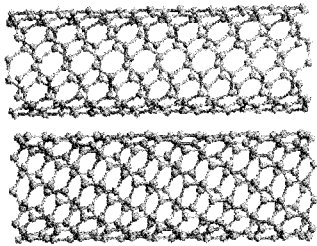


탄소나노튜브의 응용

- 김 근 수 ■ 성균관대학교 물리학과
e-mail : cnanotube@hanmail.net
- 이 영 희 ■ 성균관대학교 물리학과, 교수
e-mail : leeyoung@yurim.skku.ac.kr

이 글에서는 기계공학 전공자들이 관심을 가질 수 있는 역학과 관련 있는 탄소나노튜브의 응용에 관해 소개하고자 한다.

20 세기 말에 나노미터의 극미 세 영역에서 새로운 물리현상과 향상된 물질특성을 나타내는 연구결과가 보고되면서부터 나노기술(Nano technology)이라는 새로운 분야가 열렸으며, 이는 곧



단층나노튜브, 상 : armchair, 하 : zigzag

21세기를 선도해갈 정보통신, 의 약, 소재, 제조공정, 환경 및 에너지 등의 분야에서 미래의 기술로서 인식되게 되었다. 이러한 나노기술 분야 중 새로운 물질의 구현과 산업적 응용성에 있어 가장 크게 각광을 받고 있는 분야가 탄소나노튜브 분야이다.

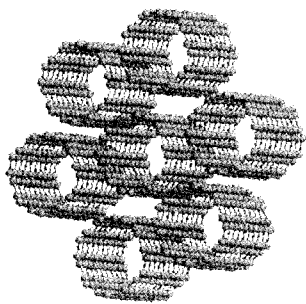
탄소나노튜브(CNT : Carbon Nano-Tube)는 구조의 비등방성이 크며(직경 : 수십~수백nm, 길이 : 수십~수백 μ m), 단일벽(singlewall), 다중벽(multi-wall), 다발(ropes) 등의 다양한 구조가 있다. 또한 감긴 형태에

따라 도체, 반도체의 성질을 띠며, 직경에 따라 에너지갭이 달라지고, 준일차원적 구조를 가지고 있어 특이한 양자효과를 나타낸다. 탄소나노튜브의 특이한 구조 및 물성이 보여주는 다기능성은 정보통신기기의 필수인 평면표시소자, 고집적 메모리소자, 2차 전지 및 초고용량 캐패시터(super-capacitor), 수소저장 물질, 화학 sensor, 고강도/초경량 복합재료, 정전기 제거 복합재료, 전자파 차폐 (EMI/RFI shielding) 물질 등에 응용성이 뛰어나며, 기존의 소자가 갖는 한계를 넘어설 가능성을 갖고 있다.

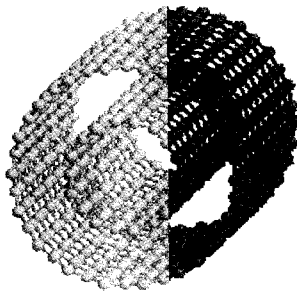
탄소나노튜브는 흑연 한 층이 감겨 있는 형태를 갖고 흑연과 같은 sp^2 결합을 하고 있어 결합강도가 강하다. 측정된 길이방향의 영률은 1TPa 이상의 값을 가지고 있다.

탄소나노튜브는 그 응용이 무척 다양하다.

이 글에서는 기계공학 전공자



다발



다층나노튜브

들이 관심을 가질 수 있는 역학과 관련 있는 탄소나노튜브의 응용에 대해 소개하고자 한다.

나노튜브를 이용한 탐침현미경 기술

탄소나노튜브는 SPM(Scanning Probe Microscopy)의 탐침(tips)으로 사용되기에 매우 적절한 일차원 구조를 가진다. 1996년 Stanford 대학의 Dai 그룹은 기존의 실리콘 또는 실리콘나이트라이드 탐침에 나노 튜브를 기계적으로 연결시켜 tip을 만드는데 성공하였다.[Dai 1996] 그러나 이러한 공정은 매우 시간이 오래 걸리고 실패 확률이 높다. 한편, 1999년 발표된 논문에 따르

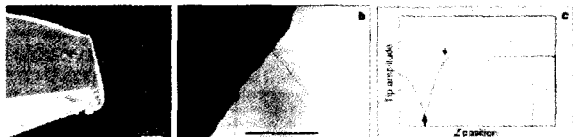
면 Harvard 대학교 화학과의 C. M. Lieber 교수 연구팀은 실리콘 tip의 끝에 한 개의 탄소나노튜브를 직접 성장시키는 기술을 개발하였다.[Janson 1999] 실리콘 tip 끝을 평평하게 한 다음 불산 용액 속에서 전기 화학적으로 식각하여 나노미터 크기의 기공을 생성시켰다. 이를 $FeSO_4$ 용액에 담구어 전기화학적으로 철 입자를 기공내에 증착하였다. 촉매작용을 하는 이 철 입자들을 화학 기상 증착법(CVD : Chemical Vapor Deposition)에 의해 에틸렌과 수소 분위기에서 $750^{\circ}C$ 로 10min 정도 노출시키면 다중벽 탄소 나노튜브가 성장한다. 성장이 진행됨에 따라 나노튜브는 기공 밖으로 튀어나오게 된다. 전기적 식각

과정을 거쳐 끝이 열리게 되는 나노튜브의 끝은 그 끝이 매우 작아서 반경이 3~6nm 정도이다. Lieber 교수에 따르면 연구팀에 제작한 tip을 사용하면 현재까지 사용된

어느 tip보다도 높은 해상도의 image를 얻을 수 있다고 한다. 나노튜브 tip은 특히 trench구조에서 그림과 해상도를 크게 개선할 수 있다. 연구팀은 이 방법을 사용하여 tip을 대량 생산 하는 공정을 개발할 계획이다.

탄소나노튜브로 만든 초미세 나노저울(nano balance)

탄소나노튜브의 전기적, 마이크로 기계공학적인 성질들 중에는 나노 저울(nano balance)로서의 기능이 있다. 이것은 바이러스나 그밖의 마이크로미터 이하 규모의 입자들을 하나씩 매달 수 있을 정도로 매우 섬세한 기술이다. 이미 잘 알려진 대로, 탄소나노튜브는 현재의 마이크로 회로에서 가장 작은 구조보다도 훨씬 작다. 이 작은 구조의 하나하나를 선택적으로 휘게 하고 공명을 일으키는 기술은 마이크로 기계공학분야에 새로운 가능성을 열고 있다. 물리학 교수 W. de Heer, 물질과학 및 공학 교수 Z. L. Wang 등으로 이루어진 미국 조지아텍 연구팀의 논문에 따르면, 각각의 탄소나노튜브가 정전기적으로 어떻게 휘어지고 진동 공명을 유도하기 위해 전압을 어떻게 이용하는지를 소개하였다.[Philippe 1999] 그들은 투과전자현미경과 그들만의 독특한 샘플 holder를 이용하여, 다층탄소나노튜브의 성질을 연구하여 왔다. 이 샘플 holder는 조지아텍의 Philippe Poncharal 박사에 의해 개발된 것이며, 이로 인해 견본을 회전시



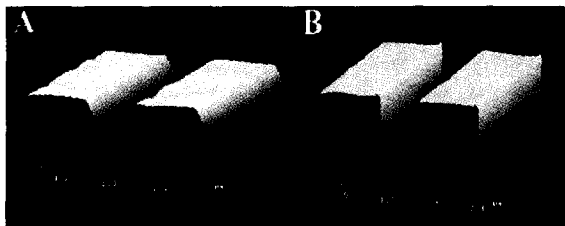
A. 기존의 실리콘 tip에 CVD를 이용해 나노튜브 한 가닥을 직접 성장한 FE-SEM 이미지 (pore 직경은 60nm, $150\text{poers}/\mu\text{m}^2$, scale bar는 $1\mu\text{m}$), B. A의 TEM 이미지 (scale bar는 100nm), C. tip의 진동 진폭 이미지



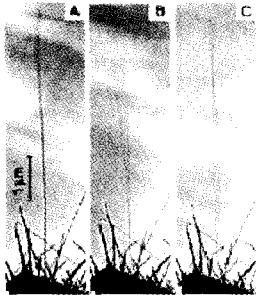
CVD로 성장한 나노튜브 tip으로 scan한 높은 해상도의 IgM 분자 이미지(분자의 높이는 2.5~3.5nm, scale bar는 100nm, box 안의 scale bar는 10nm)



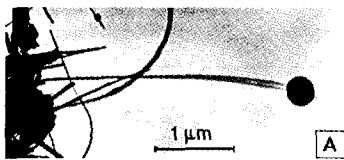
기존의 AFM tip에 부착된 탄소나노튜브 tip 이미지



A. 기존의 AFM tip으로 측정된 trench 이미지, B. 탄소나노튜브 tip으로 측정된 이미지



In-situ TEM을 이용하여 탄소 나노튜브의 공명현상을 측정된 이미지
 A. 정지상태
 B. 1st Harmonic resonance (530 kHz)
 C. 2nd Harmonic resonance (3.01 MHz)
 탄소 나노튜브 길이 = 6.25 μ m, 직경 = 14.5nm



작은 입자가 탄소나노튜브 끝에 붙어 있을 때의 1st Harmonics resonance(968kHz)가 공명현상으로부터 추정되는 입자의 무게는 약 22fg이다.

키거나 전압을 걸어 다양한 기본적인 효과들을 관찰할 수 있었다. 직접적인 시각화와 조절 등 현미경을 통해 직접 관찰함으로써, 마치 책상 위에 올려진 물체처럼 나노튜브를 다룰 수 있게 되었다. 나노튜브에 전하를 걸고 그와는 반대의 전하가 걸린 tip을 그 주변에 위치시킴으로써, 연구팀은 그 작은 구조를 상당한 수준까지 구부릴 수 있었다. 거의 90°가 될 정도로 굽혀진 후에도 나노튜브는 본래의 상태로 복원되어 직선 상태를 유지할 수가 있다. 이는 나노튜브가 매우 단단한 재질이지만 동시에 극히 높은 탄성을 지니고 있기 때문이다. 또한, 교류 전압을 걸어주고 그 진동수를 주의 깊게 조절하면, 나노튜브에서 공명을 일으키는 것도 가능하다. 마치 기타 줄이 진동하듯이 나노튜브는 각기 고유한 특정 진동수에 대해 공명을 일으키는데, 그 진동수는 나노튜브의 길이, 지름, 밀도, 탄성 등에 따라 정해진다. 이 공명 진동수는 매우 좁은 영역에 걸쳐 있기 때문에, 나노튜브의

감쇄적 성질을 측정하는 일이 용이하다. 마치 라디오의 다이얼을 돌려 특정 방송을 찾는 것처럼, 주파수를 변화시키면 원래의 공명은 멈추어지고 곧 다른 크기의 나노튜브가 진동하게 된다. 나노튜브의 가장 중요한 특성 중 하나는 극히 단단하고 강하다는 점인데, 이것은 나노튜브가 매우 얇을 경우에만 해당된다. 즉, 점점 두껍게 만들수록 점점 재질이 부드러워져 굽혀짐의 형태나 과정이 다르게 나타나게 된다. 이처럼 굽기에 따라 탄성계수가 달라지는 것은 어느 물질과는 또 다른 나노튜브의 특징이라고 할 수 있다.

나노튜브를 저울로 이용할 때의 핵심적인 관건은, 그 튜브에 대상 물체를 올려놓음으로써 발생하는 공명 진동수의 변화를 측정하는 것이다. 이것은 보통의 용수철에 물체를 매달고 그 진동수를 측정하여 물체의 질량을 계산하는 것과 마찬가지로 이유이다. 이와 같은 기술을 적용한 연구팀은, 공명 상태의 나노튜브 끝에 매달린 22펨토그램(1femtogram =

10⁻¹⁵ 그램)짜리 흑연 입자의 질량을 확인할 수 있었다. 이처럼 작은 물체를 정밀하게 측정할 수 있는 다른 방법은 지금까지 없었다. 그밖에도 펨토그램에서 피코그램(1picogram=10⁻¹² 그램)에 이르는 여러 다른 물체들의 질량도 측정할 수 있으며, 앞으로 측정분야에 보다 정확한 데이터를 얻을 수 있는 도구로서 역할이 클 것으로 기대된다.

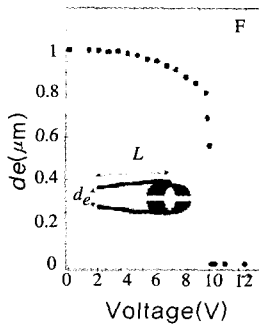
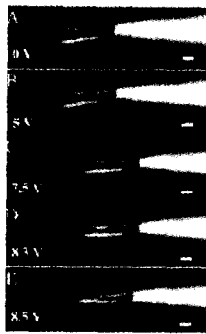
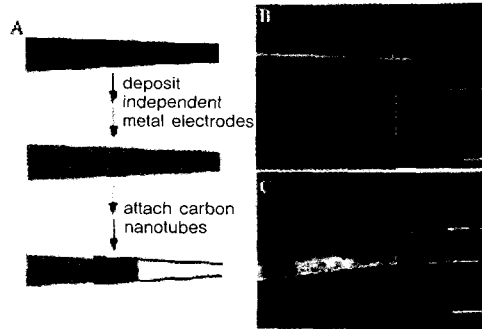
나노 핀셋(nano tweezer)

지금까지 나노 세계를 조작하는 것은 주사 탐침현미경(SPM)의 바늘(tip)을 사용하여 나노 구조들을 밀어 옮기는 데 국한되어 왔지만 이는 비용이 대단히 많이 드는 조작일 뿐만 아니라 2차원에서만 조작이 가능했다. 유용한 조작이 되려면 3차원에서의 이동이 가능해야 한다. 예를 들어 집을 한 채 짓는다고 가정해 보면, 목재들에 못을 박아 서로 붙여야 한다. 현재까지의 기술로는 못을 이리저리 밀어붙여 목재의 구석 움푹 꺼진 곳에 갖다 놓을 수 있었다. 그러나 실제 우리가 필요한 기술은 못을 직접 붙잡아 세워 놓고 박아 넣어야 하는 것이다.

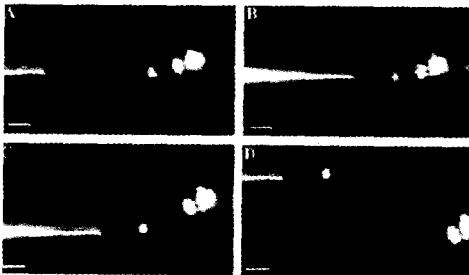
최근 Harvard 대학의 Philip Kim과 Lieber 교수는 마이크로 피펫과 탄소나노튜브들을 이용하여 한 개의 바이러스보다 더 작은 10nm 너비의 알갱이들을 조작할 수 있는 도구인 나노 핀셋을 제작하였다.[Philip 1999] 이들은 1미크론의 미세한 유리 피펫에, 분리

된 두 개의 금 전극으로 둘러싼 뒤 이 전극에 지름이 50nm, 길이가 4미크론인 탄소나노튜브 두 가닥을 붙여 핀셋을 제작하였다. 전극에 전압을 걸어서 핀셋을 조작할 수 있는데, 반대 전하를 걸면 (8.5V) 나노튜브들이 서로 밀착되어 붙게 해주며, 같은 전하가 걸리면 이 튜브들을 서로 떨어지게 한다. 광학 현미경으로 관측하면서 500nm의 폴리스티렌 뭉치(clusters)상의 나노 핀셋을 테스트하면서 Philip Kim과 Lieber 교수는 약 80%의 원하는 대상 물체들을 집을 수 있었다. 나노 핀셋은 광학현미경으로 연구자들이 볼 수 있는가에 의해 그 한계가 지워졌다. 이 핀셋의 나노튜브 팔들은 가시광선 빛의 파장보다 약간 길다. 이러한 나노 핀셋은 나노 수술을 수행하거나 한 세포 내의 단백질 복합체를 펼치거나 조작하는데 이용할 수 있을 것으로 기대된다. 이에 대해 노스웨스턴 대학교 화학과의 Chad A. Mirkin 교수는 "이러한 핀셋 응용분야는 무한하다. 이 모든 것들은 한 때 모두 공상 과학소설에 불과한 것들이었지만, 이제 우리는 그러한 것들이 실제 개발되고 있음을 목격하고 있다"고 말하고 있다.[Chad 1999] 한편 나노핀셋 역시 주사 탐침현미경 기술처럼 튜브를 붙이는 공정이 매우 복잡하고 시간이 걸리기 때문에, 직접 성장하여 응용할 수 있도록 연구가 필요하다. 아울러 생화학 분야에 응용하려면 생물에 손상이 가지 않을 정도의 낮은 전압에서도

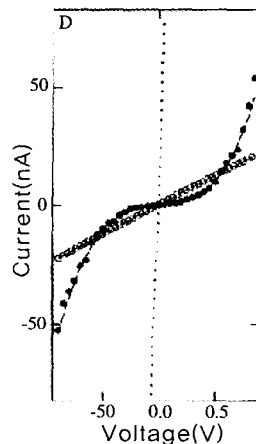
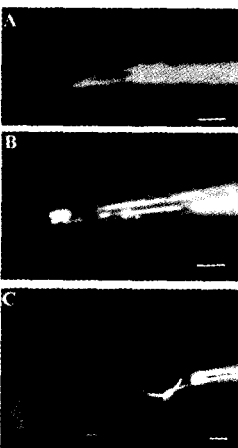
나노 핀셋 제작 : A. 두 개의 독립된 금속전극을 증착하고 나노튜브를 붙이는 개략도, B. 유리 피펫을 늘인(시작 : 1mm, 끝 : 100nm) 후 그 위에 두 개의 분리된 전극을 증착한 SEM 이미지, C. 분리된 전극에 두 개의 다중 벽 나노튜브 다발을 붙여서 만든 나노 핀셋의 SEM 이미지



나노 핀셋의 전기 역학적인 응답 : A~E 0, 5, 7.5, 8.3, 8.5V에 따라 구동하는 나노 핀셋의 dark field 이미지. F 길이 5μm, 직경 45nm, 간격 1μm일 때 계산된 나노 핀셋의 전압응답 그래프.



나노 핀셋으로 반경이 310nm인 polystyrene 나노클러스터를 잡는 것을 연속적으로 측정된 dark field 이미지 : A 접근, B 정열, C, D 이동



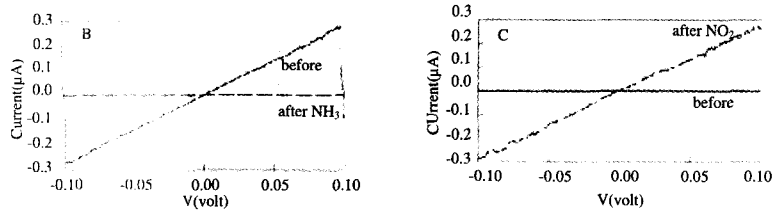
나노 핀셋으로 측정된 나노구조들의 전기특성 : A. 닫힌 나노튜브 팔, B 도핑된 SiC 나노 클러스터, C. GaAs 나노 wire 이미지, D. 측정된 I-V 데이터 그래프(열린 원 : B 측정, 닫힌 원 : C 측정)

구동할 수 있도록 해야 한다. 앞으로 이 나노 핀셋(Nano-tweezer)은 전자회로, 유전자 칩, 그리고 마이크로 수술 등의 영역에서 활용될 미세 도구들의 개발을 촉진하게 될 것으로 기대된다. 아울러 나노 기술분야에서 전기 측정과 같은 물성 측정 도구로서 유용하게 쓰일 것이다.

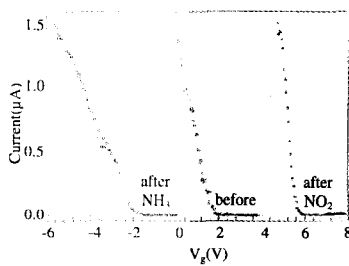
나노 가스 센서 (nano gas sensor)

한 가닥의 단층탄소나노튜브를 사용하여 자동차 배기가스에서 흔히 발견되는 암모니아(NH₃)와 산화질소(NO₂)를 검출하는 감도 높은 센서로 쓸 수 있다는 연구 결과가 최근 발표되었다. 미국 Stanford 대학교의 H. Dai 교수는 탄소나노튜브들이 다른 기체에 노출되었을 때 전기 전도성이 크게 달라진다는 사실을 알아냈다.[Jing 2000] 탄소나노튜브가 산화질소 기체에 노출되었을 경우 전기 전도성이 1,000배나 증가하였으나, 반면 암모니아에 노출되었을 경우 전도성이 급격히 떨어졌다. 그는 이러한 나노튜브의 특성변화를 문제점으로 받아들이기보다는 오히려 유용하게 활용하여 가스 센서를 제작하였다. 그러나 아직도 상용화되기까지는 해결해야 할 난제들이 있다. 특히 나노튜브 가스센서는 감응시간이 수 분 정도나 되어 대단히 느리며, 사용 후 다시 보정을 시켜주는 데 반나절이나 시간이 소요된다. 이 시간 동안에 나노튜브가 원래의 전도성을 회

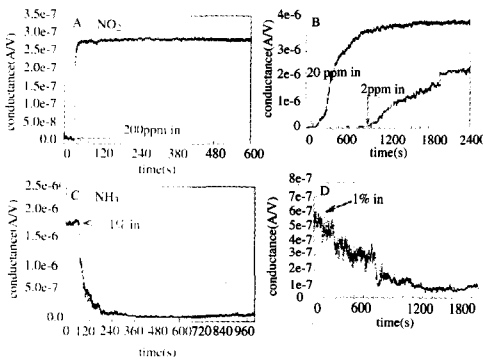
화학적 환경에서의 단층탄소나노튜브의 전기 특성 변화 : A 실험에 사용된 금속/ 한 가닥 단벽 탄소나노튜브 / 금속 sample의 AFM 이미지(직경 \approx 1.8nm, 금속 전극두께 = Au 60nm/ Ni 20nm)



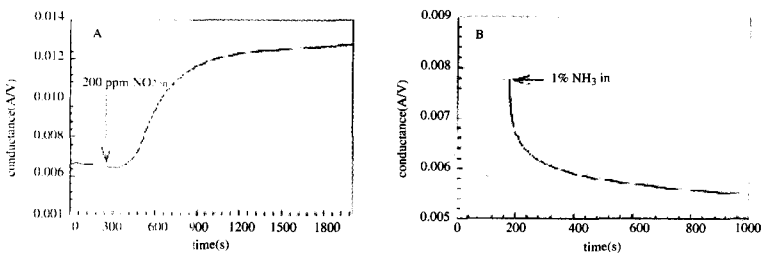
B 암모니아 가스에 노출되기 전과 후의 I-V 특성 변화 곡선, C. 이산화질소에 노출되기 전과 후의 I-V 특성 변화 곡선



반도체 특성을 가진 단벽 탄소나노튜브의 화학적 gating 효과
원 : 이산화질소 처리 전 I-Vg 곡선, 세모 : 이산화질소 처리 후 I-Vg 곡선, 네모 : 암모니아 처리 후 I-Vg 곡선



가스 분자에 따른 반도체특성을 가진 단층탄소나노튜브의 전기적인 응답 : A. 이산화질소 200ppm을 흘려주었을 때 시간에 따른 전도도 변화 곡선(Vg = 4V, 초기 상태 : 절연), B. 20ppm과 2ppm 흘려주었을 때 데이터. 두 곡선이 시간 축에 따라 명백하게 이동됨, C. A와 같은 양의 Ar을 흘려주고 암모니아를 1% 흘려 주었을 때의 전도도 변화 곡선(Vg = 0V, 초기 상태 : 절연), D. 암모니아 0.1%를 흘려 주었을 때 기록된 데이터. $\sim 3.5e-7$



이산화질소와 암모니아 분자에 따른 단층탄소나노튜브 박막의 전기적인 응답 : A. 이산화질소를 200ppm 분위기에서 시간에 따라 기록된 전도도 변화 데이터, B. 암모니아를 1% 분위기에서 시간에 따라 기록된 전도도 변화 데이터

복하게 된다. 한편, 아직 아무도 어떤 이유로 그러한 전도성의 변화가 일어나는지 메커니즘을 밝혀내지 못하고 있다. 따라서 나노튜브를 센서로 상용화하려면 앞으로 지속적인 연구가 필요하다.

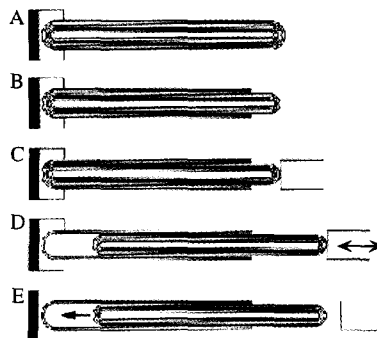
만일 이들 나노튜브들을 특성화시켜 다른 기체들도 분간할 수 있게 만들 수 있게 될 경우, 여러 개의 나노튜브 센서들을 한 개의 소자 위에 장착하여 그야말로 "1개 칩 상의 코"를 만들 수 있을 것이며, 온도변화에도 강하기 때문에 이러한 장치는 오염 물질들을 검출해내고 다른 혹성들의 대기권을 분석하는데도 사용될 수 있을 것이다.

탄소 나노튜브로 만들어진 나노 베어링과 스프링

California Berkeley 대학의 J. Cumings와 A. Zettl은 다층탄소 나노튜브를 이용하여 나노스케일의 선형 베어링을 만들었다.[John 2000] 아울러 이 나노 베어링은 내외부로 미끄러질 때 나노 스프링처럼 행동한다. 이들은 미세한 탄소나노튜브의 주변을 움직이기 위해 조정자(manipulator)를 세웠었다. TEM chamber안에 원자를 볼 수 있는 STM을 만들었다. TEM은 비디오를 구성하기에 충분한 일초에 수 프레임의 속도와 수 나노미터 이하의 분해능으로 사진을 만들어내는데 전자빔을 사용한다. STM의 미세한 끝을 가진 probe를 사용하여 큐밍은 나노튜브를 조정할 수 있었고 모든 작업을 실

시간 TEM관측했다. 베어링을 만들기 위해 그는 금으로 만든 전선에 다층나노튜브의 한 쪽 끝을 최초로 붙였다. 이 나노튜브를 조정하기 위해서 그는 STM probe 끝으로 더 튼튼한 나노튜브를 걸리게 했다. Nature지에 어떻게 원래대로 내민 내부 나노튜브를 남겨두면서 외부 나노튜브의 끝을 벗어나게 할 나노튜브 조정자를 사용했는지 설명했다.[John 2000-1] 전형적인 실험은 아홉 개의 벽으로 둘러 쌓인 나노튜브를 두 개의 겹쌓인 튜브 안쪽에 약 100개 원자 넓이인 바깥지름 8nm로 전환 시켰고, 네 개의 벽을 가진 내부지름과 그리고 4nm 바깥지름으로 전환시켰다. 또 외부 튜브의 안팎에 내부 튜브를 미끄러질 수 있게 하였다. 안쪽 나노튜브의 끝에 조정자를 용접한 후에 망원경처럼 그들을 겹 쌓았다. 비록 단지 직선형 베어링처럼 나노튜브 내외부를 움직이도록 할 지라도 겹쌓인 나노튜브는 정확히 일하게 될 뿐만 아니라 회전하는 베어링이 될 것이라고 그는 말했다. 이러한 모든 조정화가 TEM상에서 수행되었기 때문에 밀고 당기는 10~20사이클 후 나

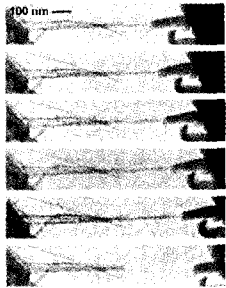
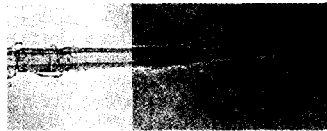
노튜브 구조를 가까이 볼 수 있었다. 그는 분자구조에 있어 아무런 변화도 볼 수 없었다. 그것은 두 개의 미끄러지는 나노튜브 사이는 필수적으로 마찰력이 없다는 것을 가리킨다. 이것은 다시 20번 또는 100만 번 수행해도 낡지 않는 베어링임을 의미한다. 나노튜브를 겹겹이 쌓은 것처럼 한 번에 스폿용접이 중단되고 놀랍게도 내부튜브는 자동적으로 외부 나노튜브 안으로 수축되었다 그것은 소위 van der Waals인력에 의한 효과이다. 이것은 미끄러지는 나노튜브가 나노 스프링 역할을 할 수 있다는 것을 의미한다. 이 나노 스프링에서 완전한 핵 수축에 대한 주향시간(1~10nsec)은 극도로 빠른 전자 기계적인 스위치의 가능성을 암시한다.[Laszlo 2000] 그와 같은 van der Waals인력은 명백히 나노튜브 베어링을 미끄러지게 하며, 흑연에서 탄소의 얇은 층을 미끄러지게 할 힘으로 확인되며 2차원 평면을 따라 쉽게 흑연이 깨질 수 있게 만든다. 마모되거나 찢기지 않고 움직임을 나타내는 스프링과 베어링은 전자 현미경과 전 세계적으로 개발하는 나노스케일



A~E는 TEM으로 봤을 때를 가정한 실험 준비의 개략도 :

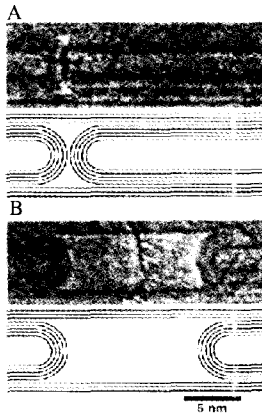
- A. 다층탄소나노튜브의 끝을 여는 공정.
- B. 내부 튜브를 노출시킴
- C. 내부튜브에 나노 조정자를 붙임
- D. 망원경처럼 밀고 당김 반복
- E. 내부튜브를 놓으면 van der Waals 인력에 의해 당겨짐

망원경과 같은 나노튜브의 TEM 이미지 : 원래 튜브는 아홉 개의 shell을 가졌으나, 오른쪽의 이미지는 네 개의 shell 중 내부의 shell을 거의 끝까지 늘린 것임



망원경과 같은 다층탄소나노튜브의 비디오 녹화 이미지 중 선택된 프레임 : 먼저, 다섯 개의 프레임은 내부의 튜브를 오른쪽으로 서서히 늘어 뻤 것, 여섯 번째 프레임은 van der Waals 인력에 의해 당겨져서 내부튜브가 외부튜브 안으로 빨려 들어간 이미지

대나무 형태 다층탄소 나노튜브의 마디의 TEM 이미지 : A. 성장된 대나무 형태 원래 다층탄소나노튜브의 마디, B. A부분에서 오른쪽의 내부 튜브를 망원경처럼 늘어 뻤 때의 이미지. 대 마디는 독립적이고 외부튜브 안에서 자유롭게 움직인다



전체에 일정한 힘을 발휘하기 때문에 그러한 나노 스프링이 MEMS와 NEMS 장치에 대한 유용성을 증명할 수 있을 것으로 기대한다. 낮은 마찰력, 낮은 마모성의 나노 베어링과 나노 스프링은 MEMS 기술에 필수적인 요소이다.

나노튜브 트랜지스터

C. Dekker가 이끄는 네덜란드 델프트 공대(Delft University of Technology)의 연구팀은 상온에서 작동하는 지극히 작은 크기의

트랜지스터를 탄소나노튜브를 이용하여 제조하였다.[Sander

1998] 이 연구에 따르면, 이 나노튜브 트랜지스터가 현재의 실리콘 소자보다 작동 속도가 100배 정도 빨라서 장래의 전자공학에서 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다.

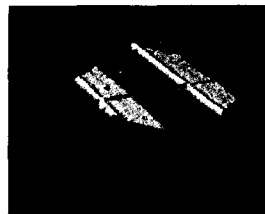
연구팀은 우선, 폭이 1.4nm

정도의 단일벽 (singlewalled) 나노튜브를 실리콘 칩에 장착된 한 쌍의 백금 전극 위에 흘뿌렸다. 그런 다음, 나노튜브를 통과하는 전류에 대한 저항 값을 측정하는 방법으로 단 한 개의 나노튜브로 연결된 전극의 쌍을 얻어냈다. 뒤 이은 실험에 의하여, 연구팀은 이러한 구조가 장-효과 (field-effect) 트랜지스터의 역할을 한다는 사실을 알아낼 수 있었다. 즉, 실리콘 기관의 전기장이 나노튜브를 통한 전자의 흐름을 증가시키는 효과를 보였다. 이 과정에서 나노튜브의 전체 부분이 참여하는 것으로 보인다고 연구팀은 분석했다. 이 실험은 분자 전자공학에 있어서의 중요한 발전이다. 실온에서 작동하는 분자 기구는 매우 유용하며 그 전류 값이 응용하기에 매우 적절하다.

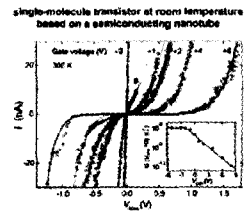
나노튜브를 이용한 상온 단전자 소자를 상용화 하기 위해서는 아직도 많은 시행착오를 거쳐야 하겠지만 그것을 생산하고 다루는 분야에서의 발전이 매우 빠르

기계의 중요한 성분일 수 있다.

마이크로 전자기계학 시스템(MEMS)을 위한 마이크로 기계는 인간의 머리카락 정도이다. 나노 전자기계학 시스템(NEMS)은 천 배 더 작으며, 1~10억 분의 1미터 스케일이다. 마찰은 MEMS가 갖고 있는 큰 문제이다. 그러나 이러한 나노 스케일 베어링은 마치 마찰이 없는 것처럼 미끄러진다. 보다 낮은 한계의 마찰은 실리콘 또는 실리콘 나이트라이드로 만들어진 전통적인 MEMS장치에서 발견한 것보다 1,000배 더 작다. 최소한은 아니지만 그것들이 그들의 운동 범위



탄소 나노튜브 트랜지스터의 AFM 이미지



상온에서 측정된 탄소 트랜지스터의 특성



Kink된 나노튜브의 AFM 이미지와 원자구조. 나노튜브의 전기적 특성을 금속에서 반도체로 바꿈

게 진행되고 있어 조만간 전자회로 분야에 크게 이바지할 것으로 기대된다.[Paul 1998]

탄소나노튜브로 제작한 마이크로 섬유

프랑스의 University of Bordeaux의 P. Poulin 연구팀에 의해 마이크로 스케일의 탄소나노튜브 섬유가 제작되었다.[Brigitte 2000] 이 연구팀은 단층탄소나노튜브를 무한히 긴 끈과 기질로 가공시켰다. 이 끈들은 흩어져 있는 나노튜브를 포함하고 있는 물질들을 정화시켜 만

든 것으로 나노튜브 물질을 망상 조직으로 만들기 위해 중합체 솔루션의 스티프로 주입하여 회전시키면서 실처럼 뽑아냈다. 그리고 제작된 섬유의 내부와 표면 구조를 분석하고, 매듭을 만들어보았다. 또 인장력을 시험하였는데, 1분 동안 1%를 늘이는 속도에서 15GPa까지 버텼다.

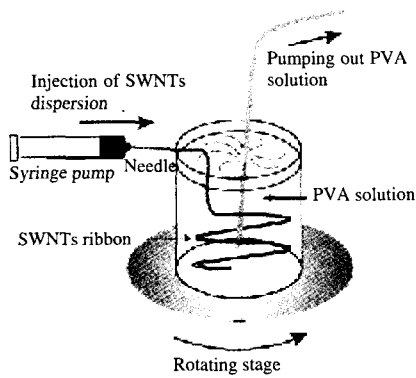
이러한 연구 성과는 차세대 마이크로 프로세서에서 매우 중요하다.[Ray 2000] 아울러 이 섬유로 모직물을 만들 경우 방탄조끼처럼 강한 옷을 제작할 수도 있을 것으로 기대한다.

나노 장비 구동장치

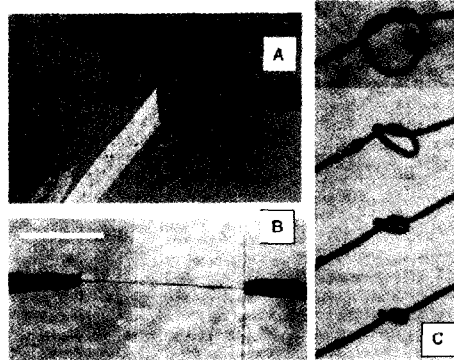
Allied Signa 1사의 재료과학자 R. Baughman이 이끄는 국제적인 팀이 자동차나 의료분야, 우주항공분야에 다양하게 사용되는 새로운 타입의 인공 근육을 개발했다.[Ray 1999]

연구팀이 개발한 소자는 새로운 형태의 기전 구동장치(electro-mechanical actuator : 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 장치)라 할 수 있다. 연구팀은 두 개의 전해질로 채워진 나노튜브 시트가 배터리에 연결되어질 때 이들이 천연의 근육과 유사한

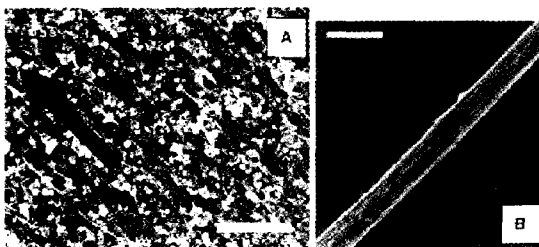
기계적 운동을 수행할 수 있는지를 실험하였는데, 양쪽 면의 나노튜브 층에 전압을 걸자 strip 전극이 휘었다. 이러한 휨현상은 전하를 지닌 양쪽 층이 서로 다른 팽창 정도를 지니기 때문이다. 즉, 양쪽 모두 팽창하지만 한 쪽이 더 팽창하므로 덜 팽창된 쪽으로 휘게 되는 것이다. 분석 결과 탄소나노튜브는 천연의 근육이나 모터에서 직접적으로 전기 에너지를 기계적 에너지로 전환시키는데 유용하게 사용되는 기존의 소재보다 내구성이나 강도가 뛰어난 것으로 나타났다. 탄소나노튜브를 사용함으로써 기대되



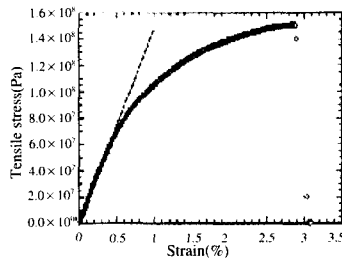
단층탄소나노튜브로 섬유를 제작하기 위한 실험 준비 개략도



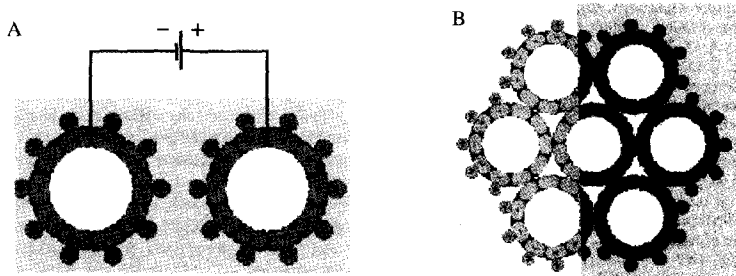
나노튜브 섬유의 광학 현미경 이미지: A. 수평, 수직, 45도 방향으로 접음. B. 나노튜브 리본을 유리에 붙여서 늘여서 섬유를 만들. C. 나노튜브 마이크로 섬유를 꼬아 만든 매듭



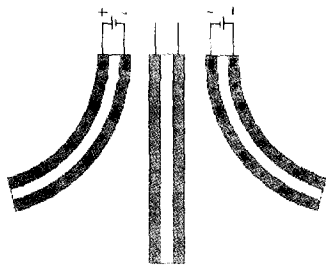
SEM 이미지 : A. 유리표면 위의 건조된 나노튜브 리본, B. 나노튜브 섬유 (직경 : 15~20 μ m)



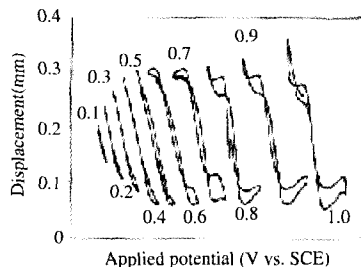
노튜브 섬유의 인장력 실험 곡선 : 1분당 길이의 1%를 늘이는 속도로 실험한 결과, 약 15GPa까지 버팀



전기역학적인 나노튜브 구동기 안의 전하 주입과 단층탄소나노튜브 다발효과 : A. 액체나 고체 전해질 안에서 두 나노튜브 전극에 전압을 걸면 전하가 주입되어 안과 밖의 상이 달라짐. B. 나노튜브 다발의 표면전하 주입

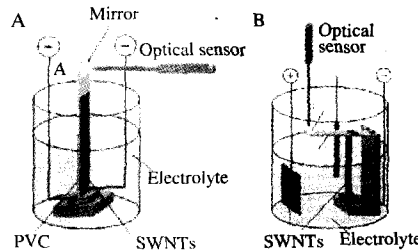


NaCl 전해액에 담근 후 전압을 걸었을 때 양극에 쌓이는 이온의 차이로 팽창률이 달라져 나노튜브 strip이 휘는 그림

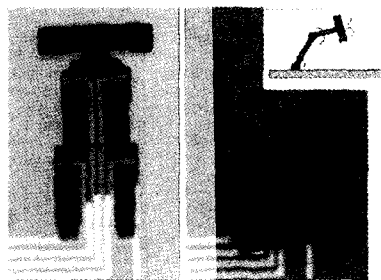


나노튜브 구동기 특성 곡선 : 인가된 전압에 따라 특성이 달라짐. 약간의 히스테리시스가 보임. (1M NaCl 용액, 215mm 두께의 PVC 테이프 위에 15mm 두께의 단층탄소나노튜브 필름을 만들)

는 장점으로는 알려진 기술과 비교할 때 일을 할 수 있는 능력과 힘을 창출할 수 있는 능력이 증가할 뿐만 아니라 낮은 전력이나 높은 온도에서도 작동할 수 있는 능력을 아울러 갖추고 있다. 나노튜브가 앞으로 사용될 분야로는 로



A. 나노튜브 구동기 특성을 측정하기 위한 실험 개략도
B. 나노튜브 구동기의 길이에 따른 특성 파악을 위한 실험 개략도



마이크로 로봇 필[Olle 1999]

보틱스, 바이메탈 온도계(bimetallic thermocouple), 인공 심장, 극도로 정밀한 기계, 광학 섬유 스위치, 항공기 제어 시스템, 광학 계기반과 같은 주요한 제품에 사용되는 작동기(actuator)에 내장될 것이다.

탄소나노튜브로 만들어진 만년필

나노 테크놀러지의 발전은 원자나 분자 크기를 갖는 부품을 다룰 수 있는 도구의 부족으로 지연되어 왔다. 현재 원자를 다룰 수 있는 가장 우수한 방법은 표면 주위에서 단일 원자를 이동시킬 수 있는 주사투과현미경(STM)을 사용하는 방법인데 이것은 매우 느리고 많은 작업이 요구된다. 그러나 D. Tomanek과 P. Kral은 원자들로 미리 채워진 그들의 원자 펌프를 사용하면 15마이크로 초에 원자 하나의 비율로 표면에 원자를 축적시킬 수 있을 것이라고 예측하고 있다. 펌프의 "잉크 카트리지"는 탄소나노튜브로 만든다. 그리고 이것은 필요한 원자들로 채워질 수 있을 것이다. 한 레이저의 진동수가 나머지 다른 한 레이저의 진동수의 두 배가 되는 레이저로부터 나온 두 개의 간섭하는 레이저 빔은 원자의 흐름을 제어할 것이다. 레이저들은 튜브에 쏘이면 공전효과에 의해서 튜브 벽에서 전자를 발생시킬 것이다. 레이저 빔 사이의 간섭은 전자들을 따라서 움직일 것이다. 전자들은 흘러가면서 갇혀 있는 원자에 힘을 유발하고 원자들을 뿜어낸다. 레이저 빔의 위상차와 강도를 조절하면 원자들의 흐름 방향과 속도를 조절할 수 있다. 이렇게 함으로써 튜브의 끝에서 나온 원자들은 정확한 위치에 도달할 수 있게 되는 것이다.[Seunghun 1999]

Mechatronics 응용분야에서 전자소자의 크기가 소형화 됨에 따라서 미세소자 간의 배선 길이와 폭도 감소되어야 하는데, 기존의 금속막 배선방법 대신에 탄소나노튜브를 배선으로 사용할 경우 우수한 효과가 기대된다. 또한 탄소나노튜브의 우수한 전기 및 열 전도도와 기계적 강도와 나노튜브의 미세크기를 이용하면 초미세 시스템의 미세 연결선, 초미세 파이프, 주입장치 등에 적용이 가능하다. 나아가서는 여러 가지 센서의 제작과 탄소와 생체조직(C, H, O, N)과의 친화성 이용한 각종 의료용 장치의 부품으로서의 응용도 기대된다.

맺음말

탄소나노튜브가 발견된 지 10년이 지났지만 본격적인 연구는 1996년 탄소나노튜브가 실험실 수준에서 대량으로 만들어지기 시작한 이후부터이다. 탄소나노튜브를 이용한 nanomechanics 응용은 나노기술의 첫 걸음이라고 해도 과언이 아니다. 이 분야에 비 전문가인 사람들은 지금 이런 일을 시작하면 늦지 않을까 생각할 수 있다. 그러나 절대 그렇지 않다. 나노기술분야는 나노튜브를 이용한 새로운 item 자체가 세계에서 최초이다. 기존의 나노튜브전문가와외의 공동 연구를 통해 자기분야의 영역을 나노기술로 접목시킬 수 있는 좋은 기회라도 할 수 있다. (<http://nano->

[참고문헌]

[1] [Dai 1996] Dai, H., Hafner, J. H., Rinzler, A. G., Colbert, D. T. & Smalley, R.E. Nature 384, 147-150(1996).
 [2] [Jason 1999] Jason H. Hafner, Chin Li Cheung, Charles M. Liber. Nature, 398, 761-762 (1999).
 [3] [Philippe 1999] Philippe Poncharal, Z. L. Wang, Daniel Ugarte, Walt A. de Heer. Science 283 1513-1516 (1999).
 [4] [Philip 1999] Philip Kim, Charles M. Liber Science, 286 2148-2150 (1999).
 [5] [Chad 1999] Chad A. Mirkin. Science, 286 2095-2096 (1999).
 [6] [Jing 2000] Jing Kong, Nathan R. Franklin, Chongwu Zhou, Michael G. Chapline, Shu Peng, Kyeongae Cho, Hongie Dai. Science, 287 622-635 (2000).
 [7] [John 2000] John Cumings and A. Zettl. Science, 289 602-604 (2000).
 [8] [John 2000-1] John Cumings and A. Zettl. Nature, in press (2000).
 [9] [Laszlo 2000] Laszlo Forro. Science, 289 560-561 (2000).
 [10] [Sander 1998] Sander J. Tans, Alwin R. M. Verschueren

& Cees Dekker. Nature, 393 49-52(1998).

[11] [Paul 1998] Paul L. McEuen. Nature, 393 15-17(1998).
 [12] [M. S. 2000] M. S. Fuhrer, J. Nygard, L. Shin, M. Forero, Yoiung-Gui Yoon, M.S.C. Mazzone, Hyoun Joon Choi, Jisoon Ihm, Steven G. Louie, A. Zettl, Paul L. McEun. Science 288 494-497(2000).
 [13] [Brigitte 2000] Brigitte Vigolo, Alain Penicaud, Claude Coulon, Cedric Sauder, Rene Paillet, Catherine Jourenet, Parrick Bernier, Philippe Poulin. Science, 290 1331-1334 (2000).
 [14] [Ray 2000] Ray H. Baughman. Science, 290 1310-1311 (2000).
 [15] [Ray 1999] Ray H. Baughman, Changxing Cui, Anver A. Zakhidov, Zafar Iqbal, Joseph N. Barisci, Geoff M. Spinks, Gordon G. Wallace, Alberto Mazzoldi, Danilo De Rossi, Andrew G. Rinzer, Oliver Jaschinski, Siegmur Roth, Miklos Kertesz. Science, 284 1340-1344 (1999).
 [16] [Olle 1999] Olle Inganäs and Ingemar Lundström. Science, 286 1281-1282 (1999).
 [17] [Seunghun 1999] Seunghun Hong, Jin Zhu, Chad A. Mirkin. Science, 286 523-525 (1999).