

아크 소호용 세라믹 분말을 이용한 높은 차단용량 및 고내구성을 갖는 초소형 퓨즈 설계

강창룡¹, 진상준², 이예지³, 윤재서³, 노성여⁴ 

¹ 부경대학교 금속공학과

² 스마트전자(주) 개발팀

³ 부경대학교 기술경영공학과

⁴ 동명대학교 ICT항만물류시스템공학과

Design of a Miniature Fuse with High Breaking Capacity and Load Life Using a Ceramic Powder of Extinguishing an Electric Arc

Chang yong Kang¹, Sang Jun Jin², Ye Ji Lee³, Jae Seo Youn³, and Seong yeo Noh⁴

¹ Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University, Busan 48547, Korea

² Development Team, SMART Electronics Inc, Ulsan 44956, Korea

³ Graduate School of Management of Technology, Pukyong National University, Busan 48547, Korea

⁴ Department of Port Logistics System, Tongmyong University, Busan 48520, Korea

(Received April 4, 2019; Revised April 11, 2019; Accepted April 17, 2019)

Abstract: Recently, inverter control systems have attracted immense attention to increase the energy efficiency. However, such systems use repeated on/off high currents for linear operation control, instead of the prevalent step variable current control method. Hence, there arise concerns of personal and property damage, especially due to the durability, explosive characteristics, and operating speed of the fuse, which is responsible for safety and is one of the internal components using current control. Therefore, in this paper, we propose an IEC60127-4 SMD sub-miniature fuse, consisting of Ag-Cu alloys and ceramic powder for arc soothing. The IEC60127-4 SMD sub-miniature fuse has high durability and cut-off capacity, and operates safely in dangerous circumstances caused by the inverter control system.

Keywords: Fuse, Arc removal, Miniature, Ag-Cu alloy, Inverter control system

1. 서론

최근 IT 네트워크 기반의 휴대용 전자제품 시장 성장으로 이차전지의 용량은 상승하였고 충전을 위한 SMPS 제어 시스템 회로가 소형화되고 있는 추세이다.

✉ Seong yeo Noh; nsy@tu.ac.kr

Copyright ©2019 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.

그리고 최근 전력산업의 패러다임 변화로 인한 저탄소 녹색 성장이라는 기조 아래, 신재생 에너지의 발전을 핵심적으로 연구하는 산업과 기존 제품의 저전력, 고효율화를 추구하는 산업이 동반적으로 발전하고 있다 [1]. 이에 이차전지의 발전과 함께 효율적 운영을 위한 고효율 인버터 제어 시스템이 백색가전과 전기자동차 등 전력의 소모가 많은 전기기기에 적용되고 있다. 하지만 고효율 인버터 제어형 시스템은 전기기기 운영의 부하를 구동 목표 선상에서 선형적으로 제어하여 전류 손실을 최소화하며, 시스템을 운영하기 때문에 기존의 가

변식 동작 방식과는 달리 높은 전류가 짧은 주기로 계속해서 반복된다 [2]. 이에 따른 그림 1에 표시한 높은 돌입전류가 기기 운영 중 효율 동작으로 위하여 계속해서 유입되는 환경으로, 전기기기 내부 부품의 수명에 심각한 영향을 미친다. 이와 함께 제품의 on-off 시에만 유입되던 돌입전류가 평시 동작 제어 간 지속적으로 유입됨으로써 이상 전류의 발생 확률 또한 증가하며, 실제 단락 시험 시 인버터 회로 부는 소손되었고, 최대 전류는 145 A 이상이 유입되었다.

이와 같이 회로 내부 단락으로 인해 발생한 과전류는 일반적인 가변식 제어 동작 방식에 비해서 높은 전류(약 145 A)가 단시간에 유입되며, 빠른 시간 이내에 해당 전류를 차단할 수 없을 시 화재와 폭발로 이어진다. 하지만 현재 적용되고 있는 메인 수동 동작형 퓨즈 중 145 A의 인가 전류에서 화재 없이 빠른 동작을 하려면 밀폐형 퓨즈의 경우 약 2~2.5 A의 정격전류 퓨즈, SMD형 퓨즈의 경우 4~5 A 정격의 퓨즈가 필요하다. 이는 인버터 방식의 평시 전류인 그림 1의 전류에서 가용체의 동작이 발생하는 퓨즈로 적용이 불가능하다. 때문에 기존에 적용되고 있는 일반적인 메인 수동 동작형 퓨즈에서 정격전류는 높으며, 최대 피크 전류에서는 빠른 동작을 하는 고효율 인버터 제어 회로에 최적화된 과전류 보호소자가 필요하다. 또한, 세라믹 분말은 합성 반응속도가 빠르고 균일한 반응 제어

가 가능한 장점을 이용하여 퓨즈의 폭발 내구성을 만족하였다.

이에 본 연구에서는 인버터 제어 시스템의 펄스형 유입전류에 대하여 빠른 동작 특성을 유지함과 동시에 수명을 상승시키기 위한 아크 소호용 세라믹 분말의 열전도도를 활용하였다. 그리고 완전 단락 돌입전류에 대한 세라믹 분말의 용융 아크 소호 동작을 통한 차단용량 특성도 만족하여 고효율 인버터 제어 회로용 UMF (universal module fuse 이하, UMF 퓨즈) 과전류 보호소자의 특성을 제시하였다.

2. 실험 방법

인버터 제어가 적용된 시스템은 높은 펄스 형태의 전류가 짧은 시간에 반복되어, 실제 퓨즈 동작 특성을 산정하기 위한 정격전류를 확정하기 어렵다. 이에 일반적으로 산술적 실효값 계산을 통한 인버터 유입 전류의 정격전류를 산정하며, 정격전류 산정 후 퓨즈를 설계할 수 있다. 때문에 본 실험을 위해서는 일반적으로 적용 중인 인버터를 대상으로 실효값이 산정된 후 퓨즈의 설계가 가능하며 이를 위해 현재 많이 적용 중인 전기차인버터를 기준으로 하였다. 기준으로 적용한 인버터의 위치 양단의 전류는 식 (1)과 같이 펄스 형태의 전류 실효값을 적용하여 정격 유입전류를 산출할 수 있다 [3,4].

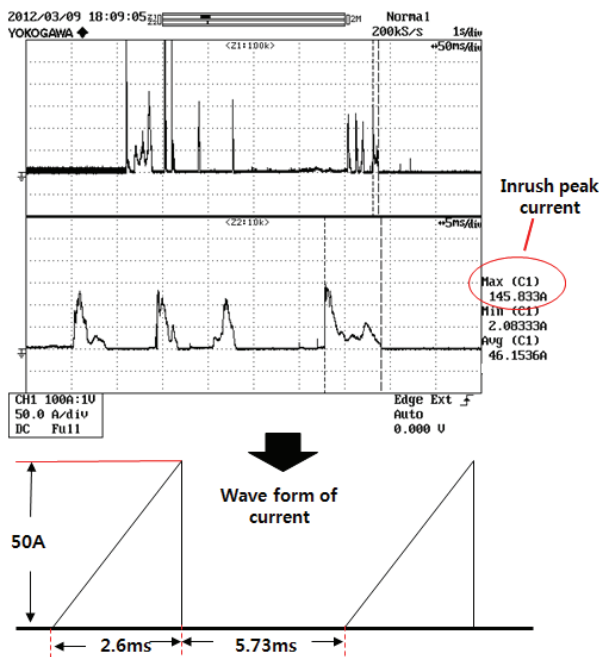


Fig. 1. Wave form of high efficient inverter control system.

$$\begin{aligned}
 \text{RMS} &= \sqrt{\frac{1}{8.33\text{ms}} \int_0^{2.6\text{ms}} \left(\frac{50\text{A}}{2.6\text{ms}} \times t \right)^2 \cdot dt} \quad (1) \\
 &= \sqrt{\frac{50^2 A}{8.33\text{ms} \times (2.6\text{ms})^2} \left(\frac{1}{3} t^3 \right)_0^{2.6\text{ms}}} \\
 &= \sqrt{\frac{50^2 A}{3 \times 8.33\text{ms} \times (2.6\text{ms})^2} \times (2.6\text{ms})^3} \\
 &= \sqrt{\frac{50^2 A \times 2.6\text{ms}}{3 \times 8.33\text{ms}}} = \sqrt{260.1} = 16.1A
 \end{aligned}$$

설계된 퓨즈는 이차전지가 대용량화됨에 따라 높은 차단용량을 구현하기 위한 밀폐형의 퓨즈 구조와 인버터 제어 회로 위에서 가장 적은 공간을 차지하여 설계에 영향을 최소화하는 UMF 퓨즈를 대상으로 하였다. 일반적으로 사용되는 UMF 퓨즈는 2.8×2.8×3.1 mm 직육면체의 형상으로, 형상은 유지하며, 차단용량의 상승을 위하여 내부 구조와 형상을 그림 2와 같이 제작하였다.

퓨즈 가용체로 사용한 금속은 전기전도성과 열 이동 성능을 고려한 고전적 퓨즈 가용체 합금인 Ag-Cu 금속으로 설계하였고, 한류형 동작을 위해서 금속 와이어 형태로 가용체를 구성하였다. 특성 구현을 위해 사용한 금속 합금 성분은 표 1과 같고 세부 동작 특성 조정을 위해 주석(Sn)을 전기도금의 방법으로 표면에 적용하였다.

퓨즈 엘리먼트의 형상은 원통형 환선 와이어로 고정하였고 선경은 목표 정격전류에 따라 조정하여 대조군을 두었다. 치수는 세라믹 튜브의 대각에 삽입하여 모든 와이어가 11.4±0.3 mm 이내의 길이를 가지도록 시료를 제작하였다.

실험은 각 합금에 따라 제품을 제작하여 모든 시료의 불량 단선 여부 등을 확인하였다. 각 시료군은 최소 20개 이상의 예비 시료를 확보하고 모든 시료의 전기저항을 측정하고 주기하였다. 이후 파워 서플라이를 사용하여 전기적 특성 실험을 실시하였고, 전류에 따라 동작되는 시간을 분석하여 시험 결과를 도출하였다. 동작 실험 간 파워 서플라이 전류는 IEC 60127-1에 정의된 DC 정전류에서 변동전압이 60 V 이내가 되도록 유지하였다. 실험은 파워서플라이 BOB사 SGI 330/150, 오실로스코프 Tektronix사 DPO 3022, 저항계측기 Hiyoki사 3.227 mΩ Hitester를 사용하였다.

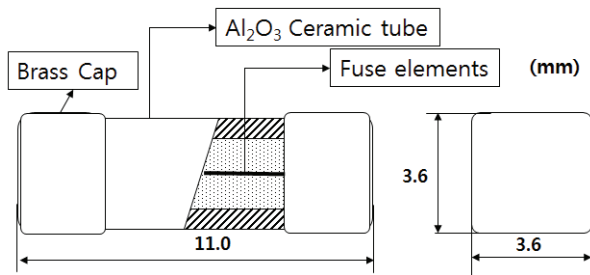


Fig. 2. Structure of fuse sample.

Table 1. Composition of the metal alloys.

Alloy	Composition (wt%)		
	Ag	Cu	Plated Sn
Ag100	100	-	10%
Ag-28Cu	28	72	10%
Ag-50Cu	50	50	10%
Ag-80Cu	80	20	10%
Cu100	-	100	10%

3. 결과 및 고찰

그림 3에 제작된 퓨즈의 기기에 대한 영향을 최소화 하기 위해 제작된 1~4 A 퓨즈의 정격전류를 인가하여 전압 강하 값을 측정하였다. IEC 60127-4에 명시된 전압 강하 기준에 따라 1~4 A의 퓨즈는 정격전류 통전에 대하여 300 mV 이하의 전압 강하를 유지해야 한다. 이는 “보호소자는 단지 보호의 역할만 수행할 것”을 명시한 규격적 정의에 의한 것이다 [5].

전압 강하 결과로부터 제작된 퓨즈는 모두 전압 강하 값이 100 mV 이하로 나타났으며 통전전류에 대한 전력 소모를 최소한으로 유지한 것으로 판단할 수 있다. 실제 그림 4와 같이 시험에 사용된 표준 기판에서의 선로 저항의 영향이 없었다면 전압 강하 값은 더

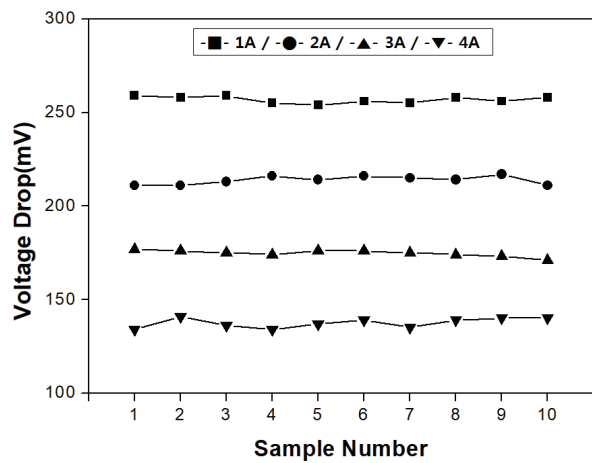


Fig. 3. Test result of voltage drop.

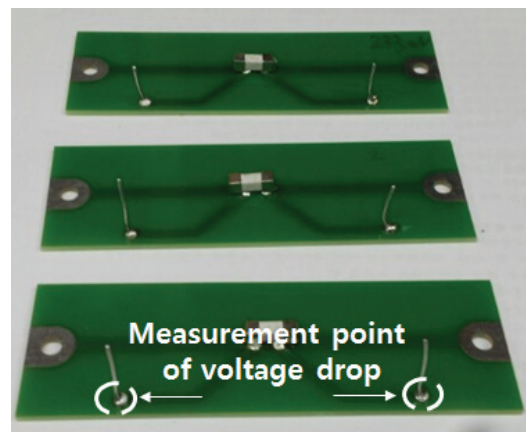


Fig. 4. Test PCB and measurement point of voltage drop.

낮아질 수 있다.

인버터 돌입전류에서 민감한 반응을 유지하기 위한 퓨즈의 동작 특성은 빠른 동작 특성 혹은 일반 동작 특성으로 구현되어야 한다. 이를 위한 합금에 따른 동작 특성을 3.15 A 대표 정격 시험을 통해 그림 5의 I-T 커브 결과로 나타내었다.

그림 5의 결과로부터 정격전류의 1,000% 동작시간 4ms 이내에서 동작한 Ag 100%의 경우를 기준으로 동일한 선경에서 이보다 매우 빠른 동작 특성으로 판단할 수 있다. Cu-28Ag만이 모든 선경에서 Ag 100%보다 더 빠른 동작 특성이 나타났다. 이는 선경의 감소 없이 동작시간이 감소된 것으로 퓨즈 가용체의 선경 감소가 없는 만큼의 내구성이 상승된 것으로 볼 수 있다. 그리고 앞선 정격전류 시험과 동작 특성 시험을 바탕으로 Cu-28Ag가 빠른 동작 특성을 만족함을 확인하였다.

Ag-Cu 합금을 대상으로 획득된 퓨즈 I-T 커브의 특성이 인버터 전류 파형에 대한 동작 특성을 만족하는지 확인하기 위하여 Ag-28 wt% Cu 합금을 적용한 샘플을 대상으로 인버터 파형 내구성 상승과 차단용량 상승을 위해 아크 소호용 세라믹 분말을 주입하여 동작 특성의 변화를 확인하였다.

그림 6의 결과로부터 아크 소호 분말의 종류에 따른 동작 특성의 변화를 확인하였다. 아크 소호제로 가장 많이 사용되는 실리콘 계열과, 알루미늄 계열, 그리고 지르콘 계열의 분말을 동일한 입도를 최대한 유지하여 튜브에 주입하였고 각각 3.15 A로 제작된 퓨즈의 정격전류 선을 이동시켜 열전도도에 따라 동작 특성이 변

함을 확인할 수 있다. 이는 동일한 정격전류의 1,000% 동작시간에 정격선이 높은 정격전류 방향으로 이동하였기 때문에 더욱 민감한 동작 방향으로 판단할 수 있고 인버터에서 발생하는 여러 위험요소를 차단하기 위한 설계로 제시될 수 있다 [6].

그림 7의 결과로부터 아크 소호용 분말에 의한 차단용량 상승과 소음 감소량을 확인할 수 있다. Si 계열 분말 소호제의 경우 낮은 열전도율로 인하여 퓨즈 가용체의 동작 특성에 가장 영향을 적게 미치면서 차단용량 특성으로 가장 높은 106 A의 차단용량을 나타내었다. 이는 아크 소호용 분말이 돌입전류에 대하여 순간적으로 녹아 아크를 소호하는 특성을 위해 융점이

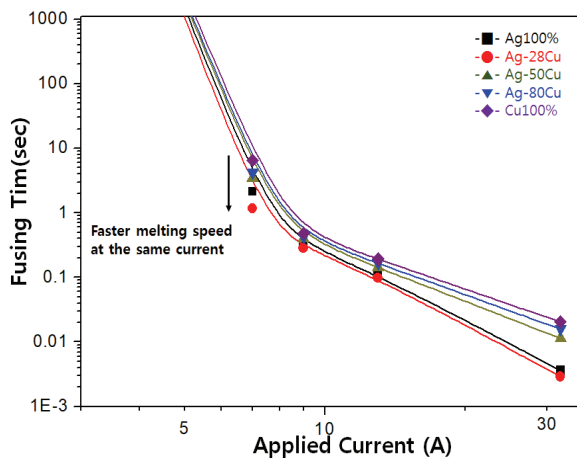


Fig. 5. Change in rated current according to the wire composition of Ag-Cu alloy.

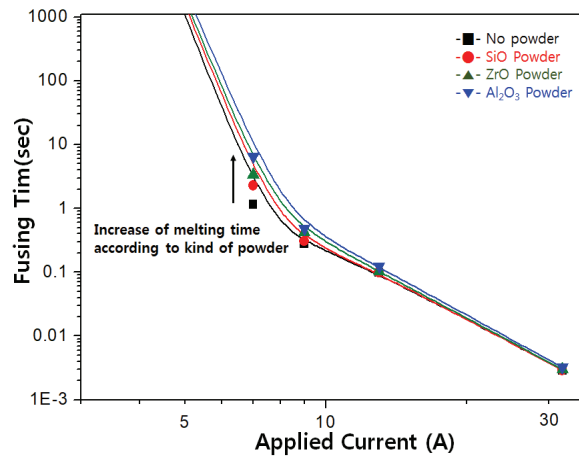


Fig. 6. Change in rated current according to the arc removal powder composition.

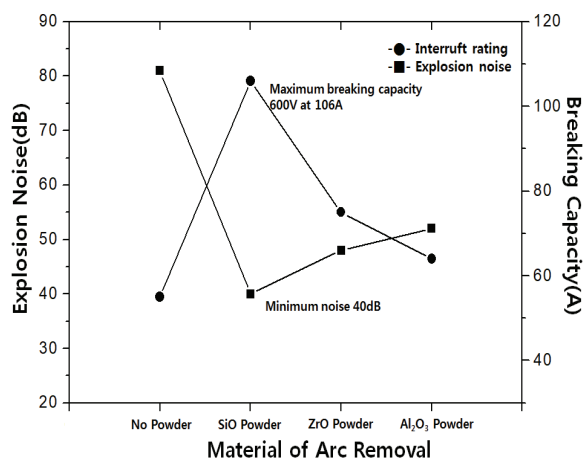


Fig. 7. Change in rated current according to the arc removal powder composition.

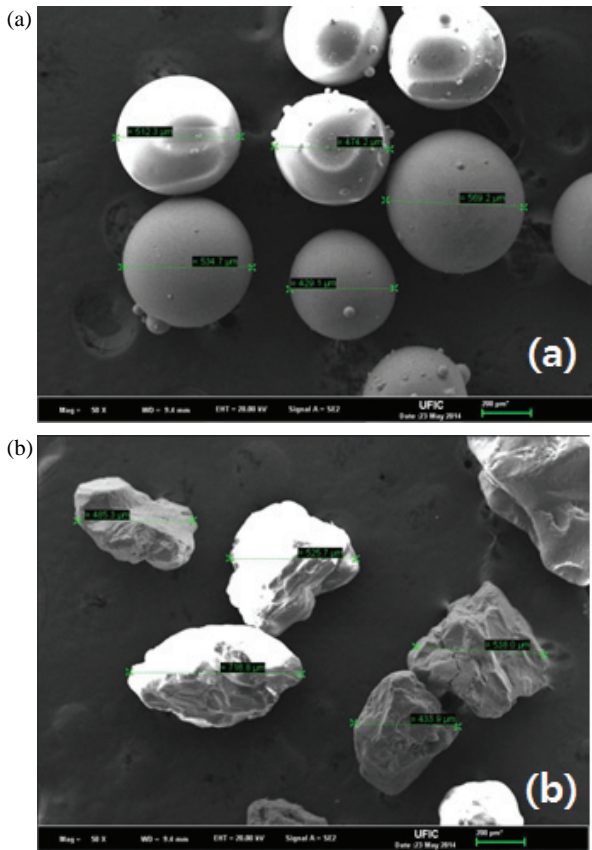


Fig. 8. Analysis of structure with powder elements (a) ZrO₂ composition and (b) SiO₂ composition.

낮은 Si 계열 소화제가 성능이 우수한 것으로 판단할 수 있다.

그리고 이와 함께 소화용 분말의 입자 형상이 용융이 용이하기 위해서는 그림 8의 소화제 입자 형상과 같이 ZrO₂ 계열의 구형 입자 형상보다 표면적이 상대적으로 넓은 SiO₂ 계열의 불규칙적 아크 소화제의 형상이 우수함도 확인할 수 있다.

이상의 실험을 통해 인버터 제어 방식에서 발생하는 높은 빈도가 많은 돌입전류에 대하여 Ag-28 wt% Cu 합금과 SiO₂ 계열 아크 소화용 분말이 차단용량의 상승과 동작 특성 조정으로 내구성이 상승함을 확인하였다 [7]. 이상과 같은 실험 결과를 바탕으로 정격전류 1~4 A까지 인버터 정격에 대응할 수 있는 제품군에 대한 I-T 커브를 그림 9에 제시하였다. 그림 9의 결과로부터 넓은 범위의 정격에서 인버터 제어에서 발생하는 펄스성 전류에 대한 I-T 커브 상 동작 특성을 만족하여 적절한 한류형 퓨즈 보호소자의 설계가 이루어졌음을 알 수 있다.

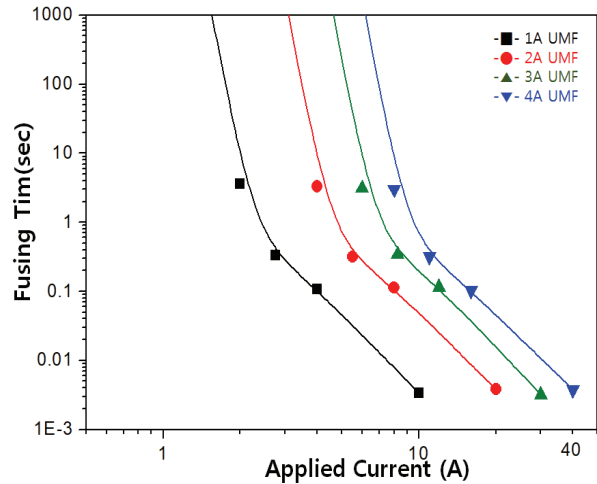


Fig. 9. Analysis of structure with powder elements (a) ZrO₂ composition and (b) SiO₂ composition.

4. 결론

본 논문에서는 전기자동차, 백색가전, ESS 등에 적용되는 고효율 인버터 제어 동작의 전기적 위험 상황과 안전한 사용을 위한 인버터 보호소자에 대하여 고찰하였다. 제작된 퓨즈 합금의 조성을 확인하기 위해 EDX 분석을 수행하였으며, 설계한 퓨즈의 합금 와이어가 양호하게 제작되었음을 알 수 있었다. 그리고 현재 일반적인 인버터 제어 회로에 적용되는 IEC 60127-4 초소형 SMD 퓨즈를 대상으로 인버터 제어 환경에서의 전류특성에 높은 내구성과 차단용량을 가지며 빠른 동작을 보유한 퓨즈를 설계한 후 전기적 시험을 진행하였다. 실험 결과로부터 Ag-28% Cu 합금에서 선경의 감소 없는 빠른 동작 특성으로 구현하여 선경과 비례하는 내구성을 상승시킬 수 있었고, 아크 소화용 세라믹 분말을 활용하여 최대 600 V, 106 A에 이르는 높은 차단용량과 낮은 폭발 소음 수준을 만족할 수 있었다. 그리고 세라믹 분말 소화제의 열전도도를 이용한 I-T 커브의 이동을 확인하여 넓은 범위의 이상전류에 대한 민감한 동작 특성을 보유한 퓨즈 정격 군을 설계할 수 있었다. 이에 본 연구의 결과로부터 인버터 제어 방식에서 안전한 동작에 핵심이 되는 퓨즈 보호소자의 가용체의 빠른 용단과 차단용량 상승을 위한 아크 소화제 적용 방법이 전기기기의 화재 및 폭발에서 인명을 보호하는 적절한 설계가 이루어졌다고 판단할 수 있다.

ORCID

Seong yeo Noh

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

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (no.20172220200130).

REFERENCES

- [1] M. Cho, D. B. Nah, S. C. Kil, and S. W. Kim, *J. Energy Eng.*, **20**, 109 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.5855/energy.2011.20.2.109>]
- [2] B. S. Kim, *Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng.*, **37**, 53 (2008).
- [3] S. Yarlagadda, T. T. Hartley, and I. Husain, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **49**, 2720 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2013.2264794>]
- [4] E. M. Kim, S. H. Kim, and D. K. Cho, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **63**, 1538 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2014.63.11.1538>]
- [5] C. K. Ji and K. O. Kim, *Definitions for Miniature Fuses and General Requirements for Miniature Fuse-Links* (Korea Standards, Korea, 2005) p. 1.
- [6] C. S. Choi, H. W. Kim, and G. S. Lee, *Electrical Fire Engineering* (Dong-hwa Technical Trading, Paju, 2000) p. 189.
- [7] D. R. Gaskell, *An Introduction to Transport Phenomena in Materials Engineering, 1th ed* (Prentice-Hall, INC New Jersey, 1997) p. 265.