

탄소나노섬유를 이용한 기계적 센서의 개발

Fabrication of a Mechanical Sensor Based on Carbon Nanotube Fibers



이 영 학*
Lee, Young Hak



강 성 준**
Kang, Seong Jun

1. 서론

탄소나노튜브(Carbon Nanotubes, CNTs)는 높은 전도성 및 안정성의 장점을 가지고 있어 최근 웨어러블 디바이스의 재료로 적용하고자 하는 시도가 증가하고 있다. 특히 탄소나노튜브의 높은 인장강도는 기계적 센서에 적합하기 때문에 CNT powder와 CNT 다발로 구성된 기계적 센서에 관한 연구가 다수 진행되고 있다. 그러나 아직까지 매우 작은 크기의 센서를 개발하는 연구만 한정적으로 수행되고 있다는 한계가 있다. 본 연구에서는 CNT가 가지고 있는 유리한 기계적 성질을 유지하면서도 기존에 개발된 센서보다 확장된 규모의 부재 변형률을 측정할

수 있는 센서를 개발하는 것을 목적으로 하였다.

본 연구에서는 CTNFs(Carbon Nanotube Fibers)를 활용한 기계적 센서를 제작하는데 있어 CVD (Chemical Vapor Deposition)와 직접 회전법(Direct spinning method)을 사용하여 긴 길이의 연속적인 CNTFs를 생산하였다. 생산된 CNTFs는 탄성의 부착판에 부착하여 휨 변형과 인장변형에 따른 저항 변화비($\Delta R/R_0$)를 측정하였다. 이를 통하여 센서로의 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 센서의 개발 및 실험

2.1 Bending sensor의 제작 및 실험

실험에 사용된 CNTFs는 <Table 1>에 주어진 합성조건으로 제작된다. 또한, 제작된 CNTFs는 Polydimethylsiloxane(PDMS)가 1000rpm으로 Spin coating된 $1.5 \times 6 \text{ cm}^2$ 의 PET에 부착된다. 부착판은 100°C에서 35분간 양생하였으며, 이후 전극제작을 위해 Mask를 부착한 뒤 300nm 두께의 은을 증착

* 경희대학교 건축공학과 교수
Dept. of Architectural Engineering, Kyung Hee Univ., Prof.

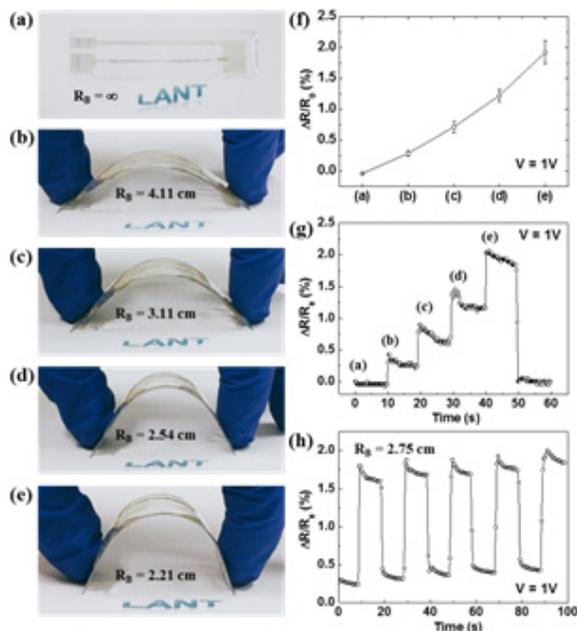
** 경희대학교 정보전자신소재공학과 교수
Dept. of Advanced Materials Engineering for Information and Electronics, Kyung Hee Univ., Associate Prof.

하였다. Mask를 제거한 뒤 $-5V \sim 5V$ 의 전압을 가하여 소자의 전류를 확인하였다.

〈Table 1〉 Synthesis of CNTFs

| Temperature | 1200°C | Acetone | 97.6wt% |
|-------------------|---------|-----------|---------|
| Hydrogen gas flow | 2000ccm | Thiophene | 0.8wt% |
| Wrap rate | 10ml/h | Ferrocene | 1.6wt% |

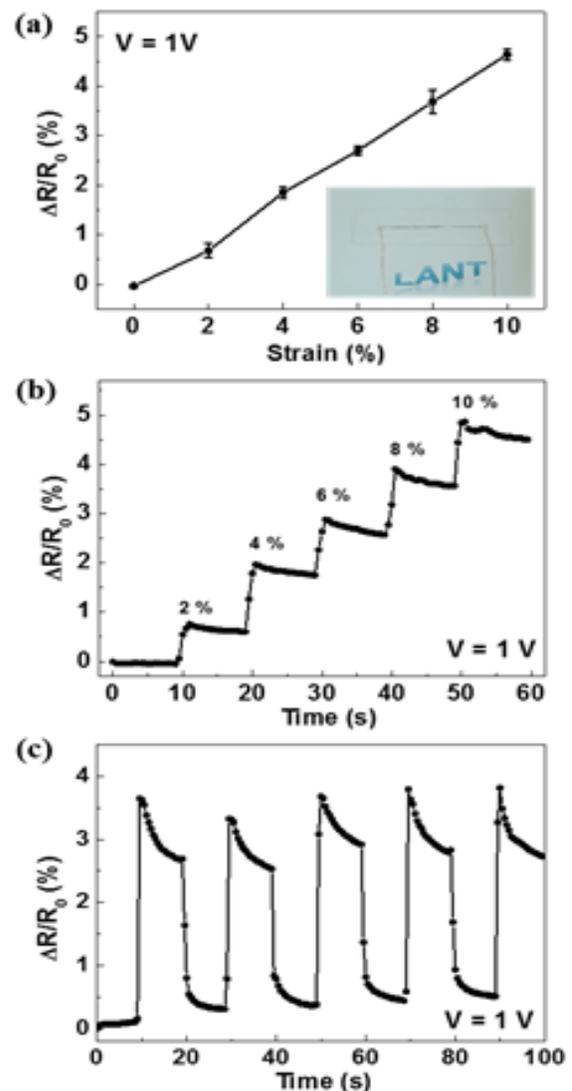
제작된 시험체에 일정한 1V의 전압을 가하고 4.11, 3.11, 2.54, 2.11cm의 반지름을 갖도록 휨 변형을 가할 경우의 저항변화비를 측정하여 〈Fig. 1〉에 나타내었다. 〈Fig. 1 (a)~(e)〉에 각 반지름에 따른 휨 정도를 나타내었으며, 〈Fig. 1 (f)〉에서 각 휨 정도에 따른 저항변화비를 비교할 수 있다. 〈Fig. 1 (g)〉에는 각 휨 정도에 따른 저항변화비를 나타내었다. 가장 큰 휨을 받은 4.11cm의 반지름을 갖는 경우 저항변화비는 2%로 나타났다. 또한, 복원에 의한 저항복귀를 확인하기 위해 10초 간격 주기로 반지름 2.75cm의 휨 변형을 가하였고, 〈Fig. 1 (h)〉에서와 같이 변형이 제거될 경우 초기 저항값으로 복귀하는 결과를 보였다.



〈Fig. 1〉 Bending test results

2.2 Strain sensor의 제작 및 실험

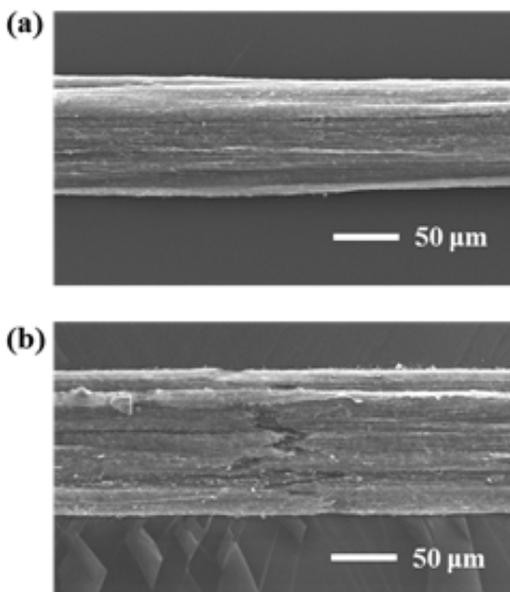
휨 실험과 동일한 시험체를 사용하여 인장변형률을 0에서 10%까지 증가시킬 경우에 저항변화비를 측정하였다. 〈Fig. 2 (a)〉에서 2% 간격의 인장변형률에 따른 저항변화비를 확인할 수 있다. 또한 10초 간격으로 2%씩 인장변형률을 증가시킬 경우의 결과를 〈Fig. 2 (b)〉에 나타내었다. 가장 큰 변형이 가해진 상태인 변형률 10%의 인장변형을 가하는 경우 저항변화비는 4.5%로 나타났다. 또한 변형 및 변형 제거 시 저항복귀를 확인하기 위해 10초 주기로 변형률 0%와 8%를 반복하였으며, 이때의 저항변화율을 〈Fig. 2 (c)〉에 나타내었다.



〈Fig. 2〉 Strain test results

2.3 실험결과 및 고찰

CNTFs의 저항변화는 크게 2가지 메커니즘에 의한 것으로 설명될 수 있다. 첫 번째는 섬유의 길이 변화에 따른 단면적의 축소가 부분적으로 저항증가에 영향을 주는 것이다. 두 번째는 저항증가의 주요한 요인으로 압전 저항 효과(Piezoresistive effect)를 고려할 수 있다. 변형이 가해질 경우 CNT 다발 사이의 접촉 면적이 변하게 되면서 에너지 준위는 변하게 된다. 이러한 현상은 Scanning Electron Microscopy(SEM)로 촬영한 <Fig. 3 (a), (b)>에 나타난 CNTFs의 이미지를 통해 확인할 수 있다. 또한, 초기의 변형이 가해지게 되면 CNTs의 일부가 파단되면서 그 결과로 저항 증가를 일으키는 경우도 생각할 수 있다. 이 경우에는 되돌릴 수 없는 저항 증가를 일으킬 것이다. 상기의 원인들에 의해 변형에 따른 CNTFs의 저항변화를 확인할 수 있으며, 최종적으로 CNTFs를 이용하여 힘 및 인장을 감지할 수 있음을 알 수 있다.

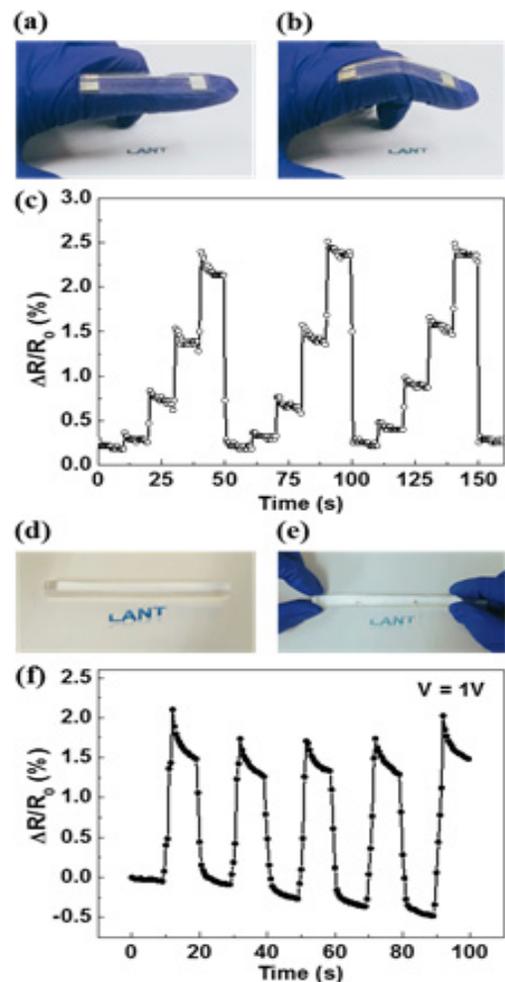


<Fig. 3> SEM images of a CNTFs

2.4 CNTFs sensor의 적용성

본 연구에서 고려된 CNTFs sensor의 웨어러블 디바이스에 적용가능성을 확인하기 위해, 손가락의

움직임에 따른 저항변화비를 확인하였다. <Fig. 4 (a), (b)>는 시험체를 부착한 손가락의 움직임을 나타낸다. <Fig. 4 (c)>는 손가락의 움직임에 따른 저항 변화비의 결과를 나타내었다. 또한, <Fig. 4 (d), (e)>에 PDMS와 CNTFs를 사용하여 바 형태로 제작한 시험체를 나타냈다. 바 형태의 시험체에 5% 변형을 가할 경우의 저항변화비를 <Fig. 4 (f)>에 나타내었다. 본 실험결과를 통하여 CNTFs sensor는 웨어러블 디바이스에 적용하여 인체의 변화를 감지하거나 측정하는데 사용할 수 있음을 알 수 있다.



<Fig. 4> CNTFs sensor of adaptability

3. 결론

본 연구에서는 기존의 CTN 센서에 비해 긴 길이의 연속적인 CNTFs를 재료로 제작된 센서를 PDMS

로 코팅된 PET에 부착하여 휨 및 인장 실험을 하였고, 이를 통해 휨 및 인장변형에 대한 저항변화비를 측정함으로써 센서의 적용성을 평가하고자 하였다.

실험결과 반지름 2.21cm를 갖도록 휨 변형을 일으킬 경우 저항변화비가 2.0%로 증가하였으며, 인장에 대하여는 10%만큼 인장시킬 경우 4.5%의 증가된 저항변화비가 측정되었다. SEM을 통하여 저항변화비는 CNTFs의 압전 저항 효과에 의한 것을 확인하였으며, 실험 결과를 통하여 본 연구에서 개발한 CNTFs를 향후 건축 및 토목분야에서 부재의 변형을 계측할 수 있는 기계적 센서로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

References

1. D. H. Son, J. H. Lee, S. Qiao, R. Ghaffari, J. M. Kim, J. E. Lee, C.Y. Song, S. J. Kim, D. J. Lee, S. W. Jun, S. Yang, M. Park, J. H. Shin, K. S. Do, M. C. Lee, K. H. Kang, C. S. Hwang, N. Lu, T. H. Hyeon, and D. H. Kim, "Multifunctional wearable devices for diagnosis and therapy of movement disorders," *Nature*, 9, 2014, 397-404.
2. D. H. Kim, R. Ghaffari, N. S. Lu, and J. A. Rogers, "Flexible and stretchable electronics for biointegrated devices," *Annual Review of Biomedical Engineering*, 14, 2012, 113-128.
3. H. Z. Geng, K. K. Kim, C. Song, N. T. Xuyen, S. M. Kim, K. A. Park, D. S. Lee, K. H. An, Y. S. Lee, Y. K. Chang, Y. J. Lee, J. Y. Choi, A. Benayad, and Y. H. Lee, "Doping and de-doping of carbon nanotube transparent conducting films by dispersant and chemical treatment," *Journal of Materials Chemistry*, 18, 2008, 1261-1266.
4. K. H. Kim, M. Vural, M. F. Islam, "Single-Walled Carbon Nanotube Aerogel-Based elastic conductors," *Advanced Materials*, 23, 2011, 2865-2869.
5. B. S. Shim, W. Chen, C. Doty, C. Xu, and N. A. Kotov, B. S. Shim, W. Chen, C. Doty, C. Xu, and N. A. Kotov, "Smart electronic yarns and wearable fabrics for human biomonitoring made by carbon nanotube coating with polyelectrolytes," *Nano Letters*, 8, 2008, 4151-4157.