

〈총론〉 나노 테크놀로지



주 병 권

(KIST 마이크로시스템연구센터 책임연구원)

1. 서론

나노기술을 완성하기 위한 방식으로는 물리적인 접근, 화학적인 접근, 그리고 생체학적인 접근 방식이 있으며, 이때 사용되는 핵심 도구들은 표 1에 보인 바와 같이 소재 및 구조 기술, 공정 및 제조 기술, 그리고 소자 및 시스템 기술로서 분류할 수 있다. 나노 소재의 경우, 세라믹, 유리, 금속, 폴리머, 반도체, 그리고 이들의 합성 물질 등이 전반적으로 대상이 되며, 나노 구조의 경우, 자연적 혹은 인위적으로 만들어진 소재가 지니고 있는 특정한 형태, 예를 들어 나노 결정, 막대, 박막, 섬유, 입자, 층, 튜브 등을 들 수 있다. 각각의 나노 구조들은 집합됨으로써 임의의 형상이나 성능을 구현하는 'Building block' 역할을 한다.

나노 공정 및 제조 기술의 경우, 〈Bottom-up〉 접근 방법으로서 중합이나 합성, 조립 그리고 조작 등이 주로 적용되며 이는 화학 및 생물학적인 개념을 토대로 하여 개별 원자나 분자등으로부터 출발한다. 〈Top-down〉 접근 방법은 리소그래피와 정밀 가공을 통하여 이루어지는데, 기존의 반도체 전기 기

술의 극미세화와 기계적인 극한 가공을 근간으로 하며, 벌크 소재의 가공이나 절단이 출발점이 된다. 나노 소재, 구조, 공정, 제조 과정을 통하여 얻어지는 나노 소자 및 시스템 기술은 현재로서는 바이오, 전자, 자기, 재료, 기계, 광 분야 등을 사정권 내에 두고 있으나, 기술의 진보에 따라 나노 시스템으로 통합되는 과정으로 확대될 것이다.

표 1. 나노 요소 기술의 분류

Nano-Materials and Structures	Materials Ceramic, Composite, Glass, Metal, Polymer, Semiconductor, etc. Structures(Building blocks) Clusters, Particles, Fibers, Tubes, Layers, etc.
Nano-Process and Fabrication	Synthesis, Assembly Lithography, Machining Manipulation, Analysis
Nano-Device and System	Biological, Electrical, Magnetic, Material, Mechanical, Optical-based Devices and Nano-Systems

2. 나노 소재 및 구조 기술

나노 크기의 building block, 즉 입자나 분말 소재 및 이들로 이루어지는 구조들은 그림 1에 보인 바와 같이 0~3차원계로 구분할 수 있다. 즉, 0차원계는 입자나 덩어리 형태(Clusters)를 띄고, 1차원계는 다층 구조(Multilayers), 2차원계는 미립자 층이 형성된 구조(Ultrafine-grained overlayers), 그리고 3차원계는 나노 상을 갖는 구조(Nano-phase)에 해당하며, 각각을 구성하는 요소의 크기는 일반적으로 100nm를 넘지 않는다. 나노 소재들은 이러한 형태를 기본으로 하여 구성되어 향상된 성능과 새로운 특성을 도출하기 위하여 개발되고 있다. 물리 및 기계적인 특성에서 볼 때, 나노 재료는 치밀도의 향상 과정 등을 통하여 기존 재료들에 비해 잠재적으로 100~1,000배 정도의 특성 변화나 성능 향상을 가져올 수 있다. 즉, 입자 크기, 입계(Grain boundary)의 미끄럼 거리(Slip distance), 결합 크기 등이 감소하고 입계의 응력 완화 정도가 증가하여 강도나 내구성을 향상시킬 수 있고, 입계 등에서 양자의 스캐터링이 증가하게 되어 열 전도도는 감소할 확률이 높다. 이 외에도, 확산성, 열 팽창성, 밀도, 탄성도 등을 변화시켜 기존 소재에 비해 한층 향상된 성능을 얻을 수 있는 여지가 충분하다. 그림 2에 나노 소재의 적용 일례로서,

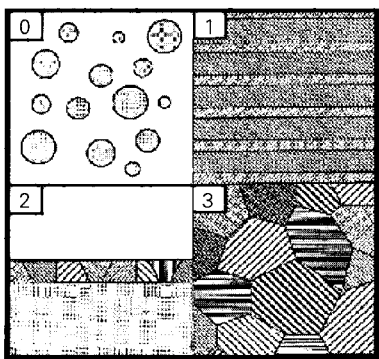


그림 1. 나노 소재의 기본적인 0~3차원계.

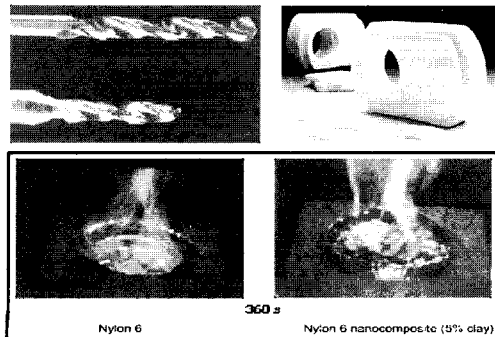


그림 2. 나노 소재를 활용한 제품군의 일례.

PCB(Printed Circuit Board)에 홀을 가공하기 위하여 사용되는 마이크로 드릴 팁에 WC와 VC 나노 분말을 이용하여 강도를 한층 강화시킨 경우, 세라믹 나노 입자들을 사용하여 정교하고 우수한 내구성을 지니도록 제조된 모형들, 그리고 나노 합성물로 이루어진 내열성 플라스틱 제품들을 선보였다.

나노 소재 기술의 경우, 재료 및 구조적인 특성 뿐만 아니라 전자, 자기, 고분자, 화학, 바이오 등의 분야에서도 기능적인 특징을 제공한다. 그림 3에 보인 것은 실리콘 (001) 표면에 배열된 게르마늄 원자들의 STM(Scanning Tunneling Microscope) 영상으로 {105} 결정면으로 둘러 쌓인 피라미드 형태로 배열되어 있다. 이러한 피라미드의 폭은 10nm, 높이는 1.5nm로서 게르마늄 원자의 수와 실리콘 표면 특성과의 상관 관계, 즉 증착되는 층과 기판간의 격자 부정합으로 따른 응력으로 인하여 자기 조립(Self-assembly) 과정을 거쳐 자발적으로 형성되며, 양자점(Quantum dot)으로 동작할 수 있다. 이와 함께, 48개의 철 원자들로 이루어진 양자 우물(Quantum corral) 구조를 함께 보였는데, 이들로 구성된 원의 직경은 7.3nm에 불과하다. 하부 기판은 구리이며, 표면에 존재하는 전자들의 무리, 소위 2차원적인 전자 가스가 철 원자들에 의해 포획되어 있다. 이와 같은 양자 구조들은 나노 구조의 양자 효과와 관련한 물성을 연구하는 데에 유용하게 적용될 수 있다.

나노 소재들을 기존의 소재에 함유시킴으로써 새로운 특성을 도출하는 것도 중요한 시도의 하나이다. 예를 들어 자동차의 연료 절감 등을 위하여 금속을 대체할 수 있는 가볍고 내구성이 우수한 재료들이 요구되며, 이의 후보로서 나노 입자와 고분자가 결합된 나노 합성 소재를 고려할 수 있다.

이러한 소재를 성형, 가공하여 가볍고 강하며, 내부식성이나 소음 완화 등의 기능이 우수하여 금속을 대체할 수 있는 구조를 제조할 수 있으며, 그 용도도 자동차 소재 이외에 건축 분야에서는 파이프나 피팅류, 가전 및 산업 용품의 하우징 등으로 확장될 수 있다.

탄소 소재 및 구조물의 경우, 수직이나 수평 판상 구조, 튜브형 구조 등과 같이 다양한 결정 구조를 가지며, 이와 함께 크기나 밀도, 인장 강도, 탄성도, 전류 수송 능력, 전계 방출성, 열 전도도 등에서 다양한 특징이 있어 미래형 소재로서 활

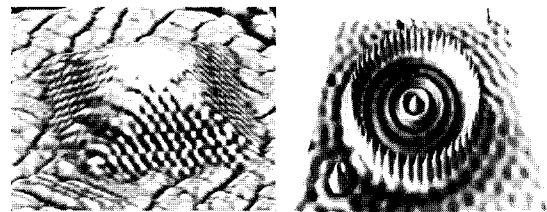


그림 3. 원자 배열을 이용한 양자 구조의 STM 영상.

표 2. CNT의 특징.

특징	단일벽 탄소 나노 튜브(SW-CNT)	비교
크기	0.6~1.8nm 직경	전자선 리소그래피에 의한 선폭 구현~50nm
밀도	1.33~1.40 g/cm ³	Al : 2.7g/cm ³
인장 강도	4.5×10 ¹⁰ Pa	고강도 합금~2×10 ⁹ Pa
탄성	휨 후 복원시 손상이 없음.	금속 및 탄소 섬유 : 입계에서 휘어짐.
전류 수송	최대 1×10 ⁶ A/cm ²	구리선 : 최대 1×10 ⁶ A/cm ²
전계 방출	1~3V/μm turn-on 전압	Mo-tip : 50~100V/μm turn-on 전압
열 전달	6,000W/m·K	다이아몬드 : 3,320W/m·K
온도 안정성	2,800°C(진공), 750°C(대기)에서 안정함.	집적 회로내의 금속선 : 600~1,000°C에서 녹음.
가격	\$ 500~1,000/g	금~\$ 10/g

표 3. CNT의 응용 구조 및 소자 일례.

구조 및 소자	특징 및 장점	해결하여야 할 점	실현 가능 순위
고강도 소재	고강도, 탄성, 유연성	가격 절감	0
수소 및 이온 저장	내부 공간 활용	저장 밀도 증가	1
기계적 메모리	강도, 전도성	스위칭 속도 개선	2
나노 트위저	미소 크기, 전도성	접착 방지	2
생체 처리용 팁	미소 크기	응용 인자 확장	3
가스 감응 물질	표면적 저항, 의존성	선택도 부여	3
SPM 팁	미소 크기	Tip 제조 공정 개선	4

용 가능성이 높다. 예를 들어 층간의 거리가 3.4Å에 불과한 탄소 수평 판상 구조는 수소 저장체로서 사용할 수 있는데, 단위 그램 당 수 리터의 수소를 저장할 수 있으며, 산소나 질소 등 다른 분자들에 대한 필터링 역할도 한다. 이와 같은 탄소 관련 소재 연구의 대부분은 탄소 나노 튜브(Carbon Nano Tube : CNT)에 집중되고 있는데, CNT의 특징과 응용성에 대하여 각각 표 2와 표 3에 요약하였다.

CNT는 직경이 수 nm로 리소그래피 공정으로는 구현할 수 없을 정도로 가늘며 전도도를 조절할 수 있는 특징으로 인해 초고집적 전자소자, 즉, 단전자 트랜지스터(Single Electron Transistor : SET)나 양자 소자 등을 구성하는 요소가 될 수 있다. 이의 인장 강도는 고강도 합금의 10배 이상으로 고강도 섬유 소재로 활용할 수 있으며, 고유의 기계적인 특성, 즉 미세 튜브 모양, 내구성, 유연성 및 탄성 등을 고려할 때 NEMS(Nano-Electro-Mechanical Systems)의 주요 부품, 즉 나노 도선, 파이프, 피펫, 트위저, 캡슐 등에도 응용이 가능하다. 또한, CNT가 일함수를 낮출 수 있고 높은 종횡비의 tip 구조를 갖는 점을 고려하면, 전자총으로서 전계 방출 표시기(Field Emission Display : FED), 평면 광원, 전자선 리소그래피 등과 같은 전계 방출 현상을 이용하는 부문에 유리하게 적용할 수 있다. 아울러, 내부가 비어 있고, 표면적이 넓은 특징을 이용할 경우, 모세관(Capillary) 현상, 수소를 비롯한 기체 저장이나 가스 센서용 감응 재료로서 활용이 가능하다.

3. 나노 공정 및 제조 기술

〈Top-down〉 접근 방법의 핵심 기술인 리소그래피는 DRAM(Dynamic Random Access Memory)를 기준으로 할 때, 2005년을 분기점으로 하여 16Gbit-0.1μm, 즉 100nm의 시대로 접어들게 된다. 이는 기존의 광 리소그래피의 실질적인 한계이며, 이의 타개를 위해 나노 리소그래피 기술로서 차세대 리소그래피(Next Generation Lithography : NGL)와 혁신적인 리소그래피(Innovative Lithography : IL)가 마련되어야 한다. NGL의 경우, 현재 전략적인 수순을 밟아 산업용으로서 개발이 진행되고 있는 기술로서, 전자선(E-beam), 극자외선(Extreme Ultra Violet : EUV), X 선, 그리고 이온 빔 등을 이용한 리소그래피가 이에 해당한다. IL은 기존의 전략적인 구도에서는 다소 이탈되어 있는 연구 중심의 기술로서, 개발이 완료되면 기존의 틀을 획기적으로 깰 수 있는 모험성이 강한 기술이며, 주사형 탐침 현미경(Scanning Probe Microscope : SPM)을 이용한 리소그래피와 나노 각인(Nano-imprint)을 이용하는 방법 등을 들 수 있다.

나노 각인 리소그래피(Nano-Imprint Lithography : NIL)는 나노 패터닝 기술의 하나로서, 그림 4에 보인 바와 같이 광선을 조사하여 레지스트의 화학적 구조를 변화시키는 대신에 몰딩에 의해 레지스트의 형상을 물리적으로 변형시켜 패턴을 얻는다. 이는 기술적으로 볼 때 광선에 의한 리소그래

피에서 나타나는 회절, 스캐터링, 화학 반응 등의 문제점들을 피할 수 있으며, 경제적으로는 공정 가격과 생산성에서 우수한 잠재력을 지니고 있다. 이러한 NIL 방법은 집적 회로 뿐만 아니라 바이오, 화학 공정, 소재 가공 등에서도 활용될 수 있다. NIL로 가공된 10nm 직경의 나노 홀 패턴 어레이들을 그림 4에 함께 보였다.

나노 머시닝은 MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems)를 한 차원 scale-down한 기술인 NEMS의 핵심 가공 기술로서, 100nm 이하의 전자-기계적인 구조물을 특징으로 하는 구조, 소자, 그리고 시스템에 적용된다. 현재로서는 MEMS 기술을 토대로 한 반도체 가공에 있어서 나노 스케일을 얻을 수 있도록 변형 내지는 특수한 공정을 접목하고 있으며, 점차적으로 안정된 공정이 확보되어 갈 전망이다. 일례로서, 그림 5에 패터닝-식각-나노 필라 가공-증착 후 식각 과정을 통하여 제조된 나노 주입기, 산화막 패터닝, 측면 방향으로의 결정 의존성 식각과 실리콘이드 식각 장벽을 이용한 선택적 식각에 의해 제조된 나노 도선 및 나노 프루브, 그리고 CNT의 선택적 성장 공정을 이용한 나노 튜브 탐침의 모양을

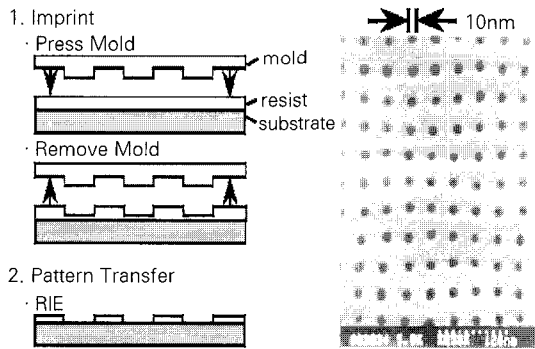


그림 4. 나노 각인 리소그래피의 공정도와 가공된 패턴.

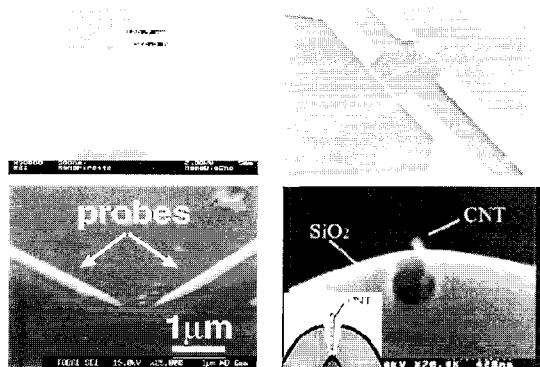


그림 5. 실리콘 나노 머시닝 공정의 적용 일례(나노 주입기, 나노 도선, 나노 프루브, 나노 탐침).

예시하였다. 이와 같은 반도체의 나노 머시닝은 나노 패터닝 기술을 비롯하여, 선택적 측면 습식 식각, 열 산화막 성장 후 식각에 의한 산화막 성장 프로파일, 선택적인 박막 및 나노 소재의 증착과 성장, 박막 구조물의 물리적 거동 등을 조합하여 적용하고 있다.

나노 조작(Nano manipulation)은 나노 레벨의 도구를 이용하여, 원자나 분자와 같은 입자를 비롯한 나노 구조체들을 조절, 이동하는 과정을 일컬으며, 컴퓨터로 제어되는 SPM 팁과 나노 트위저, 그리고 이들을 제어하는 나노 변위 시스템 등으로 분류 및 구성된다. 그림 6은 CNT를 이용한 나노 전자 소자를 제조하는 과정의 일부로서 AFM(Atomic Force Microscope) 팁을 이용하여 CNT를 조작(위치, 모양, 방향)하는 개념도이다. 즉, 비접촉 모드에서 팁을 주사하여 영상을 얻은 뒤, 팁을 표면에 이르도록 내려놓고 마치 작은 쟁기와 같이 CNT를 이동시켜 간다. 이와 함께, CNT가 실제로 조작되어 이동하는 모습을 나타내었는데, 실리콘 표면 위에서 CNT가 조작되는 모습을 6 프레임의 AFM 영상으로 보였다. CNT의 길이는 2.5 μ m에 불과하며, 최종적으로 "θ" 문자를 표시하고 있다. 이와 함께 나노 조작에 의하여 원자를 조작, 배열하여 얻어진 결과도 보였다.

나노 분석의 경우, 현재에는 나노 영역의 형상을 얻고, 나노 크기의 입자나 구조체들을 취급 및 평가하여 기계-물리-전자-화학적인 데이터를 얻기 위해 SPM을 기반으로 한 측정이 주로 행하여지고 있다. SPM은 원자 현미경으로 일컬어지는데, 제1세대인 광학 현미경(최고 배율~수천 배)과 제2세대인 전자 현미경(최고 배율~수 십만 배)을 잇는 제3세대 현미경으로서 최고 배율이 수 천만 배에 이르러 0.1~0.5nm 크기를 갖는 원자들을 개별적으로 관찰할 수 있다. TEM(Transmission Electron Microscope)의 분해능도 수평 방향으로는 원자 단위에 이르나 수직 방향으로는 이보다 떨어져 원자 각각을 관찰하기는 어렵다. 이와 같이 SPM은 100nm에서 0.1nm에

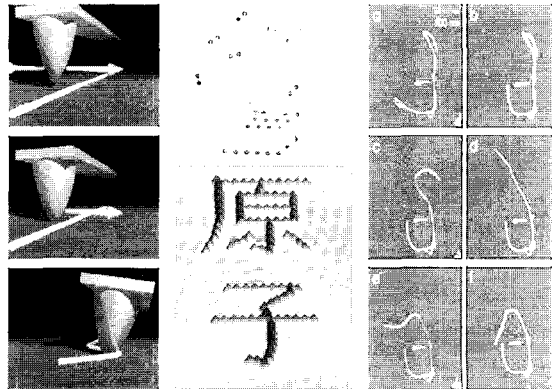


그림 6. 나노 조작 공정에 의한 CNT 이동 및 원자 배열.

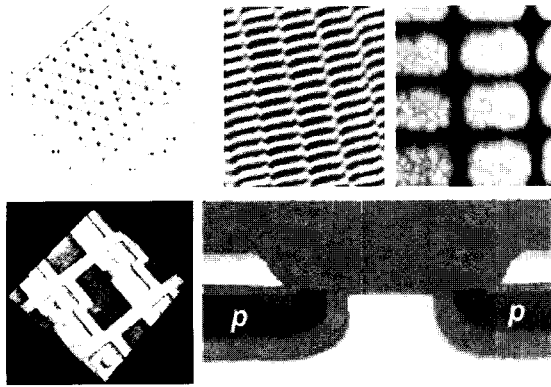


그림 7. SPM을 이용한 나노 분석 영상의 일례.

이르는 영역을 관찰할 수 있을 뿐만 아니라, 나노 리소그래피, 나노 영역에서의 조작 및 핸들링 등의 기능까지 가능하다는 특징이 있다.

SPM의 종류를 살펴보면, 원자 현미경 계열 중 처음으로 등장한 STM과 부도체 시료의 측정을 가능케 한 AFM을 비롯하여, 물질의 형상 이외에 다른 특성들을 측정할 수 있는 MFM(Magnetic Force Microscope), LFM(Lateral Force Microscope), FMM(Force Modulation Microscope), EFM(Electrostatic Force Microscope), SCM(Scanning Capacitance Microscope) 그리고 EC-SPM(Electro-Chemistry SPM) 등을 포괄적으로 의미한다. 이 외에도 물질의 광학적 특성과 온도 분포를 측정하는 NSOM(Near-field Scanning Optical Microscope)와 SThM(Scanning Thermal Microscope) 등도 특수 용도로서 사용되고 있다. 그림 7에 SPM에 의해 얻은 데이터 영상들로서, 실리콘(111) 표면의 원자 배열(STM), 다결정 실리콘의 입계 모양(AFM), 컴퓨터용 하드 디스크의 자기 분포(MFM), 그리고 반도체 회로의 도핑 프로파일(SCM)을 예시하였다.

특히, AFM을 이용하면 영상 데이터 뿐만 아니라 나노 소재 및 구조체들의 표면 및 인장 강도, 바이오 물질의 반응력(Interaction force)과 같은 기계적, 물리-화학적 특성과 전기 전도도, 항복 전압 등의 전기적인 특성 등을 평가할 수 있다. 예를 들어, 그림 8에 보인 바와 같이 AFM 팁으로 바이오 분자들을 조작하여 두 개의 DNA(DeoxyriboNucleic Acid) 결합이나 항원-항체 쌍의 연결이 끊어지는 점을 측정함으로써 상호 반응력, 인력이나 반발력 등을 pN 단위로 측정할 수 있다.

4. 나노 소자 및 시스템 기술

나노 기술을 기반으로 하여 현재 제품화가 실현된 분야는 주로 소재 분야로서, Carbon Nanotechnologies사의 CNT 소

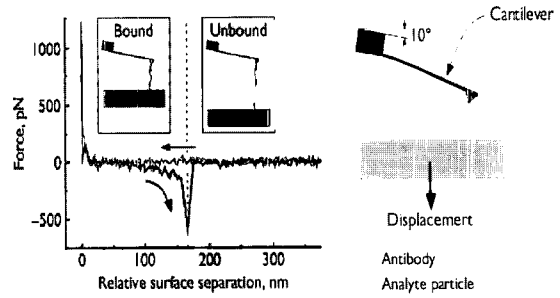


그림 8. AFM 팁을 이용한 상호 반응력 측정.

재, Exxonmobil사에서 개발된 것으로 기술된 제조에 촉매로 사용되는 제올라이트, Gilead Sciences사의 약물 전달 기구에 적용되는 리포솜, IBM사의 데이터 저장 매체용 GMR(Giant Magneto Resistance) 나노 박막, 그리고 Nanophase Technologies 사의 기능성 나노 분말 등을 들 수 있다. 그러나 나노 기술의 본격적인 응용이며 충격적으로 기여할 수 있는 분야는 나노 소재 및 구조, 공정 및 제조 기술을 통하여 도출될 수 있는 나노 소자 및 시스템 분야를 들 수 있다. 이러한 소자 및 시스템 기술의 종류를 살펴보면, 궁극적으로는 인체 주입용 나노 로봇을 지향하는 바이오 메디칼 분야, 극미세 집적 회로와 고기능 센서를 중심으로 하는 전자 및 반도체 분야, NEMS 자체인 전자-기계 분야, 미래형 통신 부품 및 시스템을 위한 광전자 분야, 저장 매체의 진일보를 위한 자기 분야, SPM으로 대표되는 분석 분야, 그리고 오염원 제거 및 정제가 주목적인 환경 분야 등으로 대표된다.

바이오 메디칼 분야의 경우, 현재에는 바이오 물질의 검출, 분리, 처리 등의 기능을 수행하는 μ -TAS(μ -Total Analysis System)나 LOC(Lab.-On-a-Chip) 등과 같은 소자 혹은 반-시스템(Semi-system) 차원의 아이템이 주요 개발 대상이 되고 있다. 이는 μ -DDS(μ -Drug Delivery System) 등과 결합하여, DNA나 항체 및 항원의 감지, 신약 물질 검출, 바이오 물질의 필터링이나 처리, 그리고 약품의 극미량 주입 등의 과정을 수행한다. 바이오 메디칼 시스템의 궁극적인 목표는 신체 이상 유무의 감지 및 정보의 전송-유해 인자의 파괴 및 절개-마이크로 수술 및 약물의 주입 등과 같은 일련의 과정들을 지능적으로 수행할 수 있는 나노 바이오 로봇의 개발이며, 현재 이러한 개념을 바탕으로 한 다양한 아이디어들이 실현되고 있다. 그림 9에 인체 주입용 나노 바이오 로봇의 구조와 거동을 가상적으로 나타내었다.

전자 및 반도체 분야의 경우, 메모리를 위주로 한 집적 회로 기술의 극미세화가 진행되면서 새로운 한계에 부딪히는 시점에서부터 나노 기술의 응용이 시작되며, 이러한 한계는 이론적인 면과 기술적인 면, 그리고 경제적인 면으로 분류하여 고려해 볼 수 있다. 이론적인 측면에서는 데이터 기록을 위한 에

너지가 최소한 열 변동 에너지(Thermal fluctuation energy, kT) 보다는 백 배 이상 커야 한다는 점(Thermal limit), 동작 에너지 및 주파수가 양자 역학적 불확정 원리가 허용하는 범위 이하에서 정해져야 한다는 점(Quantum limit), 그리고 에너지-주파수-집적도-스위칭 속도의 항으로 표현되는 전력 밀도가 일정치를 넘지 못한다는 점(Power dissipation limit)을 들 수 있다. 기술적인 측면에서의 한계는 리소그래피를 이용한 제조 및 소자의 성능 면에서 볼 때 SOI(Silicon-On-Insulator) 기판 상에서 30nm의 최소 선폭에서 나타날 것으로 보이며, 이 이하에서는 새로운 개념의 설계가 도입되어야 한다. 경제적인 측면에서의 한계는 특히 DRAM 부문에서 심각할 것으로 예측되는데, 2010년도를 향할수록 Moore의 법칙은 완만해지는 경향이 있는 반면에 칩의 기능별 가격은 현재의 변화율을 유지하려는 경향이 있다는 점에서 비롯된다.

이러한 관점에서 기존 개념을 뛰어 넘은 반도체 소자들이 개발되고 있으며, 대표적인 것으로 그림 10에 보인 바와 같이 단전자 트랜지스터(Single Electron Transistor: SET), 양자

점 기억 소자(Quantum dot memory), RTD(Resonant Tunneling Diode), CNT 전자 소자를 비롯하여 분자 전자 소자(Molecular electronic device), 자기 전자 소자(Spintronic device) 등을 들 수 있다. SET의 경우 메모리 소자에 초점을 맞추고 있으며, RTD는 다중치 논리 회로 및 메모리에서 성능이 입증되고 있다. 분자 소자와 자기 조립식 접근은 기존 스케일을 완전히 뛰어 넘는 새로운 영역의 소자 및 제조 공정을 제공할 수 있을 것이며, 자기 저장 효과를 이용하는 자기 전자 소자는 비휘발성 및 내방사선 메모리에 유용할 것으로 판단된다. 양자 현상을 이용하는 소자의 경우, 트랜지스터가 없는 컴퓨터에 이르는 길이 될 수 있을 것으로 보인다. 이러한 나노 전자 소자들은 기존 소자에 비해 상대적으로 집적도가 5~100배 정도 증가하고, 동작 속도는 10~100배에 이르며, 소모 전력은 1/50 이상으로 감소한다는 점 등을 특징으로 하고 있다. 이를 토대로 하여, 양자 소자, 자기 소자, 단전자 소자, 분자 소자 등의 개발 과정을 통하여 기능성, 속도, 전력, 집적도 등을 획기적으로 향상시키고, 이러한 특징들을 부각시킬 수 있는 소자 및 시스템들을 개발하고자 하는 방향으로 전개될 것이다.

나노 메카트로닉스, 즉 NEMS 분야는 기존의 MEMS를 잠식하거나 대체하기보다는 집적화, 기능화, 그리고 저소비전력화 기능을 더욱 강화시키는 데에 기여할 것으로 보인다. 즉, 기존의 마이크로 시스템에 전자, 바이오, 광, 자기 등의 기능을 효율적으로 집적화 시킴으로써 센서, 마이크로 프로세서, 광 통신, 액츄에이터 기능을 갖는 극미세화된 고기능 마이크로 및 나노 시스템의 출현을 기대할 수 있으며, 대표적인 결과물로서 나노 랩, 나노 위성, 그리고 나노 로봇 등을 생각할 수 있다. NEMS 기술의 발전은 기존의 MEMS 기술을 요소별로 발전시키고 이러한 과정을 통하여 마이크로 및 나노 시스템의 고기능화와 극소형화를 함께 추구하는 방향으로 전개될 것이다. 이와 같은 시스템 자체의 극소형화와 함께 나노 스케일의 변위를 조절하고 활용하는 나노 조작기, 변위 제어기 등도 MEMS 기술과 나노 기술의 융합으로 완성될 수 있다. 그림 11에 MEMS와 NEMS 기술이 접목된 경우로서, 나노 스케일의 기계식 공진기, 나노 프루브 및 구동 시스템 등을 예시하였다.

광 네트워크 및 자기 저장 매체의 경우, 현재에는 단일 소자 개념에서 출발하고 있지만 궁극적으로는 같이 전자 및 NEMS 소자 등과 함께 구성되어 주어진 면적과 가격 대비 칩의 기능을 최대화하는 방향, 즉 SOC(System On a Chip)의 개념을 지향할 것이다. 즉, CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 및 BiCMOS(Bipolar CMOS) 신호 처리부를 중심으로 하여 통신을 위한 RF(Radio Frequency) 회로와 광 전자 부품 및 칩 내부/칩간의 광 연결부가 함께 집적화되어 있다. 이와 함께 초고속 신호 처리와 저장을 위한 자기

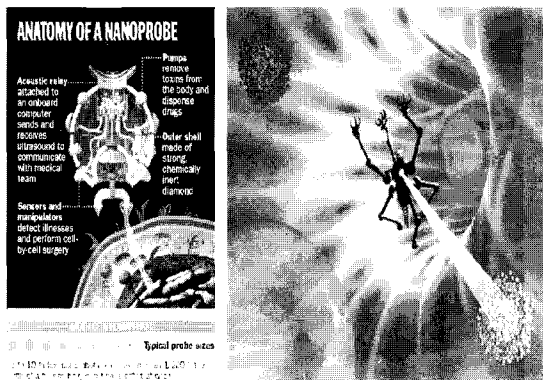


그림 9. 나노 바이오 로봇의 개념.

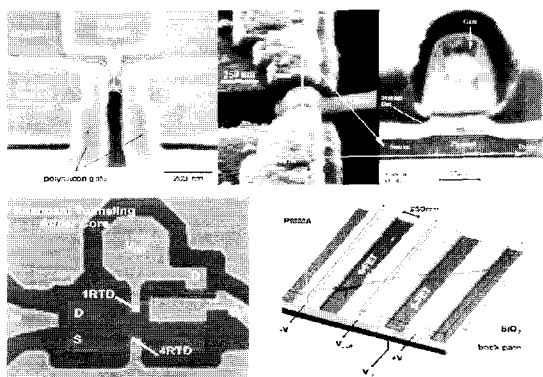


그림 10. 나노 전자 소자들의 일례.

및 분자 소자의 집적화도 고려할 수 있다.

분석 소자 및 시스템의 경우, 현재로서는 그림 12에 보인 바와 같이 SPM, 특히 AFM의 캔틸레버 팁을 제조하고 활용하는 분야가 대표적이다. 이는 나노 분석 이외에도 나노 조작,

데이터의 기록 및 판독, 리소그래피, 바이오 및 나노 소재의 핸들링 및 물성 측정 등에 폭 넓게 이용할 수 있다. 현재 캔틸레버 팁에 대한 연구는 캔틸레버의 나노 수평-수직 변위 구동 메커니즘 제작, 팁의 끝 부분을 더욱 뾰족하게 하기 위한 나노

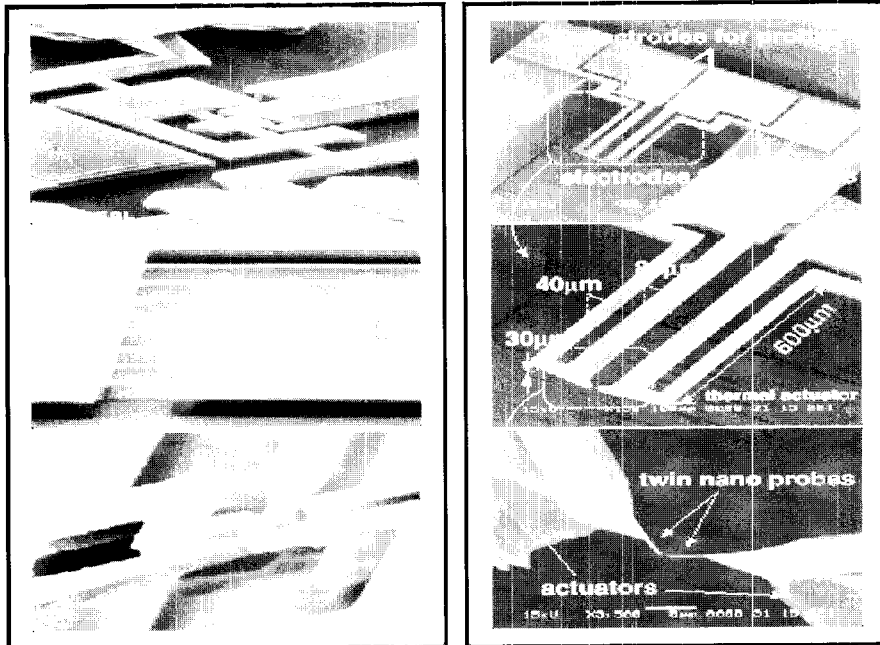


그림 11. NEMS 공정을 이용한 나노 시스템의 일례(나노 공진기 및 프루브 구동 메커니즘).

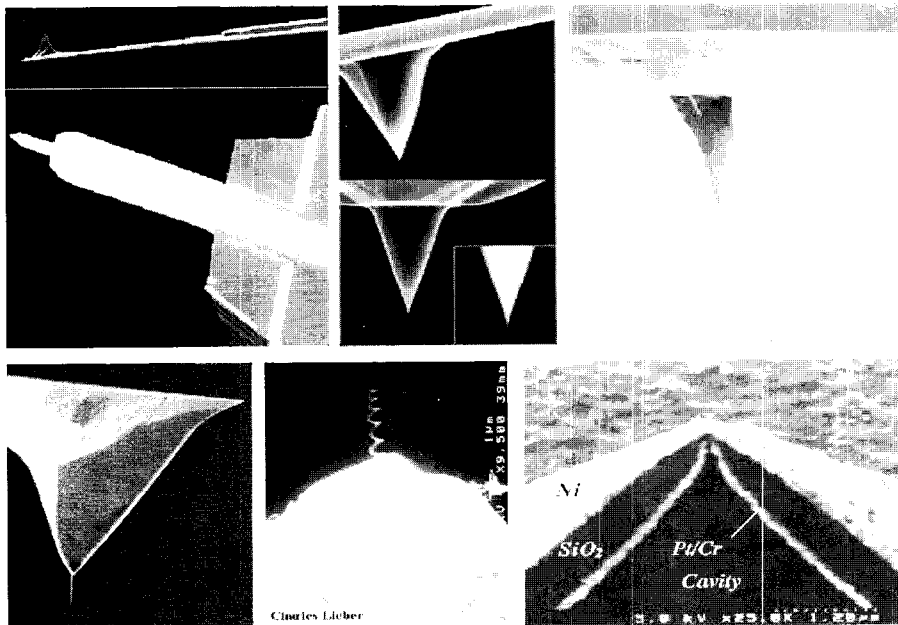


그림 12. 나노 분석 및 구동을 위한 캔틸레버 팁의 여러 가지 모양.

스케일의 가공이나 CNT의 탑재, 팁 부분에 히터나 온도 센서, 혹은 자성이나 바이오 물질 등을 첨가하고 캔틸레버 위에 전자 회로를 집적화 함으로써 신호의 감지 및 신호 처리 기능을 보다 강화하는 방향으로 진행되고 있다.

환경 분야의 경우, 나노 기술은 물과 공기를 주 대상으로 하여 오염 물질의 발생을 최소화하고, 발생된 오염 물질을 제거하며, 경우에 따라서는 수질의 특성을 변화시키는 데에도 이용될 수 있다. 오염 물질의 최소 크기가 물의 경우 300nm 이하, 공기는 20nm 이하로 이들을 제거하기 위해 나노 기공을 통한 필터링, 나노 촉매를 이용한 화학적 정화 등이 요구되며 나노 입자, 나노 기공을 갖는 고분자, 광 촉매, 자기 조립된 나노 구조물 등이 수단으로서 이용된다. 이러한 오염 물질의 제거와 함께 해수를 담수로 전환하고자 하는 시도도 이루어지고 있는데, 예를 들어 FTC(Flow Through Capacitor) 방법의 경우, 평행판 커패시터 전극 양단에 전압(1~2V)을 인가한 상태에서 전극 사이로 해수를 통과시키게 되면 정전력에 의해 Na^+ 나 Ca^{2+} 과 같은 양이온들과 Cl^- 와 SO_4^{2-} 등의 음이온들이 각각 음극과 양극 쪽으로 끌려가는 현상을 이용하는데, 기존의 역삼투나 증류를 이용하는 방법에 비해 소비 전력이 1/10 ~ 1/100에 불과한 0.5Wh/l 정도이다. FTC 시스템 개발에 있어서 이온 흡착량을 증가시키고 소비 전력을 줄이기 위해서는 표면적이 매우 넓고(약 1,000m²/g 정도) 전도성이 우수한 커패시터 전극을 제조하는 것이 핵심이며, 현재 CNT가 최적의 전극 물질로서 적용되고 있다. 세계적으로 인구는 증가하나 수자원은 지속적으로 감소하고 있으며, UN이 발표한 자료에 의하면 2025년에 48개국, 세계 인구의 32%가 물 부족에 시달릴 것으로 예측되는 현 상황에서 이러한 기술 개발은 그 의미가 매우 크다.

5. 결론

나노 기술에 대한 개요 및 국가별 지원 전략 등과 함께 이를 완성하는 수단으로서 소재 및 구조 기술, 공정 및 제조 기술을 일반적인 측면에서 살펴보고, 응용도로서 소자 및 시스템 기술의 일례들을 조사해 보았다. 서술된 내용들은 심도가 있기 보다는 기본적으로 짚고 넘어가야 할 내용들을 위주로 다룬 것이니 만큼 전문가 입장에서는 보다 구체적인 내용들을 요구할 수도 있다. 나노 기술과 관련하여 세계 도처에서 무수하게 발표되고 있는 연구 개발 보고들에 부딪히다 보면, 특정 분야에 대해 집중적인 분석을 할 수 있는 시간을 얻기가 매우 어려운 현실이다. 현 시점에서는 나노 시장을 열기 위한 첫 단계로서 먼저 숲을 보고, 무성하게 자라고 있는 나무들 중에서, 가치 있는 원목으로 활용할 수 있는 분야들을 선택할 수 있는 능력이 요구된다.

참고 문헌

- [1] 주병권, "탄소 나노 튜브", 월간 전자부품, p. 129, 2002.
- [2] 주병권, "나노 기술 개론", 삼성전기 교재 핵심기술 단 기양성과정, 2001.
- [3] 주병권, 이윤희, "나노 기술- μ m의 벽을 허물다!", 월간 전자기술, p.141, 2001.10.

저 자 약 력

성명 : 주 병 권

❖ 학 력

· 1995년 고려대 대학원 전자공학과 공학박사

❖ 경 력

· 1988년 ~ 현재

KIST 마이크로시스템 연구센터 책임연구원

· 1996년

Univ. South Australia(Australia)

방문연구원

❖ 주 관심 분야

- Flat panel display(FED, OLED), MEMS, Micro-sensor