

◆특집◆ 차세대 패터닝 공정 기술

탄소 나노튜브의 조립 및 패터닝 기술

한창수*, 이응숙**

Assembly and Patterning of Carbon Nanotube

Chang Soo Han*, Eung-Sug Lee**

Key Words : Carbon nanotube(탄소 나노튜브), Assembly(조립), Patterning(패터닝), Dielectrophoresis(유전영동), Langmuir-Blodgett(랭뮤어 블라젯)

1. 서론

탄소 나노튜브는 지름은 겨우 머리카락 굵기의 10 만분의 1 밖에 되지 않으면서 강도는 철의 100 배가량 되고 무게는 철의 1/3 정도밖에 되지 않아 자동차, 항공기, 선박 등의 재료에 적합하고, 어떠한 금속보다 전류나 열을 훨씬 더 많이 운송할 수 있는 능력으로 전력선이나 배터리 소재에 이용할 수 있으며, 또한 여러 종류의 빛 (전자빔, X-ray)을 낼 수 있어서 TV 를 얇게 만들 수 있을 뿐 아니라, 병원의 X-ray 장비들을 가방 사이즈로 만들 수 있다. 이외에도 수소를 저장할 수도 있고, 전자파를 막아주기도 하고, 일부는 반도체성질을 띄어서 데이터 저장장치나 트랜지스터와 같은 전자소자로 만들 수 있다. 더군다나 탄소 나노튜브를 사용하면 기존의 장치들의 크기를 매우 작게 만들 수 있어서 사용전력이 줄어들고 휴대가 간편한 장치들을 만들 수 있다.¹⁻⁵

이 소재는 아크 방전법(Arc Discharge)으로 흑연 음극상에 형성시킨 탄소덩어리를 분석 하던 중 우연히 발견하게 된 긴 대롱 모양의 직경이

2.5~30nm, 길이가 수 nm~수 um 정도인 탄소 나노튜브로 1991 년 일본의 이지마(Ijima)박사에 의해 처음 보고 되었다.⁶ 이후 현재까지 전 세계적으로 많은 연구자들이 이 소재를 이용해 여러 가지 응용제품을 만들기 위한 연구를 진행하고 있으며, 십 수년의 짧은 기간임에도 불구하고 괄목할만한 성과들이 많이 나타나고 있다.

탄소 나노튜브가 아직까지 우리의 생활속에서 사용되는 실제 제품들에 활용되지 못하고 있다. 앞에서 설명했듯이 매우 이상적이고 매력적인 소재임에는 틀림없지만 그것으로 제품을 만들기 위해서는 해결해야 될 몇 가지 문제점을 가지고 있다.

첫째는 소재 자체에 대한 것이다. 방법적으로 결정성이나 직선성이 좋은 탄소 나노튜브는 순도가 낮게 제작되어 정제(Purification)하기가 매우 어려운 단점을 갖고 있고, 반대로 순도는 매우 높은 탄소 나노튜브는 결정성이나 직선성이 좋지 못하게 제조되곤 한다. 또한 아직까지 반도체와 메탈 특성을 제어하거나 분리하는 것이 거의 불가능하기 때문에 물리적 성질을 활용해야 되는 전자소자나 센서에서는 치명적인 문제점이 되고 있다. 따라서 현재까지는 대량으로 제품을 만드는데 이용되지 못하고 있다. 둘째는 원하는 형태로 나노튜브를 조립하거나 패터닝을 만드는 일이 어렵다. 예를 들어 나노튜브를 한 개씩 원하는 위치에 원하는 형태로 정렬되도록 하기 위해서 현재 몇 가지

* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부
Tel. 042-868-7126, Fax. 042-868-7721
Email cshan@kimm.re.kr
탄소 나노튜브 응용 및 분자 조립 기술에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.
** 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

방법이 사용되고 있으나 아직까지 대면적에 매우 빠른 속도로 이러한 일을 할 수 있는 방법은 개발되지 못했다. 또한 대부분의 정렬 방법이 표면 위에 놓여지는 2 차원적인 조립 이며, 3 차원적으로 나노튜브를 정렬 및 조립하는 기술은 아직 개발되지 않고 있다. 셋째는 가격이 아직까지는 제품에 활용되기에는 높은 실정이다. 하지만 이것은 대량생산의 불고개 트이년 그에 따라 낮아질 가능성이 크고, 현재 이 분야에 대해 향상된 연구 결과도 출되고 있기 때문에 문제 해결 가능성이 매우 높다고 할 수 있다. 이외에도 아직까지 나노튜브의 물리적 성질이나 특성들에 대해 밝혀지지 않은 것들이 많이 남아있기 때문에 이를 이해하는 것도 매우 중요한 연구 과제라고 할 수 있다.

2. 탄소 나노튜브의 구조 및 성질

탄소 나노튜브에서 하나의 탄소원자는 3 개의 다른 탄소원자와 sp^2 결합을 하여 육각형의 벌집무늬를 가지게 되며, 둘러싼 겹질의 층수에 따라 그림 1 과 같이 단일벽 탄소 나노튜브(Single-Walled Nanotube: SWNT), 다중벽 탄소 나노튜브(Multi-Walled Nanotube: MWNT)로 분류된다. 특히 매우 특이한 현상으로서 감겨진 육각무늬의 비틀림 정도에 따라 나노튜브는 전기적 성질이 달라져서, 가해지는 전류를 통과시키는 전도체(Conductor)가 되기도 하고, 전류의 이동을 막는 절연체(Isolator)가 되기도 한다. 또한 일부는 외부 환경의 변화로 비 전도체와 전도체로 서로 바뀔 수 있는 반도체(Semi-conductor)가 되기도 한다. 이론적 연구에 의하면 단일벽 탄소 나노튜브의 경우 1/3 이 금속성을 나타내고, 나머지는 밴드갭이 나노튜브의 직경에 반비례하는 반도체 성질을 나타낸다.

탄소 나노튜브 합성을 위해 초기에 사용된 방법은 아크방전법(Arc Discharge)이다. 이 방법은 매우 직선적이고 결정성이 우수한 탄소 나노튜브를 제조할 수 있으며, 그 후 발전된 레이저 증착법(Laser Ablation)은 1200° C 의 고온에서 오븐 안에 흑연 덩어리를 레이저로 쬐어서 흑연 혼합물과 사용하는 반응가스의 종류에 따라 SWNT 와 MWNT 를 만들 수 있다. 그 외에 열분해법(Pyrolysis), 불꽃반응(Flame)합성법등 여러 가지 방법이 있으나, 이러한 기술들은 대량으로 생산하기가 어렵고 불순물을 정제 해야 하는 큰 단점이 있다.

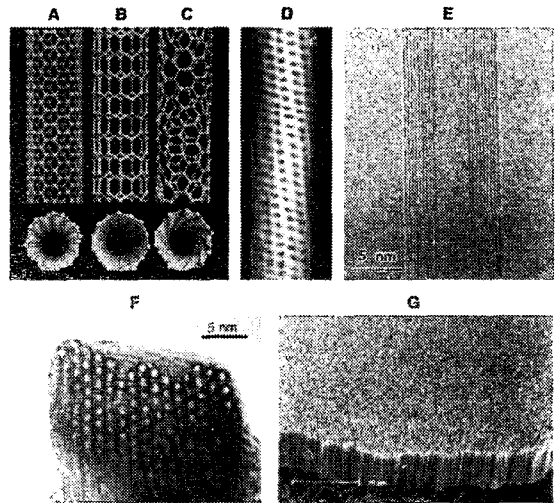


Fig. 1 CNT Structures according to twisting angle (A,B,C), (D) a photograph of Carbon nanotube by Scanning Tunneling Microscope (E) a photograph of Multi-walled Carbon nanotube by Transmission Emission Microscope (TEM) (F) bundled SWNTs (G) Carbon nanotubes in the shape of forest

이러한 단점을 보완할 수 있는 방법이 화학기상 증착법(Chemical Vapor Deposition: CVD)에 의한 제조 방법이라고 할 수 있다. CVD 법은 열 CVD 법, 직류(Direct Current: DC)플라즈마 CVD 법, 고주파(Radio Frequency: RF)플라즈마 CVD 법, 마이크로파 플라즈마 CVD 법으로 구분할 수 있다. 이 합성법은 대면적에 고르게 제작할 수 있는 장점이 있고 수직 배향이 가능하며, 또한 저온에서 합성이 가능하고 구조 제어 또한 용이한 장점을 갖고 있다. 최근엔 기상 성장법(Vapor Phase Growth)이라 하여 기판을 사용하지 않고 반응로 내부로 촉매금속 반응물과 탄화가스를 동시에 공급하여 반응로 안에서 기상으로 탄소 나노튜브를 합성하는 방법으로 대량합성에 유리한 장점을 가지고 있다.

3. 국내외 기술 동향

탄소 나노튜브의 조립 및 패터닝 기술분야에서 가장 많은 연구가 진행되는 것은 성장을 이용하는 방법이다. 탄소 나노튜브를 탄소계열의 가스가 들어있는 챔버(Chamber) 안에 넣고, 열을 가하

면 탄소 나노튜브가 기관 상에 있는 촉매로부터 Fig. 1(G)와 같이 자라게 된다. 이 때 촉매의 크기나 형태를 조절함으로써 나노튜브의 크기나 직경등을 제어할 수 있으며, 촉매의 패턴을 조절함으로써 간접적으로 나노튜브가 기관 상에 Fig. 2(a)과 같이 일정한 패턴으로 자라도록 할 수 있다. 촉매는 작고 균일하게 패터닝 될수록 날개의 나노튜브가 일정한 패턴으로 성장하도록 할 수 있는데, 이때 챔버 안에 균일한 성장 조건을 유지시켜주는 것이 어려우므로 대 면적에 나노튜브를 균일한 형태로 성장시키는 것은 매우 어렵다.









물성	특징
 크기	SWNT: 0.6-1.8nm MWNT: 10~100nm
 밀도	1.33~1.40 g/cm ³ ; 알루미늄(2.7g/cm ³)
 강도	450 Giga Pascal ; 일반 철(0.2 Giga Pascal)
 탄력	90도까지 손상 없이 켜
 전류 전송력	10 Giga Amp/cm ² (구리: 1 Mega A/cm ²)
 방출	1~3 Volt에서 전자 방출 (MoTip: 50~100V에서 방출)
 열 이송	6000Watts/m·K at 25°C (다이아몬드: 3320W/m·K)
 온도	진공에서 2800°C까지 견딜 대기에서 750°C까지 견딜 (대형: 600~1000도에서 녹음)

Fig. 2 Material properties of carbon nanotube²

이러한 성장 기술에 있어서 최근에 주로 연구되는 핵심 기술로는

- 1) 100%의 순도를 가지는 성장 기술
- 2) 성장 시 나노튜브의 속성제어 기술
- 3) 대면적 나노튜브 성장 제어 기술
- 4) 나노튜브의 기능화 기술
- 5) 제품응용을 위한 패턴화 기술

등을 들 수 있다. 이 분야에서 국내의 기술수준은 국제 수준과 비등한 정도에 있으며, 탄소 나노튜브를 이용한 여러 가지 제품의 개발을 위해 많은 산학연 연구기관들이 연구를 진행하고 있다.

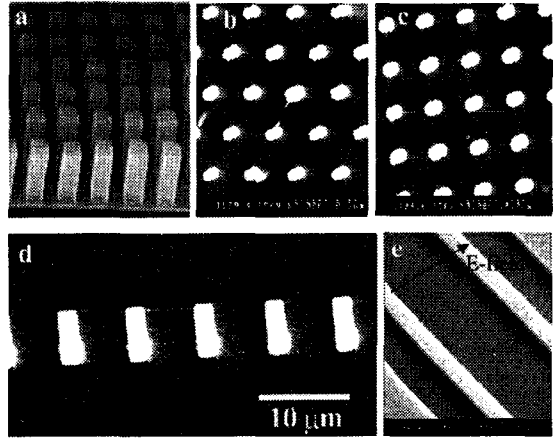


Fig. 3 Ordered carbon nanotube structure by CVD (a) self-oriented MWNT arrays (b) Hexagonal network of SWNTs (c) a square network of suspended SWNTs (d) Side view of suspended SWNTs (e) SWNTs grown along the electric field line on silicon structures.³

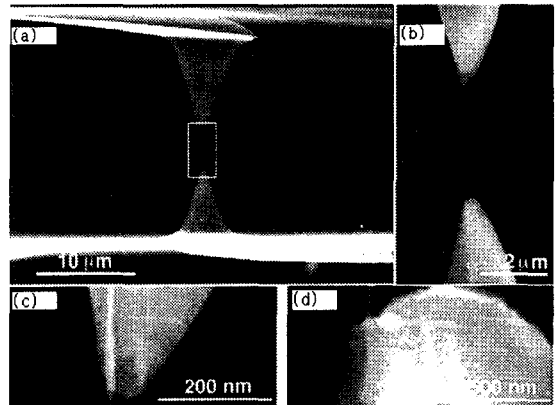


Fig. 4 An individual MWNT mounted between two opposing AFM tips (a) Two AFM tips holding a MWNT (b) High magnification image of the indicated region in (a), (c) Higher magnification image showing the attachment of MWNT on the top AFM tip (d) Closed-up SEM image showing the attachment of MWNT on the lower AFM tip.¹⁰

두 번째로는 나노튜브를 하나씩 조작하는 것이다. 이는 주사탐침현미경(Scanning Probe Microscope: SPM)을 이용하거나 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope: SEM)안에서 복잡한 구동이 가능한 조작기(manipulator)를 이용해 나노튜브를 하나씩 붙잡아서 원하는 물체에 부착하거나 나노튜브의 성질을 측정하는 것이다. 이 방법은 날개의 우수한 나노튜브를 원하는 대상에 부착할 수 있는 장점이 있지만 SWNT 는 관찰이 어려워서 부착이 거의 불가능한 것과 고가의 장비로 많은 시간을 필요로 한다는 단점이 있다. 국외에서는 Northwestern 대학의 R. S. Ruoff 교수 연구팀이 SEM 안에서 작동되는 다축 나노 구동장치(Nano Manipulator)를 이용해 탄소 나노튜브의 물성에 대한 연구를 발표한 이래로 최근에는 이러한 용도의 구동장치를 기업에서 제작하여 판매하고 있으며, 나노 연구를 위한 기반장비로서 활용하고 있다.¹⁰

세 번째로는 전기장(Field) 가이드 조립 방법이다. 전기장(electric field)이나 자기장(magnetic field) 및 유동장(Fluid field)을 이용해 나노튜브를 조립하는 방법이다.¹¹⁻¹⁴ 전기장을 이용해 조립하는 방법으로 많이 사용되고 있는 방법은 유전영동(dielectrophoresis)를 이용하는 방법으로서 두 개의 전극 사이에 불균일한 전기장을 형성시켜 용액 안에 놓여있는 탄소 나노튜브가 전극으로 끌려와서 부착하게 된다. 최근에 한국기계연구원에서는 이를 이용하여 Fig. 5 와 같은 두 전극상에 묶음형태로 되어있는 10nm 정도의 묶음형태로 되어있는 날개의 단일벽 탄소 나노튜브를 정밀하게 부착하였고, 이 원리를 이용하여 AFM 팁 끝에 나노튜브를 부착하여 고분해능과 장수명이 가능한 나노튜브 AFM 탐침을 제조하기 위한 간단하면서도 효과적인 방법을 개발하였다. 이러한 방법들은 향후 각종 센서나 반도체 소자 분야에 그 응용가능성이 높다. 기술적인 측면에서 현재의 수준보다 반복적인 성능으로 대면적에 수천 개에서 수백만 개 이상의 나노튜브를 빠르고 정확하게 조립하는 방향으로의 연구가 요구되고 있다.

네 번째로는 자기조립 분자막(Self Assembled Monolayer, SAM)을 이용해 나노튜브가 부착될 위치에 미리 패턴을 형성한 후에, 형성된 패턴 위에만 나노튜브가 부착되도록 조립하는 방법이다. 이 방법을 이용하게 되면 별다른 회로를 부가할 필요가 없는 장점이 있지만 대 면적에 날개의 나노튜브

가 부착될 만큼의 미세한 선을 패터닝 해야 하는 어려움이 있다. 마찬가지로 현재까지 100 개의 나노튜브를 90%정도의 성공률로 부착할 수 있다고 알려져 있다.⁹

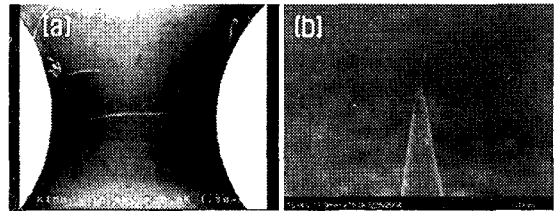


Fig. 5 Assembled carbon nanotubes by dielectrophoresis (a) single bundle of SWNT across the electrode (b) attached single MWNT on a AFM tip

탄소 나노튜브를 날개 상태로 제어하면서 조립하는 기술과는 달리 다수의 나노튜브를 특정하고체상 또는 기 형성된 패턴 위에 부착하는 기술을 나노튜브의 패터닝 기술로 정의할 때, 현재까지 가장 많이 사용되고 있는 방법은 SAM 을 이용한 표면처리를 통해 탄소 나노튜브를 고체 표면에 특정한 방향성이 없이 부착하는 기술이다. 최근에 이 기술을 이용하여 탄소 나노튜브를 이용한 투명한 전극 필름을 만드는 연구가 진행되었으며, 직경이 10cm 인 Quartz 기판상에 80nm 두께를 가지는 나노 필름을 제작하였다.¹⁶ 또한 LB (Langmuir-Blodgett) 단분자막(Monolayer)을 만들고, 이를 한쪽 방향으로 정렬되도록 유도한 후, 원하는 기판 위에 전사하여 나노튜브를 정렬하는 방법과 미리 기판상에 여러 가지 마이크로 패터닝 기법을 이용해 패턴을 형성해 놓고 패턴이 있는 위치에만 나노튜브가 정렬되는 연구가 진행된 바 있다.¹⁵

그러나 아직까지 이러한 방법들 중에서 어떤 방법이 과연 날개 혹은 다수의 나노튜브를 대량으로 대 면적에 정밀하게 조립 및 패터닝하기에 가장 적합한 기술인지에 대해서는 연구가 더 진행되어야 할 것으로 판단된다. 이 외에도 새로운 방법들이 속속 등장하고 있어서 다른 기술에 비해 특정 기술의 기술적 우위를 속단하기는 쉽지 않은 것이다.

4. 조립 및 패터닝 기술의 응용

대표적으로 탄소 나노튜브의 조립 및 패터닝 이 기술적으로 중요한 분야에 대해 정리해보면 Fig. 5 과 같다.

나노튜브를 한 개씩 원하는 위치에 부착하는 기술은 현재 상업화에 성공한 AFM 팁을 비롯하여 X-Ray 팁과 같은 것들이 있다. 하지만 10 억개의 나노튜브를 한 개의 웨이퍼 상에 정렬 및 조립하는 것은 거의 꿈에 가까운 기술이다. 이런 기술은 현존하는 어떤 메모리보다 집적밀도가 높은 메모리를 구현할 수 있을 뿐 아니라 많은 전자소자나 집적화된 나노 소자들을 만들 수 있게 해 줄 것이다. 이러한 양 극단의 조립 및 패터닝 기술 사이에 있는 수백에서 수천개의 나노튜브를 날개로 정렬 할 수 있다거나 선이나 면적 등의 형상으로 균일하게 패터닝하는 기술도 여러 가지 제품에 응용될 수 있는 중요한 기술이다. 개수도 꼭 하나씩이 아니어도 되는 경우도 있으며, 다른 물질들과 섞여서 사용되어야 하는 응용 제품들도 있다.

구체적인 예로 디스플레이를 들 수 있다. 최근에는 브라운관 TV 시대에서 점차 액정 표시 장치(Liquid Crystal Display: LCD), 플라즈마 패널 표시 장치(Plasma Display Panel: PDP)등의 새로운 디스플레이 소자들이 부상하고 있으며, 탄소 나노튜브를 이용한 전계 방출 표시 장치(Field Emission Display: FED)의 개발도 이 경쟁의 대열에 최근 합류하였다. 탄소 나노튜브는 전자빔을 방출하는데 있어서 저전력, 고효율의 이상적인 성능을 가지고 있어서 전계 방출용 팁으로 많은 사람들이 연구를 진행하고 있으며, 삼성종합기술원의 경우 1999년에 5인치 전계 방출 디스플레이를 세계에서 처음으로 발표하였다.⁸ 이러한 디스플레이는 Fig. 7 에서와 같이 수직으로 정렬된 나노튜브의 끝 단에서 전자빔이 방출되는 것을 이용한 것으로서 나노튜브가 올라간 전극상에 나노튜브가 가능한 정확하게 정렬되도록 하는 것이 이상적이다. 하지만 현재 사용되고 있는 방법들은 대면적에 나노튜브가 균일하게 같은 양만큼 정확한 위치에 정렬되도록 하지는 못하고 있어서 상용화가 지체되고 있다.

이 외에도 나노튜브를 이용해 메모리를 제작하려는 노력이 이루어지고 있는데, 이것은 나노튜브가 기존의 반도체 기술의 한계로 지적되는 50nm 이하의 선폭을 구현할 수 있을 뿐 아니라 기존의 실리콘 소재에 비해 우수한 응답특성과 열적 특성을 가지고 있어서 차세대 메모리의 대표적인

후보 물질의 하나로 여겨지고 있기 때문이다.

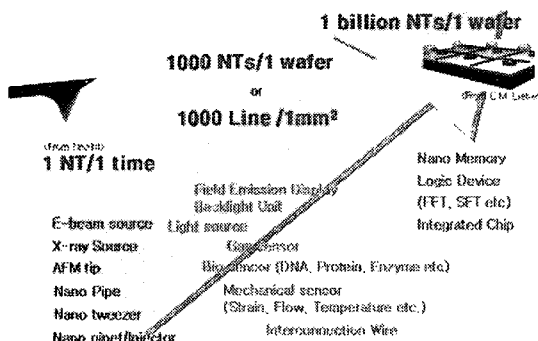


Fig. 6 Application areas of carbon nanotube in assembling technology. (NT: nanotube)

그러나 마찬가지로 넓은 면적에 대량의 나노튜브를 날개로 정렬하는 것이 매우 어렵기 때문에 실험실 수준에서의 가능성 구현 실험은 많이 이루어지고 있지만 상업화에는 아직까지 이르지 못하고 있다.

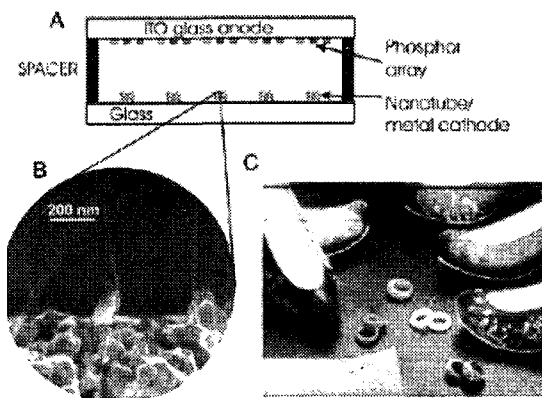


Fig. 7 Nanotube FED made by SAMSUNG (A) Basic Structure of display device (B) Vertically aligned carbon nanotube on a metal electrode (C) Photograph of a nanotube FED

미국의 Nantero 사는 2000년 Ruckes 등이 제안한 나노튜브 메모리에 대한 아이디어를 기초로 한 상업화 연구를 수행하고 있다.⁷ 나노튜브가 상하로 교차되었을 때에 아래에 놓여진 나노튜브에 전

압을 가하면 위에 놓여진 나노튜브가 아래로 휘어졌다 퍼지는데 이 때 휘어진 나노튜브를 측정해보면 저항값이 달라지고 아래의 전압을 제거해도 상태를 그대로 유지하게 된다. 이점에 착안하여, 전원이 없어도 정보가 사라지지 않는 현상을 이용한 비휘발성 메모리를 개발하고 있다. 그러나 이 기술에 있어서도 마찬가지로 대량의 나노튜브를 정밀하게 수직으로 교차하도록 정렬 및 조립하는 기술이 요구되고 있다.

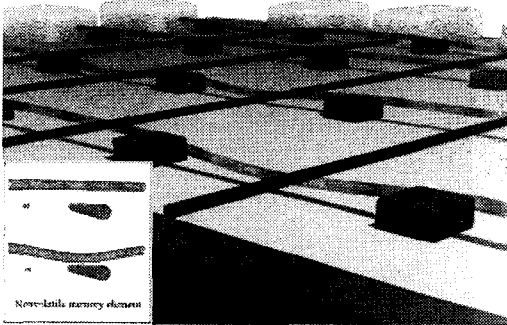


Fig. 8 Non-volatile memory using carbon nanotube. Inset box explains the principle of memory by deformation of carbon nanotube.

이와 같이 나노튜브를 대량으로 정밀하고 조립하는 일은 나노튜브를 이용한 제품의 상용화를 위해 핵심이 되는 기반기술이며, 탄소 나노튜브뿐 아니라 나노 와이어(Nanowire), 나노 입자(Nano particle) 등 나노 크기를 갖는 1 차원 구조인 나노 소재들에 그대로 적용 가능한 나노 생산 기술이 될 것이다.

5. 맺음말

탄소 나노튜브는 이상적인 소재라는 데서는 이견이 없을 정도로 훌륭하지만 그것으로 소자를 만들거나 제품에 응용하기에는 어려운 점이 많이 있다. 나노튜브를 조립하는 것은 좋은 재료로 요리를 만들기 위해서 요리법을 개발하는 것과 같다. 훌륭한 제품으로 탈바꿈하기 위해서는 반드시 이 기술이 개발되어야 하며, 이 기술의 개발이 진행될수록 더 많은 탄소 나노튜브 제품들을 우리 생활 속에서 발견하게 될 것이다. 현재 연구가 진행

되는 방법들도 있고, 아직은 이 분야의 연구가 초기에 해당되지만 이 탄소나노튜브의 조립 및 패터닝 기술은 향후 나노시대를 열어가는 돌파기술의 하나로 점차 그 중요성이 커질 것이다.

후기

본 연구는 21C 프론티어 사업인 나노 메카트로닉스 센터의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

1. Baughmann R. H., A. A. Zakhidov and W. A. de Heer "Carbon nanotubes-the route toward applications," Science Vol. 297, pp.787-792, 2002.
2. P. G. Collins and P. Avouris. "Nanotubes for electronics" Sci. Am. pp.62-69, 2000.
3. H. Dai, Acc. Chem. Res. "Carbon nanotubes: Synthesis, integration, and properties," Vol. 35, pp.1035-1044, 2002.
4. Lee Y.H., " application of carbon nanotube," Physics and High Technology pp.24-30, Jan./Feb. 2003.
5. Cho Y.H., Carbon nanotube, KISTI report, 2002.
6. Iijima S., "Helical microtubules of graphitic carbon," Nature Vol. 354, pp56-58, 1991.
7. Rueckes T., Kim K., Joselevich E., Tseng Greg Y., Cheung C.-L. and Lieber C. M. "Carbon nanotube-based nonvolatile random access memory for molecular computing," Science Vol. 289, pp.94-97, 2000.
8. Lee C. J., Kim D. W., Lee T. J., Choi Y. C., Park Y. S., Kim W. S., Lee Y. H., Choi W. B., Lee N. S., Kim J. M., Choi Y. G. and Yu S. C., "Synthesis of uniformly distributed carbon nanotubes on a large area of Si substrates by thermal chemical vapor deposition," Appl. Phys. Lett. Vol. 75, pp.1721-1723, 1999.
9. Rao Saleem G., Huang L., Setyawan W. and Hong S., "Nanotube electronics: large-scale assembly of carbon nanotubes," Nature Vol. 425, pp.36-37, 2003.
10. Yu M.-F., Lourie O., Dyer Mark J., Moloni K. and Kelly Thomas F., "Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load,"

Science 287, pp.637~640, 2000.

11. Long D. P., Lazorcik J. L. and Shashidhar R., "Magnetically directed self-assembly of carbon nanotube devices," Adv. Mater. Vol. 16, pp.814~819 2004.
12. Chung J., Lee K.-H., Lee J. and Ruoff R. S. "Toward large-scale integration of carbon nanotubes," Langmuir 20, pp.3011~3017, 2004.
13. Krupke R., Hennrich F., Löhneysen Hilbert v. and Kappes Manfred M., "Separation of metallic from semiconducting single-walled carbon nanotubes," Science Vol. 301, pp.344~347, 2003.
14. Huang Y., Duan X., Wei Q. and Lieber Charles M., "Directed assembly of one-dimensional nanostructures into functional networks," Science Vol. 291, pp.630~633, 2001.
15. Jung D.H., Jung M.S., Ko Y.K., Seo S.J. and Jung H.T., "Carbon nanotube conducting arrays by consecutive amidation reactions," Chem. Comm. pp.526~527, 2004.
16. Wu Z., Chen Z., Du X., Logan J.M., Sippel J., Nikolou M., Kamaras K., Reynolds J.R., Tanner D.B., Hebard A.F. and Rinzler A.G., "Transparent, conductive carbon nanotube films," Science Vol. 305, pp. 1273~1276, 2004.