

탄소나노튜브 소재의 정밀 수동소자 적용을 위한 한계 정격전력 용량에 관한 연구

이선우 

인하공업전문대학 전기공학과

A Study on the Limited Rate Power Capacity for Applications for Precision Passive Devices Based on Carbon Nanotube Materials

Sunwoo Lee

Department of Electrical Engineering, Inha Technical College, Incheon 22212, Korea

(Received January 3, 2022; Revised January 27, 2022; Accepted February 7, 2022)

Abstract: We prepared carbon nanotube (CNT) paper by a vacuum filtration method for the use of a chip-typed resistor as a precision passive device with a constant resistance. Hybrid resistor composed of the CNT resistor with a negative temperature coefficient of resistance (T.C.R) and a metal alloy resistor with a positive T.C.R could lead to a constant resistance, because the resistance increase owing to the temperature increase at the metal alloy and decrease at the CNT could counterbalance each other. The constant resistance for the precision passive devices should be maintained even when a heat was generated by a current flow resulting in resistance change. Performance reliabilities of the CNT resistor for the precision passive device applications such as electrical load limit, environmental load limit, and life limit specified in IEC 60115-1 must be ensured. In this study, therefore, the rated power determination and T.C.R tests of the CNT paper were conducted. $-900\sim 700$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$ of TCR, 0.1~0.2 A of the carrying current capacity, and 0.0625~0.125 W of the rated power limit were obtained from the CNT paper. Consequently, we confirmed that the application of CNT materials for the precision hybrid passive devices with a metal alloy could result in a better performance reliability with a zero tolerance.

Keywords: Resistor, Temperature coefficient of resistance (TCR), Carbon nanotube (CNT), Rated power, Passive device

1. 서론

현재 일반적으로 운용되고 있는 전기 기기와 전자 회로 등의 제어를 위한 직류 특성은 리액턴스 성분이 없어 무효 전력으로 인한 손실이 없고, 주파수가 0이므로 표피효과가

없어 전압의 일정성이 유지된다. 또한 동일한 교류전압에 비하여 절연 성능을 높일 수 있는 장점으로 인해 미세 정밀 동작 제어 분야와 전력손실 최소화 분야에서는 교류보다 높은 경제성과 성능으로 각광받고 있다 [1,2]. 이와 같은 직류 환경에서 이차전지 기반의 직류 전력원과 전력 변환손실의 최소화를 위한 DC 배전 분야의 발전으로 직류 전력의 감지, 제어, 분배, 활용 기술의 정확성에 대한 요구가 증가하는 추세이며, 이를 위하여 정밀 저항 수동소자의 성능 개선이 경주되고 있다 [3].

수동소자(passive component)는 회로를 구성하는 부

✉ Sunwoo Lee; swlee@inhatec.ac.kr

Copyright ©2022 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

품 중, 전기적 에너지를 소모, 저장 혹은 전달할 뿐 다른 역할을 하지 않는 소자를 의미하며, 외부전원 없이 단독으로 고유의 특성을 유지한다. 고정 저항 수동소자는 일정하게 유입되는 전류와 전압을 조정 제어하기 위한 성능을 가장 중요한 특성으로 설계되었으며, 성능적 분류법으로 전압을 제어하기 위한 전압 강하용 고정 저항기, 전류를 제어하기 위한 전류 분배용 셉트 고정 저항기로 구성된다. 이는 그림 1과 같이 저항의 직렬 구성을 통한 전압 강하를 이용하여 목표 전압을 제어할 수 있고, 저항의 병렬 구성을 통한 전류 분배를 이용하여 목표 전류를 제어할 수 있어, 전기적 정상 구동을 위한 정격전류, 정격전압을 제어하는 역할을 수행한다 [4].

전류와 전압의 제어를 위한 고정 저항기의 성능적 요구로 인하여 고정 저항기의 저항 일정성과 환경적 변화 및 전기적 부하에 대한 저항 불변성이 가장 중요한 특성으로 관리되고, 원천 성능을 구현하기 위한 재료적, 구조적 설계 접근 방법 또한 해당 범주에서 연구되고 있다. 즉, 회로에서의 고정 저항기의 저항치 고정성은 정격전류와 정격전압의 일정성을 유지하기 위한 유일한 성능이고 전기적 부하 혹은 환경적 요인에 고정 저항기의 저항이 변하는 것은

정전압을 이용하는 배전 전력 환경에서 회로의 요소 및 체로 유입되는 전류 전압 유량의 변동을 의미한다. 이는 특정 평시부하 혹은 과부하에서 그림 2와 같이 저항치 허용 오차가 낮은 저항기가 정격전류와 정격전압을 일정하게 제어하기 용이함을 알 수 있고 이와 같은 저항 변화 요인에 대한 저항 고정성을 확보하기 위한 소재로 탄소나노튜브 (carbon nano-tube, CNT)의 적용이 검토되고 있다 [5].

일반적인 전기 기기의 적용과 극지 환경을 고려한 온도 변화 범위 100°C (25~125°C)에서의 현재 가장 우수한 성능을 보유한 Cu-12wt%Mn-2wt%Ni (이하: 망가닌) 셉트 표준 금속 소재의 저항온도 계수는 약 +50 ppm/°C 정도로 허용오차 기준 ±1% (F급) 이하의 저항기를 제작할 수 없다. 그러나 최근 이차전지의 용량과 통전 전류량이 증가하고, 자율주행자동차, IoT 시스템 환경, 직류 배전 등에서 정밀 수동소자의 성능 향상이 요구되어 0.5% (D급), 0.2% (B급), 0.1% (A급) 허용오차 저항기의 출시가 필요한 시점이다. 이에 기존 단일 합금소재의 성능을 향상시키는 방법과 서로 상이한 저항온도계수를 보유한 복합소재를 적용하는 방법 등이 연구되고 있으며, CNT는 일정한 마이너스 저항온도계수를 보유한 특성으로 인하여 정밀 수동소자 제작 소재로 활용되고 있다 [6]. 이는 온도 상승에 대하여 저항이 하락하는 CNT 소재와 저항이 상승하는 금속소재의 복합 적용을 통한 동적 평형을 유지하는 방법으로 이론적으로 온도 변화에 대한 저항 변화를 최소화할 수 있다. 하지만 정밀 저항기는 적용 회로상의 통전 전류량으로 인한 발열과 저항 변화 요인에 대한 한계적 상황에서도 고정성이 유지되어야 하며, IEC 60115-1에 명시된 전기적 부하한계, 환경적 부하한계, 수명 한계에서의 CNT 복합 적용에 대한 성능 신뢰성이 확보되어야 한다.

이에 본 연구에서는 최근 정밀급 수동소자 제작에 각광 받고 있는 CNT 소재의 정격전력 결정 시험 연구를 통하여 CNT의 적용 형태와 저항에 따른 정격전력의 한계를 확인하고 합금 저항 소재와의 복합 적용에 대한 검토를 실시하였다. 표준 1 W 저항 형상과 크기에 대하여 단기, 장기, 환경적 정격전력 결정 방법을 통해 한계 성능을 시험하여 CNT의 복합 활용을 위한 설계 방향을 제시하였다.

2. 실험 방법

정밀 수동 저항기로 활용성이 높은 셉트 저항기에서의 한계 특성을 확인하기 위하여 셉트 수동 저항기 소자의 최소 사이즈인 1 W 정격전력 제품을 기준으로 샘플을 제작하였다. 샘플은 그림 3(a)와 같이 CNT 용액을 필터를 사용

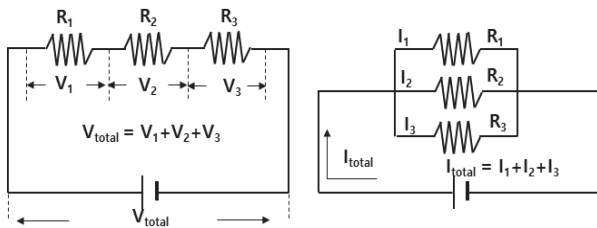


Fig. 1. Voltage drop and current distribution.

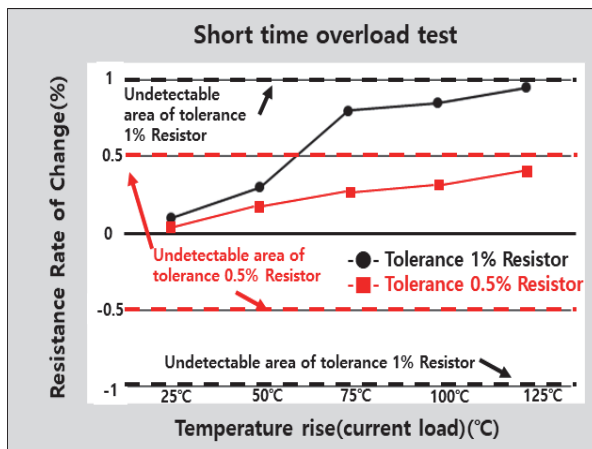


Fig. 2. Tolerance theory in current sensing.

하여 용매만을 통과시켜 필터 위에 CNT 필름 형태로 제작하는 진공 필터링(vacuum filtration) 방법을 활용하여 필름 형태의 CNT 페이퍼를 제작한 후, 기판으로부터 박리하여 준비한다. 이후 그림 3(b)와 같이 선트 1 W 정격전력 제품의 크기와 형태로 각각 50 ea 이상의 샘플을 제작하였다.

CNT 샘플의 조성 조건은 CNT의 두께에 따른 저항 안정성과 특성 변화를 확인하기 위한 조건과 첨가 바인더로의 우레탄 특성을 확인하기 위해 표 1과 같은 조성으로 제작하였다.

실험은 제작된 CNT의 저항 안정성을 확인하기 위해 IEC 60115-1의 초기 저항치 시험기준에 따른 저항시험을 실시하였고, 전기적인 특성으로는 제작 CNT의 온도 변화에 따른 저항 변화, 단시간과부하, 내전압, 납 내열성, 내습부하, PCT 기압조건에 따른 특성 변화에 의한 저항 안정성을 측정하였다. 전기적인 특성의 측정을 위해 각각 비저항이 다른 CNT의 최종 저항 값을 일치시키기 위하여 저항 CNT에 일부 트리밍 구조를 조정하여 시험에 사용할 샘플을 확정하였다. 시험에 사용된 파워 서플라이 전류는 ICE60115-1에 정의된 DC 정 전압에서 변동 전류가 ±2% 이내가 되도록 유지하였다. 실험은 파워 서플라이 BOB사 SGI 330/150, 오실로스코프 Tektronix사 DPO 3022, 저항계측기 Hiyoki사 3227 mΩ Hitester를 사용하였다.

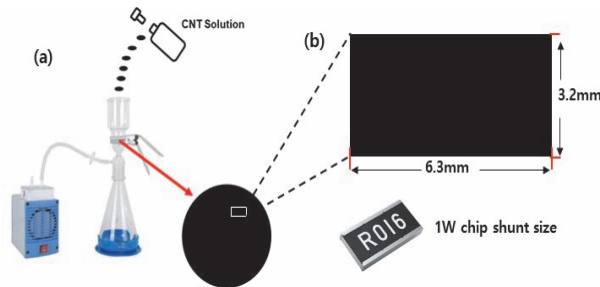


Fig. 3. Test sample preparation process.

Table 1. Fabrication conditions of the CNT paper.

Condition of CNT solution	Fabrication conditions		
	Volume	Method	Peeling
CNT 2 wt%	10 mL	Vacuum filtration	Ethanol
CNT 2 wt%	20 mL		
CNT 2 wt% + 1 wt% urethane	10 mL		
CNT 2 wt% + 1 wt% urethane	20 mL		

3. 결과 및 고찰

그림 4는 각 샘플의 용량과 첨가 우레탄에 따른 초기 저항치를 측정하였고 결과로부터 진공 필터링에 투입된 용액의 양이 많을수록 저항이 낮고 첨가 우레탄이 포함될수록 저항이 높은 것을 확인할 수 있다.

저항 샘플 10개에 대한 저항 산포는 우레탄이 포함된 용액에서 각각 오차율이 16.55%, 11.48%로 높게 나타났고 상대적으로 우레탄이 포함되지 않은 용액에서의 저항산포가 안정적인 것으로 나타났다. 이는 무기 충전제의 분산성을 크게 향상시킬 수 있는 우레탄이 포함된 CNT에서 오히려 저항 산포와 전도도가 저감되는 현상이 나타난 것으로 1%의 낮은 비율의 요인과 분산의 개선이 필요한 것으로 판단할 수 있다 [7,8].

저항을 측정한 CNT 샘플부터 식 (1)과 같이 온도 변화에 따른 CNT의 저항 변화인 저항온도계수를 측정하였고, 각 저항체의 저항 값을 25°C와 125°C에서 실제 저항치를 측정하여 변화율을 확인하였다.

$$T.C.R = \frac{R_2 - R_1}{R_2(T_2 - T_1)} \times 10^6 [ppm/^\circ C]$$

R_1 : 최저온도에서의 저항
 R_2 : 최고온도에서의 저항
 T_1 : 최저온도 (25°C)
 T_2 : 최고온도 (125°C)

그림 5의 대표 샘플 4종의 저항온도계수 평균 시험의 결과로부터 용액의 조성과 우레탄의 첨가 유무에 따라 CNT 페이퍼는 -900~-700 ppm/°C로 음(negative)의 T.C.R을 나타내었으며, 에탄올에 의한 박리를 수행하였어도 CNT

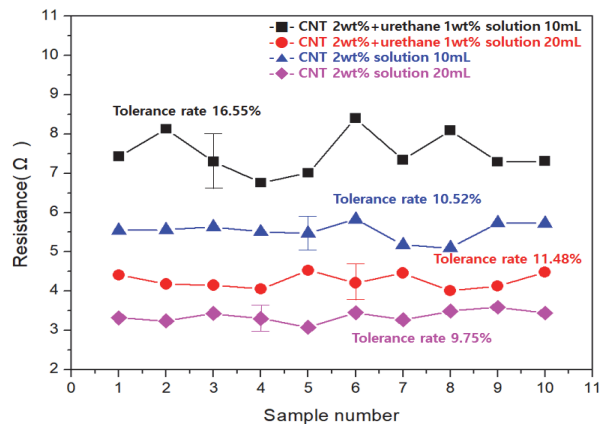


Fig. 4. Resistances for each CNT resistor elements.

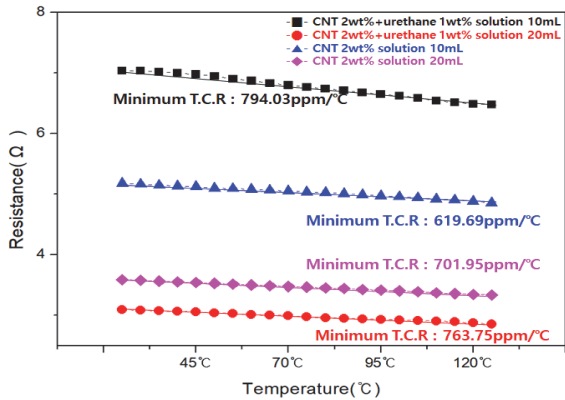


Fig. 5. Changes in CNT resistor with temperature.

파이버에서는 음의 TCR을 나타낸 결과로부터 이론적으로 예측하였던 CNT에서의 음의 T.C.R을 확인할 수 있었다. 이는 CNT를 구성하는 2/3의 반도체성 CNTs의 열적 특성에 의한 저항의 감소 때문에 발생하는 결과라고 판단할 수 있다. 측정된 저항온도계수로부터 환경 및 전기적 부하에 대한 정격전력과 허용오차를 예상할 수 있으며, 일반적으로 100°C 온도 변화 범위 이내에서 -900 ppm/°C가 변하면 오차율 ±10% (K급)의 저항 제작이 일반적이다. 이와 같은 정격전력과 허용오차를 판단하기 위해서는 IEC 60115-1에 명시된 고정 저항기의 특성 시험을 통해 확인이 가능하다.

고정 저항기의 정격전력은 제작된 저항 시리즈가 저항의 변화 없이 일정한 저항을 유지할 수 있는 최대의 부하를 나타낸다. 이는 전류 통전으로 인한 온도 변화 및 환경 요인들에 의한 조건 변화에 얼마나 일정한 저항을 유지할 수 있는가를 시험하여 결정한다. 전력 결정 방법은 제작된 저항기의 정격 전압 결정 식 (2)에 저항 값과 임의의 전력 값 (P)을 지정한 후 IEC60115-1에서 지정한 모든 인정 시험을 만족하면 해당 전력의 능력을 가진다고 판단한다 [9].

$$V = \sqrt{P(W)R} \tag{2}$$

V : 정격전압(V) P : 정격전력(W)
R : 제작된 저항제의 저항(Ω)

그리고 셉트 저항의 전력 결정 과정을 그림 6과 같이 나타내었다. 신뢰성 시험의 대부분은 정격 전압의 몇 배를 단시간 상황, 습도 상황, 압력 상황, 고온 상황 등에 인가하여 저항 값의 변화율이 몇 % 이내일 때 합격으로 판단한다. 어떤 상황에서도 저항이 변하지 않는 능력이 고정 저항기의 최고 성능 지표이고 그런 능력을 낼 수 있는 최대 전력을 찾는 과정이 정격전력의 결정 방법이다.

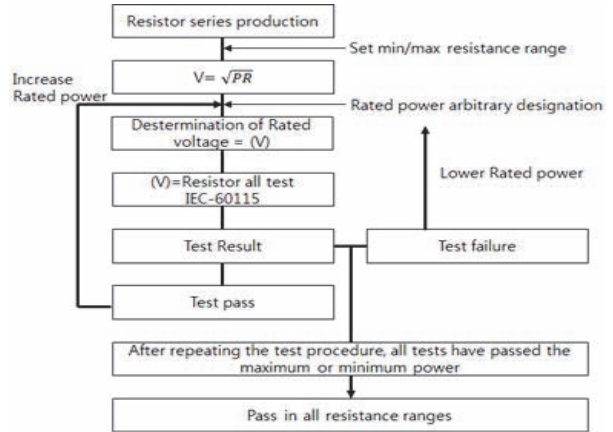


Fig. 6. Determination of rated power of shunt fixed resistor.

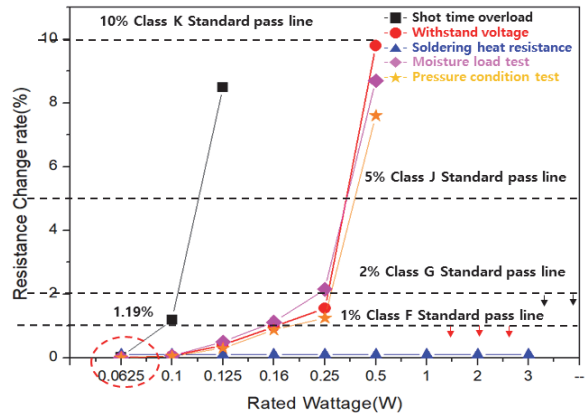


Fig. 7. Rated power determination test result of CNT 2 wt% + urethane 1 wt% solution 10 mL sample.

그림 6과 같은 방법으로 정격전력 결정 시험을 위해 IEC 60115-1에 명시된 5개의 단기 시험을 수행하여 제작된 CNT 저항 소재의 고정 저항기 활용 정격전력을 나타내었다.

그림 7의 결과로부터 고정 저항기의 정격전력에 대한 저항기의 저항치 고정 값을 유지하는 특성은 단시간과부하 성능이 가혹 조건으로 작용함을 알 수 있고 납 내열성의 변화는 3 W 산정 조건까지 없는 것으로 확인된다. 실험에서 모든 1% F급 변화율을 모두 만족하는 특성은 0.0625 W (1/16 W)에서 만족하고 2% G급의 변화율에서는 0.1 W (1/10 W)의 성능을 나타낸다. 이후 단시간 과부하 시험이 0.16 W 이상의 정격전력에서 CNT 저항 소재의 소손이 발생하여 해당 정격전력 이상에서는 사용이 불가능함을 알 수 있다. 즉 CNT 2 wt% + 우레탄 1 wt% 용액 10 mL 샘플은 최대 10% 허용오차 K급에서 0.125 W (1/8 W)까지의 정격전력 능력을 나타냄을 알 수 있다.

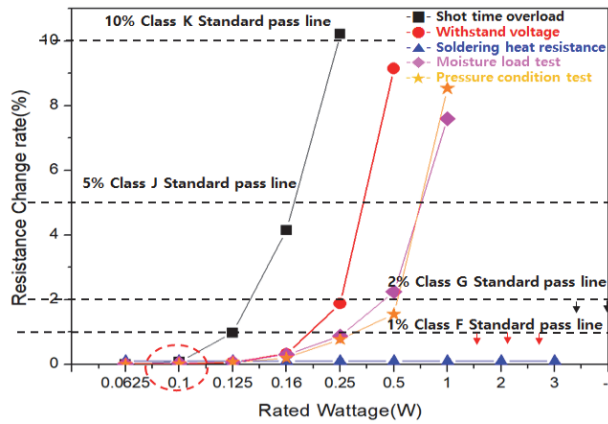


Fig. 8. Rated power determination test result of CNT 2 wt% + urethane 1 wt% solution 20 mL sample.

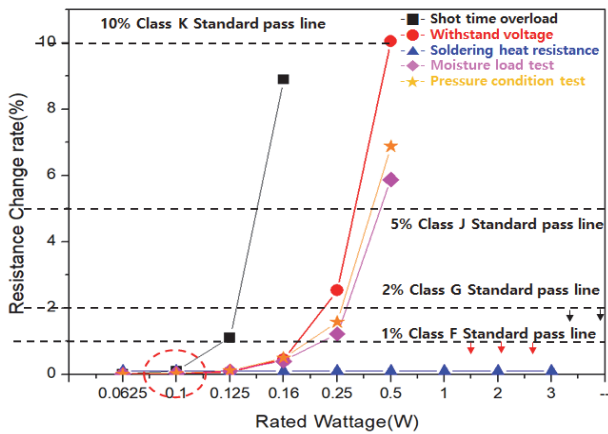


Fig. 9. Rated power determination test result of CNT 2 wt% solution 10 mL sample.

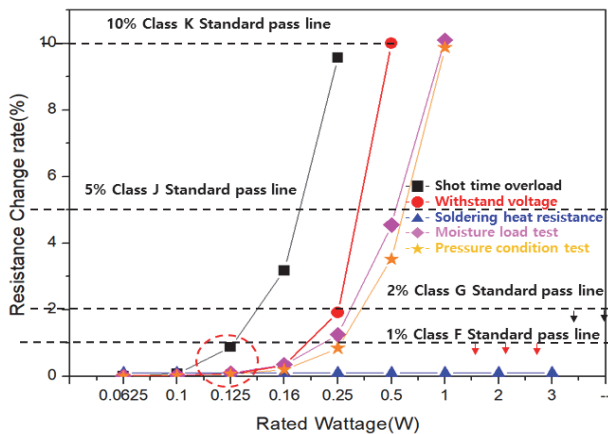


Fig. 10. Rated power determination test result of CNT 2 wt% solution 20 mL sample.

동일한 실험을 통해 CNT 2 wt% + 우레탄 1 wt% 용액 20 mL 샘플, CNT 2 wt% 용액 10 mL 샘플, CNT 2 wt% 용액 20 mL 샘플에 대한 정격전력 성능을 그림 8~10에 나타내었다.

실험 결과로부터 모든 샘플에서 F급 기준 0.1 W 성능을 K급 기준에서 0.125 W 성능을 나타내어 미세한 성능 차이는 있지만 전반적으로 1/8 W 이하에서만 CNT 저항 소재를 사용할 수 있는 것을 알 수 있다. 이는 온도 상승에 직접적으로 관여하는 통전 전류량을 기준으로 식 (3)과 같이 7 Ω의 CNT 2 wt% + 우레탄 1 wt% 용액 10 mL 샘플에서의 정격전류 약 0.1 A인 것을 알 수 있다.

$$V = \sqrt{P(W)R} = \sqrt{0.0625 \times 7} = 0.661437 \quad (3)$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{0.661437}{7} = 0.09449$$

또한 시험에서 가장 F급 기준 가장 높은 정격전력을 나타낸 CNT 2 wt% 용액 20 mL 샘플은 식 (3)과 같은 동일한 계산으로 약 0.2 A를 나타내어 CNT 저항 소재의 두께가 상승하고 저항을 낮은 구조로 구성할수록 높은 통전 전류량을 구성할 수 있음을 확인할 수 있다.

이상의 정격전력 결정 시험과 저항온도계수 시험을 통해 본 연구에서 설계한 CNT 고정 저항용 소재가 온도에 마이너스 거동이 일정하게 나타나 정밀 복합 저항의 적용이 가능하고, 낮은 정격전력 영역에서 정격전력의 한계를 확인하여 향후 적절한 복합 수동소자 설계에 필요한 성능이 구현되었음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 최근 정밀급 수동소자 제작에 있어 각광 받고 있는 CNT 소재의 정격전력 결정 시험과 저항온도계수 특성 시험 연구를 통하여 CNT의 적용 용량과 저항에 따른 정격전력의 한계를 확인하고 합금 저항 소재와의 복합 적용에 대하여 고찰하였다.

제작된 CNT 소재의 안정성과 저항 일정성을 확인하기 위해 IEC 60115-1 고정 저항기 규격에 명시된 초기 저항 시험을 수행하였으며, 이를 통해 진공필터링 공법으로 제작된 CNT 소재의 저항치가 양호하게 제작되었음을 알 수 있었다. 또한 분산을 위한 우레탄 첨가 샘플과 우레탄이 없는 샘플을 구분하여 분산도에 따른 저항치 저항온도계수를 측정하여 -900~-700 ppm/°C의 시험 결과로 플러스 저항온도계수인 금속과의 복합 적용이 가능함을 확인하였

다. CNT가 단독 혹은 복합적으로 적용될 수 있는 최대 한계 전력 범위의 시험을 통하여 0.1~0.125 W의 정격전력, 통전전류량 0.1~0.2 A까지 저항의 일정성이 유지됨을 확인하였고, CNT의 두께에 따라 정격전력과 통전 용량을 높일 수 있어 금속 고정 저항 소재와의 복합 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

본 연구의 결과로부터 정밀 수동 고정 저항의 일정한 동작에 핵심이 되는 저항온도계수와 통전 전류에 의한 정격 전력 한계의 안정성을 높이기 위한 금속 저항 소재와 CNT 저항 소재의 복합 적용에 탄소나노튜브 소재의 한계 특성을 확인하여 향후 적절한 복합 적용 설계의 참고 연구가 이루어졌다고 판단할 수 있다.

ORCID

Sunwoo Lee

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

감사의 글

이 논문은 한국전력공사의 2021년 착수 기초연구개발 과제 연구비(과제번호: R21XO01-7) 지원과 2021년 인하공업전문대학의 지원에 의해 연구되었음.

REFERENCES

- [1] T. Damle, M. Varenberg, and L. Graber, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **21**, 329 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s42341-020-00180-5>]
- [2] G. J. Sun, J. H. Yun, and M. W. Cheon, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **22**, 108 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s42341-020-00279-9>]
- [3] E. M. Kim, M. R. Son, and C. Y. Kang, *Trans. Korean Inst. Electr. Eng.*, **67**, 1055 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.8.1055>]
- [4] F. Zandman, P. R. Simon, and J. Szwarc, *Resistor Theory and Technology, 1st ed.* (Vishy Inter technology Inc, Malvern, USA, 2001) p. 5.
- [5] S. Y. Noh, *Trans. Korean Inst. Electr. Eng.*, **70**, 483 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2021.70.3.483>]
- [6] S. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **34**, 126 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.2.126>]
- [7] A. Fujiwara, R. Iijima, H. Suematsu, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki, and Y. Achiba, *Phys. B*, **323**, 227 (2002). [DOI: [https://doi.org/10.1016/s0921-4526\(02\)00970-5](https://doi.org/10.1016/s0921-4526(02)00970-5)]
- [8] O. Lourie and H. D. Wagner, *Compos. Sci. Technol.*, **59**, 975 (1999). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(98\)00148-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00148-1)]
- [9] J. S. Hwang and H. J. Kim, Korea Standards, 2008, KS C 60115-1, 15. 06.