

대용량 이차전지 보호 시스템용 전류 감지 동작형 보호소자의 저융점 금속 가용체 설계

김은민¹, 강창룡^{2,a}

¹ 서울대학교 전력연구소

² 부경대학교 금속공학과

Design of Low-Melting Metal Fuse Elements of Current Sensing Type Protection Device for Large Capacity Secondary Battery Protection System

Eun Min Kim¹ and Chang yong Kang^{2,a}

¹ Seoul National University Electric Power Research Institute (SEPRI), Seoul 08826, Korea

² Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

(Received August 14, 2018; Revised August 16, 2018; Accepted August 16, 2017)

Abstract: High-capacity secondary batteries can cause explosion hazards owing to microcurrent variations or current surges that occur in short circuits. Consequently, complete safety cannot be achieved with general protection that is limited to a mere current fuse. Hence, in the case of secondary batteries, it is necessary for the protector to limit the inrush current in a short circuit, and to detect the current during microcurrent variations. To serve this purpose, a fuse can be employed for the secondary battery protection circuit with current detection. This study aims at designing a protection device that can stably operate in the hazardous circumstances associated with high-capacity secondary batteries. To achieve the said objective, a detecting fuse was designed from an alloy of low melting point elements for securing stability in abnormal current states. Experimental results show that the operating I-T and V-T characteristic constraints can be satisfied by employing the proposed current detecting self-contained low melting point fuse, and through the resistance of the heating resistor. These results thus verify that the proposed protection device can prevent the hazards of short circuit current surges and microcurrent variations of secondary batteries.

Keywords: Current sensing fuse, Low melting point alloy, I-T curve, Secondary battery, V-T curve

1. 서론

전기 자동차 및 ESS의 에너지 저장 시스템으로 사용되고 있는 대용량 리튬이온 전지는 단위 질량과 부피당 높은 에너지 밀도와 대전류의 공급이 가능하여 에너지

저장 시스템 중 가장 주목받고 있다 [1]. 하지만 리튬이온 전지의 경우 사용 중 이차전지 내부에서 지속적인 충전과 방전 동작의 반복으로 인하여 의도하지 않은 원인의 과전류, 과전압, 과부하 등과 같은 상황이 지속될 수 있으며, 화재와 폭발로 이어질 위험이 있다 [2].

리튬이온 대용량 이차전지는 소용량 이차전지 휴대용 제품에 비하여 상대적으로 큰 제품 크기와 공간이 확보되어 있기 때문에 그림 1과 같이 전기영동 등의 셀 간 거리에서 발생하는 사고는 적은 편이다. 그리고 상대적으로 폭발 및 화재의 영향이 더 크게 발생하는 대용량 이차

a. Corresponding author; metkcy@pknu.ac.kr

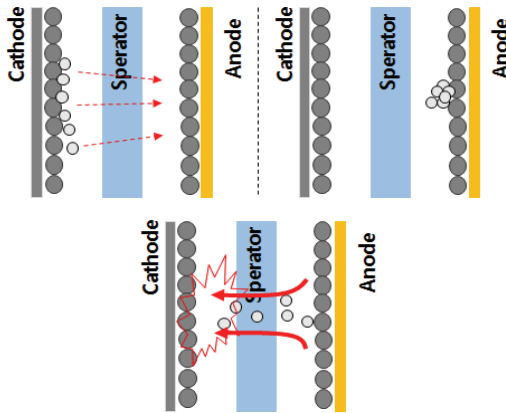


Fig. 1. Electrophoresis process of secondary battery.

전지의 경우 전기영동 현상이 발생하는 완전단락 지점이 충분히 이격되어 있기 때문에 사실상 완전단락에 의한 폭발 등은 발생이 어렵다. 하지만 실제 대용량 이차전지의 완전단락 방전 시 에너지의 이동속도가 빠를 뿐만 아니라 과방전의 한계도 넘게 되기 때문에 SOC 곡선에서 대용량 이차전지의 수명하락 요인이 되며 화재 및 폭발을 동반하게 된다 [3,4].

전기영동에 의한 이차전지 화재 발생 프로세스는 순차적으로 충격 및 전기영동 현상에 의한 분리막 손상, 충전 방전 동작 시 전류의 지속적 이동, 이차전지 전해질이 분해되어 가스 발생, 가스의 압력이 분리막을 이동시켜 전해액 혼합, 전해액이 혼합된 후에도 충전은 계속 유지, 폭발 및 화재 발생의 과정으로 이루어진다. 이와 같은 전기영동에 의한 이차전지의 화재 및 폭발을 방지하기 위해서는 유입전류 상승 시 동작하여 전류 유입을 막아 주는 퓨즈의 역할이 중요하다.

하지만 현재 규격에 정의된 일반적인 한류형 퓨즈의 경우 그림 2와 같이 모두 유입되는 전류에 의해 수동 동작하는 형태의 퓨즈로, 그 특성상 빠른 동작 특성이 정격 전류의 125% 이상일 때, 지연 동작 특성의 퓨즈는 정격 전류의 160%일 때 최초로 용단이 시작되어야 하며 이전의 전류에서는 동작하지 않아야 한다 [5]. 즉 퓨즈를 통과하여 이차전지로 정격 전류의 150%의 전류가 계속해서 유입하여도 퓨즈는 동작하지 않는 상태가 되고, 이차전지는 유입되는 높은 전류에 의해 내부 활물질 혹은 분리막 등이 손상을 받는다. 때문에 이차전지를 보호하기 위한 메인 동작 퓨즈는 돌입 전류를 보호하기 위한 퓨즈의 역할과 미소 전류 변화에 동작하는 이상전류 감지 동작의 특성을 가져야 한다. 즉 이차전지용 전류 감지 동작 퓨즈가 도입됨으로써 해서

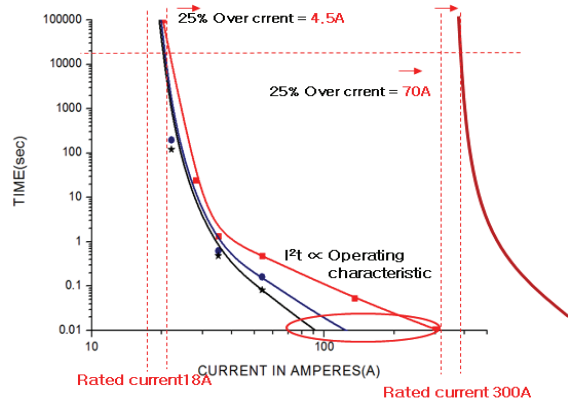


Fig. 2. Operating characteristics of the current limited fuse in I-T curve.

이차전지로 흐르는 미세한 전류 변화를 감지하여 기존의 수동동작 퓨즈가 동작하지 않던 이상전류의 미세한 변화에 능동적으로 동작할 수 있다.

본 논문에서는 대용량 ESS 안전한 사용을 위하여, 정격 전류의 20% 이하, 비교적 적은 전류 변화를 감지 후 능동적으로 동작하는 보호회로에 적합한 퓨즈와 퓨즈 가용체를 개발하여 제시하였다.

2. 실험 방법

2.1 전류 감지 동작형 보호회로 구성

완전단락 돌입 전류 및 미소 과전류 유입, 2가지의 위험에서 안전한 보호 동작을 만족하기 위한 방법으로 IC-FET 회로를 이용한 전류 감지 회로를 구성할 수 있다.

적용 보호회로는 그림 3과 같이 일반적으로 전압과 전류가 정상작동을 할 경우 전류 충전 방향으로 회로가 정상 작동하게 된다. 그리고 완전단락 돌입 전류 및

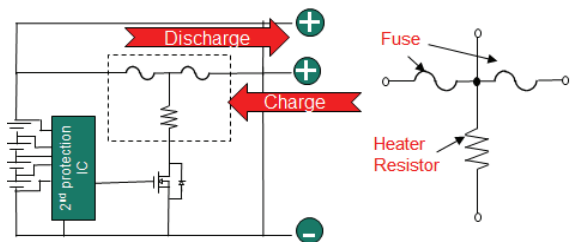


Fig. 3. Circuit of self-control protection devices.

과전류가 발생할 경우 순간적으로 발생하는 화재 위험에 퓨즈 가용체가 한류형 퓨즈 동작을 하여 용단하게 된다. 또한, 회로 내에 이상상태로 인한 정격 전류의 20% 이내 미소 전류 상승이 지속적으로 유입될 경우 전류를 센싱하여 전류의 흐름 방향을 FET 소자 방향으로 변경하게 된다. 이때, 발열 저항에 적용된 전압에 의해 발열 저항의 온도가 상승하게 되고 해당 열로 인해 퓨즈의 가용체를 용단하는 동작 특성을 함께 구성하였다.

2.2 샘플 제작 및 실험 방법

적용된 퓨즈는 이차전지가 대용량화됨에 따라 평시 통전 전류가 100 A 이상에서 최대 800 A까지 통전된다. 때문에 기존의 소형 이차전지에서 사용되던 전류 분배 구조인 1~2 W 세라믹 SMD형 퓨즈 형태는 사용이 불가능하여, 15~40 W의 대전력형 선트를 적용한 제어가 가능한 전력형 퓨즈 형태를 구성하였다. 이에 그림 4와 같은 내부구조와 형상 및 그림 5와 같은 크기의 퓨즈를 제작하였다.

대용량 이차전지 보호소자에 사용될 금속 가용체는 발열 저항의 열에 의해 용단이 가능한 금속으로 설계가 가능하며, 때문에 표 1과 같이 접합 용가재에서 적용하는 주석(Sn) 계열의 저용점 금속을 적용하였다. 접합 저용점 금속이 퓨즈 가용체로 사용되기 위한 조건은 과전류 및 과전압에 의해 퓨즈 가용체가 용단 후 충분한 절연거리를 확보할 것과 전류가 유입되어 퓨즈 가용체를 용단하는 한류형 퓨즈 특성을 만족할 것 등의 특성이 필요하다. 해당 특성을 구현하기 위하여 저용점 합금의 공정조성 합금을 선택하였고 상용 적용되어 일반적인 금속을 대상으로 시험하였다.

일반적인 중소전력 이차전지 보호소자와 다른 점은 상대적으로 높은 통전 용량과 자동실장공정을 적용하지 않는 점으로, 때문에 더 낮은 온도의 퓨즈 가용체를 적용할 수 있어 적용 합금의 자유도가 높다.

실험은 각 합금에 따라 제품을 제작하여 모든 시료의 불량 단선 여부 등을 확인하였다. 각 시료군은 최소 20개 이상의 예비 시료를 확보하고 모든 시료의 전기 저항을 측정하고 주기하였다. 이후 파워서플라이를 사용하여 전기적 특성 실험을 실시하였고, 전류에 따라 동작되는 시간을 분석하여 시험결과를 도출하였다. 동작 실험간 파워 서플라이 전류는 ICE60127-1에 정의된 DC 정전류에서 변동 전압이 60 V 이내가 되도록 유지하였다. 실험은 파워 서플라이 BOB사 SGI 330/150, 오실로스코프

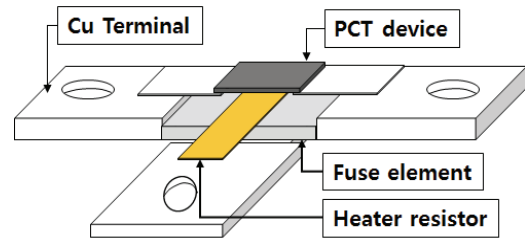


Fig. 4. Inner structure of sample for test.

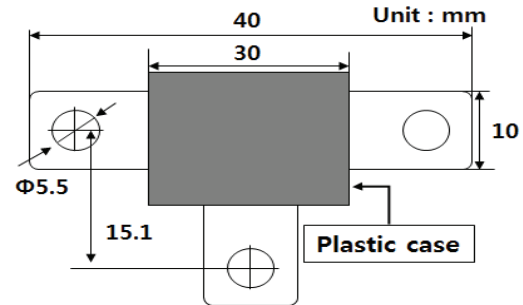


Fig. 5. External dimension of sample.

Table 1. Alloy component of fuse element.

Test alloy	Component (wt%)					Melting point (°C)
	Sn	Bi	Ag	Pb	Cu	
Sn-Bi-Ag	42	57.6	0.4	-	-	139
Sn-Ag-Cu	93	-	3.0	-	0.5	217
Pb-Sn	88	-	-	12	-	309

코프 Tektronix사 DPO 3022, 저항계측기 Hiyoki사 3.227 mΩ Hitester를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 결과

그림 6(a), (b)는 본 연구에 사용된 42Sn-57.6Bi-0.4Ag 공정 조성을 갖는 저용점 가용체 합금의 미세조직을 광학현미경과 주사전자현미경으로 나타낸 것이다. 이 합금에서 공정반응은 138°C에서 58%의 Bi를 나타낸다. 따라서 광학 및 주사전자 현미경 사진에서 알 수 있는 바와 같이 Sn rich 상[기지 상]과 Bi rich 상[돌출상]이 층상으로 존재하고 있는 전형적인 공정 조성의 조직인 층상조직을 나타내고 있는 것을 알 수 있다 [6].

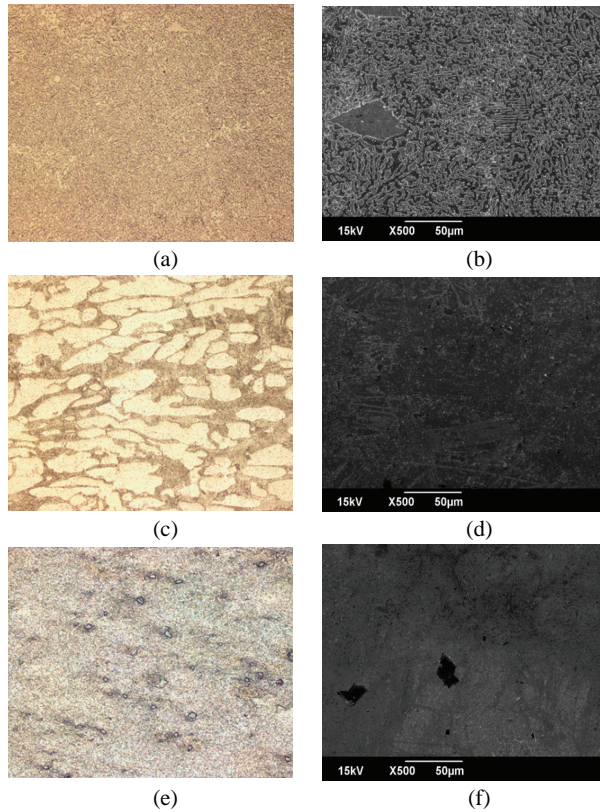


Fig. 6. Analysis of metal structure with low melting point fuse elements. (a) 42Sn-57.6Bi-0.4Ag, (b) 42Sn-57.6Bi-0.4Ag, (c) 96.5-3Ag-0.5Cu, (d) 96.5-3Ag-0.5Cu, (e) 88Pb-12Sn, and (f) 88Pb-12Sn.

그림 6(c), (d)는 96.5Sn-3Ag-0.5Cu 조성을 갖는 저용점 가용체 합금의 미세조직을 광학현미경과 주사전자현미경으로 나타낸 것이다. 이 합금에서 공정반응은 220°C에서 Sn-3.5% Ag 조성에서 나타난다. 따라서 광학 및 주사전자 현미경 사진에서 알 수 있는 바와 같이 β-Sn 기지 조직에 β-Sn과 Ag₃Sn 그리고 Cu₆Sn₅로 이루어진 층상 조직으로 되어 있는 것을 알 수 있으며 Ag₃Sn 그리고 Cu₆Sn₅ 상들이 침상으로도 존재하고 있는 것을 알 수 있다 [7]. 그림 6(e), (f)는 88Pb-12Sn의 조성을 갖는 공정 조성이 아닌 저용점 가용체의 미세조직을 광학현미경과 주사전자 현미경으로 나타낸 것이다. Pb-Sn 합금에서는 183°C에서 38Pb-62Sn의 조성에서 공정반응이 일어난다. 또한 이 합금에서는 공정온도에서는 Pb에 Sn이 19% 정도가 고용되지만 상온에서는 약 2%로 감소되어 첨가량이 2%보다 많으면 나머지 Sn은 석출되어, Pb가 많은 고용체에 입상과 침상 등으로 나타난다. 따라서 이 합금의 조직은 Sn이 10% 이상 첨가되어 있기 때문에 Pb

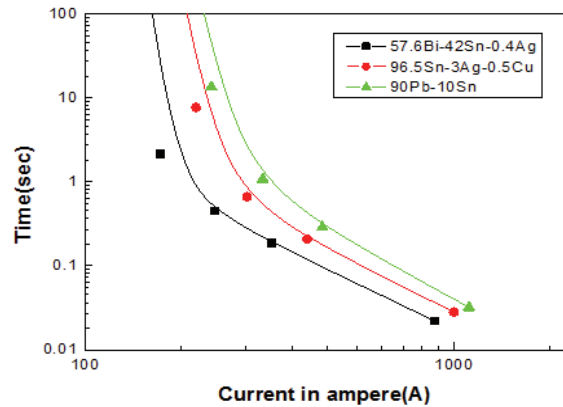


Fig. 7. Limit current operation characteristics I-T curve of a current sensing type fuse.

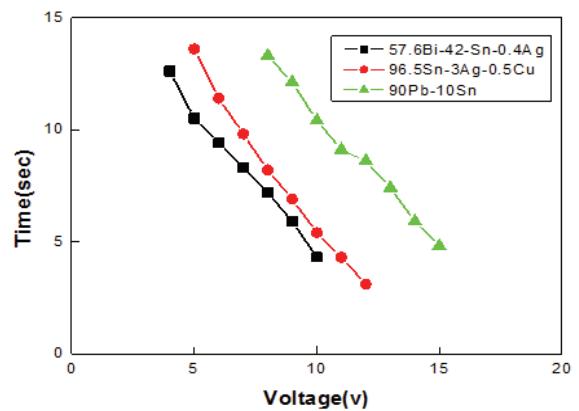


Fig. 8. Sensing current operation characteristics V-T curve of a current sensing type fuse.

기지에 고용되고 남은 Sn이 입자 형상으로 존재하고 있는 조직으로 되어 있는 것을 알 수 있다 [8]. 이상의 금속 미세조직 사진 결과로부터 합금이 올바르게 제작 되었음을 확인할 수 있다.

그림 7의 결과로부터 전류 감지 동작형 퓨즈의 한계 전류 동작 특성이 Sn-Bi 합금은 정격 전류 약 120 A 이고 정격 전류의 약 1,000% 인가 전류에서 0.02초의 동작 시간을 가지는 일반 동작형 퓨즈 특성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Sn-Ag, Pb-Sn 합금으로 갈수록 작 특성은 동일하고 정격 전류가 각각 180 A, 200 A로 상승한 결과를 확인할 수 있다. 동일 재료에서 체적을 변경하면, I-T 커브의 이동이 가능하기 때문에 가공이 없는 세 합금에 대해서는 일반 동작 (slow-blow)형 특성을 만족함을 확인하였다.

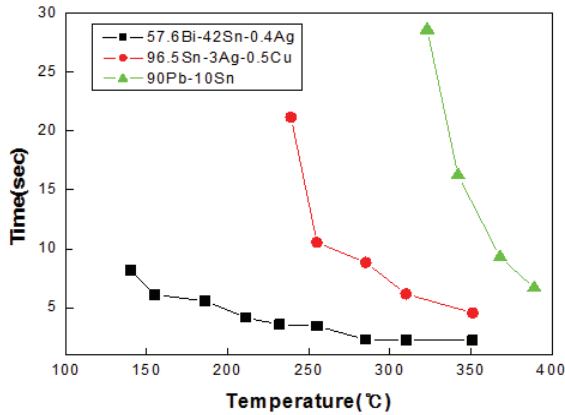


Fig. 9. Temperature operation characteristics T-T curve of a current sensing type fuse.

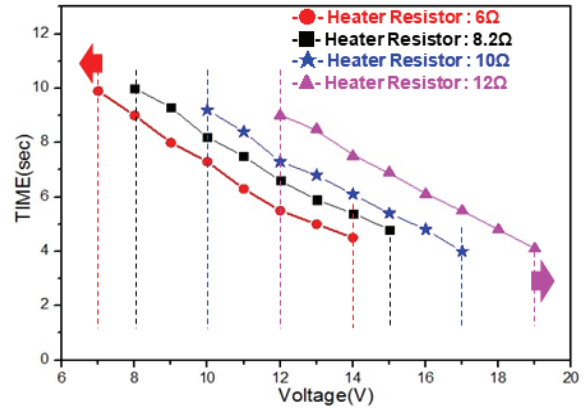


Fig. 10. Movement of V-T curve by changing the heating resistor.

그림 8의 결과로부터 미소 전류 변화에 대한 감지 동작은 IC에 의한 변경 전압이 상대적으로 낮은 용점인 Sn-Bi 금속은 5~10 V까지 동작하고, 상대적으로 가장 높은 용점의 Pb-Sn은 8~15 V까지 동작이 결정됨을 확인할 수 있다. 전체적인 동작에 대한 시간이 3~15초 이내로 일반 동작형의 기준인 60초 이내에 동작을 만족하며, 더 높은 전압에 대해서는 퓨즈 가용체가 동작하기 전에 히터 금속이 용단된다. 때문에 안전 확보에 대한 전압 범위가 가장 높은 Sn-Ag 합금이 가장 전압 시간 특성이 우수한 것으로 나타난다.

이상 전류의 감지 동작은 발열 저항의 전압에 의한 발열이 동작의 원리로 온도 상승에 대한 가용체의 동작 속도 또한 관리가 필요하다. 이는 높은 온도에서 발열 유지 시간이 적을 경우 간접 발열에 의한 동작인 전압에 의한 감지 동작이 작동하지 않을 수 있어, 때문에 온도에 따른 동작 특성 정의가 필요하다.

그림 9의 T-T 커브의 결과로부터 용점이 상대적으로 낮아 히터 금속의 다양한 발열에 용단하는 Sn-Bi 금속의 경우 상대적으로 높은 안전을 보장할 수 있는 동작 형태로, 동작 시간 또한 가장 빠른 시간에 용단하여 이차전지로 유입하는 과전류를 최소화할 수 있어 안정적으로 동작할 수 있다. 반대로 Pb-Sn의 경우 낮은 온도에서 동작 시간도 지연되고 용단 범위도 짧아 안전 확보 범위 면에서 다른 두 금속과 상반되는 특성이 나타난다.

이와 같이 퓨즈 가용체의 온도에 대한 동작 한계는 발열 금속의 저항 변화로 안정적인 동작범위를 확보할 수 있다. 그림 10에 42Sn-57.6Bi-0.4Ag 합금 가용체로 제작된 전류 감지 동작형 퓨즈의 발열 히터 저항의

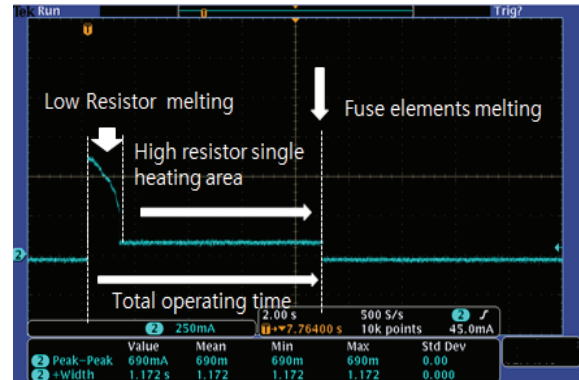


Fig. 11. Movement of V-T Curve by parallel connection of heating resistor.

변경에 따른 용단 범위의 이동을 나타내었다. 결과로부터 기존 6 V에서 10 V까지 동작하던 가용체 조건을 최대 19 V까지 동작 가능함을 저항 변경을 통해 확인하였고 결과를 이용하여 전류 감지 동작의 안정성을 확보할 수 있음을 확인하였다. 또한 기존에 한 개의 발열 저항 히터를 구성하는 전류 감지 동작 구조에서 히터를 2개 혹은 3개를 구성한 동작 구성 시 그림 11과 같이 한쪽 히터의 용단 후 나머지 히터의 발열을 이용한 발열 범위를 넓힐 수 있다.

이와 같은 설계는 퓨즈 가용체를 고정하는 상하부 발열 히터 금속을 각각 다른 저항으로 구성해야 하며, 낮은 저항의 용단 후 높은 저항의 용단이 순차적으로 나타난다.

이상의 결과로부터 제작된 퓨즈의 동작은 정격 전류의 110% 이상 낮은 과전류의 발생에 따라 감지 회로가 동작하여 발열 저항에 의해 모든 조건에서 10s 이내에 동작하였고, 단락돌입과전류는 10ms ~ 20s 이내에 모

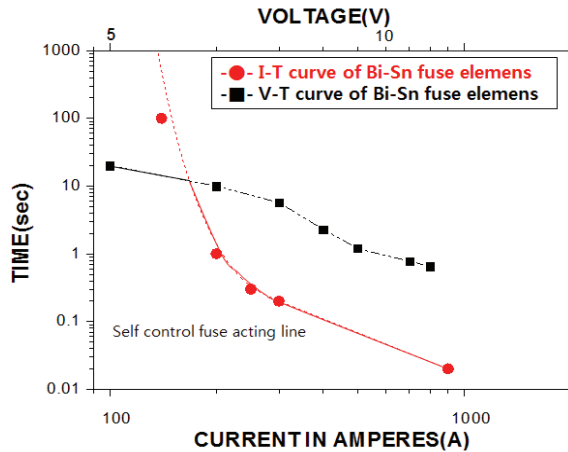


Fig. 12. Fuse acting line of current sensing type fuse (Sn-Bi).

두 동작하여 ESS를 안전하게 보호함을 확인할 수 있다. 제작된 전류 감지 동작형 보호회로용 퓨즈의 실제 동작 특성은 전류 특성과 전압 특성이 중첩되는 그림 12와 같이 넓은 이상상태 범위에서 안전을 확보할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 이차전지의 이상전류 발생에 따른 폭발 및 화재를 방지하기 위하여 정격 전류의 125% 이하 미소 전류 변화와 완전단락 전류에 동시에 동작하는 전류 감지 동작형 보호회로의 퓨즈를 제작하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

이차전지는 단락 돌입 전류의 상황 외에도 미소 전류 변화에 대한 화재 및 폭발이 발생할 수 있으며, 일반적인 수동동작 한계 전류형 퓨즈로는 안전을 확보할 수 없다. 때문에 완전단락돌입 전류에서의 한계 전류형 동작과 미소 전류 변화 상황에서의 전류 감지 동작의 특성을 모두 만족하는 보호소자가 이차전지에서 필요하고 전류 감지형 이차전지 보호회로용 퓨즈가 연구의 결과로부터 적용이 적합함을 확인하였다.

실험 결과로부터 제작된 가용체 합금금속의 조성을 확인하기 위해 미세조직 분석을 수행하였으며, 설계한 합금의 조성이 양호하게 제작되었음을 알 수 있었다. 각 저용점 가용체를 적용한 전류 감지형 이차전지 보호회로용 퓨즈의 I-T, V-T, T-T 커브의 한계를 확인

하였고, 실험 결과로부터 제작 퓨즈는 통전 전류의 미소 전류 변화와 돌입 모두에 동작하며, 가용체의 합금과 발열 저항의 사용에 따라 동작범위와 시간의 이동이 가능하였다. 이와 같은 특성으로 인해 전류 감지형 보호회로용 저용점 금속 가용체 적용 퓨즈는 이차전지의 메인 퓨즈로의 적용에 적합함을 확인하였다.

이상과 같은 본 연구의 결과로부터 대용량 이차전지의 화재 및 폭발에 대한 안전을 확보하기 위하여 적용한 전류 감지형 퓨즈는 기본 보호 특성을 만족하며, 미소 전류 변화 상황에 대응할 수 있는 적절한 보호소자 설계가 이루어졌다고 판단할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.70300045, SRnD 0666-20170030).

REFERENCES

- [1] M. Jo, 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] J. H. Park and H. J. Cha, *Trans. Korean Inst. Power Electron.*, **7**, 131 (2015).
- [3] M. S. Huh, S. W. Choi, H. G. Chun, S. C. Kwon, G. H. Lee, and T. Y. Cho, *J. Korean Vac. Soc.*, **6**, 77 (1997).
- [4] S. Yarlagadda, T. T. Hartley, and I. Husain, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **49**, 2720 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2264794>]
- [5] 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>]
- [6] W. F. Smith and H. B. Han, *Structure and Properties of Engineering Alloys*, 4th ed. (Ko-Bo, Seoul, 2010) p. 242.
- [7] N. S. Kim, Y. T. Lim, and J. T. Jin, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, 3th ed. (Pearson Education Korea, Seoul, 2007) p. 769.
- [8] D. A. Porter, K. E. Easterling, and M. Y. Sherif, *Phase Transformation in Metals and Alloys*, 3rd ed. (Garland Science, London, 2010) p. 213.