

탄소나노튜브 프로브 제작을 위한 전기적 특성 검출 방법 Electrical Detection for Fabrication of Carbon Nanotube Probes

임동현¹, *이종현¹, 권순근¹, 곽윤근¹, #김수현¹

D. H. Lim¹, *J. H. Lee¹, S. G. Kwon¹, Y. K. Kwak¹, #S. H. Kim(soohyun@kaist.ac.kr)¹

¹ 한국과학기술원 기계항공시스템학부 기계공학전공

Key words : Carbon Nanotube Probe, Dielectrophoresis, Electrical detection

1. 서론

탄소나노튜브는 높은 종횡비를 갖는 기하학적 형상과 뛰어난 기계적 강도 및 탄성능력, 전계방출 특성을 갖고 있다. 이러한 우수한 재료적 특성으로 인해 탄소나노튜브는 고분해능 AFM 용 탐침^[1], 전자방출소자^[2] 등으로 응용되고 있다. 또한 최근에는 생체시료 탐침, 극미량의 질량을 검출하기 위한 센서, 극미소의 힘을 측정하기 위한 도구로 사용하기 위한 시도가 있다.

이러한 응용을 위해서는 신뢰성 있는 탄소나노튜브 프로브의 제작 방법이 확보되어야 한다. 탄소나노튜브 프로브 제작을 위한 방법으로는 화학기상증착법 (Chemical Vapor Deposition), 기계적 조립^[3], 유전영동 (Dielectrophoresis)^[1]을 이용한 방법이 소개되었다. 특히 유전영동을 이용한 방법은 제작 장치가 간단하고 조립시간이 빠른 장점을 가진다. 하지만 조립된 탄소나노튜브의 길이, 개수, 즉 그 형상을 조절할 수 없다는 점과 30%가량의 낮은 제작 수율이 문제점으로 인식되고 있다.

본 논문에서는 유전영동을 이용한 탄소나노튜브 프로브의 조립과 동시에 조립과정을 전기적으로 모니터링 하는 방법을 소개한다. 또한 원하는 형상의 탄소나노튜브 프로브 제작을 위해 용액 주입 조절을 통한 조립시간 제어방법을 제안한다.

2. 탄소나노튜브 제작에서의 유전영동

유전영동은 불균일한 전기장에 의해 입자에 가해지는 힘이다. 이는 전극의 형상 및 용액과 입자의 전기적 특성과 입자의 형상인자 영향을 받으며 또한 인가된 전압의 크기 및 주파수에 영향을 받는다.

두 전극 사이에 형성된 불균일한 전기장 속에 탄소나노튜브 용액을 위치시키면 탄소나노튜브가 전기장 구배에 비례하는 힘을 받아 전기장의 크기가 가장 큰 곳으로 조립이 이루어진다.

3. 전기적 측정을 이용한 탄소나노튜브 제작

그림 1은 현재 알려진 유전영동을 이용한 탄소나노튜브 제작 방법과 본 연구에서 제안된 방법을 비교한 공정 순서도이다. 기존 방법과 달리 유전영동을 이용한 조립과 동시에 전기적 측정을 이용함으로써 조립 상태를 공정 중에 예측이 가능했다. 또한 측정된 전기적 신호는 조립시간을 조절하기 위한 피드백 신호로 사용될 수 있다. 측정된 신호에 따라 마이크로 피펫에 매달려 있는 용액 방울(droplet)을 조작함으로써 조립시간을 효과적으로 제어 할 수 있었다.

실험에 사용된 탄소나노튜브는 CVD로 합성된 직경 100nm, 길이 5~10 μ m의 다중벽 탄소나노튜브(multi-walled carbon nanotube)이며, 1 μ g/ml의 농도를 갖는 탄소나노튜브/에탄올 용액을 사용하였다. 탄소나노튜브가 조립될 전극으로 끝단 곡률반경이 200~300nm인 텅스텐 탐침을 사용하였다. 탄소나노튜브 프로브 제작을 위한 실험장치 구성은 그림 2과 같다. 그림의 회로는 유전영동을 일으키기 위한 DEP 신호 (DEP signal)와 탄소나노튜브 조립을 확인하기 위한 프로브 신호 (Probe signal)로 구성된다. DEP 신호는 5MHz, 0.5Vrms/ μ m를 사용하였고, 프로브 신호로는 1 μ Hz,

10mVpp+200mV DC 오프셋을 사용하였다. DC 전류를 측정하기 위해 저역 필터 구성을 위한 커패시터를 연결하였다. 탄소나노튜브가 부착될 전극과 상대전극 사이의 길이는 실험에 사용된 탄소나노튜브의 최소 길이인 5 μ m로 설정하였다.

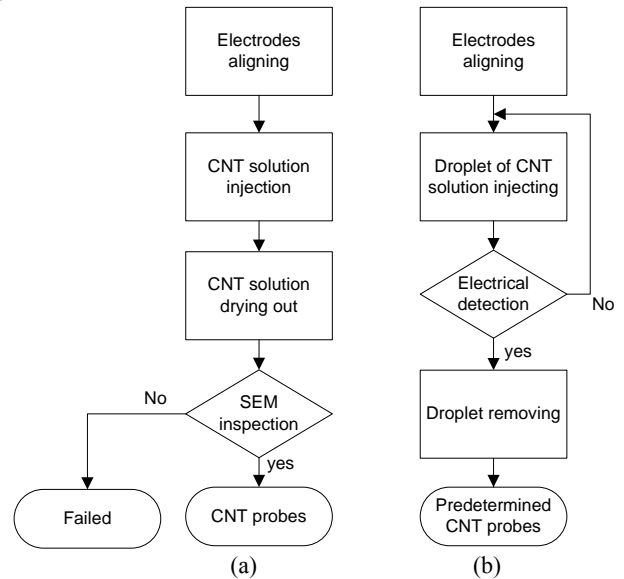


Fig. 1 Comparison between previous process and proposed process for dielectrophoretic assembly of CNT probes

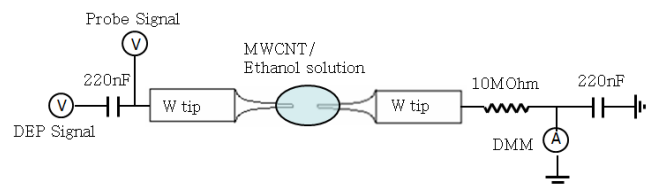


Fig. 2 Electrical circuit for detecting the Carbon Nanotube bridge across the gap

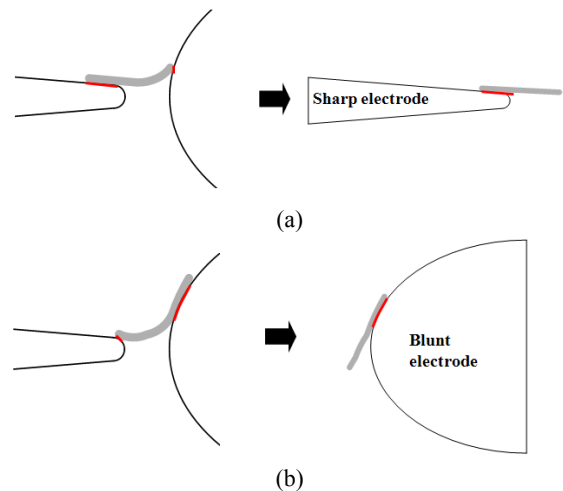


Fig. 3 Attaching side according to contact area (a) sharp electrode, (b) blunt electrode

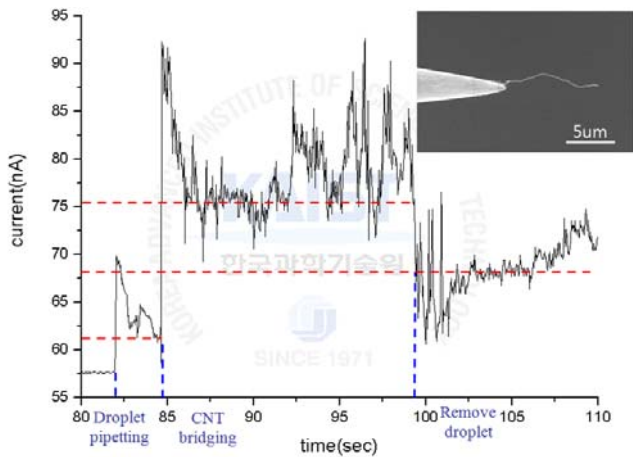


Fig. 4 Current profile of Carbon Nanotube bridge during the fabrication

탄소나노튜브가 부착될 전극과 상대전극 사이에 탄소나노튜브/에탄올 용액 20ul 를 마이크로피펫을 이용하여 주입하고, 탄소나노튜브의 조립이 전기적 신호를 통해 확인되면 용액을 제거하였다. 용액을 제거한 후에는 피에조 스테이지를 이용하여 상대전극으로부터 탄소나노튜브를 기계적으로 조립을 파괴하여 프로브를 얻는 방법을 사용하였다.

조립 후 탄소나노튜브의 연결이 유지가 되는 것은 반데르발스 힘과 미소 줄열에 의한 강화된 부착력에 의한 것이다. 따라서 간극의 반대방향으로 한쪽 끝을 당길 때 부착이 유지되는 위치는 조립 시 각 팁과 탄소나노튜브 사이의 접촉 면적의 차이에 의해 결정이 된다. 또한 탄소나노튜브는 유전영동에 의해 전기장 방향으로 정렬되고 강한 전기장 구배를 가지는 방향으로의 힘을 받게 된다. 따라서 본 실험에서는 두 전극의 형상에 의해 결정된 간극의 형상과 전기장 구배의 차이에 의해 용액 속 탄소나노튜브는 그림 3 (a)와 같은 경우로 부착 될 것이라고 예상하였다.

4. 실험결과

그림 4 는 전자현미경 이미지와 같이 단일 다중벽 탄소나노튜브가 조립되었을 때의 전기적 신호를 나타낸다. 측정된 전류 신호는 공정에 따른 순차적인 결과를 나타내었다. 용액 주입 전 낮은 노이즈 레벨 값을 가지던 전류값이 용액이 주입되고 나면 용액의 영향으로 인하여, 초기 전류신호와 구별되는 전류 신호를 얻었다. 이는 일시적인 전기분해 현상과 에탄올/탄소나노튜브 용액의 미소한 전도성에 의한 결과로 판단된다.

탄소 나노튜브의 조립으로 인하여 폐회로에 흐르는 전류의 값이 변하는 것을 확인할 수 있었다. 용액의 주입으로 인한 신호와 구분되는 일정한 값을 가지는 전류신호를 관찰할 수 있었다. 단일 다중벽 탄소나노튜브가 조립되었을 때 75nA 의 전류가 측정이 되었다. 2.5MΩ가량의 저항값을 나타내는 것으로 알려진 탄소나노튜브의 전기적 특성과 큰 차이가 난다. 이는 접촉저항이 매우 크게 작용하였음을 알 수 있다. 또한 조립 후에 나타난 전류값은 불안정성을 띠는데 이는 전극과 탄소나노튜브간의 접촉의 불안정성에 기인한 것이다. 따라서 신뢰성 있게 조립된 탄소나노튜브의 개수를 예측하기 위해서는 접촉저항이 고려되어야 한다는 것을 알 수 있다.

전기적 측정에 의해 감지된 탄소나노튜브의 조립단계에서 하나의 탐침을 간극과 반대방향으로 이동시킨 결과 날카로운 팁에 부착이 유지됨을 반복 실험을 통해 확인하였다. 이는 앞서 전극의 형상차이에 의해 예상했던 결과와 일치하는 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 신뢰성 있는 탄소나노튜브 프로브 제작을 위한 전기적 측정 방법을 제안하였다. 또한 측정된 신호에 따른 조립시간을 효과적으로 제어할 수 있는 용액의 조작 방법을 소개하였다. 하지만 전기적 신호에 따라 조립된 상태를 정확하게 예측하기 위해서는 전극과 탄소나노튜브 사이의 접촉 불안정성이 극복되어야 한다.

본 논문에서 제안한 탄소나노튜브 프로브 제작 공정은 탄소나노튜브 프로브의 형상을 제어하기 위한 방법으로 사용될 것으로 기대한다. 제어된 형상의 나노프로브 제작방법은 다양한 응용분야에 적합한 프로브로 제작되고 이를 위한 자동화 공정으로 적용될 수 있다. 특히 길이 및 지름 등 형상이 제어된 탄소나노튜브-AFM 팁은 신뢰성있는 표면측정이 가능 하도록 할 것이다.

후기

본 연구는 2008 년도 2 단계 두뇌한국(BK)21 사업에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

1. Hyung Woo Lee, Soo Hyun Kim, Chang Soo Han, Yoon Keun Kwak, "Nanoscale fabrication of a single multiwalled carbon nanotube attached atomic force microscope tip using an electric field", *Review of Scientific Instruments*, Vol.76, 046108, 2005.
2. Seung Il Jung, Jai Seong Choi, Hyung Cheoul Shim, and Soohyun Kim, Sung Ho Jo and Cheol Jin Lee, "Fabrication of probe-typed carbon nanotube point emitters", *APPLIED PHYSICS LETTERS* 89, 233108, 2006.
3. Niels de Jonge, Yann Lamy and Monja Kaiser, "Controlled Mounting of Individual Multiwalled Carbon Nanotubes on Support Tips", *Nanoletters*, Vol.3, No.12, pp. 1621-1624, 2003.
4. J. E. Kim, J. K. Park and C. S. Han, "Use of Dielectrophoresis in the fabrication of an atomic force microscope tip with a carbon nanotube: experimental investigation", *Nanotechnology*, vol.17, pp.2937-2941, 2006.