

생물학적 초미세력 검출을 위한 탄소나노튜브 프로브의 제작 및 기계적 특성 검출

Fabrication and mechanical properties of carbon nanotube probe for ultrasmall force measurement in biological application

*권순근, 박효준, #김수현, 꺾윤근¹

*S. G. Kwon, H. J. Park, #S. H. Kim (soohyun@kaist.ac.kr), Y. K. Kwak

¹ 한국과학기술원 기계항공시스템학부 기계공학전공

Key words : Carbon nanotube probe, Tip specific fluorescent loading, Electrostatic actuation, Mechanical properties

1. 서론

최근 생체 분자가 관여하는 생물학적 프로세스에 대한 관심의 증가와 함께, 급속도로 발전한 나노 기술, 물리학 기술들과의 융합을 통하여, 생체 분자를 단일 분자 수준에서 조작하며, 관련 물리량을 측정하는 연구가 활발히 진행 중이다.^{[1][2]} 기계적 조작 도구를 이용하여 조작하는 경우, 생체 분자 조작에 적합한 힘의 범위는 수 피코뉴턴 (pN)에서 수 나노뉴턴 (nN)에 이른다. 생체 분자 조작 시 가해지는 힘의 크기는 조작기의 스프링 상수와 미세 변위의 곱으로 구해지는데, 100pN이하의 초미세력을 부여하거나, 검출하기 위해서는 조작도구의 스프링 상수가 수 pN/nm의 크기를 가져야 한다. 생체 분자의 기계적 조작에 가장 많이 이용되어온 원자 힘 현미경 캔틸레버 (atomic force microscope cantilever)를 이용한 조작방법은 수십 pN/nm의 상대적으로 큰 스프링 상수로 인하여 100pN이하의 초미세력을 부가하거나, 검출하는데 어려움을 가지고 있다. 최근 단일 생체분자 대상 실험에 적합한 수 pN/nm의 스프링 상수를 가지는 원자 힘 현미경 캔틸레버가 개발되고 있으나^{[3][4]}, 균일한 사이즈를 가지는 소형의 캔틸레버를 대량으로 제작하는데 많은 시간과 수고가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 최근 각광받고 있는 나노 소재 중 하나인, 탄소나노튜브를 생체 분자 조작기로 사용하기 위하여 생체 분자 접합에 용이한 탄소나노튜브 프로브를 제작하고, 제작된 탄소나노튜브 프로브의 기계적 특성을 측정하였다. 이 방법은 생체 분자 조작기 제작을 위하여 기존의 Top-down 방식의 제작이 아닌, 나노소재를 이용한 Bottom-up 방식의 제작을 통하여, 기존의 원자 힘 현미경 캔틸레버의 힘 측정 분해능을 향상 시킬 수 있는 새로운 개념의 조작기 제작 방법이 된다.^[5]

2. 탄소나노튜브 프로브의 제작

생물학적 초미세력 검출이 가능한 측정용 도구로서 사용될 탄소나노튜브 프로브는 생체 시료와의 접근성이 용이해야 하며, 생체 시료와의 상호작용으로 인한 탄소나노튜브의 변위를 측정할 수 있는 측정 방법을 필요로 한다. 본 연구에서는, 특정 화학 물질로 기능화된 형광 물질을 탄소나노튜브 끝단에 접착하여 위의 두 가지 문제를 해결하였다. 사용된 탄소나노튜브는 화학기상증착법(Cheical Vapor Deposition method)으로 합성된 것으로 130nm의 평균 직경을 가진다. 준비된 탄소나노튜브 샘플로부터 기계적 조립 (manual assembly) 방법을 이용하여 텅스텐 탐침 위에 탄소나노튜브 프로브를 조립한다. 탄소나노튜브의 변위를 검출할 형광물질로는 Streptavidin conjugated Alexa fluor 488을 이용하였다. 형광물질의 주변에 위치한 Streptavidin은 대표적인 분자 접착제(molecular glue)로서 streptavidin-biotin 조합을 통하여 biotin conjugated single molecule과의 접착을 가능하게 한다. 초미세력 검출용 도구로서 사용될 탄소나노튜브의 고유의 기계적 특성을 유지하기 위해서, 나노튜브의 끝단에만 선택적으로 형광물질을 접착하였다.

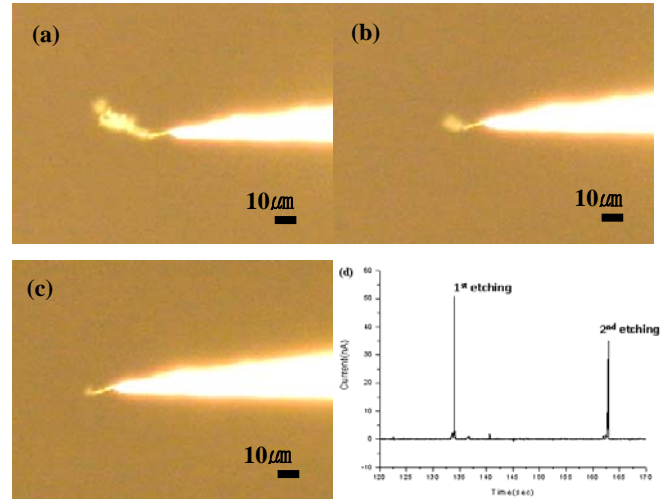


Fig. 1. Optical microscope image of CNT probe (a) before, (b) after 1st etching, (c) 2nd etching and (d) current profile during the etching.

형광물질의 접착방법으로는 끝단 기능화를 통한 화학적 결합(chemical bonding)방법을 이용하였다. 제작된 탄소나노튜브 프로브의 길이제어를 위하여 그림 1과 같이 수산화칼륨 수용액에서 전해에칭 과정을 수행하면, 담겨진 길이만큼 에칭에 의하여 잘려지게 되고, 남겨진 탄소나노튜브의 끝단에 카르복실기(-COOH)가 존재하게 된다. 형광물질 주변에 부착된 Streptavidin은 아미노기(amine group, NH₂)를 보유하고 있으므로, 카르복실기와 아미노기의 결합(COOH-NH₂)을 이용하여 형광물질을 나노튜브의 끝단에 선택적으로 접착시킬 수 있다. 그림 2는 탄소나노튜브의 끝단에 형광물질을 접착시킨 후의 모습을 보여주고 있다.

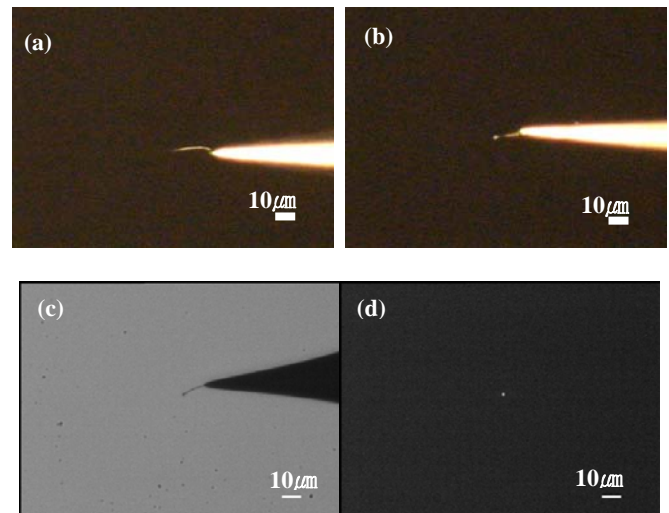


Fig. 2. Optical image of an etched CNT probe (a) before and (b)after the tip specific fluorescent loading. Epi-fluorescence image of the CNT probe having tip-specific loading (c)(d)

3. 탄소나노튜브 프로브의 기계적 특성 측정

제작된 탄소나노튜브 프로브의 기계적 특성 측정을 위하여 그림 3 과 같이 정전기력에 의한 탄소나노튜브 프로브의 변위를 측정하였다.^[6] 실험에서 사용한 탄소나노튜브 프로브는 12.5 μm(L)의 길이를 가지며, 상대전극과 초기 5 μm의 간극을 가진다. 탄소나노튜브 프로브와 상대 전극을 초기 간극(gap, r)하에서 평행하게 위치시킨 뒤, 직류 전압을 가하여 전압의 크기에 따른 탄소나노튜브의 변위 및 간극의 변화를 형광측정을 통하여 관찰한다. 양극 사이의 전압차 (V)에 대하여 정전기력에 의한 탄소나노튜브의 변위 및 그에 따른 간극의 변화의 지배방정식은 식 (1)과 같다.^{[7][8]}

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

$$EI \frac{d^4 r}{dx^4} = q_{elec}$$

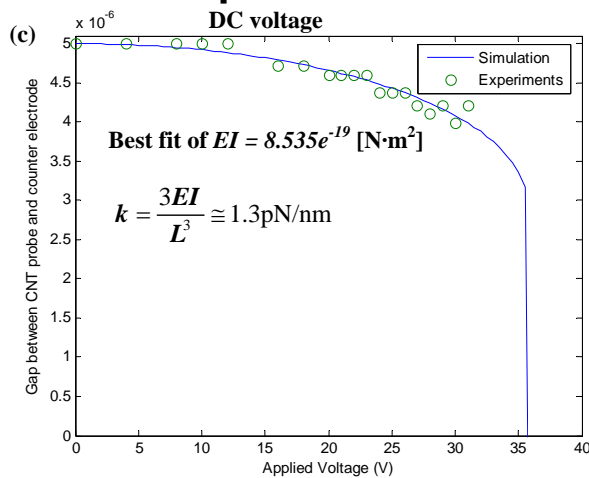
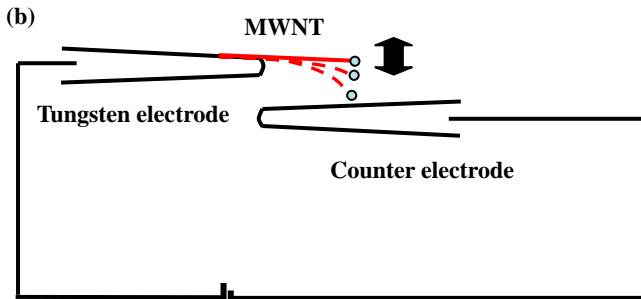
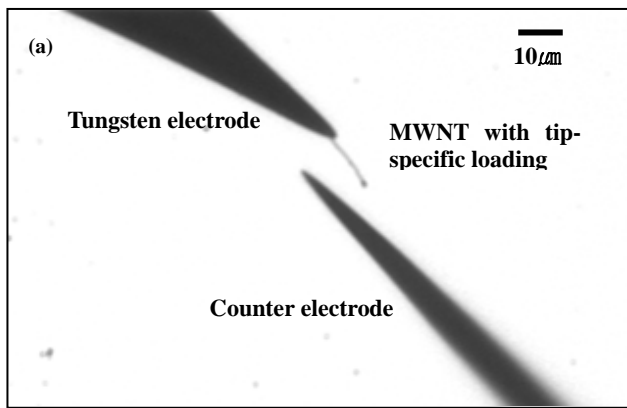


Fig. 3. (a) Optical microscope image of a MWNT to tungsten electrode with counter electrode positioned parallel to the nanotube (b) Schematic of the experimental setup for electrostatic actuation of the nanotube. (c) Plot of the gap between the nanotube and counter electrode according to the applied voltage.

식(1)의 모델링은 비선형방정식이므로, 형광 측정으로 얻어

진 실험결과로부터 최적화된 굽힘강성(EI)의 크기를 구하기 위해서, 유전알고리즘의 방법을 사용하였다. 측정된 실험결과로부터 그림 3(c)에서 알 수 있듯이, EI = 8.535⁻¹⁹ [N·m²]의 굽힘 강성 최적값을 얻을 수 있었다. 이 값으로부터 제작된 탄소나노튜브 프로브의 스프링 상수값은 1.3pN/nm의 크기로 구해진다. 이 크기는 생체 분자를 조작하기 위해 제작된 원자 힘 현미경 캔틸레버의 스프링상수 크기(k = 6pN/nm)보다 작은 값으로, 탄소나노튜브 프로브를 생체 분자 대상 실험의 조작 및 검출기기로 사용할 때, 측정 힘 분해능을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 100pN 이하의 생물학적 초미세력의 검출 및 부여를 위한 기계적 조작기로서 탄소나노튜브 프로브를 제안하였다. 생체 분자와의 접근성이 가능하도록 생체 분자와 결합하게 될 탄소나노튜브 끝단에 형광물질 (Streptavidin conjugated Alexa fluor 488)을 부착하였다. 탄소나노튜브 프로브의 끝단의 전해에칭을 통하여 끝단의 기능화 (-COOH 기 생성)를 가능하게 하였고, Streptavidin 의 표면에 위치한 아미노기(amine group)와의 결합을 이용하여 성공적으로 형광물질을 부착하였다. 형광물질의 형광측정을 이용하여 정전기력 하에서의 탄소나노튜브의 거동을 분석하고 이로부터, 탄소나노튜브의 기계적 특성 (EI 및 k)을 추출하였다. 얻어진 탄소나노튜브 프로브의 스프링 상수는 원자 힘 현미경 캔틸레버의 그것보다 작은 크기를 가지게 되므로, 향후 생물학적 초미세력 검출에 있어서 향상된 분해능을 보일 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 2007년도 2 단계 두뇌한국(BK)21 사업에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

1. Thomas Gutschmann, Georg E. Fantner, Johannes H. Kindt, Manuela Venturoni, Signe Danielsen and Paul K. Hansma, "Force Spectroscopy of Collagen Fibers to Investigate Their Mechanical Properties and Structural Organization", Biophysical Journal, **86**, 3186-3193, 2004
2. J. M. Fernandez, H. Li, "Force-Clamp Spectroscopy Monitors the Folding Trajectory of a Single Protein", Science, Vol. 303, pp.1674-1678, 2004
3. M. B. Viani, T. E. Schaffter, A. Chand, M. Rief, H. E. Gaub, P. K. Hansma, "Small cantilevers for force spectroscopy of single molecules", Journal of Applied Physics, Vol. 86, No. 4, pp. 2258- 2262, 1999
4. <http://probe.olympus-global.com/en/en/outlineproductE.html>
5. Fumihito Arai, Masahiro Nakajima, Lixin Dong and Toshio Fukuda, "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
6. P. Poncharal, Z. L. Wang, D. Ugarte, W. de Heer, "Electrostatic Deflection and Electrochemical Resonances of Carbon Nanotubes", Science, Vol. 283, No. 5, pp. 1513-1516, 1999
7. C. H. Ke, N. Pugno, B. Peng, H. D. Espinosa, "Experimental and modeling of carbon nanotube-based NEMS devices", Journal of the Mechanics and Physics of solids, **53**, 1314-1333, 2005
8. Marc Dequesnes, S. V. Rotkin and N. R. Aluru, "Calculation of pull-in voltages for carbon-nanotube-based nanoelectromechanical switches", Nanotechnology, **13**, 120-131, 2002