

신규 보호회로 적용을 통한 저전류 장비용 군 리튬전지 안전성 개선

윤성기^{ID}, 조유섭^{ID}

국방기술품질원 지휘정찰센터

Safety Improvement of Military Primary Lithium Batteries by New Protection Circuit for Low Current System

Seong Gi Youn and Yu Seup Cho

C4I System Center, Defence Agency for Technology and Quality, Jinju 52851, Korea

(Received March 18, 2019; Revised April 9, 2019; Accepted April 9, 2019)

Abstract: The use of military lithium batteries in this field accelerates the generation of internal pressure because the active materials, lithium and the electrolyte, react to form sulfur dioxide gas. This also reduces the amount of electrolyte. In this condition, batteries can ‘vent’ or ‘explode’ especially when completely discharged. Such venting and explosion can be regarded as a safety accident, as toxic gases and shrapnel are ejected from the batteries which can harm the user. A DTaQ was carried out in 2017 as a quality problem solution project to solve this safety issue. A protection circuit was thereby developed, which included a micro controller unit (MCU) which can stop battery usage when in an over-discharging state by sensing its low-voltage condition. In 2018, this concept was expanded to lithium batteries for the remote controlled ammunition system. This paper reports results of the improved performance.

Keywords: Low current system, Lithium batteries, Protection circuit

1. 서론

군용 1차 리튬전지 또는 ‘전지, 재충전불가식’(이하 ‘리튬전지’)으로 불리는 전지는 대부분 Li/SOCl₂ (리튬/염화황산)전지이다. 이 전지의 음극 활물질은 반응성이 크고, 높은 전압 특성(셀 전압 3.6 V)을 가능케 하는 리튬이며, 양극은 독성/부식성 액체인 염화황산액이다. 다시 말해 군용 리튬전지는 우리가 흔히 건전지라 부르는 전지와는 전혀 다른 습식 전지이며, 불안정한 활물질을 포함하므로 주의해서 사용해야 한다 [1,2].

그러나 이처럼 주의를 요해야 할 전지를 민수용 전지에 익숙한 군이 사용하면서 크고 작은 사고가 매년 발생하고 있다. 군용 1차 리튬전지는 사용하면 할수록 활물질 반응에 의해 전해액은 줄어들고, 반응가스가 생성되어 내부 압력이 높아지는 특성이 있다. 특히 리튬전지 단위전지(셀)의 사용말기 전압인 2.0 V 이하에서 사용자가 전지의 교체 없이 지속적으로 사용 또는 방전시킬 경우(이하 ‘과방전’), 전해액 소진에 따른 반응불가, 반응가스에 의해 높아진 전지 내부 압력, 리튬의 용융 및 발화조건 성립 등의 요인에 따라, 전지 캔의 안전배기장치 개방(이하 ‘벤팅’), 폭발(‘파열’)로 인해 유독가스가 발생하고, 전지의 파편으로 인해 인명피해가 발생할 수 있는 위험한 전지이다.

실제로 2007년부터 2017년까지 벤팅 또는 파열에 의한 사용자 불만 발생 건은 연평균 약 14건이며, 2017년에는 이와 같은 전지에 따른 안전사고가 회로지령탄약

✉ Seong Gi Youn; narwa@naver.com
 Yu Seup Cho; imneo@nate.com

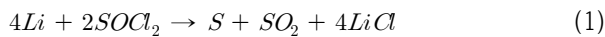
전력화 평가 간 발생하여 사용자 불만이 제기된 바 있다. 따라서 국방기술품질원에서는 이와 같은 품질문제 해결을 위해 근본적인 원인 분석과 연구 끝에 MCU (micro controller unit)와 같은 능동소자 및 탑재 소프트웨어를 포함한 신규 과방전 보호회로를 개발하여 검증 및 시험하였다 [1]. 본 논문에서는 저전류 균용장비의 리튬전지인 BA-6822AK 및 BA-6823AK용 과방전 보호회로에 대한 설계 및 시험에 대한 결과를 제시한다.

2. 실험 방법

2.1 균용 1차 리튬전지의 안전성 개선 원리

2.1.1 균용 1차 리튬전지 반응 원리

균용 1차 리튬전지의 각 양/음극과 반응원리는 다음과 같다. 양극은 염화황산(SOCl₂)액 및 소량의 첨가물(AlCl 등)로 이루어지며 전체 반응에서 양극 역할을 한다. 방전반응에 직접 참여하여 전지 사용 시 그 양이 점점 소진된다. 탄소 집전체는 다공성, 전도성의 탄소로 이루어져 있으며, 방전 반응 결과물인 황, 염화리튬 등이 석출되어 여기에 침전된다. 탄소집전체는 반응에 직접 참여하지 않는다.



음극은 리튬 금속으로, 양극과의 전위차에 의해 리

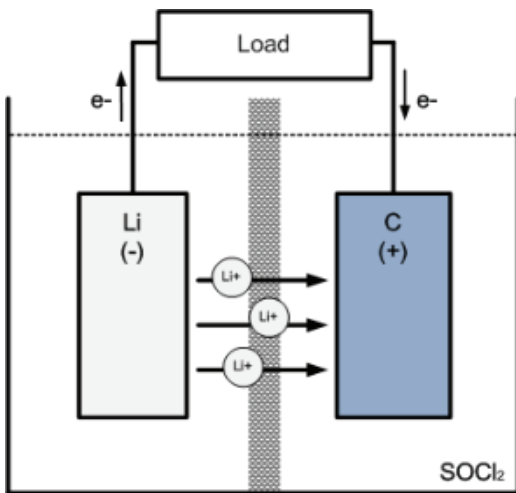


Fig. 1. Reaction principle of Li/SOCl₂ battery.

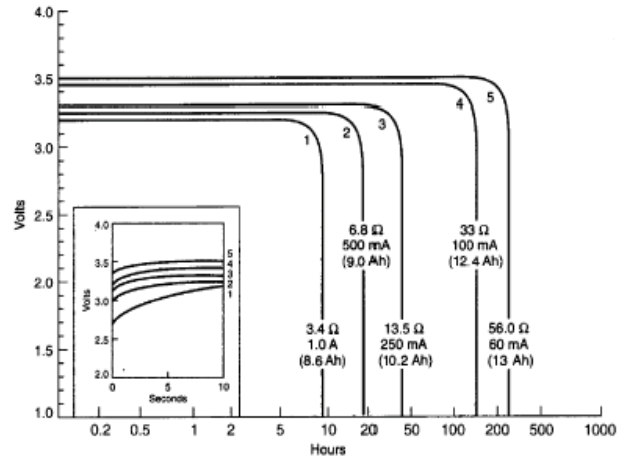


Fig. 2. Discharge profile of Li/SOCl₂ battery.

튬이 이온화되어 전해액으로 유입된다. 이때 분리된 전자는 전선을 따라 장비를 거쳐 양극의 탄소에서 반응을 마친다 [2].



2.1.2 균용 1차 리튬전지 전기적 특성

균용 1차 리튬전지의 전기적 특성은 다음과 같다. 첫째로 출력전압이 일정하다는 것이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 균용 리튬전지의 출력은 용량이 다할 때까지 3.6 V로 일정하다. 이 특성의 장점은 사용기간 동안 지속적으로 장비의 성능을 일정하고 최상으로 유지할 수 있다는 점이다. 반면, 단점은 출력전압이 일정하다가 가파르게 하강하여 저전압에 이르므로 잔여용량을 예측할 수 없다는 것이다. 이는 사용할수록 전압이 하강하여 잔여용량의 예측이 가능한 일반적인 전지의 특성과 대비된다.

둘째, 높은 에너지 밀도를 갖고 있다. 약 450 Wh/kg의 에너지밀도를 갖고 있어 다른 전지에 비해 수명이 길고 같은 에너지량 대비 무게가 가벼워 운용성, 기동성 측면에서 균용으로 유리하다. 반면, 이와 같은 높은 에너지 밀도는 파열 발생 가능성이 높아지는 등 사용자에게 인명피해를 줄 수 있는 잠재적 위험이 존재한다.

셋째, 자가 방전율이 매우 적다. 리튬염화황산 전지는 기본적으로 음극에 부동화막이라 불리는 염화리튬막이 생기는데, 이 피막이 리튬의 반응을 억제한다. 특히 장시간 저장할수록 이 피막은 두꺼워지므로 자가 방전율이 매우 낮다. 따라서 저장수명이 약 10년 정도

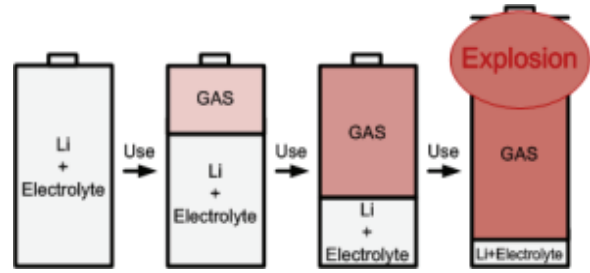
Table 1. Main characteristics of Li/SOCl₂ battery.

Anode	Li
Cathode	SOCl ₂ , C
Solvent	SOCl ₂
Solute	LiAlCl ₄
Separator	Glass non-woven
Construction	Spiral jelly-roll cylindrical
Nominal voltage	3.6 V
Specific energy	495 Wh/Kg
Energy density	High
Discharge profile	Flat

가능하여 매우 우수하다고 할 수 있다. 반면, 이와 같은 염화리튬막의 생성은 장기간 저장된 전지를 새로 사용하려 할 때 전지의 방전을 일정 시간 동안 방해하므로, 이 피막 제거를 위한 일정 시간 및 지속적인 방전시도가 필요하다. 이 현상을 초기전압 지연현상이라고 부른다. 그 외 광범위한 온도 특성은 혹한기에도 운용이 가능하여 군용으로 채택되는 데 매력적인 조건이다 [2,3].

2.1.3 군용 1차 리튬전지의 파열 매커니즘

국방부에서 발간한 <군용전지안전지침>에 의하면 파열(폭발)이란 “저장 또는 사용 중 전지 내부의 화학반응에 따른 압력의 급격한 증가로 안전배기장치 또는 타 부위가 갈라지거나 여러 조각으로 찢어지면서 전지(셀) 내용물이 강압적으로 분출하는 현상”으로 정의하고 있다. 보통 군용 리튬전지는 사용자의 안전을 고려하여 내부압력이 높아져도 폭발에 이르지 않도록 하기 위한 안전배기장치가 작동하도록 설계되어 있으나, 전지를 용량 이상으로 사용(과방전)하게 되면 폭발에 이를 수 있다. 과방전에 따른 파열 현상은 어쩔 수 없는 전지의 태생적 한계이다. 즉 전지를 사용함에 따라 전해액이 소진되어 전지의 발열을 방지하는 냉매 역할을 하는 전해액이 소실되는 한편, 기화된 반응가스로 인해 전지 내부압력 증가하여 파열되기 쉬운 조건이 형성되는 것이다. 이와 더불어, 전지의 일정한 출력전압 특성은 전지를 얼마나 사용하였는지 또는 얼마나 더 사용 가능한지에 대한 판단을 어렵게 한다. 따라서 이와 같은 복잡한 전지를 운용함에 있어 사용자가 모든 상황을 고려하고 예측하며, 주의하기란 현실적으로 쉽지 않다.

**Fig. 3.** Explosion mechanism of Li/SOCl₂ battery.

2.1.4 군용 1차 리튬전지 안전성 개선 방안

군용 리튬전지의 과방전에 의한 벤팅 및 파열 현상을 해결하고자 군 및 관련 기관은 안전성 개선 활동을 수행하여 왔다. 다이오드, FET소자, IC소자 등을 이용한 다각적 설계를 통해 안전성을 확보하고자 노력하였다. 개선방법은 전지가 과방전으로 인해 저전압 구간에 진입하였을 때 출력단을 차단하여 더 이상의 방전을 막고 장비가 OFF됨에 따라 사용자가 전지를 교체하도록 유도하는 방식이다. 그러나 이와 같은 개선방식은 앞서 설명한 군용 리튬전지의 초기전압지연 현상, 즉 장기간 저장 후 부하를 인가하였을 때 순간적으로 전압이 하강하여 정상적인 작동전압을 회복하는 데 일정 시간이 요구되는 현상으로 인해 차단기능에 강제적인 대기 시간을 부여해야 하는 제한이 있었다. 이에 따라 급격한 과방전에 따른 벤팅 또는 파열 방지는 기술적으로 부족하였다. 또한, 군용 리튬전지는 과방전에 따라 저전압 구간에 진입하더라도, 부하가 없는 상태에서 활물질인 리튬이 조금이라도 남아있으면 본래 전압인 3.6 V로 전압을 잠시 동안 회복하므로, 과방전된 전지를 사용자가 재사용할 수 있다. 다시 말해, 과방전에 이르러 전지의 내부 압력이 매우 높은 상태의 전지를 군이 사용하게 되는 것이고, 이 경우 벤팅 또는 파열 가능성이 더욱 높은 전지를 사용하게 되는 셈이다.

국방기술품질원에서는 그동안의 개선방식에 기술적 한계가 있음을 인지하고 이를 보완하기 위해 2017년부터 연구개발에 착수하였다. 기존에 설계된 보호회로를 개선하는 방향으로 큰 틀을 잡았으며 보다 많은 기능이 포함되게 하였다. 첫째로 그동안 문제가 되었던 초기전압지연현상으로 인한 대기시간 소거를 위해, 스마트 소자를 이용하여 과방전으로 인한 저전압을 판단할 수 있게 하였다. 다시 말해, 초기에 발생하는 저전압 현상은 무시하고 일정 사용시간 이후 저전압 발생 시 회로를 짧은 시간 내에 차단하는 기능을 부여하였다.

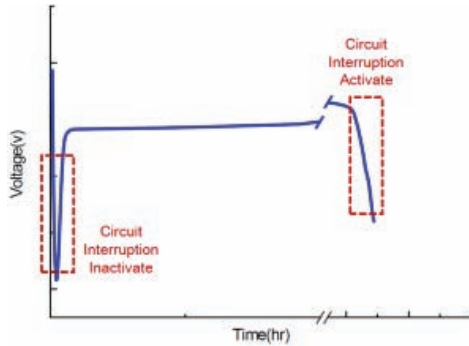


Fig. 4. Interruption concept of new protection circuit.

일정 사용시간이란 이론적으로 초기전압지연현상이 완전히 해소되는 시점인 전지 총 예상사용량의 23% 지점인(13.0 Ah 기준) 3.0 Ah 지점이다. 둘째로 과방전 보호회로에서 전지를 차단 시, 사용자가 재사용할 수 없도록 하는 기능을 부여하였다 [4-7].

3. 결과 및 고찰

3.1 저전류 장비용 리튬전지 보호회로 구현

3.1.1 배경

회로지령탄약은 대표적인 저전류 사용장비로, 2017년 전력화평가 간 리튬전지에 의해 안전사고가 발생하였다. 원격운용통제 제어기를 운용하던 병사가 장비에서 저전압 경보를 인식하고, 과방전된 전지를 신제품으로 교체한 후 여전히 장비에서 저전압이 감지(초기전압 지연으로 인한 저전압 현상)되자, 전지의 특성이 민수용과 유사할 것이라고 오인하고 기존의 과방전된 전지를 재사용하며 장비의 작동 여부를 점검하였다. 곧이어 재사용된 과방전 전지가 폭발하면서 전지 및 원격운용통제 제어기가 파손되었다. 해당 안전사고는 앞서 언급한 군용 리튬전지의 위험한 특성이 모두 나타나 있다. 첫째로 과방전에 의한 파열이 발생하였고 둘째, 초기전압지연 현상에 따라 신제품 전지가 저전압으로 인식되었다. 이와 더불어 민수용 전지 사용 경험에 따라 운용자가 과방전 및 내압 상승 심화상태의 전지를 장비에서 작동하여 과방전 파열이 일어난 것이 원인이다. 이 사고로 인해 회로지령탄약 전력화 평가 후속조치로 전지 안전성 개선이 요구되었고, 국방기술품질원에서 연구 개발하던 리튬전지용 신규 보호회로의 적용을 시도하였다. 당시

Table 2. Current usage of target system.

System	Max usage (A)	Min usage (A)
Motion Tactical detector	2.119	0.028
Training	1.175	0.029
Remote control radio Repeater	1.279	0.043
	1.241	0.025

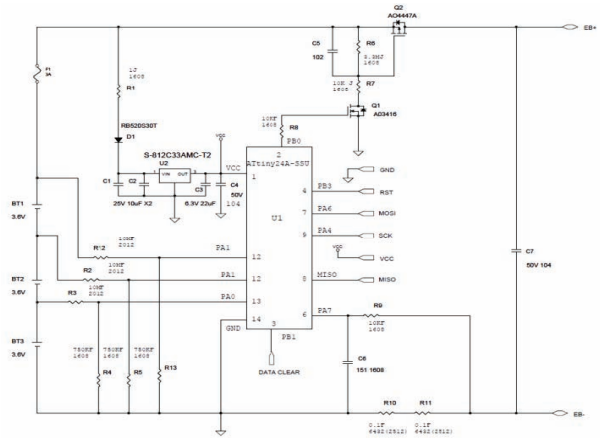


Fig. 5. New designed protection circuit for BA-6822AK.

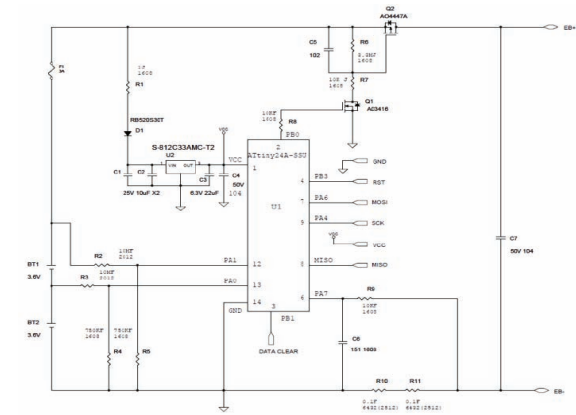


Fig. 6. New designed protection circuit for BA-6823AK.

연구되던 과방전 보호회로는 1직렬 단위전지용 보호회로로서, 단위전지의 전압(3.6 V)으로 MCU가 동작되기 때문에 최소 운용전압이 단위전지의 종지전압인 2.0 V로 설정되었다. 또한 전지구조상 양극에 전압차 측정부(shunt 저항)가 배치되었다. 그러나 1직렬 단위전지용 보호회로는 일원화된 shunt 저항으로 인해 장비별 사용 전류가 상이할 경우 가장 중요한 기능인 전류 적산 기능을 사용할 수 없었다. 실제로, 2017년에 회로지령

가 2017년과 달리 2018년 제작품에서 설계한 의도대로 정상 동작하였고, 이로 인해 신규 보호회로의 적용이 가능함을 검증하였다. 향후 보호회로 및 전지를 추가로 제작 및 재시험하여 체계에 전면 적용할 예정이다.

4. 결론

본 신규 과방전 보호회로는 군용 리튬전지의 야전 운용 중 파열과 같은 안전사고 및 사용자 불만, 품질 이슈사항을 해결하고자 2017년부터 국방기술품질원에서 연구 개발하였다. 군용 리튬전지의 파열은 기본적으로 사용자가 야전에서 리튬전지를 과하게 방전하여 사용함에 따라 발생하고, 과방전 상태에서는 전지가 저전압에 이른다. 이 때문에 과거에도 이점에 착안하여 보호회로를 통해 이와 같은 문제를 해결하려고 시도하였다. 그러나 기술적 한계로 군용 리튬전지의 고유특성인 초기전압지연에서의 전지 거동과 과방전에서의 전지 거동을 구별하지 못하여 사실상 개선의 효과가 미비하였다. 본 연구개발 시 기존의 과방전 보호회로를 개선하여 초기전압지연/과방전 시 전지 거동 구별, 과방전 차단된 전지의 재사용 불가 등 우수한 기능을 신규로 탑재하여 구현하였다. 기 연구된 단위전지 및 4직렬 보호회로의 개념을 기반으로 주장비의 사용전류를 측정하여 2직렬 및 3직렬용 과방전 보호회로를 설계 및 구현하였고, 국방규격 시험 및 체계호환성 시험을 실시한 결과 보호회로가 성공적으로 동작하였다. 본 연구결과는 소요군에 안전한 전지 운용 및 관리의 기반이 될 수 있

을 뿐 아니라, 4직렬 군용 리튬전지에 이어 기타 전원 공급원에도 이와 같은 보호회로를 성공적으로 적용될 수 있음을 다른 무기체계에서 확인했다는 점에서 그 효용과 품질적 가치가 매우 크다고 판단된다.

ORCID

Seong Gi Youn
Yu Seup Cho

<https://orcid.org/0000-0003-1279-7208>
<https://orcid.org/0000-0002-8627-9211>

REFERENCES

- [1] M. K. Ahn, Y. T. Jeong, J. S. Lee, and T. J. Roh, *J. Korean Inst. Mil. Sci. Technol.*, **21**, 669 (2018).
- [2] T. B. Reddy and D. Linden, *Linden's Handbook of Batteries Fourth Edition* (McGraw-Hill, New York, 2011).
- [3] M. K. Lim and S. Y. Chun, *J. Inst. Electronics. Info. Eng.*, **45**, 60 (2008).
- [4] J. H. Son, H. W. Shin, Y. H. Lee, G. I. Jeong, and B. S. Kim, *Conference of Inst. Electronics. Info. Eng.* (IEIE, Jeju, 2014).
- [5] J. H. Park, G. C. Cha, W. R. Cho, and J. C. Kim, *J. Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, **28**, (2014).
- [6] B. J. Lee, K. J. Choi, S. H. Lee, Y. M. Jeong, Y. Park, and D. W. Cho, *J. Korean Inst. Commun. Inf. Sci.*, **42**, 855 (2017).
- [7] J. H. Nam, *Power Electronics Annual Conference* (KIPE, Byunsan, 2017).