

에너지저장장치용 리튬이온전지의 외부단락 시 보호소자에 따른 안전성 평가

정재범^{*,**}, 임민규^{**}, 김진용^{**}, 한아^{**}, 노대석^{*}

^{*}한국기술교육대학교 전기공학과

^{**}한국산업기술시험원

e-mail:ktljjb@koreatech.ac.kr

A Safety Assessment of External Short Circuit for ESS Li-ion Battery with Protection Devices

Jae-Beom Jung^{*,**}, Min-Gyu Lim^{**}, Jin-Yong Kim^{**}, Ah Han^{**}, Dae-Seok Rho^{*}

^{*}Dept. of Electric Engineering, Korea Tech University

^{**}Korea Testing Laboratory

요 약

최근, 몇 년간 국내외에서 전기자동차(electric vehicle, EV)와 에너지저장장치(energy storage system, ESS)에 적용되는 중대형 이차전지의 수요가 급격하게 늘어나고 있고, 이에 따라 시장 규모도 기하급수적으로 증가하고 있다. 하지만, 최근 발생하고 있는 EV와 ESS용 이차전지의 화재는 시장에 부정적인 영향을 주고 있다. 특히, 2017년 8월부터 발생한 국내 ESS 화재는 2021년 5월 현재까지 총 31건으로 보고되고 있어, 중대형 이차전지의 안전성 검증을 강화하기 위한 체계적인 연구의 필요성이 대두되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 국내 중대형 이차전지에 사용되는 배터리 셀 중 범용으로 활용되는 NMC계열 배터리를 대상으로 대표적인 안전성 시험 중 하나인 외부단락 시험을 수행하기 위한 사고모의 장치를 구현한다. 여기서, 외부단락시험용 사고모의장치는 단락저항, 계측장치부, 제어장치부 등으로 구성되며, 다양한 시험조건에 따른 외부단락 특성을 분석할 수 있도록 구현한다. 이를 바탕으로 외부단락시험을 수행한 결과, 보호소자에 따른 전류 및 차단시간 특성을 확인할 수 있어, 본 논문의 유효성을 확인하였다.

1. 서 론

최근 수십 년 동안 이어진 리튬이온전지의 사용 범위 확장은 전기자동차, 에너지저장장치의 상용화를 이끌어내었다. 국내 EV 시장의 경우 2016년말 대비 2019년 9월에 700%이상 급격히 증가하고 있고, ESS 시장 역시 2017년 대비 2018년에 380% 이상 증가하는 등 중대형 이차전지 시장은 가파른 증가폭을 보이고 있다[1,2]. 이러한 상용화는 리튬이온전지 셀의 에너지밀도 증가에 따라 진행되고 있으며, 이에 따른 화재 위험성도 동시에 증가하고 있어 최근 중대형 이차전지의 화재가 다양하게 발생하고 있다. 코나 EV의 경우 국내 기준 12건의 화재가 발생하여, 국토교통부에서 제작결함에 따른 시정조치(리콜)를 명령하였다. ESS의 경우 2017년 8월부터 2020년 10월 현재까지 총 29건의 화재가 발생하여 정부 주도 2차례 사고 조사를 진행되었으며, 이 과정에서 다양한 안전 대책이 적용되었으나 이후에도 화재가 발생하여 추가로 조사가 진행되고 있다. 이뿐만 아니라 국외에서도 EV와 ESS의 화재 사례가 지속적으로 발생이 보고되고 있으며, 이에 따라 리튬이온전지의 안전성 검증을 강화하고 체계적으로 연구해야 한다는

시장의 요구가 이어지고 있다.

정부 사고조사 결과 중 직류 측 단락 시험 내용에서 알 수 있듯이 보호소자는 단락 상황에서 발생하는 큰 단락 전류를 막아 줄 수 있는 중대형 이차전지의 중요한 안전 요소이다[3]. 이에 따라 본 논문에서는 모듈 퓨즈가 적용된 모듈과 셀 퓨즈가 적용된 모듈의 단락 시험을 통해서 어떤 보호 체계가 단락전류를 효과적으로 차단하는지 확인하고자 한다.

2. ESS용 리튬이온전지의 외부단락 특성

2.1 리튬이온전지의 외부단락 특성

외부단락(External Short Circuit)은 배터리의 외부로 나와 있는 양극과 음극을 외부저항을 통해 연결하는 시험으로, 화재 위험성이 높은 시험으로 알려져 있다. 단락경로가 형성되는 순간 전위차로 인한 높은 단락전류가 흐르게 되고, 셀 내부저항에 흐르는 높은 줄(Joule)열이 발생하여 셀이 높은 온도에 도달하게 된다[2]. 높은 온도는 양극과 음극 사이의 분리막의 물리적 변형을 일으키게 되고, 내부 양극과 음극이 만나는

내부단락(Internal Short Circuit)을 일으키는 등의 발열 반응이 일어나게 된다. 이를 통해, 배터리 셀이 열폭주(Thermal Runaway) 상태로 접어들게 되고 열전이(Thermal Propagation)을 거쳐 화재나 폭발로 이어지게 된다. 특히 단락 저항이 낮은 경우, 단락전류가 커지고 온도가 높아지게 되는데, 이 때 보호소자를 통해 단락전류를 빠른 시간 내에 차단하는 것이 배터리의 안전성을 확보하기 위한 좋은 방안이다.

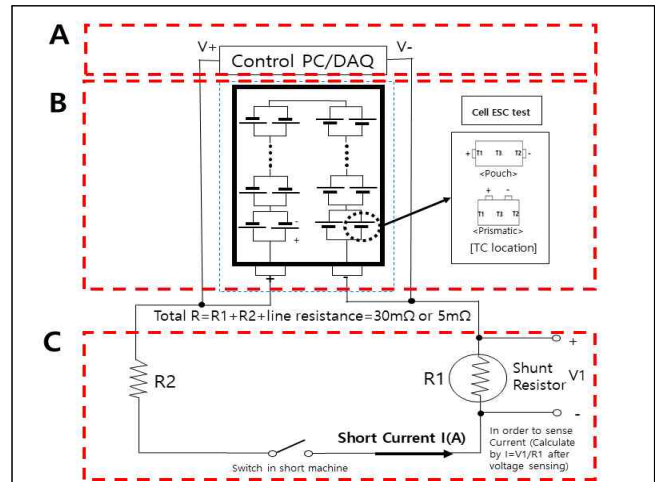
2.2 리튬이온전지의 외부단락 사고사례 분석

상기에서 설명한 리튬이온전지의 외부단락 사고 사례는 쉽게 찾아볼 수 있다. 실제 화재사고를 조사하고 발표한 ESS 화재사고 원인조사 결과 보고서에서 버스바 파손에 따른 배터리 랙 보호장치의 외함을 타격하는 2차 단락사고가 발생 후 화재에 대해 언급하고 있고, 수분·분진 시험에서 절연 성능 저하 후 화재가 발생한 메커니즘도 2차 지락에 의한 단락 사고로 추정된다. 더불어 코나 EV에서 초기 제조사에서 주장한 부동액 누출로 인한 화재 역시 절연 파괴로 인한 2선 지락/단락에 따라 단락회로가 형성되어 화재가 난 것으로 추정할 수 있다. 단락회로가 형성되어 큰 단락전류가 흐를 때 경로 내에 전류를 빠른 시간 내에 차단하는 보호소자가 있다면, 외부단락으로 인한 배터리 셀의 열폭주를 효과적으로 막을 수 있다.

3. 배터리 외부단락 모의시험장치의 구현

3.1 외부단락 모의시험장치 구성

외부단락시험에 사용되는 모듈은 국내 중대형 Application에서 가장 널리 쓰이고 있는 양극활물질인 NMC계열의 배터리를 사용한다. 상기 유형의 배터리 셀은 국내 중대형 이차전지의 대부분을 차지하고, 사고 건수 역시 가장 많은 유형이다. 외부단락시험을 위해 그림 1과 같이 시험장치를 구성한다. 여기서, A부분은 제어계측부로 외부단락기를 제어하는 Control PC와 전압, 온도 등을 계측하는 DAQ로 구성되고, B부분은 배터리 모듈부로 단락 시 단락전류가 흐르며, 보호소자를 통해 보호동작이 이루어지는 부분이다. 또한, C부분은 외부단락 부로 단락저항을 조절하고 전류를 측정하며, 제어계측부의 지시에 따라 단락을 수행하는 부분이다.



[그림 1] 모듈 외부단락 수행 모드도 및 장치

3.2 외부단락저항 구성

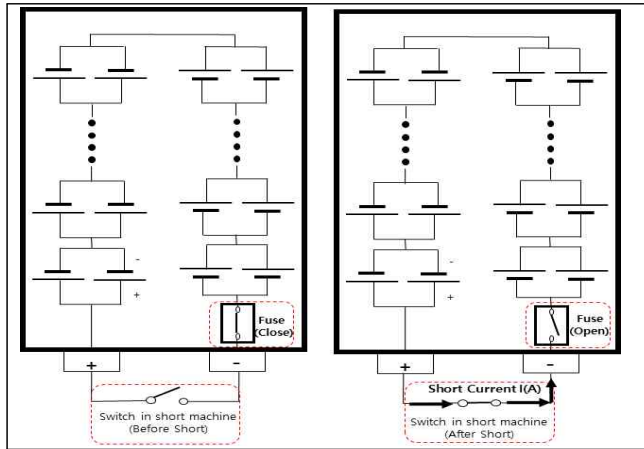
현재, 중대형 리튬이온전지에 적용되는 국내의 표준 및 규격은 표 1과 같고, 이 표에서와 같이 ESS용 단락저항이 EV용 단락저항보다 높은 것을 알 수 있다. 이에 따라, 본 논문에서는 EV용 배터리 표준에서 가장 많이 사용되고 있는 5[mΩ]과 ESS용 배터리 표준의 30[mΩ]을 본 시험의 단락 저항으로 설정한다.

[표 1] 중대형 리튬이차전지 표준·규격 내 단락저항 기준

items	standards	short resistances
Energy Storage System (ESS)	KBIA 10104-03	(30 ± 10)mΩ
	KC 62619	(30 ± 10)mΩ
	IEC 62619	(30 ± 10)mΩ
	KS C IEC 62619	(30 ± 10)mΩ
	IEC 63056	(30 ± 10)mΩ
	UL 1973	less than 20mΩ
Electric Vehicle (EV)	IEC 62660-2	less than 5mΩ
	KS C IEC 62660-2	less than 5mΩ
	ISO 12405-2	(20 ± 10)mΩ
	UL 2580	less than 20mΩ
	UN ECE R 100	less than 5mΩ

3.3 배터리 모듈 외부단락 보호소자 구성

그림 2와 같이 모듈퓨즈가 적용된 경우, 대전류 단의 보호소자가 동작하면서 전류를 차단하게 된다. 단락장치 내 스위치가 닫히면서 전위차에 따라 급격하게 높은 단락 전류가 흐르게 되고, 보호소자가 동작하여 단락경로를 차단하게 된다. 각 퓨즈의 사양에 따라 차단 시간 등이 결정되며, 일반적으로 모듈 내에서 병렬 구조로 셀이 구성된 경우 모듈 퓨즈를 사용하고 있다.

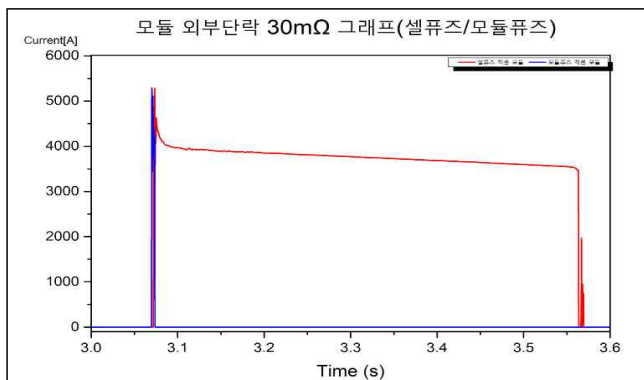


[그림 2] 외부단락 시 모듈 내 퓨즈 동작

한편, 일부 셀의 경우 셀 내부에 퓨즈를 적용하는 경우가 있으며, 모듈 퓨즈와 마찬가지로 높은 전류가 인가될 경우 줄열 등으로 인해 단락경로를 끊어 단락전류를 차단하는 역할을 한다. 본 논문에서는 셀 퓨즈가 적용된 모듈과 모듈 퓨즈를 추가한 모듈을 대상으로, 외부단락시험을 통하여 차단시간 및 전하량 등의 특성을 제시한다. 본 시험에 장착하는 모듈 퓨즈는 비슷한 용량의 ESS 모듈에 실제 사용하는 제품에서 탈거하여 사용한다.

4. 보호소자에 의한 외부단락시험 및 특성 분석

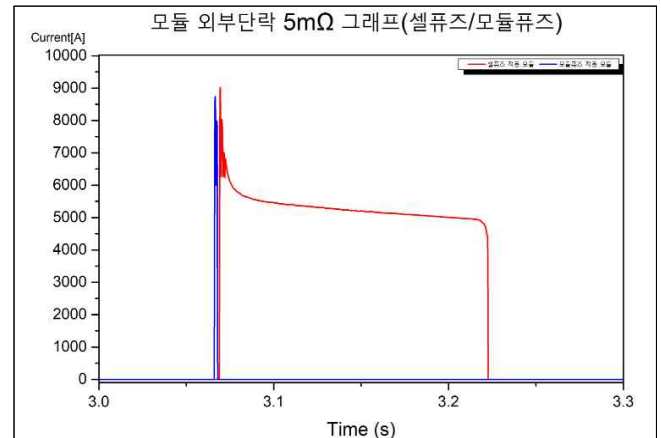
3.3절에서 제시한 바와 같이, 단락저항을 30[mΩ]으로 설정하여 외부단락시험을 수행한 결과, 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 모듈 퓨즈가 셀 퓨즈에 비해 빠르게 동작하여, 단락전류를 조기에 효과적으로 차단하는 것을 알 수 있다.



[그림 3] 모듈 30[mΩ] 외부단락 시 전류(A)-시간(s)

위와 동일하게 모듈퓨즈와 셀 퓨즈가 적용된 모듈에 대하여 단락저항을 5[mΩ]으로 설정하여 외부단락시험을 수행한 결과, 그림 4과 같이 나타낼 수 있다. 단락저항을 30[mΩ]으로 설정한 결과와 동일하게 모듈 퓨즈가 셀 퓨즈

에 비해 빠른 시간 내에 동작한 것을 알 수 있다.



[그림 4] 모듈 5[mΩ] 외부단락 시 전류(A)-시간(s)

해당 시험 결과를 표 2와 같으며, 배터리 셀에 인가되는 위해를 확인하기 위해 전류량(Ah)을 사용할 경우 숫자가 매우 작아, 전하량을 사용하여 나타낼 경우 식 (1)과 같이 근사하여 구할 수 있다.

$$\text{전하량 } Q = \int_0^t i(t) dt \quad (1)$$

시험 결과 모든 시험에서 단락전류 인가 후 1초 이내에 보호소자가 동작하였고, 이로 인해 열폭주 등의 이벤트를 발생하지 않았으며, 시험 후 관찰기간에도 Vent를 비롯하여 화재나 폭발은 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. 하지만 모듈 퓨즈가 셀 퓨즈에 비해 같은 단락저항 기준 76배에서 최대 117배가량 빠른 차단시간 특성을 보였으며, 단락 시 전하량의 경우에도 65배에서 최대 110배 이상 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 전기자동차 표준에서 쓰이는 5[mΩ]의 단락저항을 적용한 모듈과 에너지저장장치 표준을 참고하여 적용한 5[mΩ]의 단락저항에서 동일한 결과를 보이고 있어, 단락저항에 따른 단락전류의 변화에 관계없이 일관된 양상을 확인할 수 있다.

[표 2] 모듈 외부단락 결과

구분	초기전압(V)	차단시간(ms)	전하량(C)
셀 퓨즈 (30mΩ)	66.30	491.98	1850.75
모듈 퓨즈 (30mΩ)	65.74	4.19	16.72
셀 퓨즈 (5mΩ)	66.27	153.9	813.90
모듈 퓨즈 (5mΩ)	66.18	2.02	12.46

5. 결 론

본 논문에서는 모듈 퓨즈와 셀 퓨즈를 적용한 모듈의 외부단락시험을 단락저항별로 각각 진행한 결과, 모두 단락저항에 관계없이 단락전류 인가 후 1초 이내에 보호소자가 동작한 것을 확인할 수 있다. 그러나 모듈 퓨즈는 셀 퓨즈에 비해 단락전류를 76배에서 최대 117배 이상 빠르게 차단하여, 배터리 셀로 흐르는 전하량을 65배에서 최대 110배 이상 줄이는 것을 확인할 수 있다. 또한 단락저항에 따른 단락전류의 변화에 관계없이, 효과적인 보호동작을 수행하여 셀 퓨즈에 비해 차단특성이 우수함을 확인할 수 있다.

이를 통해, 모듈 내 대전류 단에 연결된 퓨즈가 단락 경로가 형성되어 발생하는 큰 단락전류를 셀 퓨즈에 비해 빠르게 차단하여, 배터리에 피해를 줄여 화재 발생 위험을 감소시킬 수 있는 것으로 확인할 수 있다. 따라서, 절연파괴 및 지락 등으로 발생할 수 있는 전기적 위험으로 인한 화재 위험을 효과적으로 대응하기 위해서, 모듈 퓨즈를 장착하는 것이 바람직함을 본 논문을 통해 확인할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 'ESS 안전확보를 위한 실증기반의 안전성 평가지표 개발 및 시설기준 제시' 과제의 일환으로 진행된 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 정재범, “에너지저장장치(ESS)의 안전성 증대를 위한 화재사고 사례연구”, 대한전기학회, 6월, 2020년.
- [2] 정재범, “ESS용 리튬이온전지의 외부단락 시 보호소자 및 전처리 온도에 따른 안전성 평가에 관한 연구”, 산학기술학회, 11월, 2020년.
- [3] 민관합동 ESS 화재사고 원인조사 위원회, “ESS 화재사고 원인조사 결과”, 6월, 2019년.
- [4] Hao Ji, “Study of lithium-ion battery module's external short circuit under different temperatures”, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, March 2020.