

전류와 같은 전류의 변화량을 측정하여 적분회로로 해석하는 방식이 아닌, 셉트저항을 활용해 분로에 흐르는 미세전류에 의해 발생하는 전압강하를 측정하여 전류를 계산함으로써, 저항의 비율에 의한 전체 전류를 측정하는 방식을 사용하여야 한다 [2]. 그러나 분로를 형성하는 저항은 사용온도가 증가함에 따라 저항값이 증가하는 현상이 발생하기 때문에, 전압강하를 일으키는 원인인 저항값이 셉트저항에 의한 성분, 온도 상승에 의해 발생하는 저항 증가에 의한 성분이 추가되어 전체 시스템이 복잡해진다 [3]. 온도 증가 성분에 의한 저항 증가로 발생하는 전압강하 성분에 의해 측정전류

에 오차가 발생한다 [4]. 따라서 사용 중의 온도 변화를 측정하여 온도 변화에 의한 저항값의 증가를 예측하고, 전체 저항에서 온도 변화에 의해 발생한 저항 증가 성분을 보정해 주는 추가회로가 필요하게 된다 [5]. 이러한 문제 때문에, 정확한 전류 측정이 어려워지며 시스템 비용이 증가한다 [6].

선트저항체의 재료로 사용되는 합금은 저항값이 작은 구리 기반에 저항온도계수(temperature coefficient of resistance, TCR)를 낮출 수 있는 금속인 망간이나 니켈을 섞어서 만듦으로써, 저항값과 TCR을 적당한 정도에서 만족하는 시스템을 사용하고 있다. 그러나 이러한 방법으로는 오차를 완전히 제거할 수는 없으며, 상용화된 최고 수준의 선트저항이 50 ppm/°C의 저항 온도계수를 가지고 있는 실정이다 [7]. 이 수치는 온도가 1°C 증가할 때마다 0.005%의 저항이 증가하는 수준이다. 작아 보일 수 있는 정도의 오차이지만, 송배전선에서 전류가 수천 A정도인 것을 감안하면, 결코 무시할 수 없는 수준의 오차가 된다.

본 논문에서는 온도 변화에 의한 저항 증가를 보정하는 회로를 사용하지 않으면서 오차가 없는 정밀한 전류 측정을 위해, 온도가 변해도 저항값이 변하지 않는 선트저항체를 구현하고자 한다. 합금은 온도가 증가함에 따라 저항값이 증가하는 양(+)의 TCR을 가지고 있기 때문에, 이를 보상하기 위해 음(-)의 TCR을 가지고 있는 반도체성 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)를 병렬로 접합하여 선트저항체를 제작한다. 이렇게 제작된 선트저항은 온도 변화에 의한 저항의 변화량이 합금과 CNT에서 서로 상쇄되어 TCR이 영(0)인 선트저항을 제작할 수 있다 [8].

2. 실험 방법

구리에 니켈을 첨가하여 진공용융로에서 용융한 후 식힘으로써 잉곳 형태의 Cu/Ni 합금을 제작하였으며, 열처리 후 가장자리 부분의 편석을 제거함으로써 잉곳 전체적으로 균일한 조성을 가지는 합금을 제작하였다. 벌크 형태의 합금은 신선공정을 통해 선형으로 제작하였고, 최종적으로 압연 및 판금공정을 통해 판상의 합금 플레이트를 제작하였다. CNT가 -800 ppm/°C 근방의 TCR을 가지기 때문에 [9], 합금은 +800 ppm/°C의 TCR을 가지게 설계하여 합금과 CNT의 TCR이 서로 상쇄될 수 있게 하였으며, 합금의 조성은 구리에 니켈을 8 wt% 첨가함으로써 구현할 수 있다 [10].

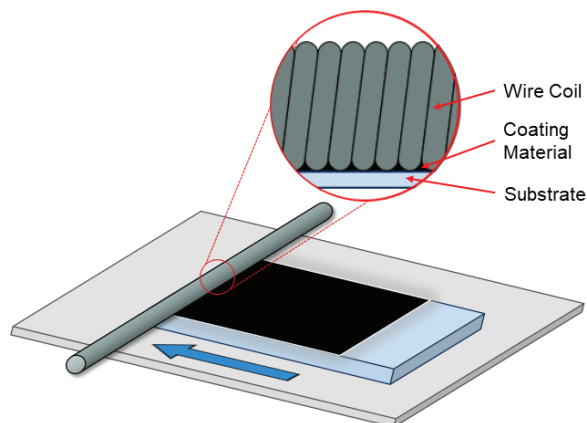


Fig. 1. Schematics of fabrication process for CNT paper using squeezing method.

음의 TCR을 가지는 CNT 페이퍼는 CNT 분산용액과 우레탄(urethane) 용액을 섞은 후, 스퀴징법으로 제작하였다. CNT 분산용액은 2 g의 분말 상태의 CNT와 4 g의 분산제(AFCONA 4570)를 98 ml의 에탄올 용매에 넣은 후, 프루브 소니케이터(probe sonicator)를 이용하여 초음파 처리하여 제조하였다. 우레탄 용액은 30 g의 우레탄을 70 ml의 에탄올에 넣은 후, 교반기를 이용하여 300 rpm으로 2시간 동안 교반하여 제조하였다. CNT/Urethane 혼합용액은 CNT 분산용액과 우레탄 용액을 3:10의 비율로 혼합한 후, 교반기에서 100 rpm으로 24시간 동안 교반하여 11.76 wt%의 CNT/Urethane 용액을 제조하였다. CNT 페이퍼를 제작하는 과정은 그림 1에서와 같이, 유리 기판 위에 CNT/Urethane 용액을 떨어뜨린 후에 코터-바(coater bar)를 이용하여 밀어주어 기판 위에 박막을 형성한다. 코터-바는 금속 봉에 코일을 감아놓은 모양이며, 코일과 코일 사이의 틈새로 코팅 물질이 남게 되어 박막을 형성하는 원리이다. 이후에 60°C에서 2시간 동안 건조한 후에 기판으로부터 벗겨내어 CNT 페이퍼를 제작한다. 본 연구에서는 유리 기판을 사용하는 대신 합금 플레이트에 직접 CNT 페이퍼를 제작함으로써 CNT와 합금의 적층 구조를 구현하였다.

3. 결과 및 고찰

제작된 합금의 조성을 확인하기 위해 에너지 분산 X선 분광계(energy dispersive X-ray spectroscopy, EDX) 분석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 2에 나타

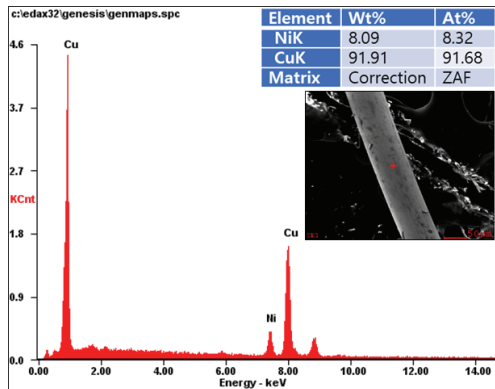


Fig. 2. EDX analysis for metal alloy composed of 8 wt% of Ni and 92 wt% of Cu.

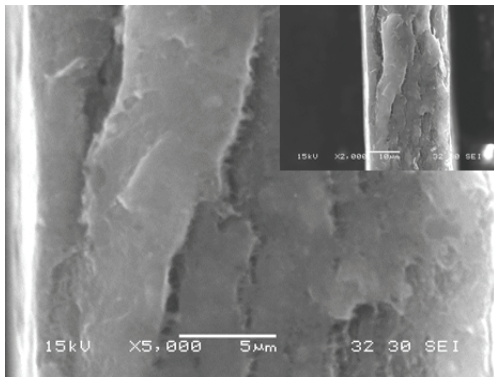


Fig. 3. SEM images for surface view and cross-sectional view (inset) of the prepared CNT paper.

내었다. EDX 결과로부터 91.91 wt%의 구리와 8.09 wt%의 니켈로 구성되어 있음을 확인할 수 있으며, 목표로 한 합금설계가 성공적으로 이루어졌음을 알 수 있다.

스퀴징법으로 제작한 CNT 페이퍼의 두께와 CNT 페이퍼에서 CNT의 분포 상태를 관찰하기 위해 주사전 자현미경(scanning electron microscopy, SEM) 분석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 3에 나타내었다.

그림 3의 SEM 이미지로부터 바인더로 사용된 Urethane 사이에 CNT가 균일하게 분포하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 단면 SEM 이미지로부터 스퀴징법으로 제작한 CNT 페이퍼의 두께는 약 30 μm 인 것을 알 수 있다. SEM 이미지에서 CNT는 엉켜 있지 않은 실과 같은 모양으로 균일하게 분포하고 있다.

송배전 선로에서 환경 온도가 변하는 동안의 직류 전류 측정의 정밀도를 평가하기 위해, 25°C부터 125°C까지의 온도범위에서 CNT 페이퍼로 제작한 저항체,

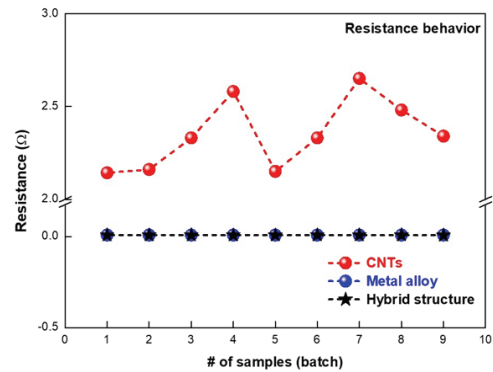


Fig. 4. Resistances at 25°C for the CNT paper resistor, the metal alloy resistor, and the hybrid resistor.

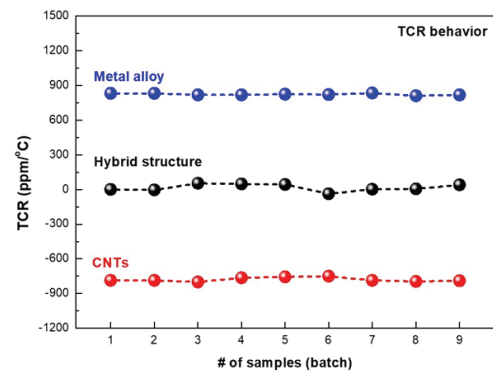


Fig. 5. TCR derived from the resistance values measured between 25 to 125°C from the CNT paper resistor, the metal alloy resistor, and the hybrid resistor.

합금으로 제작한 저항체, 그리고 CNT 페이퍼를 합금 위에 적층한 하이브리드 저항체의 저항을 측정하였다. 그림 4에 25°C의 초기상태에서 각각의 저항체의 저항을 측정하여 나타내었다. CNT 페이퍼 저항체의 저항은 2.35 Ω 의 평균값과 0.19 Ω 의 표준편차를 나타내고 있으며, 합금 저항체의 저항은 7.56 m Ω 의 평균값과 0.23 m Ω 의 표준편차를 나타내고 있다. 그리고 이 두 가지의 저항체를 병렬로 접속하여 적층한 하이브리드 저항체의 저항은 7.38 m Ω 의 평균값과 0.20 m Ω 의 표준편차를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 서로 다른 저항값을 가지는 두 개의 저항체를 병렬로 접속하였을 경우에, 합성저항은 작은 저항값을 가지는 저항체의 저항값보다 작아지는 것을 알 수 있다.

환경 온도가 25°C에서 125°C까지 변화하는 동안 각각의 저항체에서의 저항의 변화를 측정하였으며, 측정된 저항값으로부터 TCR을 산출하여 그림 5에 나타내

었다. 반도체성 거동을 보여서 음의 TCR을 가지는 CNT 페이퍼 저항체의 TCR은 $-778.72 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 의 평균값과 $18.17 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 의 표준편차를 나타내고 있으며, 금속성 거동을 보여서 양의 TCR을 가지는 합금 저항체의 TCR은 $824.06 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 의 평균값과 $8.25 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 의 표준편차를 나타내고 있다. 그리고 하이브리드 저항체의 TCR은 $17.61 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 의 평균값과 $30.55 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 의 표준편차를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

하이브리드 저항체에서 9개의 샘플에 대해 평균적으로 $17.61 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ 의 TCR을 나타내었으며, 이 값은 세계 최고 수준의 저항체의 TCR ($50 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$, 독일 Isabellen)보다 우수한 수준이다 [8]. 특히, #1, #2, #7, 그리고 #8 샘플에서는 각각 1.38, -2.77, 2.66, 5.49 $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ 의 TCR을 나타내었으며, 이 값은 금속합금만으로는 구현할 수 없는 매우 정밀한 수준이다.

이상과 같은 결과로부터, TCR을 0 근방의 매우 낮은 수준(near zero)으로 제어할 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러므로 Near zero TCR을 가지는 저항체를 사용하여 송배전 선로에서 전압이나 전류를 측정하는 경우에는 환경 온도의 변화에 따라 저항값이 달라져서 발생하는 오차를 거의 완벽하게 제거할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 합금 플레이트에 CNT 페이퍼를 적층하여 하이브리드 형태의 저항체를 제작함으로써, 선트 저항의 TCR을 near zero 수준으로 낮출 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 음의 TCR을 가지는 CNT 페이퍼와 양의 TCR을 가지는 합금을 적층하여 병렬로 접속함으로써, 온도 증가에 따라 발생하는 저항의 상승분(Positive TCR @ 합금)과 감소분(Negative TCR @ CNT)이 서로 상쇄되어 효과적으로 제거될 수 있음을 알 수 있다.

결과적으로 본 연구에서 제작한 CNT/Metal-alloy의 적층 구조를 가지는 하이브리드 저항체를 사용함으로써, 송배전 선로에서 전압이나 전류를 측정하는 경우에 환경 온도의 변화가 발생해도 오차가 발생하지 않을 것이라 기대할 수 있다.

ORCID

Sunwoo Lee

<https://orcid.org/0000-0003-1847-4100>

감사의 글

이 논문은 인하공업전문대학의 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] Y. J. Lee, J. S. Youn, S. C. Cho, and S. Y. Noh, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **33**, 201 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2020.33.3.201>]
- [2] E. M. Kim, M. R. Son, and C. Y. Kang, *Trans. Korean Inst. Elect. Eng.*, **67**, 1055 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.8.1055>]
- [3] J. D. Choi, *Trans. Korean Inst. Power Electron.*, **10**, 403 (2005).
- [4] E. M. Kim, H. C. Kim, and S. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **31**, 107 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.2.107>]
- [5] G. S. Chung and S. W. Hong, *J. Sens. Sci. Technol.*, **9**, 171 (2000).
- [6] K. S. Jung, H. K. Yang, S. H. Cha, J. U. Lim and J. H. Choi, *J. Inst. Electron. Eng. Korea. SD*, **43**, 23 (2006).
- [7] F. Zandman, P. R. Simon, and J. Szwarc, *Resistor Theory and Technology*, 1st ed. (Vishay Inter-technology Inc., Malvern, USA, 2001) p. 52.
- [8] S. Lee, E. M. Kim, and Y. Lim, *Sci. Rep.*, **9**, 7763 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44182-7>]
- [9] W. Riedel, G. E. Fernandes, J. H. Kim, and J. Xu, *SENSOR-DEVICES 2012: The Third International Conference on Sensor Device Technologies and Applications* (IARIA, Rome, Italy, 2012) p. 73.
- [10] K. Song and Y. H. Hong, *Nonferrous Alloys and Their Heat Treatment*, 9th ed. (Seoul, Korea, Gijeon, 2014) p. 154.