

전기장을 이용한 탄소나노튜브 카트리지 연구

최재성*(한국과학기술원 기계공학과), 곽윤근(한국과학기술원 기계공학과)
김수현(한국과학기술원 기계공학과)

A Study on the Carbon Nanotube Cartridges Using Electric Field

J. S. Choi (Mech. Eng. Dept. KAIST), Y. K. Kwak (Mech. Eng. Dept., KAIST)
S. H. Kim (Mech. Eng. Dept., KAIST)

ABSTRACT

This paper is about the carbon nanotube(CNT) samples called as CNT cartridges. The CNT cartridges are useful to make it better to fabricate the nano-sized devices like nanoprobe and nanotweezers through physical attachment. To make these cartridges, we need to align CNTs and to purify them from raw material. There is a variety of methods to align 1-dimensional nanostructures like nanotubes and nanowires. In this review, we mainly focused on the methods using electric field. And we will introduce various researches in relation to the CNT cartridges and the fabrication methods using the CNT cartridges and nanomanipulation techniques.

Key Words : carbon nanotube(CNT, 탄소나노튜브), cartridge(카트리지), alignment(정렬), assembly(조립)

1. 서론

본 연구는 서브마이크로미터(submicrometer) 크기의 디바이스를 가공하는데 필요한, 탄소나노튜브 카트리지 기술에 관한 것이다. 이에 관련된 연구 동향과, 탄소나노튜브 카트리지 제작에 필요한 기술들에 대해 다루며 나노디바이스의 3 차원적 가공에 효과적인 카트리지의 제작에 대해 설명한다.

1.1 연구 배경

나노미터(nanometer) 사이즈의 물체들을 이미징(imaging), 매니플레이션(manipulation) 또는 센싱(sensing)하기 위해서 다양한 나노디바이스(nano-devices)들이 필요하다. AFM(atomic force microscope)용 프로브(probe)와 나노트위저(nanotweezer) 등이 대표적이다. 탄소나노튜브는 뛰어난 기계적·전기적 특성으로 이러한 디바이스를 가공에 하기에 적합한 소재다. 그러나 탄소나노튜브를 이용하여 나노디바이스를 제작하기 위해서는, 원하는 형상과 특성을 가지는 탄소나노튜브들을 원하는 위치에 놓을 수 있어야 한다. 특히 고감도 센서나 정밀한 프로브

및 매니플레이션을 위해서는 단일 탄소나노튜브를 이용해야 한다. 이 때문에 단일 탄소나노튜브를 원하는 곳에 정밀하게 부착시키는 기술이 필요하다.

1.2 연구 목표

본 연구는 탄소나노튜브를 이용한 나노디바이스 가공에 적합한 샘플, 일명 탄소나노튜브 카트리지의 가공 방법에 관한 것이다.

탄소나노튜브는 물리·화학적 특성이 매우 뛰어난 나노소재로, 다양한 나노디바이스 제작에 활용될 수 있다. 그러나 정밀한 3 차원적인 나노디바이스의 가공을 위해서는 원하는 부위에 단일 탄소나노튜브를 부착할 수 있어야 한다. 가공의 정밀도와 유연성, 수율 등을 고려하면, 나노매니플레이션 시스템을 이용하여 원하는 서브스트레이트(substrate) 위에 탄소나노튜브를 직접 물리적으로 부착하는 방법이 효과적이다. 그리고 부착 작업을 효율적으로 하기 위해서는 잘 가공된 탄소나노튜브 샘플, 즉 탄소나노튜브 카트리지가 필요하다. 따라서 탄소나노튜브 카트리지와 나노스테이지를 이용한 매니플레이션 기술을 통해 다양한 나노디바이스들을 3 차

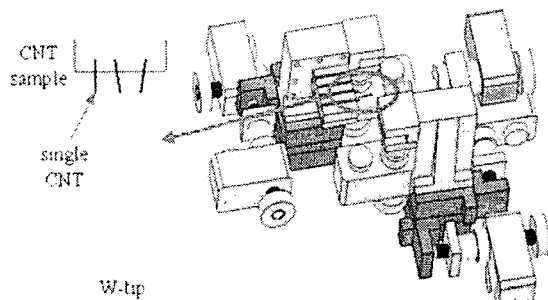


Fig. 1 Nanomanipulation system for the nano-fabrication with CNTs and the CNT cartridges

원적으로 가공할 수 있게 된다. Y. Nakayama 등[1]은 이와 같은 방식으로 다양한 나노다바이스를 제작하는 연구를 발표했다.

2. 탄소나노튜브의 조립과 정렬

탄소나노튜브 카트리지의 제작을 위해서는, 기판 위 임의의 위치 또는 정해진 영역에 탄소나노튜브를 부착할 수 있어야 한다. 따라서 탄소나노튜브나 나노와이어(nanowire)와 같은 1 차원 나노구조체들의 정렬과 조립 기술이 필수적이다. 다음과 같이 이에 관한 연구들을 살펴보겠다.

2.1 탄소나노튜브의 조립

단일 탄소나노튜브를 이용하여 나노사이즈의 프로브나 트위저 같은 나노다바이스 등을 제작하려면, 단일 탄소나노튜브를 특정 부분에 위치, 즉 조립할 수 있어야 하는데 다음과 같은 방식들이 있다.

첫째, 화학기상증착(CVD, chemical vapor deposition)으로 단일 탄소나노튜브를 원하는 위치에 직접 성장시키는 방법이다[2]. 그러나 이 방법은 온도, 유동, 반응 가스 등을 조절해야 하므로 공정의 제어가 까다롭고, 고온의 작업 조건 때문에 다른 공정과의 연계가 어렵다. 또한 단일 탄소나노튜브가 성장하려면 촉매의 나노패터닝(nano-patterning)이 필요하다는 어려움이 있다. 둘째, 탄소나노튜브를 원하는 곳에 직접 부착하는 방식이다. 이 방식은 부착하길 원하는 나노구조물들을 현탁액 상태로 만들고 공정을 진행하는데, 대개 정렬과 조립이 함께 이뤄진다. 이를 위해 전기장[3-5]이나 자기장[6] 같은 외부역장(external field)을 이용하거나, 마이크로유동[7] 또는 국소적인 패터닝이나 자가조립단분자막(self-assembled monolayer) 등을 이용하여 화학반응으로 부착하는 방법[8,9] 등을 사용할 수 있다.

2.2 탄소나노튜브의 정렬

나노다바이스의 효율적인 가공을 위해서는 다수

의 단일 탄소나노튜브들을 단순 조립이 아닌, 일정한 방향성을 가지도록 정렬시킬 필요가 있다. 대개 1 차원 나노구조물들의 현탁액에 앞서 언급한 대로 외부역장[3-6], 마이크로 유동[7], 화학적 표면처리[8,9] 등을 이용할 수 있다.

전기장을 이용하여 탄소나노튜브를 부착하려면 전극을 이용하여 목표 영역에 전기장을 인가해야 한다. 전기장 대신 자기장을 이용한 정렬도 가능하다. 그러나 실험 장비적인 측면이나 조립의 효율적인 측면에서 전기장을 이용하는 방식보다 덜 사용된다. 마이크로유동을 이용하여 정렬할 수도 있다[7]. 나노구조물을 부착하고자 하는 기판 위에 마이크로-나노 채널을 놓고 채널 내에 현탁액을 채운 후 전기장을 걸어서 유동을 제어함으로써 원하는 부위에서 정렬 조립되도록 한다. 그러나 이러한 채널들을 가공해야 하고, 넓은 영역에 걸쳐 다수의 단일 탄소나노튜브를 부착하기가 쉽지 않다. 탄소나노튜브를 부착시키고자 하는 위치에 화학적인 표면처리를 가하는 방법도 있다[8]. 기판 위에 화학적으로 표면 처리를 한 전극을 만들거나[9], 또는 전극과 나노튜브 모두 화학적으로 개질하기도 한다. 이 경우 외부역장을 이용하는 것에 비해 나노튜브들이 정렬·조립되는데 시간이 많이 걸린다. 최근에는 소요시간을 줄이기 위해 화학적인 방법과 전기장을 함께 사용하려는 연구도 진행 중이다[10].

3. 전기장을 이용한 탄소나노튜브의 정렬과 조립

다양한 1 차원 나노구조체들의 정렬·조립법이 있으나, 전기장을 이용하여 탄소나노튜브 카트리지를 준비하는 것이 가장 간편하다. 또 단순히 탄소나노튜브를 기판 위에 조립하는 것이 아니라, 다른 서브스트레이트에 부착할 수 있어야 한다. 전기장을 이용하여 단일 탄소나노튜브를 정렬·조립하려면, 탄소나노튜브 현탁액을 준비하고, 부착 위치에 전기장을 인가하기 위한 전극과 그에 대한 상대전극이 필요하다. 따라서 다음의 사항들을 고려해야 한다.

3.1 인가 전기장

전극들 위에 탄소나노튜브 현탁액을 떨어뜨리고 전기장을 인가하면, 인가 전기장의 방향에 따라 나노튜브가 정렬되고 전기장 구배(gradient)의 분포에 따라 조립된다. 이를 직류 전기장을 인가하거나[3], 교류전기장[4], 또는 직류 바이어스를 가지는 교류전기장[5]을 인가하게 된다. 직류와 교류 전기장에 의해 나노튜브는 전극에 대해 상대 운동을 하는데, 직류 성분에 의해 전기영동(electrophoresis) 효과를 받고 교류 성분에 의해서는 분극전기영동(DEP,

dielectrophoresis)의 영향을 받는다. 전자는 전하(charge)에 의해 발생하는 것이고, 후자는 중성입자의 극성(polarity)에 관계된다. 특히 분극전기영동은 물체가 전기장의 구배(gradient) 변화가 큰 쪽으로 물체가 몰려오는 양성분극전기영동(positive- or p-DEP)과, 반대로 밀려나가는 음성분극전기영동(negative- or n-DEP)으로 나뉘는데, 탄소나노튜브나 나노와이어의 정렬에는 주로 전자를 이용한다.

3.2 전극 형상

인가되는 전기장의 종류는 전력공급장치들에 의해 결정되지만, 실제 현탁액 속의 나노튜브들에게 영향을 미치는 전기장이 분포는 전극 형상에 의해 결정된다. 특히 나노튜브가 부착되는 영역은 양성분극전기영동에 영향을 받으며, 이것은 전극의 형상에 좌우된다. J. Chung 과 Y. Lee [5]은 날카로운 두 전극보다 한 쌍의 둥근 형상의 전극에서 단일 탄소나노튜브가 잘 부착됨을 보였으며, H. Lee [11] 는 끝이 뾰족한 경우보다 무딘 경우에 AFM 탐침 끝단에 단일 탄소나노튜브가 붙음을 보였다. 또한 K. Yamamoto 와 Y. Nakayama 등[3]은 한 쌍의 나이프 에지(knife-edge)형 전극을 이용하여 탄소나노튜브 카트리지를 처음 제작했으며 각각의 나노튜브 간의 정렬 각도를 제어할 수 있었다.

3.3 현탁액

전기장에 의해 나노튜브를 정렬·조립할 때 탄소나노튜브 현탁액을 사용한다. 이 때 현탁액 속에 나노튜브들의 분산 정도와, 나노튜브와 용매 간의 전기적 성질이 중요하다. 탄소나노튜브들은 번들(bundle) 형태로 붙어 있거나 탄소 불순물들이 붙어 있으므로 초음파분산(ultrasonication)을 해야 하며, 분극전기영동의 원리상, 용질에 해당하는 탄소나노튜브와 용매 간의 전기전도도(electric conductivity)와

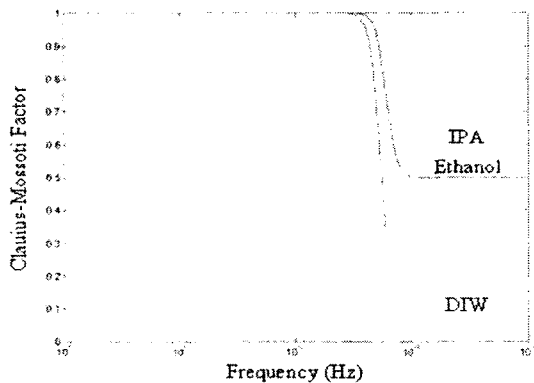


Fig. 2 Analysis of the Clausius-Mossoti factor with MWCNT and D.I.W, ethanol, and IPA

유전율(permittivity)의 차이가 탄소나노튜브의 거동에 영향을 주기 때문이다. 클라우시우스-모조티 인자? Clausius-Mossoti factor)로 표현되는 분극전기영동의 효과는 간단하게 구해진다. M. Dimaki [12]는 전산해석을 통해 다양한 용매 속의 탄소나노튜브들의 거동이 차이가 있음을 보였다.

4. 탄소나노튜브 카트리지

본 장에서는 앞서의 연구 동향과 원리들을 참조하여, 3 차원 나노디바이스 가공에 적합한 탄소나노튜브 카트리지의 개념에 대해 다룬다.

일반적인 탄소나노튜브의 조립 기술들은 단일 또는 다수의 탄소나노튜브들을 두 전극의 갭(gap) 사이에 걸쳐 놓는다. 그러나 3 차원 가공을 위한 샘플로써의 성격이 강한 카트리지 개념에서는 한 쪽 전극의 특정 영역 또는 위치에 탄소나노튜브들을 정렬·조립해야 한다. 또한 부착된 이후에 나노디바이스의 제작을 위해 다른 서브스트레이트 위로 옮기는 작업과 더불어 카트리지 자체의 취급이 용이해야 한다. 따라서 카트리지 제작을 위해 두 개의 전극이 각각 분리될 수 있는 구조를 가져야 한다. 그러나 전기장 인가 과정을 수행하기 위해 분리된 전극들은 일정 간격을 유지하며 위치하도록 서로에 대한 정렬 작업이 필요하다. 이를 위해 두 전극간의 위치를 조정할 수 있는 정밀스테이지 시스템이 필요하다.

전기장을 인가하여 단일 탄소나노튜브를 부착할 때, 대부분 같은 전극을 대칭 배열한다. 이것은 주로 현탁액 속에 공존하는 탄소나노튜브와 다른 불순물 간의 이동 속도에 차이를 주기 위해서인데, 간혹 주변에 비해 부착 부위에서 전기장의 영향을 상대적으로 높이기 위해 비대칭의 전극 쌍을 사용하기도 한다. 대표적인 경우가 분극전기영동을 이용하여 AFM 용 CNT 프로브를 제작하는 것이다[11]. 최근에는 순도가 높은 탄소나노튜브들이 많이 양산

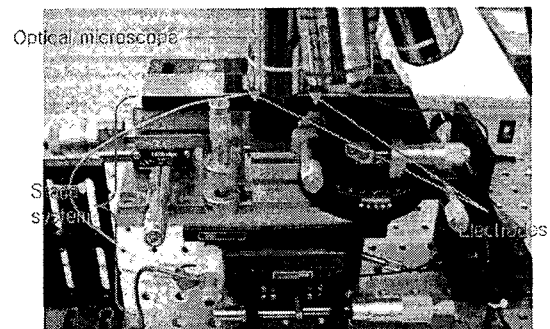


Fig. 3 Experimental set-up to fabricate the CNT cartridge with a precision stage system

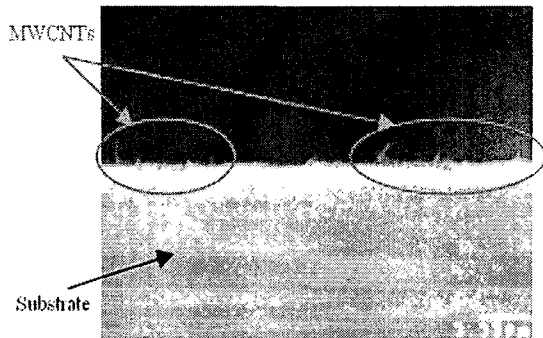


Fig. 4 (a) a set of electrodes and its electric field (b) the fabricated CNT cartridge under 1V@10MHz

되고 있으므로 전기장 구배의 영향을 높이기 위해 비대칭의 전극을 사용하여 전극 간의 간격이 커지더라도 탄소나노튜브를 부착할 수 있게 한다. 전극 간의 간격이 커지면, 전기장의 변화가 정렬 오차에 상대적으로 둔감해지게 된다. 우리는 다음과 같은 비대칭적인 전극쌍을 이용하여, 비대칭 전극으로도 불순물이 적게 붙는 탄소나노튜브 카트리지를 제작이 가능함을 보였다[13].

그러나 탄소나노튜브 카트리지에 붙게 되는 각각의 탄소나노튜브들이 서로 일정 간격을 유지하며, 정렬 각도가 일정하고, 탄소나노튜브가 전극과 붙어 있는 길이를 어느 범위 이하로 제어하기 위해서는 전기장 인가에 의한 방법만으로는 한계가 있다. 이러한 점을 화학적인 표면처리를 통해 극복될 수 있을 것이다. 최근에서야 전극 표면에 화학처리를 하고 전기장을 인가하여 나노튜브를 조립하는 연구 [10]가 선보이기 시작했다. 향후 이러한 탄소나노튜브 카트리지의 제작을 위해 이러한 혼합 방식을 활용할 필요가 있다.

4. 요약 및 결론

탄소나노튜브 카트리지는 다양한 나노디바이스를 정밀하게 3 차원 가공을 하기 위해 필요한 도구다. 이를 위해 전기장을 이용하여 간단하게 탄소나노튜브를 정렬·조립할 수 있다. 그러나 카트리지의 정밀한 제작을 위해서, 각각의 탄소나노튜브들의 서로간의 위치와 정렬각도 및 카트리지에 붙어 있는 길이를 제어할 필요가 있다. 이러한 점들은 향후 화학적인 표면처리 기술을 통해 해결되리라 기대한다.

참고문헌

1. T. Fukuda, F. Arai, L. Dong, and M. Nakajima, "Nanolaboratory - A Prototype Nanomanufacturing

system," Proc. of 5th WCICA, China, pp. 2698-2701, 2004

2. A.M. Cassell, H. Dai, *et al.*, "Directed Growth of Free-Standing Single-Walled Carbon Nanotubes," *J. Am. Chem. Soc.* Vol.121, pp. 7975-7976, 1999

3. K. Yamamoto, S. Akita, and Y. Nakayama, "Orientation of Carbon Nanotubes Using Electrophoresis," *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol.35, pp. L917-L918, 1996

4. K. Yamamoto, S. Akita, and Y. Nakayama, "Orientation and Purification of Carbon Nanotubes Using AC Electrophoresis," *J. Phys. D*, Vol.31, pp. L34-L36, 1998

5. J. Chung, and J. Lee, "Nanoscale Gap Fabrication and Integration of Carbon Nanotubes by Micromachining," *Sensors and Actuators A* Vol.104, pp. 229-235, 2003

6. M. Fujiwara, E. Oki, M. Hamada, Y. Shimomura, *et al.*, "Magnetic Orientation and Magnetic Properties of a Single Carbon Nanotube," *J. Phys. Chem. A* Vol.105, No.18, pp. 4383-4386, 2001

7. Huang Y., Duan X., Wei W. and Lieber C.M., "Directed Assembly of One-Dimensional Nanostructures into Functional Networks," *Science* Vol.291 pp. 630-633, 2001

8. J. Liu, M.J. Casavant, R.E. Smalley *et al.*, "Controlled deposition of individual SWCNTs on chemically functionalized templates," *Chem. Phys. Lett.* Vol.303, pp. 125-, 1999

9. M. Burghard, G. Duesberg, G. Philipp, and J. Muster, S. Roth, "Controlled Adsorption of Carbon Nanotubes on Chemically Modified Electrode Arrays," *Adv. Mater.* Vol.10 No.8, pp.584-588, 1998

10. Z. Chen, Y. Yang, Z. Wu, G. Luo, L. Xie, and Z. Liu, "Electric-Field-Enhanced Assembly of Single-Walled Carbon Nanotubes on a Solid Surface," *J. Phys. Chem. B* Vol.109, pp. 5473-5477, 2005

11. H.W. Lee, S.H. Kim, Y.K. Kwak, and C.S. Han "Nanoscale Fabrication of a Single Multiwalled Carbon Nanotube Attached Atomic Force Microscope Tip Using an Electric Field," *Rev. Sci. Instrum.* Vol.76, 2005 (On-line published)

12. M. Dimaki and P. Boggild, "Dielectrophoresis of Carbon Nanotubes Using Microelectrodes: a Numerical Study," *Nanotechnology* 15 (2004) 1095-1102

13. J.S. Choi, G.S. Kang, J.S. Lee, Y.K. Kwak and S.H. Kim "A Study of Carbon Nanotube Array for Fabrication of Carbon Nanotube Tip," Proc. of ISNM 2004, Daejeon. Korea, pp. 391-393, 2004