

Nanomaterials Chemistry

나노소재 화학

김병윤 · 김지혜 · 남좌민 · 류재건 · 문회리
박수진 · 신현석 · 오정욱 · 우한영 · 윤효재
이광렬 · 이재승 · 임동권 · 정광섭 · 주상훈



지은이 머리말

Preface

본다는 것은 사물의 현상을 이해하는 첫 걸음이다. 현미경을 통하여 들여다본 미생물의 세계는 참으로 경이롭다. 맨눈으로는 보지 못하는 세계에 참으로 많은 생명체와 사물이 있고, 이들은 우리가 짐작하지 못하는 방식으로 작동을 하는 경우가 많기 때문이다. 이와 같이, ‘보는 행위’를 통하여 우리는 사물의 성질과 행동에 대해 직관적인 이해를 하게 된다.

일반화학 수업에서 가장 먼저 이야기하는 내용이 질량분석기의 원리와 동위원소의 존재다. 또한, 전공수업에서는 X-선 결정학을 통하여 분자의 구조를 알아낼 수 있다는 것과 IR, NMR 등의 기기를 통하여 화합물의 구조를 간접적으로 알아내는 방법에 대해서도 배운다. 그러나 이러한 일련의 분석법들은 우리가 원자와 분자를 직접 보게 해주지는 못한다. 따라서 소위 머리로는 이해를 하지만 가슴으로 납득하기가 어려운 것이다.

1980년대에 들어서서 현미경 기술에서 획기적인 발전이 있었다. STM이나 AFM과 같은 현미경들은 우리가 분자를, 심지어 원자를 직접 보고 조작할 수 있게 해주었다. 막연히 상상만 하던 분자들의 모습을 눈으로 직접 보게 되었고, 이들의 행동에 대해 직관적인 이해가 가능해진 것이다. 그 전에는 볼 수 없었던 화합물과 재료들의 세계, 즉, 나노세계가 우리 눈 앞에 펼쳐진 것이다. 이 나노세계는 우리가 알지 못했던 아주 신기한 현상들이 많이 숨어 있었다. 예를 들어 금의 나노입자는 크기와 모양에 따라 빨주노초파남보의 총천연색의 구현이 가능하다. 막 문을 연 미지의 세계에 대한 호기심과 신비로운 현상들을 현실세계의 기술 진보에 적용하고자 하는 욕구가 나노과학 및 기술을 폭발적으로 발전시켰다. 지금은 나노라는 단어가 우리가 일상적으로 쓰는 단어가 되었으며, 나노기술을 기반으로 창업을 하는 사례가 기하급수적으로 늘고 있다. 그러나 나노세계는 아직도 신비함을 많이 숨기고 있으며, 한 연구자가 일생을 바쳐 연구를 하기에 부족함이 없는 연구대상으로 남아있다. 또한 먼 미래에서도 인류의 생존과 안녕을 담보하기 위해 지구 온난화와 감염병을 막고 암과 노화를 극복하는 의료기술을 개발하여야 하는데, 이를 위해서는 혁신적인 나노기술의 개발이 필수적이다.

이 책은 나노과학과 기술에 대해 배우고자 하는, 용감하고 창의성이 넘치는 대학생들과 대학원생들을 대상으로 하는 입문서로 작성되었으며, 보다 미래지향적인 내용들을 담아 학생들의 역량강화에 디딤돌이 될 수 있도록 하였다. 또한, 집필진을 현재 활발하게 교육과 연구에 매진하는 나노소재연구의 리더로 부상하고 있는 연구자들로 구성하여, 명쾌하며 효율적인 지식의 전달이 이루어지도록 하였다. 이 책을 통하여 나노소재화학의 세계로 즐겁게 여행을 떠나는 여행자들이 많아지기를 바란다.

2022년 5월
집필진 일동

차례

Contents

지은이 머리말 · 3

제 1 장

나노소재 화학 개요 · 8

Introduction of Nanomaterials Chemistry

1.1 서론 · 8

Introduction

1.2 나노결정의 이해 · 16

Introduction of nanocrystals

참고 문헌 · 26

연습 문제 · 27

제 2 장

나노소재의 합성과 분석 · 28

Syntheses and Characterizations of Nanomaterials

2.1 나노 물질의 합성 · 28

Syntheses of nanomaterials

2.2 나노소재의 특성 분석 · 40

Characterizations of nanomaterial properties

참고 문헌 · 59

연습 문제 · 61

제 3 장

금속 나노입자와 플라즈모닉스 · 62

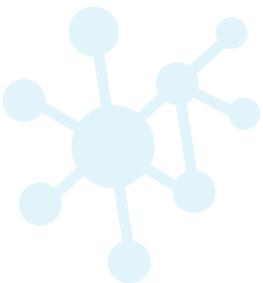
Metal Nanoparticles and Plasmonics

3.1 금속 나노입자에 대한 서론 · 62

Introduction to metal nanoparticles

3.2 금속 나노입자의 플라즈모닉스 · 64

Plasmonics of metal nanoparticles





- 3.3 플라즈모닉 금속 나노입자 합성과 설계 · 73
Design and synthesis of plasmonic metal nanoparticles
- 3.4 플라즈모닉 나노입자의 응용과 전망 · 80
Applications and perspectives of plasmonic nanoparticles
- 참고 문헌 · 88
- 연습 문제 · 91

제 4 장

반도체 나노입자 · 92 *Semiconductor Nanoparticles*

- 4.1 반도체 나노입자 개요 · 92
Introduction of semiconductor nanoparticles
- 4.2 합성 · 96
Synthesis
- 4.3 광학적 성질 · 100
Optical properties
- 4.4 응용 · 103
Applications
- 참고 문헌 · 113
- 연습 문제 · 115

제 5 장

이차원 나노소재 · 116 *2-Dimensional Nanomaterials*

- 5.1 이차원 소재 개요 · 116
Introduction of 2-Dimensional nanomaterials
- 5.2 그래핀 · 123
Graphene
- 5.3 전이금속 칼코젠 화합물 · 127
Transition metal dichalcogenides
- 5.4 육방정계 질화붕소 · 132
Hexagonal boron nitride
- 5.5 이차원 헤테로구조체 · 136
2-D heterostructures
- 참고 문헌 · 140
- 연습 문제 · 143

제 6 장

나노다공성 소재 · 144

Nanoporous Materials

- 6.1 나노다공성 소재 개요 · 144
Introduction of nanoporous materials
 - 6.2 제올라이트 · 148
Zeolites
 - 6.3 금속-유기 골격체 · 155
Metal-organic frameworks
 - 6.4 메조다공성 소재 · 166
Mesoporous materials
- 참고 문헌 · 175
연습 문제 · 180

제 7 장

자기조립 단분자막과 나노 표면화학 및 분자전자학 · 182

Self-assembled Monolayers for Surface Nanochemistry and Molecular Electronics

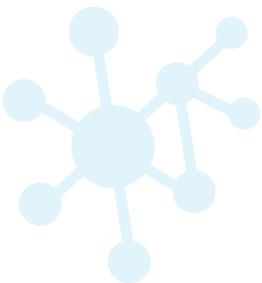
- 7.1 자기조립 단분자막 · 182
Self-assembled monolayer, SAM
 - 7.2 친수성 및 소수성 · 189
Hydrophilic and hydrophobic
 - 7.3 분자전자학 · 191
Molecular electronics
 - 7.4 분자열전학 · 198
Molecular thermoelectrics
- 참고 문헌 · 205
연습 문제 · 210

제 8 장

고분자와 나노패터닝 · 212

Polymer Nanomaterials and Nanopatterning

- 8.1 나노 패턴 고분자 개요 · 212
Introduction of nanopatterned polymers
 - 8.2 고분자 박막 나노 패터닝 기술 · 213
Nanopatterning techniques for polymer membrane
 - 8.3 진단 및 치료를 위한 의료용 고분자 · 219
Medical applications of polymer nanomaterials
- 참고 문헌 · 226
연습 문제 · 228





제 9 장

에너지 저장원을 위한 나노소재 · 230

Nanomaterials for Energy Storage

- 9.1 2차 에너지 저장원 개요 · 230
Introduction of secondary energy storage materials
 - 9.2 이차 전지용 소재 화학 · 234
Materials chemistry for secondary batteries
 - 9.3 이차 전지 계면 반응 · 260
Interface reactions of secondary batteries
 - 9.4 슈퍼커패시터용 소재 화학 · 275
Material chemistry for supercapacitors
- 참고 문헌 · 296
연습 문제 · 308

제 10 장

촉매 응용을 위한 나노소재 · 310

Nanomaterials for Catalysis

- 10.1 나노촉매의 개념 · 310
Fundamentals of nanocatalysts
 - 10.2 나노입자 기반 촉매 합성 · 313
Syntheses of nanoparticle-based catalysts
 - 10.3 나노입자 기반 촉매 연구 · 316
Catalysis based on nanoparticles
 - 10.4 원자 분산 촉매 · 337
Atomically dispersed catalysts
- 참고 문헌 · 343
연습 문제 · 348

제 11 장

바이오 응용을 위한 나노소재 · 350

Nanomaterials for Bioapplications

- 11.1 나노소재를 이용한 바이오센싱 및 화학 결합 · 350
Biosensing and chemical bondings with nanomaterials
 - 11.2 나노소재를 이용한 질병 치료 · 354
Medical applications of nanomaterials
 - 11.3 나노소재를 이용한 화장품 · 363
Cosmetic products with nanomaterials
- 참고 문헌 · 367
연습 문제 · 368

▶▶ 찾아보기 · 369

제1장

나노소재 화학 개요

Introduction of Nanomaterials Chemistry

김병윤 · 김태경 · 이광렬

1.1 서론(Introduction)

1.1.1 Small world

‘나노(nano)’는 이제 우리 생활에서 익숙해져 더 이상 생소하게 느껴지지 않는다. 나노 공정으로 제조된 전자회로 없이는 현대 사회를 지속할 수 없을 것이며, 나노 의약품과 진단기술은 우리의 건강을 향상시키고, 화장품 속의 나노 리포솜과 썬크림의 나노 산화아연은 우리를 아름답게 한다. 양자점(quantum dot) 기술이 적용된 디스플레이가 생활에 즐거움을 선사하며, 오염물질을 분해하는 나노촉매는 환경을 개선한다. 이렇게 우리는 나노로 이루어진 세계에서 살게 되었다. 더 정확히 표현하자면 이미 오래전부터 나노의 세계에서 살고 있었는데 우리가 인식하지 못했을 뿐이다. 중세 교회의 스테인드글라스는 금과 구리의 나노입자로 색을 내었고, 메소포타미아 문명에서 사용한 나노 코팅은 도자기를 아름답게 할 뿐 아니라 항균 기능을 하였다. 기원전 고대 인도에서 제조한 철강에서 탄소 나노튜브가 발견되기도 한다. 우리뿐인가, 자연 생태계도 나노기술을 활용한다. 잠자리와 매미의 나노 코팅된 날개는 비에 젖지 않고 빛을 반사하지 않아 생존에 유리하며, 카멜레온 피부의 유동적인 나노 패턴은 나노 파장의 가시광선을 걸러내어 다채로운 색을 낸다. 벽에 붙어 있는 도마뱀붙이의 발바닥 나노구조는 미시세계의 상호작용인 van der Waals 인력으로 거시세계의 몸을 지탱한다. 스스로 움직여 먼지를 털어낼 수 없는 식물들이 자동 청소 기능이 있는 나노돌기를 만들고, 빛을 잘 받을 수 있도록 잎 표면을 깨끗하게 유지한다. 이렇듯, 나노는 특별한 것이 아니라 자연스러운 것이며 우리와 역사를 함께 했고, 우리의 삶을 만들고 있다. 자연을 이해하기 위해서, 그리고 우리의 삶을 운택하게 할 기술을 개발하기 위해서 나노과학을 공부해보도록 하자.

난쟁이를 뜻하는 그리스어 ‘nanos’에서 작다는 의미를 가져온 나노는 10^{-9} 를 뜻하는 SI 단위계 접두어로, 1 나노미터($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$)는 원자의 지름보다는 수 배 크고 아미노산 같은 작은 분자의 길이와 비슷하다. 나노물질은 보통 ‘1~100 나노미터 크기를 가지는 물질’로 다소 모호하게 지칭되며, 공통 합의된 명확한 정의가 마련되지 않고 있다. 나노물질이라는 용어를 사용하여 물질을 분류해야 하는 필요성은, 1~100 나노미터 크기의 물질이 그 외의 크기를 가지는 벌크(bulk) 물질과 같은 조성임에도 다른 물성을 보이기 때문일 것이다. 예로 나노산화철이 나노과학의 연구대상이 되기 위해서는 나노가 아닌 산화철이 존재

해야 하고 그 둘에서 다른 현상이 관찰되어야 한다. 5 nm 크기인 헤모글로빈 분자는 '1~100 나노미터 크기를 가지는 물질'에 부합하지만 크기가 다른 헤모글로빈 분자는 존재하지 않는다. 따라서 나노과학의 연구 대상이 아니며 나노헤모글로빈이라 하지도 않는다. 그러나 이런 구분 방법도 모호함이 남아 있다. 탄소 나노튜브는 대표적인 나노물질이며 나노 규모의 굽기와 끊임없이 이어지는 길이를 가지고 있다. C₆₀ buckminsterfullerene은 나노 규모의 크기를 가지고 있으나, 분명한 분자식으로 기술되고 벌크 상태가 존재하지 않는다. 그럼에도 풀러렌은 탄소 나노튜브의 특성을 상당히 공유하기에 나노물질로 분류되는 경우가 많다. 이외에도 같이 마이셀, 고분자, 염, 생체분자 등을 나노물질로 분류할 것인지에 대해 학술단체마다 각기 다른 의견을 제시하고 있으며, 제올라이트와 같이 물질의 크기가 벌크지만 내부에 나노 규모의 공동을 가지는 경우, 의도적으로 제조된 물질인가의 여부, 크기 분포가 광범위한 경우 등 물질의 다양성만큼이나 나노물질을 바라보는 시각 또한 다양하다(표 1.1).

1.1.2 나노 기술의 역사

20세기 초 출현한 양자역학을 바탕으로 과학자들은 원자의 구성에 대해서 수학적으로 기술하고 그 거동을 예측할 수 있게 되었지만, 실제 원자를 보고 만질 수 있는 기술은 당시에는

표 1.1 ▶ 여러 학술기관들이 제시한 나노물질의 정의¹

Organisation	Definition of nanomaterial
ISO-CEN (draft)	Material with any external dimension in the nanoscale or having internal or surface structure in the nanoscale
OECD	Material which is either a nano-object or is nanostructured
EU SCENIHR	Any form of a material composed of discrete functional parts, many of which have one or more dimensions in the nanoscale.
EU SCCP	Material with one or more external dimensions, or an internal structure, in the nanoscale, which could exhibit novel characteristics compared to the same material without nanoscale features.
EU (Cosmetic Products)	An insoluble or biopersistent and intentionally manufactured material with one or more external dimensions, or an internal structure, in the nanoscale.
EU (Novel Foods)	Any intentionally produced material in the nanoscale or is composed of discrete functional parts, either internally or at the surface, many of which have one or more dimensions in the nanoscale.
ACC	An Engineered Nanomaterial is any intentionally produced material in the nanoscale.
Australia (NICNAS)	Industrial materials intentionally produced, manufactured or engineered to have specific properties or specific composition, in the nanoscale.
Canada	Manufactured material at or within the nanoscale in at least one spatial dimension, or is smaller or larger than the nanoscale in all spatial dimensions and exhibits one or more nanoscale phenomena.
Denmark	Materials having structures in the nanoscale.
The UK	Materials having structured components in the nanoscale.
The UK (DEFRA)	Materials in the nanoscale and are deliberately engineered i.e. not natural or unintentional by-products of other processes, and are 'free' within any environmental media at any stage in a product's life-cycle.
US-EPA	Engineered nanoscale material is any particle, substance, or material that has been engineered to have one or more dimensions in the nanoscale.

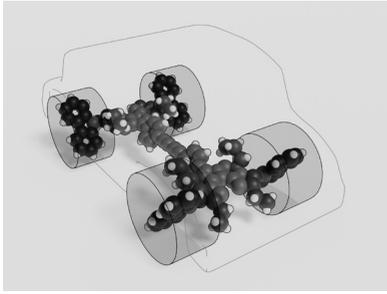


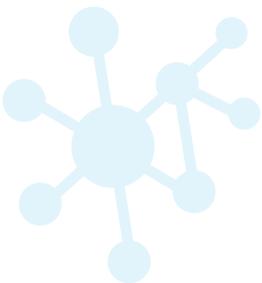
그림 1.1 ▶ 실제로 구동하는 4개의 바퀴를 가진 분자기계 자동차. 네덜란드 Groningen 대학의 Tiber Kuderna은 STM의 터널링 전자에서 에너지를 받아 여기된 바퀴 축 이중 결합(double bond)의 반복적인 *트랜스-시스* 이성질체화 과정(*trans-cis isomerization*)으로 회전하는 분자모터를 가진 자동차를 합성하고, Cu 표면에서 6 nm를 주행하는 영상을 공개하였다.

상상하기 어려운 일이었을 것이다. 1959년 Feynman 교수는 캘리포니아 공과대학에서 열린 물리학회에서, “There’s Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics”란 제목의 강연에서 미래에는 직접 원자들을 조작하여 새로운 분자기계를 만들 수 있게 될 것이고, 초고집적회로를 가진 컴퓨터의 탄생, 그리고 기존에 볼 수 없었던 작은 세계도 직접 관찰할 수 있게 될 것이라며 미래의 나노세계를 전망하였다(그림 1.1). 특히 “Swallowing the doctor”는 나노 로봇을 삼키면 그 로봇이 몸 안을 돌아다니며 병을 찾아내고 치료할 것이라는, 당시에 상상하기 힘들었던 파격적인 개념이었다. 이 강연은 많은 관심을 불러 모았고 나노 과학이라는 개념이 젊은 과학자들에게 퍼져 나갔으며, 비록 이 당시의 상상들이 모두 똑같은 방식으로 구현되지는 않았지만 현대 나노기술의 중요한 토대가 된다.

“나노기술(nanotechnology)”라는 용어는 1974년 일본 동경대의 Taniguchi 교수가 일본 정밀공학 학회에서 처음 사용한 이후, 미국 MIT의 공학자 Drexler가 1986년에 그의 저서 “Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology”에서 적극적으로 사용하면서 널리 퍼지게 된다.^{2,3} 그는 우주개발, 질병 치료, 인공지능 등의 분야에 관한 나노기술의 비전을 전망하며 대중의 지지를 받게 되었는데, 특히 스스로 자기복제(self-replicating)하면서 원자 하나하나를 조절할 수 있는 분자기계인 나노어셈블러(nano assembler)의 가능성을 언급한 것이 많은 관심을 끌었다. 만능에 가까운 이상적인 기술이 될 수 있을 것이라 내다보면서도, 나노어셈블러의 자기복제 기능이 통제를 벗어나 무한히 증식하여 바이러스보다 위협적으로 생태계를 뒤덮거나 군사적인 목적으로 사용되는 상황에 대하여 경고하였다. C₆₀ Buckminsterfullerene의 발견(1985년)으로 노벨상을 수상한(1996년) 미국 Rice 대학의 화학자 Smalley는 나노 과학 연구의 선두로 주목받았는데, 2001년 대중과학 잡지 Scientific American의 기사에서 Drexler의 분자기계는 ‘실현 가능성이 없는 몽상’이라며 강도높게 비판하면서 연구자들 사이에서 뜨거운 논쟁이 일어나게 된다.⁴ Smalley를 비롯한 화학자들은 분자기계의 손 역할을 할 분자 규모의 도구가 존재하지 않으며, 작동하게 할 에너지를 공급하거나 작업 도면을 저장할 수단도 없다고 일축하였지만, Drexler와 그의 동료들은 단백질 을 조립하는 세포소기관 리보솜을 예로 들며 생물이 존재하는 것이 자기복제 분자기계의 가능성을 증명한다고 반박하였다.

논쟁의 주제인 자기복제 분자기계의 실현 가능성 여부는 여전히 결론이 나지 않았고, 종결되지 않은 이들의 논쟁은 과학자들과 대중에게 나노과학에 대한 큰 관심을 불러일으키는 역할을 했다는 의의가 있다. 그러나 논쟁 과정에서 나노기술의 위험성이 자극적으로 지목되어 부정적인 인식을 가져오기도 하였고, 과학자들은 이러한 부정적인 인식이 연구개발을 저해하는 사회적 장벽이 될 것을 우려하여 이를 극복하기 위해 나노기술의 잠재적 위험성을 연구하는 분야를 신설하기도 했다. 나노물질이 인체에 미치는 피해를 검토하는 나노독성학 연구에서 오히려 의약적 가능성을 발견하고 나노의약학으로 발전하게 되는 등의 성과들이 모여, 현재에 와서는 건강과 친환경을 위한 기술로 인식이 변화되고 있다. 나노기술에 대한 기대가 높아짐에 따라 연구개발을 장려하는 사회적 장치들이 마련되었다. 미국 정부는 나노기술을 위한 독립기관 National Nanotechnology Initiative (NNI)를 설립하면서(2000년) 나노기술 분야에서 세계를 선도해 나가고 있고, 대한민국도 국가나노기술정책센터를 설립하여(2010년) 나노기술의 연구기반 조성 및 연구자의 체계적인 육성을 추진하고 있다.

Feynmann 교수의 “There’s Plenty of Room at the Bottom” 강연 이후 나노기술에 대한 관심과 기대가 높아졌지만, 나노 세계를 관찰할 수 있는 현미경의 부재로 인해 본격적인 연구는 훗날로 미뤄지게 된다. 20여 년이 지나 1980년대에 최초의 주사터널링현미경(scan-



ning tunneling microscope, STM)이 개발되었고, 이어서 원자힘현미경(atomic force microscope, AFM), 전자 현미경(electron microscopy, EM) 등 다양한 관찰 기법들이 마련되었다. 1981년, 물리학자 Binnig과 Rohrer는 전도성 시료 근처에 탐침을 놓았을 때 가까워진 원자들의 전자파동함수의 겹침을 감지하는 방식의 주사터널링현미경을 개발하여, 1983년 최초로 원자 규모의 해상도를 가진 현미경 영상을 공개하였다(그림 1.2).⁵ STM이 개발되고 얼마 후, 1990년 IBM연구소(New York, USA)의 Eigler는 STM의 탐침과 시료 원자의 상호작용으로 관찰뿐만 아니라 직접 원자를 조작할 수 있음을 보이며 35개의 제논 원자를 개별로 조작하여 니켈 표면에 IBM 로고를 새기는 성과를 얻었다.⁶ STM의 발명자들은 1986년 노벨 물리학상을 수상하였고 이에 영감을 받은 새로운 원자규모 현미경 AFM과 SPM 등의 개발이 이어졌다. 1991년, 투과전자현미경(transmission electron microscopy, TEM)로 처음 관찰된 탄소 나노튜브의 향상된 강도와 유연성은 이를 각광받는 재료로 급 부상시켰다.⁷ 기계적, 전기적, 열적 특성들을 활용한 복합 섬유들이 개발되었으며, 에너지 저장물질, 촉매 등 화학적 활용 또한 활발히 개발되고 있다. 풀러렌(Fullerene)이라 하는 C₆₀, C₇₀ 등의 탄소 공, 10 nm 미만의 탄소 물질 C-dot 등 새로운 나노탄소 물질들이 발견되어 이들의 화학적 활용성, 생체 응용 가능성들이 모색되고 있다.^{8,9}

새로운 나노재료들이 개발되어 관심이 높아지자, 이들의 응용 또한 가속화되었다. 21세기 이후 컴퓨터 공학은 나노 규모로 집적된 회로와 함께 발전하여 방 크기의 컴퓨터는 책상 위로 올라가고, 다시 주머니 속으로 들어가는 크기로 축소되었으며, 몸에 입는 형태와 피부에 부착하는 형태로도 나아가고 있다. 질병의 진단과 치료를 위한 나노바이오기술이 매우 큰 잠재력을 가진 것으로 평가되고, 신 재생 에너지를 생산·저장하는 나노촉매, 배터리 등이 환경오염에 대응할 유망한 기술로 떠올랐다. 불과 수십 년만에 나노과학은 첨단 현대기술문명의 핵심으로 자리잡았으며 상상할 수 있는 모든 미래에 나노기술이 있을 것이다.

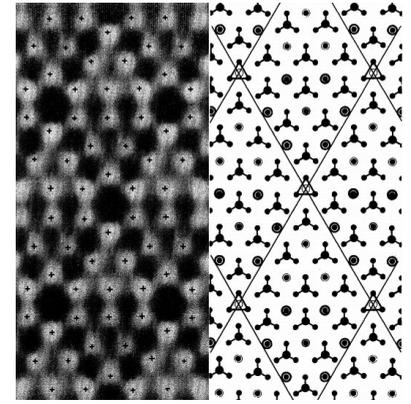


그림 1.2 ▶ (왼쪽) 최초로 공개된 주사터널링현미경 영상, Si (111) 표면 (오른쪽) 촬영된 영상의 결정 구조 모델 검은 점은 표면층의 원자 위치, 동심원은 다음 층의 원자 위치, 삼각형 내의 원은 빈 자리를 표기한다. Reproduced with permission from American Physical Society.⁵

1.1.3 나노 기술의 파급효과

우리는 현재, 하루가 다르게 급속히 발전하고 있는 나노기술을 목격하고 사용하고 있다. 이미 수년 전, 양자점(quantum dot)을 이용하여 고품질 디스플레이를 구현하였고, 의학 분야에서는 나노기술을 이용하여 표적 선택적인 나노의약품이 개발되고 있다. 또한 수 나노미터의 선풍을 가지는 초고집적회로가 사용된 스마트폰, 나노촉매를 사용한 물분해를 통한 수소 생산과 수소연료전지 자동차 등 그 적용 분야는 점차 늘어나고 있다. 다양한 학문 분야에서 나노물질에 대한 관심이 높아짐에 따라 다양한 측면에서 연구가 진행되었고, 이를 공유하며 여러 학문 간의 소통이 이루어졌다. “나노”라는 공통 분모에 모인 학문과 기술들이 융합하고 복합화하여 새로운 분야를 창출하며 발전해 나아가고 있다. 나노는 과학 기술 및 학문의 발전 측면뿐만 아니라 사회, 윤리, 환경, 그리고 법적인 문제 등 공동체의 삶 전반에 걸쳐 영향을 주고 있다. 20세기 후반이 플라스틱 혁명의 시대였다면 21세기는 나노 혁명으로 출발했다고 이야기할 수 있을 것이다. 아래에서 다양한 분야에서 나노기술이 활용되는 예와 미래를 위한 연구개발의 방향을 살펴보자.

■ 전자 산업 분야

1965년 intel사(California, USA)의 공동 설립자 Moore는 반도체 집적회로의 성능이 24개월마다 2배로 증가할 것이라 예측하며 자사의 연구개발 기준으로 삼았고, 이는 곧 모든 반도체 기업들이 경쟁에서 살아남기 위해 달성해야만 하는 공동의 목표가 되었다. 지난 반세기 동안 마이크로 회로 시대를 거쳐 나노 회로 시대로 진입하며 반도체 소자 기술은 눈부

시대의 의약품은 스스로 환부를 찾아가고, 질병의 종류나 병변의 범위 등을 진단하여 정보를 전달하며, 적절한 치료를 행할 수 있는 것이다. 정상 조직에는 작용하지 않고 환부에만 작용하는 기능이 특히 중요한데, 이를 통해 약제 내성과 부작용을 최소화할 수 있을 것으로 본다. 또한 인체 스스로 복구하지 못하는 영구 손상된 조직을 재건하는 재생 의학 또한 나노기술을 통하여 가능성을 열고 있다. 이러한 복잡한 기능들을 수행하기 위해서는 약물 또한 여러 가지 기능을 하는 부품들로 조합된 형태가 될 것이며, 단순한 분자 약물보다 크기가 커질 것이다. 그러나 마이크로미터 이상의 규모를 가지는 물체는 소화기관에서 잘 흡수되지 않으며 주사 투여하더라도 세포막을 투과하지 못하여 약리작용이 어려울 뿐만 아니라 인체의 면역기능에 의해 빠르게 제거된다. 따라서 체내에서 활동하는 ‘the swallowed doctor’는 틀림없이 나노물질이어야 할 것이다.

현재 나노의학 기술은 정밀 진단, 약물 전달, 재생 의학 등에 중점을 두고 연구되고 있으며, 폭발적인 성장세를 보이고 있다. 예로, 초상자성 산화철 나노입자의 넓은 표면에 암 조직 등의 타겟에 부착되는 항체를 붙여 주면 이 나노입자는 암조직에 모여서 MRI의 조영제(contrast agent)가 되며, 사용된 후에 초상자성 나노입자는 자성을 잃고 흩어지고 세포 내에서 소화되어 헤모글로빈을 위한 철분으로 재활용된다.¹⁰ 이외에 금 나노입자의 형광 반응을 이용하여 신호를 감지하는 방법도 사용되며, 테라헤르츠파(THz)를 이용한 차세대 의학 영상기법으로 연구중인 테라헤르츨선(terahertz-ray, T-ray)을 위한 마커도 개발되고 있다. 세포 외 기질(extra cellular matrix)을 모방하여 만든 인공적인 세포 지지체 스캐폴드(scaffold)를 상처로 손실된 조직에 채워 주면, 세포의 유도분화를 촉진하여 쉽게 빈 공간을 채우며 기관의 원래 형태를 재생할 수 있다. 보다 특성이 좋은 스캐폴드를 만들기 위해 나노기술이 사용되며, 기계적 강성이 좋은 탄소 나노튜브나 부드러운 나노-다공성 고분자 등이 재생하고자 하는 조직의 종류에 따라 선택될 수 있다.

의학의 발전은 점점 더 많은 병으로부터 더욱 많은 환자를 치료할 수 있는 방향으로 진행되었으나 희귀한 질병을 비롯하여 개인마다 특이적으로 달라지는 병리에 하나하나 대응하기는 매우 어려운 일이었다. 개인 맞춤형 치료를 위해서는 막대한 종류의 의약품을 준비해야 하는데, 그 하나하나의 약품마다 임상시험을 완수해야만 한다. 막대한 시험 비용과 시험 과정에 생기는 부작용 등 우리 사회가 감당해야 할 부담이 매우 크므로 소수를 위한 특이적인 의약품보다는 모두가 사용할 수 있는 범용적인 약물이 우선하여 개발될 수밖에 없었을 것이다. 만약 의약품의 검증에 필요한 비용을 크게 절감할 수 있다면, 그때는 개인 맞춤형 치료가 현실이 될 수 있을 것이다.

나노 의약품은 다양한 기능을 가지는 부품들을 조립하여 만들 수 있는데, 병변 조직을 찾는 표적체, 전달할 약물과 그것을 담는 담지체, 측정할 수 있는 신호를 발신하는 표지물질, 병변조직을 감지하거나 외부 신호를 받았을 때 약물을 방출하는 작용기 등을 포함할 수 있다. 이들을 로봇과 같이 모듈의 개념으로 필요에 따라 쉽게 조합할 수 있도록 준비하고, 각각의 모듈에 대한 임상 검증을 확보하는 것은 어떨까? 필요에 따라 모듈을 조립하여 각각의 환자에게 필요한 즉석 맞춤 설계가 가능할 것이며, 모든 조립의 경우의 수만큼 모든 임상 시험을 하지 않아도 될 수 있을 것이다. 다만, 현재 임상시험에 관한 법률은 임상 허가된 약물들로 조합된 복합제 역시 추가적인 임상시험을 수행하도록 한다. 나노 조립 의약품에 대한 더 많은 연구와 논의가 이루어진 후에 더욱 효율적인 임상 검증 방법이 도입되기를 기대할 수 있을 것이다.

에너지 분야

미래 사회를 맞이하기 위해 가장 중요하고 시급한 연구 분야가 무엇인지 묻는다면 가장 먼

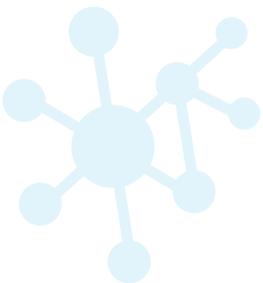
저 언급되는 것은 에너지일 것이다. 화석 연료를 대체할 새로운 에너지는 생산과 소비 과정 모두 친환경적이어야 하며, 안전하고 저렴하게 대량 운용할 수 있어야 한다. 이 어려운 조건들을 나노기술 없이 충족시키는 방법은 현재로서는 제안조차 할 수가 없다. 가장 유망한 에너지 생산기술, 변환기술, 저장기술들의 완성도를 높이는 데 나노물질의 특성이 적재 적소에 활용되고 있다. 기존에 상용화된 실리콘 기반의 태양광전지는 태양광의 일부분만을 이용할 수 있다. 태양광 에너지의 대부분을 차지하는 적외선 영역의 빛들은 활용하지 못하는데, 만약 두 개 이상의 장파장(낮은 에너지)의 광자를 흡수하여 단파장(높은 에너지)의 광자를 방출하는 업컨버전(up-conversion) 나노입자들을 이런 태양광전지에 적용한다면 태양광전지의 효율을 크게 높일 수 있을 것이다.¹¹ 전기 에너지로 물을 분해하여 수소를 생산하는 수전해(water electrolysis) 기술과, 반대로 수소를 연료로 사용하여 전기에너지를 얻는 연료연지(fuel cell), 이산화탄소나 질소의 환원반응 등 에너지 변환 기술 역시 에너지 변환 효율을 높이기 위해 나노촉매가 매우 중요한 역할을 하고 있다. 배터리(battery), 커패시터(capacitor)와 같은 전기에너지를 저장하는 기술도 부피와 질량을 줄이고 에너지 밀도를 높이기 위한 새로운 전극재료를 탄소 나노튜브(carbon nanotube), 그래핀(graphene), 금속디칼코게나이드(metal dichalcogenide) 기반의 황화물 등이 개발되며 지속적으로 발전해 나가고 있다.

■ 농업 분야

나노기술을 아주 유용하게 활용할 수 있는 분야 중 하나가 바로 농업 분야이다. 고도화된 농업기술과 사회장치로 78억 인구를 부양하고 있으나, 여전히 풍족하지는 못하며 농경지는 줄어들고 인구는 늘어나고 있다. 이에 더해, 심각한 환경오염이나 기후 변화로 인해서 기존의 농업기술이 타격을 받는 상황에 처할 때, 우리는 필연적으로 식량문제에 직면하게 될 것이다. 이 때문에 환경을 오염시키지 않으며 기후 변화를 극복할 수 있는 새로운 농업기술 개발은 중대한 문제이다. 이러한 요구에 따라 작물 수확량(crop yield)을 높이기 위한 나노비료(nanofertilizer), 환경오염을 피하며 병충해를 방지하기 위한 나노살충제(nanopesticide)에 대한 연구들이 진행되고 있다.^{12,13} 또한 토양의 영양 상태나 작물의 성장 상태를 지속적으로 모니터링하여 최적의 작물성장을 유도할 수 있는 시스템 구축을 위해 나노바이오센서를 이용하는 연구도 이루어지고 있다.¹⁴ 다만, 공장과 같은 통제된 환경이 아닌, 개방된 농경지에 사용할 화학기술인 만큼, 환경과 생태계에 위협이 되지 않도록 주의를 기울여야 할 것이다.

■ 항공·우주 산업 분야

비행기, 인공위성, 우주선들은 극한의 환경에서 운용된다. 따라서 이러한 분야에서는 안전성과 에너지 사용의 효율을 높이기 위해 더욱 가볍고도 강한 소재들을 지속적으로 개발해 오고 있다.¹⁵ 탄소 기반의 나노복합소재, 실리콘이나 금속 산화물, 금속 질화물 기반의 새로운 반도체 나노물질들을 적용한 소재들은 고온이나 높은 수준의 방사선 노출 이후에도 장치들이 안정적으로 기능할 수 있도록 한다.^{16,17} 철이나 알루미늄보다 훨씬 가벼운 마그네슘 합금이 항공기 재료로 유망하지만 마그네슘이 쉽게 부식되기에 이를 보완할 수 있는 내부식성(anti-corrosion) 나노코팅(nanocoating)이 함께 사용된다. 인공위성의 수명은 곧 위성에 탑재된 태양전지의 수명에 상응하므로 이 또한 나노기술에 큰 영향을 받는다. 스텔스 항공기의 표면은 나노물질로 코팅되어 전자기파를 매우 잘 흡수한다. 매우 가볍고 에너지 밀도가 큰 수소를 연료로 사용하는 연료전지는 소형 드론에 이상적인 에너지원으로 고려되고 있으며, 연료전지 전극의 나노촉매가 개발의 핵심이라 할 수 있다. 항공 우주 산업은 당대 첨단



기술들의 총집합체라 할 수 있으며, 모든 기술과 소재들이 가장 가혹하게 시험된다. 구조체, 코팅, 접착제, 전자재료, 동력원을 아우르는 나노기술의 잠재력이 항공 우주 산업에서 큰 빛을 내고 있다.

■ 환경 분야

디젤 및 가솔린을 사용하는 차량, 선박, 항공기 등 연소원은 나노입자를 포함하는 미립자 물질을 대기로 방출하며, 이는 도시 대기 미세먼지 농도의 30% 이상을 차지한다. 비가 오면 미세먼지가 크게 줄어서 우리는 쾌적하다 느끼지만, 물에 분산된 나노입자는 콜로이드(colloid) 상태가 되어 쉽게 가라앉지 않고 모래와 진흙으로 걸러지지 않으므로 강과 바다까지 수생 생태계 전체에 피해가 전달될 것이다. 이러한 미세한 나노입자의 생체독성이 확인됨에 따라 규제와 조사가 진행되고 있으나, 주로 인체 건강에 미치는 영향에 초점을 맞추고 있으며, 생태계에 대한 조사는 거의 이루어지지 않고 있다. 지금은 금지되었지만, 자연적 나노물질인 석면을 단열재로 사용했던 시기 이후로 치약, 세탁기, 청소기, 반창고 등에 사용되는 나노입자, 플라스틱, 촉매, 배터리 전극, 항공기 소재, 화장품 등에 사용되는 탄소 나노튜브와 금속 산화물 나노입자 등 모든 유형의 나노물질들의 생산량이 폭발적으로 증가하고 있으며, 문제는, 수많은 종류의 나노물질들이 위험성 평가가 이루어지기 이전에 이미 사용되고 배출되고 있다는 것이다. 이처럼, 나노물질의 환경독성에 대한 우려가 좀처럼 관심을 받지 못하는 중에도, 소수의 연구자들은 이에 대한 경고를 보내고 있다. Xing과 Liu 등은 식물의 발아 및 뿌리 성장 단계에서 토양에 섞인 나노물질이 미치는 영향을 보고했으며,^{18,19} Adams 등은 썩뜨림에 사용되는 산화아연(ZnO) 등의 나노입자가 생태계 1차 생산자인 수생 미생물에게 강한 독성을 보인다고 보고했고,^{20,21} Smith 등은 어류의 아가미 호흡 기능에 영향을 줄 가능성이 있다고 경고했다.^{22,23}

나노물질의 사용량은 증가할 것이고, 의도치 않더라도 환경으로 방출되는 양 또한 증가할 것이다. 우리는 지난 산업혁명 시기에 환경과 생태계의 파괴를 외면했었고, 많은 것을 잃은 후에서야 규제를 마련하며 환경 복원을 위해 노력을 기울이고 있다. 이제 멈출 수 없는 나노혁명이 시작되었고, 급격한 발전을 기대하고 있지만, 그 이면에 있는 환경부담을 또다시 외면해서는 안 될 것이다.

1.1.4 이 책에서는...

나노소재 화학은 다양한 기초학문과 응용학문들이 한 데 모여 함께 만들어가고 있는 융복합 학문이다. 물리학, 화학, 생명공학, 에너지공학, 환경공학, 반도체 공학을 비롯한 수많은 분야의 연구자들이 각자의 다양한 시각을 제공하며 나노 과학 연구에 참여하여 적극적인 학제간 교류가 일어나고 있다. 이 책은 나노소재 화학을 주제로 다양한 분야에서 활발히 연구하고 있는 국내 연구자들이 함께 집필한 것으로, 각 분야에서 나노소재 화학을 어떻게 발전시키고 활용해 왔는지를 소개하고, 21세기 나노 혁명을 이끌어 갈 도전 과제와 전망을 제안하고자 한다.

이 책의 1장은 나노 규모에서 일어나는 특별한 현상을 이해하는 것으로 출발한다. 나노 기술의 역사와 앞으로 일어날 파급효과를 살펴보고, 나노 세계에서 비분자 고체의 표면 상태와 표면에너지에 대한 개념을 이해할 것이다.

2장에서는 나노물질의 대표적인 합성·제조 방법들과 관찰 방법들의 튜토리얼을 제공할 것이다.

3장에서는 금속 나노입자의 대표적인 특성인 표면 플라즈몬 공명 현상을 주제로, 작은

나노입자의 전자구조를 살펴보고 자유전자들의 진동으로 표현되는 유사입자 플라즈몬을 소개할 것이다. 표면 플라즈몬 공명으로 인해 나타나는 광학적, 화학적 현상들과 이를 활용하기 위한 나노입자를 합성하는 방법, 파생되는 응용과 전망을 소개할 것이다.

4장에서는 밸런스밴드와 컨덕션밴드 사이에 밴드갭을 가진 반도체 물질이 나노구조를 가질 때 나타나는 현상에 주목한다. 반도체 나노결정의 전자구조 변화와 광학적 성질들을 이해하고, 다이오드, 태양 전지, 광검출기, 레이저 등 다양한 응용 예들을 살펴볼 것이다.

5장에서는 층상구조 화합물, van der Waals 구조체로도 불리는 이차원 소재를 다룬다. 2차원 구조를 형성하게 하는 비등방성 결정구조와 적층구조에 따른 전자구조 등 기본적인 원리를 공부하고, 박리법, 증착법 등 대표적인 합성 방법과 그래핀, 전이금속 칼코젠, 육방정계 질화붕소 등 대표적인 2차원 구조들을 소개하고자 한다.

6장에서는 내부에 나노구조의 기공을 함유하는 나노다공성 소재를 소개한다. 내부 기공의 크기, 형태, 연결성, 표면상 등 나노다공성 소재의 특성을 기술하는 요소들을 살펴보고, 제올라이트, 금속-유기 골격체, 메조다공성 실리카 등 대표적인 나노다공성 소재의 합성 전략과 응용들에 대해 이야기할 것이다.

7장에서는 단분자의 자기조립으로 형성되는 나노구조를 살펴본다. 분자 간의 정전기력, van der Waals 힘과 같은 상호작용을 통해 자기조립체를 형성하는 과정과, 이를 통해 형성된 단분자막의 표면 및 계면특성을 이해하고 이를 소재로 활용하는 전망을 소개하고자 한다.

8장에서는 나노구조를 갖도록 성형된 고분자를 소개한다. 고분자의 유연성을 기반으로 전기적, 광학적 특성을 활용하여 여러 분야에 응용 가능한 소재를 설계하는 전략과, 고분자를 나노구조로 성형하기 위한 리소그래피, 프린팅 등 패터닝 기술들을 살펴볼 것이다.

9장에서는 이차전지 및 슈퍼커패시터 등의 에너지 저장에 특화된 나노물질들을 폭 넓게 살펴보고자 한다. 에너지 저장 소재에 요구되는 특성들과 이를 제공하기 위한 전략을 다루며, 소재와 전해질의 계면에서 나타나는 미세구조와 이로 인한 효과를 설명할 것이다.

10장에서는 나노물질을 불균일계 촉매로 활용하는 나노촉매 분야에 대해 다룬다. 나노물질의 특이적인 표면 상태가 나노물질 표면에 찾아온 게스트 물질과 상호작용하여 화학반응을 일으키는 현상을 이해하고, 촉매 특성을 향상시키기 위한 전략들을 소개할 것이다.

11장에서는 바이오센싱, 질병 치료, 기능성 화장품 등 바이오 응용을 위한 나노소재를 소개한다. 생물학적 수용체와 나노소재의 결합 방법, 의료용 약물을 내장한 나노소재들의 제조 방법, 열을 발생시키고 자기장에 반응하며 빛을 흡수하는 나노소재들이 우리의 건강을 위해 활용되는 예를 살펴볼 것이다.



1.2 나노결정의 이해(Introduction of nanocrystals)

1.2.1 표면에너지(Surface energy)

물질의 고유한 성질을 가지는 가장 작은 단위 입자를 분자로 정의하나 모든 물질이 이를 만족하는 단위 입자를 가지지는 않는다. 금속 및 금속염, 그래핀, 다이아몬드와 같이 금속 결합, 이온 결합, 공유 결합 등에 의해 끊임없이 이어질 수 있는 물질들은 조성과 구조의 최소 단위체인 단위정(unit cell)을 찾을 수 있지만, 분자의 정의에는 부합하지 않는다. 단위정의 크기만큼만 떼어 놓으면 물질의 고유한 성질과는 현저히 다른 물성이 나타나며, 물체의 크기에 따라 물성이 변하므로 고유의 물성을 가지는 최소 크기를 특정할 수 없기 때문이다. 이러한 비분자 고체(non-molecular solid)의 특징은 원자들이 끊임없이 이어질 수 있

