

마이크로 구동기를 이용한 탄소나노튜브 어레이의 접촉 면적에 따른 점착력 측정

Adhesion between Carbon Nanotube Arrays with Different Contact Area Measured Using Microactuator

최정욱*, 김종백†

Jungwook Choi and Jongbaeg Kim

(2014년 3월 25일 접수; 2014년 3월 26일 심사완료; 2014년 3월 27일 게재확정)

Abstract

Adhesion between carbon nanotube (CNT) arrays is measured and characterized for number of different contact areas. The CNT arrays are directly grown on an electrostatic microactuator, and they make contact with each other during the growth process. The pull-out force is precisely applied by the microactuator while the contact status is identified by measuring electrical resistance between the CNT arrays. We have designed different contact areas of 1000, 6000, and 8500 μm^2 between the CNT arrays, and the corresponding adhesion increases from 0.9 to 3.7 μN as the contact area increases.

Key Words : Carbon Nanotube Array, Adhesion, Contact Area, Microactuator

기호설명

F_{Adh} : Adhesion force
 F_E : Electrostatic force
 F_C : Contact force
 ϵ : Free space permittivity
 t : Thickness of comb finger
 n : Number of comb pairs
 V : Pull-out voltage
 g : Gap between comb fingers
 k : Stiffness of spring
 d : Displacement of shuttle after growth of CNTs

1. 서론

탄소나노튜브 어레이 (Carbon nanotube array; CNT array)는 높은 기계적 강성과 탄성, 고종횡비, 높은

단위 면적 당 개수와 같은 특징으로 인하여 다른 표면과 강한 van der Waals interaction 및 점착 특성을 보인다 [1]. 이러한 특성을 이용하여 탄소나노튜브 어레이를 건식 점착제로 활용한 연구가 보고되었고, 이 때의 점착력은 수직 방향으로 29 N/cm^2 , 전단 방향으로 100 N/cm^2 에 이른다 [2,3]. 또한 원자력 현미경을 이용하여 단일 탄소나노튜브와 표면 처리된 탐침 간의 점착력 측정에 대한 연구 결과가 보고되었고 [4], 탄소나노튜브를 SiO_2 표면에서 미끄러져 움직이게 하기 위해서는 약 7-8 nN의 인장력이 탄소나노튜브에 가해져야 한다는 것이 보고된 바 있다 [5].

하지만 탄소나노튜브와 다른 표면과의 점착 특성에 대한 활발한 연구에 비하여, 탄소나노튜브 간 점착에 대한 연구는 보고된 바가 많지 않다. 탄소나노튜브 간 접촉은 나노 트위저 및 나노, 마이크로 기전 스위치와 같은 다양한 분야에 적용이 가능하다 [6-8]. 또한 탄소나노튜브 어레이 간 기계, 전기적 접촉은 기존의 금속을 비롯한

† School of Mechanical Engineering, Yonsei University
 E-mail : kimjb@yonsei.ac.kr
 TEL : (02)2123-2812

* School of Mechanical Engineering, Yonsei University

다른 고체 간 접촉에 비하여 높은 신뢰성, 고 전류 밀도 전달과 같은 우수한 특성을 가지고

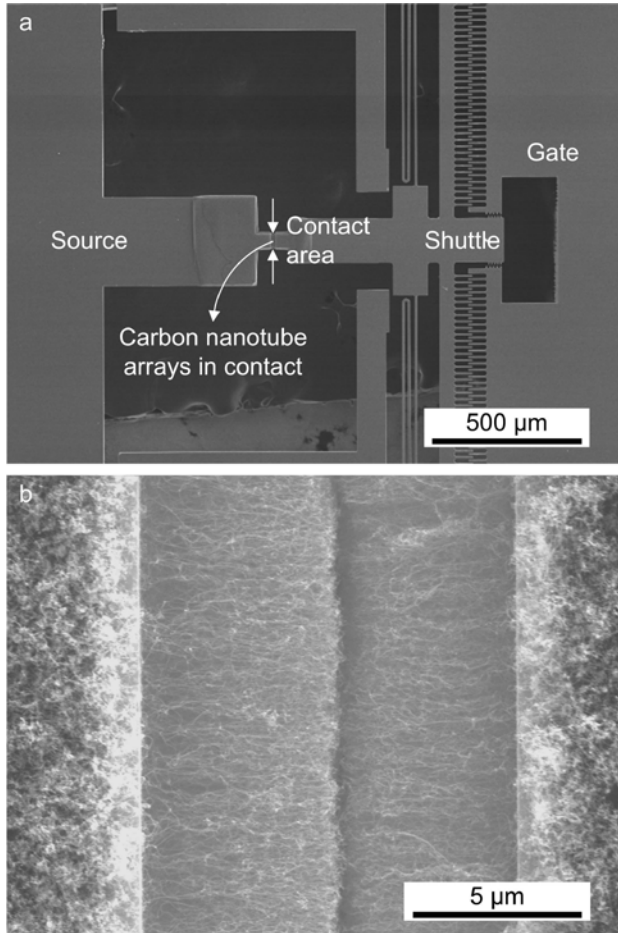


Fig. 1 (a) Scanning electron microscope (SEM) image of CNT array-integrated microactuator. When a voltage is applied on a gate electrode, a shuttle is actuated to pull-out the contact between CNTs. The status of the contact can be identified by measuring the resistance between source and shuttle. (b) Close-up SEM image of the CNT arrays in contact.

있음이 보고되었다 [9]. 이러한 탄소나노튜브 간 접촉의 점착력은 전체 소자의 성능과 수명을 결정지을 수 있는 중요한 요소이며, 향후 탄소나노튜브가 접촉재료로 활용되어 반복적인 접촉이 요구되는 소자를 구현함에 있어 주요 고려사항이 될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 탄소나노튜브 어레이를 마이크로 구동기에 통합하고, 마이크로 구동기를 이용하여 탄소나노튜브 간 점착력을 측정하였다. 이 때 탄소나노튜브가 합성되어 접촉을 이루고 있는 면적을 다르게 설계하여, 접촉 면적에 따른

탄소나노튜브 간 점착 특성을 분석하였다. 마이크로 구동기는 정전기력으로 구동되며, 이때의 힘은 μN 이하의 정밀한 제어가 가능하다.

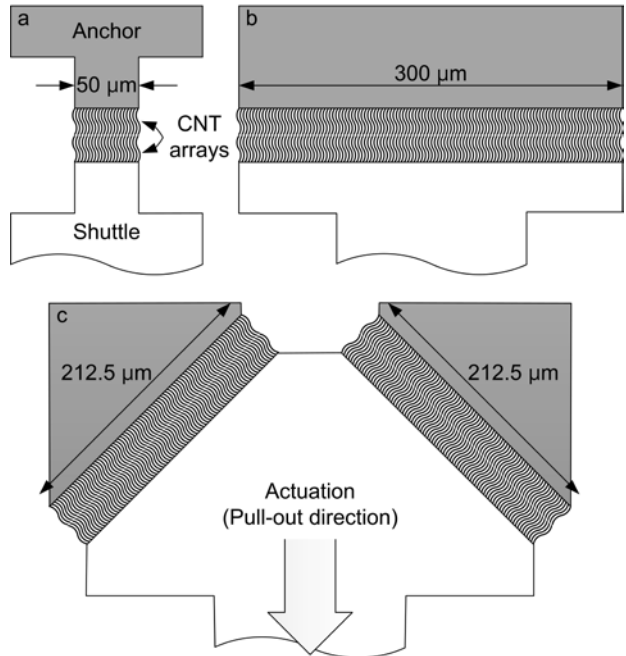


Fig. 2 Schematic of contact between the CNT arrays. Three different contact areas of (a) 1000 (b) 6000 (c) 8500 μm^2 are designed to investigate the effect of contact area on the adhesion between the CNTs.

마이크로 구동기에 인가되는 전압을 점차 증가시킴에 따라 탄소나노튜브 간 접촉을 분리하려는 힘이 증가되게 되며, 접촉이 분리되는 시점의 힘을 측정함으로써 탄소나노튜브 간 점착력을 얻을 수 있다. 또한 마이크로 구동기를 이용한 점착 특성 분석은 다양한 환경에서 측정이 가능하고, 반복적인 측정이 쉽고 간편하다는 장점이 있다. 탄소나노튜브 어레이 간 접촉 면적이 1000, 6000, 8500 μm^2 로 증가됨에 따라서 점착력이 0.9, 2.3, 3.7 μN 으로 증가함을 실험적으로 확인하였다.

2. 설계 및 제작 공정

2.1 마이크로 구동기의 설계 및 제작 공정

마이크로 구동기는 silicon-on-insulator (SOI) 웨이퍼로부터 제작되었다 [9]. SOI 웨이퍼의 디바이스층 두께는 20 μm , 매몰 산화층의 두께는 2 μm , 기판의 두께는 450 μm 이다. 먼저 1

μm 두께의 실리콘 산화막을 형성한 후, 웨이퍼의 앞, 뒷면에 포토 리소그래피, 반응성 이온 식각, 고종횡비 건식 식각 공정을 통하여 실리콘 마이크로 구조물을 제작한다.

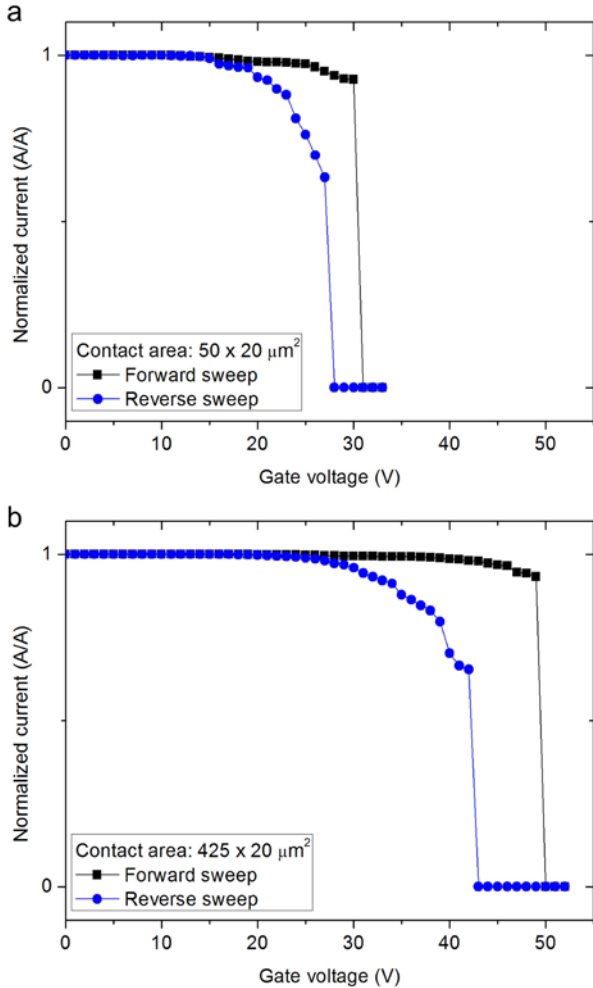


Fig. 3 Hysteretic current-voltage curves for the contact area of (a) 1000 and (b) 8500 μm².

그 후 piranha cleaning 으로 남은 포토 레지스트를 제거하고, HF 용액으로 산화 실리콘 층을 식각하여 comb-drive 마이크로 구동기의 제작을 완료한다. 그림 1(a)는 제작이 완료된 마이크로 구동기의 주사전자현미경 사진이다.

2.2 탄소나노튜브 어레이의 합성 공정

탄소나노튜브 합성을 위한 5 nm 두께의 철 촉매는 웨도우 마스크를 통하여 source 전극과 shuttle 사이에만 증착한다. 그 후 700 도의 온도와 2 Torr 의 압력에서 C₂H₂ 를 15 분 간 흘려주며 탄소나노튜브를 합성한다. 탄소나노튜브는 합성 과정에서 길이가 자가 조절되며 source 와

shuttle 의 중간 지점에서 기계, 전기적 접촉을 이루게 된다 [10]. 동시에 탄소나노튜브의 합성 시 발생하는 힘으로 인하여 shuttle 에 연결된 스프링이 변형하게 되고, 이로 인한 복원력으로

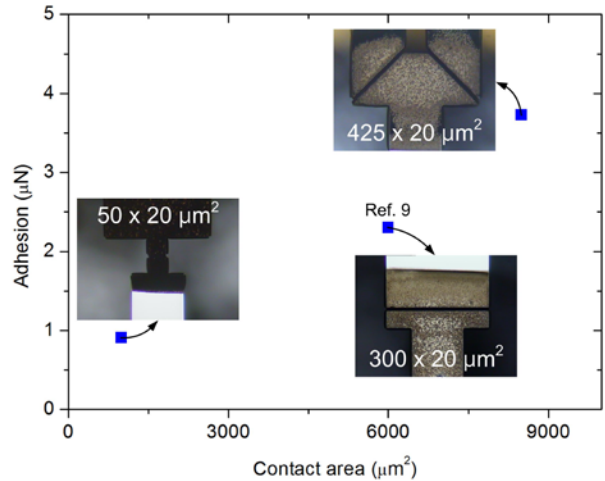


Fig. 4 Increase of the contact area increases the adhesion between the CNT arrays.

인해 탄소나노튜브 간 접촉은 preload (접촉력)를 받게 된다 [10]. 그림 1(b)는 마주보고 있는 전극의 사이에서 합성되어 접촉을 이루고 있는 탄소나노튜브 어레이를 보여준다.

3. 실험 결과 및 토의

그림 2 는 본 연구에서 탄소나노튜브 어레이 간 접촉 면적을 다르게 설계한 3 가지 경우에 대한 top view 모식도이다. 실리콘 디바이스층의 두께는 모두 20 μm 로 동일하며, 접촉면의 너비는 50, 300, 425 μm 로 디자인하였다.

탄소나노튜브 어레이 간 접촉력을 측정하기 위하여, gate 전극에 인가되는 전압을 증가시키며 source 와 shuttle 사이의 전류를 실시간으로 측정하였다. 그림 3 에서와 같이 전류-전압 그래프는 hysteresis 를 보이며, 이는 탄소나노튜브 간 접착력이 존재하기 때문이다. 또한 접촉이 완전히 분리되는 시점의 pull-out 전압은 접촉면의 크기가 1000 μm² 에서 8500 μm² 로 증가될 때 31 V 에서 50 V 로 높아짐을 알 수 있다.

탄소나노튜브 간의 접촉은 마이크로 구동기의 정전기력이 접촉력과 접착력의 합보다 커졌을 때만 분리될 수 있다. 즉, $F_{Adh} = F_E - F_C$ 의 관계로부터 접착력을 얻을 수 있으며, 이 때

정전기력은 $F_E = \epsilon t n V / 2g$ 로 정의되고, 접촉력은 $F_C = kd$ 로 정의된다. 스프링 상수는 1.14 N/m 임을 실험적으로 확인하였으며 [9], 탄소나노튜브 합성 후 shuttle의 변위는 접촉 면적이 $1000 \mu\text{m}^2$ 인 경우

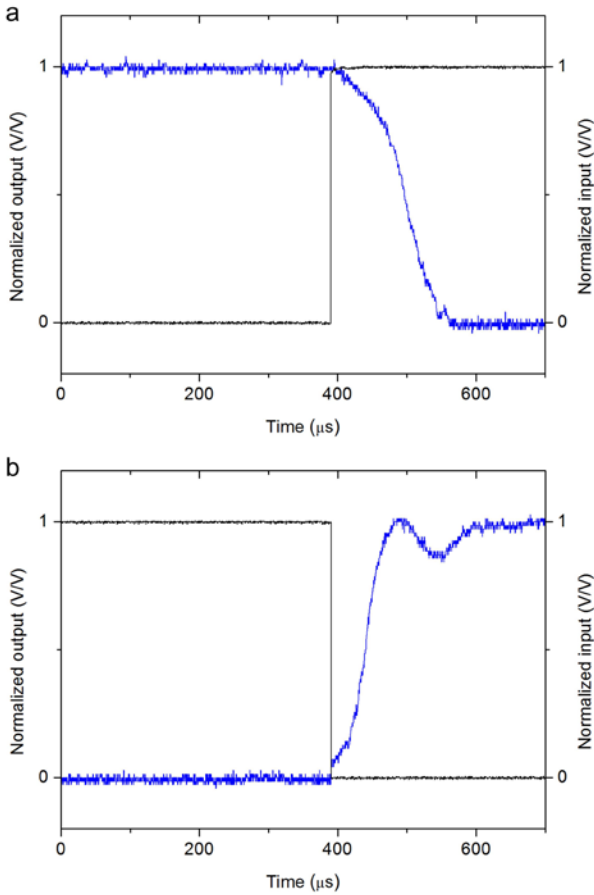


Fig. 5 Transient responses of the contact are presented when the contact is turned (a) off and (b) on.

$2 \mu\text{m}$, $8500 \mu\text{m}^2$ 경우 $4.5 \mu\text{m}$ 이었다. 이로부터 얻어진 탄소나노튜브 간 점착력은 그림 4 와 같이 접촉 면적이 $1000, 6000, 8500 \mu\text{m}^2$ 로 증가됨에 따라 $0.9, 2.3$ [9], $3.7 \mu\text{N}$ 으로 증가하게 된다. 이는 접촉을 이루고 있는 탄소나노튜브의 개수가 늘어나기 때문이며, 단위 면적당 더 높은 밀도의 탄소나노튜브를 합성하면 점착력은 더 커질 것이다. 또한 이 값은 기존에 보고된 탄소나노튜브 어레이와 유리 표면과의 점착력보다 10^2-10^3 배 낮은 값이다 [2,3]. 기존의 연구는 탄소나노튜브가 다른 표면과 선접촉을 이루고 있는 반면, 본 연구의 마주보고 있는 탄소나노튜브는 서로의 맞물림 없이 점접촉을 이루고 있기 때문에 더 낮은 점착력을 보이게 된다.

접촉의 과도 응답을 알아보기 위하여 외부 저항을 source 전극과 shuttle 에 직렬로 연결하고, 외부 저항의 전압 강하를 실시간으로 측정하여 접촉이 떨어질 때와 이루어 질 때의 거동을 분석하였다. 그림 5(a)와 같이 탄소나노튜브 간의 접촉은 점진적으로 떨어지게 됨을 알 수 있으며, 이는 각각 접촉을 이루고 있는 탄소나노튜브의 길이가 다르기 때문이다. 또한 그림 5(b)에서 나타나는 것처럼 접촉이 이루어질 때는 일반적인 underdamped response 를 보였다. 접촉이 이루어져 안정화 될 때까지는 $214.4 \mu\text{s}$, 접촉이 완전히 떨어질 때까지는 $171.8 \mu\text{s}$ 의 응답 시간을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 마이크로 구동기에 직접 합성되어 통합된 탄소나노튜브 어레이 간 접촉의 점착력을 측정하였다. 마이크로 구동기를 이용하여 탄소나노튜브 간 접촉을 분리하기 위한 힘을 인가하고, 동시에 접촉의 상태를 저항의 변화로 측정하였다. 또한 탄소나노튜브 간 접촉을 이루고 있는 면적에 넓어짐에 따라 점착력도 증가함을 실험적으로 확인하였다. 본 실험 결과는 탄소나노튜브를 기반으로 안정적인 기계, 전기적 접촉을 구현하고자 하는 다양한 나노, 마이크로 기전 소자에 적용될 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 2014 년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업 (NRF-2012R1A1A2043 661)의 지원을 받아 수행되었음.

REFERENCES

- [1] Luciano F. Boesel, Christian Greiner, Eduard Arzt, and Aranzazu del Campo, 2010, "Gecko-Inspired Surfaces: A Path to Strong and Reversible Dry Adhesives", *Advanced Materials*, Vol. 22, pp. 2125–2137.
- [2] Liangti Qu and Liming Dai, 2007, "Gecko-Foot-Mimetic Aligned Single-Walled Carbon Nanotube Dry Adhesives with Unique Electrical and Thermal Properties", *Advanced Materials*, Vol. 19, pp. 3844–3849.

- [3] Liangti Qu, Liming Dai, Morley Stone, Zhenhai Xia, and Zhong Lin Wang, 2008, “Carbon Nanotube Arrays with Strong Shear Binding-On and Easy Normal Lifting-Off”, *Science*, Vol. 322, pp. 238–242.
- [4] Mark A. Poggi, Lawrence A. Bottomley, and Peter T. Lillehei, 2004, “Measuring the Adhesion Forces between Alkanethiol-Modified AFM Cantilevers and Single Walled Carbon Nanotubes”, Vol. 4, No. 1, pp. 61–64.
- [5] Jed D. Whittaker, Ethan D. Minot, David M. Tanenbaum, Paul L. McEuen, and Robert C. Davis, 2006, “Measurement of the Adhesion Force between Carbon Nanotubes and a Silicon Dioxide Substrate”, Vol. 6, No. 5, pp. 953–957.
- [6] Philip Kim and Charles M. Lieber, 1999, “Nanotube Nanotweezers”, *Science*, Vol. 286, pp. 2148–2150.
- [7] Thomas Rueckes, Kyounggha Kim, Ernesto Joselevich, Greg Y. Tseng, Chin-Li Cheung, et al., 2000, “Carbon Nanotube-Based Nonvolatile Random Access Memory for Molecular Computing”, *Science*, Vol. 289, pp. 94–97.
- [8] Yuhei Hayamizu, Takeo Yamada, Kohei Mizuno, Robert C. Davis, Don N. Futaba, et al., 2008, “Integrated Three-dimensional Microelectromechanical Devices from Processable Carbon Nanotube Wafers”, *Nature Nanotechnology*, Vol. 3, pp. 289–294.
- [9] Jungwook Choi, Jae-Ik Lee, Youngkee Eun, Min-Ook Kim, and Jongbaeg Kim, 2011, “Aligned Carbon Nanotube Arrays for Degradation-Resistant, Intimate Contact in Micromechanical Devices”, *Advanced Materials*, Vol. 23, pp. 2231–2236.
- [10] Jungwook Choi, Soonjae Pyo, Dae-Hyun Baek, Jae-Ik Lee, and Jongbaeg Kim, 2014, “Thickness-, Alignment- and Defect-tunable Growth of Carbon Nanotube Arrays Using Designed Mechanical Loads”, *Carbon*, Vol. 66, pp. 126–133.