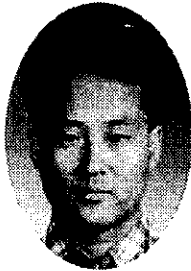


## 2000년대의 기술 - Nano Technology



주 병 권

(한국과학기술연구원 정보소재연구센터 선임연구원)



김 회 중

(한국과학기술연구원 박막기술연구센터 센터장)

원자와 분자 수준에서의 정밀한 제어를 통해, 숨털 같은 무게로 강철에 이르는 강도를 갖는 재료를 만들어 내고, 국회 도서관에 소장하고 있는 방대한 자료들을 각설탕만한 소자 내에 담을 수 있다면 얼마나 놀라운 일인가? 암 세포가 만들어지기 시작할 때부터 인체 내에서의 즉시 치료가 가능하고, 극히 작은 입자들을 통해 오염되고 있는 강물들을 수정같이 맑은 물로 정화할 수 있다면..... 이는 20년 이상이 소요될지도 모르는 일이나 그 중요성은 한 세기를 지탱할 것이다. 우리는 나노 테크놀러지를 실현하기 위해 연간 5억불에 이르는 재원을 투입할 것이며, 그 노력은 앞으로 더욱 배가될 것이다. - 미국 대통령 William J. Clinton

### 1. 머리말

20세기에서 21세기로 넘어오면서 마이크로 세계(1 마이크로는 백만 분지 1 미터)는 나노 세계(1 나노는 십억 분지 1 미터)로 전이되고 있다. "나노"라는 어휘는 지난 수 년 동안 언급되기 시작하면서 최근에 이르러 나노 분말, 나노 튜브, 나노 리소그래피, 나노 소자 등을 통하여 매우 친근하게 받아들여 지고 있다. 특히 미국 정부에서는 범 국가차원의 전략적 연구분야로 나노 기술(Nano Technology)의 육성(NNI : National Nano-technology Initiative)을 발표하고, 일본과 유럽 등에서 연간 1억불 이상의 연구비가 투입되

면서 그 중요성이 더욱 고양되고 있다. 우리 나라에서도 금년에 시작될 프론티어 21세기 사업의 일환으로 연간 100억 원에 이르는 나노 기능 소자 사업이 발전되면서, 최근 수 년 동안 독립적으로 수행되어 온 나노 관련 연구들이 하나의 통합된 축을 중심으로 하여 움직여질 전망이다. 본 고에서는 물리, 화학, 생물, 고분자, 금속, 반도체, 광, 전기, 전자, 기계 등 나노 기술과 연관될 수 있는 분야들의 연구자들에게 앞으로 전개될 나노 기술 세계를 소개함을 목적으로 한다. "나노"라는 이름과는 상반되는 이 "거대한 세계"를 다루기에는 저자의 식견도 부족하고 지면도 제한되어 있어 기술의 일반적인 아웃 라인만을 간단히 제시하고자 한다.

### 2. 나노 기술의 개요

나노 기술은 "현실"보다는 "비전"에 해당하는 기술이다. 나노 기술이 포괄하는 영역을 기하학적으로 본다면 대략 1 nm에서 100 nm 정도의 범위로 이를 Nanoscale length라 하며, 1 nm-scale 이하에서 비롯되는 합성 화학과 100 nm 이하의 가공을 지향하는 집적 회로용 리소그래피의 중간 영역에 해당한다. 기능적인 관점에서 볼 경우, 기능체의 크기가 나노 스케일에 이르면서 일어나는 현상들, 즉 양자 효과나 마그네틱 스핀 현상 등으로 대표되는 메커니즘을 수반하는 구조 및 소자 기술, 이를 활용하는 시스템 기술도 나노 기

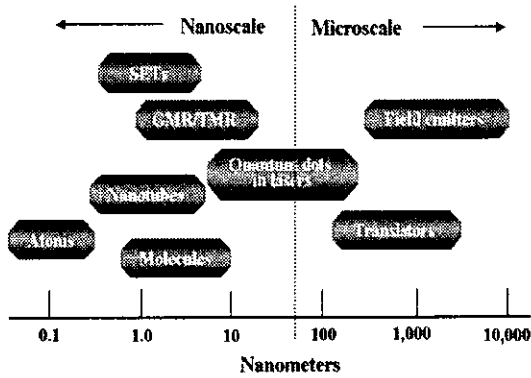


그림 1. 기능성 소재들의 스케일 분류

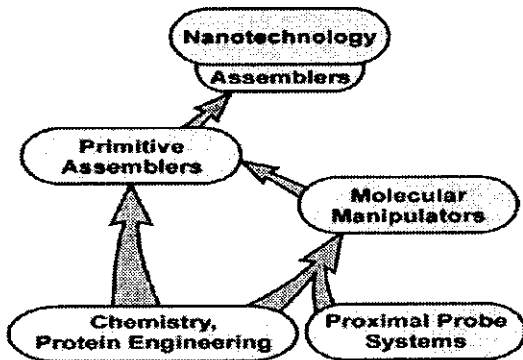


그림 2. 화학적 (Bottom-up) 방식을 통한 나노 스케일 접근 체계

술에 포함될 수 있다. 그림 1에 크기 및 가능 면에서 볼 때, 나노 스케일과 마이크로 스케일 영역에 해당하는 소재의 범주들을 예시하였다.

나노 스케일을 구현하는 방법은 (Bottom-up) 식 접근과 (Top-down) 식 접근으로 분류되는 2가지 방식이 있다. (Bottom-up) 식 접근은 화학적인 수단에서 출발하는데, 각각의 원자나 분자들을 제어 조작하여 나노 구조체를 build-up하는 방식으로 합성, 자기 조립(self-assembly) 등이 주요 도구가 된다. (Top-down) 식 접근은 기계적인 가공을 주요 수단으로 하며, 벌크 재료들을 breaking-up하여 나노 구조체로 조각하는 방식으로 기계적인 밀링이나 초정밀 가공, 리소그래피 등을 이용한다. 일례로, 그림 2는 화학적인 수단을 통한 (Bottom-up) 식 접근 체계를 예시한 것이다.

### 3. 나노 재료 및 구조

나노 재료와 나노 구조를 살펴보면, 현재까지는 특정한 제한이나 분류가 있기보다는 나노 기술에 적용되는 재료들과 이에 임의의 형상을 부여한 구조체라는 다소 막연한 표현만

큼이나 그 종류도 매우 광범위하다. 나노 재료의 경우, 세라믹, 금속, 폴리머, 반도체, 유리, 합성체 등 거의 모든 재료들이 대상이 되고 있으며, 이들은 대부분 나노 클러스터, 나노 분말, 나노 입자, 나노 파이버, 나노 튜브, 나노 박막 등과 같은 다양한 형태로써 광범위한 응용 잠재성을 내재하고 있다.

최근에는 탄소 재료 고유의 특성과 이에 특수한 형상을 부여한 탄소 나노 튜브(CNT : Carbon Nano-Tube)가 수면 위에서 매우 활발한 거동을 보이고 있다. 즉, 미세한 크기(주로 수 ~ 수십 나노의 직경)와 특수한 형상, 우수한 기계적 특성(강도, 유연성, 탄성), 전기적인 선택성(도체 혹은 반도체), 특히 뛰어난 전계 방출 특성을 기반으로 하여, 기계 저장 매체(2차 전지, 연료 전지용 수소 저장체), 나노 메카트로닉스(NEMS : Nano-Electro-Mechanical Systems), 나노 전자 소자(단전하 소자), 그리고 FED(Field Emission Display)의 고성능 냉음극에서 가능성을 제시하고 있다. 탄소 나노 튜브의 주요 응용도로서 단전하 트랜지스터, 나노 트위저, 램프 및 FED에 적용된 일례를 그림 3에 나타내었다.

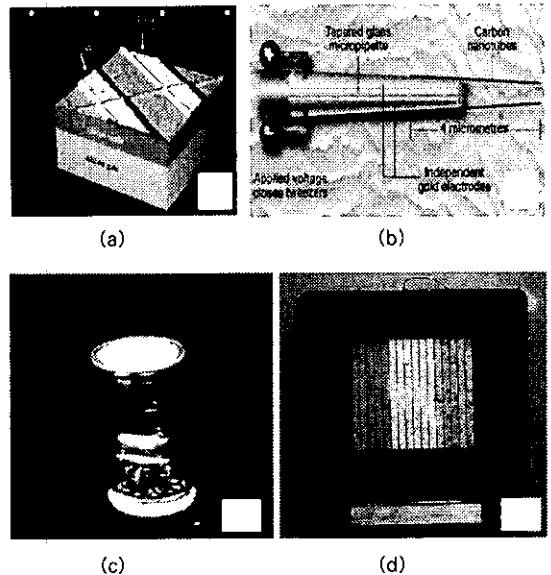


그림 3. 탄소 나노 튜브의 적용 일례  
(a) 단전하 트랜지스터,  
(b) 나노 트위저 (Harvard 대, 미국)  
(c) 램프 (Ise 전자, 일본),  
(d) FED (삼성, 한국)

### 4. 나노 공정

나노 재료, 나노 구조체 및 소자, 나노 시스템 등을 실현하는 데에는 기존에 활용되고 있는 화학, 기계, 재료, 반도체,

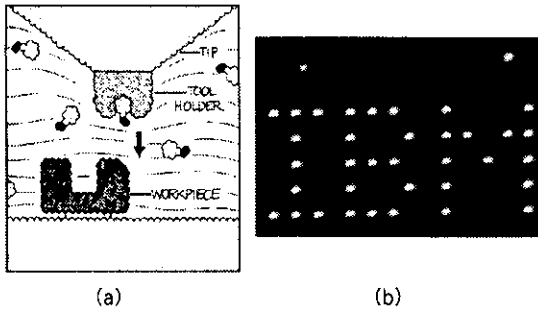


그림 4. 나노 분자 조작 기구의 개념도(a)와 Xe 원자로 기록된 IBM 로고(b)

전기·전자, 생명 공학 등과 관련한 다양한 공정 기술들이 근간이 되며, 이의 기반 위에 나노 스케일을 제공하는 공정 기술이 마련되어야 한다. 대표적인 공정 기술로는 <Bottom-up> 식 접근의 경우 자기 조립과 입자 조작 공정, <Top-down> 식 접근의 경우 나노 수준의 가공 및 리소그래피 공정을 주목할 만 하다. 나노 입자 조작(Nano Particle Manipulation)의 경우 나노 스케일의 팁을 이용하여 원자 혹은 분자를 개별적으로 조작하는 공정으로 나노 패터닝을 비롯하여 분자 단위의 결합, 이를 이용한 Bio-engineering 등에 활용될 수 있다. 일례로 그림 4의 (a)와 (b)에 각각 나노 스케일의 분자 조작 기구의 개념도와 원자 조작법을 이용하여 35개의 Xe 원자들로 쓰여진 세계에서 가장 작은 로고를 보였다.

특히, 실리콘 반도체 소자의 경우, 지속적으로 추구해 온 고집적화와 대용량화를 향한 욕구를 충족시키기 위해 미래형 애로 기술의 타개책을 나노 기술의 범주 내에서 모색하고 있으며, 이는 16 G-DRAM부터 적용될 0.1  $\mu\text{m}$  급 이하의 선평 구현을 위한 나노 리소그래피로부터 시작될 전망이다. 즉, 광학적 리소그래피의 한계치인 0.1  $\mu\text{m}$  급 이하의 선평 구현을 위해, 전자선이나, 극자외선, X-ray 등을 이용하는 차세대 리소그래피(NGL : Next Generation Lithography)와 SPM(Scanning Probe Microscopy), 나노 Imprint 등을 이용하는 혁신적인 리소그래피(Innovative Lithography) 기술이 개발되고 있다.

### 5. 나노 소자 및 시스템

나노 기술의 융합체인 나노 소자와 시스템 부문은 나노 전자 소자(Nano Electronics), 나노 기전 소자(Nano Mechatronics), 나노 광전 소자(Nano Optonics), 그리고 나노 자기 소자(Nano Magnetics) 등으로 구분될 수 있다. 전자 소자의 경우 단전하 소자를 비롯한 극소형-고집적 반도체 소자가 주류를 이루고, 기전 소자의 경우에는 현재의

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 스케일의 다음 세대인 NEMS(Nano-Electro-Mechanical Systems) 부문, 광전 및 자기 소자의 경우에는 차세대 초고속-대용량 무선 통신용 정보 처리 및 저장 소자 부문이 대표하고 있다.

아울러, 나노 단위의 직경을 갖는 초미세 탐침(Nano Probe)을 응용한 소자들이 연구개발되고 있는데 고집적 진공관, 주사형 탐침을 이용한 패터닝 기록 및 판독분석 모듈, 입자 조작 기구 등이 이에 해당한다. 예를 들어 그림 5는 3극형 나노(마이크로) 진공관들로 수직형에 대한 개념도와 수평형 구조에 대한 실물 사진을 보인 것이다. 진공 내로 전자들이 진송되므로 기존의 MOS(Metal-Oxide-Semiconductor) 트랜지스터에 비해 상대적으로 고속 스위칭이 가능하고, 외부 방사선에 의한 영향이 적으며, 동작 온도 영역이

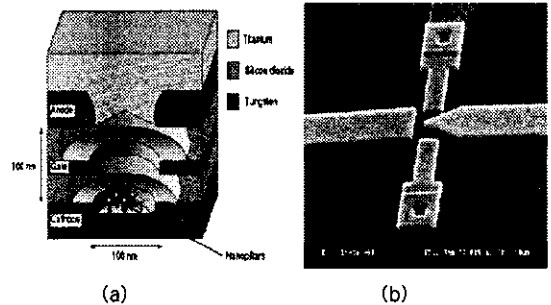


그림 5. 극소형 진공관의 개념도(Univ. Cambridge) (a) 및 수평형 소자의 모양(KIST) (b)

넓다는 특징이 있다.

이와 함께 주사 탐침형 현미경의 경우 탐침이 미세하여 질수록 분석 한계와 분해능 등이 향상되며, 따라서 탐침의 원자 스케일화를 위한 노력도 진행되고 있다. 주사 탐침부의 개념도와 이를 보다 미세화 하기 위해 마이크로 팁의 끝 부분에 나노 가공 기술을 접목하여 10 nm 이하의 팁 반경을 갖는 나노 팁을 구성한 사진을 그림 6에 나타내었다.

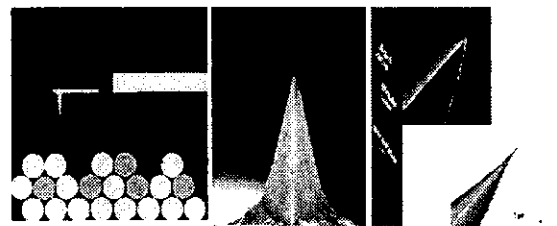


그림 6. 주사 탐침형 현미경에 있어서 주사 탐침부의 개념도 및 나노 팁의 모양

## 6. 미국의 나노 기술 지원 분석

미래의 미래, 가시 영역을 벗어난 기술을 전망한다는 것은 실로 어려운 일이며, 기술의 특성과 국의 기술 선진국들의 연구 의욕을 통하여 기술의 중요성을 유추해 볼 수 있다. 최근 미국에서 발표된 나노 기술 관련 조사 분석 보고서에 수록된 주요 내용을 탐색해 보면 나노 기술의 발전 전망 및 중요성은 실로 자명하다. 표 1은 1997년도에 기술 선진국들을 대상으로 하여 정부 차원에서 나노 기술을 지원한 내역으로 미국, 일본의 경우 이미 1억불을 넘고 있음을 볼 수 있다.

표 1. 나노 기술에 대한 기술 선진국들의 지원 현황 (1997)

국 가	년간 예산(\$M)
미 국	116
일 본	120
유 럽	128
기타(러시아, 중국, 캐나다, 호주, 한국, 대만, 싱가포르)	70
총 계	432

특히 미국의 경우, 정부 차원에서 나노 기술의 중요성 및 대규모 지원 계획(NNI)이 확정되면서 항공 우주, 생명 농학, 환경 에너지, 재료 산업, 의약 의료, 전자 컴퓨터, 보안 안전, 과학 교육 등 전 분야에 걸쳐 나노 기술의 파급 효과를 기대하고 있다. 높은 활용성을 가질 것으로 예측하고 있는 분야에 대해 구체적으로 살펴보면, 메모리 용량의 극대화, 원자 혹은 분자 수준으로부터의 재료 조립, 저 중량의 초 고 강도 재료 개발, 컴퓨터의 초고속화, 신체 결합 세포의 초기 진단 및 in-situ 치료, 초미세 입자 세정을 통한 환경 정화, 태양 전지를 비롯한 특수 기능성 소재의 효율 배가 등이 이에 해당한다.

표 2와 표 3에 미국의 나노 기술 지원에 대해 기관별 지원 규모 및 내역을 2000년과 2001년을 기준으로 하여 요약하였다. 범 국가적인 차원의 사업임을 고려하여 총 6개의 기관이 연구 지원을 하고 있으며, 지원 규모도 2000년 기준 2억 7천만 불에서 2001년에는 1.8 배가 증가한 4억 9천만 불 정도가 투입될 예정이다. 그 지원 내용을 살펴보면, 기초 및 혁신적인 연구, 대형-장기간 중점 연구(재료 분야, 전자-광전-자기 분야, 의료-진단 분야, 환경 분야, 에너지 변환-저장 분야, 항공-우주 분야, 운송-산업 분야, 보안-안전 분야 등), 우수 센터 및 연계 체계, 공동 연구 및 활용을 위한 인프라 구축, 교육 및 훈련을 통한 인력 양성 등으로 나노 기술에 대한 확고한 연구 개발 체계를 구축하고자 하는 의지를 볼 수 있다.

표 2. 미국의 기관별 나노 기술 사업 지원 현황 및 계획

	2000년 (\$M)	2001년 (\$M)	Percent Increase
National Science Foundation	\$97M	\$217M	124%
Department of Defense	\$70M	\$110M	57%
Department of Energy	\$58M	\$94M	66%
NASA	\$5M	\$20M	300%
Department of Commerce	\$8M	\$18M	125%
National Institutes of Health	\$32M	\$36M	13%
총 계	\$270M	\$495M	83%

표 3. 미국의 나노 기술 지원 내역

	기초 및 혁신적 연구	중점 연구	센터 우수연구 집단	인프라 구축	교육 및 훈련	총 계
2000년	\$87M	\$71M	\$47M	\$50M	\$15M	\$270M
2001년	\$170M	\$140M	\$77M	\$80M	\$28M	\$495M

## 7. 맺음말

나노라는 미지의 세계에 관하여 단지 호기심과 짧은 식견만을 가지고 나름대로 정리하여 보았다. 최근의 활발한 연구 개발 동향, 범 국가적 지원 체계, 무한한 잠재성 등에 비추어 볼 때 이 작은 세계는 거대한 발걸음으로 우리에게 다가올 것이 틀림없는 듯 하다. 극미세 입자들이 모여 구조체와 소자를 만들고 궁극적으로는 시스템으로 이어질 기술적 연계 구도하에서 우리가 어떠한 접근 방식을 취할지, 무엇을 만들어낼지, 어느 곳을 지향할지..... 이러한 질문들에 대한 대답이 준비되어야 할 시점이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Handbook of Nanostructured Materials and Nanotechnology (Vol.1 ~ Vol.5), edited by

Hari Singh Nalwa, Academic Press, USA  
(2000)

- [2] National Nanotechnology Initiative, National Science and Technology Council, USA (2000)
- [3] Nanostructure Science and Technology, WTEC Panel Report, International Technology Research Institute, USA (1999)
- [4] Unbounding the Future: the Nanotechnology Revolution, Foresight Institute, USA (1997)

## 저 자 약 령

**성명 : 주 병 권**

❖ 학 령

1995년 고려대학교 전자공학과 공학박사(반도체 공학 전공)

❖ 경 령

1996년 Univ. South Australia 방문연구원

1988년 ~ 현재 KIST 정보소자센터 선임연구원

✽ E-mail:

**성명 : 김 희 중**

❖ 학 령

1988년 KAIST 재료공학과 공학박사(재료공학전공)

❖ 경 령

1978년 ~ 1997년 : KIST 재료연구부 책임연구원

1997년 ~ 현재 : KISRT박막기술센터 센터장

✽ E-mail: [hjikim@kist.re.kr](mailto:hjikim@kist.re.kr)