

나노트위저 제작을 위한 탄소나노튜브 카트리리지

최재성*(한국과학기술원 대학원 기계공학과), 이준석(한국과학기술원 대학원 기계공학과)
강경수(한국과학기술원 대학원 기계공학과), 곽윤근(한국과학기술원 기계공학과)
김수현(한국과학기술원 대학원 기계공학과)

Carbon Nanotube Cartridge for the Fabrication of Nanotweezer

J. S. Choi(Mecha. Eng. Dept. HKU), J. S. Lee(Mecha. Eng. Dept. HKU), G. S. Kang(Mecha. Eng. Dept. HKU),
Y. G. Kwak(Mechanical Eng. Dept. HKU), S. H. Kim(Mechanical Eng. Dept. HKU)

ABSTRACT

We researched carbon nanotube(CNT) cartridge as a CNT sample for the fabrication of nanotweezer which is composed of a couple of single CNT tip. Our CNT cartridge was made by dielectrophoretic methods, a kind of micromanipulation technique using electric field. Therein we intended to fabricate the CNT cartridge with just conventional function generators and a set of simple electrode. A knife edge and a flat metal electrode were employed as a couple of electrode, and these electrode pair faced each other with the gap. When the gap is filled with CNT suspension, we induced AC electric field into the gap. Then CNTs was attached on the sharp edge in knife edge by dielectrophoresis. This knife edge with attached CNTs is called as the CNT cartridge.

Key Words : Carbon nanotube cartridge (탄소나노튜브 카트리리지), Nanotweezer (나노트위저), Dielectrophoresis (유전 전기영동),

1. 서론

최근 나노기술(nanotechnology)이 각광을 받으면서 기존에는 어려웠던 미세한 물체의 연구 및 조작에 대한 관심이 커져가고 있다. 이를 위해서는 나노매니폴레이션(nanomanipulation) 기술이 필요하다. 특히 서브마이크로미터(submicrometer) 크기의 물체에 대한 매니폴레이션 장치는, 나노입자나 나노와이어 등의 나노소재나 바이러스 같은 생물학적 미소 물체를 매니폴레이션에 유용하다. 이를 위해 광학집계(optical tweezer), 원자력간현미경(AFM, atomic force microscope), MEMS(micro electromechanical system) 가공에 의한 마이크로 그립퍼(micro-gripper), 탄소나노튜브(이하 CNT)를 이용한 나노트위저(nanotweezer) 등 다양한 기술들이 연구되어 왔다.

Sumio Iijima[1]에 의해 발견된 CNT는 수에서 수십 나노미터의 직경과 수 마이크로 정도의 길이를 가지며 화학적으로 안정적이고 우수한 기계적

성질을 가지는데, 이를 이용한 CNT 나노트위저는 서브마이크로미터의 물체를 기계적으로 직접 매니폴레이션 하는 말단장치(end effector)의 역할을 할 수 있다. CNT 나노트위저는 Philip Kim[2]에 의해 처음 연구되어 Seiji Akita 등[3]에 의해 연구되어 왔는데, 이들의 연구는 나노트위저의 내구성이 부족하거나 가공방법이 어렵다는 단점이 있다. 따라서 간단한 제작 공정과 향상된 내구성을 가지는 CNT 나노트위저가 필요한데, 이를 위해 우리는 한 쌍의 단일 CNT 팁으로 구성된 CNT 나노트위저 시스템 [4]에 대해 제안한 바 있다.

CNT 나노트위저의 제작은 CNT 나노트위저는 CNT를 미세 팁의 말단에 붙히는 것이 핵심인데, 팁의 말단에 CNT를 화학기상증착(CVD, chemical vapor deposition)에 의해 성장시킬 수 있으며, 또는 팁의 말단에 CNT를 직접 물리적으로 부착할 수도 있다. 그러나 CVD 성장시킨 CNT는 아크방전으로 성장한 CNT에 비해 기계적 성질이 떨어지므로, 후

자의 방법이 선호된다. 팁의 말단에 CNT의 물리적인 부착을 위해서는 팁을 정밀하게 움직일 수 있는 다자유도 매니플레이션 시스템이 필요하고, 단일 CNT를 쉽게 선별하여 부착할 수 있는 CNT 샘플이 필요하다.

CNT를 추출·정렬하는 대표적인 연구들이 다음과 같이 수행되었다. Y. Nakayam 등[5]과 S. Akita 등[3]은 각각 CNT 정렬 정제를 위해 각각 DC 전기장과 AC 전기장을 이용했다. 특히 S. Akita 등은 이를 이용하여 CNT 카트리지를 만들어 나노트위저 제작에 사용했다[3]. Otto Zhou 등은 전기장을 이용하여 텅스텐 팁의 끝단에 CNT를 추출·부착시켜서 탄소나노섬유(CNF, carbon nanofiber)를 형성하는 연구를 수행했고[6], 또한 본 연구진은 텅스텐 팁과 실린더형 금속전극을 이용하여 직렬로 정렬되는 CNT 샘플 제작에 관해 연구했다[7].

본 연구는 유전전기영동(이하 DEP, dielectrophoresis)[8]에 의한 CNT 카트리지를 개발에 관한 것이다. 기존 연구들과 달리 RF 앰프와 같은 고가의 AC 전원증폭장치를 사용하지 않고 일반적인 함수발생기(function generator)만을 사용하여 CNT 카트리지를 제작했다. 그리고 탄소나노튜브에 DEP를 작용하기 위해 나이프에지형 전극과 평판형 전극을 이용했다.

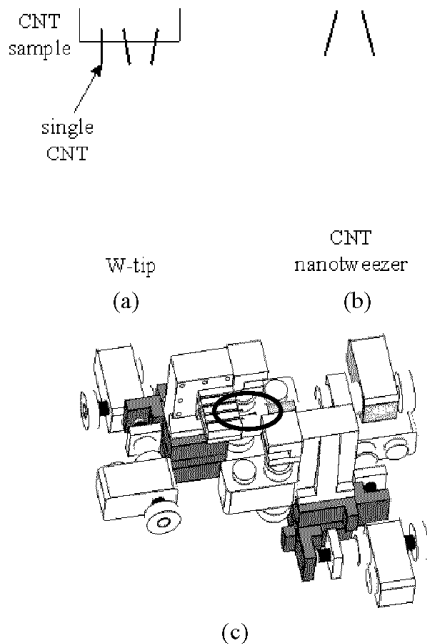


Fig. 1 Schematics about CNT nanotweezer system using CNT cartridges as CNT samples : (a) fabrication of single CNT tip, (b) CNT nanotweezer, (c) nano-aligner system (red circle shows (a) as a part of system).

2. CNT 카트리지를

2.1 나노트위저 제작 공정

우선 CNT 카트리지의 활용을 중심으로, CNT 나노트위저의 제작 공정을 살펴보겠다(Fig. 1). 방전가공에 의해 날카롭게 가공된 텅스텐 팁의 끝단에 한 가닥의 CNT를 부착하여 단일 CNT tip을 제작한다. 이 때 단일 CNT들이 부착작업에 용이한 형태로 배치된 CNT 샘플이 필요한데, 이를 위해 CNT 카트리지를 사용한다. 이 때, 나노얼라이너 시스템(nano-aligner system)[9]을 이용하여 텅스텐 팁 위에 CNT를 부착한다. 이렇게 제작된 한 쌍의 CNT tip으로 CNT 나노트위저 시스템을 구성한다.

2.2 CNT 카트리지를

본 연구에서는 AC DEP를 이용하여 단일 CNT들이 추출·정렬된 형태의 CNT 샘플, 즉 CNT 카트리지를 제작에 관한 기초실험을 수행했다. 이를 위한 AC DEP에 관한 원리와 사용한 금속전극에 관해 설명하고, 기초실험 결과를 소개하겠다.

2.2.1 AC dielectrophoresis

전기적으로 중성이며 마이크로 수준 또는 그 이하의 크기를 가지는, 작은 입자들이 들어있는 콜로이드 용액-본 연구에서는 CNT 현탁액(suspension)을 사용-등에 전기장을 인가해주면, 용액 내에 들어있는 입자는 전기쌍극자(electric dipole)를 형성하고, 전기장의 분포가 상대적으로 더 강한 영역으로 끌려가거나 밀려나오게 된다. 이러한 현상을 DEP라고 부른다. 그리고 용액 내 입자가 용매보다 분극(polarization)이 잘 일어나면, 입자가 전기장 분포가 더 강한 쪽으로 이동하는 positive DEP(이하 p-DEP)가 발생하고, 반대로 용매가 더 분극이 잘 되는 경우엔 전기장이 약한 영역으로 밀려나는 negative DEP(이하 n-DEP)가 발생한다. 일반적으로 AC 전원을 이용하여 DEP 효과를 발생시키는데 이를 AC DEP라고 부른다.

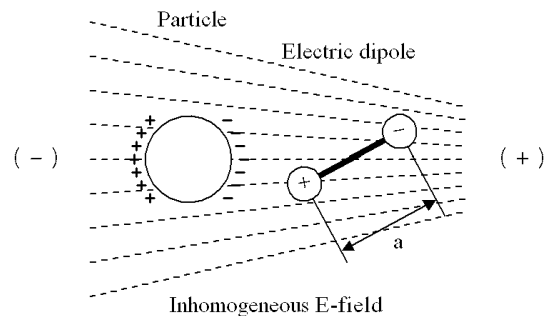


Fig. 2 Principle of dielectrophoresis

CNT 는 가늘고 긴 형상이므로 전기장이 가해지면, 각각 크기는 같고 극성은 반대인 전하들이 양 끝단에 집중되어 있는 전기쌍극자로 가정할 수 있다(Fig. 2). 그러나 CNT 현탁액 내에서는 비정질탄소(amorphous carbon)나 나노캡슐(nanocapsule)과 같은 불순물과 CNT 들이 함께 엉켜 있다. 구(sphere)의 형상으로 가정하면, 그 때의 DEP 힘(dielectrophoretic force)[8]은 다음과 같다.

$$F_{DEP} = 2\pi\epsilon_m a^3 \text{Re}[K(\omega)] \cdot \nabla E^2$$

$$K(\omega) = \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*} \quad \text{where } \epsilon^* = \epsilon + j\frac{\sigma}{\omega}$$

여기서 Clausius-Mossotti factor(이하 C-M factor) $K(\omega)$ 는 인가되는 AC 전압의 주파수에 따라 변하는 값으로 1 부터 -0.5 사이의 값을 갖고, 양의 값을 갖는 경우 p-DEP, 음의 값을 갖는 경우엔 n-DEP 가 작용함을 뜻한다. ϵ^* 는 물질의 복소유전율(complex permittivity)로 ϵ, σ, ω 는 차례로 유전상수, 전기전도율, 인가주파수이고, 아래 첨자 p, m 은 각각 용질인 CNT 와 용매를 나타낸다. 마지막으로 a 는 CNT 의 길이, E 는 전기장 벡터를 나타낸다.

우선 CNT 현탁액(suspension) 속의 CNT 가 AC 전기장 하에서 받는 DEP 의 효과를 알기 위해 C-M factor 를 살펴본다. 용매로는 CNT 현탁액 제조에 흔히 사용되는 DIW(de-ionized water), IPA(isopropyl alcohol), 에탄올의 세가지를, 용질로는 MWCNT(multi-walled carbon nanotube)를 설정했으며 각각의 물성치들은 기존 연구결과들을 참조했다[10,11]. 해석을 통해 일반 함수발생기의 주파수 대역인 수십 MHz 이하에서는 C-M factor 가 양의 값을 가지므로, p-DEP 가 작용함을 알 수 있다(Fig. 3). 다음으로 F_{DEP} 를 살펴보면 $K(\omega), \epsilon_m, a$ 는 인가전압의 주파수와 CNT 현탁액에 관련된 것이지만, ∇E^2 는 전기장의 세기 및 그 분포와 관계된 것이다. 즉, ∇E^2 는 전

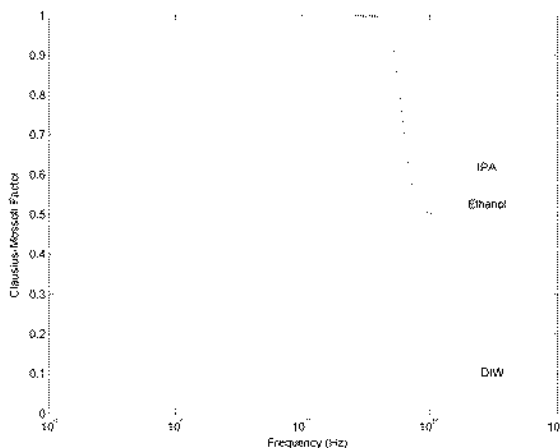


Fig. 3 Analysis of Clausius-Mossotti factor

극 형상에 의해 직접적인 영향을 받는다.

2.2.2 CNT 카트리지 제작 방법

AC DEP 를 이용하여 CNT 를 제작하기 위해 AC 전기장을 인가할 한 쌍의 금속전극들로, 얇고 날카로운 나이프에지(knife edge)형 금속전극(이하 나이프에지)과 평평한 금속전극을 선택했다. 이 두 개의 금속전극에 의해 불균일한 전기장을 생성할 수 있으며, 상대적으로 강한 전기장이 걸리는 나이프에지에 p-DEP 가 작용하여 CNT 들이 그 끝단에 달라붙게 된다. 두 전극 사이의 간극(gap)은 400 μm 를 유지한다. 그리고 기존 연구들과 달리 RF 앰프와 같은 별도의 특별한 전원증폭장치의 사용 없이 일반적인 함수발생기(Agilent 社, model no. 33220A)를 AC 전원장치로 사용했다. 이 함수발생기는 최대 10 MHz, 20 Vpp 이하의 AC 전압을 인가할 수 있다. 실험을 위한 2 wt% CNT 현탁액은 DIW 와 상용 CNT(일진나노텍(株), MWCNTs grown on Al_2O_3 substrate by CVD)를 섞고 초음파분산(ultrasonication)을 시켜 제작했다.

실험은 다음과 같이 진행했다. 우선 두 금속전극이 일정 간극을 유지한 채 서로 마주보게 하고 함수발생기로 AC 전압을 인가시킨 뒤, CNT 현탁액을 간극 사이에 채운다. 일정시간이 지나면 전원을 끄고 실험장치에서 나이프에지만 분리한다. 이 나이프에지를 CNT 카트리지로써 사용하며, 전자현미경(Topcon 社, model no. SM-300)으로 나이프에지를 관찰했다.

2.2.3 제작 실험 결과

실험 결과 AC 전기장 인가 후 CNT 들이 나이프에지의 끝단에 붙어 있음을 확인했다. 대체로 CNT

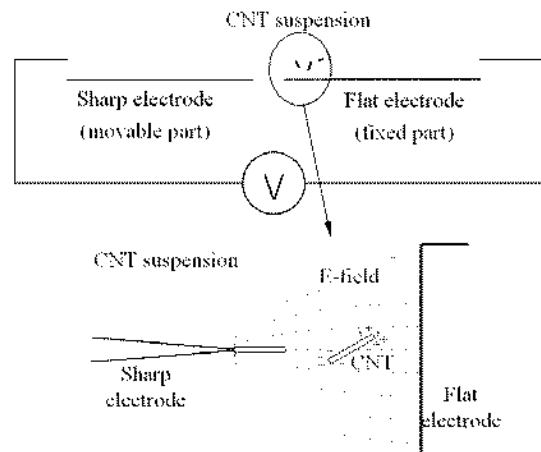


Fig. 4 Fabrication of the CNT cartridge, and the movement of CNTs by E-field distribution in CNT suspension

들이 나이프에지의 폭 방향으로 병렬 정렬되어 있었다. 그리고 추출된 CNT 들의 개수는 전압에 비례함을 확인했다. 전압이 낮은 경우 CNT 들을 찾기 위해 전자현미경의 배율을 더 높여야 할 정도로 그 개수가 적었으나, 전압이 커질수록 CNT 들이 많이 붙어 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 추출된 CNT 개수와 인가전압간의 정량적인 분석은 어려웠고, 다만 정성적으로만 확인할 수 있었다.

3. 결론 및 요약

CNT 나노트위저 제작을 위한 CNT 카트리지에 대한 기초 연구를 수행했다. CNT 나노트위저의 제작에 적합하도록 다수의 단일 MWCNT 들이 병렬로 정렬되도록 나이프에지를 사용했다. 또한 CNT 현탁액으로부터 CNT 를 추출하기 위해서는 p-DEP 의 효과를 크게 해야 하므로, 나이프에지의 상대전극(counter-electrode)으로 평평한 형태의 금속전극을 사용하여 별도의 특별한 AC 전원 증폭장치가 없이

도 CNT 가 추출되도록 했다. C-M factor 의 해석 결과, DIW 와 MWCNT 로 만들어진 CNT 현탁액과 일반 함수발생기를 사용했을 경우, p-DEP 가 작용한다. 실험결과, 일반 함수발생기를 사용해도 CNT 카트리지가 제작이 가능했고, 인가전압의 증가에 따라 CNT 의 추출량도 증가하는 것을 정성적인 차원에서 확인할 수가 있었다. 향후 이 CNT 카트리지를 nano-aligner system 에 부착하여 CNT nanotweezer 를 제작하는 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 21 세기 프론티어 연구개발사업인 나노 메카트로닉스 기술개발사업단의 연구비 지원(M102KN010001-04K1401-01120)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. S. Iijima, "Herical microtubules of graphitic carbon," Nature Vol. 354, pp.56-,58 1991.
2. Philip Kim, Charles M. Lieber, "Nanotube nanotweezers," Science, Vol. 286, pp. 2148-2150, 1999.
3. S. Akita, H. Nishijima, Y. Nakayama, "Carbon-nanotube tips for scanning probe microscopy: Preparation by a controlled process and observation of deoxyribonucleic acid," Applied Physics Letter, Vol. 74, pp. 4061-4063, 1999.
4. 이준석, 최재성, 강경수, 박윤근, 김수현, "AC 이 중전기영동법에 의한 나노팁 제작용 CNT 시편," 한국정밀공학회 2004 년도 춘계학술대회, pp. 640-643, 2004.
5. K. Yamamoto, S. Akita, Y. Nakayama, "Orientation of carbon nanotubes using electrophoresis," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 356, No 7B, pp. L917-L918, 1996.
6. J. Tang, B. Gao, H. Geng, O. D. Velez, L. C. Qin, O. Zhou, "Assembly of 1D nanostructures into sub-micrometer diameter fibrils with controlled and variable length by dielectrophoresis," Advanced Materials, Vol. 15, No. 15, pp. 1352-1355, 2003.
7. J. S. Choi, J. S. Lee, G. S. Kang, Y. K. Kwak, S. H. Kim, "Carbon Nanotube Sample for Fabrication of Nano-tip Using AC Dielectrophoresis Method," KSPE 2004 Conference Fall, pp. 640-643, 2004.
8. H. A. Pohl, "Dielectrophoresis," Cambridge University Press, Cambridge, 1978.

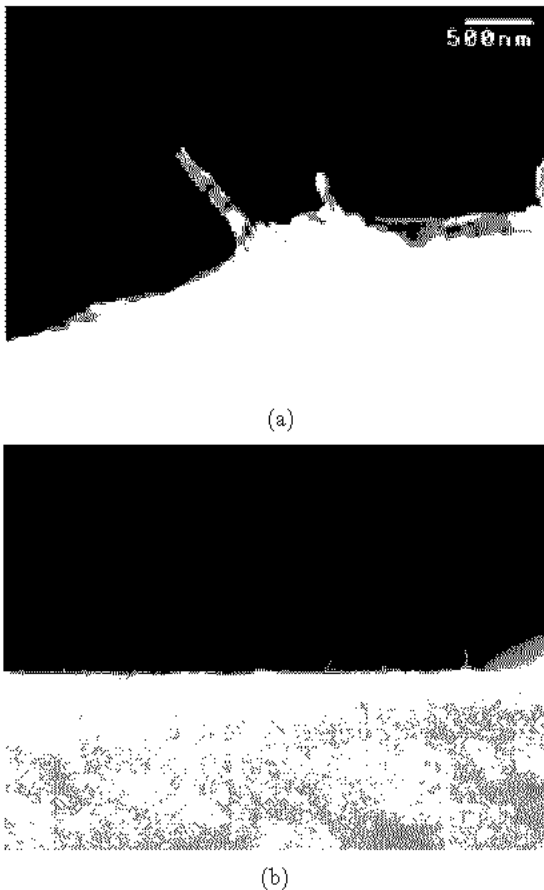


Fig. 5 SEM images for experimental results : (a) 5 V_{pp} at 10 MHz, (b) 10 V_{pp} at 10 MHz.

9. 강경수, 이준석, 최재성, 박윤근, 김수현, "탄소 나노 튜브-립 제작을 위한 다자유도 나노 정렬 시스템 개발," 대한기계학회 2004 년도 추계학술 대회, pp. 923-928, 2004.
10. M. Dimaki and P. Boggild, "Dielectrophoresis of carbon nanotubes using microelectrodes: a numerical study," *Nanotechnology*, Vol. 15, pp. 1095-1102, 2004.
11. C. A. Grimes, E. C. Dickey, C. Mungle, K. G. Ong, and D. Qian, "Effect of purification of the electrical conductivity and complex permittivity of multiwall carbon nanotubes," *Journal of applied physics*, Vol. 90, No. 8, pp. 4134-4137. 2001.