

나노 기술과 그 가능성

글 ■ 안강호 | 한양대학교 기계공학과, 교수 e-mail ■ khahn@hanyang.ac.kr

최근 들어 여러 과학 기술 분야뿐만 아니라, 일반 미디어를 통하여 "나노기술"이라는 단어를 많이 접촉할 수 있다. 나노 분야는 워낙 방대하여 순수 물리 화학 분야뿐만 아니라 공학분야에도 나노 기술에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 특히, 전통학문 분야인 기계공학도 나노기술 영역의 개척뿐만 아니라 개발되고 있는 나노 기술을 응용할 수 있는 여지가 많이 있다. 이에 본 지면을 통하여 아주 간단하나마 몇 가지 나노기술과 이의 응용 예를 소개하고자 한다.

나노라는 말은 희랍어의 나노스(난장이)에서 유래했으며, 나노미터는 1미터의 십억 분의 일 길이로 대략 원자 직경의 네 배에 해당한다. 1990년대부터 여러 과학자들 사이에 큰 관심을 끌어오고 있는 나노기술(Nano Technology)을 일부에서 "차세대 산업혁명"이라 부르고 각국의 정부 및 연구단체에서 이에 관한 연구력을 집중하고 있

다. 이에 간단하나마 나노기술의 일반적인 특징에 대하여 기술하고자 한다.

나노 물체를 만드는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 큰 덩어리 물질(bulk material)을 잘게 부수어 나노 영역까지 가는 방법(top down 방식)이 있다. 이는 우리가 알고 있는 반도체 공정이 일반적으로 이에 해당한다. 반면 원자나 분자 수준에서 이들 원자/분자를 합성 또는 조작하여 나노 크기의 물체를 만드는 방법(bottom-up 방식)이 있다. (그림 1 참조)

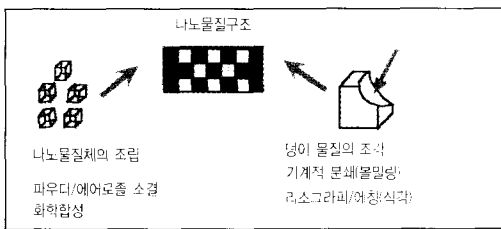


그림 1 Top-down 방식과 Bottom-up 방식에 의한 나노 구조체 형성 방법

나노기술은 1차원, 2차원, 또는 3차원 중 어느 한 쪽의 차원(dimension)이 나노미터 크기($10^{-9}m$)인 구조물의 제작, 응용 및 특성 연구에 관련된 것을 일반적으로 의미한다. 그림 2은 나노기술 영역과 원자/분자 및 기타 여러가지 물체들과의 크기를 비교한 것으로서 일반적으로 나노기술은 원자/분자부터 100nm까지의 크기를 다루는 것을 알 수 있다. 이와 같이 나노기술 영역의 한계를 일반적으로 100nm를 취하는 이유는 여러가지가 있겠지만, 그림 3에서 보듯이 입자의 크기가 작을수록 입자의 표면에 존재하는 원자의 개수가 입자를 구성하고 있는 전체 원

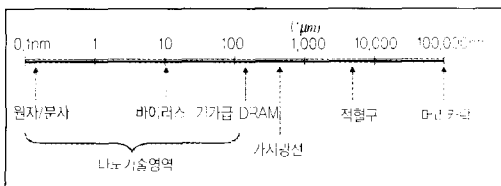


그림 2 나노 기술의 영역 비교

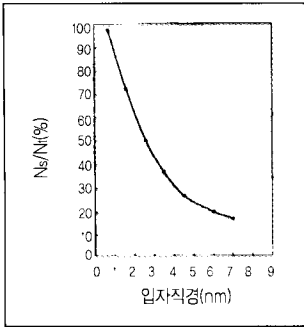


그림 3 입자크기에 따른 전체 원자 (N) 중 표면에 노출된 원자 (Ns)의 비율

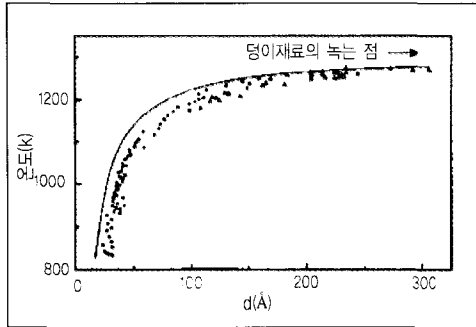


그림 4 나노 금 입자의 입자 크기에 따른 용융점 변화

람은 많지 않았다. 1986년 노벨 물리학 수상자인 로리와 비니히가 발명한 주사 터널링 현미경(STM)이 나오으로써 원자와 분자의 관찰 및 조작을 할 수 있는 발판이 마련되었으며, 1990년 초 원자현미경(AFM)이 개발

자수에 비해 상당히 많아지므로 큰 표면효과를 볼 수 있게 된다.

이와 같은 현상을 이용하여 나노입자 등과 같은 소재를 센서나 반도체 소재 등으로 사용하게 되면 단순한 크기의 소형화 외에 여러 물리·화학적 성질이 변하게 된다. 예를 들면 탄소나노 튜브의 경우 무게는 철의 1/6 정도이지만 강도는 10배 강해진다. 또한 크기가 작아짐으로써 화학반응이 매우 빨리 일어나고, 열전도도, 광학적 성질, 고유 진동수, 자기적 성질 등 bulk(덩이) 물질과는 다른 물리·화학적 특징을 나타낸다. 그림 4는 금 입자의 크기와 용점 온도와의 관계를 나타낸 것이다. 이와 같이 물질의 크기가 나노 영역에 도달하면 물리적, 화학적, 기계적, 전기적, 광학적 특성 등이 벌크(bulk) 재질과는 매우 다른 특성을 나타내게 된다.

이러한 나노기술의 탄생예측은 이미 1959년 노벨 물리학상 수상자인 리처드 파인만 박사가 원자나 분자의 크기로부터 물질의 성질을 조절하고, 그 당시까지 만들어진 것보다 만분의 일 크기의 기계적 구조를 만들 수 있고, 이런 개념이 미래의 산업을 주도할 것으로 예측하였다. 그러나 그 당시에는 원자나 분자를 관찰하거나 움직일 수 있는 현미경이 개발되지 않아 그 현실성을 믿는 사

람은 많지 않았다. 1986년 노벨 물리학 수상자인 로리와 비니히가 발명한 주사 터널링 현미경(STM)이 나오

으로써 원자와 분자의 관찰 및 조작을 할 수 있는 발판이 마련되었으며, 1990년 초 원자현미경(AFM)이 개발되고, C₆₀ 및 탄소 나노 튜브의 발견 등으로 나노기술 연구에 새로운 전기가 마련되었다.

나노기술을 대략적으로 분류하여 그 특성을 보면 다음과 같다.

원자/분자 조작 및 제어

분자조작(Molecular Manipulation)

원자/분자 조작기술은 원자나 분자차원에서 이를 조작하여 필요한 물체나 물질을 제작하는 것으로서 나노물질의 특성구현을 위해 단일분자 차원부터 설계하는 것이다. 이 기술은 나노 스케일 공정에서의 나노 물체의 대량생산, NEMS(nano-electro-mechanical system)에서의 분자 모터 및

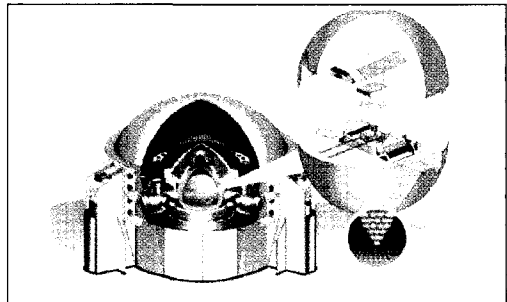


그림 5 분자 측정 기계

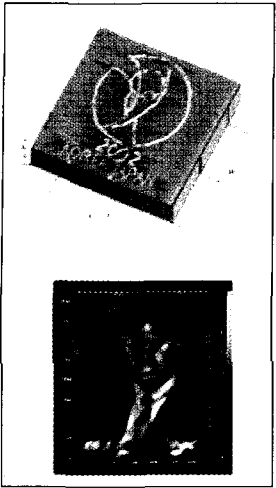


그림 6 AFM을 이용한 나노 패턴
(한양대학교 화학과 이해원 교수 제공)

액 추 에 이 터 , SPM(Scanning Probe Microscope)을 이용한 원자/분자의 표면 이동, 염색체 및 고분자의 조작, 분자 조작기를 이용한 나노물질 및 나노구조의 기계적 성질 측정 등의 분야가 있다. 이 분야는 나노 영역에서의 계측, 측정 및 제어가 선행되어야만 하며, 일반적으로 기계적조작에 의해 일어 수 행되므로 기계공학 측면에서 많은 지원이 필요한 분야이다. 그림 5는 1987년부터 시작된 과제의 결과물로 50mmx50mm 측정 영역에서 1nm의 측정 불확도를 목표로 개발중인 Molecular Measuring Machine(3M)으로 현재 5nm의 불확도를 갖고있다. 그림 6은 Atomic Force Microscope(AFM)을 이용하여 한양대학교 화학과 이해원 교수 연구실에서 만든 2002 World Cup logo 및 한국대표팀 축구감독의 초상화를 원자 수준에서 그린 것이다.

분자합성

화학적 반응을 통하여 새로운 기능이나 특성을 가지는 분자를 제조하여 광전자 재료, bio 재료, 신기능성 고분자 재료, 나노 포러

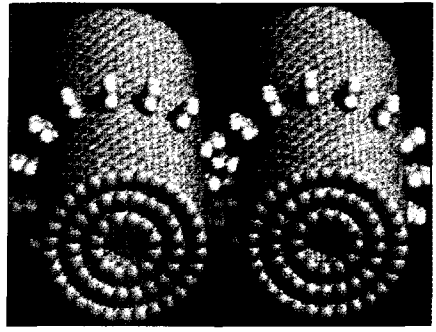


그림 7 탄소 나노분자로 제작된 기어 모형

스 물질, 촉매 등을 만드는 분야이다. 이 분야에 대한 연구는 국내외에서 매우 활발히 진행되고 있으며, 가시적이 성과들이 속속 발표되고 있다.

스 물질, 촉매 등을 만드는 분야이다. 이 분야에 대한 연구는 국내외에서 매우 활발히 진행되고 있으며, 가시적이 성과들이 속속 발표되고 있다.

Simulation

나노 기술에서 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션은 분자 설계, 최적화된 화합물의 설계, 유기, 무기, 금속, 고분자 물질의 합성 및 제어에 가장 필요한 기술이다. 이러한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 원자나 분자의 거동을 미리 예측함으로써 실제 실험에 소요되는 시간과 경비를 절감할 수 있다. 특히, 원자나 분자 수준에서 일어나는 반응은 매우 빠르고, 또한 이의 현상을 관측할 수 있는 기술이 현재는 개발되지 않은 상태이므로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 반응의 보다 정확한 예측을 할 수 있으므로 시뮬레이션 기법의 개발 및 이론의 정립은 매우 필요한 분야다. 그림 7은 탄소 나노분자로 제작된 기어 모형으로 이의 작동 특성을 분자이론이나 컴퓨터 시뮬레이션으로 확인할 수 있다.

소재 제조 및 특성분석

나노입자

나노 구조물질 형성의 가장 기본이 되는 단계로 같은 부피의 덩이재료(bulk material)에 비해 원자나 분자의 대부분이 표면에 존재함으로써 덩이재료와는 다른 특이한 물리-화학적 특성을 나타낸다. 예를 들면, 은(銀) 덩어리는 흰회색에 가깝지만 나노 은 입자(5nm 정도)는 검은색을 띄게 되며, 금 입자도 입자 크기에 따라 진한 붉은 색

에서부터 여러가지 색깔을 갖게 된다. 이는 나노입자의 광학적/물리적 특성이 덩이재료와는 다르다는 것을 의미한다. 또한 나노 입자가 되면 그림 4에서 보여주는 것과 같이 금 입자의 녹는점이 낮아져 덩이재료보다 매우 낮은 온도에서도 물체를 녹일 수 있게 된다.

나노 구조체

나노 구조체는 일정 형태의 원자 또는 분자 배열 구조를 가진 소재를 의미하며, 현재, 자기조립, 실험상 성형, templating법 등의 제조 방법이 있다. 이 나노 구조체는 기존의 소재와는 성질과 응용면에서 특이하며 탄소나노튜브, 나노선(線), 다공성 zeolite 등이 있으며, 촉매 담체, 오염물질의 정화흡수제, 기공제어 분리막, 수소 저장물질 등으로 응용되고 있다. 그림 8은 C₆₀과 single wall carbon nano tube 나노 구조체를 보여주고 있다. 이들은 초전도성 등 다양한 특징이 속속 밝혀지고 있어 이의 응용 분야는 매우 다양할 것으로 사료된다. 특히 삼성에서 세계최초로 카본 나노 튜브를 이용한 전계 방출형 평면 디스플레이를 개발하기도 하였다.

분자 박막

기능성을 부여하기 위하여 재료표면에 쌓

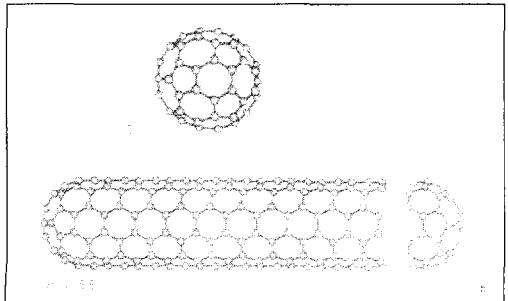


그림 8 C₆₀과 카본 나노튜브 구조체

은 단분자 혹은 다분자 층으로서 광센서, Bio 센서, Lithography용 필름 등으로 응용될 수 있고, 인지질 등의 생체모사 세포막을 제조하여 DNA 분자를 연결할 수 있다. 또한 자기조립 분자박막 제조기술을 응용한 분자단위 device제조 등에 응용할 수 있다.

나노 기술 응용

나노 기술의 응용분야 및 응용가능성은 현재 아무도 예측할 수 없을 정도로 무궁무진하다. 앞에서 언급하였듯이 나노 크기의 물체에서는 기존의 덩이재료(bulk material)에서는 볼 수 없었던 특성이 나타남으로써 일부 학자들은 원소 주기율표를 다시 써야 되지 않나 할 정도다. 이에 현재 연구가 진행되고 있거나, 우리의 일상 생활에 이미 침투해 있는 나노 기술에 대해 간략히 언급하고자 한다.

나노 electronics

나노 electronics는 나노 구조체를 이용한 전자 기술 및 그 산출물을 의미하며, 넓은 의미로서 광전자 및 자기 기술도 포함된다. 현재 이 분야는 전자 부품의 초소형화 및 고속화를 위해 소자의 크기를 100nm 이하로 줄여가고 있다. 이 분야에서는 소자의 크기가 소형화됨으로써 양자역학적 성질이 발현되어 지금까지 적용하던 기술의 한계에 부딪히기 시작하였다. 따라서 양자역학적 특성을 이용한 스핀트로닉스, 탄소나노튜브를 이용한 메모리 소자, 분자 나노소자, 단전자 트랜지스터 등과 같은 새로운 기술의 접목을 시도하고 있다.

나노 machining

나노 machining은 나노 스케일의 기계적 구조물을 제작하고 응용하는 기술로서 나노



구조체 조립 로봇, 미세 의료용 공구 및 인체 삽입 로봇, NEMS/MEMS를 이용한 분자 모터 및 액추에이터 등에 관해 연구하고 있다. 특히 나노 세계에 들어가면 bulk 세계에서 사용하면 물질의 물리적-기계적 성질들이 전혀 다르게 발현됨으로 나노 세계에서의 물질 및 구조체의 특성을 측정, 평가할 수 있는 장치나 기구의 개발이 절실히 요구되고 있다. 그림 9는 현재 사용되고 있는 나노 물질의 물성을 측정하는 장치이다.

우리 곁에 이미 와 있는 나노 기술들

Hard disk(GMR head)

현재 컴퓨터의 비휘발성 정보 저장장치로 Hard disk drive(HDD)를 가장 많이 사용하고 있는데 이는 불과 몇 년 전만해도 수백 메가 바이트의 용량에 수십만 원 정도하였으나, 지금은 수십 기가 바이트에 2~3십만 원 정도하고 있다. 이는 단위 면적당 정보저장 능력이 월등히 뛰어난 정보 재생헤드의 개발로 가능하게 된 것이다. 즉 1988년 나노미터 두께의 자성-비자성 다층 박막에서 거대자기저항(GMR) 효과가 발견되고, 1991년 IBM이 스핀밸브 구조의 GMR헤드를 개발한 후 1997년 최초의 상업용 GMR헤드를 발표함으로써 대용량 초고속 HDD의 출현이 가능해졌다.

자외선 차단제 및 광촉매용 nano TiO₂ 입자

여름의 강렬한 자외선이나, 겨울 스포츠인 스키 등을 탈 때 사용하는 자외선 차단제에는 자외선 차단용으로 나노 TiO₂가 다량 첨가되어 있다. 또한 아나타제 결정의 나노 TiO₂ 입자는 빛과 반응하였을 경우 산화작용이 있어 탄화수소 등의 유기물질 제거할 수 있는 전구(나노TiO₂입자 부착), 건물

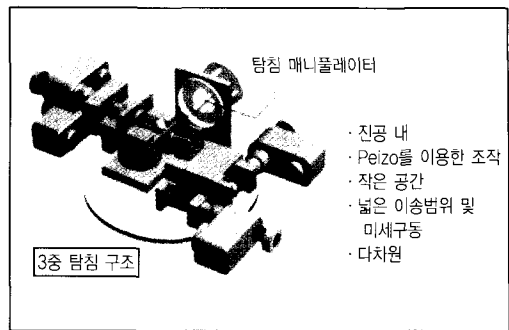


그림 9 나노 물질의 기계적 특성시험 장치

의 외벽이나 보도블록에 나노 TiO₂ 입자를 첨가하여 건물외벽의 자정작용 또는 대기오염 물질의 감소에 사용하고 있으며, 화장실이나 목욕탕의 도기에 TiO₂ 나노입자를 부착하여 보다 청결히 유지할 수 있도록 한 제품들이 나오고 있다. 또한 최근에는 나노 TiO₂ 입자를 이용한 공기정화 및 탈취를 할 수 있는 제품을 시장에서 볼 수 있다.

또한 TiO₂는 초친수성 성질이 있어 차량의 side mirror에 나노 TiO₂ 입자를 부착하여 사용하고 있다.

Nano Ag 입자를 이용한 살균

Ag(은)은 옛날부터 살균작용이 있는 것으로 알려져 왔고 이를 수저로 사용하였다. 이러한 은 입자를 나노 크기로 만들면 그 표면적이 매우 크게 증가하여 적은 양의 은으로 큰 살균효과를 볼 수 있어 은 입자를 무기질 살균제로 이용할 수 있다. 현재 나노 은 입자를 사용하여 항균 유아 젖병, 항균 비누, 신발 밑창의 악취제거 등에 사용하고 있다.

외국의 나노 기술 응용 및 연구

위에 언급한 연구내용 이외에 몇 가지 나노 기술의 응용 예를 들면 아래와 같다.

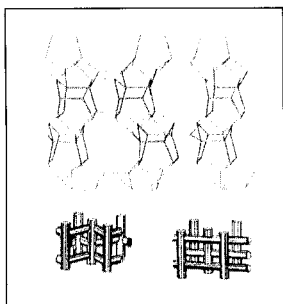


그림 10 3차원 체널구조의 ZSM-5 (신 제올라이트)

나노구조화된 촉매

Mobil석유회사는 1 nano meter 이하의 기공을 갖는 다공성 소재인 제올라이트(zeolite)를 개발하였다 (그림 10 참조).

이 촉매는 현재 연간 70억 배럴 이상의 석유 및 화학약품을 처리하는데 사용하고 있으며, 뉴질랜드는 같은 촉매를 사용하여 천연가스를 고옥탄가 연료로 바꿈으로써 국가 전체 기름연료 사용량의 1/3을 생산하고 있다.

나노미터 크기의 1차원, 2차원, 3차원 고체 촉매는 독특하고 조정 가능한 성능을 발휘할 수 있는데 금 입자의 크기가 3~5nm 이하로 작아지면 icosahedral이라는 결정 구조를 갖게 되어 덩이재료에서는 볼 수 없었던 촉매기능을 나타내게 된다.

약물전달 시스템

나노 기술을 이용한 약물의 제조 및 전달 시스템의 개발은 향후 10년 동안 3,800억 달러 규모의 전세계 의약품 제조 시장의 절반 정도에 영향을 줄 것으로 예측되며, 아래와 같은 다양한 방면에 이용될 것이다.

* 약물의 나노 크기화로 용해도가 작은 물질을 의약품으로 사용하는 것이 가능하게 될 것이며, 이 결과 의약품으로 사용 가능한 화학물질의 수가 약 2배 정도 늘어날 것으로 예측된다.

* 50~100nm 범위의 나노입자를 이용한 암세포 치료. 큰 입자는 암세포 내 기공에 침투하는 것이 어려우나 나노 입자는 암세

포에 쉽게 침투할 수 있다. 또한 나노입자 표면에 목표 수체(receptor) 역할을 하는 배위자(ligand)를 첨가한 능동적으로 목표 추적할 하게 함으로써 수체는 손상된 조직을 인식하고 달라붙은 다음 치료약물을 방출함으로써 치료한다.

* 나노 크기화된 표적은 암세포 숫자가 매우 적을 때에도 초기단계의 암 진단을 가능하게 한다. 여기서 사용하는 나노 입자는 콜로이드상의 금 입자로 매우 균일하게 분산된 상태이다.

나노 복합재료 : 나노입자 강화 고분자(자동차 부품용 저가격, 고강도 소재)

자동차의 연비를 향상시키기 위해서는 금속을 대체할 수 있는 플라스틱과 같은 경량 소재를 사용해야 한다. 가장 좋은 플라스틱은 값이 비싸 자동차 업계가 널리 채택하고 있지 않다. 세계적으로 연구 중에 있는 새로운 소재인 나노 복합재료는 나노입자가 골고루 분산되어 있는 강화 고분자로 이루어져 있다. 이 강화 고분자는 금속을 대체할 수 있는 경제적 해결책이 되며, 이론상 나노 복합재료는 실험상으로 쉽게 압축되거나 성형될 수 있다. 또한 금속에 근접한 강도를 가질 수 있고, 내부식성, 내방진성, 부품성형, 재활용성이 모두 좋다. 이 재료는 미국, 일본 등에서 연구를 진행하고 있으며, 이를 활용할 경우 1년간 생산하는 자동차의 수명이 다할 때까지 150억 리터의 휘발유를 절약할 수 있으며, 따라서 50억 킬로그램 이상의 이산화탄소 배출을 줄일 수 있다.

미생물 탐지

나노 기술은 군사력을 획기적으로 발전시킬 수 있다. 나노미터 크기에서 생물학, 화학, 물리학을 접목시키면 생화학전의 약품/

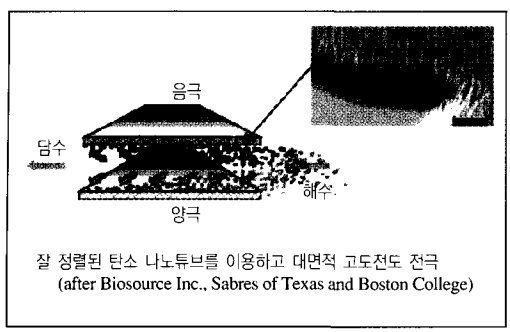


그림 11 고표면적, 고전도성 카본 나노 튜브를 이용한 해수 담수화 개념도

병원체 탐지를 위한 센서 성능이 획기적으로 향상될 것이다. 특히, 탄저균이나 결핵균 탐지에 대한 실험이 성공적으로 진행되어 상업화 단계에 와있다. 이의 원리는 DNA를 나노미터 크기의 금 입자에 붙이면 상보적인 DNA가닥이 용액 중에 녹아 있을 때 금 입자는 서로 달라붙게 된다. 입자가 뭉치는 작용으로 나노입자는 현탁액의 색깔을 변화시킨다. 현재의 기술과 비교하면 이 센서는 매우 간단하고 약 1/10의 비용밖에 안 들며 선택성이 뛰어나다.

수질정화 및 담수

최신의 역삼투 방법보다 10배 적은 에너지를 사용하며, 증류 방식보다는 100배 적은 에너지를 사용하여 바다물을 담수화시킬 수 있는 에너지 효율이 높은 Flow Through Capacitor(FTC) 방식에 대한 연구가 진행되고 있다. 이는 매우 큰 표면적을 가진 두 개의 평판전극(1,000m²/g)을 이용하는 탈이온수 필터와 같은 구성을 갖는다. 작은 직류전압(1~2V)이 가해짐에 따라 용해된 이온이 매우 큰 표면적을 갖는 전극 재료에 정전기적으로 흡착되어 바다물은 빠르게 정화된다. 그림 11처럼 양전하를 띤 이온들 (Na⁺, Ca²⁺)들은 음극에 달라 붙는 반면

음전하를 띤 이온들(Cl⁻, SO³⁻)은 양극에 정전기적으로 달라 붙는다. FTC의 이러한 성능은 나노 기술에 근원이 있다. 나노 기술로 인하여 매우 큰 비표면적을 갖는 새로운 전도성 전극 소재의 제조로 저항 손실을 줄이고 하전된 이온의 흡착능이 향상될 수 있게 되었다. 유엔은 2025년까지 세계인구의 32%에 해당하는 48개 국에서 깨끗한 물이 부족할 것으로 예상하고 있는데 이러한 나노 기술을 이용한 저에너지 소비형의 담수화 장치의 개발은 인류복지에 매우 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

맺음말

이상에 언급된 몇 가지 예는 나노 기술의 응용에 대한 빙산의 일각으로 보는 것이 좋을 것이다. 최근의 과학자들은 나노 영역에서 물질의 성질이 매우 다르게 나오므로 “원소 주기율표를 재작성 해야 할 것이다”라고 까지 극단적으로 이야기하기도 한다. 따라서 이 분야에서 나오는 신기술이나 새로운 현상에 대해 잘 유념할 필요가 있다.

나노 기술은 그 특성상 극소형화 기술, 즉, 소자의 고집적화, 정보처리의 고속화, 제품의 경량화등과 같은 분야에 큰 영향을 줄 수 있으며, 또한 분자/원자 제어기술을 이용하여 새로운 소재, 소자 등을 만들어 낼 수 있다. 아울러 크기 효과 및 양자기술을 이용하여 bulk 물질과는 완전히 다른 특성을 갖는 물질을 만들 수 있으며, 기존의 고전역학이 아닌 새로운 이론, 즉, 양자역학이 적용되고 있다. 따라서 나노기술 연구에는 광범위한 학제간 연구(물리, 화학, 기계, 전자, 재료, 생물, 의학, 에너지, 환경 등)가 필수적이며, 과학기술 전분야의 공조가 필요하다.