

정전기구의 형광 현미경 측정을 이용한 탄소나노튜브 프로브의 굽힘 스프링 상수 측정

Experimental determination of bending spring constant of an individual multiwall carbon nanotube probe using fluorescence measurement of electrostatic actuation

*권순근¹, 박효준¹, 곽윤근¹, #김수현¹

*S. G. Kwon¹, H. J. Park¹, Y. K. Kwak¹, #S. H. Kim¹ (soohyun@kaist.ac.kr)

¹ 한국과학기술원 기계항공시스템학부 기계공학전공

Key words : Carbon nanotube probe, Electrostatic actuation, Fluorescence measurement, Spring constant

1. 서론

최근 단일 생체분자가 관여하는 생물학적 프로세스에 대한 관심의 증가와 함께, 단일 생체분자를 조작할 수 있는 마이크로/나노 조작기구의 제작기술의 발전은 관련 힘 측정을 통하여 나노미터 크기의 단일 생체분자의 물리량 측정을 가능하게 하고 있다.¹ 단일 생체분자가 관여하는 힘의 범위는 수 피코뉴턴(pN)에서부터 수 나노뉴턴(nN)에 이른다. 생체분자 조작 시 가해지는 힘의 크기는 조작기구의 스프링 상수(spring constant, k)와 미세 변위의 곱으로 구해지며 피코뉴턴 크기의 힘을 부여하거나 검출하기 위해서는 조작기구의 스프링 상수가 수 pN/nm 수준이 되어야 한다.

탄소나노튜브 프로브는 나노미터 크기의 직경, 높은 종횡비의 장점으로 인하여 피코 뉴턴 크기의 힘을 측정할 수 있는 유용한 도구로 제시되어 왔으나², 실제 스프링 상수 값에 대해서는 이론적인 접근이 대부분이다. 또한 탄소나노튜브의 기계적 특성은 나노튜브의 결함(defect) 유무 및 직경에 따라서 달라지게 된다.³ 따라서 피코뉴턴 크기의 미세 힘을 측정할 수 있는 탄소나노튜브 프로브의 굽힘 스프링 상수를 실험적으로 측정할 수 있는 방법이 요구된다.

본 연구에서는 비접촉식 힘 인가 방법인 정전기력에 의한 나노튜브의 굽힘 현상으로부터 나노튜브 프로브의 굽힘 스프링 상수를 실험적으로 측정하는 방법을 제안한다. 제안된 방법을 통한 측정 결과로부터 탄소나노튜브 프로브가 피코뉴턴의 미세 힘 측정에 적합한 스프링 상수를 가지는 것을 검토한다.

2. 정전기력에 의한 탄소나노튜브 프로브의 구동

정전기력에 의한 나노튜브의 굽힘 현상은 다음의 지배 방정식에 의하여 결정된다.

$$EI \frac{d^4 r}{dx^4} = q_{elec} \quad (1)$$

여기서 r 은 나노튜브와 그라운드 면사이의 간극 거리(gap), x 는 튜브의 길이방향으로 위치, q_{elec} 은 나노튜브에 수직으로 작용하는 단위길이당 정전기력의 크기, E 는 나노튜브의 영계수이며, I 는 나노튜브의 관성 모멘트이다. 또한 정전기력은 정전 용량 모델로부터 구해질 수 있는데, 그라운드 면에 있는 원통형 실린더의 형태로 식 (2)와 같이 근사할 수 있다.⁴

$$q_{elec} = - \frac{\pi \epsilon_0 V^2}{R \sqrt{\frac{r(r+2R)}{R^2}} \log^2 \left[1 + \frac{r}{R} + \sqrt{\frac{r(r+2R)}{R^2}} \right]} \quad (2)$$

여기서, R 은 실린더의 반경이며, ϵ_0 은 진공의 유전상수 값이다. 입력 전압에 따른 나노튜브 끝단에서의 굽힘 변위는 식(1), (2)에 의하여 구해진다. 위의 식(2)가 비선형 방정식이며 정전기력이 나노튜브와 상대전극 사이의 간극 거리(r)의 함수이므로, 나노튜브의 변위의 시뮬레이션 결과는 반복 계산법(iteration method)에 의하여 구하였다.

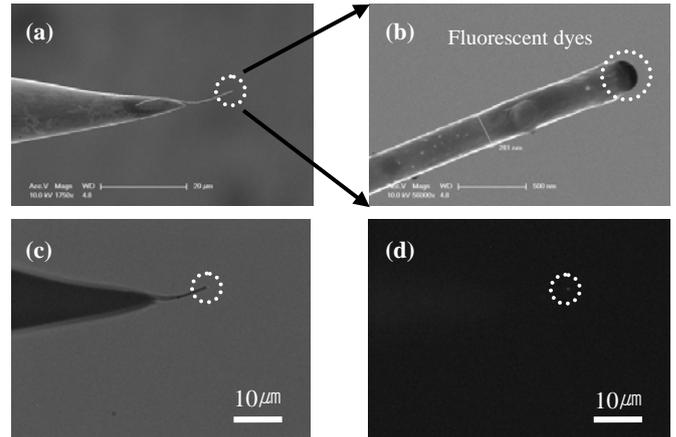


Fig. 1 SEM image ((a),(b)) and fluorescence microscope image ((c),(d)) of an individual MWNT probe with tip-specific loading of fluorescent dyes at the end

식 (1)에서 알 수 있듯이, 간극(r)은 굽힘 강성(bending stiffness, EI)의 크기에 따라 달라지게 되므로, 실제 측정을 통한 결과를 이론적인 모델에 적용하여 나노튜브의 굽힘 강성의 크기를 실험적으로 구할 수 있다. 본 연구에서는 나노튜브의 끝단 변위 측정을 위하여 그림 1 과 같이 끝단에 형광물질이 접착된 나노튜브 프로브를 이용하였다.⁵ 그림 2 는 정전구동 실험의 개념도(a)와 실험 구성(b)을 보여준다. 실험에서 사용한 탄소나노튜브 프로브는 165nm의 직경과 22.7 μ m의 길이를 가지며, 상대전극과 초기 7.9 μ m의 간극을 가진다. 두 전극 사이에 직류 전압을 가하여 전압의 크기에 따른 탄소나노튜브의 변위를 형광측정을 통하여 관찰한다. 형광현미경 이미지로부터 굽힘 변위를 추출하기 위해서, 형광세기에 대한 가우시안 분포를 적용하였다. 가우시안 분포의 꼭지점(peak point)을 형광입자의 중심으로 선택하여 각각의 이미지에서 중심의 이동변위를 추출하였다.

3. 굽힘 스프링 상수의 추출

본 연구에서는 기울기 정보를 필요로 하지 않는 유전자 알고리즘 방법을 이용하여 실험결과로부터 굽힘 강성의 크기를 최적화하였고, 이로부터 스프링 상수의 크기를 구하였다. 유전자 알고리즘에서 최적화의 대상이 되는 유전자로는 굽힘 강성(bending stiffness, EI)의 크기를 선택하였고, $[40, 60] \times 10^{-19} [N \cdot m^2]$ 의 범위 내에서 유전자를 선택하였다. 50 개의 초기 유전자를 임의로 선택한 뒤, 선택된 유전자에 대해서 목적함수의 결과를 도출하였다. 본 연구에서 고려한 목적함수는 식 (3)과 같이, 선정된 유전자와 식(1), (2)의 결과로 얻어지는 이론적인 탄소나노튜브 프로브와 상대전극 사이의 간극크기 ($r_{simul}(V)$)와 형광측정을 통해 실험적으로 얻어지는 간극 크기($r_{exp}(V)$)의 차이를 이용하였다.

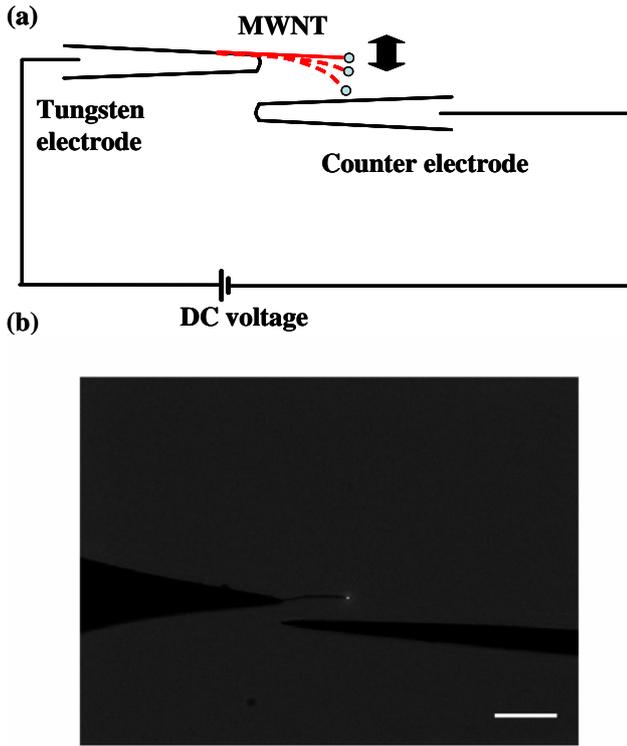


Fig.2 (a) Schematics of the experimental setup for electrostatic actuation of the nanotube (b) Optical microscope image of the CNT probe with the counter electrode positioned parallel to the nanotube. (scale bar : 10 μm)

$$\text{Objective function} = \sum_{i=1}^n (r_{\text{simul}}^i - r_{\text{exp}}^i)^2 \quad (3)$$

위 식에서 n은 전압을 달리하여 실험한 횟수이다. 그림 3은 최적화 결과로서, 세대가 지남에 따라 각 세대를 이루는 유전자들의 목적 함수 크기 값의 평균 값 (Average fitness value)이 최적화된 크기의 값(Best fitness value)으로 근접해 감을 보여준다. 이는 세대가 진행될수록 각 세대를 이루는 유전자가 우성의 것으로 진화됨을 의미한다. 최적화를 통하여 구해진 굽힘 강성(EI)의 값은 $42.74 \times 10^{-19} \text{ [N} \cdot \text{m}^2]$ 이다. 그림 3(b)는 최적화된 굽힘 강성을 이용하여 실제 실험결과와 이론적으로 계산된 결과를 비교하여 나타낸 그래프이다. 전자현미경 측정을 통하여 얻어진 탄소나노튜브의 길이와 위의 굽힘 강성 크기의 결과를 이용하여, 제작된 탄소나노튜브 프로브의 스프링상수(k)를 구해보면 다음과 같다.

$$k = \frac{3EI}{L^3} \cong 1.1 \text{ pN/nm} \quad (4)$$

위의 1.1 pN/nm의 스프링상수 크기는 생체 분자 대상으로 사용되고 있는 원자힘 현미경 캔틸레버의 스프링상수 크기 (6 pN/nm)보다 작은 값으로, 탄소나노튜브 프로브가 피코뉴턴(pN) 힘 측정에 유용하게 사용될 수 있음을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 피코뉴턴 크기의 생물학적 초미세력 검출을 위한 힘 센서로서 사용될 탄소나노튜브 프로브의 굽힘 스프링상수를 측정하였다. 정전기력에 의한 나노튜브의 굽힘 현상을 모델링하고 이를 실험적인 결과와 비교함으로써 실험적으로 굽힘 스프링상수를 추출하였다.

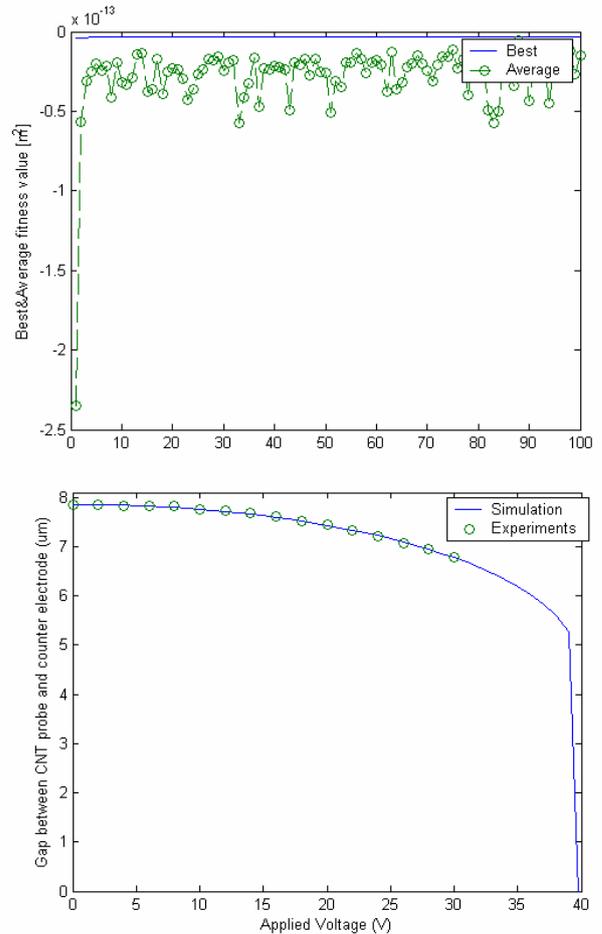


Fig. 3 Optimization result of bending stiffness using genetic algorithm: (a) Randomly selected initial genes and evaluation of the objective function after several generations and (b) comparison between optimization result and experimental results.

측정 결과로부터 탄소나노튜브 프로브는 1pN/nm의 스프링 상수 값을 가지며, 이 크기는 기존의 원자 힘 현미경의 최소 스프링 상수 크기 (6 pN/nm)보다 작은 값으로 탄소나노튜브 프로브가 피코 뉴턴 힘 측정에 유용하게 사용할 수 있음을 보여준다.

참고문헌

- Gutsmann T., Fantner G E., Kindt J H., Venturoni M., Danielsen S., Hansma P K., "Force Spectroscopy of Collagen Fibers to Investigate Their Mechanical Properties and Structural Organization", *Biophysical Journal*, **86**, 3186-3193, 2004
- Arai F., Nakajima M., Dong L., Fukuda T., "Pico-Newton Order Force Measurement Using a Calibrated Carbon Nanotube Probe by Electromechanical Resonance", *Proceeding of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Taipei, Taiwan, September 14-19, 2003
- Poncharal P., Wang Z L., Ugarte D., Heer W., "Electrostatic Deflection and Electrochemical Resonances of Carbon Nanotubes", *Science*, **283**, 1513-1516, 1999
- Dequesnes M., Rotkin S V., Aluru N R., "Calculation of pull-in voltages for carbon- nanotube - based nanoelectromechanical switches", *Nanotechnology*, **13**, 120-131, 2002
- 권순근, 박효준, 이형우, 박윤근, 김수현, "생물학적 초미세력 검출을 위한 탄소나노튜브 프로브의 제작 및 기계적 특성 검출", *한국정밀공학회지* **25권 제 5호**, 140-147, 2008