

# 탐침기반 나노소자의 제작을 위한 탄소나노튜브 조립 기술

## Assembly Technique of Carbon Nanotubes for the Fabrication of the Probe-based Nanodevices

\*최재성, #곽윤근, #김수현

\*J. S. Choi, Y. K. Kwak, #S. H. Kim(soohyun@kaist.ac.kr)  
한국과학기술원 기계항공시스템학부 기계공학과

Key words : Carbon nanotube, Electric-field-assisted assembly, Nanomanipulation, Nanoprobe

### 1. 서론

탄소나노튜브(CNT, carbon nanotubes)를 이용한 탐침형 나노디바이스는 원자력간현미경용 프로브와 CNT 디바이스의 응용기술을 연구하기 위한 플랫폼 디바이스로 주목받고 있다. 이러한 탐침형 나노디바이스를 제작하는 방법들은 여러가지가 있지만, 단일 CNT 를 3 차원상에서 자유자재로 조작하여 임의의 모체에 부착하는 경우, 나노매니퓰레이션 스테이지 시스템에 의한 직접 조립법이 적합하다.

최근 나노매니퓰레이션 시스템의 빠른 발전으로 나노사이즈의 물체를 직접 조작하는데 필요한 하드웨어는 충분한 상황이다. 그리고 조작대상이 되는 물체, 소위 '나노빌딩블럭(nano-building block)'으로 일컬어 지는 나노소재들의 종류는 증가하고 있다. 현재 나노와이어(nanowire)와 CNT 를 비롯한 각종 1 차원 나노소재들이 나노빌딩블럭으로 각광받고 있다. 그러나 나노매니퓰레이션 시스템을 이용하여 나노빌딩블럭들을 원하는 형태로 조립하려면, 공정에 맞게 나노빌딩블럭을 쉽게 조작할 수 있도록 재가공 또는 배치해야만 한다. 이런 관점에서 1 차원 구조의 나노소재를 하나씩 떼어내기 쉽게 다량으로 배치하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 탐침형 나노디바이스의 제작공정에 적합한 형태로 CNT 를 재가공하는 방법에 대해 다뤘다. 전기장인가조립 원리를 활용하여 다량의 단일 CNT 또는 CNT 다발을 돌출된 형태로 부착했으며, 이렇게 돌출된 CNT 들은 나노매니퓰레이션 시스템을 이용하여 기계적으로 하나씩 떼어내어 탐침형 나노디바이스를 제작하는데 쓰인다. 이미 본 연구진은 이전 연구<sup>[1]</sup>를 통해 이러한 CNT 샘플을 이용한 나노탐침 제작에 관한 타당성을 확인했다.

### 2. 탄소나노튜브 전기장인가조립

용매 속에 존재하는 전기적으로 중성인 마이크로 스케일의 물체가 불균일한 전기장에 노출되면, 전기장의 변화가 급격한 방향으로 물체가 끌려오거나 반대로 밀려나게 된다. 이러한 현상을 '유전영동(DEP, dielectrophoresis)'<sup>[2]</sup>이라 부른다. 유전영동을 비롯하여 전기장을 인가해서 전극 사이에 단일 CNT 를 조립하는 연구들은 많이 이루어졌다<sup>[3-5]</sup>. 그러나 본 연구에서는 CNT 를 기관으로부터 돌출된 형태로 만들어야 한다. 이를 위해 두 전극을 3 차원상에서 정렬했다. 정렬작업은 광학현미경으로 모니터링 되며, 이를 통해 전극은 수십  $\mu\text{m}$  의 간극을 유지한다. 이 간극에서 세기가 강하고 불균일한 전기장을 형성해야 한다.

본 연구에서는 '나이프에지형 전극(knife-edge-typed electrode)'과 '평탄형 전극(flat electrode)'으로 구성된 비대칭 전극쌍을 사용했다. 두께 450  $\mu\text{m}$  의 Si 웨이퍼를 습식 벌크 에칭 한 후, 날카로운 끝단에 15  $\mu\text{m}$  폭의 Au 전극을 증착하여 나이프에지형 전극을 제작했다. 그리고 두께 400  $\mu\text{m}$  의 직사각형 단면을 갖는 금속판에 무전해금도금을 하여 상대전극을 제작했다.

정밀스테이지와 광학모니터링 장비를 이용하여 두 전극이 약 30 ~ 40  $\mu\text{m}$  의 간극을 유지하도록 정렬한 후, 나이프에지형 전극의 날카로운 부분이 상대전극의 평탄면 중앙에 오도록 위치시켰다(Fig. 1). 합수발생기(Agilent 33220A)로 두

전극에 AC 전기장을 인가하고, CNT 용액 2  $\mu\text{l}$  를 간극에 떨어뜨린다. 인가되는 최대전기장의 세기는 10  $V_{pp}$  로, 간극의 크기를 고려하면 약 0.12  $V_{rms}/\mu\text{m}$  이다. 기존 연구들<sup>[3-5]</sup>과 비교하면, 약 30 ~ 60 % 정도의 세기다. CNT 용액은 아크방전법으로 합성된 '다층벽탄소나노튜브(MWCNT, multi-walled carbon nano-tube)'를 에탄올에 섞고 초음파분산을 시켜 제작했으며, 약 5  $\mu\text{g}/\text{ml}$  의 농도를 가진다. CNT 용액 속의 MWCNT 은 평균직경 30 nm, 평균길이 2  $\mu\text{m}$  를 가진다.

### 3. 실험 결과

우선 전기장을 인가하지 않은 경우와 DC 전압을 건 경우, 1 kHz 의 AC 전압을 인가한 경우를 비교실험했다(Fig. 3). 다음으로 수 ~ 수십 MHz 영역에서 실험했다(Fig. 4). 실험 결과 전기장을 인가하지 않은 경우, 전극 위에 MWCNT 를 비롯한 어떠한 불순물도 붙지 않았다. 이로써 CNT 를 조립하기 위해서는 외부력이 필요하다는 걸 확인했다. 0.118  $V_{rms}/\mu\text{m}$  의 DC 인가에서는 다량의 불순물과 MWCNT 들이 함께 부착되었다. 이와 동일한 세기의 1 kHz AC 전기장 실험에서는 DC 인가실험에서 보다 적은 불순물과 소량의 MWCNT 들이 발견되었다. 따라서 CNT 를 조립하기 위해서는 AC 전기장을 이용하는 편이 적합함을 확인했다. 본격적인 AC 인가실험 결과 1 ~ 10 MHz 에서 불순물의 양이 적고 CNT 들이 잘 부착되었다. 특히 5 MHz 부근에서 다량의 단일 CNT 들이 부착되었다. 이후 주파수를 더욱 높이면 10 MHz 이후로는 CNT 의 부착량이 점점 적어졌으며, 최대인 주파수인 20 MHz 에서는 불순물은 거의 없었지만 부착된 CNT 의 양도 급감했다. 이를 통해 확인한 CNT 의 주파수별 조립 특성은 기존 연구결과들<sup>[4,5]</sup>과 비슷했다.

1 ~ 10 MHz 의 실험결과들을 대상으로 전극 끝단으로부터 튀어나온 CNT 의 돌출길기와 정렬각을 조사했다. 전자현미경(Philips XL30SFEG, Hitachi S4800)을 통해 확인한 결과, 평균 약 500 nm 길이로 돌출되었고, 약 60 % 정도의 CNT 들이 20° 내에서 정렬되었는데(Fig. 5), 이는 나노매니퓰레이션 시스템으로 충분히 조작이 가능한 수준이다.

### 4. 전기장인가조립에 관한 이론적 해석

용액 내 CNT 또는 불순물들의 거동에 가장 큰 영향을 끼치는 것은 유전영동효과로 알려져 있다<sup>[6]</sup>. 유전영동력에 의해 CNT 가 에탄올 속을 움직이면 마찰에 의한 저항을 받는다. 이는 불순물도 마찬가지인데, 주파수 조건에 따라 CNT 와 불순물이 받는 영향에 차이가 있다. 물질의 '유전성질(dielectric properties)'이 주파수에 의존하기 때문이다. CNT 를 '편장형타원체(prolate ellipsoid)'로 가정하고, 불순물을 구형의 비정질탄소입자로 가정하여, 유전영동의 거동을 해석했다. 이를 위해 (식 1)로 정의되는 '중단속도인자(terminal velocity factor)'를 해석했다(Fig. 4). 이는 AC 전기장을 인가한 후, 정상상태에서의 입자의 운동속도를 전기장 세기의 구배값으로 나눈 것이다. 이 때 기존 연구결과를 참조하여 CNT 와 비정질탄소의 전기전도도 및 유전상수를 설정했다<sup>[7,8]</sup>.

$$\mathbf{v}_T = \frac{\mathbf{F}_{DEP}}{f \cdot \nabla |\mathbf{E}|^2} \quad (\text{식 1})$$

여기서  $\mathbf{F}_{DEP}$  는 유전영동력,  $f$  는 마찰계수,  $\mathbf{E}$  는 전기장에 해당한다. 전산해석 결과 불순물은 100 kHz 주변에서, MWCNT 는 1 GHz 부근에서 속도가 급격히 떨어졌다. 불순물은 실험과 비슷한 결과였으나, CNT 는 차이가 났다. 실제 실험에서는 이미 5 MHz 를 정점으로 CNT 의 부착량이 급감했다. 이렇게 실험과 해석 간에 차이가 생기는 주된 원인으로, 전기장인가시 발생하는 에탄올의 해리현상을 살펴볼 수 있다. 해석에서는 에탄올이 비전도성을 유지하는 것으로 가정했으나 실제로는 해리현상이 발생한다. 실험과정에서 에탄올에 약 20  $\mu\text{A}_{\text{rms}}$  정도의 AC 전류가 흐름을 확인했다. 따라서 전극표면에 존재하는 에탄올에 쿨롱-힘이 작용하며, 또한 ‘이중전하층(charged double layer)’의 효과가 증가하여 ‘전기삼투현상(electroosmosis)’이 증가한다고 볼 수 있다.

5. 결론

탐침형 나노디바이스를 제작하는데 적합한 CNT 샘플을 전기장인가조립 방식으로 제작했다. 실험을 통해 약 0.12  $\text{V}_{\text{rms}}/\mu\text{m}$  의 전기장을 1 ~ 10 MHz 로 인가했을 때, 불순물 양이 적고 CNT 가 다량으로 조립됨을 확인했다. 주파수 조립 특성은 기존 연구 결과와 비슷했으나, 비대칭 전극을 사용함으로써 기존에 비해 적은 전기장 세기로도 CNT 샘플을 제작할 수 있었다. 조립된 CNT 들은 약 500 nm 의 돌출길이를 가지며, 약 60%의 CNT 들이 20° 내에서 정렬되었다. 그리고 유전영동 해석결과와 실험 사이에 차이가 발견되었는데, 이는 에탄올의 해리에 인한 것으로 판단되었다.

후기

이 연구는 2007 년 두뇌한국(BK)21 사업에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

1. Choi, J. S., Kim, S. H., and *et al.*, "A Study on the Fabrication of Carbon Nanotube Cartridges," Proc. of ChinaNano2005, Session 1P-62-030, 2005.
2. Pohl, H. A., "Dielectrophoresis: The behavior of neutral matter in non-uniform electric field," Cambridge University Press, Cambridge, 1978.
3. Yamamoto, K., Akita, S., and *et al.*, "Orientation of carbon nanotubes using electrophoresis," Jpn. J. of Appl. Phys., **35**, L917-L918, 1996.
4. Yamamoto, K., Nakayama, Y., and *et al.*, "Orientation and purification of carbon nanotubes using ac electrophoresis," J. Phys. D: Appl. Phys., **31**, L34-L36, 1998.
5. Chung, J., Lee, J., and *et al.*, "Integration of single multi-walled carbon naontube on Microsystems," Proc. of IMECE2002, 1-5, 2002.
6. Kim, J. E. and Han, C. S., "Use of dielectrophoresis in the fabrication of an stomic force microscope tip with a carbon nanotube: a numerical analysis," Nanotechnology, **16**, 2245-2250, 2005.
7. Martens, H. C. F., Brom, H. B., and *et al.*, "Metallic state in disordered quasi-one-dimensional conductors," Phys. Rev. B, **63**, 073203, 2001.
8. J. Ortiz-Lopez and R. Gomez-Aguilar, "Dielectric permittivity and AC conductivity in polycrystalline and amorphous C60," Rev. Mex. Fis., **49**(6), pp. 529-536, 2003.

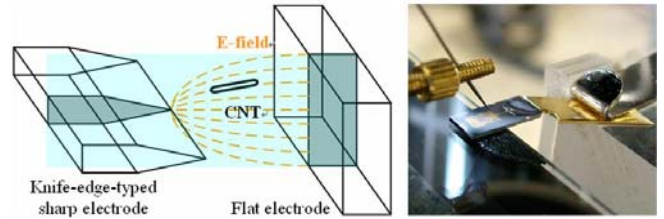


Fig. 1 Experimental set-up for Electric-field-induced assembly of MWCNTs with an asymmetric electrode pair

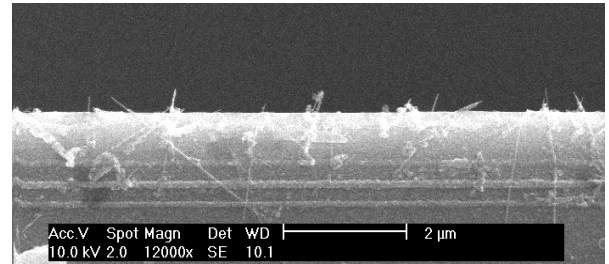


Fig. 2 SEM images of experimental results under electric field of 0.125  $\text{V}_{\text{rms}}/\mu\text{m}$  at 5MHz

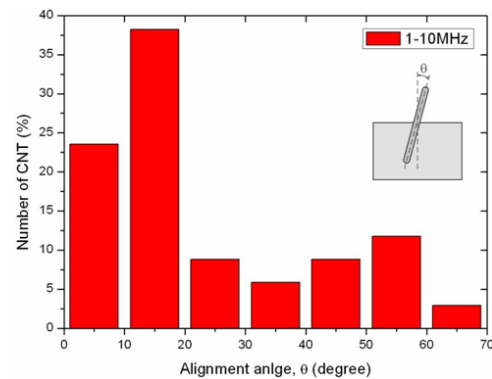


Fig. 3 Distribution of the alignment angle of the CNTs attached on the knife-edge-typed electrodes

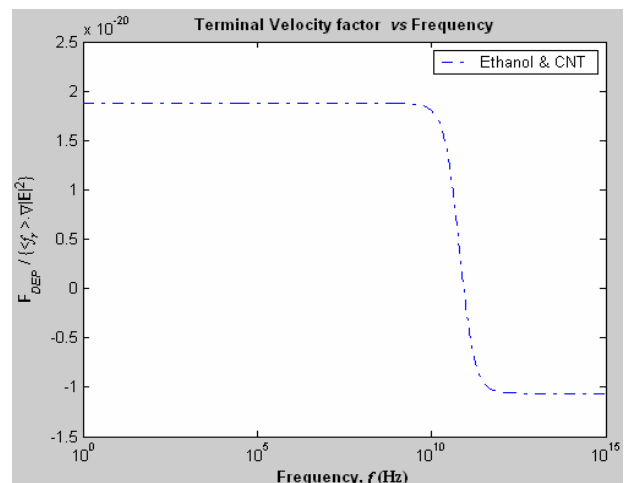


Fig. 4 Graphs of the terminal velocity factors of MWCNT of 30 nm  $\phi$ , 2  $\mu\text{m}$   $l$ ,  $6.2 \times 10^4 \text{ S/m}$ , and  $-10^{-4} \text{ F/m}$ .