

## 스프레이코팅 방식으로 제작된 단일벽 탄소나노튜브막 스트레인 센서

### Spray-coated single-wall carbon nanotube film strain sensor

박 찬 원\*  
Park, Chan-Won

---

#### Abstract

We demonstrated the viability of fully microfabricating SWCNT(single-wall carbon nanotube) film strain sensors for force and weight sensing. Our spray-deposited SWCNT film strain sensors showed good linearity over a range from 0 to 400 microstrain, and much higher sensitivity compared to commercial metal foil-type gauges. The number of grids and the thickness of the SWCNT film were found to have a significant effect on the strain sensing properties of the SWCNT film gauges. A strain sensing method for the CNT-based strain gauges was also investigated using a binocular type beam load cells. Preliminary results indicate that the microfabrication method shown here is promising for developing a commercial strain gauge using a spray-coated SWCNT thin film. In the near future, various studies will be performed to further enhance the properties of the spray-coated SWCNT film strain sensors.

키워드 : 카본나노튜브, 단일벽 카본나노튜브, 스트레인게이지  
Keywords : carbon nanotubes, single-wall CNT, Strain Gauge

---

#### 1. 서론

힘에 의한 변형을 측정하는 스트레인 센서는 힘과 압력측정에 오랫동안 사용되어 왔으며 최근에는 바이오메디칼분야에서도 많이 사용되고 있다. 스트레인 센서중 금속박막게이지형의 스트레인게이지가 정밀하고 비교적 저렴한 장점으로 상업적인 용도로 힘과 하중의 측정에 가장 대표적으로 사용되어 왔다. 그러나 금속박막형 스트레인게이지는 센서 엘레먼트 자체의 저항이 작고 게이지율이 적으며 온도드리프트 특성등의 단점과 제조공정의 어려움등의 문제점들이 있다. 이러한 것들을 해결하기 위해 새로운 물질로서 탄소나노튜브(carbon nanotubes : CNT )에 관한 연구가 진행되어 왔

다. CNT는 우수한 전자-역학적인 특성으로 새로운 스트레인 센서 물질로 활발히 연구되고 있는 중이다[1]~[9].

최근 CNT를 기본으로 하는 스트레인 센서는 CNT단일벽, 폴리머/CNT 합성물 또는 CNT 박막의 형태로 만들어 지고 있다. 단일벽 CNT(single-walled CNTs : SWCNTs)와 다중벽 CNT(multi-walled CNTs : MWCNTs) 모두 스트레인 센서로 활용할수 있는 수준의 우수한 피에조저항 효과를 보이고 있다[1][8]. 금속박막게이지의 게이지율이 2 정도인 것을 감안할 때 CNT로 제작된 어떤 것은 게이지율이 1000 이상인 것도 있어 그 활용이 기대된다. 이러한 우수한 피에조저항 특성에도 불구하고 CNT게이지는 마이크로 집적화 공정제작에 어려운 실제적인 문제점을 가지고 있다.

---

\* 강원대학교 전기전자공학과 교수, 공학박사

최근 polymer/CNT 혼합물을 기조로 한 스트레인게이지들에 연구가 많이 진행되어 왔으나 [10]~[17], 기존 호일형 게이지보다 현저히 높은 게이지율을 가지는 장점에도 불구하고 스트레인 감도가 폴리머 특성뿐만 아니라 게이지의 중형비율과 CNT의 함유성분 그리고 분산상태에 영향을 많이 받는 것으로 보고 되고 있다[4]~[17].

앞서 많은 연구에서 CNT스트레인게이지의 게이지율과 안정화에 노력을 하였으나 수감부 구조 위에 실용적으로 장착한 사례는 거의 없고 그나마 제조공정이 매우 복잡하고 비경제적이어서 대량생산의 실용화에는 아직 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 미세공정기술로 제작한 단순하고 저가의 SWCNT스트레인게이지의 제작과 특성에 대하여 고찰하였다. SWCNT는 플렉시블 폴리이미드기판 위에 스프레이분사의 방법으로 형성하였으며 사진식각공정과 산소 플라즈마를 이용하여 SWCNT의 스트레인게이지 그리드용 패턴을 에칭하였다. 그리드의 형상과 갯수 그리고 두께를 변화시켜 스트레인게이지의 특성을 비교 분석하였다.

## 2. SWCNT 스트레인게이지의 설계와 제작

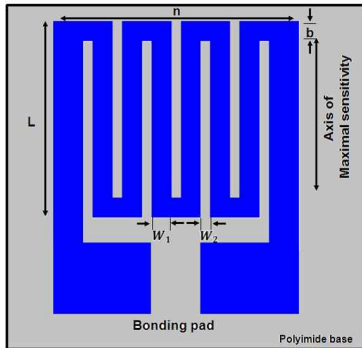
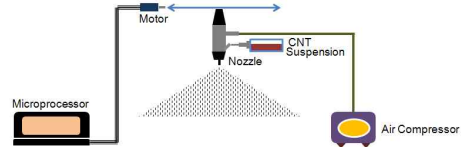


그림 1 CNT 스트레인게이지 그리드의 디자인 레이아웃

그림 1은 폴리이미드 기판에 부착된 CNT막 그리드의 외형을 보여주고 있다. CNT 그리드는 예상되는 힘을 최대한 감지하기 위한 방향으로 길고 얇게 배치 되어 있다. 끝부분의 루프부분은 힘에 수직방향으로 감지되므로 게이지의 횡단부의 영향을 줄이기 위해 최대한 넓고 짧게 설계하였다. 게이지의 단자부는 접합저항을 줄이고 리드선의 접착강도를 위해 최대한 넓게 하였다.

그리드폭은  $200\ \mu\text{m}$  ( $w_1$ ) 이며 길이는  $3\text{mm}$  ( $L$ ) 이다. 그리드라인과의 사이는  $100\ \mu\text{m}$  ( $w_2$ )의 폭이며 엔드루프는 폭  $300\ \mu\text{m}$  ( $b$ )와 길이  $500\ \mu\text{m}$ 이다. 폴리이미드 기판의 크기는 통상 길이  $5\text{mm}$ 와 폭  $3\text{mm}$ 이다. 기판의 공칭두께는  $15\ \mu\text{m}$  정도로 제작하였

다. 실험의 비교평가를 위하여 그리드수를 4, 6, 8 개로 다르게 제작하였고 두께는  $70\text{nm}$ ,  $225\text{nm}$ , 그리고  $280\text{nm}$ 의 3가지로 하였다.



(a)



(b)

그림 2 스프레이 코팅장치의 개요도(a)와 사진(b)

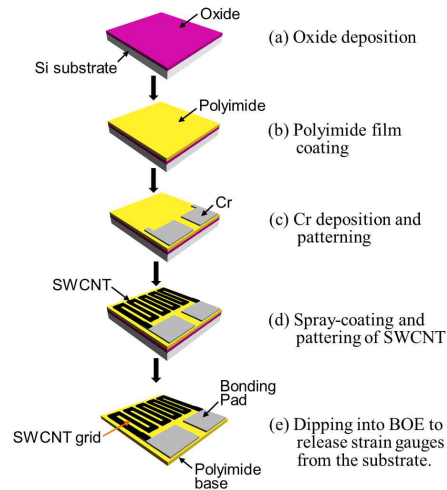


그림 3 SWCNT 스트레인게이지의 제조 공정

그림 2는 본 연구에서 사용된 스프레이 코팅장치의 개요도(a)와 사진(b)을 보여준다. 그림 3은 CNT게이지의 주요 제작 공정을 보여준다. 기판으로는 실리콘과 유리웨이퍼가 사용되었고 먼저  $2000\ \text{\AA}$   $\text{SiO}_2$  막이 PECVD법으로 실리콘웨이퍼위에 성장되고 폴리이미드막은 스프레이코팅방법으로 도포하고  $350^\circ\text{C}$ 에서 1시간 큐어링하였다.  $3000\text{\AA}$ 의 크롬막이 폴리이미드막위에 증착되었고 사진식각

공정으로 Cr7에칭액으로 60분간 습식에칭공정을 진행하였다. 스프레이코팅막을 제작하기 위한 용액을 준비하기 위하여 3mg의 SWCNT를 150ml의 디클로로벤젠에 20분간 초음파 담금처리를 하였다.

SWCNT막이 그림의 스프레이분사 방법으로 폴리이미드 와 크롬전극위에 분사되었으며 그리드 모양을 형성하기 위하여 SWCNT막을 산소플라즈마 장치로 50W의 출력에서 5분간 에칭하였다. 마지막 단계는 그림 (d)와 같이 유리기판위에서 분리하는 작업이다. 유리기판을 묶은 산화에칭용액에 담구어서 수용액 표면으로 떠오르는 스트레인 게이지를 다른 기판으로 옮기는 과정을 처리하였다.

스트레인게이지의 특성을 평가하기 위해 SWCNT막 두 개를 그림 4와 같은 쌍안경빔형 로드셀을 제작하여 스트레인에 대한 저항의 변화를 관찰하였다. 스트레인게이지의 전극에 실버페이스트로 본딩한 리드선을 외부로 연결하여 스트레인 변화에 대한 저항의 변화를 관찰하였다. 스트레인 게이지 A는 장력(+스트레인), 그리고 스트레인게이지 B는 압축력(-스트레인)에 의한 저항의 변화를 검출한다. 저항의 변화는 디지털 멀티미터(Agilent 34401A)를 이용하여 상용의 게이지를 부착한 시료와 같이 측정하여 비교분석하였다.

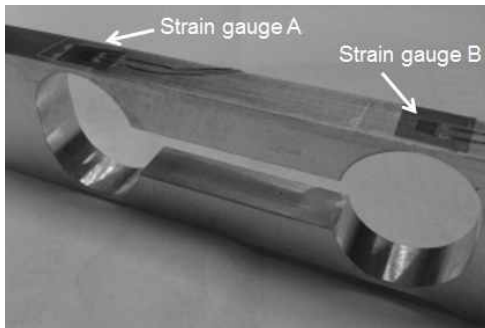


그림 4 스트레인특성을 평가하기 위해 제작된 로드셀과 스트레인게이지의 부착위치

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 스프레이코팅 SWCNT 스트레인게이지

초기 실험에서 그림 5(a)와 같이 서로 다른 형태와 크기의 센서게이지들을 제작하였다. 각각 그리드의 선폭은 50 $\mu$ m to 200 $\mu$ m 였으며 두께는 270 to 500nm 범위로 각각 플라즈마 출력과 시간을 조절하여 제작하였다. 그림 5(b)는 폴리이미드 베이스위에 50 $\mu$ m 그리드 선폭과 270nm 두께의 SWCNT막으로 제작된 스트레인게이지 1개의 SEM 사진으로서 그 형태가 잘 갖추어진 것을 볼 수 있다.

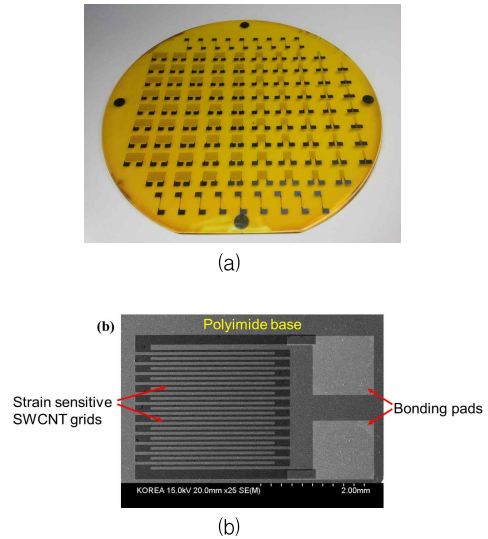


그림 5 제작된 SWCNT 스트레인게이지

(a) 4인치 유리웨이퍼 기판위에 제작

(b) 50 $\mu$ m 그리드폭의 SEM 사진

CNT막의 스트레인 효과를 바르게 평가하기 위해서는 CNT막과 전극과의 사이에 접합전위등의 다른 영향이 없어야 한다. 즉, CNT막과 전극이 충분히 오믹접합(ohmic contact)이 이루어진 것을 확인하여야 한다. 이를 평가 하기 위하여 하중부하가 가해지지 않은 상태에서 전원을 양극성으로 변화시켜 DVM으로 전압과 전류를 측정하여 선형성을 평가하였다. 그림 6에 그 결과를 보여주며 제작된 CNT막은 상온에서 충분한 선형성을 보여 전극과의 접합이 오믹접합이 이루어진 것을 확인하였다.

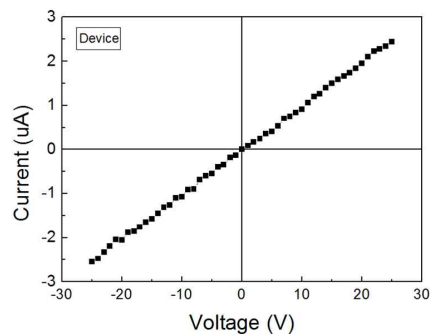


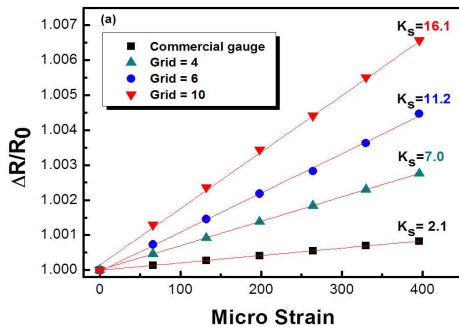
그림 6 상온에서 SWCNT 스트레인게이지의 전압-전류특성

#### 3.2 저항-스트레인특성

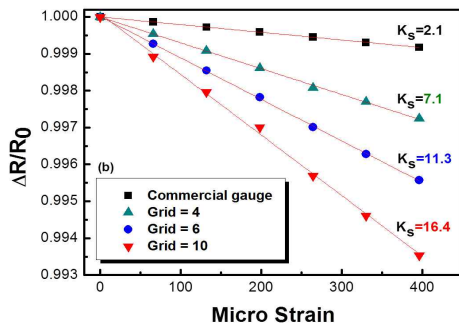
그림 7에 본연구에서 제작된 SWCNT 스트레인 게이지의 압축력과 인장력에 의한 저항의 변화를

관찰한 결과이다. 이때 박막의 두께는 270nm였으며 비교를 위하여 기존의 상업용 금속막 스트레인 게이지의 특성과 함께 비교해 보았다. R0는 스트레인게이지에 어떤 힘도 가해지지 않았을 때의 저항값이고  $\Delta R$ 은 힘의 변화에 저항값의 변화를 표시한다. SWCNT 스트레인게이지의 스트레인 변화에 대한 저항변화는 압축력과 인장력 모두 높은 직선성을 보여주었으며 압축력의 경우가 인장력보다 감도가 조금더 높게 나타났다. 제작된 게이지의 스트레인을 가하기전의 저항 초기값은 4개 그리드의 경우 21.73k $\Omega$  6개 그리드의 경우 각각 27.52k $\Omega$ , 46.42k $\Omega$ 으로 측정되었다. 각 데이터는 5개의 저항측정 평균의 결과이다. 게이지율은 실험결과와 기울기 값으로부터 산출하여 다음과 같이 나타났다.

$$\frac{\Delta R}{R_0} = K_s \frac{\Delta L}{L_0} = K_s \varepsilon \quad (1)$$



(a)



(b)

그림 7 SWCNT 스트레인게이지의 저항-스트레인관계  
(a) 인장력 (b) 압축력

여기서  $\Delta R/R_0$  변화된 저항성분의 백분율이고  $\varepsilon$  게이지의 스트레인값이다. 그림 7의 기울기로부터

터 8개의 그리드로 구성된 SWCNT 의 최대 게이지율은 장력의 경우 16.1로 나타났으며 압축력의 경우 16.4로 측정되었다. 상업용의 금속게이지의 게이지율이 인장 압축력 모두 2.1로 측정된것에 비해 약 8배 정도의 감도가 개선되는 것으로 평가되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 힘과 하중센서로 사용하기위한 단일벽 탄소나노튜브막으로 형성된 스트레인게이지를 제작하고 그특성들을 관찰하였다. 스프레이코팅 방법과 기존의 반도체 제조공정으로 SWCNT 스트레인게이지를 제작하였으며 이를 쌍안경구조의 빔에 부착하여 기존의 금속박막게이지와 특성을 비교하였다. 특성의 분석결과 외력에 의한 스트레인과 저항의 변화는 직선성의 변화를 보였으며 게이지율은 7에서 16정도의 값을 나타내었다. 이는 기존의 상업용 금속박막게이지 보다 8배정도 크게 나타났다. 이러한 결과들은 상업용으로서의 개발가치가 큰 가능성을 보여주었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. Cao, Q. Wang and Hongjie D, "Electromechanical Properties of Metallic, Quasimetallic, and Semiconducting Carbon Nanotubes under Stretching", *Phys. Rev. Lett.* 90 222-345, April 2003.
- [2] R. J. Grow, Q. Wang, J. Cao, D. Wang and H. Dai, "Piezoresistance of carbon nanotubes on deformable thin-film membranes", *Appl. Phys. Lett.* 86 093104, February 2005.
- [3] T. Nishio, Y. Miyato, K. Kobayashi, K. Matsushige and H. Yamada, "Piezoresistive properties of carbon nanotubes under radial force investigated by atomic force microscopy", *Appl. Phys. Lett.* 92 063117, February 2008.
- [4] Z. Li, P. Dharap, S. Nagarajiah, E. V. Barrera and J. D. Kim, "Carbon Nanotube Film Sensors 2004 Carbon Nanotube Film Sensors", *Adv. Mater.* 16 640-3, April 2004.
- [5] S. Paulson, M.R. Falvo, N. Snider, A. Helsen, T. Hudson, A. Seeger, R. M. Taylor, R. Superfine and S. Washburn, "In situ resistance measurements of strained carbon nanotubes", *Appl. Phys. Lett.* 75 2936-38, November 1999.
- [6] K. J. Loh, J. H. Kim, J. P. Lynch, N. W.

- S. Kam and N. A. Kotov, "Multifunctional layer-by-layer carbonnanotube - polyelectrolyte thin films for strain and corrosion sensing", *Smart Mater. And Struct.* 16 429-38, February 2007.
- [7] I. Kang, M. J Schulz, J. H Kim, V. Shanov and D. Shi, "A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring", *SmartMater. And Struct.* 15 737-48, April 2006.
- [8] M. Knite, V. Tupureina, A. Fuith, J. Zavickis, V. Teteris, "Polyisoprene - multi-wall carbon nanotube composites for sensing strain", *Mater. Sci. and Eng. C* 27 1125-28, August 2006.
- [9] E. T. Thostenson and T. W. Chou, "Carbon Nanotube Networks:Sensing of Distributed Strain and Damage for Life Prediction and Self Healing", *Adv. Mater.* 18 2837-41, October 2006.
- [10] M. Park, H. Kim and J. P. Youngblood, "Strain-dependent electrical resistance of multi-walled carbon nanotube/polymercomposite films", *Nanotechnology* 19 055705, January 2008.
- [11] Y. Liu, S. Chakrabatty, D. S. Gkinosatis, A. K. Mohanty and N. Lajnef, "Multi-walled Carbon Nanotubes/Poly(L-lactide)Nanocomposite Strain Sensor for Biomechanical Implants", *Biomech. Circuits Syst. Conf* 27 119-22 2007.
- [12] Zhang, Suhr and Koratkar, "Carbon Nanotube/Polycarbonate Composites as Multifunctional Strain Sensors", *J. Nanosci. Nanotechnol.* 6 960-4, April 2006.
- [13] P. Dharap, Z. Li, S. Nagarajaiah and E. V. Barrera, "Nanotube film based on single-wallcarbon nanotubes for strain sensing", *Nanotechnology* 15 379-82, January 2004.
- [14] X Li, C. Levy and L. Elaadil, "Multiwalled carbon nanotube film for strain sensing", *Nanotechnology* 19 045501, January 2008.
- [15] S. M. Vemuru, R. Wahi, S. Nagarajaiah and P. M. Ajayan, "Strain sensing using a multiwalled carbon nanotube film", *The Journal of Strain Anal. for Eng. Des.* 44 555-62, June 2009.
- [16] X. Yang, Z. Y. Zhou, F. Z. Zheng, M. Zhang, J. Zhang and Y. G. Yao, "A High Sensitivity Single-Walled Carbon-Nanotube -Array-Based Strain Sensor For Weighing", *Solid-State Sens. Actuat. and Microsyst. Conf* 21-25 1493-46, June 2009.
- [17] H. Zhao, Y. Zhang, P. D. Bradford, Q. Zhou, Q. Jia, F. G. Yuan and Y. Zhu, "Carbon nanotube yarn strain sensors", *Nanotechnology* 21 305502, July 2010.