


직류전류측정기의 안전성 향상을 위한 고내구성 보호소자의 가용체 설계

이예지¹, 윤재서¹, 조성철², 노성여³ 

¹ 부경대학교 기술경영학과

² 알포에스 개발팀

³ 동명대학교 항만물류시스템공학과

Design for a Fuse of High Durability Protection Elements for Improving the Safety of DC Current Measurement Device

Ye Ji Lee¹, Jae Seo Youn¹, Sung Chul Cho², and Sung Yeo Noh³

¹ Graduate School of Management of Technology, Pukyong National University, Busan 48547, Korea

² Development Team, R4S, Busan 47837, Korea

³ Department of Port Logistics System, Tongmyong University, Busan 48520, Korea

(Received December 26, 2019; Revised January 6, 2020; Accepted January 10, 2020)

Abstract: With the expansion in the use of DC power systems and increased need for system maintenance, the development of measurement devices for maintenance requires high stability. Of the different kinds of DC current measurement devices, the single-shot measurement device causes the input signal of the current measuring unit to initially generate a high inrush current. The high inrush current flows into the signal processor of the meter, shortening the life of the internal fuses and causing failure. Therefore, in this study, the I^2t value for increasing the durability of the fuse is designed using the available wire diameter. Operating characteristics for 210~400% over-current of the rated current, which is relatively low over-current, are realized by the plating of low melting tin metal. As a result, a method of designing a fuse element for a DC power supply, which improves the safety of the DC current measurement device by blocking the failure caused by the inrush current, is presented.

Keywords: Fuse, Sub-miniature, Durability, Single-shot, Inrush current

1. 서론

최근 전기 자동차 및 ESS의 에너지저장 시스템으로 사용되고 있는 이차전지는 사용과 충전, 그리고 방전 시 하한까지 사용 가능한 장점으로 인하여 직류전원 체계를 사용하고 있다. 이와 같은 이차전지의 직류 운

영 체계는 충전 시에는 일정 전압까지 CC (constant current) 모드로 충전하고 일정 전압 도달 후에는 CV (constant voltage) 모드로 변경 충전하여 충전의 효율과 속도를 높이며, 방전 시에는 직류 CC 모드로, 방전 하한전압까지 일정한 방전을 할 수 있게 된다 [1]. 하지만 이와 같은 이차전지 기반 에너지 저장장치의 직류 운영체계는 교류 기반 전력체계와 달리 전류의 변화가 없어 전류와 전압의 측정이 용이하지 않다. 특히 셉트의 실장이 없이 통전 선로를 유지하며 전류를 측정하는 방법은 홀센서(hall sensor)를 사용할 수밖에 없지만, 최근 이차전지의 용량이 상승하며 에너지 저장

✉ Sung Yeo Noh; nsy@tu.ac.kr

Copyright ©2020 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.

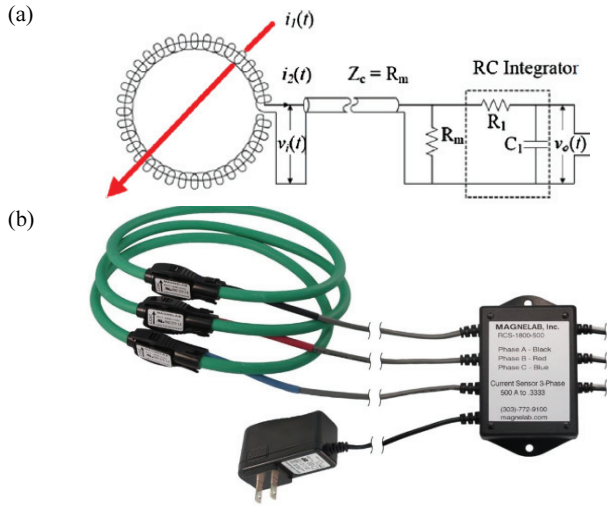


Fig. 1. (a) Equivalent circuit of rogowski coil with passive integrator and (b) rogowski coil single-shot current measuring system.

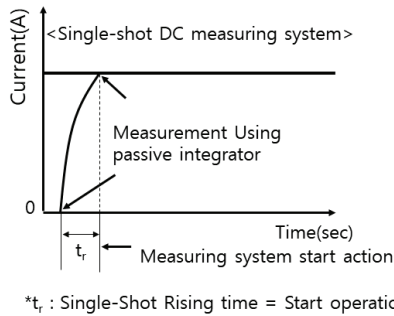


Fig. 2. Method of single-shot DC measurement.

장치의 통전 전류량이 증가하는 추세에서 상대적으로 고가인 높은 전류 측정용 홀센서를 산업적으로 도입하기 힘든 실정이다 [2]. 이에 직류 기반 이차전지의 유지 보수 산업에서는 그림 1과 같이 상대적으로 제작 단가가 낮고 시스템의 구성이 간단하며, 통전 선로에서 단선 및 정전작업 없이 전류량의 측정이 가능한 로고스 키코일형 싱글샷 전류측정 장치가 사용되고 있다 [3].

하지만 그림 2와 같이 측정 장치에서 전원 버튼을 사용한 on/off 동작으로 임의의 전류 상승 기틀을 만들어 측정하는 싱글샷 측정 장치의 측정 방법으로 인해 동작 돌입전류가 발생하고, 이는 시스템의 내구성에 영향을 미치며 수명하락과 고장을 일으키는 원인이 된다 [4]. 이는 시스템 전원 인가 시 발생하는 돌입전류에 서지 보호 부품 없이 직접적으로 영향을 받는 1차 측 최초 메인 보호소자가 동작하기 때문이며 보호

소자의 보호 동작을 유지하며 내구성을 상승시키는 부품 설계가 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는 일반적인 전기 전자 제품에서 요구되는 전원 인가 동작 10만 회 내구정보다 2배 이상 높은 내구성을 가지는 보호소자의 가용체 설계를 통하여 제품 전원을 이용한 싱글샷 측정 장치에서의 돌입전류 내구성을 확보한 보호소자를 설계하였고 보다 안전하고 고장이 적은 전원인가형 시스템용 보호소자를 제시하였다.

2. 실험 방법

2.1 퓨즈 내구성 설계

회로 내에서 특정한 요인으로 발생한 과전류 및 돌입전류 발생에 대하여 전류를 제한하여 화재와 폭발을 방지하는 과전류 보호소자는 일반적으로 퓨즈가 사용된다. 그리고 배전전원 1차 측에서 유입 전류 및 전압에 대한 보호동작을 수행하기 위한 퓨즈는 250 V 메인 퓨즈가 사용되며 IEC 60127-2 카트리지 퓨즈와 IEC60127-3 서브미니어처 퓨즈(Sub-miniature fuse 이하, 초소형퓨즈)가 메인 퓨즈로 사용된다 [5].

$$E(\text{에너지}) = I^2 \times t \tag{1}$$

E: 제품으로 유입되는 에너지

I=실효 전류, t=인가시간(초)

일반적인 단락에 의한 과전류 발생 상황에서 한류형 퓨즈에 의한 보호 동작은 그림 3과 같이 유입 전류의 급격한 상승에 대하여 pre-arcing 시간과 post-arcing 시간의 합으로 결정되고 이때의 가용체의 용단에 이르는 에너지 값은 무차원 값으로 식 (1)과 같이 I^2t 값으로 결정된다. 즉 유입되는 전류에 대하여 퓨즈가 용단되지 않을 최대 수명은 해당 I^2t 값의 비교를 통해 결정되고 결과는 유입 돌입전류에 대한 최대 내구성 보장 횟수로 도출된다.

퓨즈의 동작은 전류가 상승함에 따라 퓨즈의 용단 시간은 빨라지고 어느 시점 이후에는 열 이동이 시작되기 이전 시간에 용단이 발생하게 되며, 이 시점을 IEC 60269 규격은 용단시간이 0.01초에 이르는 전류로 규정하고 있다 [6]. 해당 영역에서는 식 (1)의 발열이 손실 없이 적용되며, 고유의 가용체 한계 전류 에너지를 확인할 수 있고 전류원에 의한 전류 인가 에너

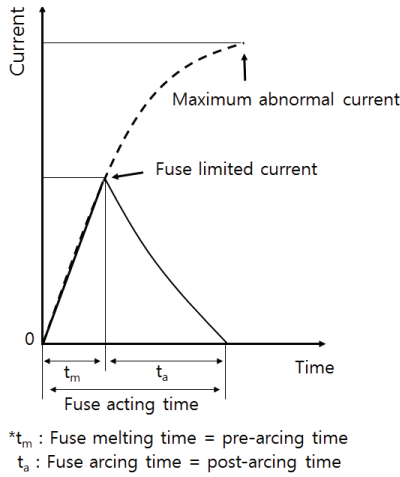


Fig. 3. Current-limit operation of fuse.

지도 식 (1)과 같이 무차원 값으로 I^2t 값의 계산으로 결정되어 해당 값의 비교를 통해 제품이 받는 에너지의 비교가 가능하다. 이때 퓨즈의 고유 에너지를 결정하는 높은 전류에서의 동작 시간은 전체 I-T 커브의 이동을 통해서만 가능하고, I-T 커브의 이동에 영향을 미치는 전기 환경 인자는 간단한 계산을 통해 알 수 있으며, 퓨즈에 흐르는 전류는 에너지이며 전류상의 에너지 P는 다음의 식 (2)와 같이 정의된다.

$$P = V \times I \quad (2)$$

해당식의 물성적 해석을 위하여 재료의 고유 물성인 저항의 범주로 전압을 유도하면 식 (3)과 같다.

$$V = I \times R \Rightarrow R = \frac{\rho L}{A} \quad (3)$$

$$V = I \times \frac{\rho L}{A} \Rightarrow A = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$V = I \times \frac{4\rho L}{\pi D^2}$$

P: 정격전력, V: 전압, I: 정격전류, R: 가용체의 저항,
 ρ: 가용체의 도전율, L: 가용체의 길이,
 A: 가용체의 단면적, D: 가용체의 선경

식 (2)에 식 (3)을 대입하여, 불변 상수 값을 제외시키면, 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$P = I \times \frac{4\rho L}{\pi D^2} \times I / P = I^2 \times \frac{1}{D^2} / I^2 \propto D^2 \quad (4)$$

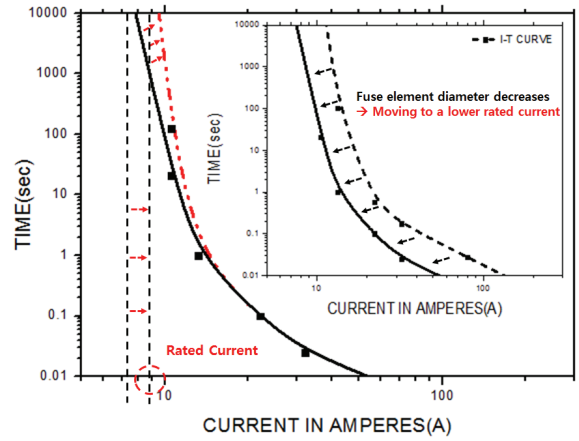


Fig. 4. The method design characteristics for durability.

식 (4)의 계산 결과로부터 퓨즈의 I-T 커브를 이동시키기 위해서는 가용체의 선경 변화가 필요하고 높은 수명을 만족시키기 위해서는 선경이 증가해야 한다. 하지만 가용체의 직경을 상승시킬 경우 퓨즈의 정격전류가 상승하게 되고 210~400% 동작시간이 지연되어 퓨즈의 특성을 만족할 수 없다 [7]. 때문에 퓨즈의 선경은 상승시키고 동작특성을 유지하기 위한 가용체의 설계가 필요하며 그림 4와 같이 선경의 조정을 통한 I-T 커브의 이동 후 저용점 금속의 도금을 이용한 세부 특성 조정이 필요하다.

이와 같은 퓨즈의 수명 특성을 고려하여 싱글샷 전류 측정 장치와 같은 제품 시작 돌입전류가 계속해서 발생하는 장치에서의 퓨즈 수명을 상승시키기 위해서는 가용체에 선경 상승과 저용점 금속, 특히 주석의 확산을 이용한 일반 과전류에 대한 동작 설계가 중요하다.

2.2 실험 샘플 제작 및 실험 방법

전원 인가형 싱글샷 전류 측정 장치는 유지 보수를 위한 휴대성을 고려하여 설계된 제품이 대부분으로 시스템 구동을 위한 최소한의 회로 공간만이 허용되어 상대적으로 적은 회로 공간에서 적용하는 IEC60127-3 초소형 퓨즈를 대상으로 돌입전류 내구성 가용체 실험을 실시하였다.

일반적으로 전기기기의 입력 단에 사용되는 메인 초소형 퓨즈는 반밀폐형 직육면체의 형상으로, 구조는 유지하면서 돌입전류 내구성은 상승시키기 위하여 내부 구조와 형상을 그림 5와 같이 제작하였다.

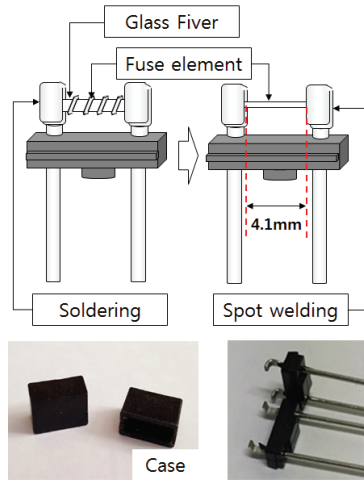


Fig. 5. Test sample structure of sub-miniature fuse.

퓨즈 가용체 실험은 구조상 열 집중에 용이한 가용체 구조로 인한 열 이동의 영향을 최소화하기 위하여 환선 형태의 퓨즈 금속 가용체를 구성하였다. 재료의 영향과 저용점 금속 도금 두께의 영향을 확인하기 위하여 상용 퓨즈에 많이 적용되는 구리에 니켈 함량을 조정하여 합금을 제작하였고 이 중 순동과 합금 함량이 가장 많은 Cu-45Ni은 도금 두께에 따라 세분화 시험을 실시하였다. 제작 방법은 기존 금속인 Cu 100 wt%에 니켈을 각각 5, 10, 20, 45, 65, 85 wt%의 합금을 진공 용융로에서 용융하여 잉곳 형태로 제조하였고 조성은 표 1 합금 조성표와 같다.

이후에 분산화 열처리와 상하부 편석제거를 통해 농도를 조정하고 인발 신선 공정으로 거쳐 와이어로 제작하였다. 제작된 합금의 조성을 확인하기 위해 EDX (energy dispersive X-ray) 분석을 수행하였으며, 이후 건욕된 주석 도금액에 와이어 랙(rack)도금 방식으로 주석 도금을 실시하였다.

항산 주석을 이용한 도금 건욕 조성표와 도금 조건은 표 2와 같으며, 도금의 두께는 와이어 선경 체적의 10%, 20%, 30%와 같이 체적에 비례한 두께 변화로 실험을 실시하였다.

실험은 일곱 종류의 합금을 선경과 도금 두께에 따라 제품 제작하여 모든 시료의 불량 단선 여부 등을 확인하였다. 각 시료 군은 최소 50개 이상의 예비 시료를 확보하고 기판 실장 후 모든 시료의 전기저항을 측정하고 기록하였다. 이후 파워 서플라이를 사용하여 전기적 특성 실험을 실시하였고, 전류에 따라 용단되는 시간을 분석하여 시험 결과를 도출하였다. 용단 실험

Table 1. Composition of the metal alloys.

Alloy	Composition (wt%)	
	Cu	Ni
Cu100	100	-
Cu-5Ni	95	5
Cu-10Ni	90	10
Cu-20Ni	80	20
Cu-45Ni	55	45
Cu-65Ni	35	65
Cu-85Ni	15	85

Table 2. Fine wire plating condition.

Solution composition	1 layer plating	
	Component	Contents
	SnSO ₄	50 g/l
H ₂ SO ₄	180 g/l	
Top-10 (additive)	30 ml/l	
T-AC (brightener)	30 ml/l	
Plating condition	Condition	
	Temperature	25 °C
	Current density	2.5 A/dm ²
	pH	4
Barrel speed	40 rpm/min	

간 파워 서플라이 전류는 ICE 60127-1에 정의된 DC 정전류에서 변동 전압이 60 V 이내 있도록 유지하였다. 실험은 파워 서플라이 Power-soft사 800/8000, 오실로스코프 Tektronix사 DPO 3022, 저항계측기 Hiyok이사 3.227 mΩ Hitester를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 6에 초소형 퓨즈로 제작된 합금 가용체가 전기 기기에 대한 설계의 영향을 최소화하기 위한 저항 값을 측정하였다. IEC 60127-4에 명시된 전압강하 기준에 따라 낮은 차단용량 제품 1~10 A의 퓨즈는 정격전류 통전에 대하여 140 mV 이하의 전압 강하를 유지해야 하며 이는 “보호소자는 단지 보호의 역할만 수행할 것”을 명시한 규격적 정의에 의한 것이다 [8]. 또한 퓨즈의 저항 증가는 전류 통전 시 발열량과 비례하기 때문에 퓨즈의 정격과 관련이 있다 [9]. 즉 퓨즈의 저항이 증가할수록 동일한 전류에서 퓨즈가 용단되는 시간이 빨라지고 정격은 하락한다.

실험 결과 그림 7과 같이 순금속(순동)일 때 가장 전기 전도도가 우수했으며, 합금의 함유량이 증가할수록

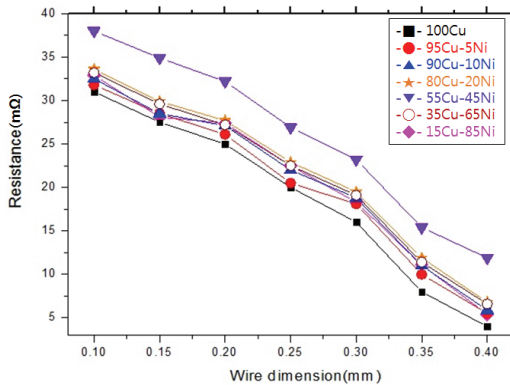


Fig. 6. Change in resistance according to the wire diameter and the composition of Ni-Cu alloy.

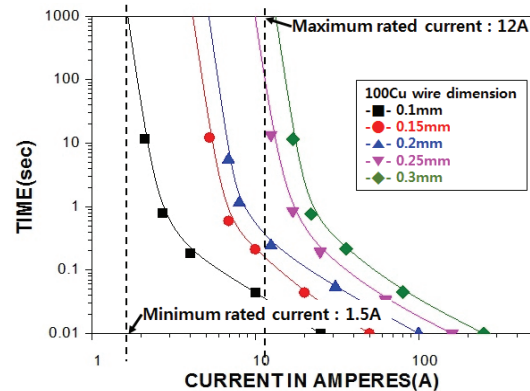


Fig. 8. Change in I-T curve according to the wire diameter of fuse used 100% Cu wire.

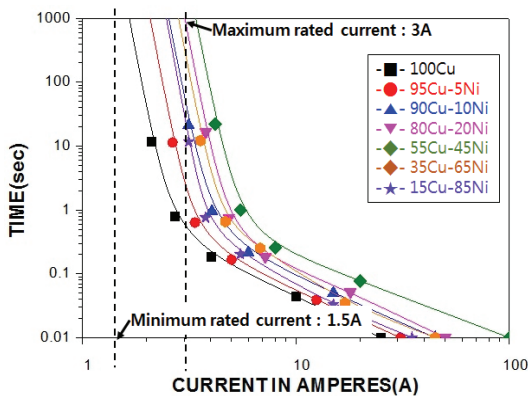


Fig. 7. Change in I-T curve according to the composition of Ni-Cu alloy of fuse used wire diameter 0.1 mm.

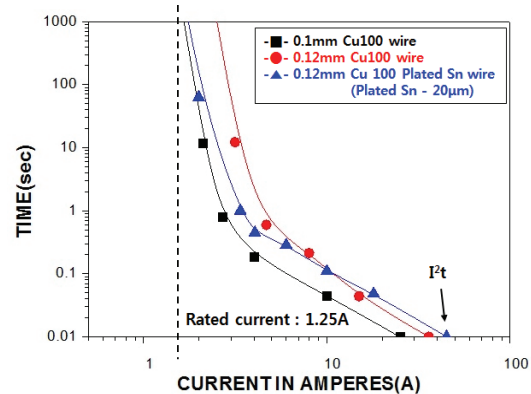


Fig. 9. Design of high durability fuse elements using plated tin.

저항치가 상승하는 경향을 보였고 선경이 증가함에 따라 저항 값이 감소하는 경향이 나타났다. 또한 동일한 선경에서 합금 함량에 따른 용단 특성 변화와 동일한 합금 함량에서 선경 상승에 따른 용단 특성 변화 I-T 커브를 그림 6과 그림 7에 각각 나타내었다.

그림 6~8의 결과로부터 합금 함량과 선경에 따른 저항의 변화 및 I-T 커브의 이동이 선경이 높아질수록, 순금속에 가까울수록 I^2t 값과 수명, 내구성이 상승하는 설계임을 확인할 수 있다. 하지만 이와 같은 I-T 커브의 단순한 이동은 정격전류가 높은 퓨즈를 사용하는 것과 같이 커브 전체를 이동하기 때문에 210~400%에 해당하는 과전류에 대한 동작 특성은 만족하지 못한다.

때문에 퓨즈의 수명을 상승시키며 동작 특성을 만족하기 위해서는 선경의 상승 혹은 합금의 형태로 I-T 커브를 높은 정격 전류 방향으로 이동시키고 정격전류의 210~400% 동작을 조정하여 빠르게 동작할 수 있도록

로 가용체의 설계가 필요하다. 이와 같은 동작을 위해 저용점 금속의 확산을 이용하여 가용체 용단 온도와 시간을 조정하였고, 이는 I-T 커브의 상부 기울기를 움직이는 방법으로 결과적으로 정격전류 선이 낮은 정격 전류 쪽으로 이동하여 최종적으로 동작 특성을 구현할 수 있게 된다.

실험을 위하여 싱글샷 전류 측정 장치에 적용되는 1.25 A 퓨즈를 Cu-100% 가용체로 제작하였고 그림 8과 같이 나타내었다.

그림 9의 결과로부터 가용체의 선경을 0.1 mm에서 0.12 mm로 상승시켜 퓨즈의 수명을 결정하는 동작시간 0.01초 전류를 지연하여 I^2t 값을 상승시켰다. 이후 저용점 금속의 도금을 이용하여 상대적으로 낮은 과전류에서의 동작 시간을 상승시켜 정격전류를 1.25 A로 유지하였음을 확인할 수 있다. 재료의 용점을 낮추는 가용체 설계는 퓨즈의 동작 특성을 지연 동작 특성으로 만드는 방법으로 적용한 저용점 금속의 도금은 그

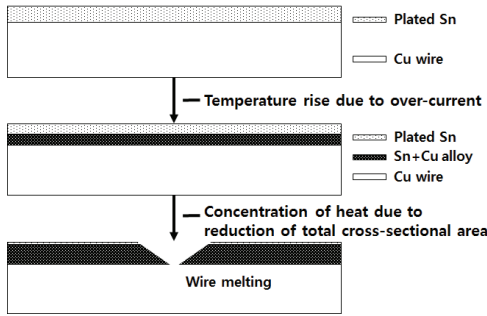


Fig. 10. Melting process of copper plated tin for fuse elements.

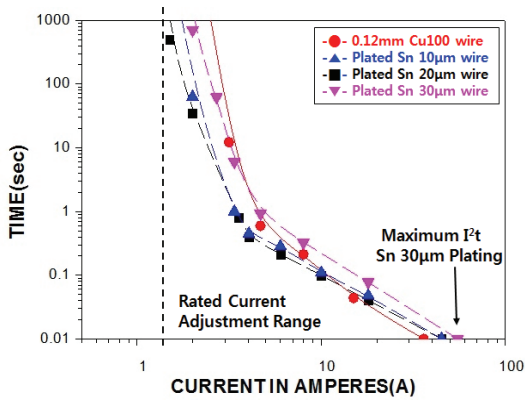


Fig. 11. I-T curve shift according to tin plating thickness.

림 9와 같이 저용점 금속의 확산을 통해 가용체의 용단 온도를 낮추는 것으로 판단할 수 있다 [10].

이와 같은 설계로 기존 1.25 A 퓨즈의 I^2t 값은 식 (5)와 같이 상승하며, 이는 제품 돌입전류에 대한 내구성이 해당 비율만큼인 약 5.3배 상승하였다고 판단할 수 있다.

$$\begin{aligned} 100Cu &= I^2 \times t = 148^2 \times 0.01 = 219.04 \\ Cu \text{ Plated Sn} &= I^2 \times t = 342^2 \times 0.01 = 1,169.64 \end{aligned} \quad (5)$$

그림 11의 결과로부터 제작된 초소형 퓨즈의 I^2t 값이 표시된 수렴 구간에서 각 정격전류에 해당하는 I^2t 값이 나타나고, 이 값은 도금 두께에 따라 유사한 수준으로 돌입전류에 대한 내성이 높은 것으로 확인된다 [10]. 하지만 동작 특성의 조정에서 일정 도금 두께 이상이 될 경우 동작 특성은 다시 높은 정격전류 방향으로 역행하고 I^2t 값은 더욱 상승하게 된다. 이와 같은 결과로부터 주석의 두께는 선경의 20% 이내에서 조정이 필요하고 정격전류의 210%, 275%, 400% 인가 시 동작 특성을 결정하여 설계가 가능함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 직류 기반의 이차전지 및 ESS의 유지 보수 산업에서 널리 사용되고 있는 싱글샷 전류 측정 시스템의 수명과 내구성을 상승시키기 위한 보호소자에 대하여 고찰하였다. 해당 시스템은 전류의 변화가 없어 적분회로의 적용이 불가능한 직류 전류에 대하여 임의의 측정 시스템 시작 동작을 부여한 측정 원리로 인하여 기기 시작 돌입전류가 발생한다. 이에 1차 측 메인 보호소자인 퓨즈가 시작 돌입전류로 인한 수명이 줄어들고 퓨즈의 용단으로 인한 시스템 고장이 빈번히 발생하여 퓨즈의 수명 및 내구성 상승과 함께 동작특성을 만족하는 설계가 필요하였다.

이를 위하여 제작된 퓨즈 가용체 일정성을 확인하기 위해 저항 값을 측정하였으며, 설계한 퓨즈의 가용체가 양호하게 제작되었음을 알 수 있었다. 그리고 현재 일반적인 SMPS 회로에 적용되는 IEC 60127-3 초소형 퓨즈를 대상으로 1.25 A의 정격전류와 높은 I^2t 를 보유한 퓨즈를 설계한 후 전기적 시험을 진행하였다. 실험 결과로부터 선경과 합금 함량에 따라 넓은 범위의 정격 전류를 구현할 수 있었고, 동작 특성을 유지하며 내구성과 I^2t 특성도 만족하기 위하여 저용점 주석 금속 도금을 실시하였다. 이에 따라 동일한 1.25 A 초소형 퓨즈에 비하여 정격전류 및 210~400% 동작 특성은 유지하며 I^2t 값은 최대 5배 이상의 성능 상승을 확인하여 동작 특성은 유지하며 수명과 내구성이 상승된 가용체 설계가 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 이에 본 연구의 결과로부터 퓨즈 가용체의 선경의 상승과 저용점 금속의 도금을 이용한 동작특성 조정 설계는 빠른 용단과 수명, 내구성 상승 특성 등이 전기기기의 시작 돌입전류에서 퓨즈의 고장을 방지하는 적절한 설계가 이루어졌다고 판단할 수 있다.

ORCID

Sung Yeo Noh

<http://orcid.org/0000-0002-2715-5809>

감사의 글

본 연구는 중소기업기술정보진흥원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.S2661510).

REFERENCES

- [1] W. J. Park, I. H. Kim, H. Y. Jo, Y. G. Kim, and K. Y. Ahn, *Trans. Korean Inst. Elect. Eng.*, **68**, 1688 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.5370/kiee.2019.68.12.1688>]
- [2] S. Y. Oh and H. L. Choi, *J. Inst. Control Rob. Syst.*, **20**, 12 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.5302/j.icros.2014.13.1971>]
- [3] P. Jang, *J. Korean Magn. Soc.*, **28**, 5 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.4283/jkms.2018.28.1.005>]
- [4] Agilent Technologies, Fundamentals of Time Interval Measurement, Application Note 200-3 (1997).
- [5] C. H. Ahn, *J. Inst. Electron. Inf. Eng.*, **54**, 3 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.5573/ieie.2017.54.3.131>]
- [6] W. J. Jang, Definitions for Low Voltage Fuses and General Requirements, Korea Standards, Korea (2014).
- [7] S. J. Kim, D. H. Kim, and C. Y. Kang, *Trans. Korean Inst. Elect. Eng.*, **67**, 644 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.5370/kiee.2018.67.5.644>]
- [8] C. K. Ji and K. O. Kim, *Definitions for Miniature Fuses and General Requirments for Miniature Fuse-Links* (Korea Standards, Korea, 2005) p. 16.
- [9] E. M. Kim, S. H. Lee, D. K. Cho, and S. H. Kim, *Trans. Korean Inst. Elect. Eng.*, **63**, 1070 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.5370/kiee.2014.63.8.1070>]
- [10] S. J. Jin, E. M. Kim, J. S. Youn, Y. J. Lee, and S. Y. Noh, *J. Korean Acad.-Ind. Coop. Soc.*, **19**, 80 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.6.80>]