

낮은 저항과 열안정성을 가지는 Cu/Mn 합금저항의 전기적 특성

김은민¹, 김성철², 이선우^{3,a}

¹ 기초전력연구원 전기에너지변환연구팀

² 삼우와이어 부설연구소

³ 인하공업전문대학 전기정보과

Electrical Properties of Cu/Mn Alloy Resistor with Low Resistance and Thermal Stability

Eun Min Kim¹, Sung Chul Kim², and Sunwoo Lee^{3,a}

¹ Electric Energy Conversion Research Team, Korea Electrical Engineering & Science Research Institute, Seoul 08826, Korea

² Research Center, Samwoo Wire Co., Incheon 21315, Korea

³ Department of Electrical Information, Inha Technical College, Incheon 22212, Korea

(Received April 19, 2016; Revised April 22, 2016; Accepted April 25, 2016)

Abstract: In this paper, we fabricated Cu/Mn alloy shunt resistor with low resistance and thermal stability for use of mobile electronic devices. We designed metal alloy composed of copper (Cu) and manganese (Mn) to embody in low resistance and low TCR which are conflict each other. Cu allows high electrical conductivity and Mn serves thermal stability in this Cu/Mn alloy system. We confirmed the elemental composition of the designed metal alloy system by using energy dispersive X-ray (EDX) analysis. We obtained low resistance below 10 mΩ and low temperature coefficient of resistance (TCR) below 100 ppm/°C from the designed Cu/Mn alloy resistor. And in order to minimize resistance change caused by alternative frequency on circuit, shape design of the metal alloy wire is performed by rolling process. Finally, we conclude that design of the metal alloy system was successfully done by alloying Cu and 3 wt% of Mn, and the Cu/Mn alloy resistor has low resistance and thermal stability.

Keywords: Cu-Mn alloy, Shunt resistor, Low resistance, Thermal stability, TCR

1. 서론

IT 기술의 발전으로 인한 Network 기반의 휴대용 전자기기 시장이 크게 성장하고 있으며, 이에 따른 전

자기기의 소형화, 대용량화, 고효율화를 위한 전자소자가 요구되어지고 있다 [1]. 특히, 전력손실이 적은 고효율 기반의 전자기기에서 정격전력이 높은 제품과 열에 안정하여 고정 저항기로서의 저항값의 변화가 거의 없는 셉트저항이 강력히 요구되어지고 있다 [2]. 셉트저항은 적용 회로상의 증가한 통전 전류량으로 인한 발열문제로 정격전력이 높아야 하며, 효과적으로 전류를 분배하기 위해 저항이 낮아야 하고, 발열에 의한 온도상승으로 인한 저항값의 변화를 낮추기 위해 낮은

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

저항온도계수를 가져야 한다.

금속은 온도가 상승함에 따라 열에너지에 의한 금속 격자의 진동이 활발해져 전자의 이동을 방해하여 저항값이 증가하는 현상이 발생한다. 이를 전자의 평균 자유 행로(mean free path) 감소로 해석할 수 있으며 이렇게 저항값이 온도에 따라 변화하는 비율을 저항온도계수(temperature coefficient of resistance, TCR)라 한다 [3]. 단일 순 금속의 TCR은 모든 금속에서 3,000 ppm 이상으로, TCR을 낮추기 위해 TCR을 안정시킬 수 있는 금속과의 합금 형태로 저항을 제작하여 사용하고 있다. 그러나 TCR을 낮추기 위한 순 금속의 합금화는 전도도가 우수한 금속을 적용하여도 순금속에 비하여 전기 전도도를 하락시킨다 [4]. 때문에 시장에서 요구하는 선트저항의 특성을 만족시키지 못하고 있으며, 낮은 저항값과 낮은 저항온도계수를 가지는 합금 저항재료의 개발이 시급한 실정이다.

금속재료의 저항온도계수와 비저항은 반비례하는 관계를 가지고 있기 때문에, 낮은 저항의 구현을 위해서는 합금의 함량을 최소로 유지해야 하지만 저항온도계수를 낮추기 위해서는 합금의 함량을 높여야 하는 모순된 관계가 있어서 개발을 더욱 어렵게 하고 있다 [5]. 이러한 기술적인 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 합금의 함량을 최소로 하여 낮은 저항값을 유지하면서 낮은 저항온도계수를 확보하고자 하였다. 일반적인 TCR 안정화 재료로 많이 쓰이는 실리콘(Si)과 망간(Mn)은 재료의 전기음성도에 따라 각각 다르게 적용해야 하며, 철(Fe)과 크롬(Cr) 등의 재료에는 Si 계열이, 동(Cu)과 니켈(Ni) 등의 재료에는 망간 계열이 TCR 감소에 효과적이다 [6,7]. 때문에 합금 조성의 설계는 대표적인 저저항 재료로서 사용되는 Cu를 기준 금속으로 하여 Mn을 미량 첨가하여 낮은 저항과 낮은 TCR 특성을 동시에 가지는 합금을 설계하였다.

2. 실험 방법

낮은 저항과 낮은 TCR 특성을 동시에 가지는 합금을 설계하기 위해 기준 금속인 Cu에 Mn을 각각 3, 9, 그리고 14 wt%의 합금을 진공용융로에서 용융하여 잉곳 형태로 제조하였다. 이후에 분산화 열처리와 상하부 편석제거를 통해 농도를 조정하고 압출을 이용하여 와이어 형태로 제조한 후, 신선 공정을 통해 완제품 형태의 와이어를 제조하였다. 본 연구에서는 표피효과에 의한 저항의 주파수 의존성을 낮추기 위해 압연공정을

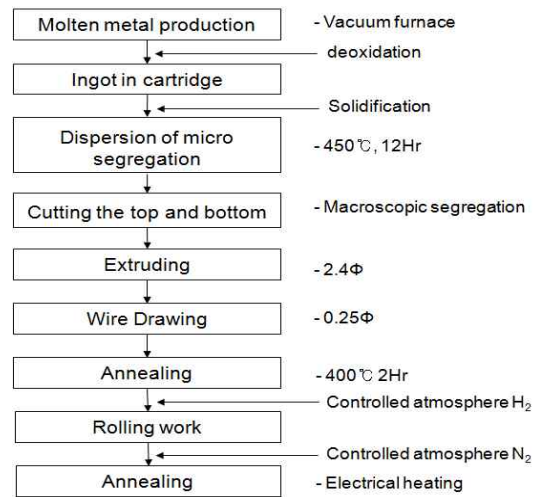


Fig. 1. Schematics of process for metal alloy wire preparation.

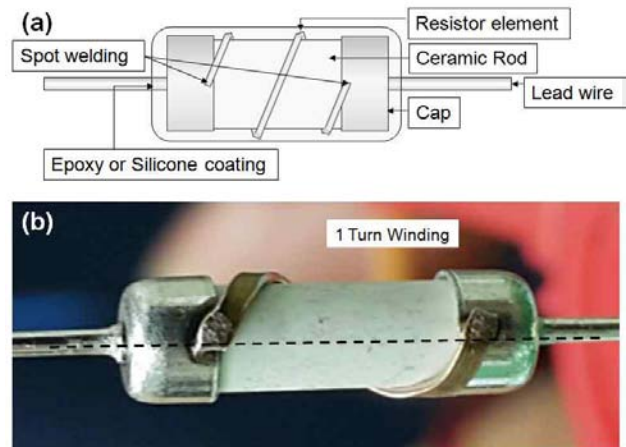


Fig. 2. (a) Structure and (b) image of the resistor for measuring electrical properties.

추가로 진행하였다. 이상의 공정을 그림 1에 도식화하여 나타내었다 [8].

제작된 합금 와이어의 조성을 확인하기 위해 EDX (energy dispersive X-ray) 분석을 수행하였으며, 전기적인 특성으로는 합금의 조성에 따른 저항 변화, 온도변화에 따른 저항 변화, 주파수 변화에 의한 저항 변화 등을 측정하였다. 그림 2(a)에 전기적인 특성의 측정을 위해 제작한 저항체의 구조를 나타내었다.

저항의 제작은 $4.5 \times 14 \text{ mm}^2$ 표준 3 W 고정 저항기의 세라믹 Al_2O_3 함량 75%를 사용하였고, 아연 함량 22 wt%의 황동 cap과 주석을 도금한 순동의 lead wire

를 단자로 사용하였다. Wire wound 저항 제작 시 세라믹 rod와의 접촉 면적은 저항 금속의 열을 분산시켜 저항기의 정격전력을 상승시키는 요인이 되기 때문에 용접 후 winding은 최소 1턴 이상이 되어야 한다. 또한, 저항 금속의 높은 선경으로 인하여 저항금속이 cap 단자 보다 높을 경우 내전압, 절연저항이 파괴될 우려가 있어 선경은 cap의 높이를 넘지 않는 한도에서 제작한다 [9]. 이와 같은 제작 방법을 적용하여 최종 wire의 선경을 0.25 ϕ 로 결정하여 그림 2(b)와 같이 1턴의 winding을 하여 샘플을 제작하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3에 제작된 합금 저항의 조성을 확인하기 위해 측정된 EDX 결과를 나타낸다. 그림 3(a)로부터 3 wt%의 Mn, 그림 3(b)로부터 9 wt%의 Mn, 그리고 그림 3(c)로부터 14 wt%의 Mn 함유량을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 설계한 함량의 합금 와이어가 양호하게 제작되었음을 알 수 있다.

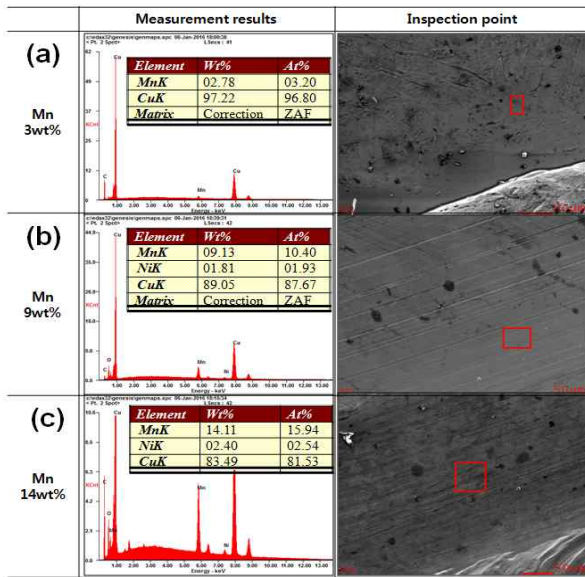


Fig. 3. EDX analysis for metal alloy resistors; (a) Cu-3 wt%Mn alloy and (b) Cu-9 wt%Mn alloy, and (c) Cu-14 wt%Mn alloy.

그림 4에 합금 저항체의 동일 선경 적용 시 합금 조성에 따른 저항값을 나타낸다. 3, 9, 14 wt%의 Mn이

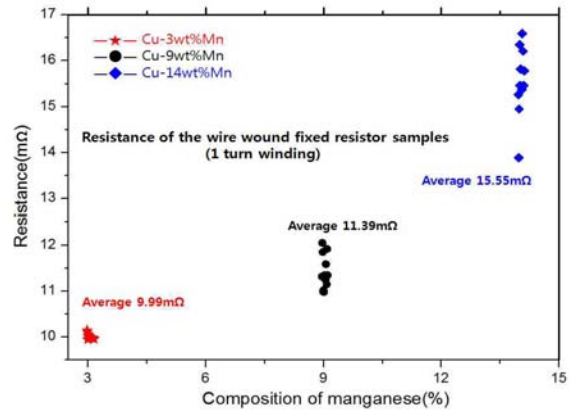


Fig. 4. Resistances for each metal alloy resistors.

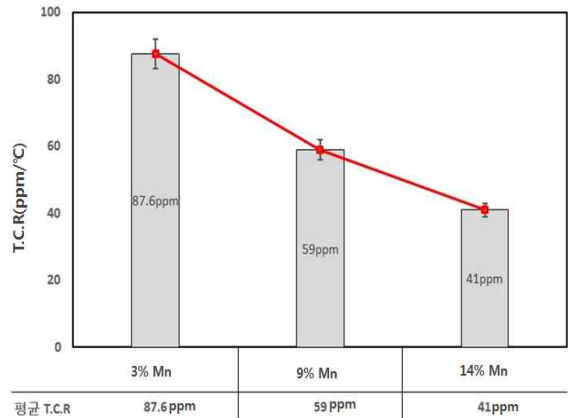


Fig. 5. Resistance changes with the temperature between 25 to 125 °C for the Cu-Mn alloy.

포함된 Cu-Mn 합금에서는 각각 9.99 mΩ과 11.39 mΩ, 15.55 mΩ의 평균 저항값이 측정되었다. 이러한 결과로부터 3 wt%의 Mn이 포함된 Cu-Mn 합금을 제외한 다른 조성의 합금은 저항체에서 1턴 이상 winding 시 10 mΩ 이하의 저항을 구현할 수 없어 Cu-3 wt%Mn만이 효과적인 합금 설계가 시행된 것을 알 수 있다.

그림 5에는 온도 변화에 따른 합금 저항체의 저항 변화율을 나타내었으며, 각 저항체의 저항값을 25°C와 125°C에서 측정하여 변화율을 나타내었다 [10]. 실험 결과 3 wt%와 9 wt%, 14 wt%의 Mn이 포함된 Cu-Mn 합금에서는 각각 최종 TCR 평균 89 ppm과 59 ppm, 41 ppm의 저항온도계수가 측정되었으며, Mn의 함량에 따라 비례적으로 TCR이 낮아짐을 확인하였다.

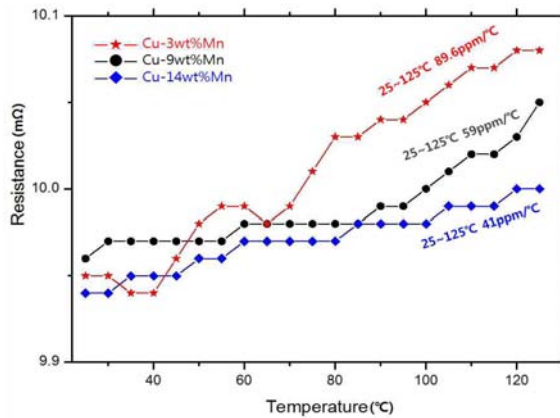


Fig. 6. Trends of changes in the TCR due to a change in temperature.

그림 6에는 각 온도에 따라 각 시료의 저항이 변화되는 추이를 나타내었으며, Mn의 함량이 많을수록 저항 변화가 안정적이며, 적게 일어남을 확인하였다. 하지만 Mn의 대량 첨가는 Cu 모재의 전기전도성에 좋지 않아 목표한 저저항 특성을 구현하기 힘들게 된다. 이상의 결과로부터 낮은 저항을 구현하기 위한 합금 설계와 낮은 저항온도계수를 구현하기 위한 합금 설계가 서로 상충되는 관계가 있음을 확인할 수 있었으며, 본 연구에서 설계한 합금 조성 중 Cu-3wt% Mn이 특성을 만족하여 적절한 합금 설계가 이루어졌음을 알 수 있다.

그림 7(a)에 Cu-Mn 합금에서의 주파수 변화에 따른 합금 저항체의 저항 변화율을 나타내었으며, 각 저항체의 저항값을 10 mΩ으로 제작하여 0 Hz부터 2 MHz까지 측정하여 변화율을 나타내었다. 3 wt%와 9 wt%, 14 wt%의 Mn이 포함된 Cu-Mn 합금 각각 전원 주파수 기준인 60 Hz에서 0.09%, 0.12%, 0.14%의 주파수 의존성이 관측되었다. 이는 고정 저항기의 저항이 거의 변화하지 않은 안정적인 상태이며, 30 kHz까지의 성능은 특성을 만족함을 알 수 있다. 하지만 100 kHz 이상의 주파수에서는 저항이 큰 폭으로 상승하였고, 최종적으로 2 MHz에서 각각 20.33, 23.49, 26.65%의 저항이 상승하였다. 이러한 주파수 의존성은 압연공정을 거치지 않은 환선 와이어를 사용하여 제작한 저항체의 주파수 의존성에 비해 상당히 개선된 특성이다. 그림 7(a)에서 압연 와이어를 사용하여 제작한 저항체와 동일한 조건으로 압연을 하지 않은 환선 와이어 저항체를 제작하여 주파수 의존성을 확인하였다.

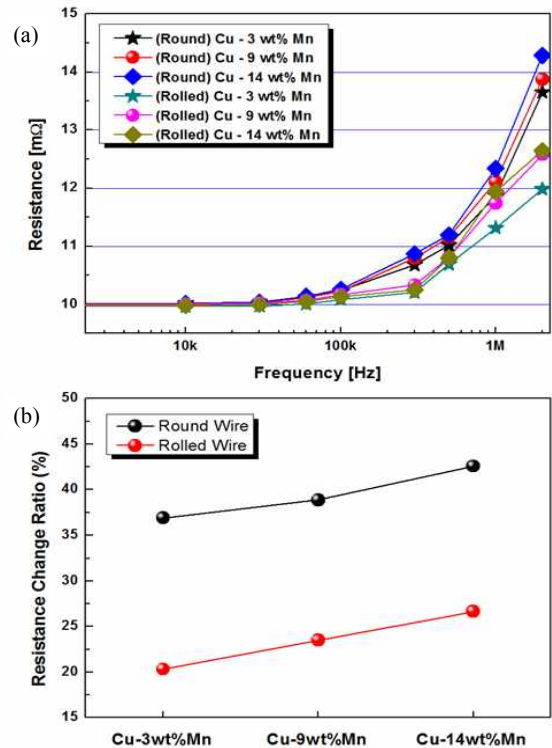


Fig. 7. Frequency dependence of the resistance; (a) resistance with the frequency between 0 Hz to 2 MHz for the Cu-Mn alloy wire resistors with and without the rolling process and (b) resistance change ratio at 2 MHz.

환선 와이어를 사용한 저항체는 그림 7(a)에서와 같이 30 kHz까지는 적은 변화를 유지 하지만 이후 주파수의 영향으로 저항이 빠르게 상승하며, 압연선 보다 높은 저항 상승률을 보인다. 그림 7(b)에 압연 와이어와 환선 와이어의 2 MHz 주파수에서 특성 차이를 나타내었고, 이는 압연공정을 통해 와이어의 두께를 줄임으로써 주파수의 증가에 의해 skin depth가 감소하여 나타나는 표피효과가 최소화되어 나타난 결과라고 판단할 수 있다 [11].

4. 결론

본 논문에서는 휴대용 전자기기용 낮은 정격전력의 선평저항으로 사용하기 위한 저항체의 요구 특성인 낮은 저항값과 낮은 저항온도계수를 구현하기 위해 합금 설계를 구현하였으며, 설계한 합금 저항체의 전기적인

특성을 고찰하였다. 제작된 합금 저항의 조성을 확인하기 위해 측정된 EDX 분석을 수행하였으며, 설계한 합금량의 합금 와이어가 양호하게 제작되었음을 알 수 있었다. 설계한 합금 저항체에서 10 mΩ 이하의 저항을 얻었으며, 낮은 저항을 구현하기 위한 합금 설계와 낮은 저항온도계수를 구현하기 위한 합금 설계가 서로 상충되는 관계가 있음을 확인하였다. 압연공정을 거치지 않은 저항체의 주파수 의존성에 비해 압연공정에 의해 개선된 주파수 의존성을 얻었으며, 이러한 결과는 압연공정에 의해 표피효과가 최소화되어 나타난 특성이라고 생각할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 중소기업청의 재원으로 산학연 협력 기술개발사업(첫걸음)의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. C0275691).

REFERECES

- [1] E. M. Kim, S. H. Lee, D. K. Cho, S. H. Kim, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, **63**, 1070 (2014).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2014.63.8.1070>]
- [2] 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>]
- [3] M. S. Huh, S. W. Choi, H. G. Chun, S. C. Kwon, G. H. Lee, and T. Y. Cho, *Journal of Vacuum Society*, **6**, 77 (1997).
- [4] Y. G. Ko, C. W. Lee, S. Namkung, D. H. Lee, and D. H. Sin, *The Korean Society For Technology of Plasticity*, **18**, 476 (2009).
- [5] F. Zandma, P. R. Simon, and J. Szwarc, *Resistor Theory and Technology, 1st ed.* (Malvern, U.S.A, Vishy Inter Technology Inc., 2001) p. 76-77.
- [6] F. Zandma, P. R. Simon, and J. Szwarc, *Resistor theory and Technology, 1st ed.* (Malvern, U.S.A, Vishy Inter Technology Inc., 2001) p. 52-55.
- [7] H. A. Harper, *Electronic Materials and Processes Handbook* (New York, U.S.A, McGraw-hill, 2010) p 4.1~4.71.
- [8] D. A. Potter, K. E. Easterling, and M. Y. Sherif, *Phase Transformation in Metals and Alloys London, 3rd ed.* (UK, Garland Science, 2010) p. 213~217.
- [9] S. H. Kim, J. W. Choi, D. W. Kim, and H. H. Kim, *Journal of the Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, **22**, 210, (2009).
- [10] T. Y. Yoon and Y. K. Koo, *Fixed Resistors for Use in Electronic Equipment-part 1 : Generic Specification, Korea, Standards, KS C IEC- 60115*, 15-16 (2006).
- [11] K. F. Gooddard, A. A. Roy, and J. K. Sykulski, *IEE Proc. Sci. Meas. Technol.*, **152**, 7 (2005).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/ip-smt:20051057>]