

# 다중벽 탄소나노튜브를 이용한 나노 브리지 제작

이종홍\*, 원문철\*, 서희원\*\*, 송진원\*\*, 한창수#

## Fabrication of Nano-bridge Using a Suspended Multi-Wall Carbon Nanotube

Jong-Hong Lee\*, Mooncheol Won\*, Hee Won Seo\*\*, Jin-Won Song\*\* and Chang-Soo Han#

### ABSTRACT

We report the suspension of individual multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) from the bottom substrate using deep trench electrodes that were fabricated using optical lithography. During drying of the solution in dielectrophoretic assembly, the capillary force pulls the MWNT toward the bottom substrate, and it then remains as a deformed structure adhering to the bottom substrate after the solution has dried out. Small-diameter MWNTs cannot be suspended using thin electrodes with large gaps, but large-diameter MWNTs can be suspended using thicker electrodes. We present the statistical experimental results for successful suspension, as well as the feasible conditions for a MWNT suspension based on a theoretical approach.

**Key Words :** NEMS (나노전자기계 시스템), Multi-wall Carbon Nanotube (다중벽 탄소나노튜브), Resonator (공진기), Bridge (브리지), Dielectrophoresis (유전영동), Capillary Force(모세관힘), Focused Ion Beam(집속 이온빔)

### 기호설명

$\delta_{max}$  = maximum deflection  
 $q$  = applied force per unit length  
 $l$  = length  
 $E$  = Young's modulus  
 $I$  = second moment of inertia  
 $S$  = surface area of the carbon nanotube captured by the solution  
 $\gamma$  = interfacial adhesion energy per unit contact area  
 $\theta$  = contact angle of the solid-liquid interface

$z$  = distance between the carbon nanotube and substrate

### 1. 서론

NEMS 기반의 공진기는 초감도 질량 감지기, 라디오 주파수(RF) 신호 처리 등에 사용할 수 있는 소자이다. 독특한 물리, 화학, 기계, 전자적 특성을 가진 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)는 높은 강도뿐만 아니라 튜브 형태로 되어 있어 질량이 작아 공진기<sup>2,3</sup> 제작을 위해 이상적인 물질로 알려져 있다.

\* 접수일: 2006년 7월 6일; 게재승인일: 2007년 1월 22일

\* 충남대학교 메카트로닉스공학과

\*\* 한국기계연구원 나노공정장비연구센터

# 교신저자: 한국기계연구원 나노공정장비연구센터

E-mail cshan@kimm.re.kr Tel. (042) 868-7126

그런데 공진기뿐만 아니라 구동기(actuator)<sup>4,5</sup>, 센서(sensor)<sup>6</sup> 등의 나노 디바이스 제작을 위해 전극 사이에 탄소나노튜브를 조립·정렬하는 기술이 필수적이다. 그 방법에는 화학기상증착법(Chemical Vapor deposition)에 의한 성장<sup>7</sup>, 전자빔 리소그래피(E-beam Lithography)<sup>8</sup>, 자기 조립(Self Assembly)<sup>9</sup>, 유전영동(Dielectrophoresis, DEP)<sup>10</sup> 등의 방법이 있다. 하지만 본 연구는 간단하고 성공률이 높은 유전영동법을 이용해 다중벽 탄소나노튜브를 전극 사이에 띄운 상태로 조립하여 공진기로 사용하기 위한 나노 브리지를 제작하였다.

## 2. 이론적인 배경

유전영동법으로 탄소나노튜브를 전극 사이에 조립·정렬하게 되면, 분산된 탄소나노튜브 용액이 마르면서 탄소나노튜브와 이산화규소(SiO<sub>2</sub>) 기판 사이에 발생하는 모세관힘 때문에 휘어져 바닥에 달라붙는다.<sup>11,12</sup> 이것은 공진기와 같이 바닥으로부터 띄워야 되는 소자에는 치명적인 문제가 된다.

Fig. 1(a)는 이상적인 공진기 모형이고, Fig. 1(b)는 유전영동법으로 탄소나노튜브를 전극 사이에 조립했지만 모세관힘에 의해 휘어지는 현상을 개념적으로 보여준 것이다.

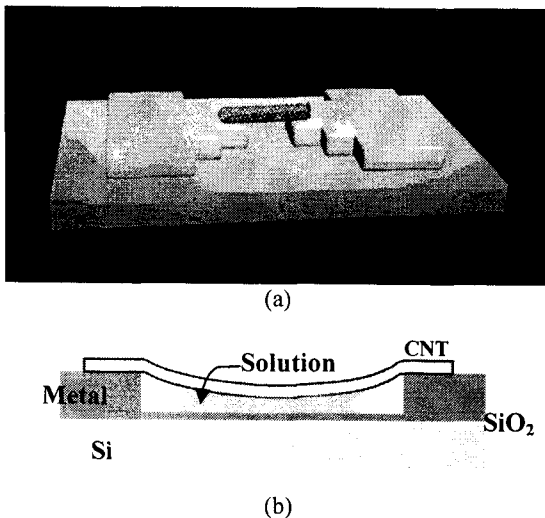


Fig. 1 (a) Schematic view of a fabricated electrode structure and (b) bending deflection of the CNT by capillary force

모세관힘은 탄소나노튜브를 바닥으로 당기지만, 탄소나노튜브는 큰 탄성력을 가지고 있어 원래 모양으로 되돌아오려 한다. 여기서 만약 모세관힘에 의한 탄소나노튜브의 최대 처짐 변위가 전극 높이보다 크면 바닥에 붙고, 탄소나노튜브 용액이 마른 후에도 탄소나노튜브와 기판 사이에 반데르발스힘(Van der Waals Force)에 의해 붙은 상태가 지속된다. 하지만 탄소나노튜브의 최대 처짐 변위가 전극 높이보다 작으면 모세관힘에도 불구하고 탄소나노튜브는 기판과 닿지 않은 상태에서 용액이 마르고 큰 탄성력으로 뜬 상태가 될 것이다.

모세관힘과 최대 처짐 변위 사이의 관계를 규명하기 위하여 탄소나노튜브의 최대 처짐 변위를 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_{\max} = \frac{ql^4}{384EI} \quad (1)$$

식 (1)에서  $l$ 은 탄소나노튜브의 길이,  $E$ 는 영의 계수(Young's Modulus),  $I$ 는 2차 관성 모멘트( $r^4$ 에 비례하고,  $r$ 은 반지름)이고,  $q$ 는 단위 길이당 받는 힘(모세관힘)으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q = S\gamma \cos \theta / z \quad (2)$$

식 (2)에서  $S$ 는 용액과 닿는 탄소나노튜브 표면적,  $\gamma$ 는 단위 접촉 면적당 부착 에너지,  $\theta$ 는 고체-액체 계면의 접촉각,  $z$ 는 탄소나노튜브와 기판 사이의 거리이다. 식 (2)에서  $\gamma$ 와  $\cos \theta$ 에 대한 정확한 측정과 계산이 어렵기 때문에 이론적으로 모세관힘에 의한 처짐 변위를 구하는 것은 매우 힘들겠지만, 최대 처짐 변위를 작게 하면 띄울 수 있는 가능성이 높다고 생각할 수 있다. 따라서 탄소나노튜브의 지름과 영의 계수는 클수록 길이는 작을수록 바닥에 붙지 않을 것이고, 전극 높이를 높게 하는 것도 효과적인 방법일 것이다.

## 3. 나노 브리지 제작

### 3.1 전극 제작

광 노광법으로 전극을 제작하는데, 실리콘(Si)

웨이퍼 위에 200nm 이산화규소(SiO<sub>2</sub>) 절연층을 올린 후 Au, Pt, Al 을 패터닝 마스크를 통해 50nm, 200nm, 500nm 높이로 증착했다. 광 노광법으로는 전극 사이의 거리를 1um 이하로 제작하는 것이 불가능하기 때문에 1um ~ 2 um 로 제작했다.

### 3.2 다중벽 탄소나노튜브(MWNT)의 조립

유전영동법으로 전극 사이에 탄소나노튜브를 조립·정렬할 때, 용액의 주입량에 따라 조립되는 개수가 달라지는데, 주입량이 많을수록 조립되는 개수는 많아진다. Fig. 2 와 같이 한 개의 다중벽 탄소나노튜브를 조립하기 위한 조건으로 0.25ul 가 적당하다고 판단할 수 있다.

일반적으로 농도, 주입량, 전압이 클수록 탄소나노튜브의 조립 개수는 많고, 주파수가 클수록 정렬성은 좋지만 조립 개수는 적다.

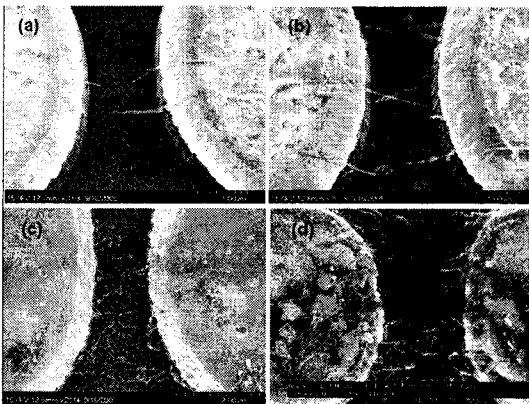


Fig. 2 SEM images according to the solution injection volumes of (a) 0.25ul, (b) 0.5ul, (c) 1 ul and (d) 2 ul at 5 Volts and 10 MHz. The Au electrode thickness was about 200 nm

### 3.3 전기방전법으로 만든 다중벽 탄소나노튜브(Arc-MWNT)의 처짐

탄소나노튜브는 전기방전법(Arc-Discharge)과 열화학기상증착법(Thermal Chemical Vapor Deposition, ThCVD)으로 만든 두 종류의 다중벽 탄소나노튜브를 사용하였는데, 전자는 후자에 비해 영의 계수는 크지만 지름과 길이는 작으며 많은 불순물로 순도는 낮다. Fig. 3 은 지름이 약 30nm 정도인 전기방전법으로 만든 다중벽 탄소나노튜브(Arc-MWNT)를

전극 사이에 조립한 이미지이고, 하나의 Arc-MWNT 가 부착되는 최적 조건은 주입량 0.25ul, 전압 5V, 주파수 10MHz 이다.

Fig. 3 은 전극 사이에 조립되었지만 모세관힘과 전극 끝의 경사 때문에 Arc-MWNT 가 바닥에 붙게 되었다. 용액이 마르면서 모세관힘에 의해 Arc-MWNT 가 바닥에 붙은 것이 마른 후에도 그대로 유지되는 것이다. Arc-MWNT 의 조립 성공률은 많은 불순물로 매우 낮을 뿐 아니라 지름이 50nm 이하이므로 모세관힘 때문에 바닥에서 띄우는 것도 쉽지 않을 것으로 생각된다.

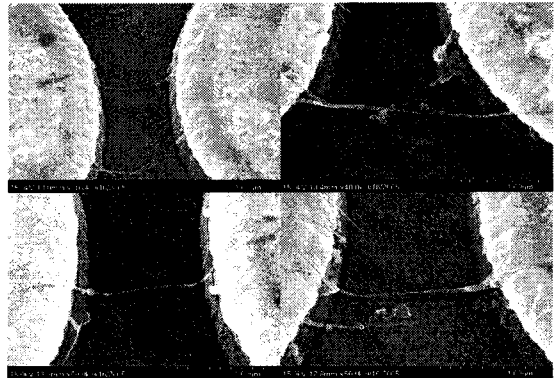


Fig.3 SEM images of an individually assembled MWNT made using Arc-Discharge for a 200nm thick Au electrode

### 3.4 열화학기상증착법으로 만든 다중벽 탄소나노튜브(ThCVD-MWNT)를 이용한 나노 브리지 제작

Fig. 3 에서 보는 것처럼 Arc-MWNT 를 띄울 수 없었지만, ThCVD-MWNT 는 적은 불순물로 순도가 높아 유전영동법에 의한 조립 성공률이 높을 뿐 아니라 지름이 50~100nm 로 커서 바닥에서 띄우는 것도 유리해 나노 브리지 제작에 적합하다고 판단했다.

Fig. 4 는 ThCVD-MWNT 를 (a) 50nm, (b) 200nm, (c),(d) 500nm 높이의 전극을 이용해서 전압 5V, 주파수 5MHz 로 조립한 것이다. Fig. 4(a)는 전극 높이가 낮아 띄우지 못했지만, Fig. 4(b),(c),(d)에서는 지름이 50~100nm 인 ThCVD-MWNT 를 전극 끝의 경사 영향에 상관없이 띄울 수 있었다. Fig. 4(b)는 200nm 높이의 전극에서 띄웠는데, 전극 끝이 수직

으로 만들어지지 못해 이를 따라 탄소나노튜브가 바닥으로 흐르면서 조립되었다. 만약 이것을 개선한다면 200nm 보다 낮은 전극에서도 조립할 수 있을 것이다.

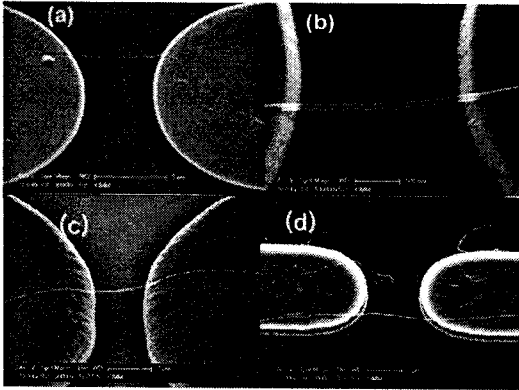


Fig. 4 SEM images for (a) 50nm, (b) 200nm and (c),(d) 500nm thick electrodes. The ThCVD-MWNTs were about 50nm~100nm in diameter. The applied voltage and frequency were 5 Volts and 5 MHz, respectively

본 나노 브리지는 공진기용으로 제작되었기 때문에 전기적인 특성이 매우 중요하다. 탄소나노튜브와 전극과의 접촉 저항을 줄이고, 공진할 때 탈착 현상이 일어나지 않도록 접촉 부분에 집속 이온빔(Focused Ion Beam, FIB)으로 Fig. 5 와 같이 100nm 높이의 백금을 증착한 후 완성하였다.

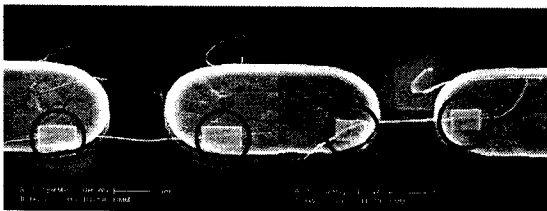


Fig.5 SEM images of an individually assembled MWNT with deposition of metal using FIB

Fig. 6 은 나노 브리지 제작 과정을 순서대로 보여준다.

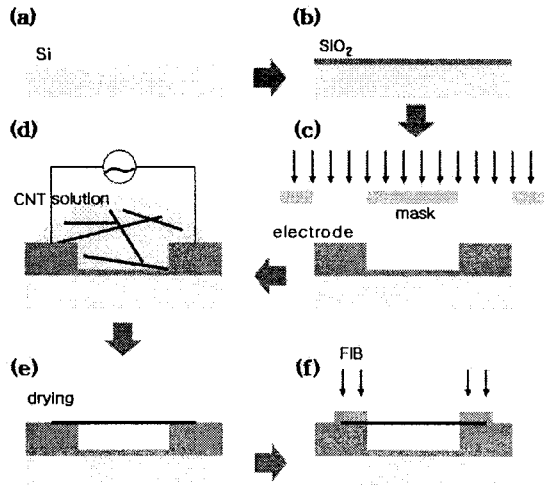


Fig. 6 Fabrication steps of MWNT bridge (a) 4 inches Si wafer, (b) SiO<sub>2</sub> layer deposited, (c) metal electrode deposited, (d) drop of the CNT solution, (e) drying and (f) deposition of metal using FIB

#### 4. 전극 높이 및 탄소나노튜브의 지름에 따른 나노 브리지 제작 조건

Table 1 은 42 개의 실험으로 조건에 따른 나노 브리지의 제작 성공률을 정리한 것이다.

Table 1 Success rate of free suspension for 42 individually assembled samples

CNT Diameter \ Electrode thickness	10-50 nm	50-100 nm	Over 100 nm
50nm	0 %	33 %	-
200nm	0 %	42 %	50 %
500nm	25 %	100 %	100 %

Table 1 을 보면 탄소나노튜브의 지름은 크고 전극 높이는 높을수록 공진기의 제작 성공률이 좋아진다. 특히 탄소나노튜브의 지름이 50nm 이상이고, 전극 높이가 500nm 인 경우에는 제작 성공률이 100%가 된다. 지름이 50nm 이하인 Arc-MWNT 는 전극 높이가 500nm 가 되더라도 바닥으로부터 뜬 상태로 조립하는 것은 쉽지 않겠지만, 지름이

50~100nm 인 ThCVD-MWNT 는 전극 높이가 200nm 만 되어도 전극 사이에 지지될 확률은 42%가 되었다. 제작 성공률은 전극 높이가 높을수록 향상되겠지만, 다중벽 탄소나노튜브의 지름에 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

Table 1 과 2 장의 수식을 통해 탄소나노튜브의 지름과 전극 높이에 따라 다음과 같이 구할 수 있다. 식 (3)에서 전극 높이가 최대 처짐 변위보다 클 조건을 구하면 식 (4)와 같이 미지수를 포함하는 K 값이 형상 변수들로 이루어진 수식보다 작아야 한다.

$$\frac{4(\gamma \cos \theta)}{384E} = \frac{\delta_{\max} z r^3}{l^4} \quad (3)$$

$$K < \frac{z^2 r^3}{l^4} \quad (4)$$

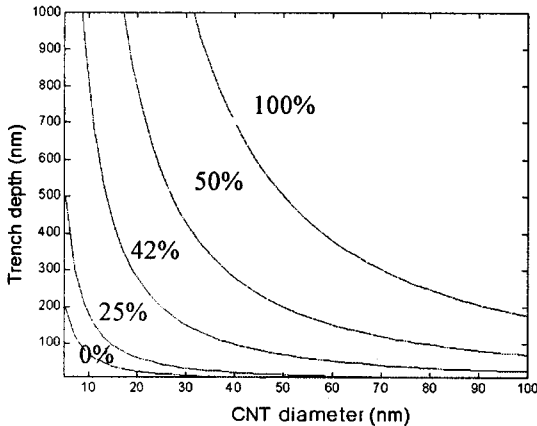


Fig. 7 Success probability region for suspension of a MWNT between 1~2 um gap electrode in terms of CNT diameter (d) and electrode height (t)

본 실험에서는 지지된 길이를 광 노광법에 의한 한계값으로 제한하였기 때문에 주로 z, r, l 에 의한 지지 성공률을 Fig. 7 과 같이 그래프로 구할 수 있었다. 실험 결과를 통해 얻어진 그래프를 이용하여 정해진 탄소나노튜브의 지름에 대해 원하는 성공률을 얻기 위한 전극 높이를 선택할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 탄소나노튜브의 지름과 전극 높이를 조절함으로써 탄소나노튜브를 바닥으로부터 뜬 상태로 조립하여 나노 브리지를 제작하는 간단한 방법을 제안하였다. 지름이 50nm 이하인 Arc-MWNT 는 전극 높이가 500nm 가 되더라도 바닥으로부터 뜬 상태로 조립되는 것은 불가능할 것이다. 반면에 지름이 50~100nm 인 ThCVD-MWNT 는 전극 높이가 200nm 만 되더라도 전극 사이에 뜬 상태로 하나의 다중벽 탄소나노튜브를 조립할 수 있었다. 또한 모세관힘과 탄성력에 의한 탄소나노튜브의 처짐에 관한 수식과 실험 결과에 근거하여 탄소나노튜브의 지름과 전극 높이에 따라 지지되는 확률 영역을 그래프로 도시하였다. 이를 통해 향후 다중벽 탄소나노튜브를 이용한 나노 브리지 및 NEMS 소자를 제작하는데 본 연구 결과가 유용할 것으로 생각된다.

### 후 기

본 연구는 한국기계연구원 자체사업, 환경부의 Echo-STAR 과제, 과학기술부의 자연모사과제 및 21 세기 프론티어 사업인 나노메카트로닉스 사업단의 지원을 받아 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌

1. Baughman, R. H., Zakhidov, A. A. and Heer, W. A., "Carbon Nanotubes—the Route Toward Applications," Science, Vol. 297, pp. 787-792, 2002.
2. Sazonova, V., Yuval, Y., Üstünel, H., Roundy, D., Arias, T. A. and McEuen, P. L., "A tunable carbon nanotube electromechanical oscillator," Nature, Vol. 431, pp 284-287, 2004.
3. Babić, B., Furer, J., Sahoo, S., Farangfar, Sh. and Schönenberger, C., "Intrinsic thermal vibration of suspended doubly clamped single-wall carbon nanotubes," Nano Lett., Vol. 3, No. 11, pp. 1577-1580, 2003.
4. Collins, P. G., Bradely, K. B., Ishigami, M. and Zettl, A., "Extreme Oxygen Sensitivity of Electronic Properties of Carbon Nanotubes," Science, Vol. 287,

- pp. 1801-1804, 2000.
5. Akita, S., Nakayama, Y., Mizooka, S., Takano, Y., Okawa, T., Miyatake, Y., Yamanaka, S., Tsuji, T. and Nosaka, T., "Nanotweezers consisting of carbon nanotubes operating in an atomic force microscope," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, No. 11, pp. 1691-1693, 2001.
  6. Kong, J., Franklin, N. R., Zhou, C., Chaplin, M. G., Peng, S., Cho, K. and Dai, H., "Nanotube Molecular Wires as Chemical Sensors," *Science*, Vol. 287, pp. 622-625, 2000.
  7. Kong, J., Soh, H. T., Cassell, A. M., Quate, C. F. and Dai, H. J., "Synthesis of individual single-walled carbon nanotubes on patterned silicon wafers." *Nature*, Vol. 395, pp. 878-881, 1998.
  8. Lefebvre, J., Lynch, J. F., Llaguno, M., Radosavljevic, M. and Johnson, A. T., "Single-wall carbon nanotube circuits assembled with an atomic force microscope," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 75, No. 19, pp. 3014-3016, 1999.
  9. Rao, S. G., Huang, L., Setyawan, W. and Hong, S., "Nanotube electronics: Large-scale assembly of carbon nanotubes," *Nature*, Vol. 425, pp. 36-37, 2003.
  10. Seo, H. W., Han, C. S., Choi, D. G., Kim, K. S. and Lee, Y. H., "Controlled assembly of single SWNTs bundle using dielectrophoresis," *Microelectronic Eng.*, Vol. 81, pp 83-89, 2005.
  11. Javey, A., Guo, J., Wang, Q., Lundstrom, M. and Dai, H., "Ballistic carbon nanotube field-effect transistors," *Nature*, Vol. 424, pp. 654-657, 2003.
  12. Martel, R., Schmidt, T., Shea, H. R., Hertel, T. and Avouris, Ph., "Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 73, No. 17, pp 2447-2449, 1998.