Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 22, No. 8 pp. 663-672, 2021

https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.8.663
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

운용환경요인을 고려한 리튬이온전지의 외부단락 특성 연구

정재범[1], 임민규[2], 김진용[2], 노대석[1*]
[1]한국기술교육대학교, [2]한국산업기술시험원

Characteristics of External Short-Circuit in Li-ion Battery Considering Operation and Environment Factors

Jae-Beom Jung[1], Min-Gyu Lim[2], Jin-Yong Kim[2], Dae-Seok Rho[1*]
[1]Korea University of Technology and Education, [2]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 각형 및 파우치형 전지를 대상으로 대표적인 안전성 시험 중 하나인 외부단락 시험을 수행하기 위한 사고모의 장치를 구현한다. 여기서, 외부단락시험용 사고모의장치는 단락저항, 계측장치부, 제어장치부 등으로 구성되며, 다양한 운용환경 시험조건에 따른 외부단락 특성을 분석할 수 있도록 구현한다. 이를 바탕으로 리튬이온전지의 형태, 단락저항 및 SOC에 따른 외부단락 시험을 수행하여, 단락저항과 SOC에 따른 전류 및 온도 특성을 제시한다. 또한, 전처리 온도와 전지 모듈 내 보호소자별 외부단락을 수행한 결과, 보호소자에 따른 전류 및 차단시간, 전처리 온도에 따른 외부단락 특성을 확인할 수 있어, 본 논문의 유효성을 확인하였다.

Abstract In this paper, we utilize an accident simulation device to perform an external short-circuit test, one of the typical safety tests of IEC62619 for NMC prismatic and pouch-type batteries, which are widely used in battery cells of medium and large secondary batteries. The device consists of a short-circuit resistance, measurement device section, control device section, etc., to analyze external short-circuit characteristics according to various optional test conditions. Based on the output of the proposed test device, this paper presents the characteristics of current and temperature according to the short-circuit resistance and SOC by performing an external short-circuit test of a lithium-ion (Li-ion) battery. In addition, as a result of performing an external short-circuit for each protection element in the battery module and pre-processing temperature, the effectiveness of the characteristics of these elements can be evaluated.

Keywords : ESS, Li-Ion Battery, Fire Accident, External Short Circuit, Resistance, SOC, Charge Temperature

본 논문은 한국에너지기술평가원(KETEP)의 'ESS 안전확보를 위한 실증기반의 안전성 평가지표 개발 및 시설기준 제시(No.20192910100250)' 과제의 일환으로 진행된 연구로서, 산업통상자원부의 사업비를 지원받아 연구되었음.
*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)
email: dsrho@koreatech.ac.kr
Received May 11, 2021 Revised July 22, 2021
Accepted August 5, 2021 Published August 31, 2021

1. 서론

최근 수십 년 동안 리튬이온전지의 활용범위는 다양한 분야로 확장되고 있다. 리튬이온전지의 발전은 과거의 유선 전화기를 휴대폰으로, 데스크탑을 노트북으로, 유선청소기를 무선청소기로 변화시켰다. 국내 EV 시장의 경우 2016년말 대비 2019년 9월 기준 700%이상 급격히 증가하고 있고, ESS 시장 역시 2017년 대비 2018년 기준 380% 이상 증가하는 등 중대형 이차전지 시장은 가파른 증가폭을 보이고 있다[1]. 이러한 상용화는 리튬이온전지의 에너지밀도 증가에 따라 진행되고 있으며, 이에 따른 화재 위험성도 동시에 증가하여, 최근 국내외에서 중대형 이차전지의 화재가 다양하게 발생하고 있다. 특히, 코나 EV의 경우 국내 기준 17건의 화재가 발생하였고, 국토교통부에서 제작결함에 따른 시정조치(리콜)를 명령하였다. ESS의 경우 2017년 8월부터 2021년 3월 현재까지 총 30건의 화재가 발생하여, 정부 주도 하에 2차례 사고 조사를 진행되었으며, 이 과정에서 다양한 안전 대책이 적용되었으나 이후에도 화재가 발생하여 추가로 조사가 진행되고 있다. 뿐만 아니라 국외에서도 EV와 ESS의 화재 사례가 지속적으로 보고되고 있으며, 이에 따라 리튬이온전지의 안전성 검증을 강화하고 체계적으로 연구해야 한다는 시장의 요구가 이어지고 있다.

최근 발생한 ESS 화재 관련 2차례 정부사고조사 결과 공통적으로 높은 SOC 사용에 대한 지적이 있었다. 1차 사고조사위원회에서는 제조결함이 있는 상황에서 전지의 충·방전 범위가 넓을 경우 내부단락으로 인한 화재 발생 가능성이 높아질 수 있는 부분을 지적하였고, 2차 화재사고 조사단에서는 높은 충전율 조건(95% 이상)으로 운영하는 방식과 배터리 이상 현상이 결합되어 화재가 발생한 것으로 추정하였다[2,3]. 따라서, 본 논문에서는 리튬이온전지의 열폭주(Thermal Runaway)가 발생할 수 있는 대표적인 원인 중 하나인 외부단락 시험을 통해 SOC 및 단락저항에 따른 안전성평가를 제시하고, 나아가 현재 적용되고 있는 EV 및 ESS용 중대형 리튬이온전지의 외부단락 시험 조건에 대한 적절성을 평가하고자 한다. 또한, ESS 화재사고와 관련된 정부사고조사 결과 중 직류측 단락시험에서 보호소자는 단락 상황에서 발생하는 큰 단락전류를 차단시킬 수 있는 중대형 이차전지의 중요한 안전 요소로 평가되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 모듈 퓨즈가 적용된 모듈과 셀 퓨즈가 적용된 모듈의 단락시험을 통해서 어떤 보호 체계가 단락전류를 효과적으로 차단하는지 보호소자의 특성을 제시하고자 한다. 또한 ESS 사용 환경(온도)에 따른 단락 시 안전성을 확인하기 위해, 단락 전 배터리의 전처리 온도를 다양하게 설정하여 단락시험 특성을 확보하여, 중대형 리튬이온전지의 안전성 및 기술력을 확보하고, 국내 배터리 업계가 세계 시장에서 산업경쟁력을 갖추는 것에 일조하고자 한다.

2. 리튬이온전지의 외부단락 특성

2.1 외부단락 사고 및 시험 사례

민간합동으로 제시한『ESS 화재사고 원인조사 결과 보고서』에 의하면, 배터리 랙의 부스 바의 파손에 따라 분전반(switch gear box)의 외함을 타격하는 2차 단락 사고에 의한 동시다발적인 화재의 원인으로 추정되고, 수분·분진 시험에서 절연성능 저하에 의한 화재 발생 메커니즘도 2차 지락에 의한 단락 사고로 추정되고 있다[4]. 또한, EV 제조사는 부동액 누출로 인한 절연 파괴로 2선 지락이 발생하고 결국 단락회로가 형성되어 화재가 난 것으로 추정하고 있다. 한편, 리튬이온전지의 안전성에 영향을 크게 미칠 수 있는 외부단락 시험은 다수의 문헌에서 제시되고 있다[5,6]. 여기서, 배터리의 SOC에 따른 외부단락시험을 수행한 경우, 외부단락 초기에 급격한 전류 상승과 함께 온도가 증가하는 현상을 제시한다. 다만, 상기의 시험은 EV나 ESS에 사용되는 중대형 배터리 셀이 아닌 소형 배터리 셀 혹은 원통형 셀을 사용하고 있다. 또한, 소형 배터리 셀은 대부분 양극활물질로 LCO 계열을 사용하고 있고, 원통형 셀도 LCO 혹은 NCA계열의 양극재를 사용하고 있다. 하지만, 중대형 배터리 셀의 경우 일부 원통형을 제외하고 NMC(삼원계) 계열을 주로 사용하고 있으나, 해당 배터리 셀에 대한 외부단락 안전성 자료, 특히 SOC별 외부단락 특성은 제시되지 않고 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS 화재사고 중 대부분을 차지하는 중대형 배터리 셀에 대한 외부단락 시험과 보호소자에 따른 배터리 모듈의 외부단락 시험을 통해, 안전성을 진단하고 나아가 현재 개발 중인 국내외 표준의 근거자료를 제시하고자 한다.

2.2 운용환경요인에 따른 외부단락 특성

리튬이온전지의 외부단락(External Short Circuit)은 배터리 외부에 노출된 양극과 음극을 외부저항을 통해 연결하여 위해성을 판단하는, 화재 위험성이 높은 시험으로 알려져 있다. 이 시험은 단락회로가 형성되는 순간 높

은 단락전류가 흐르게 되고, 셀 내부저항에서 높은 줄(joule) 열이 발생하여 셀의 온도는 급격하게 상승하게 된다[7]. 외부단락에 의한 높은 온도는 양극과 음극 사이에 위치한 분리막에 물리적 변형을 일으키고, 이에 의하여 양극과 음극이 접촉하는 내부단락(Internal Short Circuit)이 발생하여 심각한 발열 반응을 수반하게 된다. 이에 따라, 배터리 셀은 급격하게 온도가 상승하는 열폭주(Thermal Runaway) 상태가 되고, 열전이(Thermal Propagation) 현상에 의하여 화재나 폭발로 이어질 가능성이 있다. 이 때 SOC, 단락저항, 전처리 온도, 보호소자 등의 운용환경요인에 따라, 외부단락에 의한 배터리의 위험도가 결정된다. 즉, 배터리 셀의 SOC(state of charge)가 높거나 단락 저항이 낮은 경우, 단락전류가 커지고 온도도 높아지게 된다. 하지만, 외부 단락저항이 큰 경우에는 SOC에 따른 영향이 작아져, 배터리의 위험도를 정확하게 확인하기 어려울 수 있다. 또한, 전처리 충전 온도에 따라 화학적 특성의 변화로, 초기전압과 단락전류에 영향을 미칠 수 있다. 한편, 모듈 내에 위치한 보호소자에 따라 단락전류 차단 시간에 영향을 미칠 수 있으므로 퓨즈 등을 포함한 모듈 단의 보호소자에 대해 고찰해야 한다.

3. 운용환경요인을 고려한 외부단락 시험장치 구현

3.1 모의 외부단락 시험장치의 구성

3.1.1 배터리 모듈용 외부단락 시험장치 구현

외부단락시험에 사용되는 모듈은 크게 2가지 유형의 배터리 셀로 구성된다. 국내 중대형 배터리 시장에서 가장 널리 사용되고 있는 양극활물질인 NMC계열의 배터리 중 각형(prismatic)과 파우치(pouch) 배터리를 시험에 적용한다. 상기 2가지 유형의 배터리 셀은 국내 중대형배터리 시장의 대부분을 차지하고 사고 건수 역시 가장 많은 유형이다. 따라서 본 논문에서는, 외부단락용 시험장치를 Fig. 1과 같이 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.

한편, 시험 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 외부단락 시험에 사용된 계측기는 모두 공인시험교정기관에서 교정을 받고 유효기간 내의 장비를 사용한다. 또한, 외부단락 시험 전 SOC 세팅 시에 사용된 충방전 설비와 환경온도를 제어하는 챔버 뿐만 아니라, 외부저항을 측정하는 저항 측정기 역시 공인교정 받은 장비를 채택한다.

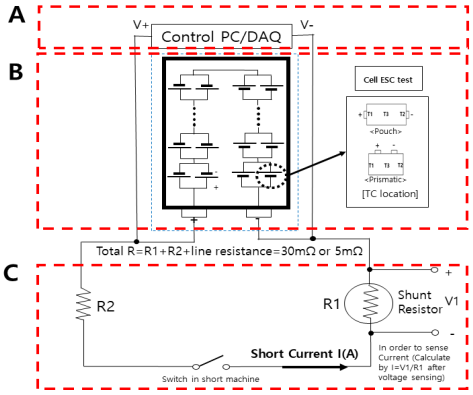

Fig. 1. Configuration of test devices for external short circuit

3.1.2 배터리 셀용 외부단락 시험장치 구현

배터리 셀의 외부단락 시험도 동일하게 2가지 유형의 배터리 셀을 대상으로 한다. 본 논문에서는 NMC계열 각형과 파우치형 배터리를 구분하여 시험하며, 외부단락 시험을 위한 시험장치는 모듈과 동일하게 Fig. 1과 같이 구성한다. 단, Fig. 1의 B부분에서 모듈 대신에 셀을 시험대상으로 하고, 시험별 온도의 위치에 따른 편차를 최소화하기 위해 각 셀 유형에 따라 온도 측정 위치를 지정한다.

3.2 배터리 SOC의 설정

외부단락 시험에 있어 SOC는 시험 결과에 영향을 미칠 수 있는 가장 중요한 요소이다. 대부분의 배터리는 SOC 상한 기준 100%까지 사용하는 것이 일반적이나, 최근 ESS 화재가 빈번하게 발생하면서 정부에서는 SOC를 70%로 제한하여 운용하는 것을 권고하여 사고발생 빈도수를 획기적으로 감소시켰다. 이에 따라, 본 논문에서는 외부단락에 의한 SOC의 영향도를 평가하기 위하여 70%, 80%, 90%, 100% SOC에 대하여 시험을 진행하고, 구체적인 SOC 설정 절차는 Fig. 2와 같다. 여기서, 모든 시험은 상온(25℃)로 설정된 항온조에서 이루어지며, 먼저 배터리를 시료별 사양에 따라 100%까지 충전하

고 방전을 하면서 용량을 측정한다. 그리고, 측정된 방전 용량을 기준으로 설정하고자 하는 SOC(%) 만큼 충전하고, 방치에 따른 초기 전압 하락을 방지하기 위해 24시간 안에 외부단락시험을 수행하도록 하며, 충전과 방전 사이의 휴지 시간은 모두 30분으로 설정하여 배터리 시료별 편차를 제거한다.

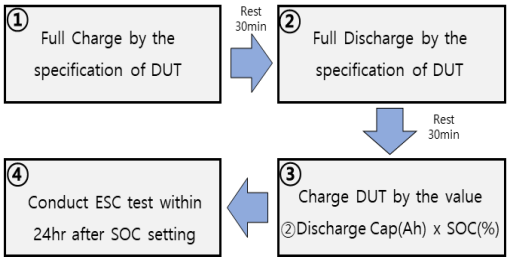

Fig. 2. Preprocess of SOC setting for lithium ion battery's external short circuit test

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

4.1.1 단락저항 설정

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

Table 1. External short resistances in standards applied to ESS & EV

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

4.1.2 배터리 모듈 외부단락 보호소자 설정

Fig. 3과 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.

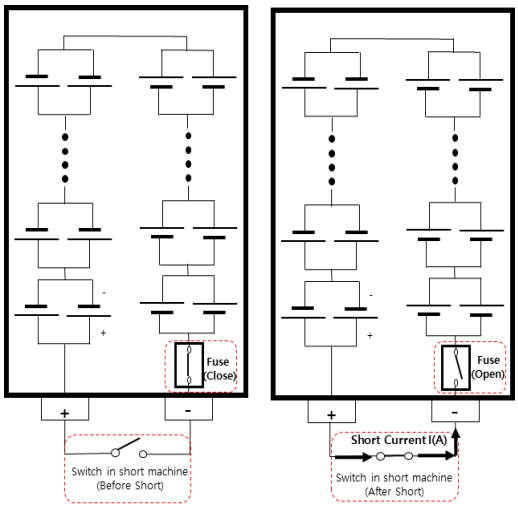

Fig. 3. Fuse operation in module by external short current

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 모듈 퓨즈가 설치된 파우치형 셀로 구성된 모듈과, 셀 퓨즈가 적용된 각형 셀로 구성된 모듈을 외부단락시험을 통하여 차단시간 및 전하량 등의 특성을 제시한다. 또한, 모듈 및 셀 퓨즈의 SOC에 따른 특성을 확인하기 위하여, 모듈의 SOC는 각각 30%, 100%로 설정하여 시험을 수행한다.

4.1.3 전처리 온도 시험조건 설정

현재 국내에 적용되는 ESS용 배터리 셀의 외부단락시험 시 전처리 충전온도는 Table. 2와 같이 대부분 상온(25±5℃)으로 설정되어 있다. 하지만, 소형 리튬이차전지 배터리 표준의 경우 국내외 규격에 관계없이 대부분이 45℃ 이상의 고온 혹은 10℃ 이하의 저온에서 충전을 하도록 제시되어 있다. 즉, 셀의 상한 충전온도가 45℃를

초과하는 경우, 상한 충전온도에 5℃를 더한 값을 전처리 온도로 적용하고, 하한 충전온도가 10℃보다 낮은 경우 하한 충전온도의 5℃를 뺀 값을 전처리 온도로 사용한다. 통상 고온에서 충전이 이루어진다면 셀 내부에 가스가 생성되어 Swelling이 발생하고, 내부 압력이 증가하여 배터리의 위해도가 높아진다고 알려져 있다. 더불어 저온에서 충전이 이루어진다면 음극 내부의 리튬이온 확산률이 감소해 리튬석출이 이루어져, 배터리의 위해도가 높아진다[8]. 이에 따라 본 논문에서는 중대형 배터리 셀을 다양한 온도(-10℃, 5℃, 25℃, 45℃)에서 충전 전처리를 수행한 후, 외부단락시험을 진행하도록 한다. 또한, 국내 중대형 배터리 중 가장 널리 사용되고 있는 NMC계열 각형과 파우치형 배터리를 시료로 사용하고, 단락저항은 ESS용 배터리 셀의 표준에서 통용되는 30[mΩ]으로 설정하여 시험을 수행한다.

Table 2. Temperature of charge preprocess in standards applied to small and large batteries

items	standards	high temp	low temp
Small	IEC 62133-2	45℃↑	10℃↓
	KC 62133	45℃↑	10℃↓
	JIS C 8714	45℃↑	10℃↓
Large (ESS)	IEC 62619	30℃	20℃
	KC 62619	30℃	20℃
	KBIA 10104-03	30℃	20℃

4.2 SOC 및 저항에 따른 외부단락 특성

4.2.1 SOC 및 단락저항별 전류 특성

상기의 시험 조건에 따라 파우치형 배터리에 대하여, SOC 및 단락 저항별 외부단락시험 전류 특성을 나타내면 Fig. 4과 같다. 여기서, Fig. 4의 ①, ②, ③, ④는 각각 5[mΩ]의 단락저항을 적용한 경우 외부단락 특성이고, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧은 30[mΩ]의 단락저항을 적용한 경우 외부단락 특성을 나타낸 것이다. 5[mΩ]의 단락저항을 적용한 배터리가 30[mΩ]을 적용한 배터리에 비해 높은 단락전류가 짧은 시간동안 흐르는 것을 알 수 있다. 즉, 단락전류 특성은 SOC에 관계없이 동일한 현상을 보이고, SOC가 높아짐에 따라 5[mΩ]의 경우 최대 전류값이 상승하는 경향을 보이며, 30[mΩ]의 경우에는 지속시간이 길어지는 현상을 나타내고 있다.

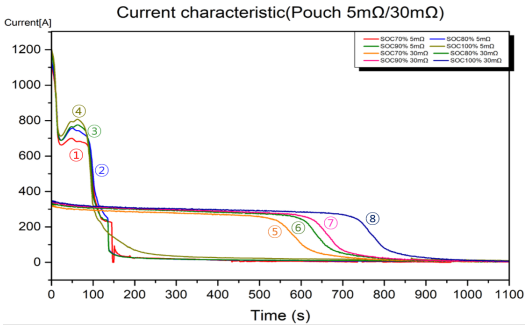

Fig. 4. Current characteristics of pouch cells during external short test according to SOC and short resistance

한편, 상기의 시험 조건에 따라 각형 배터리에 대하여, SOC 및 단락 저항별 외부단락시험 전류 특성을 나타내면 Fig. 5와 같다. 여기서, Fig. 5의 ①, ②, ③, ④는 각각 5[mΩ]의 단락저항을 적용한 경우 외부단락 특성이고, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧은 30[mΩ]의 단락저항을 적용한 경우 외부단락 특성을 나타낸 것이다. 파우치형과 유사하게 5[mΩ]의 단락저항을 적용한 배터리가 30[mΩ]을 적용한 것에 비해 높은 단락전류가 짧은 시간동안 흐르는 것을 알 수 있다. 다만, 파우치형에 비해 전류가 높은 부분을 확인할 수 있고, 각형 배터리의 저항 특성에 기인한 것으로 보인다.

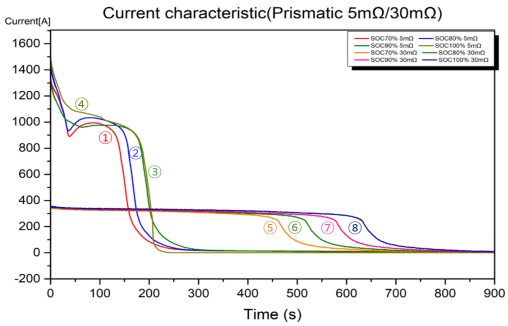

Fig. 5. Current characteristics of prismatic cells during external short test according to SOC and short resistance

따라서, 상기의 시험결과를 바탕으로 최대 전류를 비교하면 Table 3과 같다. 이 표에서와 같이 30[mΩ]의 단락저항에 대하여 각형/파우치형 모두 SOC에 따른 최대 전류의 차이가 크지 않는 것을 알 수 있다. 하지만 각형/파우치형에 대하여 5[mΩ]의 단락저항을 적용한 경우, SOC에 따라 최대 전류가 증가하는 기울기가 급격해지

며, 특히 각형의 경우 파우치형에 비해 해당 기울기가 커짐을 알 수 있다.

Table 3. Maximum currents during external short circuit test for prismatic & pouch battery cell

Max Current (A)		SOC 70%	SOC 80%	SOC 90%	SOC 100%
Pris.	5mΩ	961.9	1111.2	1230.5	1492.1
	30mΩ	347.9	354.3	356.5	356.5
Pouch	5mΩ	1110.9	1133.2	1186.6	1220.7
	30mΩ	322.3	332.0	344.6	346.7

4.2.2 SOC 및 단락저항별 온도 특성

상기의 시험 조건에 따라 파우치형 배터리에 대하여, SOC 및 단락 저항별 외부단락시험 온도특성을 비교하면 Fig. 6와 같다. Fig. 6의 ①, ②, ③, ④는 각각 5[mΩ]의 단락저항을 적용한 경우 외부단락 특성이고, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧은 30[mΩ]의 단락저항을 적용한 경우 외부단락 특성을 나타낸 것이다. 5[mΩ]의 단락저항을 적용한 배터리가 30[mΩ]을 적용한 배터리에 비해, 높은 온도와 급격한 상승 기울기를 나타내고 있다. 즉, 5[mΩ]의 단락저항을 적용한 경우, 초기 전류가 높아짐에 따라 저항 열이 증가하는 현상으로 보인다. 파우치 셀의 경우 모든 시료에서 최고 온도에 대하여 90[℃]를 넘지 않지만, 외부 재질 특성상 열전도도가 금속에 비해 월등히 낮아 내부온도는 측정치 이상을 상회할 것으로 보인다.

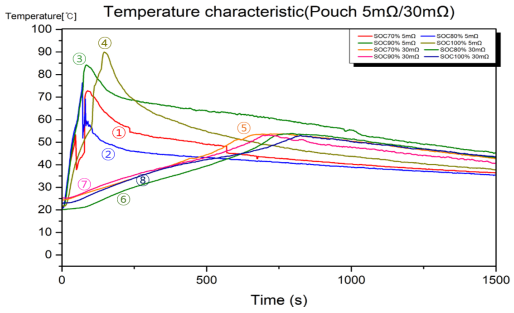

Fig. 6. Temperature status of pouch cells during external short test according to SOC and short resistance

한편, 상기의 시험 조건에 따라 각형 배터리에 대하여, SOC 및 단락 저항별 외부단락시험 온도특성을 비교하면 Fig. 7과 같다. Fig. 7의 ①, ②, ③, ④는 각각 5[mΩ]의 단락저항을 적용한 경우 외부단락 특성이고, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧은 30[mΩ]의 단락저항을 적용한 경우 외부단락 특성을 나타낸 것이다. 파우치형과 유사한 특성을 보이나, 5[mΩ]을 적용한 각형 배터리의 경우 파우치형에 비해 월등히 높은 온도를 보이고 있고, 온도 상승 기울기가 매우 가파른 것을 확인할 수 있다. 이는 배터리 종류에 따른 저항 특성에도 영향과 더불어, 파우치형에 비해 온도 전도도가 월등히 높은 알루미늄 금속 외관을 사용하고 있기 때문에 내부온도를 비교적 충실히 반영하고 있는 결과로 판단된다.

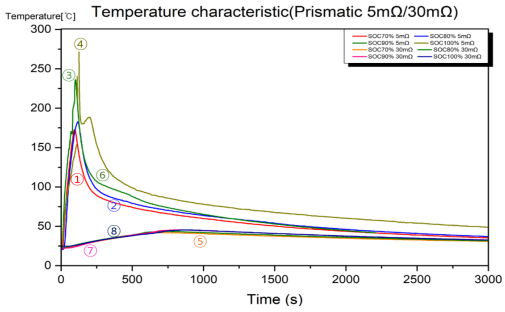

Fig. 7. Temperature status of prismatic cells during external short test according to SOC and short resistance

따라서, 상기의 시험결과를 바탕으로 최대 전류를 비교하면 Table 4와 같다. 이 표에서와 같이 각형, 파우치형 모두 동일하게 30[mΩ]을 단락저항으로 적용한 경우, SOC에 따른 최고 온도 차이가 비교적 작은 것을 알 수 있다. 하지만, 단락저항을 5[mΩ]으로 적용한 경우 각형, 파우치형 모두 SOC에 따라 최고 온도가 높아지며, 특히 각형의 경우 파우치에 비해 해당 상승폭이 큰 것을 확인할 수 있다.

Table 4. Maximum temperatures during ESC test for large Prismatic & Pouch battery cell

Max Temp. (℃)		SOC 70%	SOC 80%	SOC 90%	SOC 100%
Pris.	5mΩ	173	182.9	236.2	271.6
	30mΩ	38.0	43.5	45.5	45.4
Pouch	5mΩ	72.8	76.4	84.2	89.9
	30mΩ	53.7	53.9	53.3	53.0

4.3 보호소자별 외부단락 특성

모듈퓨즈와 셀 퓨즈가 적용된 모듈에 대하여 각각 SOC 30%와 100%로 설정하여 외부단락시험을 수행한 결과, Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 8의 ①

과 ②는 각각 셀 퓨즈의 SOC가 100%, 30%인 경우의 외부단락 특성이고, ③과 ④는 각각 모듈 퓨즈의 SOC가 100%, 30%인 경우의 특성을 나타낸 것이다. 즉, 모듈 퓨즈가 셀 퓨즈에 비해 훨씬 빠르게 동작하여, 단락전류를 조기에 차단하는 것을 알 수 있으며, SOC 및 그에 따른 초기전압의 차이와 관계없이 동일한 경향성을 띄고 있음을 알 수 있다.

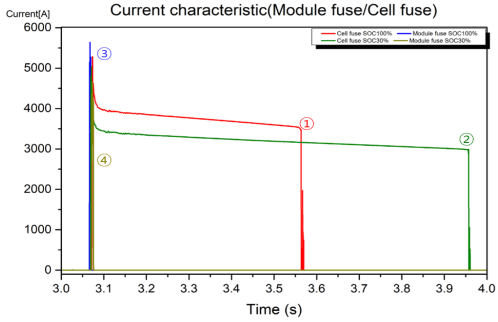

Fig. 8. Current status of battery module during external short test according to protection device

보호소자와 SOC에 대한 배터리 모듈의 외부단락시험 특성은 Table. 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배터리 셀에 인가되는 위해를 확인하기 위해 전류량(Ah)을 사용할 경우 측정치가 매우 작아, 전하량(Quantity of electric charge)으로 나타내면 식 (1)과 같이 근사식으로 구할 수 있다.

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

Table. 5와 같이, 2가지 타입의 모듈에 대하여 외부단락전류에 의하여 1초 이내에 보호소자가 동작하여, 외부단락시험 후에 벤팅(venting)을 비롯한 화재나 폭발현상이 발생하지 않아 배터리의 안전성에는 크게 문제가 없음을 알 수 있다. 하지만, 모듈 퓨즈가 셀 퓨즈에 비해 같은 SOC 기준 120배 이상 빠른 차단시간 특성을 보이며, 단락 시 전하량의 경우에도 110배 이상 작은 것을 알 수 있다.

Table 5. Characteristics of battery module's external short test according to protection device and SOC

items	initial voltage (V)	cut-off time (ms)	Quantity (C, Coulomb)
Module Fuse (SOC 30%)	50.84	4.79	18.00
Module Fuse (SOC 100%)	59.31	3.84	16.51
Cell Fuse (SOC 30%)	61.00	888.63	**2842.99**
Cell Fuse (SOC 100%)	66.30	491.98	**1850.75**

4.4 전처리 온도별 셀 외부단락 특성

4.4.1 전처리 온도별 전류 특성

각형 배터리의 전처리 온도에 따른 전류 특성은 Fig. 9와 같다. 여기서, Fig. 9의 ①, ②, ③, ④는 각각 전처리 온도가 -10℃, 5℃, 25℃, 45℃인 경우의 단락 전류특성을 나타낸 것이다. 즉, Fig. 9의 ①번의 25℃ 전처리 시료가 다른 온도 전처리 시료에 비해 상대적으로 높은 초기 전류특성이 나타나, 내부 저항이 가장 낮음을 알 수 있다. 반면, 고온과 저온에서 전처리한 시료의 경우 초기 전류가 상대적으로 낮아 내부저항이 높음을 알 수 있다.

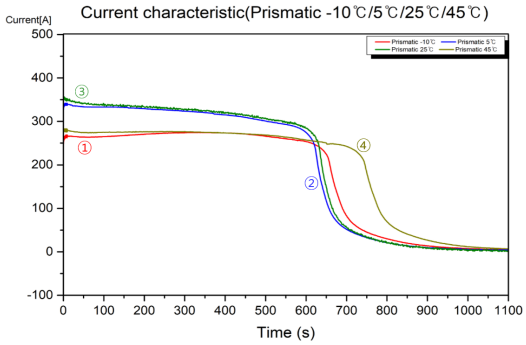

Fig. 9. Current status of prismatic cell during external short test according to preprocessing temperature

한편, 파우치형 배터리의 전처리 온도에 따른 전류 특성은 Fig. 10과 같다. 여기서, Fig. 10의 ①, ②, ③, ④는 각각 전처리온도가 -10℃, 5℃, 25℃, 45℃인 경우의 단락 전류특성을 나타낸 것이다. 각형 배터리와 마찬가지로, Fig. 10의 ①번의 25℃ 전처리 시료가 다른 온도 전처리 시료에 비해 상대적으로 높은 초기 전류특성이 나타나, 내부 저항이 가장 낮음을 알 수 있다. 반면, 고온과 저온에서 전처리한 시료의 경우 초기 전류가 상대적으로 낮아 내부저항이 높음을 알 수 있다.

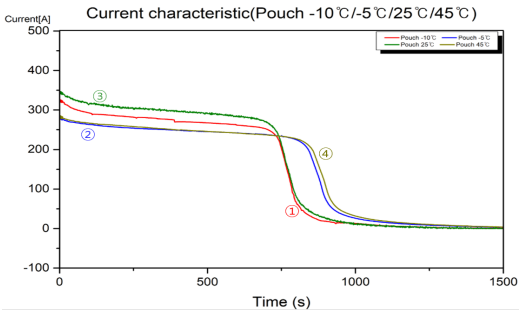

Fig. 10. Current characteristics of pouch cell during external short test according to preprocessing temperature

4.4.2 전처리 온도별 온도 특성

각형 배터리의 경우 전처리 온도에 따라 외부단락시험 온도 특성은 Fig. 11과 같다. 여기서, Fig. 11의 ①, ②, ③, ④는 각각 전처리온도가 -10℃, 5℃, 25℃, 45℃인 경우의 단락 온도특성을 나타낸 것이다. 즉, 25℃ 전처리 시료가 다른 전처리 시료에 비해 온도 상승이 낮음을 알 수 있다. 이것은 고온과 저온에서 전처리한 시료의 경우, 전처리 과정에서 내부저항이 상승하여 내부의 줄열이 발생함에 따라 25℃ 전처리 시료에 비해 온도가 높아진 것으로 평가된다.

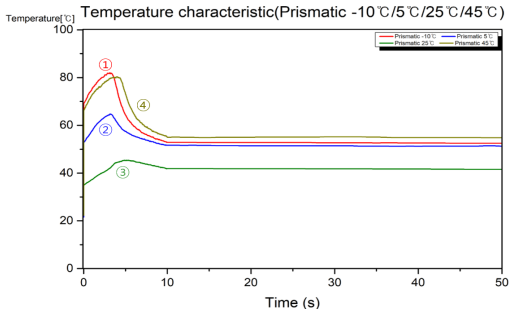

Fig. 11. The temperature status of prismatic cell during external short test according to preprocessing temperature

한편, 파우치형 배터리의 경우 전처리 온도에 따라 외부단락시험 온도 특성은 Fig. 12와 같다. 여기서, Fig. 12의 ①, ②, ③, ④는 각각 전처리온도가 -10℃, 5℃, 25℃, 45℃인 경우의 단락 온도특성을 나타낸 것이다. 즉, 25℃ 전처리 시료가 다른 전처리 시료에 비해 온도 상승이 낮음을 알 수 있다. 이것은 고온과 저온에서 전처리한 시료의 경우, 전처리 과정에서 내부저항이 상승하여 내부의 줄열이 발생함에 따라 25℃ 전처리 시료에 비해 온도가 높아진 것으로 평가된다.

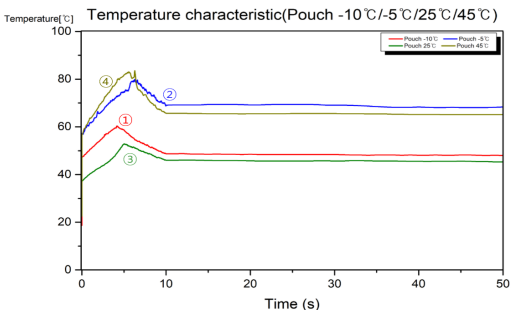

Fig. 12. The temperature status of prismatic cell during external short test according to preprocessing temperature

한편, 상기 그래프의 초기전압, 최대전류, 최대온도를 나타내면 Table 6 같다. 이 그림에서와 같이 전처리 충전온도에 따라 저온으로 갈수록 물질의 확산률이 떨어지는 등 내부저항이 높아져 초기전압이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 최대전류에서는 큰 유의점이 없으나, 최대온도 측면에서는 25℃ 전처리 시료에 비해 최대 36℃ 이상 높은 온도를 나타내는 것으로 보아 배터리에 더욱 위해를 가할 수 있는 가혹한 조건임을 확인할 수 있다.

Table 6. Characteristics of device under test during external short test according to preprocessing temperature

items	preprocess temp. (℃)	initial voltage (V)	max current (A)	max temp. (℃)
Pris.	-10	4.044	**274.6**	**82.0**
	5	4.078	341.8	64.7
	25	4.084	356.5	45.4
	45	4.082	**313.7**	**80.3**
Pouch	-10	4.110	339.4	60.4
	5	4.150	283.2	79.9
	25	4.170	346.7	53.0
	45	4.176	**297.3**	**83.6**

5. 결론

본 논문에서는 국내 중대형 이차전지에 사용되는 배터리 중 가장 널리 사용되는 NMC계열 각형 및 파우치형 전지를 대상으로 대표적인 안전성 시험 중 하나인 외부단락 시험을 수행하기 위한 사고모의장치를 구현하여, 배터리의 단락저항, SOC, 전처리 온도, 보호소자 등 다양한 시험조건에 따른 외부단락 특성을 분석한 주요 결

과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 단락 저항을 30[mΩ]으로 설정하여 시험을 수행한 결과, SOC에 따른 전류와 온도의 변화가 크지 않음을 알 수 있었으며, 각형/파우치형 모두 동일한 경향이 나타남을 확인하였다. 또한, 2가지 타입의 셀에 대하여, SOC에 관계없이 최대 전류는 350A, 최고 온도는 55℃ 이하로 나타나, 배터리에 큰 위해를 가하기 어려운 수준임을 알 수 있었다.

(2) 단락 저항을 5[mΩ]으로 설정하여 시험한 경우, 30[mΩ]에 비하여 각형, 파우치형 모두 SOC에 따른 전류와 온도의 변화가 증가함을 알 수 있었다. 또한, SOC 70%와 SOC 100%의 시험 결과를 비교한 결과, 각형은 55%의 전류 상승과 56%의 온도 상승이 나타나고, 파우치형은 10%의 전류 상승과 23%의 온도 상승이 나타남을 알 수 있었다. 특히, 각형 셀의 경우 최고온도가 270℃까지 상승하여, 배터리의 화재 위험이 증가함을 알 수 있었다.

(3) 상기의 결과를 바탕으로, 현재 적용되고 있는 ESS용 배터리의 표준에서 외부단락 시 적용하는 단락저항보다 EV 표준과 같이 낮은 저항으로 시험하는 것이 배터리의 안전성을 보다 유의미하게 판단할 수 있음을 알 수 있었고, SOC를 낮추는 것이 화재를 방지하는 방안임을 확인할 수 있었다.

(4) 모듈 퓨즈와 셀 퓨즈를 적용한 모듈의 외부단락시험을 SOC별로 각각 수행한 결과, 2가지 타입에 대하여, SOC에 관계없이 단락전류 인가 후 1초 이내에 보호소자가 동작함을 알 수 있었다. 하지만, 모듈 퓨즈는 셀 퓨즈에 비해 단락전류를 120배 이상 빠르게 차단하여, 셀로 흐르는 전하량을 110배 이상 감소시켜, 전기적 위해요인에 대한 차단 특성이 우수함을 확인할 수 있었다.

(5) 전처리 온도별 셀 외부단락시험을 진행한 결과, 전처리 충전온도에 따라 내부 저항이 상승하여 초기 전압이 낮아지고, 최대 온도가 상온 전처리 시료 대비 최대 36℃ 이상 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 배터리의 사용온도를 상온으로 일정하게 유지하는 것이 외부단락 상황에서 안전성이 높은 것을 알 수 있었다.

References

[1] Korea Commit of investigation for ESS fire accidents, "A result of investigation for ESS fire accidents" in MOTIE, KOREA, June 2019
http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=161771&bbs_cd_n=81&currentPage=11&search_key_n=title_v&cate_n=&dept_v=&search_val_v=ESS

[2] A Korea Team of investigation for ESS fire accidents, "A report of investigation result for ESS fire accidents" in Korea Testing Laboratory, February 2020
https://www.ktl.re.kr/notice/notice_4/notice_press_release.do?ptSignature=5V9xjmXUaCiBWZXQwlUXNuvx6J3zjFxL1u04xoknIOZS3RMJ17MJd8yieO%2FxQNOmzGn89okd3PdQ7KShMWJ5haYqc

[3] Jae-Beom Jung, "A Case Stud.y on fire accidents of ESS for safety improvement", Journal of The 51th KIEE Summer Conference(2020), pp. 1090-1091, July 2020
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.038

[4] Qingsong Wang, "Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery", Journal of Power Sources 208(2012), pp. 210-224, March 2012
DOI: https://doi.org/10.1109/ICPWS.2009.5442704

[5] Hao Ji, "Study of lithium-ion battery module's external short circuit under different temperatures", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,March 2020
DOI: https://doi.org/10.1007/s10973-020-09506-0

[6] Ruixin Yang, "Experimental Study on External Short Circuit and Overcharge of Lithium-ion Battery Packs for Electric Vehicles", 2020 4th International Conference on Green Energy and Applications, March 2020 https://ieeexplore.ieee.org/document/9077579

[7] Zeyu Chen, "Temperature rise prediction of lithium-ion battery suffering external short circuit for all-climate electric vehicles application", Applied Energy 213(2018), pp.375-383, March 2018
DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.068

[8] Exponent FA Associates, "Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment", NFPA, July, 2011
https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Hazardous-materials/rflithiumionbatterieshazard.ashx

정 재 범(Jae-Beom Jung) [정회원]

- 2012년 2월 : 부산대학교 전자전기공학부 (공학사)
- 2012년 1월 ~ 2016년 6월 : 삼성SDI/선임
- 2016년 6월 ~ 현재 : 한국산업기술시험원/선임연구원
- 2020년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 석·박사통합과정 재학 중

〈관심분야〉
전기저장장치, 신재생에너지, 보호협조

임 민 규(Min-Gyu Lim) [정회원]

- 2013년 2월 : 충북대학교 전기공학과 (공학사)
- 2013년 1월 ~ 2017년 10월 : 삼성SDI/선임
- 2017년 10월 ~ 현재 : 한국산업기술시험원/주임연구원

〈관심분야〉
전기저장장치, 신재생에너지, 보호협조

김 진 용(Jin-Yong Kim) [정회원]

- 2005년 2월 : 건국대학교 전기공학과(공학사)
- 2012년 2월 : 숭실대학교 전기공학과(공학석사)
- 2016년 6월 ~ 현재 : 한국산업기술시험원 센터장/수석연구원

〈관심분야〉
전기저장장치, 보호협조, 신재생에너지, 마이크로그리드

노 대 석(Dae-Seok Rho) [종신회원]

- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

〈관심분야〉
전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석