

# 나노 기술 및 산업 동향



최 영 진 (세종대학교 나노신소재공학과 교수)



# 나노 기술 및 산업 동향

최 영 진 (세종대학교 나노신소재공학과 교수)





# C O N T E N T S

## I. 나노 기술 및 산업 개요

- |                  |    |
|------------------|----|
| 1. 나노기술 개요 ..... | 4  |
| 2. 나노산업 개요 ..... | 12 |

## II. 나노 기술 및 산업 육성 정책 동향

- |                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 1. 국내 나노 기술 및 산업 육성 정책의 역사 ..... | 15 |
| 2. 해외 나노 기술 및 산업 육성 정책 동향 .....  | 33 |

## III. 나노기술 및 연구동향

- |                        |    |
|------------------------|----|
| 1. 나노소재 분야 .....       | 39 |
| 2. 나노소자 분야 .....       | 47 |
| 3. 나노에너지·환경 분야 .....   | 53 |
| 4. 나노바이오 분야 .....      | 58 |
| 5. 나노공정·장비·측정 분야 ..... | 61 |

## IV. 나노산업 동향 및 전망

- |                  |    |
|------------------|----|
| 1. 나노산업 동향 ..... | 67 |
| 2. 나노산업 전망 ..... | 73 |

## V. 결어

- |       |    |
|-------|----|
| ..... | 74 |
|-------|----|

# I. 나노 기술 및 산업 개요

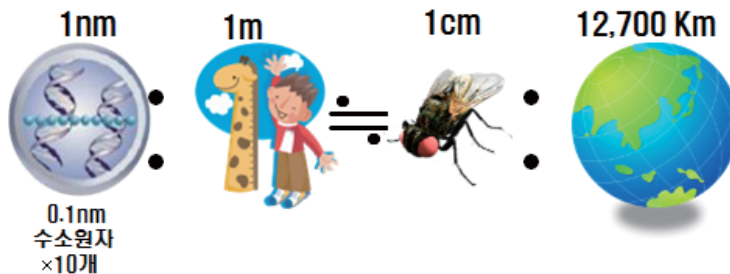
## 1. 나노기술 개요

### ≡ 나노기술의 정의

#### ■ 나노의 개념

- 나노는 난장이를 의미하는 그리스어인 nanos에서 유래된 단어로써, 10억분의 1( $10^{-9}$ )을 나타내는 접두사
- 일반적으로 나노기술이라고 할 때는 특별히 10억분의 1미터 크기를 다루는 기술을 의미하는데, 1nm는 사람 머리카락 굵기의 십만 분의 일 정도 크기가 되며, 비유적으로 볼 때 지구만한 인간이 파리를 다루는 것과 같은 수준의 기술임

그림\_01 나노크기에 대한 비유



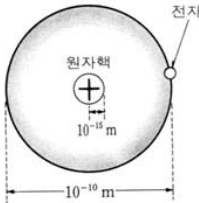


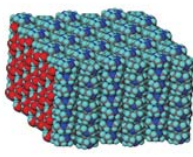


- 나노기술에 대한 학문적 정의는 역사적으로 조금씩 진화하고 있는데, 현재 가장 일반적으로 통용되는 정의는 1~100nm(nanoscale) 수준에서 물질을 조작하는 과학기술을 의미함
  - (미국 NNI의 정의) Nanotechnology is science, engineering, and technology conducted at the nanoscale, which is about 1 to 100 nanometers.
    - \* NNI : National Nanotechnology Initiative
  - (나노기술개발 촉진법 상의 정의) “물질을 나노미터 크기의 범주에서 조작·분석하고 이를 제어함으로써 새롭거나 개선된 물리적·화학적·생물학적 특성을 나타내는 소재·소자(素子) 또는 시스템(이하 “소재등”이라 한다)을 만들어 내는 과학기술” 및 “소재등을 나노미터 크기의 범주에서 미세하게 가공하는 과학기술”

### ≡ 나노기술의 역사

- 나노기술의 개념 등장
  - 노벨물리학상 수상자인 미국의 Richard Feynman 교수가 1959년 캘리포니아공과대학에서 열린 강연에서 “There's Plenty of Room at the Bottom”이라는 주제강연을 통해 원자조작을 통한 새로운 과학기술의 출현을 예견
  - 1974년 일본 동경과학대학교 Norio Taniguchi 교수가 반도체 공정에서 처음으로 “nanotechnology” 라는 용어를 사용
  - 1986년 미국의 Eric Drexler 박사가 창조의 엔진(Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology)이라는 책을 통해 나노기술의 잠재력을 소개
- 과학사적 관점에서 나노기술의 태동이 늦은 이유
  - 20세기 전반에는 간단한 수학적 모델링을 통해 나노크기 보다 더 작은 원자에 대한 학문적 이해가 충분히 이루어졌으며 이의 응용으로 핵폭탄, 원자력발전 등이 개발됨

- 20세기 후반에는 원자가 무한히 많이 모여 있는 거시물질에 대해 역시 간단한 수학적 모델링을 통해 전자공학이 크게 발전
- 나노크기의 경우 간단한 수학적 모델링을 통해 그 특성을 알아볼 방법이 없었으며 (1nm 크기 정육면체에는 원자가 대략 1,000개 존재), 나노크기에서 벌어지는 현상을 들여다 볼 도구가 없었음

**그림\_02** 나노크기에서의 학문 발전이 더디었던 이유

핵물리학 (20세기 초반)	고체물리학 (20세기 후반)
  	  
<ul style="list-style-type: none"> <li>⚡ (다루는 대상) 원자 한 개</li> <li>⚡ (연구방법) 수학적 계산 + 원시적 컴퓨팅</li> <li>⚡ (적용분야) 원자력발전, 핵폭탄</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⚡ (다루는 대상) 무수히 많은 원자 (<math>10^{23}</math>개)</li> <li>⚡ (연구방법) 수학적 계산 + 진보된 컴퓨팅</li> <li>⚡ (적용분야) 반도체</li> </ul>

■ 나노기술의 과학기술적 진보의 계기

- 20세기 후반 핵심 산업인 전자공학분야에서 반도체 구성요소들의 크기가 1 마이크로보다 작아지면서 더 이상 근사계산이 어려워짐에 따라 나노크기 영역에 대한 관심이 증대



- 1981년 스위스 IBM Zurich 연구소의 Gerd Binnig 박사와 Heinrich Rohrer 박사가 공동으로 주사터널링현미경(scanning tunneling microscope)을 개발함으로써 최초로 물체 표면의 원자를 관측하고, 1986년 Binnig, Calvin Quate, Christoph Gerber가 손쉽게 나노크기 영역에서 물체의 표면을 관측할 수 있는 원자현미경(atomic force microscope)을 개발함에 따라 20세기 말에 나노기술이 급격히 발전하게 됨
  - 컴퓨터 기술의 진보로 인해 나노크기 영역에서의 현상을 예측할 수 있는 능력이 확대됨
- 미래 신기술로서의 입지 확립
- 2000년 미국의 빌 클린턴 대통령이 국가나노기술개발계획 (National Nanotechnology Initiative, NNI) 발표
  - 이후 제조업이 있는 나라들은 거의 대부분 국가전략으로 나노기술 육성

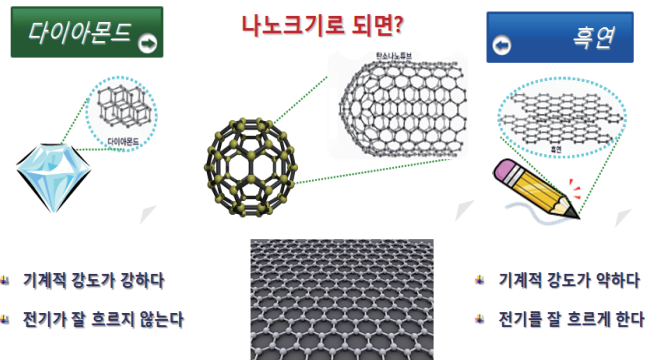
그림\_03 나노기술을 국가전략으로 육성하고 있는 국가(녹색표시)



### ≡ 나노기술의 특징 (예)

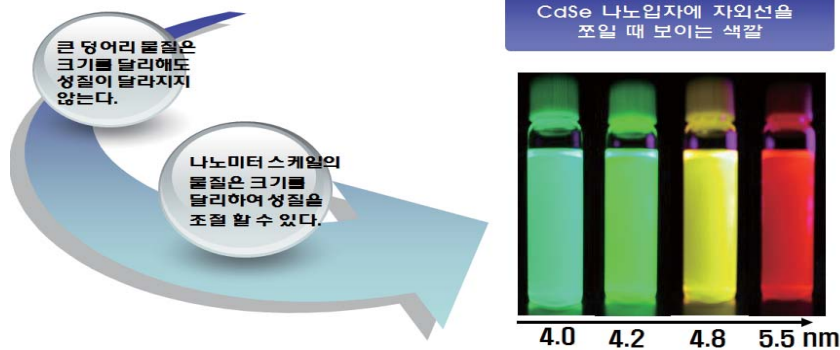
- 나노 크기가 되면 같은 물질도 다른 구조를 가질 수 있음
  - 탄소의 경우 일반적으로 다이아몬드 구조와 흑연 구조, 두 가지의 결정구조를 갖는 것으로 알려져 왔음
  - 정사면체 중심과 꼭지점에 탄소원자가 배치되어 있는 다이아몬드 구조는 탄소 간의 결합이 매우 강하기 때문에 기계적 강도가 강한 반면, 전자가 강하게 속박되어 있어 전기가 잘 흐르지 않음
  - 반면, 벌집 모양의 판상 구조가 적층되어 있는 흑연 구조는 벌집 모양에 존재하는 탄소들 간의 결합은 강하지만, 판과 판 사이의 결합이 약해서 쉽게 부스러지고, 판과 판 사이에 존재하는 전자가 원자에 강하게 속박되어 있지 않아 전기가 잘 통함
  - 그러나 나노 크기가 되면 탄소원자들은 모여서 공 모양(플러렌)을 만들거나, 죽부인과 같은 대롱 모양(탄소나노튜브)을 만들게 됨
  - 특히 탄소나노튜브(Carbon Nanotube, CNT)는 흑연의 한 층(그래핀)이 돌돌 말려져서 만들어진 모양인데, 말리는 방향에 따라 전기를 아주 잘 흐르게 하는 도체가 되거나, 전자소자 관점에서 유용한 반도체 특성을 보이기도 함

그림\_04 탄소 나노 크기로 될 때 나타나는 여러 가지 형태의 나노구조체



- 따라서 탄소의 나노구조체들은 기존 탄소 결정에서 볼 수 없었던 전기적 특성을 보일 뿐 아니라, 빈 공간이 많아서 가볍고 강한 기계적 특징을 보임
  - 비교적 최근에 발견된 그래핀의 경우 높은 전기이동도 및 빛 투과율로 인해 현재 전자기에 널리 사용되고 있는 투명전극에 적용될 수 있는 가능성을 보이고 있음
- 나노 크기가 되면 “크기”에 따라 물질의 성질이 달라질 수 있음
- 마이크로 크기 이상에서는 물질의 크기를 변화시킨다고 해서 물질의 물리적, 화학적 특성이 크게 변하지 않음
  - 그러나 CdSe 과 같은 반도체 물질은 외부에서 자외선을 쬐어주었을 때 가시광선 영역의 빛을 내뿜는데, 입자의 크기가 나노급이 되면 작은 크기에 변화에도 내뿜는 빛의 색깔이 바뀜
  - 이는 양자역학적 원리에 기인한 것으로 나노 크기 영역에서만 나타나는 고유의 특성이며, 이에 따라 이런 입자를 양자점(Quantum Dot)이라고 부름
  - 양자점에서 나오는 빛은 색이 매우 선명하므로, 최근 이를 이용하여 화질이 선명한 초고 화질 TV를 국내 기업이 출시한 바 있음

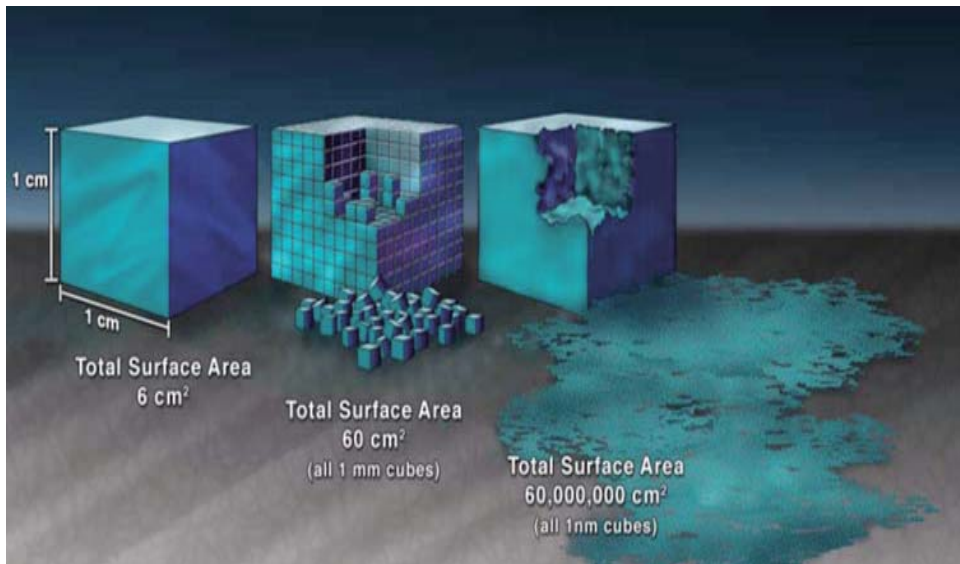
그림\_05 크기에 따라 다른 색을 내뿜는 양자점



■ 나노 크기가 되면 비표면적비가 크게 증가함

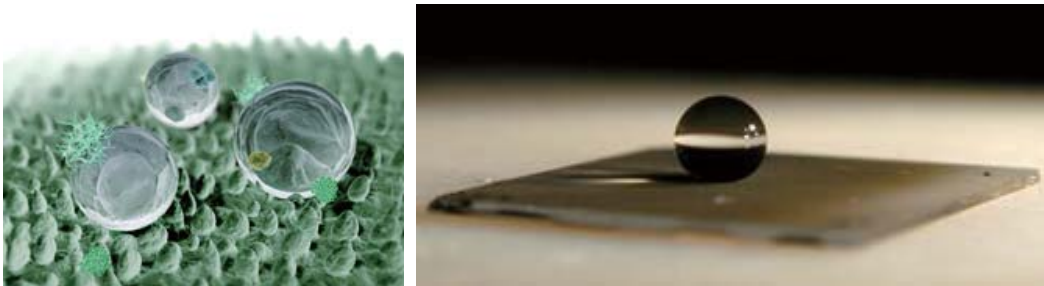
- 물체는 잘게 자르면 자를수록 표면적이 증가하는데, 한 변의 길이가 1cm인 정육면체를 1nm 크기의 정육면체로 잘게 자르면, 표면적이 천만 배 증가함
- 일반적으로 촉매는 촉매 물질의 표면에서 화학반응을 유도하기 때문에, 촉매에 있어서 전체 부피 대 표면적을 의미하는 비표면적비라는 물리량이 중요한데, 나노 크기가 되면 비표면적비가 크게 증가하여 촉매 활동에 유리
- 대부분의 촉매는 귀금속으로 이루어져 있기 때문에 사용되는 촉매량을 최소화하는 것이 중요하며, 이러한 관점에서 볼 때 촉매를 나노입자화 함으로써 비표면적비를 증가시키는 것이 필요

그림\_06 크기에 따른 표면적 증가의 예



- 나노 크기 물체는 그 크기로 인해 특별한 성능을 가짐
  - 물체의 표면에 나노 크기 돌기를 형성시키면 소위 연잎 효과(Lotus Effect)에 의해 표면이 젖지 않는 “초소수성(super-hydrophobicity)”라는 현상이 발생하는데, 이를 이용하여 자가 세정이 가능한 페인트, 음식물이 묻지 않는 셔츠 등을 제조할 수 있음
  - 나노 굵기의 섬유로 천을 짜면, 나노섬유와 섬유 사이에 나노 크기 수준의 구멍이 만들어져 크기가 큰 불순물들은 쉽게 걸러지는 여과막을 만들 수 있음
  - 일정한 간격으로 배열되어 있는 나노구조물은 빛의 간섭 효과로 인해 특정한 색의 빛만 잘 반사시킬 수 있으므로, 염료가 없이도 색을 구현할 수 있음(구조색)

그림\_07 초소수성 표면의 형성 개념(좌) 및 초소수성 표면에서의 물방울 움직임



그림\_08 구조색의 형성 개념(좌) 및 구조색으로 표현된 나비



## 2. 나노산업 개요

### ≡ 나노산업의 정의 및 범위

#### ■ 나노산업의 정의

- ‘나노산업’은 ‘나노기술 + 산업’의 혼성어로서 소재 혹은 초정밀 제조에 있어서의 매우 효율적인 생산 활동 혹은 혁신적인 제품의 제조로 나타나는 나노크기 영역에서의 공학적인 적용과 관련이 있는 경제활동으로 정의(‘Nanoindustry’ is a portmanteau word of nanotechnology and industry and economic activity concerned with the practice of engineering on the nanoscale resulting in either highly efficient production activity on materials or high precision manufacturing or manufacture of innovative goods.)
- 나노기술이 거의 전 산업영역에서 기존 산업들을 혁신하고 있으므로 나노산업이 별도의 산업으로 분류될 수 없다는 견해도 일부 존재하지만, 이는 정보통신기술(ICT)이 다른 산업들의 혁신에 기여한다고 해서 ICT 산업을 독립적인 산업으로 볼 수 없다라는 시각과 궤를 같이 하는 것임

#### ■ 나노산업의 범위

- 나노산업은 나노기술을 핵심적으로 사용함으로써 기존 제품을 개선·혁신하거나 전혀 새로운 나노기능에 의존하는 새로운 제품을 창출하는 특성을 지니고 있기 때문에, 이미 나노기술을 핵심적으로 사용하고 있는 반도체 산업의 예에서 보는 것과 같이 산업의 범위는 기존 산업들과 중첩되는 경향을 보임

### ≡ 나노융합산업 통계

- 2012년에 처음으로 나노산업분야에 대한 국내 통계조사가 실시됨
  - 나노산업의 타산업과의 중첩성으로 인해 나노융합산업의 이름으로 통계청 승인 통계 조사가 이루어졌음
- 국내 나노융합산업 표준분류표는 4개 대분류, 16개 중분류, 44개의 소분류 산업으로 구성
  - 4개 대분류는 나노소재, 나노전자, 나노바이오/의료, 나노장비/기기 등으로 구성
- 매년 나노융합산업에 대한 국내 통계조사를 실시하고 있으며, 2014년 나노융합산업통계까지 조사된 바가 있음

표\_01 나노융합산업 분류체계

대분류	중분류	소분류	
NA. 나노소재	NA01. 나노원료소재	NA0101. 나노분말 (나노입자포함)	
		NA0102. 나노선 (나노막대, 나노튜브포함)	
		NA0103. 판상나노소재	
		NA0104. 나노기공체 (나노세공체)	
		NA0105. 탄소나노소재	
	NA02. 나노가공소재 (1차가공소재)	NA0201. 나노분산체	
		NA0202. 나노코팅체	
		NA0203. 나노복합섬유	
		NA0204. 나노응집체	
NA03. 나노복합소재 (2차가공소재)	NA0301. 벌크형 나노복합체		
	NA0302. 나노기공체		
	NA0303. 나노 구조막소재		
	NA0304. 나노다층소재		
	NA0305. 나노직물		
NB. 나노전자	NB01. 반도체용 나노소자	NB0101. 메모리소자	
		NB0102. 로직소자	
		NB0103. 광소자	
	NB02. 센서용 나노소자	NB0201. 물리센서	
		NB0202. 화학센서	
		NB0203. 생체인식센서	
	NB03. 디스플레이용 나노소자	NB0301. LCD용 나노소자 (Front plane)	
		NB0302. OLED용 나노소자 (Front plane)	
		NB0303. Backplane 소자 (a-Si, LTPS, Oxide TFT)	
		NB0304. Touch용 나노소자	
NB04. 에너지용 나노소자	NB0401. 이차전지		
	NB0402. 연료전지		
	NB0403. 태양전지		
NC. 나노 바이오/의료	NC01. 나노의약품	NC0101. 나노치료제	
		NC0102. 나노진단제	
	NC02. 나노바이오기기/장비	NC0201. 진단기기	
		NC0202. 분석기장비	
	NC03. 나노화장품	NC0301. 나노화장품	
	NC04. 나노농수산 식품	NC0401. 나노기능성 식품	
		NC0402. 사료/비료/농약	
NC05. 나노생체 삽입소재	NC0501. 임플란트		
NC06. 의료 및 연구용 소모품	NC0601. 의료 및 연구용 소모품		
ND. 나노 장비/기기	ND01. 일반목적 장비용 나노부품	ND0101. 일반목적 장비용 나노부품	
		ND0201. 나노패터닝 장비	
		ND0202. 나노박막장비	
		ND0203. 나노소재 제조 및 정렬장비	
	ND02. 나노제조 공정장비	ND0204. 나노 제조장비용 나노부품	
		ND03. 나노측정 분석장비	ND0301. 나노 화학구조 측정분석장비
			ND0302. 나노형상/물성측정분석장비
ND0303. 나노측정분석장비용 나노부품			



## II. 나노 기술 및 산업 육성 정책 동향



### 1. 국내 나노 기술 및 산업 육성 정책의 역사

#### ≡ 나노기술종합발전계획

##### ■ 나노기술종합발전계획 수립 배경

- 미국의 빌 클린턴 대통령이 2000년 1월 나노기술개발계획 (National Nanotechnology Initiative, NNI) 발표
- 우리나라는 다른 나라들에 비해 상대적으로 빠른 시기였던 2001년 범부처 공동으로 제1기 나노기술종합발전계획을 수립하고, 나노기술 연구개발을 촉진하려는 노력을 시작
- 계획 수립 당시(2000년) 국내 나노기술 연구개발 능력은 미국 대비 25% 수준에 머물러 있었고, 나노관련 정부연구개발 예산은 과학기술부 312억원, 산업자원부 25억원, 정보통신부 121억원 등 총 450억원 / 년 규모에 불과

##### ■ 제1기 나노기술종합발전계획

- 제1기 계획에서는 국내 나노기술 연구인프라가 부족하다는 공감대를 바탕으로 나노패널 구축을 최우선 과제로 삼았고, 연구개발 분야에서는 과학기술부를 중심으로 나노기술관련 3대 프론티어사업<sup>1</sup> (테라급나노소자기술개발사업, 나노소재기술개발사업, 나노메카트로닉스기술개발사업)이 추진 됨

1\_ 연구비 규모는 년 100억 정도이며 사업기간은 10년에 달하는 대형 국가 연구개발 사업으로, 테라급나노소자기술개발사업, 나노소재기술개발사업, 나노메카트로닉스기술개발사업 등이 추진 됨

- 목표지향적인 사업단 형태의 프론티어 사업 이외에도 당시 과학기술부에서는 나노기 초연구기반을 강화하고 신산업창출 및 관련 제품 개발을 위해 향후 실용화 가능성이 큰 나노핵심기술과 미래 원천기술을 집중 개발하고자 하는 목적으로 나노핵심기반기술개발사업을 2002년도부터 추진 함
- 제1기 계획에서 인프라 구축을 최우선으로 삼은 점은 당시 열악한 국내 나노기술장비 인프라를 고려한 시의적절한 정책적 판단이었으나, 당초 나노팹 1개소를 시범적으로 구축하고 나노기술발전추이에 따라 이를 확대하겠다는 계획(2005년 이후 특화팹 2개소 설치)이 여러 가지 상황논리에 빠져 과학기술부 2개 팹(나노종합팹, 나노소자특화팹), 산업자원부 4개 팹(나노기술집적센터-포항, 전북, 광주, 나노부품실용화센터)의 동시다발적 구축으로 변경된 점은 전체적인 예산 투입의 불균형을 초래했을 뿐 아니라 인프라에 대한 과잉중복투자라는 평가를 받게 됨
- 물론 짧은 시간 내에 인프라에 대한 집약적 투자를 통해 전세계에서 유래를 찾기 힘들 정도의 정부주도 우수 인프라를 갖춘 점은 긍정적이나, 주로 반도체 소자 제작 관련 장비들 중심으로 구성되어 있어 나노기술연구개발자의 다양한 기술적 수요를 충족하지 못하고 있다는 점과 한정된 국내 수요 대비 공급과잉으로 인해 각 인프라 기관들이 재정적으로 자립하기 어려운 상황에 직면하고 있다는 점은 향후 우리 정부가 풀어야 할 문제로 대두되고 있음
- 나노기술종합발전계획이 수립되던 2001년에는 1,052억원의 정부 R&D 자금이 나노 기술육성에 투자되었는데, 이 투자액은 2002년에 두 배 규모인 2,121억으로 증가하였으며, 매년 꾸준히 성장하여 2005년에는 2,676억원으로 증가
- 이러한 육성정책에 힘입어 당 기간 동안 우리나라의 나노기술 수준은 비약적으로 성장하였으며, 그 결과 기술력이 미국 대비 66% 수준에 달하게 되었음
- 특히 SCI 논문의 경우는 세계 8위 수준에서 5위 수준으로 도약했으며, 미국 등록 특허건수 역시 세계 5위권에 들어서게 되었음

- 또한 나노기술연구인력은 2001년 천명 내외에서 2004년 3,900 여명으로 4배가 증가했으며, 대학의 나노관련 학과는 2001년 3개에서 33개로 11배가 증가하는 등 우리나라의 나노기술 연구개발 역량이 급속도로 성장함
- 제도적인 측면에서는 나노기술개발촉진법(02년 12월) 및 나노기술개발촉진법시행령(03년 6월) 제정으로 나노기술육성을 위한 제도적 뒷받침이 공고히 이루어짐

■ 제2기 나노기술종합발전계획

- 2006년 수립된 제2기 나노기술종합발전계획에서는 1기 계획에서 수립된 여러 정책들을 안정화하는 것을 주된 골자로 하여, 1기 계획을 수정·보완하는 차원에서 계획이 수립되었음
- 1기 계획에서는 2010년까지 선진 5대국 기술경쟁력을 확보하는 것을 비전으로 삼고, 세계 최고기술 10개 이상을 확보하고, 2010년 경 나노활용 IT 분야에서 30%의 시장점유(3천억불)를 목표로 한 반면, 2기 계획에서는 2015년까지 선진 3대국 기술경쟁력을 확보하는 것을 비전으로 삼고, 세계 최고수준 실용화 기술 30개 이상 확보, 2014년 경 세계 나노관련 시장 20%의 점유(5천억불) 등을 목표로 설정함
- 1기 계획에서 추진된 인프라 구축사업이나 연구개발사업이 모두 중장기 프로그램들이어서 2기 계획에서는 특별히 새롭게 추진하는 프로그램은 거의 없었음
- 특히 1기 계획에서 구축이 시작된 인프라의 경우 2기 계획기간 동안 구축을 완료할 예정이었으므로, 새로운 인프라 구축보다는 구축 중인 인프라의 운영 활성화 및 인프라 간 역할분담에 관한 정책적 제안이 주를 이루었음
- 그 결과 2010년에는 교육과학기술부와 지식경제부가 공동으로 “국가나노인프라 활성화 방안”을 수립하여 구축이 완료된 나노인프라 간 연계를 통한 운영 활성화를 도모하였음

- 연구개발 분야에 있어서도 새로운 프로그램은 만들어지지 않았으나, 2004년 과학기술혁신본부 출범과 함께 과학기술부 연구개발 사업이 대거 산업자원부로 이관됨에 따라 2005년부터 실용화 가능성이 큰 나노핵심기술은 산업자원부의 중장기 연구개발 사업인 차세대 신기술개발사업의 일부로 흡수되었고 나머지는 나노원천기술개발사업으로 재편되었음
- 당 사업은 2009년 바이오분야와 함께 미래기반기술개발사업(나노분야)으로 재편되었다가, 2011년부터 나노·소재기술개발 사업으로 독립 편재되어 현재까지 이르고 있음
- 나노기술 연구개발 정부투자의 또 다른 축인 산업통상자원부(舊 산업자원부, 지식경제부)에서는 1999년에 시작된 차세대 신기술개발사업<sup>2</sup>에서 일부 나노기술 관련 연구개발 프로그램을 추진했으나, 본격적으로 나노기술연구개발 육성에 나선 것은 제2기 계획 동안인 2007년 산업분야별로 전략기술개발사업을 시행하면서부터라고 볼 수 있음
- 당 사업은 기존에 차세대 신기술개발사업으로 진행되던 나노기술 관련연구개발 사업들을 흡수하면서 동시에 산업별 전략기술지원단을 기반으로 나노기술 분야에 특화된 연구개발 과제들을 발굴하기 시작했음
- 2009년 지식경제부의 출범과 더불어 전략기술개발사업은 산업원천기술개발사업으로 개편되었고, 2011년에는 산업융합원천기술개발사업으로 개편됨과 동시에 PD<sup>3</sup> 제도를 도입함으로써 나노기술 연구개발의 전략성을 한층 강화하게 되었음
- 당 사업은 현재는 나노융합산업핵심기술개발사업으로 이름을 바꿔 추진되고 있음
- 2기 계획(06년~10년) 동안에는 1조 3천억원 정도의 정부연구개발투자가 이루어졌으며, 그 결과 08년 기준 미국대비 75% 수준의 기술력을 확보함으로써 세계 4위권에 도약하는 쾌거를 이루어냄

2\_ 연구비 규모는 평균 년 20억 정도이며, 당시 산업자원부의 연구개발 사업으로는 파격적인 10년의 사업기간이 주어짐.

3\_ Program Director의 약자로, 산업통상자원부의 각 산업별 연구개발사업을 총괄 기획하는 역할을 함.

- SCI 논문은 세계 4위권, 미국등록특허는 세계 3위권에 도달했으며, 나노기업수도 2009년 184개에 이를 정도로 나노기술의 상용화가 가시권 안에 들어오기 시작함
- 나노기술연구인력은 2009년 5,400여명으로 증가했으며, 대학의 나노관련 학과 역시 43개로 꾸준히 증가하였음
- 2기 계획기간을 거치면서 나노기술의 산업적 가시성에 대한 사회적 관심이 폭발적으로 증가하게 되었고, 그 결과 교육과학기술부와 지식경제부에서는 2009년 공동으로 “나노융합산업발전전략”을 수립하게 되었으며, 나노기술에 대한 사회적 수용성을 높이기 위해 환경부 주도의 “나노물질안전관리 중장기 추진계획(2009년)”, 지식경제부 주도의 “나노제품안전성종합계획 중장기 추진계획(2010년)” 등이 잇달아 수립됨
- 특히 “나노융합산업발전전략”에서는 기초원천기술의 발굴부터 상용화까지 기술개발의 전주기를 지원하는 프로그램 추진을 제안했으며, 이는 2012년 출범한 나노융합2020 사업의 모태가 되었음

■ 제3기 나노기술종합발전계획

- 제3기 나노기술종합발전계획은 2010년 12월에 확정되었는데, 세계 일류 나노강국 건설을 비전으로 하여 미국대비 나노기술 수준을 90% 수준까지 끌어올리고, 산업적 파급효과가 높은 나노융합원천기술 30개 이상을 확보하는 것을 목표로 설정하였음
- 특기할만한 점은 나노기술 연구개발의 사회적·윤리적 책무성을 강화하기 위해 정부의 나노기술 연구개발비의 일정부분을 나노 EHS(Environment, Health, and Safety)에 투자 하도록 가이드 했다는 점임
- 제1기 계획에서 추진했던 나노인프라 구축사업이 모두 종료되었으며, 21세기 프론티어 사업 등 주요 대규모 연구개발사업이 모두 종료됨에 따라 3기 계획에서는 새로운 프로그램 추진이 필요한 상황이 되었으나, 구체적으로 어떠한 프로그램을 추진할 것인지는 명확히 제시되지 않았음

- 그나마 2009년 교육과학기술부와 지식경제부가 공동으로 발표한 “나노융합산업발전 전략”에 담겨있던 “기초원천기술의 발굴부터 상용화까지 기술개발의 전주기를 지원하는 프로그램” 추진에 대한 내용이 반영되었으며, 이를 근거로 하여 2년간의 예비타당성 조사사업을 거쳐 2012년 나노융합2020 사업단<sup>4</sup>이 출범하게 되었음
- 무엇보다도 3기 계획을 통해서는 나노안전관리에 대한 정책적 지원이 활발하게 이루어져, 나노안전성 기술지원센터 등 관련 인프라 구축 및 연구개발 사업에 대한 투자가 크게 증가함
- 3기 계획 동안에는 기존 대규모 사업들이 종료되고, 규모 있는 프로그램이 새롭게 만들어지지 않았음에도 불구하고 통계상 정부투자액은 크게 증가한 것으로 나타나, 나노 기술분야의 투자효율성에 대한 의문이 증대됨
- 이는 2013년부터 R&D 투자액 통계가 특정분야에 대한 사전기획 투자액 기준에서 연구자가 국가과학기술정보서비스(NTIS)에 입력한 분야 기준으로 변경됨에 따라 기획 단계가 없는 기초분야 R&D 투자액이 각 기술 분야(6T : NT, IT, BT, ET, CT, ST) 투자액으로 포함되었기 때문이며, 실제로 NT는 6T 중 CT 다음으로 가장 적은 예산이 투입되고 있는 형편임<sup>5</sup>
- 그럼에도 불구하고 기술력은 꾸준히 상승하여 2014년 기준 미국대비 80% 수준의 기술력을 확보하였으며, SCI 논문 세계 4위권, 미국등록특허 세계 3위권을 유지하고 있음
- 또한 나노기술연구인력은 2014년 8,548명으로 증가했으며, 대학의 나노관련 학과 역시 234개로 대폭 증가하였음

4\_ 나노융합2020사업은 나노원천기술의 연구성과를 상용화하여 조기에 신시장·신산업을 창출하는 나노융합기술 상용화 R&BD사업으로, 2012년부터 2020년까지 총사업비가 5,130억원(국비 4,322억원, 민간 808억원)이 투입되는 것으로 설계됨

5\_ 2014년 6T별 투자비중은 IT 18.4%, BT 18.2%, ET 15.1%, ST 4.7%, NT 4.5%, CT 0.9% (2014년도 국가연구개발사업 조사·분석 보고서, KISTEP)

- 특히 나노기술의 산업화 진전에 따라 나노기업수는 2013년 541개로 2009년 대비 3배로 증가함

■ 제4기 나노기술종합발전계획

- 제4기 나노기술종합발전계획은 “대한민국 나노혁신 2025”라는 부제로 2016년 4월에 확정되었음
- “기술혁신으로 지속성장을 견인하는 나노 선도국가” 라는 비전으로 제조업 혁신을 위한 선도기술을 구현하고, 나노기술 산업화의 글로벌 리더가 되는 것을 목표로 하고 있음
- 혁신주도 나노산업화 확산, 미래선도 나노기술 확보, 나노혁신 기반 확충이라는 3대 전략을 바탕으로, 12개의 전략과제를 제시
- 주요 발전 지표로는 2025년까지 나노과학기술수준을 미국 대비 92% 수준까지 끌어 올리고, 핵심연구인력을 12,000명 수준까지 양성하고, 국내 전산업에서 나노융합제품 매출이 차지하는 비중을 12%까지 확대시키며, 나노융합기업 수를 1,000개까지 증가 시키고자 함

그림\_09 제4기 나노기술종합발전계획 상의 3대 전략 12개 과제



### ≡ 나노관련 유관기관의 설립

#### ■ 나노융합산업연구조합

- 제1기 나노기술종합발전계획이 수립되던 해인 2001년 나노융합기술 사업화를 목적으로 나노융합산업연구조합(舊 나노산업기술연구조합) 설립
- 나노융합산업연구조합은 나노융합산업 발전의 토대를 마련하기 위해 산·학·연 협력네트워크 구축 및 공동기술개발사업, 나노융합기업 수요연계 및 제품화 적용을 위한 각종 사업화 지원 활동을 주도적으로 수행해 오고 있음
- 나노융합산업연구조합은 나노기술연구협의회와 함께 나노코리아(국제나노기술심포지엄 및 전시회)를 공동 주최하고 있으며, 나노융합기업의 사업화 촉진을 지원하기 위해 나노융합기업 T2B(Tech to Biz) 촉진사업, 나노융합제품 수요연계 제품제작 평가지원사업, 나노소재 수요연계 제품화 적용기술개발 사업 등의 사업을 수행하고 있음
- 2016년 현재, (주)엘지, 삼성전자 등 100개의 산·학·연 기관들이 회원으로 활동하고 있음

#### ■ 나노기술연구협의회

- 나노기술개발촉진법 제7조에 의거하여 학·연·산 연구주체 간 정보·인력 교류 및 협동 연구 등을 촉진하고, 이와 관련된 나노기술 정책연구, 학술활동 및 나노기술의 조기 산업화에 기여하며, 회원 간 상호 협력 증진을 목적으로 2004년에 사단법인으로 발족
- 나노기술연구협의회는 나노기술종합발전계획 수립, 국가나노기술지도 수립, 나노융합 2020 사업 기획, 표준나노교재편찬, 나노팹시설활용지원사업 등을 성공적으로 수행해 왔으며, 나노코리아 심포지엄 주최, 학술지인 Nano Convergence 발간, 나노기술기반 교육과정 운영, 온라인 교육프로그램인 e-nanoschool 운영 등을 중심사업으로 진행하고 있음



- 최근에는 미래창조과학부의 나노기술 R&D 프로그램인 나노·소재기술개발사업의 사전 기획을 담당하여, 전문가 중심의 상향식 R&D 과제 도출에 힘쓰고 있음

■ 국가나노기술정책센터

- 국가나노기술정책센터(NNPC)는 정부의 나노기술 정책개발 및 전략수립을 지원하기 위하여 나노분야의 정보수집·분석을 통해 정책을 연구·개발하는 기관으로 2010년에 설립되었음
- 주요 국가의 나노기술 정책·산업·기술동향을 분석하여 정부 정책 당국자와 국내 연구자 및 기업에 제공하고 있으며, 특히 나노기술정책 연구, 나노기술정보 수집·분석과 통계조사, 나노분야 유망기술 도출, 나노인력 양성 및 연구자 협력 네트워크 구축 지원 등의 역할을 하고 있음

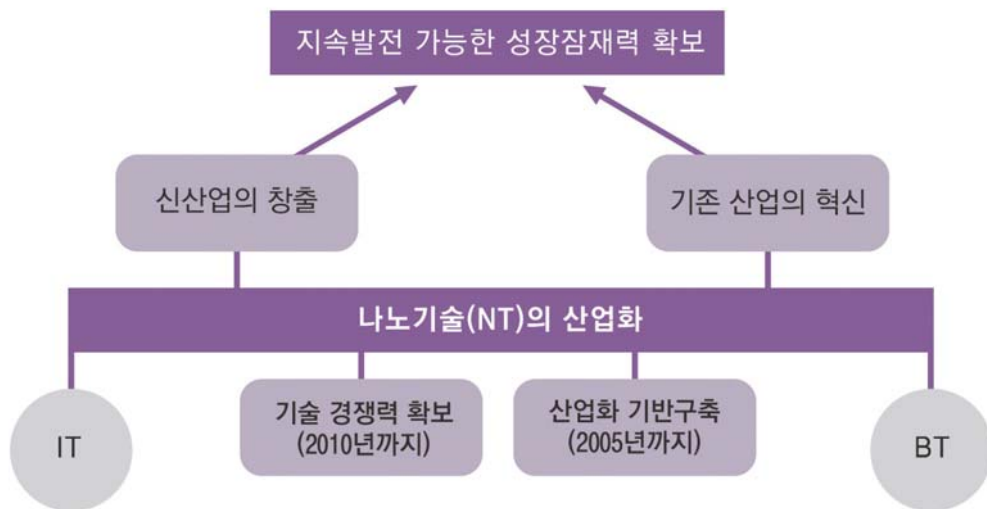
≡ 주요 나노융합산업 육성 정책

■ 나노기술산업화전략

- 2001년 7월 산업자원부에서 “나노기술산업화전략”을 발표함
- 당시에는 나노기술이라는 용어조차도 생소한 시절이었지만, 선진국의 나노기술 수준을 따라잡기 위해서는 산업화의 비전을 가지고 투자하는 것이 바람직하다는 정책적인 판단에서 나노기술산업화전략을 수립
- 본 전략에서는 나노기술을 통해 반도체, 디스플레이 등 세계 1위 산업의 기술혁신(Breakthrough)과 생명공학, 신재료 등의 분야에서 세계적 수준의 신산업을 창출하는 것을 목적(Goal)으로 설정하였으며, 이를 위해 2005년까지 나노기술 발전을 위한 기반(시설 및 인력) 구축을 통해 산업화의 토대를 완비하고, 2005년 이후 나노기술의 산업화를 본격 추진하여 주요 산업의 경쟁우위를 지속적으로 확보하며, 2010년까지 나노

기술의 주요 핵심분야에 관해, 미국, 일본, EU 등 선진국과 대등한 기술경쟁력을 확보함으로써 나노기술 G5에 진입하는 것을 목표(Target)로 삼음

그림\_10 나노기술산업화전략의 비전



- 주요추진 내용은 연구개발, 기반구축, 나노기술 전문 네트워크구축, 인력양성, 산업육성 등으로 구분하여 제시
- 연구개발 분야에 있어서는 국내산업구조와 비교우위를 고려하여 핵심분야, 전략분야, 기초분야로 나누어 전략적인 투자를 하는 것으로 계획함
  - 핵심분야는 전자/통신 분야와 같이 현재 비교우위를 가진 산업의 경쟁우위를 지속적으로 확보하여 당해 산업의 절대우위를 점유하는 것을 목표로, 대규모 집중투자를 하겠다는 전략을 제시
  - 전략분야는 바이오나 에너지/환경 분야와 같이 현재 주력산업이 아니지만, 미래 핵심전략산업으로 부상할 가능성이 큰 분야에 대한 전략적 투자분야로서 소규모 분산 투자의 전략을 제시

- 산업화 가능성은 불투명하지만, 다른 분야의 기반이 되는 필수 기술의 확보를 위해 나노소재나 공정장비 등과 같은 기초분야에 대해서는 핵심 및 전략분야와 연계한 지속적 투자 전략을 제시
- 기반구축을 위해서는 연구소나 기업이 고가의 장비를 공통적으로 이용할 수 있는 센터가 필요하다는 측면에서 나노 팹(Fabrication Center)을 설치하는 것을 주요 추진내용으로 제시
  - 나노 팹은 기술분야별 전문 팹과 일반 팹 두 가지 형태로 구축하는 전략을 제시
  - 전문 팹은 2005년까지 단계별로 설치하는 것으로 계획했고, 일반 팹의 경우 나노 기술의 Critical Mass가 형성되는 시점인 2005년 이후에 설치를 검토하기로 함
- 나노기술 전문 네트워크 구축에 있어서는 기존에 나노기술을 연구하고 있는 각 기관이 보유하고 있는 장비 및 시설을 D/B화하여 모든 연구주체에게 개방할 수 있도록 거점별 네트워크와 공통 네트워크를 구축하는 것을 주요 내용으로 제시
- 인력양성 관련해서는 전문 팹에서 교육프로그램을 운영하고, 팹의 장비 운용에 대한 교육 및 자격증 제도를 도입해 전문운용인력을 양성하고 장비운용의 효율성을 제고하고자 함
- 산업육성 측면에서는 나노기술에 대한 민간자본 유입과 산업화 주기의 단축을 위해, 전문 벤처펀드를 조성하여 초기 산업화단계 기업에 투자하는 것을 주요 추진 계획으로 제시했는데, 펀드조성은 나노기술의 발전정도 등을 감안하여 1~2년 후 설치를 검토하는 것으로 하였음
- 본 전략의 효과적 추진을 위해 산업발전심의회 산하 분과위원회에 기업, 연구소, 대학, 정부(차관보) 등 20명 내외로 구성되는 “나노기술 산업화 위원회”를 설치하여 나노기술 산업화 계획의 심의조정 및 평가를 실시하고자 하였음

■ 나노융합산업 발전전략

- 2009년 3월 국가과학기술위원회 운영위원회에서는 교육과학기술부와 지식경제부에서 제출한 “신성장동력 확충 및 녹색성장 견인을 위한 나노융합산업발전전략”을 심의·의결함
- 본 전략을 추진하게 된 배경은 2001년 나노기술종합발전계획 수립 이후 2008년까지 총 1.9조원(지식경제부 4천9백억원, 교육과학기술부 7천7백억원)을 나노기술 육성에 투입했으나 주로 기초 R&D 지원과 인프라 구축에 초점이 맞춰져 있어, 주요 선진국들의 나노산업기술개발과 상용화 노력에 비해 우리나라는 체계적 산업화 전략 수립 및 추진 동력 확보 노력이 미흡하다는 판단에서 시작되었음
- 한편 기술 융복합화에 의한 신산업 창출, 지구적 환경변화에 대응할 녹색기술의 필요성에 따라 나노융합기술의 중요성이 부각되고 있었으며, 이에 따라 폭발적인 성장이 예상되는 세계 나노융합시장의 선점을 위한 선제적 산업육성 전략 수립이 필요하였음
- 본 전략에서는 2015년까지 나노융합산업 3대 강국 도약을 비전으로 삼아, 세계 나노융합산업 시장 15% 점유(2천3백억불 수준), 나노기술 전문기업 500개 및 글로벌 중핵기업 10개 육성, 30개 이상의 세계 최고 나노원천융합기술 및 혁신제품을 창출하는 것을 목표로 설정함
- 주요추진 내용은 수요지향형 나노융합산업기술 R&D 추진, 나노인프라 활용기반 구축 및 나노인력 양성, 산학연 협력강화의 추진주체 정립, 민간투자 활성화를 통한 시장기반 조성, 나노기술 산업화 촉진 시스템 구축 등으로 구성되어 있음
- 수요지향형 나노융합산업기술 R&D 추진에 있어서는 ① 산업실태조사와 업계 참여를 통해 기술력과 시장성에 기반한 현실성 있는 「나노융합산업 기술시장 청사진」 수립, ② 산·학·연이 공동 참여하는 나노분야 플랫폼 기술개발사업 실시, ③ 실용적 R&D 사업으로 「나노융합 2.0」 프로젝트 추진, ④ 목적지향적 기초·원천연구에 대한 지원 확대·강화 등을 주요 추진과제로 설정함

그림\_11 나노융합산업발전전략의 비전 및 목표



- 나노인프라 활용기반 구축 및 나노인력 양성에 있어서는 ① 기존 인프라 및 연구장비들을 망라한 지역별·기능별 Infra-Map 작성을 통해 효율적 인프라 활용방안 마련, ② 나노관련 정보 및 정책 지원을 위한 종합 정보 인프라 구축, ③ 나노융합기술 전문인력양성 센터 지정 등을 주요 추진과제로 설정하였음

- 산학연 협력강화의 추진주체 정립에 있어서는 ① 대덕특구 内の 출연研 부설로 「나노 융합산업기술센터」 설립, ② 아이템 발굴, 연구성과 확산, 마케팅 지원을 위한 중간조직 활성화 등을 주요 추진과제로 설정하였음
- 민간투자 활성화를 통한 시장기반 조성에 있어서는 ① 신성장동력 펀드 활용 방안 검토, ② 나노융합산업의 집적화를 위한 그린나노파크(나노산업단지) 조성 추진 등을 주요 추진과제로 설정하였음
- 나노기술 산업화 촉진 시스템 구축에 있어서는 ① 나노융합제품 관련 민간 인증제 및 안전성 검증시스템 도입, ② 세계시장 주도권 확보를 위한 나노기술 표준화 및 국제 협력 추진 등을 주요 추진과제로 설정하였음

■ 나노융합 확산전략 : 나노 PLUS 2020(2012.11)

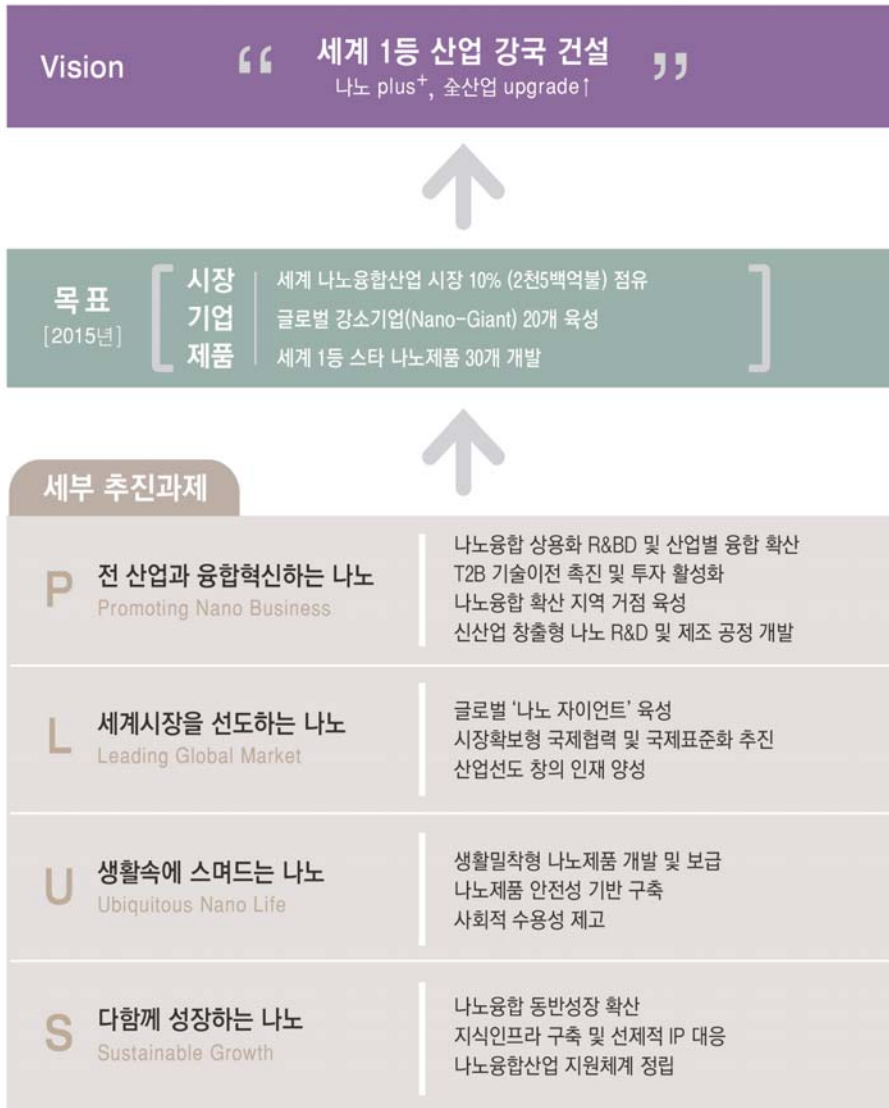
- 2012년 3월 지식경제부에서는 “나노융합 확산전략(나노 **PLUS** 2020)”을 발표하였음
- 지식경제부는 지난 10년간 2조원 이상의 정부 투자를 통해 나노분야의 기술수준이 세계 4위권으로 올라섰으나, 이를 상용화하여 산업적·경제적으로 큰 부가가치를 창출하는 단계에는 도달하지 못했다고 진단하고, '20년 2.5조달러에 이를 것으로 전망되는 글로벌 나노융합시장을 선점하기 위해서는 나노융합기술의 사업화와 타산업 분야로의 확산이 매우 중요한 시점이라는 인식하에 “나노융합 확산전략”을 수립하게 되었음
- 본 전략은 세계 1등 산업강국 도약을 비전으로 하여 유망 나노기술의 상용화 및 나노 융합 확산 등의 내용이 주요 골자로 하고 있으며, 2020년까지 세계 나노융합산업 시장 10% (2천5백억불) 점유, 글로벌 강소기업(Nano-Giant) 20개 육성, 세계 1등 스타 나노 제품 30개 개발을 목표로 설정하였음
- 전 산업과 융합·혁신을 촉진(Promoting Nano Business)하기 위해, ① 나노융합 2020 사업 등과 같은 나노융합 상용화 R&BD 확대 및 산업별 ‘나노융합 혁신 컨소시엄’ 운영을 통해 기존 주력산업으로의 융합확산을 추진하고, ② 나노융합기술사업화

및 기술이전 촉진을 위해 기존 T2B 사업을 “나노융합 사업화 종합지원 프로그램”으로 확대개편을 추진하며, ③ 나노융합분야 민간투자 활성화를 위해 신성장동력펀드를 조성하고, ④ 전국 6개 지역에 구축된 나노인프라 기관을 나노융합 확산을 위한 지역별 거점을 육성하며, ⑤ 신산업 창출을 위해 핵심 나노 R&D 및 나노기반 제조·공정 개발에 대한 지원을 확대하고자 했음

- 세계시장을 선도(Leading Global Market)하기 위해, ① 성장 잠재력을 갖춘 나노분야 우수 중소·중견기업을 나노전문기업으로 지정하고 '20년까지 20개 이상의 “나노 자이언트”<sup>6</sup>를 육성하며, ② 글로벌 사업화를 위한 국제공동 R&D 및 국제표준화를 지원하고, ③ 글로벌 나노융합산업을 선도할 창의적 인재를 양성하고자 했음
- 생활 속에서 쉽고 안전하게 나노제품을 활용(Ubiquitous Nano Life)하기 위해, ① 국민 생활 편의성 증진을 위한 생활공감형 나노제품의 개발을 지원하고 우수제품의 보급 확산을 추진하고, ② 나노제품의 사회적 수용성을 제고하고 세계시장 진출 지원을 위해 나노제품 안전성 평가인증 체계를 마련하고 안전성센터를 구축하며, ③ “N-마크” 제를 도입하여 나노제품에 대한 사회적 수용성을 제고하고자 했음
- 다함께 성장하는 나노 생태계 조성(Sustainable Growth)을 위해, ① 나노분야 대·중소 기업간 비즈니스 협력 모델을 구축·확산하고, ② 나노융합 지식정보망과 통계시스템을 구축하며, ③ 나노융합산업 촉진을 위한 범부처 협의체를 구축하고, 산업화 프로모션 타워 역할을 담당할 ‘나노융합산업지원센터’를 운영하고자 했음

6\_ 세계시장 점유율 3위 이내, 나노분야 매출액 1억달러 이상, 수출 3천만달러 이상

그림\_ 12 나노융합확산전략의 비전 및 목표





■ 나노기술 산업화 전략

- 2015년 4월 미래창조과학부·산업통상자원부·환경부는 공동으로 「나노기술 산업화 전략」을 마련하여 국과과학기술심의회 운영위원회 의결을 거쳐 확정하였음
- 본 전략은 나노기술의 범용기술(General Purpose Technology, GPT<sup>7</sup>)적인 특징에 주목하여 나노기술을 국가 산업전반의 혁신 및 신시장 창출의 동력으로 도약시키기 위해 수립되었음
- 본 전략은 “기술 산업화 선도로 나노산업 2대 강국 실현”을 비전으로 하여 나노기술 산업화로 신시장 창출, 나노기술 활용 기업성장모델 확산, 개발에서 사업화까지 최적 지원체계 구축 등을 통해 세계 나노시장의 20%를 점유하는 것을 목표로 삼고 있음
- 이를 위해 본 전략에서는 7대 산업화 기술 확보, 나노기술기업 육성, 4대 인프라 확충 등의 추진과제를 설정함
- 7대 산업화 기술 확보에 있어서는 향후 나노산업의 주요 기반기술이 될 것으로 예상되며, 산업화 수준 도달 하거나 근접한 기술 분야인 3차원 나노전자소자, 사물인터넷 적용 환경 나노센서, 식품안전 나노센서, 기능성 나노섬유, 탈귀금속 촉매용 나노소재, 탈희유원소 산업용 나노소재, 저에너지 수처리 시스템 등을 선정하여 중점개발을 추진하고자 함
- 나노기술기업육성에 있어서는 나노융합 2020 사업과 같은 우수기술의 사업화를 촉진하는 기업 지원 프로그램을 활성화하고, 시제품제작 및 성능평가지원 사업과 같은 프로그램을 통해 나노중소기업의 기술 사업화를 지원하며, 나노 중소기업의 핵심 전략제품을 선정하고 글로벌 경쟁력 확보를 지원하여 강소기업으로의 성장을 견인하고자 함

7. General Purpose Technology : 산업기술 전반에 영향을 미치며 기간이 경과함에 따라 지속 향상되며 혁신을 이끌어내는 기술(증기기관, 전기, 반도체 등)

- 4대 인프라 확충에 있어서는 7대 전략분야 사업화의 체계적 지원이 가능하도록 나노 펌의 기업지원을 강화하고, 나노기술 개발과정을 효율화함으로써 제품의 개발기간 및 비용을 획기적으로 축소할 수 있는 계산나노과학 플랫폼을 구축하며, 나노제품에 대한 글로벌 나노안전 규제 대응 방안 마련을 위해 나노안전성을 확립하고, 나노제품의 상용화 촉진 및 나노기업의 글로벌 시장 진출을 촉진하기 위해 나노제품에 대한 성능 평가를 지원하고자 함

그림\_ 13 나노기술산업화전략의 비전 및 목표



## 2. 해외 나노 기술 및 산업 육성 정책 동향

### ≡ 미국

#### ■ NNI 개요

- 미국정부는 1997~1999 기간 중 ‘나노기술관련 범부처 워킹그룹(Interagency Working Group on Nanotechnology, IWGN)’을 창립하여 연방정부 차원의 나노기술 개발체계를 수립
- 2000년 1월 미국 클린턴 행정부는 「국가나노기술전략(National Nanotechnology Initiative, NNI)」을 공식적으로 발표
- 2003년 12월 부시 행정부는 「나노기술개발촉진법(Nanotechnology Research and Development Act)」을 제정하여 NNI 추진의 법적 근거를 마련
- NNI는 클린턴, 부시, 오바마 3대 행정부에서 미국의 최우선 순위 과학기술 투자분야로 육성되어 왔으며, NNI 전략계획(안)이 지금까지 4차례(2004년, 2007년, 2011년, 2014년) 발표됨
- 미국 정부(주·연방)는 2013년 17.2억 달러, 2014년 16.7억 달러를 나노기술 분야에 투자하며 나노기술 분야 정부투자에서 세계 선두를 달리고 있음
- NNI의 4대 목표는 ① 세계적 수준의 나노기술 R&D 프로그램 활성화, ② 경제적 이익과 공익을 위해 신기술 이전을 통한 제품화 촉진, ③ 나노기술 선진화를 주도할 교육 자원, 숙련된 인력 및 기반시설과 장비 개발 지원, ④ 책임감 있는 나노기술 개발 지원 등임

■ 나노기술개발 정책 추진방향

- 2011년 8개의 분야로 구성되었던 프로그램 구성요소(Program Component Areas, PCA)를 2014년에 발표된 4차 NNI평가서를 통해 나노기술상용화전략(Nanotechnology Signature Initiative, NSI)을 포함한 5개 영역의 PCA로 새롭게 구성
- NNI 4차 평가서(2012년 4월)가 NSI 프로그램을 지속적으로 발굴하여 추진할 것을 요구했다면, 최근 발간된 NNI 5차 평가서(2014년 10월)에서 미 대통령과학기술자문회의(PCAST)는 나노기술 분야가 NNI 2.0이라는 새로운 시대에 돌입하고 있다고 강조하며 본격적인 나노기술의 상업화 전략에 적합한 그랜드챌린지를 제안
- 미국 정부의 나노기술 활동에 대한 평가가 아닌 자문을 해줄 나노기술 전 분야에 걸친 전문가들로 구성된 상시/상설 위원회의 필요성을 강조하고 나노기술 그랜드챌린지를 위해 기관 간 펀딩 우선순위를 정할 수 있도록 하는 범 기관 간 프로세스의 필요성을 재차 강조
- 그랜드챌린지를 파악하고, 선정하는 과정에 연구개발과 산업 분야 주체들을 참여시켜 연방 나노기술 활동의 파급효과를 보다 극대화할 것을 권고
- 2015년 6월 OSTP는 NNI에 참여하고 있는 연방 기구들과의 협의를 거쳐 정보요청서(RFI)를 작성하였으며, 본 RFI를 통해 나노기술 기반 그랜드챌린지에 대한 일반 국민들의 제안사항을 수렴하고, 2015년 10월 20일 1차 나노기술 그랜드챌린지를 발표
- 1차 나노기술 그랜드챌린지는 인간 두뇌와 같은 센싱 및 문제해결 능력, 오류 허용력(Fault-tolerance)과 에너지 효율을 갖춘 컴퓨터를 구현하는 것으로, 본 챌린지의 궁극적인 목적은 시각정보, 음성정보를 효율적으로 해석하여 데이터 패턴이나 비정상적 데이터를 찾아내고, 데이터로부터 얻은 정보로부터 익숙하지 않은 문제들을 해결할 수 있는 컴퓨터를 구현하는 새로운 하드웨어 및 소프트웨어 아키텍처를 구축하는 것임

## ≡ 일본

### ■ 정책 개요

- 일본의 나노기술정책은 따로 나노기술에 특화된 정책보다는 ‘과학기술종합발전계획’ 내에서 추진되고 있음
- 제3기 과학기술기본계획(2006~2010)에서는 나노기술·재료가 라이프, 정보통신, 환경 등과 더불어 4대 중점과학기술영역으로 분류되었으나, 제4기 과학기술기본계획(2011~2015)에서는 에너지의 안정적 공급과 저탄소사회 실현의 양립을 도모하는 그린 이노베이션의 추진, 고령화 사회를 위한 의료·보건·건강을 대상으로 하는 라이프 이노베이션의 추진, 그리고 재해로부터의 복구·재생의 실현 등 사회적 기대에 대응하는 3대 과제해결형 전략을 추구하면서 나노기술·재료 및 정보통신기술은 이들 3개의 축을 횡적으로 잇는 공통기반기술로 분류됨
- 일본이 강점을 지닌 나노기술·재료분야는 기간산업(자동차, 전자 등)뿐만 아니라 전 산업의 기술혁신을 지원하는 성장 동력 및 국제경쟁력의 원천인 바, ‘제5기 과학기술 종합발전계획’(2016-2020)에서 나노분야가 어떻게 추진될지 귀추가 주목되고 있음

### ■ 나노기술개발 정책 추진방향

- 일본 나노분야의 정책은 과제해결형 정책전환으로 인해 구체적인 전략은 없지만, 관련 시책은 다양하게 추진되고 있음
- 연구개발에 있어서는 문부과학성에서 물질재료연구기구(NIMS)를 통해 나노기술 개발을 지원하고 있으며, 경제산업성은 신에너지산업기술종합개발기구(NEDO)와 산업기술종합연구소(AIST)의 나노기술 연구개발을 통해 지원하고 있음
- 인프라 측면에서는 ‘나노기술 플랫폼’(2012년~) 프로그램을 통해 지금까지 각종 시책을 통해 구축한 나노기술 플랫폼의 전국적인 공용기반 네트워크를 활용하여 대학·연구기관의 나노기술에 관한 공용설비에 대해 이용자들의 니즈를 충분히 반영하면서, 필

요한 정비·고도화를 추진하고 있음

- 또한 산업계를 비롯한 폭넓은 이용자에게 최첨단 계측, 평가, 가공설비의 이용기회를 고도의 기술지원과 함께 제공하여 일본의 부품소재개발의 기초력 향상과 이노베이션 창출을 위한 연구기반 형성을 추진 중임

### ≡ 독일

#### ■ 정책 개요

- 독일은 유럽연합의 핵심적인 국가로 전체 연구개발 프로그램을 주도하고 있으며, 특히 나노기술을 독일 경제발전을 위한 혁신적 수단으로 여기고 있음
- 나노기술 관련하여 ‘소재에서 혁신으로’, ‘Hightech 2020전략’ 등을 통해 전략적 연구 개발 및 상용화를 지원하고 있으며, 나노기술에 연간 4억 유로 이상 투자하고 있음
- 연구개발은 물론 나노기술의 안전성(위험성), 나노기술 분야 공공지원 및 벤처 자본 참여를 추진하고 있음
- 나노기술 관련 기관도 꾸준히 증가(2008년 대비 50% 이상)하고 있으며, 나노기술 관련 경쟁력 중 논문 분야에서도 꾸준한 성장세로 전세계 6위(2014년 기준 4,536편)를 차지하고 있음

#### ■ 나노기술개발 정책 추진방향

- 나노기술의 연구 및 개발은 독일연방교육연구부(German Federal Ministry of Education and Research, BMBF)를 통해 주도적으로 20년 이상 지속적인 지원이 이루어지고 있음
- 지원 초기에는 나노기술 기초 연구 분야에 비중을 두었다면 이후 계속되는 지원을 통해 기술 응용 분야로 확대되었으며, 협력 프로젝트를 통해 산업, 특히 중소기업과

학계 간의 밀접한 네트워크가 형성되어 연구개발의 결과를 실제로 구현하는 데 가장 효율적인 기반이 마련됨

- 2006년 독일 정부는 미래의 글로벌 시장을 선도하기 위해 최첨단 기술 전략(Hightech Strategy)을 수립하였고, 2010년에는 최첨단 기술전략을 기반으로 한 ‘Hightech 2020’ 전략을 발표함
- 동 전략은 과학, 산업 간의 협력을 강화하고 혁신을 통한 미래의 프레임워크를 개선하여 선도 시장을 창조하는 것을 목표로 함
- ‘Hightech 2020’은 크게 기후/에너지, 건강/영양, 운송, 안전, 통신 등 5개의 영역으로 규정되어지며, 각 영역마다 그에 속한 글로벌 도전과제가 제시되고 있음

### ≡ 중국

#### ■ 정책 개요

- 중국은 2000년 미국의 NNI 발표이후 나노기술을 정부차원에서 적극적으로 지원하기 시작하여, ‘국가나노과학기술지도협조위원회’를 설립하고 2000년 11월에 국가과학기술부 등 관련 5개 부처가 공동으로 「국가나노과학기술기본강요(2001~2010)」를 제정·발표함으로써 나노기술에 대한 투자를 대폭 확대함
  - 「제10차 국가 5개년 계획(2001~2005)」기간 동안 나노소재분야를 중점 연구분야로 선정하고, 나노기술 제품화 촉진을 위해 ‘나노기술인증위원회’(2004.2)를 설치하여 표준화 작업을 공식 가동함
  - 「제11차 국가 5개년 계획(2006~2010)」기간 동안 나노기술 선도국 진입을 위한 기술경쟁력 확보를 위한 「나노혁신 2050로드맵」을 수립하여 나노기술의 도약적 발전을 추진

- 「제12차 국가 5개년 계획(2011~2015)」 기간 중에는 경제성장에 기여할 수 있는 나노기술개발을 위한 전략적 핵심연구 과제를 선정하여 산업화를 촉진

- 제조업 활성화를 위한 「중국제조 2025(2016~2025)」를 수립하여 제조강국으로의 전환을 촉진하고, 현재 중국은 「제13차 국가 5개년 계획(2016~2020)」을 수립하여 신성장산업 육성에 중점을 둔 정책을 추진할 계획임
- 중국은 지난 15년간 정부의 적극적인 지원하에 나노분야의 연구개발 및 산업화에서 이미 선진국과 비슷한 수준에 도달했으며, 특히 논문과 특허 수 및 피인용 지수는 '세계1위' 수준에 있음
- 2015년도 중국은 그래핀 등 나노소재 연구에 집중 투자하였고, 베이징 등 나노산업 단지의 체계적 구축을 통해 나노기술 산업화 발전을 꾸준히 추진 중

#### ■ 나노기술개발 정책 추진방향

- 중국정부는 12차 5개년 계획 기간에 '나노 기초과학 연구', '선진 기능 나노재료 연구', '나노 검출 및 가공 방법과 장비 및 표준 연구', '나노 정보 재료 및 장치', '나노바이오 및 나노의학', '환경 나노재료 및 기술 연구', '에너지 나노재료 및 기술 연구', '나노 기술안전성' 등 연구를 통해 나노기술 발전 및 산업화 추진을 중점 실행함
- 「중국제조 2025」은 제조업 혁신을 통해 '제조업 대국'이 아닌 '제조업 강국'으로의 전환을 목표로 하고 있으며, 신소재 및 차세대 정보기술과 같이 나노기술과 관계가 깊은 산업을 10대 핵심산업으로 육성 예정
- 13차 계획 기간 동안 그래핀 산업을 선행 산업으로 육성하기로 결정하고 2020년까지 그래핀 산업 시스템을 완벽히 구축하는 동시에 핵심 경쟁력을 보유한 그래핀 기업 육성과 그래핀을 특색으로 하는 신형 공업화 산업 시범기지를 구축할 계획임



## ▶ Ⅲ. 나노기술 및 연구동향



### 1. 나노소재 분야

#### ≡ 나노소재기술의 정의

나노미터 스케일에서 기존 재료를 제어·조합하거나 새로운 물질 구조를 합성·조합하여 물성을 현저히 향상시키고 새로운 물성과 기능을 창조하는 소재기술

#### ≡ 나노소재기술 분야 유망기술 동향

##### ■ 양자점 소재

- 양자점(Quantum Dot)이란 화학 공정을 통해 만드는 나노미터 크기의 반도체 결정체를 말하며, 고에너지의 광양자를 받아 그 크기에 따라서 다양한 파장대의 광양자를 낼 수 있는 특성을 갖고 있는 소재로써 색순도, 색재현성 및 광 안정성이 높고, 에너지 효율이 높아 차세대 발광소자로 각광받고 있음
- 양자점 기술은 태양전지, 디스플레이 장치, 바이오 분야 소재와 같이 다방면에 걸쳐 적용이 가능하며, 최근 양자점 기술은 타 기술과의 융합을 추구하며 동반 성장하는 경향을 보임.
- 양자점 기술의 장점은 ① 자체발광형 광원 구현 가능, ② 재료에 상관없이 입자 크기의 조절을 통해 원하는 파장대의 빛을 구현, ③ 무기물 기반의 기술로서 유기물 기반 광원 대비 구동수명이 길고 가격이 저렴, ④ 외부 환경(산소, 수분)에 강고 높은 색 재현성 등임

- 양자점에 관한 연구는 1970년대 석유 파동 이후 에너지 위기를 극복하기 위해 태양 전지를 연구하는 과정에서 처음 시작되었으며, 1980년대초 벨연구소의 Louis Brus 박사와 러시아의 Alexei Ekimov 박사가 크기에 따라 다른 색을 방출하는 반도체 결정을 발견하면서 양자점 기술에 대한 비약적인 발전이 이루어짐
- 이후 MIT의 Deshpande Center for Technological Innovation에서 자금을 지원한 연구팀은 유기필름 사이에 수 나노미터 두께의 양자점 층을 샌드위치시킨 발광 소자에 대한 연구 결과를 2002년 Nature지에 게재하였음. 이 연구결과를 통해 양자점을 광원으로 사용한 디스플레이의 구현 가능성이 입증됨
- 국내의 전문기업은 큐디솔루션과 나노스퀘어는 Cd계 양자점을 합성, 판매하고 있으나, 가격이 g당 수백만원 대로 비싸고, RoHS의 제한 물질인 Cd를 사용하고 있어 향후 사업화에 문제점이 있음
- 포항공대 김성지 교수팀은 비카드뮴계의 ZnTe / ZnSe 양자점으로 가시광선 영역구현을 시도하였고(2008년), 아주대 김상욱 교수팀은 유사한 InP/ZnS 구조의 양자점을 개발하여 보고함(2012년)
- 플라즈마를 이용한 건식 양자점 합성 기술 개발은, LED 패키지에 응용할 목적으로 성균관대학교(채희엽 교수팀)에서 RF PECVD법을 이용하여 실리콘 나노입자 연구를 수행함(2013년)
- LCD 디스플레이용 양자점 필름 관련하여, 필름소재업체인 아이컴포넌트는 삼성전자의 초고화질 TV에 친환경 양자점을 도입하여 상용화에 성공(2016년)
- 최근 국내 한 연구소는 LED 조명의 자연광 추출이 가능한 양자점 필름 개발을 진행하고 있으며, 건식 플라즈마법 및 습식방법으로 양자점 제조, 필름화 연구를 수행하고 있으며, 특히 나노물질의 취급난이성, 분산난이성 해결이 가능한, 기존 수 나노미터 크기의 양자점이 아닌 마이크로 크기 담체에 양자점이 분산 담지된 신개념의 양자점 소재에 대한 물질특허를 확보하고 관련 연구를 수행하고 있음

■ 나노탄소소재

- 나노탄소소재의 대표적인 탄소나노튜브 및 그래핀 소재는 전기적, 열적, 기계적, 화학적 특성 등 나노크기가 발현하는 고유의 성질뿐만 아니라, 고분자 혹은 금속 등의 기존 벌크 소재에 첨가하여 탁월한 전기적, 열적, 기계적 특성을 보유한 신소재를 재창출함으로써 산업적 파급력과 응용성이 매우 큼
- 탄소나노튜브는 한국을 포함하여 미국, 유럽, 일본, 중국 등에서 최근 주로 기업을 중심으로 활발한 상용화 연구개발이 진행되고 있으며 2차전지 전극소재, 전기전도성 복합소재 및 대전방지 전도성 필름 중심으로 다층 탄소나노튜브 응용제품 시장이 최근 크게 확대하고 있음
  - 과거 상용화 장벽이었던 탄소나노튜브의 저가 대량합성 기술을 이미 국내 기업이 확보하였기 때문에 전기전도성, 방열, 발열, 전자파 차폐 등의 기능성 필름 등의 차별화된 응용제품 적용기술을 확보할 경우 국내 기업들이 세계시장을 선점할 수 있을 것으로 기대됨
  - 탄소나노튜브 원소재는 국내 대기업을 중심으로 수십 톤 이상의 생산능력을 확보하고 있으며, 주로 복합소재와 전극 첨가제 활용을 위한 목적으로 활용되고 있음
  - 현재 국내기업의 탄소나노튜브 공급 가격은 \$50/kg 수준으로 복합소재의 사업화에 탄소나노튜브 소재 자체의 가격은 제품원가에 크게 문제가 없으나, 분산기술과 배향기술이 부족하여 물성이 크게 향상되지 않고 있음
  - 탄소나노튜브를 이용한 차세대 투명전극, 광원, 나노소자 등의 분야는 현재 물성의 달성수준이 상용화 수준에 미치지 못하여 중급이하의 터치패널 용도의 투명전극으로 상용화가 일부 진행되었을 뿐 현재까지 괄목할만한 시장 성장이 이루지 않고 있음
  - 탄소나노튜브를 기반으로 다른 금속나노소재등과 접목하여 나노카본소재의 문제점을 극복할 수 있는 기술이 확보되어져만 상용화를 촉진시킬 수 있음

- 그래핀의 경우 전반적으로 우리나라가 세계최고 수준의 기술력을 보유한 것으로 평가되나, 최근 미국과 유럽, 중국 등에서 많은 연구개발 투자를 하고 있는 상황이며 그래핀 시장선점을 위해 관련 핵심기술 확보에 집중하고 있는 상황임
  - 그래핀 CVD 분야에서는 삼성전자, 한화테크윈, 성균관대학교(그래핀 스퀘어), 한국과학기술원과 같은 한국의 연구주체들이 상당 수준의 연구 역량 및 특허 역량을 보유하고 있는 것으로 나타나고 있는 바, 본 기술분야의 상용화 단계에 가장 근접한 연구개발 능력을 보유한 것으로 판단됨
  - 비산화 그래핀은 수십 톤 규모를 생산하는 미국기업과 비교하여 현재의 국내수준은 실험실 수준이며, 특히 그래핀 제조 후에 발생하는 재응집 방지 기술은 상당히 미흡함. 현재 국가에서 추진하고 있는 사업을 통해 포스코, 제이오 등에서 비산화 그래핀을 생산하는 기술을 개발하고 있음
  - 산화그래핀의 경우 국내기업에서 파일럿 규모의 생산설비를 가지고 합성 및 판매를 진행하고 있으며, 품질향상을 위한 연구개발을 진행하고 있음
  - 그래핀 응용분야의 경우 전자소자, 투명전극, 전도성 복합재, 센서, 에너지 전극소재, 방열, 베리어, 환경 분야에 연구개발이 진행되고 있으며, 주로 앞의 5개 분야에 투자가 집중되고 있음. 장기적인 관점에서 전자소자 원천기술이, 단기적으로는 투명전극, 센서, 방열복합소재, 전극소재로의 상용화 기술개발이 진행되고 있음.

■ 인쇄전자용 소재

- 인쇄전자 기술은 고가의 진공 공정 및 사진식각 공정을 사용하던 기존의 제조 방식을 저가의 인쇄 방식으로 대체함으로써, 전기/전자 소자 및 기기의 생산 원가를 혁신적으로 절감할 수 있는 기술임
- 기존의 사진식각(photolithography) 방식이 최적의 패터닝을 위해서 평평하고(flat) 단단한(rigid) 기판을 필요로 하는데 비해서, 인쇄 방식은 유리, 필름, 종이 등의 다양한 물리적 형상을 가지는 기판에 대응이 가능함
- 특히, 최근 미래 유망 산업으로 각광받고 있는 flexible display를 포함하는 flexible electronics 분야의 경우, 유연한 기판 상에 패턴을 구현할 수 있는 기술이 필수적이며, 인쇄전자 기술은 이 분야에서 가장 경쟁력이 높은 기술로 평가 받고 있음
- 또한 최근에는 기존의 평탄한 평면상에서의 전자소자 제작에서 벗어나 새로운 개념의 공정기술을 기반으로 탈평면 또는 3D 구조의 다양한 기능성 소자를 구현하는 기술 개발이 필요하며, 이러한 전자소자 및 회로를 구현할 수 있는 나노소재의 개발이 요구되고 있음
- 국내의 경우 2차원 평면상에서의 인쇄공정 기술은 최근 10여 년 동안 다양한 소재 및 소자에 대한 기술개발이 이루어지고 있으며, 최근 산업으로의 실용화 움직임이 기대되고 있으나, 탈평면 3D 기판상에 인쇄전자 기술을 이용하여 전자회로를 제작하는 기술은 초보적인 단계로서 소재 및 공정기술에 대한 기초적인 연구단계에 머물러 있는 실정임
- 탈평면 3D 인쇄전자 기술과 관련하여 주로 대학과 연구소에서 새로운 3차원 인쇄 기술, 다양한 전도성 소재 및 반도체성 소재에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 다양한 기능성 소재를 기반으로 미세 패터닝이 가능한 인쇄공정 기술을 기반으로 기능이 부여된 다양한 형태의 구조물의 제작이 시도되고 있음

■ 생체모방소재

- 생체모방소재는 자연이나 생체에 존재하는 나노스케일 단위의 물질이나 구조 또는 조직들이 가진 혁신적인 기능을 밝히고 모방하여 응용함으로써 인간의 삶을 윤택하게 하는 자연 친화적인 기술임
- 생체시스템의 기능을 모사하여 발전된 초발수 표면 소재, 습식부착 소재, 자기치유 소재, 최소저항 표면 소재, 식수 수집용 복합소재, 인공 광합성 소재, 광각 시각센서 소재, 카멜레온 변색 소재, 시냅스터 소재, 고감도 분자감지소재 등은 지금까지 상상으로만 가능했던 여러 기술들을 실현시킬 수 있는 기술로서, 독일을 중심으로 유럽에서 연구가 가장 활발하며, 미국과 중국 등에서도 초고강도 및 초고효율 소재를 위한 최적 설계 및 제조 연구를 하고 있음
- 국내에서는 원리가 규명된 자연현상을 활용하여 응용하는 연구에 치중하고 있으며 원천 기술 확보 측면에서는 상대적으로 낮은 수준을 보이고 있음
- 복합적인 생체시스템 기술 구현을 위해서는 기계, 전기/전자, 재료, 화학, 생명 공학 등 거의 모든 공학 분야 간의 협력과 새로운 형태의 융합 연구를 필요로 하며, 다양한 학제간의 교류와 융합을 통해 원천 기술 확보와 높은 연구 성과가 요구됨

■ 환경촉매소재

- 환경촉매소재는 기공배열의 규칙성이 잘 발달되어 있고 비표면적이 크며, 사용 목적에 맞추어 물질의 특성(기공크기, 비표면적, 표면 특성)을 조절 할 수 있는 물질로, 최근 들어 나노기술이 접목되어 기존 촉매 소재의 성능 개선 및 혁신이 이루어지고 있음
- 코어-셸 구조의 나노촉매의 제조기술 및 초고비표면적 나노흡착제 제조기술의 경우 고도 정수처리 시 유해 중금속 및 난분해성유기물질(NOM)의 높은 분해 효율과 처리 후 회수 및 재생의 유용성을 지니고 있어 수처리장 운전효율을 향상 및 수처리 후 흡착제의 재생성능을 높여 경제성을 높일 수 있음
- 최근 영가철 나노입자에 철을 코팅하여 흡착 환원을 이용한 부산물 생성이 없는 고성능 환경정화 흡착제, 철 나노입자에 산화티탄 혹은 산화아연 셸을 형성하여 반도체 에칭공정 폐액의 처리에 적용 후 회수 효율을 높인 기능성 흡착제 제조에 관한 관심이 증가했으나 대량 생산의 제한성으로 이를 극복할 수 있는 연구가 필요
- 기존 정수용 흡착 필터 소재, 전자소재, 에너지저장소재로 널리 이용된 활성탄의 경우 느리고 낮은 흡착력과 실험실 규모의 생산 및 표면개질 특성을 보이고 있어 상용화 기술로 많은 제한성을 가지고 있음. 또한, 재생을 위해 150°C 이상의 추가적인 열을 공급해야하는 단점으로 공정상 에너지 손실이 큼. 따라서 천연물질을 활용하며 기존의 활성탄을 대체할 수 있는 초고비표면적 나노흡착제 제조기술은 높고 빠른 흡착력, 양산 가능성, 고도정수용 외산 흡착제를 대체하거나 100 °C 이하의 낮은 온도에서 재생을 할 수 있으며, 고성능 나노흡착제 표면개질 기술은 특정 오염물질에 대한 선택적인 흡착성능을 높일 수 있어 이를 생산 할 수 있는 저렴한 소재의 탐색과 제조 기술에 대한 연구가 필요
- 국내의 환경나노촉매 제조 기술(나노촉매 및 나노흡착제)의 경우 선진국 대비 70% 수준의 기술력을 보유하고 있으며, 실험실 규모 이상의 대량의 환경나노촉매를 생산 할 수 있는 양산 기술 역시 선진국에 비해 낮은 인프라와 기반을 가지고 있음

■ 희유금속 대체 나노소재

- 희유금속(Rare Metal)은 전 세계적으로 매장량이 극히 적고 지역적 편재성이 크며, 추출이 어려운 금속 원소로 현재 산업적 수요가 있고 향후 첨단산업 성장에 따라 급격한 수요 증가가 예상되는 원소로, 국가별, 시대별로 분류 기준이 상이하나 국내에서는 인듐, 갈륨, 리튬, 희토류 등 35종(56원소)을 총칭함
- 선진국의 지속적인 첨단산업 발전과 중국, 인도 등의 후발국의 급성장에 따라, 희유 원소에 대한 수요가 급속히 증가하고 있으며, 최근 희유금속 자원 보유 국가들의 자원 보호주의에 따라, 전세계적 희유금속자원 확보경쟁이 가속화되고 있음
- 나노기술의 적용에 의한 원자의 내부구조 및 전자 배열 상태를 새롭게 바꿀 수 있는 새로운 희유금속 대체 나노소재의 개발이 가능할 것으로 전망되나, 전세계적으로 기술 개발 초기 단계임
- 국내의 희유금속 관련 연구는 주로 출연연구소를 중심으로 진행되고 있음



## 2. 나노소자 분야

### ≡ 나노소자기술의 정의

- 나노미터 크기의 물질이나 구조가 갖는 특화된 성능과 현상을 이용하여 기존 IT 소자의 물리적 한계를 극복하고 이를 통해 국내 IT 산업의 국제 경쟁력을 유지하는데 기여할 수 있는 기술

### ≡ 나노소자기술 분야 유망기술 동향

- 초전력 메모리
  - 나노미터 크기를 갖는 전자소자에 전기 입력 신호 인가 시, 소자를 이루는 소재에 따라 전하 저장, 분극 혹은 저항상태가 변화하며, 이를 통해 정보 저장을 수행하는 소자를 통칭함
  - 플래쉬 메모리, 강유전체 기반의 전하분극 기억소자, 자성기억소자, 저항변화소자, 상 변화 메모리소자 등이 있으며 이 중 플래쉬 메모리만이 상용화되어 있는 기술임
  - 현재의 플래쉬 메모리 기술은 기존 2D 평탄형 구조의 전통적인 미세화 기술에서 벗어나, 3D 수직 구조를 갖는 전하트랩 플래쉬 메모리 소자를 적용하여 현재 양산 중 이나, 향후 10년 이상 지속적으로 성장하기 위해서는 지속적인 기술혁신이 필요
  - 강유전체 기반의 전하분극 기억소자 최근 산화 하프늄에 금속 도핑(예, 실리콘, 지르코늄, 이트륨, 가돌륨, 스트론튬, 란타륨 등) 시, 강유전체 특성이 보고되었고, 10nm 이하의 얇은 두께에서도 강유전체 특성을 갖으며, 높은 밴드 갭을 가지고 있을 뿐 아니라 기존 반도체 공정에서 바로 활용 가능할 정도로 공정적인 성숙도가 높음

- 자성기억소자(STT-MRAM)는 비휘발성, BEOL 공정 적합 성, 무한한 쓰기/지우기 반복 횟수, 고집적성, 빠른 쓰기/지우기/읽기 속도 가능 등의 장점이 있어, 궁극적으로 로직-인-메모리가 구현될 것으로 기대하며, 2018년에 DRAM이 미세화 한계에 도달 시, DRAM을 대체할 가장 강력한 메모리 기술로 고려되고 있음
- 저항변화소자는 전계의 크기 또는 부호에 따라서 저항상태가 바뀌는 메모리 소자로서, 메모리 저항 비는 100이상의 값을 갖으며, 상대적으로 빠른 쓰기 속도와 작은 면적에 소자 구현이 가능하여 Cross-point 구조에 적합한 장점이 있음
- 상변화 메모리소자는 상용화에 가장 근접했으나, 시간에 따라서 비정질 구조의 구조적 결함의 양이 변화 하는 등 상의 미세 변화로 다치 레벨 메모리 셀 구현에 이슈가 있고, 셋과 리셋 동작 시 인접 셀에 열전달에 의한 소자 특성 변화로 저항이 변화하고 셀의 스케일링에 어려움을 발생시키는 단점이 존재하여 이를 극복할 필요가 있음

■ 초고속저전력 논리소자

- 반도체 소자의 집적화 한계와 소모 전력 문제를 원천적으로 극복하기 위한 새로운 제조방식으로의 패러다임 전환을 통해 초고성능 및 초저전력 정보처리를 구현하는 데 필요한 신소자, 응용회로 및 아키텍처 로직 기술을 의미
- IBM, AMD 및 Freescale 등 기존 해외 선진 기술 회사들의 직접적인 반도체 제조 포기과 반도체기술 개발컨소시엄인 SEMATECH의 퇴출에 따라, 기술 로드맵의 불투명성이 증가 되어, 로직 기술의 미래 추세 예측이 매우 어려워지고 있음
- 뿐만 아니라 신기술 기반 시장 선점을 위해 Intel 등 선도기업의 기술 폐쇄 성향은 더욱 강화되고 있으며, 국내 기업들의 기술도입선이 제한되면서 민간주도 기술혁신이 어려워지고 있음
- 미래 초고속·저전력 논리소자는 실리콘소자를 기반으로 하되, monolithic 3D 집적 기술을 활용하여 기존 기술의 한계를 극복하는 방향으로 발전해나가는 추세임(예: 3

차원 집적 NAND기술 등)

- 그 밖에 초고성능, 초절전 기능을 확보하기 위한 새로운 로직 소자 기술이 연구되고 있으며, 기존 소자 한계를 극복할 획기적 대안 소자(예: 스핀소자, 강유전체소자)에 대한 연구가 진행되고 있음
- 국내에서는 국내 나노기술인프라를 중심으로 3차원 집적기술관련 기반공정을 개발하고 있으며, 대학을 중심으로 뉴로모픽 소자관련 기술들이 개발되고 있음

#### ■ 나노환경센서

- 나노 소재의 새로운 특성을 활용하여, 기존 센서보다 고감도, 고선택성, 빠른 응답속도, 저전력 소모의 특성을 갖는 소형화된 센서기술을 의미
- 저차원 나노물질 또는 나노구조는 표면적의 기하급수적인 증가로 인하여 센서로 활용될 경우 매우 우수한 물리적, 화학적 특성을 나타내는 바, 저차원 나노물질 및 나노구조체를 센서의 감지체로 활용하고자 하는 연구가 진행되고 있음
- 국내의 경우 선택코리아, 와이즈산전 등의 업체에서 자체 개발한 알코올 센서, VOC (Volatile Organic Compound) 센서 등의 나노 가스센서 제품을 생산 또는 시장진입 모색 중임. 특히, 선택코리아는 고신뢰성 알코올 감지소재 기술을 바탕으로 휴대형 음주 측정기 세계시장에서 높은 점유율을 차지하고 있음
- ETRI, KIST 등의 정부출연연구소에서 CO<sub>2</sub>, HCHO(포름알데히드, 대표적인 VOC), CO, NO<sub>x</sub> 등의 나노 또는 나노 / MEMS 융합 가스센서 시제품을 개발 중 임. ETRI는 나노 감지소재, MEMS 센서 소자 및 CMOS ROIC 기술이 접목된 융합형 나노 가스 센서를 개발 중이며, KIST는 자기발열(Self-heating) 나노 감지소재 기반 초저전력 나노 가스센서를 개발 중

■ 신개념 나노물질구조 나노소자

- Beyond CMOS로 규정되는 전자소자의 영역으로 저차원 나노물질 또는 나노구조 고유의 물성을 이용하여 기존의 MOSFET 개념을 탈피한 창의적인 성능과 소자의 제작 및 운영상의 경제성을 가질 수 있는 전자소자를 의미
- 기존의 Si를 기반으로 하는 소자가 가지는 집적도, 에너지 효율, 신뢰성의 한계를 극복하는 새로운 나노소재 및 나노구조 기반의 소자에 대한 세계적 관심이 높아지고 있음
- 탄소 나노소재 및 이차원 소재 기반 나노소자 관련 분야에서는 특히 국내 연구 역량이 세계적 수준에 근접하고 있으나, 이차원 소재의 경우, 특히 소자 대량 생산 및 다양한 응용과 직결되는 이종 결합 제작에 대한 진공 제조법 분야에서 세계적 수준에 미치지 못하고 있음

■ 나노유연소자

- 기존의 유기기판이나 실리콘 웨이퍼와 같은 딱딱한 기판위에 제조된 전자소자가 아닌 유연한 플라스틱, 금속 호일 등의 플렉서블 기판위에 제조된 다양한 기능을 지닌 전자소자를 의미
- 유연소자 구현을 위해서는 소자에 쓰이는 반도체 소재, 절연체 소재, 전도성 소재 등이 바뀌어야 하며, 고성능 2차원 층상형 나노 반도체소재, 그래핀과 같은 고전도성 나노 소재 등이 개발되고 있음
- 유연기판의 재질적 특수성을 고려한 박막 형성 및 제어기술의 개발이 요구되는 바, 크게 기존의 진공공정기반 박막 증착기술과 인쇄공정을 기반으로 한 박막 도포기술이 개발되고 있음
  - 또한 유연기판의 재질적 특수성을 고려한 고해상도 패터닝 및 에칭기술의 개발이 요구되어, 이에 대한 다각도의 신공정기술이 개발되고 있음

- 미국은 플렉서블 전자소자 및 디스플레이에 대한 다양한 핵심 소재, 공정, 소자 기술에 원천 특허를 다수 보유하고 있으며 아리조나 대학의 플렉서블 디스플레이 센터를 비롯하여 다수의 제조기술 연구센터도 존재함. OLED 관련 인광발광기술의 원천기술을 UDC에서 보유하고 있음. 제조회사로 애플, 모토롤라등이 플렉서블 디스플레이를 탑재한 스마트 단말기에 개발을 주도하고 있음
- 유럽은 인쇄기술을 기반으로 하는 플렉서블 전자소자와 디스플레이에 대한 원천 핵심 기술을 보유하고 있음. 필립스, Plastic logics 등은 제조기술을 보유하고 있으며, 머크, 아그파, 솔베이 등의 재료회사에서 다양한 소재의 핵심 기술을 보유하고 있음
- 일본은 플렉서블 전자소자와 디스플레이의 소재 기술과 인쇄기술에 대한 핵심 원천 기술을 다수 보유하고 있음. 특히 다이니폰잉크, 소니, 파라소닉, 산요, 재팬디스플레이 등에서 소재 및 제조 기술의 핵심기술을 보유하고 있고, 산화물 기반 구동소자기술에 원천기술을 보유하고 있음
- 국내는 삼성과 엘지 등을 중심으로 플렉서블 전자소자와 디스플레이를 개발하기 위해서 지난 10년 동안 노력해 왔으며 현재 세계에서 가장 앞선 제조 기술을 보유하고 있음. 특히 OLED 디스플레이기술은 세계최고 수준임. 또한 제일모직, 엘지화학 등 관련된 다양한 소재 기업과 주성엔지니어링, SFA등 제조 장비 기업을 보유하고 있음

■ 나노 광소자

- 대역 신호 처리용 능동형 나노 광소자는 미래 사회의 통신, 정보 처리, 가정용 / 산업용 / 의료용 이미징 등 광범위한 차세대 응용 수요에 대응하기 위하여 나노구조 및 나노소재의 광학적, 전기적 특성을 통해 광대역 광신호 처리를 가능케 하는 능동 소자 기술을 의미
- 기존 반도체 기술과의 집적화를 고려하여 시장성이 있는 집적형 차세대 광소자를 개발하고 있으며, 통신파장, 가시광, 중적외선, 테라헤르츠 및 밀리미터파에 이르기까지 다양한 주파수 대역에서 능동 소자를 중심으로 집적화 된 소형, 저가격의 기술 개발 중
- 특히 통신파장, 가시광, 중적외선, 테라헤르츠파, 밀리미터파 대역 고효율 광원 및 검출기의 효율 향상을 위하여 밴드 갭 구조, 양자 구조, 나노 구조 및 패턴, 신소재 등에 신기술을 적용한 능동 나노 광소자 기술 개발 진행 중
- 국내의 경우 핵심 광부품 기술 중 광원, 광 검출기 등은 대부분 수입에 의존하는 현실이며, ETRI, KETI 등에서 밀리미터-테라헤르츠파 기반의 차세대 나노 소자 기술 개발을 수행하고 있음

### 3. 나노에너지·환경 분야

#### ≡ 나노에너지·환경기술의 정의

- 나노기술이 갖는 혁신적 특성을 이용하여 에너지·환경 산업분야가 직면하고 있는 고효율화, 저비용 생산 등의 기술적 이슈들을 해결함으로써 기후변화에 대응하기 위한 기술

#### ≡ 나노에너지·환경기술 분야 유망기술 동향

- 나노태양전지
  - 나노소재와 나노기술 적용하여 기존 실리콘 태양전지를 대체할 수 있는 혁신적인 저비용 고효율 고안정성 차세대 태양전지 제조기술을 의미
  - 최근 태양광산업은 전세계적인 경기침체와 공급과잉으로 인한 제품가격 하락 등의 어려움을 극복하고 수요가 급상승하고 있으며, 각국 정부의 태양광 산업 육성을 위한 적극적인 정책과 지원에 힘입어 향후 세계시장을 주도해 나갈 기술확보에 전념하고 있음
  - 실리콘 태양전지 발전효율이 한계에 도달(이론 29%, 현재 25%)하여 저가격 고효율의 비실리콘계 차세대 태양전지 기술개발이 진행되고 있으며, 탠덤형 태양전지와 같은 차세대 초고효율 태양전지 신구조 개발, 페로브스카이트 / CZTS /하이브리드형 / 양자점 / 유기복합체 등과 같은 초저가 고효율 태양전지 신물질 개발 등이 진행되고 있음
  - 차세대 태양전지 분야는 국내기술 수준이 선진국과 비교해서 기술격차가 크지 않으며, 현재 상용화에 가까운 기술을 보이고 있는 CIGS 태양전지, 유기태양전지, 염료감응 태양전지는 산업부 주관으로 민간기업과 정출연 중심으로, 페로브스카이트 태양전지는 미래부 주관으로 대학과 정출연 중심으로 연구개발이 이루어지고 있음

■ 나노구조 이차전지

- 나노 구조체 디자인 및 아키텍처링 기술을 기반으로 리튬이온전지 등 기존 이차전지의 에너지, 출력, 수명, 안전성을 획기적으로 향상시키거나, 새로운 개념의 미래형 이차전지 기술을 의미
- 현재 상용화된 리튬이온전지가 유일하게 소형 및 중·대형 이차전지 분야에 모두 적용이 되고 있지만, 한계 성능으로 인해 향후 급속히 확대될 것으로 예상되는 시장 수요 및 요구 성능을 만족하기엔 어려움이 있어, 성능이 획기적으로 향상된 이차전지 기술 개발이 진행 중
- 나노 구조 제어기술을 통한 고체전해질 이온전도성 향상 및 전고체전지 출력 개선, 리튬 자원 한계 극복 및 저가형 비리튬계 이온 전지 신규 고용량 전극 소재 기술, 고에너지밀도 금속-공기 및 리튬-황 전지용 전극 및 전해질 안정화 기술 등이 개발되고 있음
- 국내의 경우, 기존 리튬이온전지의 공정 및 생산 기술 분야에서 글로벌 기술 우위를 확보하고 있으나, 리튬이차전지의 원천기술 및 소재 부분에서는 일본 기업의 50~70% 수준으로 선진국과의 격차가 큼
- 또한 기술선진국 대비 미래형 이차전지 기술 분야의 원천 소재 기술, 전지 상용화 및 실증 경험 측면에서 경쟁력 부족

■ 나노구조 연료전지

- 나노소재, 나노구조 및 나노공정기술의 개발과 적용을 통해 연료전지의 출력과 장기 내구성을 향상하고 저가격화하기 위한 기술을 의미
- 연료전지는 현재 높은 소재 및 공정비용, 열악한 장기안정성 및 성능 등과 같은 기술적 병목을 돌파하지 못해 시장진입이 지연되고 있는 실정으로 이를 해결하기 위한 방안으로 나노기술을 적용하여 고가의 소재를 저가형으로 대체하고 고효율화를 달성함



로써 경제성을 확보하려는 노력이 확대되고 있음

- 해외의 경우, 미국, 일본, 유럽의 주도로 연료전지 개발이 추진되고 있음. 특히 후쿠시마 원전 사태 이후 정전사태를 경험한 일본은 NEDO(신에너지산업기술종합개발기구)를 중심으로 가정용 세라믹 연료전지에 대한 관심이 급증하고 있으며, 활발한 인프라 구축으로 시장이 급속도로 커지고 있음. 이러한 세라믹 기반 고온형 연료전지는 고체산화물 전해질의 나노구조화 및 박막화, 그리고 나노이오닉스를 적용한 신소재 개발 및 공정기술의 개발에 주력되고 있음
- 주로 수송 수단에 적용되고 있는 저온형 고분자 연료전지 역시 미국, 일본, 유럽 주도로 개발이 추진되고 있음. 해당 기업 및 연구 기관들은 생산 단가를 낮추기 위해 백금 촉매 나노화 및 합금화 연구를 수행하고 있음
- 국내의 경우 연료전지 분야 나노기술은 국제적인 수준에 크게 뒤지지 않는 우수성을 국내외적으로 인정받고 있음. ‘신재생에너지 공급의무화제(RPS)’, ‘연료전지 자동차 보급 및 시장 활성화 계획’ 등을 수립하는 등 발전용, 수송용 연료전지를 중심으로 국내 해당 분야가 크게 부상하고 있음. 이러한 기술적 우수성과, 산업적 관심에도 불구하고 원천핵심특허 보유는 크게 부족한 실정임.

#### ■ 나노분리막

- 나노구조를 갖는 물질을 이용하여 기존 분리막과 복합 및 응용하는 나노복합 분리막 기술과 나노구조 물질을 이용한 나노 기능성 분리막 및 생물모방형 나노 분리막 기술을 의미
- 나노복합 분리막 기술 분야에서는 제올라이트, 탄소나노튜브, 블록공중합체를 이용한 기술 등이 개발되고 있고, 나노 기능성 분리막 기술 분야에서는 나노 섬유, 낮은 투과 저항, 촉매 담지기술 및 나노 기공 내 기능성 분자를 활용한 수처리 기술, 생물모방형 기술 분야에서는 아쿠아포린 기술 등이 개발되고 있음

- 나노분리막 등은 아직 제조 단계의 기술적 한계를 가지고 있기 때문에 실험실 수준에서 다양한 연구들이 진행되고 있음
- 특히, 제오라이트 복합 분리막의 경우 투과성 향상을 위한 박막화 기술, 탄소나노튜브, 나노 섬유 분리막 및 아쿠아포린 등은 경제적인 대용량 생산 방식의 기술의 한계로 있기 때문에 대용량 생산, 모듈화를 통한 스케일업 기술 및 현장 적용 기술 개발이 개발되고 있음
- 국내에서는 탄소나노튜브 분리막, 기능성 나노 복합막, 저에너지 고효율 담수용 멤브레인 소재 및 시스템 개발, 아쿠아포린 등 생체 모방형 분리막 등 다양한 분야에 적용될 수 있는 나노 소재 분리막 기술 개발 연구과제가 연구단급 및 개별사업으로 활발하게 추진되고 있음

■ 열전소자

- 열전성능지수(ZT) 1의 에너지 변환 성능을 보이는 기존 Bi-Te계, Silicide계, PbTe계, Skutterudite계, Half-Heusler계 등 다양한 온도대역의 열전소자의 변환 성능 한계 극복을 위하여, 나노 구조의 복합화 및 bulk 재료 내 기능성 나노구조의 형성 등의 진일보한 기술의 구현을 통해 기존의 상용 에너지 변환 소자에 근접한 열전소자 제조 기술 및 이를 이용한 모듈 제조 기술을 의미
- 산업폐열에서부터 인체열까지 광범위한 폐열 에너지를 재활용할 수 있는 그린에너지 기술로 폭넓은 적용 가능성을 가지고 있으나, 현재 열전소자의 낮은 변환 효율 한계를 극복하기 위하여 나노구조를 가지는 벌크형 열전소자가 개발 중임
- 현재 일본과 미국은 열전기술을 마일 기술협력 8대 신기술 중의 하나로 선정하여, 미래 에너지원으로서 집중 투자하고 있음
- 국내 열전발전 소재 기술은 lab scale에서 세계적 수준에 근접하고 있으나 나노기술의 scale-up 공정기술 개발이 요구되며, 열전발전 모듈화 기술은 세계적 수준에 미치지

못하고 있음. 최근 열전발전의 시장성을 인식하여 LG화학, LG이노텍, 현대자동차, (주)제펠, (주)리빙케어, 등 많은 기업들이 개발을 시도하고 있음

- 향후 10% 이하의 에너지 변환 효율을 가지는 기존 열전소자 및 모듈의 기술적 한계를 해결하기 위해, 2-D 및 3-D 나노구조 제어 기술, 나노구조체 담지 기술, scale-up 가능한 나노구조제어 공정 기술, 신뢰성 향상 기술, 나노구조 열전소자의 모듈화 기술, Flexible 나노복합체 기술 등의 열전소자 개발 및 모듈화 연구 등이 필요

#### ■ 극미소 전원

- 에너지 자립형 극미소 전원기술은 우리 주변에 상존하는 미약한 기계적인 진동, 압력, 온도의 변화, 소음 등의 활용되지 못하는 에너지자원을 활용 가능한 전기에너지로 변화하고, 발생한 에너지를 수집, 활용하는 기술을 의미
- 국외의 경우 특히 조지아공대, 버지니아공대, MIT 등의 대학을 중심으로 다양한 나노 구조 및 소재를 이용한 극미소 전원 소자와 전원제어 회로에 대한 연구가 활발하며, 다수의 기업들이 이를 활용한 소자 및 모듈의 판매에 나서고 있으나, 이러한 개발품들은 macro 스케일이 일반적으로, 아직까지 나노소재 / 구조를 기반으로 한 에너지 자립형 극미소 전원 기술의 제품은 출시되지 않은 것으로 파악됨
- 국내의 경우 KAIST, UNIST, KIST 등의 학계, 연구계를 통한 논문, 특허 등의 보고는 활발히 이루어지고 있으나, 극미소 전원 모듈과 같은 실제적인 산업의 적용과 관계된 개발은 기초적인 상태임

## 4. 나노바이오 분야

### ≡ 나노바이오기술의 정의

- 나노기술을 적용하여 생명현상을 규명하고 바이오 및 의료 분야에 활용함으로써 질병 예방 / 진단 / 치료 및 웰빙 제품 / 서비스 등에 기여할 수 있는 기술

### ≡ 나노바이오기술 분야 유망기술 동향

- 나노기반 농수산 제품 고도화
  - 나노기술을 이용하여 농업 수산업 그리고 식품산업에 필요한 각종 공정 개발 기술 및 제품 개발 기술을 의미
  - 나노 기술을 이용하여, 식품 내 영양분 등 첨가물을 안정하게 보관하기 위한 기술을 이미 다양한 공산 식품과 영양제에서 활용되고 있으며, 다양한 기업들은 식품의 제조 공정, 가공 공정 등의 과정에 나노기술을 적용하기 위한 연구개발을 수행하고 있음
  - 최근 증가하고 있는 각종 동식물들의 전염병(돼지 구제역, 조류독감 등)을 조기에 검지하고, 전염병 확대를 방지하기 위하여, 동식물의 직접검사 뿐만 아니라, 대기, 토양, 용수의 환경적 간접적 정밀검사 필요하나, 농산품(채소, 육류 등) 및 수산원재료(굴, 미역, 생선 등)에서 감염 병원균의 초고감도 측정을 위한 전처리 기술은 아직까지 확립되지 않고 있어, 초고감도 측정이 이루어지지 않고 있음
- 나노 웰빙 제품
  - 나노기술을 적용하여 기능성을 획기적으로 개선한 화장품, 식품, 의료용품, 생활용품 등 보건, 건강, 안전과 편의 그리고 삶의 질 개선을 위한 나노 웰빙제품, 그리고 이들 제품과 실시간 모니터링 및 IoT 기술과 연계한 웰빙 서비스 기술을 의미

- 현재 전 세계적으로 600여개 이상의 나노기술이 이용된 식품이 판매되고 있으며, 나노바이오 기술이 2025년까지 식품산업의 40%에 영향을 미칠 것으로 전망
- 개인의 개성이 강조되고 소비패턴이 세분화, 다양화됨에 따라 개인 맞춤형 기능성 화장품에 대한 수요가 또한 크게 증가함에 따라 나노기술을 적용한 고기능성 화장품은 세계시장에서 매우 빠르게 성장 중임
- 나노기술을 적용하여 약물전달기능이나 항균기능성을 향상시킨 의료용품 및 생활용품 등이 개발되고 있음.
- 기능성 화장품 등 웰빙 제품의 세계시장 성장속도가 매우 높지만, 동시에 화장품등의 유효성/안정성 평가를 위한 동물실험이 금지되는 등 국제적 동물실험 규제가 강화되고 있는 추세임

■ 나노진단

- 나노기술을 이용하여 개개인의 생체특성에 맞는 생체지표를 초고감도 다중검지하여 질병을 진단하거나, 다양한 시료에서 검체를 효과적으로 분리/정제하고, 검출 신호를 선별 변환 증폭함으로써 높은 감도 및 선택성을 현장에서 구현할 수 있는 나노진단/분석 기술을 의미
- 각종 전염병 및 만성질환을 조기에 진단하고, 예방하기 위해 혈액 중심의 검체에서 타액, 콧물, 날숨 등 다양한 시료 및 공기, 토양 등 환경시료 내 초고감도 고정확 분석 기술이 개발 중임
- 유전자 분석의 주요특허인 Biomeriux사의 일명 “Boom 기술”과 Roche사의 핵산 증폭 기술인 “PCR 기술”의 원천특허권이 만료됨에 따라 세계 각국에서는 유전자 진단 시장에서 나노바이오 기술을 적극 도입 중
- 예로서, 일루미나는 나노바이오 기술을 유전자 시퀀싱을 이용하여, 인간의 게놈을 천 불로 분석할 수 있는 기술을 상용화하여 동분야를 주도하고 있음

- 국내의 경우 나노엔텍, 바이오니아, 씨젠 등 일부 업체만이 해외 선진 업체와 경쟁하는 실정으로 경쟁력이 미흡한 상태임

■ 생체분자 나노분석

- 나노 기술을 이용하여 높은 정밀도로 바이오물질을 측정분석을 수행하는 기술 및 생체 유래물질 및 생체유해물질 등을 대상으로 단분자 수준의 정밀도를 갖는 나노기술 기반의 측정·분석·제어 기술을 의미
- 나노스케일의 측정·분석·제어에 기반하여 신호감도와 특이도를 향상시킴으로써 나노 정밀도에서 생체분자를 제어할 수 있는 기술이 개발 중임
- 국내의 나노바이오 측정·분석·제어 기술 분야의 기술력은 일부 분야에서 세계를 선도하는 수준에 있으나, 대부분의 분야에서 상용화와 산업화 기여도가 매우 낮은 상태임

■ 지능형 나노치료

- 다양한 질병에 맞추어 변형이 가능하고, 체내동태 조절이 가능한 나노플랫폼을 활용하여 질환 부위를 추적하고, 이를 바탕으로 질병의 치료에 활용될 융합과학 및 기술을 의미
- 주요 선진국들은 지능형 나노치료기술을 암/치매/심혈관질환/관절염 등 난치성 질환의 조기진단 및 치료의 난제를 극복할 수 있는 돌파기술로 판단하고 국가적 차원에서 지원, 추진하고 있음
- 20여건의 다양한 형태의 나노물질을 이용한 진료기술이 이미 임상시험단계에 진입하고 하였고 이중 5건은 FDA 또는 EU의 승인을 획득하는 등 임상 적용 단계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음
- 국내의 경우 아직 실험실에서 연구목적으로 사용하는 수준에 불과하여 임상적용 목적으로 실용화된 사례는 거의 없음

## 5. 나노공정·장비·측정 분야

### ≡ 나노공정·장비·측정기술의 정의

나노 소재 및 나노 소자의 기본 요소를 제조 및 제작하는 기술과 이에 관련된 소재의 물성 및 소자 특성 측정 기술을 바탕으로, 나노소재 / 소자 제조 / 제작 및 특성평가에 필요한 장비제작 기술을 포함하는 기반 기술 분야

### ≡ 나노공정·장비·측정기술 분야 유망기술 동향

#### ■ 유연소자 공정

- 메모리 전자소자, 에너지 전자소자, 나노 바이오소자, 유연전자소자 및 디스플레이 등의 고기능화 및 환경 친화/인간친화형의 기능성 나노소자 및 나노부품을 대면적에서 연속으로 제작할 수 있는 기술을 의미
- 핀란드의 VTT, 일본의 도시바, 히타치 등에서 힘이 가능한 기능성 나노소자를 개발하고 있으며, 삼성중기원에서는 그래핀을 이용한 유연성이 있는 나노소자 등을 개발하고 있어 유연 나노전자소자의 대량생산을 위한 기술개발이 활발히 진행되고 있음
- 또한, 최근에는 Q-dot 및 3차원 나노구조를 기반으로 하는 에너지전자소자, 환경친화적 나노전자소자 등을 제작할 수 있는 기술개발이 활발히 진행되고 있음
- 대면적에서 패터닝하는 기술은 현재 마이크로 패턴 및 단층소자 제작 수준에 머물고 있으며, 향후 에너지, 소자 및 바이오분야에 적용되기 위한 대면적에서 다층 나노구조를 구현할 수 있는 기술이 요구됨
- 다층 오버레이/정렬기술은 국내에서 Si wafer를 기반으로 30nm급 수준의 오버레이/정렬을 위한 기술이 개발되고 있으나 대면적의 유연한 substrate에 다층 나노구조를 구현하기 위한 기술개발이 필요

■ 나노구조 패터닝

- 기능성 나노구조물을 복잡한 전/후 공정을 거치지 않고 직접 패터닝함으로써 공정의 단순화, 비용절감, 친환경성을 극대화 하고, 다종의 나노구조물을 다양한 기판에 고밀도로 집적시켜 고기능성 나노소자를 제작할 수 있는 기술을 의미
- 잉크젯 프린팅기술을 이용한 기능성 나노구조물 직접 패터닝 기술의 경우 미국(버클리대, MIT), 일본(큐슈대, AIST), 유럽(캠브리지대) 등을 중심으로 금속나노입자 잉크의 잉크젯 프린팅 기술이 활발하게 개발되고 있으며, 국내에서도 건국대를 중심으로 Printed Electronics 응용을 위한 금속 나노입자 잉크의 잉크젯 프린팅 기술을 개발하고 있음
- 나노임프린팅 기술에 기반한 기능성 나노구조물 직접 패터닝 기술의 경우 미국(MIT), 한국(기계연구원, KAIST, 고려대) 등을 중심으로 금속 나노입자 및 ZnO, TiO<sub>2</sub> 나노입자 잉크의 직접 나노임프린팅 기술이 개발되고 있음
- 전사프린팅 기술에 기반한 기능성 나노구조물 직접 패터닝 기술의 경우 미국(버클리대, UIUC), 한국(서울대), 유럽(프랑스 CNRS) 등을 중심으로 금속 나노입자, 나노와이어 등의 전사 프린팅 공정 기술이 개발되고 있음
- Roll-to-roll 그라비아/오프셋/플렉소 프린팅 기술에 기반한 기능성 나노구조물 직접 패터닝 기술의 경우 미국 Hewlett-Packard, 일본 Toyo Ink, 한국 삼성전기, 기계연구원 등을 중심으로 금속 나노입자의 roll-to-roll 패터닝 기술 개발 중
- 현재 기능성 나노구조 직접패터닝 기술은 금속 입자에 집중되어 연구가 수행되고 있으나 이를 나노입자, 와이어, 튜브 및 그래핀 등 다양한 나노물질에 적용 하는 시도가 수행될 필요가 있음
- 현재 마이크로 스케일의 직접 패터닝 기술은 3차원 적층 및 아키텍처링 공정이 일부 개발되고 있으나, 나노스케일의 직접 패터닝 기술은 단층 패터닝에 국한된 초기 기술



개발 단계임. 향후 직접 패터닝 기술을 이용해 나노구조물의 3차원 적층 및 아키텍처링 공정을 개발할 필요가 있음

■ 고분해능 측정

- 나노수준의 물성 측정 시 요구되는 정밀도 및 신뢰도가 향상되는 핵심기술을 의미
- 나노 물성에 대한 정밀도와 신뢰도의 유지 및 나노수준의 물성 DB를 구축/활용하기 위해서 실시간 복합물성 측정시스템 구축 및 기술 개발 필요
- 2x nm 이하 반도체 공정에서 주력 계측 및 검사장비 기술이 한계에 이를 것으로 전망 되고 있어, 새로운 측정/분석 검사장비 개발에 대한 요구가 증대되고 있음
- 디스플레이 제품의 대형화와 바이오 산업의 급격한 발달로 인해 실시간 초고분해능측정기술에 대한 요구가 급증하고 있는 바, 진공 조건하에서만 초고분해능 측정이 가능 하던 기존 기술의 제약을 극복하여 대기 상에서 실시간 대면적 시료나 바이오 시료 의 초고속 측정 분석에 활용 가능한 대기형 Air SEM과 같은 새로운 테크놀로지에 대한 필요성 대두

■ 나노 적층공정

- 우수한 전기적, 기계적 특성을 가지는 나노미터 두께의 박막을 제조할 수 있는 기술을 의미
- 나노 박막은 현재 반도체 산업의 소자 집적화와 따라 나노 소재 및 소자 제작의 모든 부분에 핵심적인 역할을 담당하고 있으며, 고기능화 되는 전자, 광, 에너지 소자 등에서 우수한 전기적, 기계적 특성을 가지는 나노 스케일 두께의 박막이 필요
- 사물인터넷 시대에 필요한 전자 제품의 다기능화 및 스마트화에 대한 요구가 폭발적 으로 증가하므로, 고품위 나노 박막 공정 기술에 대한 수요는 지속적으로 확대될 것

으로 전망되고 있으나 기존 박막 증착 및 식각 기술로는 소자 크기의 나노화 및 구조의 3차원화에 어려움이 있으며, 이를 해결하기 위하여 새로운 개념의 나노 증착 및 식각 공정 기술이 개발되고 있음

- 14nm 이하에서 fin-FET 과 같은 다양한 3차원 구조를 가지는 소자제조를 위해 복잡한 형상의 표면에 고단차성 박막 증착 및 식각 기술, contact 및 금속 배선 공정에서의 고 증황비 via 및 trench 공정이 필요
- 실리콘과 화합물반도체 또는 새로운 2D-반도체 물질등과 같은 신개념의 소재들이 같이 사용 될 수 있도록 고품위의 이중 에피택시 나노박막 증착기술이 필요

■ 하이브리드 나노검사

- 광학측정법을 기반으로 그 밖의 다양한 나노계측 기술을 접목하여 마이크로 / 나노 구조를 복합적으로 검사하는 대면적 3D 나노소자 측정기술을 의미
- 국내 및 해외에서 나노, 마이크로, 매크로 각각의 영역에 특화된 광학검사장비 및 주사탐침장비와 소프트웨어 그리고 단일 광학시뮬레이터는 상용화되어 있으나, 각 영역의 분석에 사용되는 광학 기술과 주사탐침 기술과 같은 나노계측 기술들을 융합하여 연속적인 나노특성 평가를 진행하는 하이브리드 나노 검사장비와 이로부터 얻어진 나노특성 결과들을 각 영역의 이론적 원리와 실시간으로 비교 검증할 수 있는 융합 시뮬레이터 기술은 미확보 상태임
- OCD를 이용한 공정검사장비가 국외 2개의 회사에서 개발되어, 국내의 반도체 생산 라인에도 접목되고 있으나, 대당 가격이 30~50억원으로 고가이며, 라이브러리 비교 분석법을 사용하고 있는데, 특정 공정에만 국한된 라이브러리를 얻는데도 길게 수십 일의 시간이 걸리는 한계가 있어 주사탐침계측기술 등의 보완을 통한 기술개발이 필요
- 양자전자현미경은 전세계적으로 개념적인 이론제시가 이루어진 상태이며, 실험적 증명은 이루어지지 않음.

■ 스마트 공정

- 소재 표면에 나노구조 형성을 통해 재료 표면의 물리적, 화학적 특성 또는 생물학적 활성을 목적에 맞게 조절하는 기술을 의미
- 독일에서는 초소수성 특성을 갖는 물 고사리의 표면 구조를 재해석하여 선박의 표면에 적용하는 연구를 수행하고 있으며, 국내의 경우에도 삼성중공업에서 스마트 표면구조화 기술을 토대로 초소수성 표면을 적용한 방오 특성 및 항력저감 특성을 갖는 선박 표면 및 블레이드 표면 제작 기술에 대한 연구가 수행되고 있음
- 미국 3M에서는 다양한 수송기기의 항력저감을 위한 항력저감 필름을 상용화 하였으며, 실제 항공기에 적용되어 운항 시험까지 시도된 사례가 있음. 국내의 경우 철도연구원 에서 철도차량에 항력저감을 위한 스마트 표면구조화 기술을 접목하는 연구를 수행하였음
- 응결입자에 의한 스팀터빈 블레이드의 손상을 최소화하기 위해 미국 GE에서는 스마트 표면구조화를 통한 응결방지 기능을 스팀터빈 블레이드 표면에 적용하는 연구를 수행하고 있으며, 열전달 특성 향상, 결빙 및 응결막 발생 최소화 특성을 갖는 표면구조화 기술을 활용한 고효율 열교환기 개발 연구를 수행하고 있음. 국내의 경우 두산 중공업 에서 결빙 및 응결막 발생 최소화 스마트 표면을 활용한 열교환기 개발 연구를 수행하고 있음
- 또한 현대자동차에서는 스마트 표면 구조화 기술을 활용한 향균 플라스틱 표면 개발 연구를 수행하고 있으며 이를 자동차용 내장제 분야에 적용하고자 하는 연구를 수행하고 있음
- 미국에서는 나노입자 표면에 생체분자 또는 생체모사분자를 접합하여 진단 및 치료용 나노바이오 소재로 개발하고자 하며 국내외 바이오칩 회사들은 실리콘 또는 금속 기판위에 활성을 유지한 생체분자를 접합함으로써 의료 및 바이오 진단용 소자를 개발하고 있음

- 미국에서는 고분자 물질의 자기조립 특성을 이용하여 나노 스케일의 패턴 제작에 성공하였음. 또한 이에 더 나아가 외부로부터 가해진 손상에 대응하여 자체 복구 기능을 갖춘 폴리머 코팅 시스템을 개발하고 있음
- 자기 조립 박막을 이용한 전자 소자 개발에 대해 미국에서는 국방부의 DARPA 프로그램을 통하여 대대적 지원을 하고 있으며 UCLA, HP, Rice 대학에서 앞선 실적을 나타내고 있음

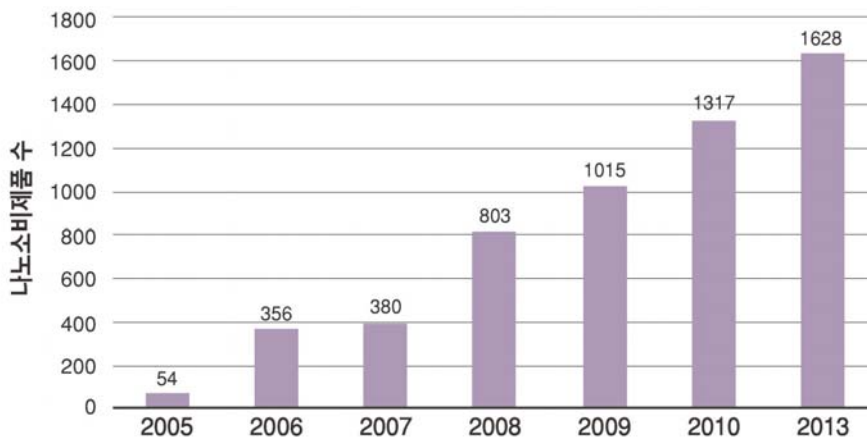
# IV. 나노산업 동향 및 전망

## 1. 나노산업 동향

### ≡ 세계 나노기술 기반 소비재 제품 현황

- 미국의 우드로 윌슨센터에서는 매년 전세계의 나노기술 기반 소비제품에 대한 DB를 구축 중
- 전세계 나노소비제품 출시 추이
  - 나노제품은 2005년 이후 2013년까지 거의 직선적으로 수가 증가하고 있는데, 2006~2013년 사이의 연평균 제품 수 증가율은 24%로 수준임
  - 이는 대략 3.5년마다 제품 수가 2배로 늘어남을 의미

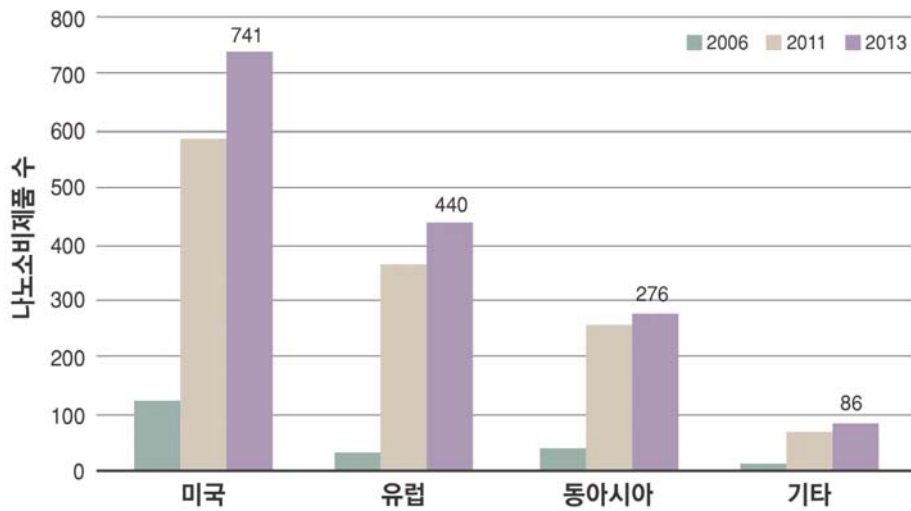
**그림\_14** 나노소비제품 전체 건수 변화



■ 전세계 나노소비제품 지역별 분포

- 지역별로는 미국이 가장 많은 나노제품을 보유하고 있고 성장속도도 가장 빠르며, 유럽, 동아시아가 다음을 잇고 있음

그림\_15 지역별 나노제품 수 및 연도별 변화

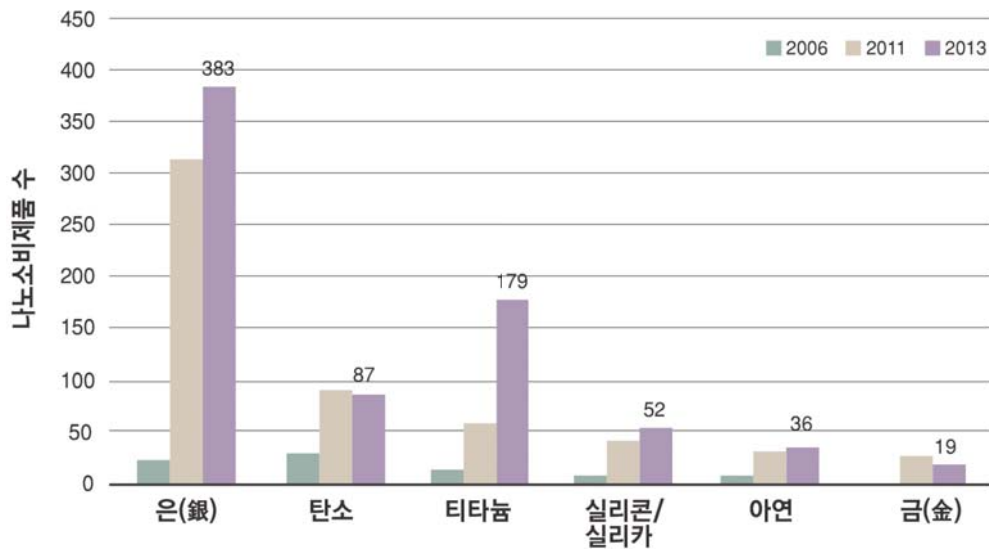


■ 주요 소재별 나노소비제품 제조 건수

- 2013년 현재 가장 많이 사용되는 소재는 은(나노)입
- 은나노 소재를 사용하는 제품은 2006년에는 탄소 소재를 사용한 제품의 수보다도 작았으나 2011년에는 300건 이상으로 급증하였음
- 2011년도 시점은 은나노 제품의 유해성에 대한 우려가 어느 정도 정리되고 은나노 소재의 사용에 대한 가이드라인이 나온 시기임
- 은나노 다음으로 현재 주목받는 소재는 티타늄으로, 나노소비제품에 사용되는 티타늄은 금속 티타늄보다는 광촉매, 자기정화, 자외선 흡수 등 다양한 용도로 쓰이는 티타늄 산화물(이산화티타늄, TiO<sub>2</sub>)을 말함

- 티타늄 소재는 2011년까지는 탄소 소재보다도 제품에 사용되는 건수가 작았으나 2012년 이후 급증하여 탄소 소재를 추월하였음
- 탄소나노튜브를 포함하는 탄소 소재를 이용하는 나노소비제품의 건수는 아직까지 많지 않으며 2011년 이후 증가하지 않고 있는 실정임

그림\_16 소재별 나노소비제품 수 및 연도별 변화



### ≡ 국내 산업 동향

- 우리나라의 경우 나노기술 관련 미국특허를 보유한 기업 수는 1,000개가 넘을 만큼 나노기술이 산업계로 확산되고 있음
- 2010년부터 산업연구원에서는 나노산업통계조사를 실시하고 있는데, 이에 따르면 2012년 현재 사업활동을 하고 있는 나노기업은 504개로 조사됨
  - 504개 중의 43%에 해당하는 218개가 나노소재 부문의 기업이며, 나노장비/기기, 나노전자, 나노바이오/의료 부문 순으로 기업들이 분포하고 있음

- 2012년 기준 나노기업의 매출 총액은 129조원으로 전년 대비 27.7% 늘어난 규모인데, 총 매출의 대부분(91%)을 나노전자 부문이 차지하고 있으며, 고용에서도 유사한 현상이 나타나고 있음
- 나노전자 부문이 매출과 고용에서 90% 수준을 점유하는 것은 나노전자 부문 기업들의 규모가 다른 부문의 기업들에 비하여 월등이 크다는 것을 의미하며, 이는 우리나라 나노산업의 특징으로 볼 수 있음
- 2012년 기준으로 전체 제조업 중 나노산업이 차지하는 매출 규모는 8.5%에 달하며, 고용의 5.0%를 담당하고 있는 것으로 조사되었는데, 2010년에서 2012년 기간 동안의 매출 평균 성장률은 19.7%로 제조업 평균인 6.2%의 세 배 이상의 성장률을 보이며, 1인당 평균 매출액도 9.3억원으로 제조업 평균인 5.5억원을 크게 상회하는 것으로 나타남

그림\_17 국내 주요 나노산업 통계



- 이처럼 국내 나노산업은 2010년에서 2012년 사이에 연평균 20% 이상의 높은 성장률로 성장하고 있지만, 동기간 세계 나노산업은 40% 대의 고성장을 거듭하고 있어 국내 나노산업의 성장속도가 세계 나노산업의 성장 속도에 미치지 못하고 있음



- 특히 국내 나노산업은 대기업 중심인 나노전자 분야가 산업전반을 선도하고 있어 우리나라의 나노산업 경쟁력이 전반적으로 높은 것 같이 보이지만, 나노기술이 전체 산업영역으로 확산되어 큰 시장을 형성하게 될 미래에는 나노전자 산업만으로 20% 이상의 높은 성장률을 유지하는 것은 매우 도전적인 과제가 될 것으로 보임

### ≡ 국내 주요 사업화 사례

- 양자점 필름을 적용한 퀀텀닷 SUHD TV
  - 양자점은 크기가 수 나노미터에 불과한 반도체 입자로서, 양자점에 푸른 색 빛을 쬐이면 크기에 따라 붉은 빛을 내기도 하고, 녹색 빛을 내기도 함
  - 양자점을 이용하면 정확한 색깔을 재현할 수 있기 때문에 더욱 풍부한 색을 TV 화면에서 볼 수 있다는 장점을 가지고 있음
  - 양자점은 나노기술분야에서 그동안 많이 연구된 물질 중의 하나로서 2016년에 삼성전자에서 양자점 필름을 이용한 퀀텀닷 SUHD TV를 출시

그림\_ 18 삼성전자에서 2016년 출시한 퀀텀닷 SUHD TV



■ 10 나노미터급 반도체 메모리

- 삼성전자에서는 10 나노미터급 미세공정을 적용한 메모리 반도체를 2016년 상반기에 출시

■ 나노카본을 적용한 초경량 자전거

- 국내 업체로서 세계 1위 양궁 활 브랜드인 “원앤원”에서는 국내 최초로 나노카본 자전거를 개발하여 출시했으며, 한국 사이클 대표팀은 올 1월 열린 아시아 사이클선수권 대회 주니어 부에서 본 자전거를 타고 금메달 16개 중 14개를 획득

■ 나노면상발열체를 이용한 전기밥솥

- “딤체죽”에서는 올해 나노소재 기반의 면상발열체를 이용하여 밥솥 전체에 골고루 열을 전달함으로써 고슬고슬하고 쫄득한 밥맛을 낼 수 있는 전기밥솥을 출시

■ 나노기술을 이용한 오염방지 셔츠

- 국내 유명 의류브랜드인 “빈폴”에서는 나노입자를 섬유질 하나하나에 달라붙게 만들어 옷에 음식물이 흘러도 툭툭 털기만 하면 스미지 않고 흘러내리는 오염방지 셔츠를 출시

그림\_ 19 원앤원의 나노카본 자전거와 빈폴의 오염방지 셔츠



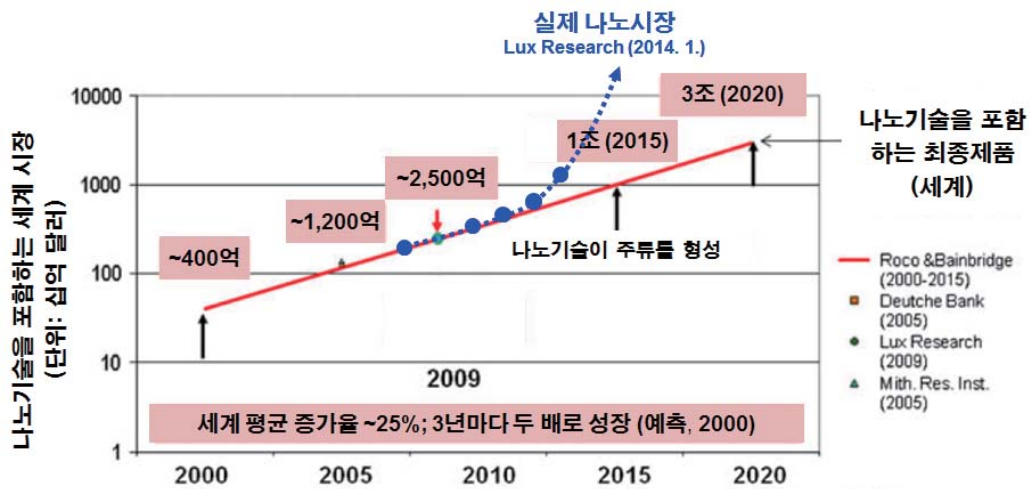
## 2. 나노산업 전망

### ≡ 나노산업 세계시장 규모 전망

■ 급격한 시장규모 확대

- 2000년대 초반의 예측에 따르면 나노기술 시장은 2015년 1조 달러, 2020년 3조 달러의 규모를 형성할 것으로 예측되었는데, 실제 조사된 결과에 따르면 2000년에서 2010년 사이에는 연평균 25%의 성장률을 성장했으며, 2010년에서 2013년 사이에는 연평균 44%의 성장률로 성장하여 이미 2013년에 1조 달러를 넘어선 것으로 발표됨

그림\_20 여러 기관의 나노기술 시장 전망 및 실제 시장 규모



## V. 결어

### ≡ 나노기술은 더 이상 선택의 문제가 아닌 필연적으로 가야할 길

- 나노기술은 제조업 전 분야에 걸쳐 혁신을 유도하고 새로운 서비스를 창출
  - 일본제품의 저가화, 중국제품의 고성능화와 같은 신너트 크래커 상황을 돌파하기 위해서는 나노기술을 이용하여 주력제품의 저가격화 및 고성능화라는 두 마리 토끼를 잡는 방향으로 기업 활동이 집중될 수 밖에 없음
  - 나노산업은 더 이상 우리가 선택할 수 있는 여러 가지 길 중의 하나가 아니라 우리나라가 제조업을 포기하지 않는 이상 반드시 가야할 길임

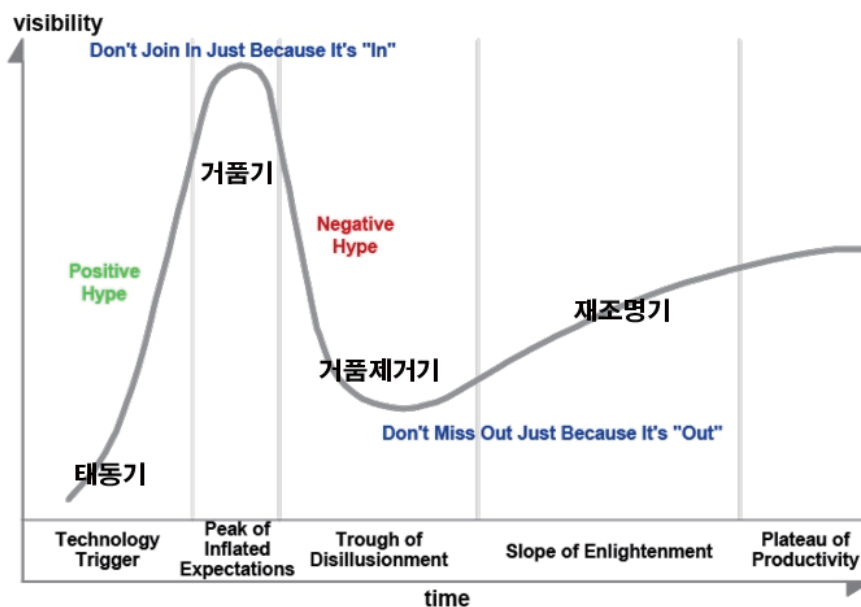
### ≡ 나노산업의 성장을 위한 지속적인 지원 필요

- 나노기술은 신기술 산업화 성장곡선인 가트너 곡선에서 거품제거기를 지나고 있음
  - 신기술이 산업으로 성장하기 까지는 소위 말하는 하이프 사이클이라는 것을 따르게 되어 있음
  - 초기에는 과도한 기대를 하게 되고, 기대에 못 미치는 결과들이 나옴에 따라 대중의 관심이 멀어지다가, 그 바닥을 찍고 나면 서서히 산업으로 영글어가는 것이 하이프 사이클의 일반적인 경향임
  - 나노기술은 하이프 사이클에서 볼 때 바닥을 찍고, 서서히 산업으로 영글어가는 상황에 놓여 있음

■ 지속적인 국민적 관심 필요

- 최근 몇 년 사이에 정부가 그동안 나노기술에 투자한 것에 비해 주목할 만한 성과가 있었느냐는 지적이 종종 있으나, 이미 나노기술은 우리 삶 속에 깊숙이 들어와 있음
- 기술적으로 설명하기 어렵고, 제품의 깊숙한 곳에 숨어 있기 때문에 대중들이 잘 인지하지 못하고 있을 뿐인 바, 단지 눈에 띄는 성과가 보이지 않는다는 이유로 나노기술, 나노산업 육성에 소홀히 해서는 안 될 것임
- 나노기술 분야는 전세계적으로 볼 때 우리나라가 선도적으로 투자한 분야이며, 우리나라가 first mover로서의 역할을 잘 하고 있는 분야인 바, 단기간에 가시적인 사업화 성과가 잘 보이지 않는다고 질책할 것이 아니라, 꾸준한 투자와 육성이 절실히 필요함

그림\_21 가트너 그룹의 Hype Cycle



Source: Gartner (July 2007)

참고문헌

- 나노·소재 분야의 신사업 창출 전략 수립, 박종구, 2015
- 2014 나노융합산업조사, 산업연구원, 2015.06
- 제1기 나노기술종합발전계획, 국가과학기술위원회, 2001.07
- 제2기 나노기술종합발전계획, 국가과학기술위원회, 2005.12
- 제3기 나노기술종합발전계획, 국가과학기술운영위원회, 2010.12
- 제4기 나노기술종합발전계획 : 대한민국 나노혁신 2025, 국가과학기술심의회, 2016.04
- 나노기술산업화전략, 산업자원부, 2001.07
- 나노융합산업 발전전략, 국가과학기술운영위원회, 2009.03
- 나노융합확산전략, 지식경제부, 2012.11
- 나노기술산업화전략, 미래창조과학부, 2015.04
- 2015 나노기술연감, 국가나노정책센터, 2016 하반기 발간 예정

[www.nanotechproject.org/cpi/about/analysis/](http://www.nanotechproject.org/cpi/about/analysis/)

Analysis of companies reporting nanotechnology publications and/or patent records (applications or grants, all patent offices, 1990–July 2008), based on Georgia Tech global database of nanotechnology publications and patents.





나노 기술 및 산업 동향

