cobalt Spinel Oxide with Site-Specific Single Atom Incorporation for High-Performance Electrocatalysis. *Energy & Environmental Science*, Vol. 17, No. 10, pp. 3618-3628.

Lee, Y., Kang, T., Cho, H. R., Lee, G. J., Park, O. K., Kim, S., Lee, B., Kim, H. M., Cha, G. D., Shin, Y., Lee, W., Kim, M., Kim, H., Song, Y. M., Choi, S. H., Hyeon, T., & Kim, D. H. 2021. Localized Delivery of Theranostic Nanoparticles and High-Energy Photons using Microneedles-on-Bioelectronics. *Advanced Materials*, Vol. 33, No. 24, p. 2100425.

Li, F., Liang, Z., Liu, J., Sun, J., Hu, X., Zhao, M., Liu, J., Bai, R., Kim, D., Sun, X., Hyeon, T., & Ling, D. 2019. Dynamically Reversible Iron Oxide Nanoparticle Assemblies for Targeted Amplification of T1-Weighted Magnetic Resonance Imaging of Tumors. *Nano Letters*, Vol. 19, No. 7, pp. 4213-4220.

Li, H., Tsai, C., Koh, A. L., Cai, L., Contryman, A. W., Fragapane, A. H., Zhao, J., Han, H. S., Manoharan, H. C., Abild-Pedersen, F., Nørskov, J. K., & Zheng, X. 2016. Activating and Optimizing MoS<sub>2</sub> Basal Planes for Hydrogen Evolution through the Formation of Strained Sulphur Vacancies. *Nature Materials*, Vol. 15, No. 1, pp. 48-53.

Li, L., & Reiss, P. 2008. One-pot Synthesis of Highly Luminescent InP/ZnS Nanocrystals without Precursor Injection. *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 130, No. 35, pp. 11588-11589.

Lin, Y. M., Jenkins, K. A., Valdes-Garcia, A., Small, J. P., Farmer, D. B., & Avouris, P. 2009. Operation of Graphene Transistors at Gigahertz Frequencies. *Nano Letters*, Vol. 9, No. 1, pp. 422-426.

Liu, J., Li, F., Wang, Y., Pan, L., Lin, P., Zhang, B., Zheng, Y., Xu, Y., Liao, H., Ko, G., Fei, F., Xu, C., Du, Y., Shin, K., Kim, D., Jang, S. S., Chung, H. J., Tian, H., Wang, Q., Guo, W., Nam, J. M., Chen, Z., Hyeon, T., & Ling, D. 2020. A Sensitive and Specific Nanosensor for Monitoring Extracellular Potassium Levels in the Brain. *Nature Nanotechnology*, Vol. 15, No. 4, pp. 321-330.

Lu, Y., Xu, Y. J., Zhang, G. B., Ling, D., Wang, M. Q., Zhou, Y., Wu, Y. D., Wu, T., Hackett, M. J., Kim, B. H., Chang, H., Kim, J., Hu, X. T., Dong, L., Lee, N., Li, F., He, J. C., Zhang, L., Wen, H. Q., Yang, B., Choi, S. H., Hyeon, T., & Zou, D. H. 2017. Iron Oxide Nanoclusters for T1 Magnetic Resonance Imaging of Non-human Primates. *Nature Biomedical Engineering*, Vol. 1, No. 8, pp. 637-643.

Moon, J., Beker, W., Siek, M., Kim, J., Lee, H. S., Hyeon, T., & Grzybowski, B. A. 2024. Active Learning Guides Discovery of a Champion Four-Metal Perovskite Oxide for Oxygen Evolution Electrocatalysis. *Nature Materials*, Vol. 23, No. 1, pp. 108-115.

Murray, C., Norris, D. J., & Bawendi, M. G. 1993. Synthesis and Characterization of Nearly Monodisperse CdE (E= sulfur, selenium, tellurium) Semiconductor Nanocrystallites. *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 115, No. 19, pp. 8706-8715.

Nature Nanotechnology. 2019. Long live the NNI (Editorial). *Nature Nanotechnol*, Vol. 14, p. 995.

The Royal Swedish Academy of Sciences, 2023. Popular information. Nobel Prize Outreach AB 2024. from <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2023/popular-information/>.

Okada, S., Bartelle, B. B., Li, N., Breton-Provencher, V., Lee, J. J., Rodriguez, E., Melican, J., Sur, M., & Jasanoff, A. 2018. Calcium-Dependent Molecular fMRI using a Magnetic Nanosensor. *Nature Nanotechnology*, Vol. 13, No. 6, pp. 473-477.

- Pan, L., Peng, H., Lee, B., Zhao, J., Shen, X., Yan, X., Hua, Y., Kim, J., Kim, D., Lin, M., Zhang, S., Li, X., Yi, X., Yao, F., Qin, Z., Du, J., Chi, Y., Nam, J. M., Hyeon, T., & Liu, J. 2024. Cascade Catalytic Nanoparticles Selectively Alkalize Cancerous Lysosomes to Suppress Cancer Progression and Metastasis. *Advanced Materials*, Vol. 36, No. 5, p. 2305394.
- Park, J., An, K., Hwang, Y., Park, J. G., Noh, H. J., Kim, J. Y., Park, J. H., Hwang, N. M., & Hyeon, T. 2004. Ultra-large-scale Syntheses of Monodisperse Nanocrystals. *Nature Materials*, Vol. 3 No. 12, pp. 891–895.
- Smith, E., Heckaman, R. L., Lang, K., Penczek, J., & Bergquist, J. 2020. Evaluating Display Color Capability. *Information Display*, Vol. 36, No. 5, pp. 9–15.
- Smith, T. T., Stephan, S. B., Moffett, H. F., McKnight, L. E., Ji, W., Reiman, D., Bonagofski, E., Wohlfahrt, M. E., Pillai, S. P. S., & Stephan, M. T. 2017. In Situ Programming of Leukaemia-Specific T Cells using Synthetic DNA Nanocarriers. *Nature Nanotechnology*, Vol. 12, No. 8, pp. 813–820.
- Soh, M., Kang, D. W., Jeong, H. G., Kim, D., Kim, D. Y., Yang, W., Song, C., Baik, S., Choi, I. Y., Ki, S. K., Kwon, H. J., Kim, T., Kim, C. K., Lee, S. H., & Hyeon, T. 2017. Ceria-Zirconia Nanoparticles as an Enhanced Multi-Antioxidant for Sepsis Treatment. *Angewandte Chemie–International Edition*, Vol. 56, No. 38, pp. 11399–11403.
- The National Nanotechnology Initiative. 2024. Supplement to the President's 2024 Budget. National Science and Technology Council (NSTC), USA.
- Uekert, T., Kuehnel, M. F., Wakerley, D. W., & Reisner, E. 2018. Plastic Waste as a Feedstock for Solar-Driven H<sub>2</sub> Generation. *Energy & Environmental Science*, Vol. 11, No. 10, pp. 2853–2857.
- Weng, Q., Sun, H., Fang, C., Xia, F., Liao, H., Lee, J., Wang, J., Xie, A., Ren, J., Guo, X., Li, F., Yang, B., & Ling, D. 2021. Catalytic Activity Tunable Ceria Nanoparticles Prevent Chemotherapy-Induced Acute Kidney Injury without Interference with Chemotherapeutics. *Nature Communications*, Vol. 12, No. 1, p. 1436.
- William, W. Y., Falkner, J. C., Yavuz, C. T., & Colvin, V. L. 2004. Synthesis of Monodisperse Iron Oxide Nanocrystals by Thermal Decomposition of Iron Carboxylate Salts. *Chemical Communications*, pp. 2306–2307.
- Won, Y. H., Cho, O., Kim, T., Chung, D. Y., Kim, T., Chung, H., Jang, H., Lee, J., Kim, D., & Jang, E. 2019. Highly Efficient and Stable InP/ZnSe/ZnS Quantum Dot Light-Emitting Diodes. *Nature*, Vol. 575, No. 7784, pp. 634–638.
- Yoo, J., Lee, K., Yang, U. J., Song, H. H., Jang, J. H., Lee, G. H., Bootharaju, M. S., Kim, J. H., Kim, K., Park, S. I., Seo, J. D., Li, S., Yu, W. S., Kwon, J. I., Song, M. H., Hyeon, T., Yang, J., & Choi, M. K. 2024. Highly Efficient Printed Quantum Dot Light-Emitting Diodes Through Ultrahigh-Definition Double-Layer Transfer Printing. *Nature Photonics*, Vol. 18, No. 10, pp. 1105–1112.
- Yoo, T. Y., Lee, J., Kim, S., Her, M., Kim, S. Y., Lee, Y. H., Shin, H., Jeong, H., Sinha, A. K., Cho, S. P., Sung, Y. E., & Hyeon, T. 2023. Scalable Production of an Intermetallic Pt–Co Electrocatalyst for High-Power Proton-Exchange-Membrane Fuel Cells. *Energy & Environmental Science*, Vol. 16, No. 3, pp. 1146–1154.