

Yarned CNT Fiber 저항체의 전기적 특성

임영택¹, 이선우^{2,a}

¹ 인하대학교 전기공학과

² 인하공업전문대학 전기정보과

Electrical Properties of Yarned Carbon Nanotube Fiber Resistors

Youngtaek Lim¹ and Sunwoo Lee^{2,a}

¹ School of Electrical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

² Department of Electrical Information, Inha Technical College, Incheon 22212, Korea

(Received November 14, 2016; Revised December 1, 2016; Accepted December 1, 2016)

Abstract: CNT (carbon nanotube) resistors with low resistance and negative TCR (temperature coefficient of resistance) were fabricated with yarned CNT (carbon nanotube) fibers. The CNT fibers were prepared by yarning CNTs grown on the silicone substrate by CVD (chemical vapor deposition) method. The CNT resistors were fabricated by winding CNT fibers on the surface of ceramic rod. Both metal terminals were connected with the CNT fiber wound on the ceramic rod. We measured electrical resistance and thermal stability with the number of CNT fibers wound. The CNT resistor system shows linearly decreased resistance with the number of CNTs wound on the ceramic rod and saturated at 20 strands. The CNT resistor system has negative TCR between -1,000 ~ -2,000 ppm/°C and stable frequency properties under 100 kHz.

Keywords: Carbon nanotube fiber, Yarning process, Resistor, Low resistance, Negative TCR, Frequency stability

1. 서 론

IT 기술의 발전으로 인한 Network 기반의 휴대용 전자 제품이 큰 시장으로 자리 잡고 있으며, 이와 함께 휴대용 전자기기의 구동을 위한 이차전지 시장이 함께 성장하고 있다. 또한 전자 제품 회로 구성의 가장 기본이 되고, 가장 많이 적용되는 수동소자인 고정 저항기 또한 이런 시장의 요구를 충족하기 위하여 기존의 형태와 기능에서 발전적인 개선을 시도하는 연구가 진행되고 있다. 이차전지의 입출력 전류가 상승함에 따라 고정저항기의

저항치는 낮고 정격전력은 높으며, 소형기기에 실장되기 위한 제품의 크기는 작아지는 특수 저항이 필요하게 되었다. 때문에 현재 시장에서 가장 보편적으로 적용되고, 잘 알려진 저항기의 대부분은 이차전지 기반의 소형화된 전자기기에서는 적용되기 힘들며, 그 요인은 크게 온도 특성 문제, 제품 크기의 문제 그리고 정격전력의 문제로 나눌 수 있다. 저항 중 전류의 분배 역할로 전류를 감지 검출하는 셉트저항은 이차전지의 용량 상승과 함께 높아진 발열량의 문제로 정밀 검출이 어려워지고 있으며, 또한 입출력 전류 상승으로 인한 정격전력(W) 상승을 크기의 상승 없이 만족해야 하는 문제를 안고 있다 [1,2].

본 연구에서는 전력손실이 적은 고효율 기반의 전자 기기에서 정격전력이 높은 제품과 열에 안정하여 고정 저항기로서 저항의 변화가 거의 없는 셉트저항에 적용되기 위한 일환으로 저항체의 재료로써 탄소나노튜브

a. Corresponding author; swlee@inhac.ac.kr

(carbon nanotube, CNT)를 적용하기 위한 연구를 수행하였다. CNT는 1차원 구조를 가지고 있기 때문에 완전한 결정에서는 충돌에 의해 발생하는 저항이 존재하지 않을 수 있지만, 실제의 CNT에서는 결합에 의해 발생하는 충돌로 인한 저항이 발생한다 [3-5]. 그럼에도 불구하고 CNT는 탄소 원자가 강한 공유결합으로 구성되어 있기 때문에 일렉트로 마이그레이션(electro-migration)에 대한 내성이 크고 기계적인 강도가 우수하여, 전기적인 전도성뿐만 아니라 허용전류량 측면에서도 매우 우수한 재료이다 [6-9]. 본 연구에서는 저항체로 사용하기 위한 CNT로 다중벽 탄소나노튜브를 적용하였다. CNT는 합성되는 과정에서 정해지는 Chirality에 의해 반도체성 CNT와 금속성 CNT가 각각 2/3와 1/3의 비율로 만들어진다 [10,11]. 온도에 의한 저항변화는 금속과 반도체에서 서로 다른 거동을 나타낸다. 금속의 경우에 온도가 증가하면 열에너지에 의한 격자진동이 활발해지기 때문에 전자의 이동을 방해하여 저항이 증가하는데 반해, 반도체에서는 열에너지에 의한 전자-정공 쌍의 생성이 증가하여 전하량이 증가하는 결과를 초래하여 저항이 감소하는 결과가 나타난다 [12-15]. 이 때문에 CNT를 저항체로 사용하는 경우, 2/3의 비율을 점유하는 반도체성 CNT에 의해 부(megative)의 저항온도계수(TCR)를 기대할 수 있다.

본 논문에서는 CNT fiber를 저항체로 저항기에 적용을 위한 전기적, 열적 안정특성 관찰하였다.

2. 실험 방법

화학적 기상증착법(CVD)을 이용하여 실리콘 웨이퍼 위에 성장시킨 CNT의 일부를 핀셋으로 잡은 후에 스피닝하면서 잡아당겨서 CNTs가 꼬여진 형태의 Yarned CNT fiber를 제작하였다 [16]. 이와 같은 공정을 통해 제작된 Yarned CNT fiber의 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM) 사진을 그림 1에 나타낸다. 제작한 Yarned CNT fiber의 직경은 약 75 μm 이며 각각의 CNT가 다발의 형태로 제작되어진 것을 알 수 있다. Yarned CNT fiber에서 각각의 CNTs는 반데르발스 힘에 의해 결합되어 견고한 와이어의 형태를 유지할 수 있다. 본 실험에 사용된 Yarned CNT fiber는 1, 5, 10, 20, 40, 80 가닥으로 제작하였으며, 제작 방법은 Yarning된 1 가닥을 일정한 길이(2 cm)로 자른 후 여러 가닥을 한꺼번에 꼬는 과정을 진행하였다.

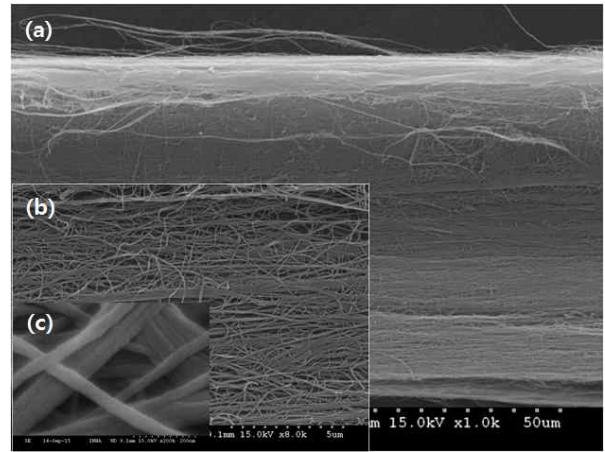


Fig. 1. SEM images of yarned CNT fiber.

Yarned CNT fiber에는 CNT를 합성하는 과정에서 만들어진 결정형의 CNT와 함께 비정질 탄소 물질과 촉매로 사용된 금속 물질이 포함되어 있다. Yarned CNT fiber의 전도성을 향상시키기 위해서 비정질 탄소 물질과 촉매 금속을 제거하였다. 비정질 탄소 물질과 촉매 금속을 제거하기 위해 희석한 묽은 황산을 이용한 습식 정제 방법을 적용하였으며 개선된 전기전도 특성을 확인하기 위해 저항 값을 측정하였다. 습식 정제 방법은 1, 5, 10, 20, 40, 80 가닥의 CNT fiber를 30초간 묽은 황산에 담근 후 DI Water에 10분간 담가 CNT fiber에 묻어 있는 묽은 황산을 제거하였다.

3. 결과 및 고찰

제작된 Yarned CNT fiber가 저항체로 적용되기 위한 적합성을 판단하기 위해 전기적 그리고 열적 특성을 분석하였다. 그림 2에는 Yarned CNT fiber의 습식 정제 공정의 전후에 측정한 저항값을 나타내었다. 1가닥의 Yarned CNT fiber로부터 80 가닥의 Yarned CNT fiber까지 가닥수의 증가에 따른 저항값의 변화를 함께 나타낸다. 정제 공정 전후의 저항은 상당한 수준의 의미 있는 변화를 나타내고 있다. 1가닥의 Yarned CNT fiber의 경우의 저항 값은 정제 공정의 전 저항 값이 244 Ω 인데 반해, 정제 공정 후의 저항 값은 180 Ω 으로 개선된 것을 확인할 수 있다. 또한, Yarned CNT fiber의 가닥수가 증가함에 따라 저항 값은 감소하였으며, 80 가닥의 Yarned CNT fiber에서 정제 공정 전후에 각각 4.03 Ω 과 3.42 Ω 의 저항

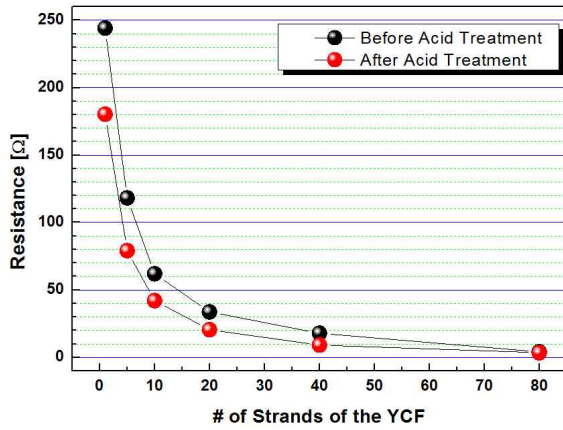


Fig. 2. Resistance with the number of yarned CNT fibers before and after cleaning process.

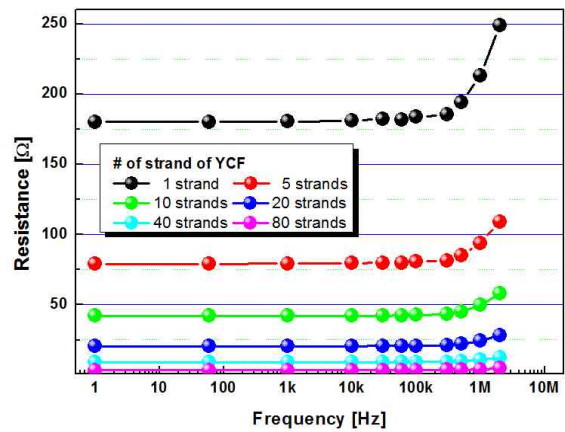


Fig. 4. Frequency dependence of resistance in yarned CNT fiber.

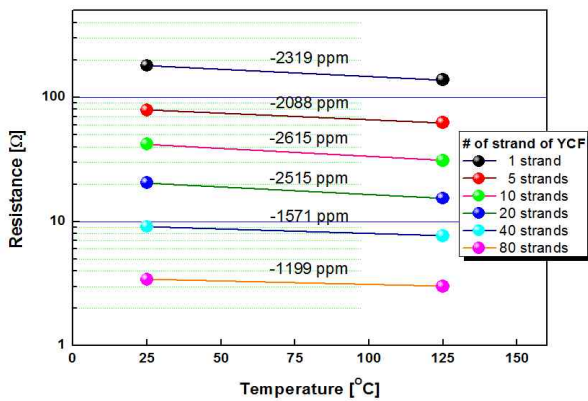


Fig. 3. Resistance changes of the yarned CNT fibers measured at 25 and 125°C TC.

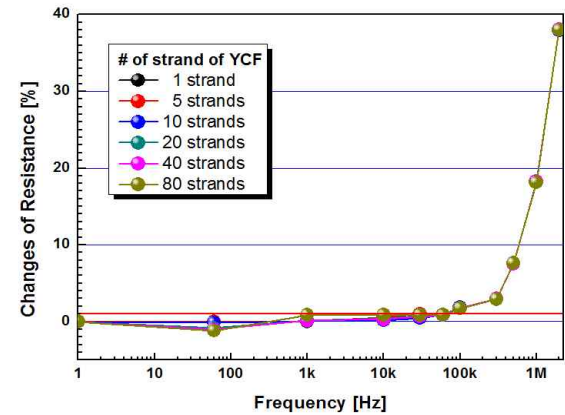


Fig. 5. Frequency dependence of resistance in yarned CNT fiber.

값을 나타내었다. 이러한 결과로부터 정제 공정에 의한 전도도의 개선과 함께 Yarned CNT fiber의 가닥수를 조절함으로써 저항 값을 조절할 수 있다는 것을 확인하였다.

온도변화에 의한 저항 값의 변화를 조사하기 위해 25°C와 125°C에서 저항 값을 측정하였으며, 저항온도 계수(TCR)는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. (R_1 : 최저 온도에서의 저항, R_2 : 최고 온도에서의 저항, T_1 : 최저 온도 (25°C), T_2 : 최고 온도 (125°C)) 이러한 방법으로 구한 TCR 결과를 그림 3에 나타내었다.

$$TCR = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)} \times 10^6 \text{ [ppm/}^\circ\text{C]} \quad (1)$$

정제 공정 전의 Yarned CNT fiber에서는 -800 ~

-900 ppm의 부(negative)의 TCR을 나타내었으며, 정제 후의 Yarned CNT fiber에서는 -2,000 ppm 이상의 큰 부의 TCR을 나타내었다. 이러한 결과는 Yarned CNT fiber를 구성하고 있는 2/3의 반도체성 CNTs의 열적 특성에 의한 저항의 감소 때문에 발생하는 결과라고 생각할 수 있다.

그림 4에 Yarned CNT fiber의 가닥수에 따른 0 Hz부터 2 MHz까지의 주파수 변화에 의한 저항변화를 나타내었으며, 100 kHz 이하의 주파수에서는 안정적인 주파수 의존성이 관측되었다.

또한, 그림 5에 0 Hz부터 2 MHz까지의 주파수 변화에 의한 저항변화율을 나타내었다. 100 kHz 이상의 주파수에서는 저항이 큰 폭으로 상승하였고, 최종적으로 2 MHz에서 30% 이상 저항이 상승하였다. 일반금속의 경우 교류에 의한 유도기전력의 발생으로 금속

중심부의 전류밀도가 감소하여 표면으로 전류가 흐르게 되는 표피효과(skin effect)가 발생하여 저항이 증가하는 결과를 초래하여, 저항과 주파수의 비례관계를 나타내게 된다. 그러나 본 실험에서 적용된 Yarned CNT fiber는 금속합금에서의 주파수 특성보다 양호한 특성으로 저항체로의 적용이 가능한 수준이라고 판단할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 하이브리드 형태의 저항기의 적용을 위해 필요한 열적 안정특성을 개선하기 위해 CNT의 반도체성 특성을 활용하여 하이브리드 형태의 저항기에 적용하기 위한 연구를 진행하였다. Yarned CNT fiber의 전도성을 개선하기 위해 묶은 황산을 이용한 습식정제법을 사용하였으며, Yarned CNT fiber의 정제되기 전과 후의 전기적 특성과 열적 안정특성을 비교 관찰하였다. 전기적 특성 중 저항변화 특성을 확인한 결과 개선된 전도특성을 확인하였으며 비정질 탄소물질과 촉매 금속이 제거되어 전도성이 향상되었음을 알 수 있다. 또한 Yarned CNT fiber의 주파수 변화에 의한 저항변화를 관찰한 결과 안정적인 주파수 의존성이 관측되었다. 마지막으로 열적 특성을 확인한 결과 $-2,000$ ppm 이상의 큰 부의 TCR이 확인되었다. 이것은 2/3의 반도체성 CNTs의 열적 특성에 의한 저항의 감소 때문에 발생하는 결과라고 생각할 수 있다.

결과적으로, 정(positive)의 TCR을 가지는 금속 와이어와 부(negative)의 TCR을 가지는 CNT의 하이브리드 형태의 저항체를 제작하면 TCR이 0 (Zero)에 가까운 고정저항체의 구현이 가능할 것이라 기대된다.

감사의 글

이 연구 결과보고서는 2016년도 특성화 전문대학 육성지원 사업비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] F. Galliana, P. P. Capra, and E. Gasparotto, *Journal of measurement*, **46**, 1630 (2013). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.11.031>]
- [2] F. Zandman, P. R. Simon, and J. Szwarc, *Resistor theory and technology*, 1st ed. (Vishy Inter technology Inc, Malvern, 2001) p. 76.
- [3] J. Hu, T. W. Odom, and C. M. Lieber, *Acc. Chem. Res.*, **32**, 435 (1999).
- [4] P. G. Collins, A. Zettl, H. Bando, A. Thess, and R. E. Smalley, *Science*, **278**, 100 (1997). [DOI: <https://doi.org/10.1126/science.278.5335.100>]
- [5] P. L. McEuen, M. S. Fuhrer, and H. Park, *IEEE Trans. Nanotech.*, **1**, 78 (2002). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TNANO.2002.1005429>]
- [6] E. Flahaut, R. Bacsá, A. Peigney, and C. Laurent, *Chemical Communications*, **12**, 1442 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1039/b301514a>]
- [7] J. W. Mintmire, B. I. Dunlap, and C. T. White, *Phys. Rev. Lett.*, **68**, 631 (1992). [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.68.631>]
- [8] C. Dekker, *Physics Today*, **52**, 22 (1999). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.882658>]
- [9] O. Meincke, D. Kaempfer, H. Weickmann, C. Friedrich, M. Vathauer, and H. Warth, *Polymer*, **45**, 739 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2003.12.013>]
- [10] A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y. H. Lee, S. G. Kim, A. G. Rinzler, D. T. Colbert, G. E. Scuseria, D. Tománek, J. E. Fischer, and R. E. Smalley, *Science*, **273**, 483 (1996). [DOI: <https://doi.org/10.1126/science.273.5274.483>]
- [11] A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y. H. Lee, S. G. Kim, A. G. Rinzler, D. T. Colbert, G. E. Scuseria, D. Tománek, J. E. Fischer, and R. E. Smalley, *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 256805-1 (2001). [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.256805>]
- [12] W. Lowrie, *Fundamentals of Geophysics*: (Cambridge University Press, Zurich, 2007) p. 254.
- [13] B.N.J. Persson and N. D. Lang, *Phys. Rev. B*, **26**, 5409 (1982).
- [14] H. Gerischer, *J. Phys. Chem.*, **88**, 6096 (1984).
- [15] W. Choi, A. Termin, and M. R. Hoffmann, *J. Phys. Chem.*, **98**, 13669 (1994).
- [16] M. Zhang, K. R. Atkinson, and R. H. Baughman, *Science*, **306**, 1358 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1104276>]