

# 원자힘현미경을 이용한 탄소나노튜브소자의 변형 및 수리

박지용\* · 김용선 · 오영무

아주대학교 에너지시스템학부, 수원 443-749

(2006년 12월 4일 받음)

원자힘현미경(AFM)을 이용하여 탄소나노튜브소자에서 탄소나노튜브를 전기적 또는 기계적으로 조작함으로써 전기적 특성을 변형시키는 연구를 수행하였으며 이를 이용하여 탄소나노튜브의 절단 및 연결을 시연하였다. 조작과 동시에 AFM을 이용한 정전기힘측정법을 적용하여 탄소나노튜브의 절단 및 연결을 시각화할 수도 있음을 밝히고 이를 결합하여 본 연구에서는 AFM을 이용한 탄소나노튜브소자의 극소적인 변형 및 조작이 가능하다는 것을 보였다.

주제어 : 탄소나노튜브, 분자제어, 분자조작, 원자힘현미경

## I. 서 론

탄소나노튜브(CNT)는 그 발견 [1] 이래 작은 크기와 저차원물질로써의 특성뿐 만 아니라 우수한 전기적, 기계적 특성으로 인해 많은 연구의 대상이 되고 있다 [2-5]. 특히 전자소자용 물질로써 CNT는 구리, 금과 같은 금속에 맞먹는 높은 전도도,  $10,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 이상의 높은 이동도 (mobility), 전하의 높은 결합음 정도 및  $10^9\text{A}/\text{cm}^2$  이상이라는 구리의 1,000배를 넘어서는 높은 전류밀도등 기존의 전자소자용 도체, 반도체 물질과 비교할 때 우수한 성질을 지니고 있어서 많은 관심의 대상이 되고 있다 [3, 5]. 이러한 전자소자용 물질로써 CNT는 이미 전계형 트랜지스터 (FET) [6, 7] 및 화학 [8], 생물센서 [9]등으로 시연이 되었으며 그 특성 및 응용에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다 [3]. 이러한 CNT에 기반을 둔 전자소자나 회로들은 일반적으로 기존의 반도체공정을 활용하여 CNT에 다양한 형태의 전극과 절연막을 형성하는 형태로 제작되고 있으며 실리콘에 기반한 종래의 전자소자의 경우와 유사하게 소자 크기의 축소 및 집적도의 증가 측면에서도 많은 연구가 진행 중에 있다 [10-12].

한편, 원자힘현미경(AFM)은 이러한 CNT를 연구하는데 없어서는 안 되는 중요한 도구로 여겨지고 있다. 전자소자와 같이 일반적으로 부도체표면위에 CNT가 놓여져 있는 경우에 그 직경을 측정할 수 있는 거의 유일한 방법은 AFM을 이용한 표면형상측정으로 CNT연구초기부터 많이 이용되어 왔다. 그 외에도 AFM은 정전기힘현미경(Electrostatic Force Microscopy, EFM), 주사게이트현미경(Scanning Gate

Microscopy, SGM)과 같은 방법에 응용됨으로써 CNT소자 내에서 CNT자체의 전압분포, 포텐셜 분포등을 측정할 수도 있다는 것이 밝혀졌다 [13, 14]. 또한 날카로운 AFM의 탐침을 나노크기의 프로브로 사용하게 되면 거시적인 프로브와 같은 역할로 CNT내의 전압 또는 전류를 극소적으로 측정할 수도 있다는 것도 시연된 바 있다 [15]. AFM은 이러한 나노스케일의 정밀한 측정 도구일 뿐만 아니라 다양한 조작의 도구로 이용될 수도 있다는 것이 장점이기도 한다. 즉 시료표면과 강한 상호작용을 할 수 있는 영역까지 AFM탐침을 접근시킬 수 있기 때문에 CNT를 기계적으로 밀거나 끌어당겨 위치를 변화시키거나 모양을 변형시킬 수도 있으며 최근에 보여진대로 CNT에 근접한 탐침에 전압 펄스를 가함으로써 CNT자체의 전기적, 기계적절단도 가능하다 [16]. 이러한 AFM을 이용한 조작은 CNT의 꺾기, 누르기등 다양한 형태의 CNT 변형과 그에 따른 전기적특성의 변화등의 연구 [17, 18]에도 사용되었으며 위치이동을 이용한 CNT소자의 제작등에도 사용가능하다는 것이 밝혀진바 있다 [19]. 비록 이러한 AFM을 이용한 CNT의 변형, 조작이 기존의 반도체공정에 기반 한 나노공정에 비해서는 느리기는 하지만 회로 또는 소자내의 특정 부분에서 기존의 공정으로는 구현하기 힘든 정밀한 변형등이 필요하다면 유용하게 이용될 수 있을 것이다. 또한 이러한 AFM의 극소적인 측정 및 변형 조작능력을 결합하면 기존의 반도체 공정으로는 제작하기 어려운 형태의 소자의 구현 및 변형이 가능할 것이다.

본 연구에서는 EFM을 이용한 CNT소자내의 전압분포 측정과 AFM의 전기적, 기계적조작을 결합하여 CNT소자

\* [전자우편] jiyong@ajou.ac.kr

의 전기적인 절단 및 재연결이 가능하다는 것을 시연함으로써 CNT전자소자 내 특정 부분의 AFM을 이용한 정밀한 변형 및 수리의 가능성을 보여주었다.

## II. 실험 방법

본 연구에서 이용한 CNT소자는 기존에 보고된 방법을 이용하여 제작하였다 [16, 20]. 먼저 고밀도로 도핑된 Si 기판위에 열산화법을 이용하여 절연막으로 사용할 SiO<sub>2</sub>를 200nm두께로 형성한 후 자외선 리토그래피를 이용하여 그 위에 단일벽CNT(SWNT)를 키우는데 사용되는 촉매입자인 Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>를 2μm×2μm 크기의 모양안에 형성하였다. 이렇게 촉매입자의 패턴이 형성된 기판을 화로속에 넣고 800℃로 Ar 분위기에서 가열한 후 수소(H<sub>2</sub>) 200sccm, 에틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) 6sccm을 동시에 흘려주는 화학기상증착법을 이용하여 촉매입자 패턴주위에 SWNT가 자라도록 하였다. SWNT의 성장 후에는 다시 자외선 리토그래피를 이용하여 원하는 전극패턴을 이미 형성되어 있는 촉매입자 패턴에 맞추어서 형성하고 전자빔증착을 통하여 금속(이 실험의 경우에는 Au이나 Pd를 접착층 없이 사용하였다)막을 형성하고 lift-off과정을 통하여 전극을 만들었다. 이와 같이 만들어진 소자는 그림 1에서 보는 바와 같이 고밀도도핑된 Si기판이 게이트(gate)로 SiO<sub>2</sub>절연막을 사이에 두고 CNT와 일종의 축전기형태를 이루고 있으며 이 게이트 전극에 가해지는 전압을 통하여 반도체성 CNT의 경우에는 유도되는 전하를 제어할 수 있어서 FET구조를 형성하게 된다. CNT에 바로 연결되어 있는 전극들은 각각 소스, 드레인 전극으로 CNT를 통한 전압의 인가 및 전류 측정에 사용하게 되며 이러한 게이트, 소스, 드레인, 세 개의 전극이 일반적으로 이 실험에서 사용한 CNT소자의 형태이다. 원자힘현

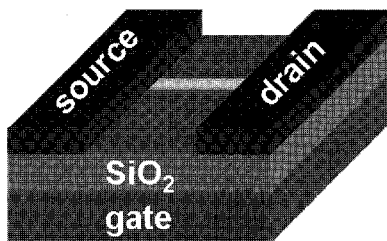


그림 1. 본 연구에서 사용한 CNT소자의 구조. 소스(source), 드레인(drain), 게이트(gate)의 세 개의 전극과 CNT로 구성되어 있다.

미경은 일반적인 표면형상의 측정뿐만 아니라 위의 방법으로 제작한 CNT소자에 대한 전압 인가, 전류측정등을 동시에 진행할 수 있도록 앞서 발표한대로 변형하고 사용하였으며 [16] 모든 실험은 상온, 상압하에서 진행되었다.

## III. 결과 및 고찰

우선 위와 같은 방법으로 제작된 CNT소자의 전기적인 특성을 밝히는 방법으로 EFM을 이용하였다 [13]. EFM에서는 AFM의 탐침에 전압  $V_T$ 을 인가하고 CNT소자에도 바이어스 전압,  $V_{SD}$ 을 인가한 상태에서 탐침의 변화를 측정하게 된다. 일반적인 EFM측정형태는 그림 2에서 보여진다. 일반적으로 두가지 형태의 EFM측정법이 있으며 각각 dc-EFM과 ac-EFM이라고 불리어 진다. dc-EFM의 경우는 그림 2에서 AFM의 탐침에  $V_T$ , CNT 소자에 직류 바이어스 전압,  $V_{SD} = V_0$ 를 인가하고 탐침진동의 위상차,  $\Delta\phi$ 를 측정하게 된다. 이 경우  $\Delta\phi$ 는

$$\Delta\phi \propto \left( \frac{d^2C}{dz^2} \right) (V_T + \phi - V_S)^2 \quad (\text{식 1})$$

와 같이 주어진다는 것을 보일 수 있다. 여기서  $C$ 는 탐침과 시료사이의 축전용량,  $z$ 는 탐침과 시료사이의 거리,  $\phi$ 는 탐침과 시료사이의 일함수 차이,  $V_S$ 는 시료상의 전압이다.

한편 ac-EFM의 경우에는 역시 그림 2와 같은 측정형태에서 탐침에는  $V_T$ , CNT 소자에는 교류 바이어스 전압,  $V_{SD} = V_0 \sin \omega t$ 를 인가하게 되는데 이 때 주파수,  $\omega$ 는 탐침의 공명주파수 근처가 되도록 한다. 이 경우 CNT에 인가된 교류전압인  $V_{SD}$ 에 의하여 탐침이 진동을 하게 되며 그 진동의 진폭을 다음과 같이 구할 수 있다. 즉, 탐침과 CNT가 그 사이의 축전용량  $C$ 에 의한 근사적인 평행판 축전기라고

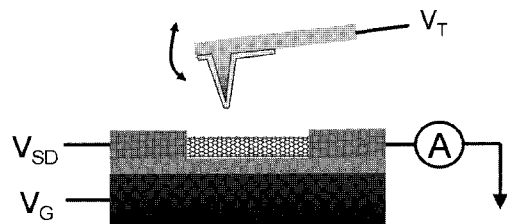


그림 2. AFM을 이용한 EFM측정법. CNT에 인가하는 바이어스 전압  $V_{SD}$ 의 AC, DC여부와 진동하는 AFM 탐침의 측정양에 따라 dc-EFM, ac-EFM으로 나누어진다 (자세한 내용은 본문 참조).

가정하면 그 사이에 축전되는 에너지,  $U$ 는

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{1}{2} C [(V_T + \phi) - V_S]^2 \\
 &= \frac{1}{2} C [(V_T + \phi)^2 - 2V_S(V_T + \phi) + V_S^2] \\
 &= \frac{1}{2} C [(V_T + \phi)^2 - 2V_0(V_T + \phi)\sin\omega t + V_0^2\sin^2\omega t] \quad (\text{식 2}) \\
 &= \frac{1}{2} C \left[ (V_T + \phi)^2 + \frac{V_0^2}{2} - 2V_0(V_T + \phi)\sin\omega t - \frac{1}{2} V_0^2\cos 2\omega t \right]
 \end{aligned}$$

가 된다. 이 때  $V_S$ 는 CNT내에서의 전압인  $V_S(x) = V_0(x)\sin\omega t$ 이고 탐침에 작용하는 힘은 식 2를 미분해서 구할 수 있다. 따라서 탐침에 작용하는 힘은 주파수와 무관한 항,  $\omega$ 와 관계있는 항,  $2\omega$ 와 관계있는 세 가지 성분으로 나눌 수 있다. 따라서 이 에너지에 의한 힘에 의하여 탐침이 진동을 할 것이고 그 중 일차  $\omega$ 성분만을 lock-in 증폭기를 이용하여 측정하게 되면 그 진폭,  $F(\omega)$ 은

$$F(\omega) = -\frac{dU}{dz} = -\frac{dC}{dz} (V_T + \phi) V_0(x) \quad (\text{식 3})$$

로 주어지게 된다. 따라서 이렇게 측정한  $\omega$ 성분의 진폭은 위치에 따른 CNT표면의 전압,  $V_0(x)$ 에 비례하게 되어 직접적으로 CNT내의 전압분포를 측정할 수 있게 된다. 반면에

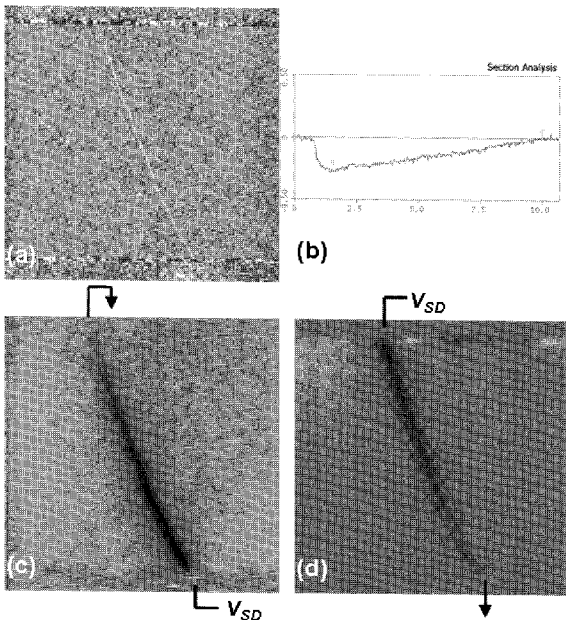


그림 3. (a) 반도체형 CNT 소자의 AFM 이미지. (b) ac-EFM 이미지에서 CNT 길이방향에 따른 ac-EFM 신호의 크기의 단면도. (c) 동일한 소자의 ac-EFM 이미지, 아래 전극에 교류전압바이어스, 위전극은 접지 후 측정된 이미지. (d) 동일한 소자의 ac-EFM 이미지, (c)와 전압인가 방향만 바꾼 후 측정된 이미지. 모든 이미지의 크기는  $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ .

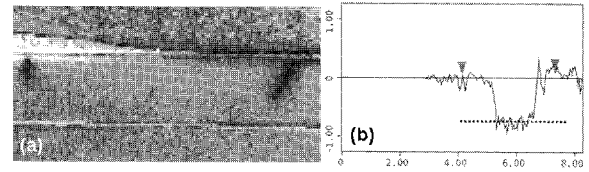


그림 4. (a) ac-EFM 이미지. 두 개의 CNT가 위쪽 전극에만 연결되어 있는 형상. 이미지 크기는  $10\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ . (b) (a) 이미지상의 오른쪽 CNT의 전압분포단면도.

식 1에서 나타나는 것처럼 dc-EFM의 경우에는 탐침의 전압과 CNT표면전압차이의 제곱에 비례하게 되기 때문에 ac-EFM에서와 같은 직접적인 CNT표면전압의 측정은 어렵게 된다. 따라서 본 실험에서는 ac-EFM을 측정함으로써 CNT소자내부의 전압분포를 측정하였다. 실제로 반도체형 CNT로 제작한 FET에서 게이트전압을 0V로 하고 소스, 드레인 전극사이에 100mV의 교류전압을 인가한 후 측정된 ac-EFM 이미지를 그림 3(b), (c)에서 볼 수 있다. 그림 3(a)의 표면형상 이미지에서 이 반도체형 CNT는 길이가 약  $9\mu\text{m}$ 라는 것을 알 수 있으며, 동시에 측정한 ac-EFM 이미지인 그림 3(c), (d)와 CNT 길이방향의 전압강하단면을 보여주는 그림 3(b)에서 볼 수 있는 것처럼 전압이 가해진 전극에서 접지된 전극까지 균일하게 강하가 일어나는 형태를 볼 수 있다.

이 측정으로 부터 CNT의 길이가 상온에서의 CNT내 전하의 자유거리보다 충분히 길고 반도체형 CNT의 경우에 확산수송(diffusive transport)이 일어난다는 사실을 확인할 수 있다. 전압이 가해진 전극을 바꾸어 주더라도 마찬가지로 형태를 보인다는 것을 그림 3 (b), (c)에서 볼 수 있다. 이와 같이 ac-EFM을 이용하면 두 전극사이에 연결되어 있는 CNT의 경우 그 내부의 전압분포를 측정할 수 있게 된다. 반면에 CNT가 오직 하나의 전극에만 연결되어 있는 경우에는 CNT와 연결된 전극사이의 저항이 탐침과 CNT사이

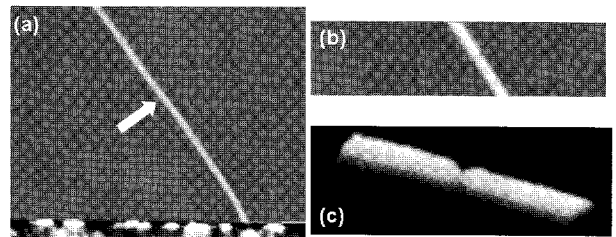


그림 5. (a) 전압펄스를 인가하기 전의 CNT 이미지. 이미지 크기는  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$  (b) (a)의 화살표지점에  $-8\text{V}$ ,  $10\text{ms}$ 의 전압펄스를 인가하여 CNT가 끊어진 모습. 이미지 크기는  $0.6\mu\text{m} \times 0.15\mu\text{m}$ . (c) (b)를 3차원형상화한 이미지.

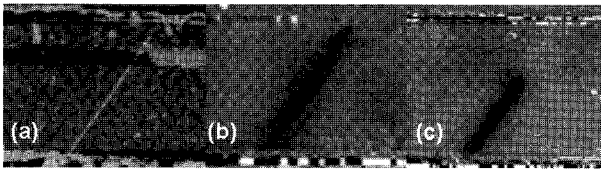


그림 6. (a) CNT소자의 AFM 이미지. (b) 동일 소자의 전압펄스가 인가되기 전의 ac-EFM이미지. (c) 전압펄스가 인가된 후의 절단된 CNT의 ac-EFM이미지. 이미지 크기는 3µm×2.5µm

의 저항보다 충분히 작기만 하면 연결된 전극에 인가한 전압이 CNT 전체에 균일하게 분포할 것이고 이를 그림4에서 볼 수 있다. 이와 같이 ac-EFM을 이용하게 되면 CNT소자에 있어서의 CNT의 전압분포를 비접촉식으로 측정할 수 있는 장점이 있다.

또한 서론에서 기술한 바와 같이 AFM을 이용하면 기계적, 전기적으로 CNT를 조작할 수 있다. 기계적인 조작에 있어서는 AFM 탐침을 이용하여 CNT와 표면사이의 접촉력을 증가하는 힘을 가하게 되면 CNT를 표면위에서 원하는 방향으로 움직일 수 있게 된다. 이와 같은 기계적인 조작은 비교적 쉽게 적용할 수 있지만 CNT자체의 탄성때문에 쉽게 끊을 수는 없다. 반면에 전기적인 조작을 하게 되면 다음에 보이는 바와 같이 CNT를 쉽게 절단할 수 있다. 이미 발표된 바와 같이 [16] AFM 탐침을 전극과 연결된 CNT에 가까이 가져가고 전압펄스를 CNT와 탐침사이에 인가하는 형태로 진행된다. 일반적으로 인가하는 전압펄스는 -5~-10V 정도로 10ms - 100µs정도의 펄스를 인가하게 되면 CNT가 그림 5에서 보는 것처럼 끊어지는 것을 확인하였다.

이 때 AFM 탐침의 힘과 거리에 따른 관계를 조사하여 이러한 절단이 일어나려면 탐침이 CNT에 약 5nm이내로 접근해야 된다는 것을 확인하였다. 또한 이와 같은 절단은 오직 음(-)의 전압펄스에서만 일어난다는 것도 확인하였는데 이와 같은 사실은 이러한 전기적인 절단의 기작이 탐침과 표면의 물(water)층사이에서 일어나는 산화현상(anodic oxidation)과 연관될 수 있다는 것을 내포하는 것으로 추정된다. 즉 CNT를 양극으로 생각할 수 있고 상온, 상압에서 습도 때문에 CNT주위에 물(water)층이 형성되어 있다고 가정하면 탐침에 걸리는 음의 전압은 물(water)층 내부에서 OH-기를 형성하여 양극인 CNT에 산화현상을 일으킬 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 AFM탐침을 이용한 산화현상은 Si, Ti등의 표면에서 산화를 일으킴으로서 리토그래피로 이용되고 있다 [21]. 이러한 전압펄스를 통한

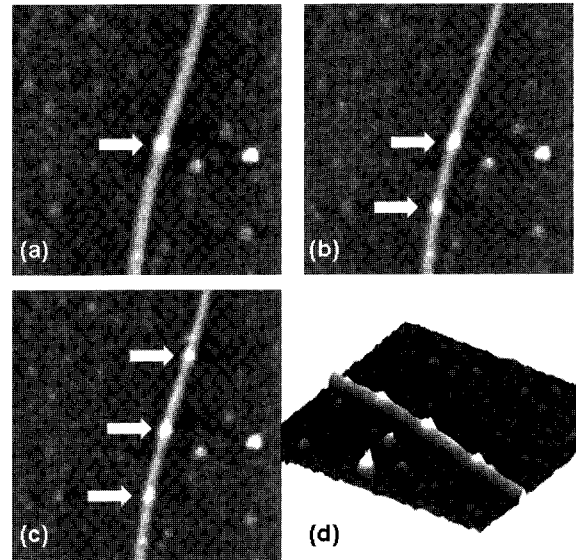


그림 7. (a), (b), (c) CNT위의 화살표위치에 전압펄스(-5V, 10ms)를 순서대로 인가한 후의 AFM이미지. 이미지 크기는 1µm×1µm. (d) (c)의 3차원 형상. CNT위의 3지점에 이물질이 증착되어 있는 것을 볼 수 있다.

CNT의 절단은 AFM이미지상으로는 구별하기 힘들 정도의 작은 틈으로 나타나기도 하며 이런 경우에는 위에서 설명한 ac-EFM이미지를 측정하면 어떤 지점에서 절단이 일어났는지를 분명하게 확인할 수 있다. 그림 6에서 보는 것처럼 전압펄스를 가하기 전에는 연결되어 있던 CNT [그림 6(b)]가 중간지점에서 끊어짐으로 해서 아래쪽 전극에 인가한 전압이 중간지점까지만 미치는 것을 확인할 수 있다 [그림 6(c)]. 이와 같이 ac-EFM을 이용하게 되면 전기적으로 절단된 지점을 확인할 수 있다는 장점이 있다.

이러한 전압펄스에 의한 절단현상은 때때로 탐침에 붙어 있을 것으로 추정되는 물질들을 표면에 떨어뜨리는 형태로 나타나기도 한다. 그림 7에서 보는 것처럼 전압펄스를 가해 준 CNT상의 특정지점에 높이 ~5nm에 해당하는 이물질

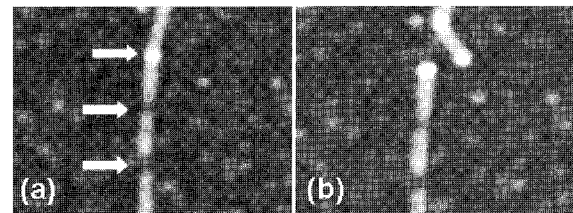


그림 8. (a) 화살표로 표시된 지점에 전압펄스를 인가한 후의 AFM 이미지. 아래쪽 두 지점은 CNT가 절단된 양상이 뚜렷하나 위쪽 화살표로 표시된 지점에는 이물질이 증착된 것으로 보인다. (b) AFM탐침으로 CNT의 윗부분을 옆으로 밀은 후의 이미지. 이미지 크기는 0.6µm×0.4µm.

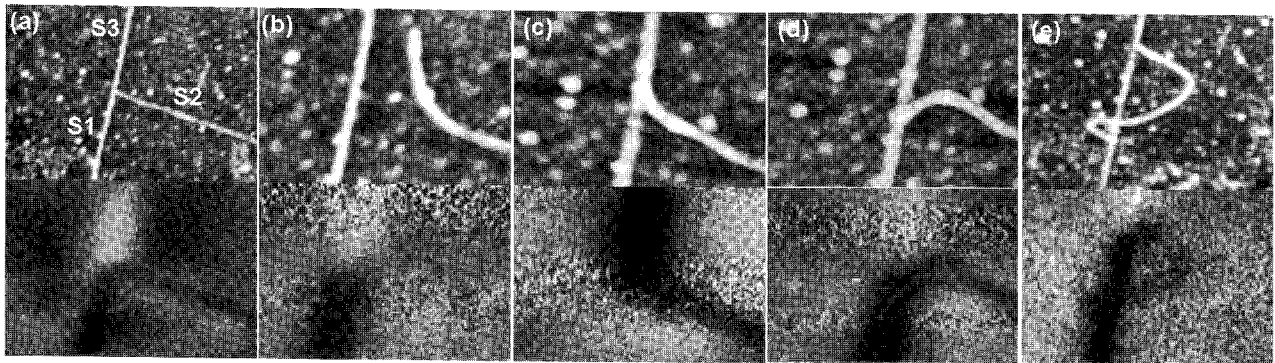


그림 9. (a)–(e)CNT소자내에서 CNT를 절단하거나 움직여서 전기적 연결상태를 조작하는 일련의 이미지들. 위쪽 이미지들은 AFM 표면형상이미지, 아래쪽 이미지는 표면형상이미지와 동시에 측정된 ac-EFM이미지들임. 이미지 크기는 (a), (e)  $1.2\mu\text{m}\times 1\mu\text{m}$ , (b)–(d)  $0.6\mu\text{m}\times 0.5\mu\text{m}$ .

을 떨어뜨린 것을 볼 수 있다. AFM이미지만으로는 그 이 물질이 어떤 물질인지 확인하기는 어려우며 사용한 탐침이 금으로 도포된 점을 고려하면 도포된 금의 일부가 떨어져 나온 것으로 추정된다. 이는 차후에 성분을 측정할 수 있는 분석장비, 예를 들어 전자현미경의 EDS장치등을 이용하여 추가 연구를 하여 밝혀야 할 것이다. 이를 잘 제어할 수 있다면 극소적으로 원하는 위치에 금속을 극소적으로 증착할 수 있는 방법으로 발전시킬 수 있을 것으로 기대된다.

또는 이와 같이 전압펄스를 가한 지점에 그림 8에서 볼 수 있는 것처럼 이물질이 증착되는 현상과 절단이 동시에 일어나는 경우도 존재한다. 그림 8(a)에서 나타난 바와 같이 CNT에  $-8\text{V}$ ,  $100\text{ms}$  전압펄스로 화살표로 표시되어 있는 이미지 하단부의 두 근대 지점을 절단을 한 후 세번째 펄스를 인가한 후에는 인가지점에 이물질이 증착된 것을 확인 할 수 있다. 위쪽의 CNT부분 옆에 AFM탐침을 표면에 접근시킨 후 표면을 따라서 오른쪽으로  $500\text{nm}$ 이동시킨 후 이미지를 해 보면 이 부분이 이미 절단이 되어 있었다는 것을 그림 8(b)에서와 같이 확인할 수 있다.

이와 같이 AFM탐침을 이용해서 CNT를 움직이는 것이 가능하다. 일반적으로  $\text{SiO}_2$ 위에 성장한 CNT의 경우 용수철상수  $1\text{N/m}$ 이상의 AFM탐침을 이용해서 움직이는 것이 가능하였다. 이와 같이 전기적 조작법을 기계적 조작법과 결합하면 AFM을 이용하여 자유롭게 CNT를 절단하고 원하는 모양으로 만드는 것이 가능하고 전기적인 연결을 조작할 수도 있는데 그 예를 그림 9에서 볼 수 있다. 그림 9(a)가 초기상태의 CNT이다. 표면형상이미지에서는 CNT S1과 S3가 연결되어 있고 S2가 옆으로 분기된 형상이나 동시에 측정된 ac-EFM측정결과를 보면 S1과 S3는 끊어져 있고

오히려 S1과 S2가 전기적으로 연결되어 있다는 것을 확인할 수 있다. 그림 9(b)–(e)는 이와 같은 초기상태의 CNT에 AFM을 이용하여 변형을 시키면서 실제 전기적인 연결상태가 어떻게 변하는지를 ac-EFM으로 동시에 측정한 결과이다. 우선 그림 9(b)에서 볼 수 있는 것은 CNT S2를 AFM 탐침을 이용하여 위쪽으로 밀어 올린 후의 이미지이다. 예상할 수 있는바와 같이 CNT S2는 더 이상 전기적으로 CNT S1과 연결되지 않았다는 것을 ac-EFM에서 볼 수 있다. 이 상태에서 다시 CNT S2를 왼쪽으로 밀어서 그 끝부분이 CNT S2의 위로 가도록 AFM 탐침을 이용하여 밀어주었다 [그림 9(c)]. 이번에는 ac-EFM을 통하여 초기상태와는 다르게 CNT S2와 S3가 전기적으로 연결되는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 단순히 하나의 CNT를 다른 CNT위로 올려주는 것만으로도 충분히 전기적인 연결을 만들 수 있다는 것을 확인할 수 있다 [22]. 이와 같은 전기적 연결이 가능한 것은 두개의 CNT가  $\text{SiO}_2$ 표면위에서 가로 질러서 만날 때 그 접점에 강한 접촉력이 존재하면서 CNT에 변형이 일어나기 때문이라는 것이 이론적으로 알려져 있다 [22]. 비슷한 방법으로 CNT S2를 움직여서 다시 CNT S1위로 움직여 주면 CNT S1과 S2가 연결이 되며 이는 그림 9(d)에서 볼 수 있다. 이와 같은 AFM 탐침을 이용한 CNT의 변형은 그림 9(e)에서와 같은 자유로운 모양으로 CNT의 변형도가 가능하게 하며 이 경우에도 CNT S1과 S2사이의 전기적인 연결은 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 AFM 탐침을 이용하게 되면 CNT의 전기적인 절단은 전압펄스를 통하여 CNT의 변형 및 재연결은 기계적인 조작을 통하여 가능하다는 것을 알 수 있다. 따라서 이를 이용하면 특정 CNT 소자내부의 끊어진 CNT의 연결 또는 필요없는 CNT

의 절단과 같은 작업을 AFM의 높은 해상도와 결합하여 정밀하게 수행할 수 있을 것이다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 AFM을 이용한 CNT소자의 측정과 조작에 관하여 다루었다. ac-EFM을 이용하면 CNT소자내의 전압분포를 알아 낼 수 있으며 이는 CNT소자에서 CNT의 전기적 연결상태를 확인하는데 사용할 수 있다. 또한 AFM 탐침에 전압펄스를 가함으로써 CNT소자내의 CNT를 전기적으로 절단할 수 있으며, 힘을 가함으로써 CNT를 움직일 수 있다는 것을 보이고 이를 응용하여 CNT의 전기적 절단과 다른 CNT사이의 전기적 연결을 구현할 수 있다는 것을 보였다. 이와 같은 AFM 탐침을 이용한 자유로운 CNT소자의 전기적인 조작은 CNT소자의 정밀한 변형, 조작에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] S. Iijima, Nature **354**, 56 (1991).
- [2] M. P. Anantram, and F. Leonard, Rep. Prog. Phys. **69**, 507 (2006).
- [3] P. Avouris, MRS Bull. **29**, 403 (2004).
- [4] H. J. Dai, Surf. Sci. **500**, 218 (2002).
- [5] P. L. McEuen, M. S. Fuhrer, and H. K. Park, IEEE Trans. Nanotech. **1**, 78 (2002).
- [6] R. Martel et al., Appl. Phys. Lett. **73**, 2447 (1998).
- [7] S. J. Tans, A. R. M. Verschueren, and C. Dekker, Nature **393**, 49 (1998).
- [8] J. Kong et al., Science **287**, 622 (2000).
- [9] Y. Cui et al., Science **293**, 1289 (2001).
- [10] K. Alam, and R. Lake, Appl. Phys. Lett. **87**, 073104 (2005).
- [11] A. Javey et al., Nature Mater. **1**, 241 (2002).
- [12] L. Yu-Ming et al., IEEE Electron Device Lett. **26**, 823 (2005).
- [13] A. Bachtold et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 6082 (2000).
- [14] S. J. Tans, and C. Dekker, Nature **404**, 834 (2000).
- [15] Y. Yaish et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 046401 (2004).
- [16] J.-Y. Park et al., Appl. Phys. Lett. **80**, 4446 (2002).
- [17] D. Bozovic et al., Appl. Phys. Lett. **78**, 3693 (2001).
- [18] D. Bozovic et al., Phys. Rev. B **67**, 033407 (2003).
- [19] P. Avouris et al., Appl. Surf. Sci. **141**, 201 (1999).
- [20] J. Kong et al., Nature **395**, 878 (1998).
- [21] H. C. Day, and D. R. Allee, Appl. Phys. Lett. **62**, 2691 (1993).
- [22] M. S. Fuhrer et al., Science **288**, 494 (2000).

## **Modification and Repair of a Carbon Nanotube-based Device Using an Atomic Force Microscope**

Ji-Yong Park\*, Yong Sun Kim, and Youngmu Oh

*Division of Energy Systems Research, Ajou University, Suwon 443-749*

(Received December 4, 2006)

Electrical and mechanical modifications of devices based on carbon nanotubes (CNTs) using an atomic force microscope (AFM) in the forms of cutting and reconnection of CNTs are demonstrated. In addition to the modifications, electrostatic force microscopy is used to visualize the cutting and reconnection of CNTs. In this way, AFM is shown to be a useful tool in local modifications and manipulations of CNT-based devices.

Keywords : Carbon nanotube, Molecular control, Molecular manipulation, Atomic force microscopy

\* [E-mail] [jiyong@ajou.ac.kr](mailto:jiyong@ajou.ac.kr)