

나노 트위저의 구동 전압에 관한 연구

이준석[†] · 최재성* · 강경수* · 곽윤근* · 김수현*

A Study on the Actuating Voltage of a Nanotweezer

Lee Junsok, Choi Jaiseong, Kang Gyungsoo, Kwak Yoonkeun, Kim Soohyun

Key Words : Nanotweezer(나노 트위저), Electrostatic Force(정전기력), Carbon Nanotube(탄소나노튜브)

Abstract

In this paper, we propose a method to estimate the actuating voltage of the nanotweezer made by manual assembly using carbon nanotube. The nanotweezer is composed of two CNT arms that are made by the multi-walled carbon nanotube and tungsten tip. Since the each CNT arm has the macro actuator, the nanotweezer can manipulate a large particle and it is possible to close and open the CNT arm repeatedly. The closing voltage, i.e., actuating voltage is calculated using the capacitance between the carbon nanotubes in CNT arm. We demonstrate the actuation of the nanotweezer using the voltage calculated with the electrostatic force.

기호설명

C_{unit} : 단위길이당 전기 용량
 V : 나노 트위저에 인가한 전압
 E : 탄소나노튜브의 영 계수
 I : 탄소나노튜브의 단면 2 차 모멘트
 q_{elec} : 단위 길이당 정전기력
 y : CNT 의 휨 량

1. 서 론

1991 년 처음 탄소나노튜브가 발견된 이후[1], 탄소나노튜브에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 특히, 탄소나노튜브의 뛰어난 전기적, 기계적 성질을 이용한 나노 팁에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 기술을 바탕으로 나노 트위저를 개발한 사례도 발표되고 있다.

1999 년 Kim 은 처음으로 탄소나노튜브를 이용한 나노 트위저를 개발하였으며, 이를 이용하여 나노 클러스터를 조작할 수 있음을 보였다[2]. 이후, 2001 년에는 Akita 에 의해 원자현미경(Atomic Force Microscope, AFM) 내에서 기존의 AFM 팁의 끝이 분리된 양쪽에 탄소나노튜브를 부착하여 나노 트위저를 제작하였다[3].

이러한 연구들은 공통적으로 트위저를 만들기 위해 단일 기저를 사용하였다. 즉, 유리 전극 봉이나 분리된 AFM 팁을 이용하였으며, 각각의 경우 두개의 탄소나노튜브를 기저에 부착하여 나노 트위저를 제안하였다. 단일 기저를 이용한 나노 트위저의 경우, 구동 전압의 인가를 통하여 트위저가 닫힌 후, 다시 분리하기가 매우 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 본 연구에서는 두개의 기저에 각각 탄소나노튜브를 부착하고, 각각의 기저가 개별적인 운동이 가능하도록 액츄에이터를 부착하여 나노 트위저를 제작하였다. 또한, 전해에칭 과정을 통하여 나노 트위저에서 각각의 탄소나노튜브의 길이를 적절한 길이로 조절하여 사용하였다.

본 논문에서는 제작된 나노 트위저의 구동 전압을 예측하고, 예측된 구동 전압과 실제 제작된 나노 트위저의 움직임과 비교하였다. 이때, 탄소나노

[†] 한국과학기술원 기계공학과
 E-mail : jameslee@kaist.ac.kr
 TEL : (042)869-3268 FAX : (042)869-5201

* 한국과학기술원 기계공학과

튜브 사이의 전기용량을 이용한 정전기력을 이용하여 구동 전압을 계산하였다.

2. 나노 트위저 제작

2.1 단일 CNT arm 제작

CNT arm 을 제작하기 위해서는 먼저, 탄소나노튜브가 부착될 기저를 제작해야 한다. 본 연구에서 기저물로 텅스텐을 사용하였다. 초기 직경이 500 μm 인 텅스텐 봉을 전해에칭을 통하여 끝단 직경이 1~2 μm 의 텅스텐 팁으로 제작하였다[4]. Fig.1 에서는 제작된 팁을 고배율 광학 현미경으로 관찰한 모습을 보여주고 있다.

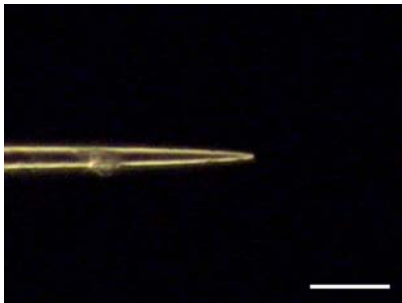


Fig. 1 Manufactured tungsten tip (scale bar : 10 μm)

전해에칭 과정을 통하여 기저물이 제작되면, 기저물에 탄소나노튜브를 부착한다. 본 연구에서 사용한 탄소나노튜브는 화학기상증착법(Chemical Vapor Deposition, CVD)에 의해 알루미늄(Al_2O_3) 기판 위에서 성장시킨 것으로, 평균 직경이 약 100 nm 이다. 탄소나노튜브로는 상대적으로 굵기 때문에 본 연구의 모든 과정은 광학현미경 하에서 수행 가능하다.

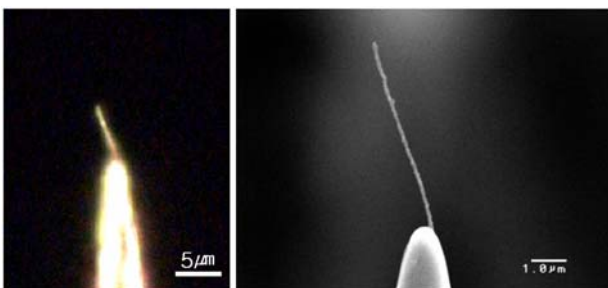


Fig. 2 Manufactured CNT arm (left : Optical microscope image, right : SEM image)

탄소나노튜브는 초음파 분쇄기를 통하여 탄소나노튜브간의 엉킴을 분리한 뒤, 광학 스테이지 및 나노 액츄에이터를 이용하여 직접 텅스텐 팁에 부

착한다. 부착할 때에는 부착되는 지점에 카본 테잎을 이용하여 접착력을 강화하였다. Fig.2 에서 탄소나노튜브가 부착된 모습을 보여주고 있다.

2.2 나노 트위저 제작

앞 절에서 텅스텐 팁과 탄소나노튜브를 이용하여 CNT arm 을 제작하였다. 하지만, 이렇게 제작된 CNT arm 은 탄소나노튜브의 다양한 길이로 인하여 나노 트위저로 사용하기에 서로의 길이가 다를 수 있다. 그렇기 때문에, 본 연구에서는 서로 길이가 다른 CNT arm 의 길이를 같은 길이로 맞추기 위하여 전해에칭을 통한 탄소나노튜브 길이 조절 과정을 수행하였다. Fig.3 에서 전해에칭 시스템의 개념도를 보여주고 있다.

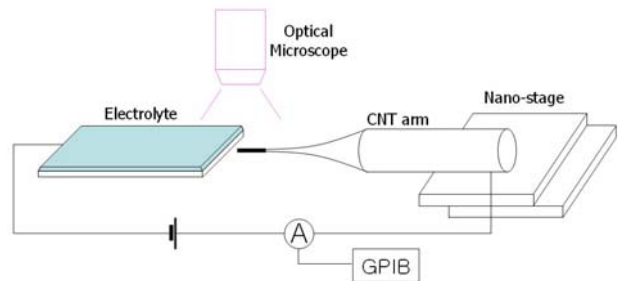


Fig. 3 Schematic view of CNT arm cutting system

전해에칭을 통하여 CNT arm 의 길이를 조절한 결과는 Fig.4 에서 보여주며, 탄소나노튜브가 전해에칭 과정을 통하여 잘려질 때 흐르는 전류를 측정하여 잘라나간 CNT 의 양을 계산할 수 있다.

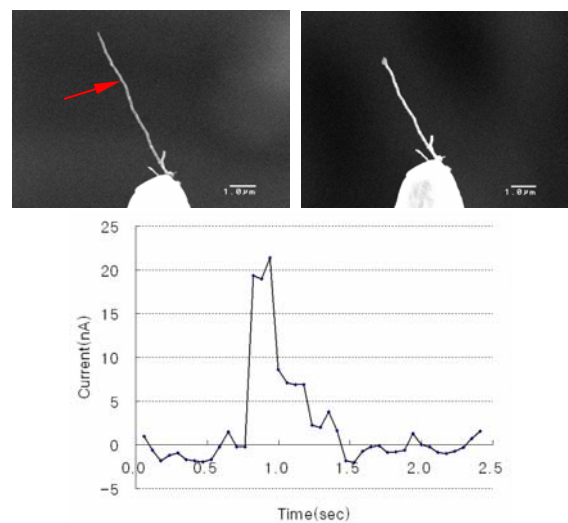


Fig. 4 Prior and posterior images of CNT arm of electrochemical etching (upper) and the profile of current during the processing (lower)

Fig.4 에서 화살표로 표시한 지점에서 탄소나노튜브가 잘려졌으며, 이때 측정된 전류의 흐름은 아래 그림과 같이 나타났다. 결국, 이러한 과정을 통하여 CNT arm 을 나노 트위저로 사용하기에 적절한 길이로 조절하였다. 본 연구에서는 사용한 전류측정기는 Agilent 사의 3458A 를 사용하였다.

본 연구와 기존의 나노 트위저가 다른 점은 서로 다른 두개의 기저물을 사용하여 각각의 CNT arm 이 상대운동이 가능하도록 한 점이다. 즉, Fig.5 에서 보이는 것과 같이 각각의 CNT arm 에 액츄에이터를 부착하여 대상물에 비하여 큰 운동이 가능하도록 제작하였다.

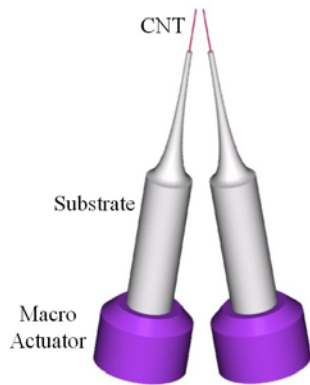


Fig. 5 Schematic view of nanotweezer with macro actuator

본 연구에서 사용한 액츄에이터는 PI 사의 나노포지셔너(nano positioner)를 이용하였으며, 3 축 운동이 가능하도록 시스템을 구성하였다. 실제로 제작된 나노 트위저의 모습을 Fig.6 에서 보여주고 있다.



Fig. 6 Manufactured nanotweezer (scale bar : 5 μm)

3. 구동 전압 예측 및 실험 결과

제작된 나노 트위저를 구동하기 위해 양단에 전압을 인가하면 탄소나노튜브 사이의 정전기력에 의해서 구동된다. 본 연구에서 사용한 힘은 정전기력이다. 실제로 반데르발스 힘(van der Waals force)도 존재하지만, 이 힘이 영향을 주는 범위는 약 30nm 이내이므로, 본 연구에서는 무시한다.

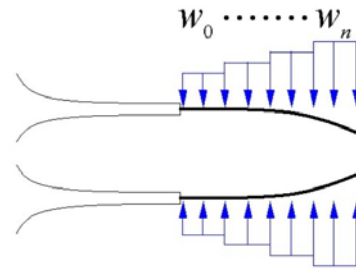


Fig. 7 Schematic view of the electrostatic force in a nanotweezer

Fig.7 에서 보이는 것과 같이 인가전압에 의한 탄소나노튜브 사이의 정전기력은 두 탄소나노튜브 사이의 전기용량의 변화에 따라 결정되며, 그 힘은 탄소나노튜브 사이의 거리가 가까울수록 커지게 된다. 사용된 전기용량은 Dequesnes 가 제안한 방법을 바탕으로 하여 두 CNT arm 에 반대 전압이 인가될 경우를 바탕으로 수행하였다[5]. 즉, 양 전압이 걸리는 탄소나노튜브와 GND 사이의 전기용량을 구하고, GND 와 음 전압이 걸리는 탄소나노튜브 사이의 전기용량을 구한 뒤, 직렬로 연결된 두 전기용량의 합으로 전체 전기용량을 구할 수 있다. 즉, 단위 길이당 전기용량은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{unit} = \frac{\pi\epsilon}{2 \ln \left[1 + \frac{h}{2r} + \sqrt{\left(\frac{h}{2r} + 1 \right)^2 - 1} \right]} \quad (1)$$

식(1)에서 ϵ 은 공기의 유전율, h 는 탄소나노튜브의 초기 간격, r 은 탄소나노튜브의 반지름을 나타낸다. 이렇게 구한 전기용량을 이용하여 전체 전하량과 전기용량 및 인가전압 사이의 관계를 통하여 단위 길이당 전하량 즉, 단위 길이당 작용하는 힘(q_{elec})을 구할 수 있다. 이것을 간단히 표현하면 식(2)와 같다.

$$q_{elec} = C_{unit} V \quad (2)$$

결국, 이 힘이 외력으로 작용하여 탄소나노튜브를 움직인다.

본 연구에서는 탄소나노튜브를 실린더 형태의 봉으로 가정하여 휨 량을 계산하였다. 즉, 식(3)과 같은 형태로 휨 량을 계산할 수 있다.

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = q_{elec} \quad (3)$$

식(3)에서 E 는 탄소나노튜브의 영 계수, I 는 단면 2 차 모멘트, y 는 x 위치에 따른 휨 량을 나타낸다. 이 식을 바탕으로 앞에서 제작한 나노 트위저의 구동 전압을 예측한 결과와 실제 구동한 결과를 Fig.8 에서 보여준다.

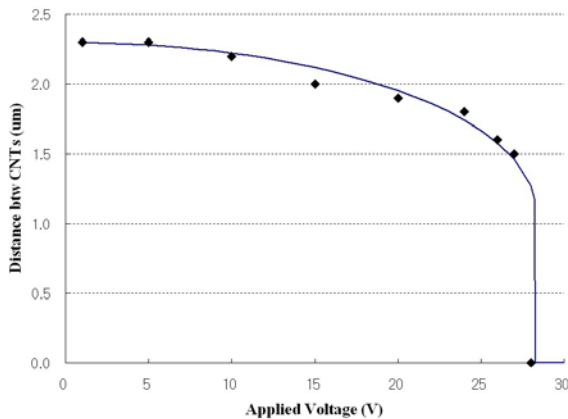


Fig. 8 Distance between the end points of CNTs in nanotweezer depending on the applied voltage (line : simulation, point : experiment)

Fig.8 에서는 구동전압을 예측한 결과와 실제 실험을 통한 결과를 보여주고 있으며, 두 결과는 서로 비슷한 결과를 보여줌을 확인하였다. 실제로, 전산모사 실험을 통한 구동전압은 28.3V 이었으며, 실험에서는 28V 로 측정되었다.

제작된 나노 트위저는 탄소나노튜브의 길이가 약 $6.5 \mu\text{m}$ 이고, 굵기가 약 100 nm , 초기 두 탄소나노튜브 사이의 거리가 $2.5 \mu\text{m}$ 이다. Fig.9 에서 구동되는 나노 트위저의 모습을 보여주고 있다. 초기상태에서(Fig.9 (a)) 전압을 인가하면, 두 탄소나노튜브 사이의 거리가 가까워진다. 인가전압이 24V 일 때는 Fig.9 (b)와 같게 되고, 구동전압이 28V 가 인가되면 Fig.9 (c)와 같이 접촉하게 된다. 이제, 액츄에이터를 이용하여 나노 트위저를 분리하는데, Fig.9 (d)와 같은 과정을 거쳐 Fig.9 (e)에서 보여주는 것과 같이 탄소나노튜브는 다시 떨어지게 된다. 다시, 액츄에이터를 이용하여 초기의 상

태로 복귀하면 Fig.9 (f)와 같게 된다. 본 연구에서 제안한 두개의 기저물을 이용한 나노 트위저는 앞의 실험결과에서도 알 수 있듯이 구동을 반복적으로 수행할 수 있다.

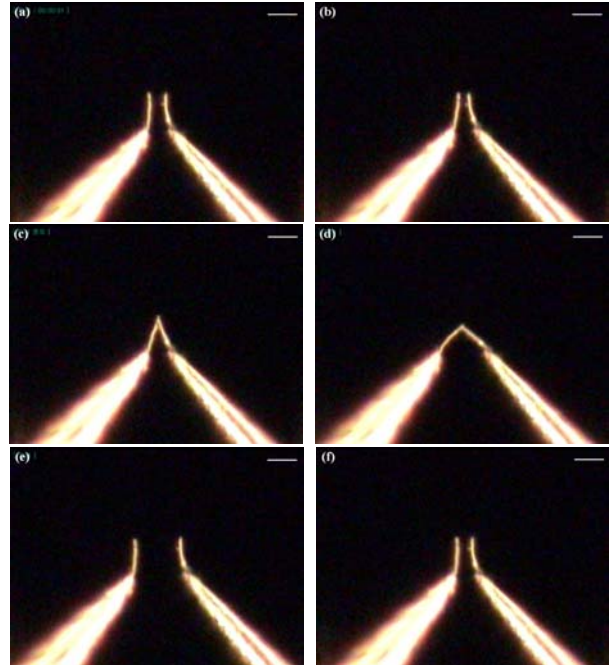


Fig. 9 Images of the nanotweezer depending on the applied voltage and the movement of the macro actuators. (a) initial state, (b) intermediate state, 24V, (c) at closing voltage, 28V, (d) before separation by the macro actuators, (e) after separation and (f) recover the initial state (scale bar : $5 \mu\text{m}$)

4. 결 론

본 연구에서는 탄소나노튜브를 텅스텐 텅 기저물에 부착하여 단일 CNT arm 을 만든 뒤, 액츄에이터와 조합하여 나노 트위저를 제작하였다. 제작된 나노 트위저의 구동전압에 대한 예측을 탄소나노튜브 사이의 전기용량을 이용하여 구하였으며, 이를 실험결과와 비교하였다.

향후, 이러한 실험을 바탕으로 $1 \mu\text{m}$ 이하의 대상 물체의 조작에 나노 트위저를 적용할 예정이며, 이에 필요한 여러 가지 힘에 대한 분석도 수행할 예정이다. 또한, SEM 내에서 구동 가능한 이중 구조의 나노 스테이지 시스템을 이용하여 더 작은 크기의 나노 트위저를 제작하고, 적용할 예정이다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Sumio Iijima, 1991, Hellical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, Vol.354, pp.56-58
- (2) Philip Kim, Charles M. Lieber, 1999, Nanotube Nanotweezers, *Science*, Vol.286, pp.2148-2150
- (3) Seiji Akita, Yoshikazu Nakayama, Syotaro Mizooka, Yuichi Takano, Takashi Okawa, Yu Miyatake, Sigenori Yamanaka, Masashi Tsuji, Toshikazu Nosaka, 2001, Nanotweezers consisting of carbon nanotubes operating in an atomic force microscope, *Applied Physics Letters*, Vol.79, No.11, pp.1691-1693
- (4) Lim Hyeongjun, Lim Youngmo, Kim Soohyun, 2003, Fabrication of Arbitrarily Shaped Microelectrodes by Electrochemical Etching, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.42, pp.1479-1485
- (5) Marc Dequesnes, S V Rotkin, N R Aluru, 2002, Calculation of pull-in voltage for carbon-nanotube-based nanoelectromechanical switches, *Nanotechnology*, Vol.13, pp.120-131