

ESS용 리튬이온전지의 외부단락 시 SOC에 따른 안전성 평가에 관한 연구

정재범* **, 임민규*, 김두혁*, 노대석**

*한국산업기술시험원

**한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:jjb@ktl.re.kr

A Safety Assessment of External Short Circuit for ESS Li-ion Battery According to SOC

Jae-Beom Jung* **, Min-Gyu Lim*, Doo-Hyuk Kim*, Dae-Seok Rho**

*Korea Testing Laboratory

**Dept. of Electric Engineering, Korea Tech University

요약

최근 다양한 분야에서 리튬이온전지의 활용도가 높아지고 있으며, 이에 따라 사고 사례도 함께 증가하고 있다. 국내에서는 2016년 갤럭시 노트7 배터리 발화사고를 비롯한 소형 배터리의 화재사고 뿐만 아니라, 최근 중대형 배터리의 화재도 수차례 보고되고 있다. 특히 2017년 8월부터 발생한 국내 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS) 화재는 2020년 6월 현재까지 총 29건으로 보고되고 있어 신재생에너지 산업 전반에 부정적인 영향을 주고 있다. 이에 따라 ESS용 리튬이온전지의 검증과 안전성을 강화하기 위한 체계적인 연구가 필요하며, 특히 리튬이온전지의 충전율(States Of Charge, SOC)에 따른 안전성 시험에 대한 선행적인 연구가 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 국내 전기자동차(Electric Vehicle, EV) 및 에너지저장장치에 사용되는 배터리 셀 중 범용으로 사용되는 NMC계열 각형 및 파우치형 전지를 대상으로, 대표적인 안전성 시험 중 하나인 외부단락 시험을 수행하기 위한 사고모의장치를 구현한다. 이를 바탕으로 리튬이온전지의 형태, 단락저항 및 SOC에 따른 외부단락 시험을 수행한 결과, 단락저항과 SOC에 따른 전류 및 온도의 특성을 확인하였다.

1. 서론

최근 수십 년 동안 리튬이온전지의 활용범위는 다양한 분야에서 넓어지고 있다. 리튬이온전지의 발전은 과거의 유선 전화기를 휴대폰으로, 데스크탑을 노트북으로, 유선청소기를 무선청소기로 발전하게 하였다. 특히 국내기준 전기자동차의 경우 2016년말 대비 2019년 9월에 700%이상 급격히 증가하고 있고[2], 에너지저장장치 역시 2017년 대비 2018년에 380% 이상 증가[1]하는 등 중대형 리튬이온전지 시장 역시 급격하게 성장하고 있다. 이러한 상용화는 리튬이온전지의 에너지 밀도 증가에 따라 진행되고 있으며, 동시에 화재 위험성도 높아지고 있는 것이 현실이다. 실제 2016년 노트7 화재사고를 비롯한 보조배터리와 같은 소형배터리의 화재는 2019년 광주 퀵보드 화재사고와 같은 인명피해로 이어졌다. 이뿐 아니라 국내외 전기자동차 화재 사례도 수차례 보고되고 있으며, 에너지저장장치의 경우 2017년 8월부터 2020년 6월 현재까지 총 29건의 화재가 발생하여 정부가 조사에 나서는 등 최근 몇 년간 중대형 리튬이온전지의 화재도 잇따라 발생하고 있다.[3] 이에 따라 지속적으로 화재사고가 발생하는 리튬이온전지의 안전성 검증을 강화하고, 체계적으로 연구해야 한다

는 시장의 요구가 이어지고 있다.

최근 발생한 ESS 화재 관련 2회의 사고조사 결과 공통적으로 높은 SOC 사용에 대한 지적이 있었다. 1차 사고조사위원회에서는 '제조결함이 있는 상황에서 배터리 충·방전 범위가 넓고...(중략)...자체 내부단락으로 인한 화재 발생 가능성이 높아질 수 있다.'라고 지적하였고[4], 2차 화재사고 조사단에서는 '높은 충전율 조건(95% 이상)으로 운영하는 방식과 배터리 이상 현상이 결합되어 화재가 발생한 것으로 추정'이라고 명시하였다.[5] 따라서 리튬이온전지의 열폭주(Thermal Runaway)가 발생할 수 있는 대표적인 원인 중 하나인 외부 단락 시험을 통해 SOC 및 단락저항에 따른 안전성을 확인하고, 나아가 현재 적용되고 있는 전기자동차 및 에너지저장장치용 중대형 리튬이온전지 셀의 외부단락 시험 조건에 대한 적절성을 고찰하고자 한다. 이러한 연구를 통해 중대형 리튬이온전지의 안전성 및 기술력 확보에 일조하여, 국내 배터리 업계가 세계 시장에서 산업경쟁력을 갖추는 것에 일조하고자 한다.

2. 외부단락 시험 및 사고 사례 분석

2.1 외부단락 시 리튬이온전지 특성의 변화

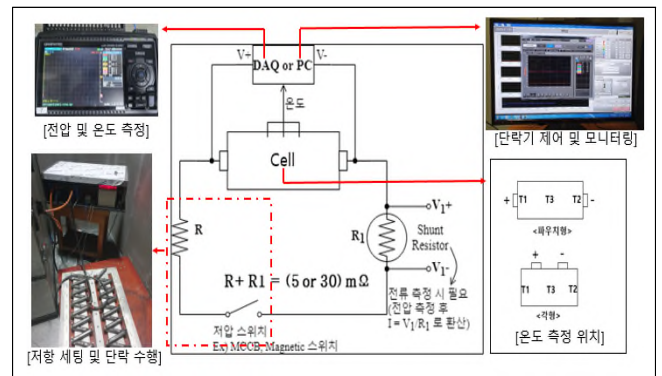
외부단락 시험은 배터리의 안전성 시험 중 관통, 내부단락, 과충전 등과 함께 화재 위험성이 높은 시험으로 알려져 있다. 배터리의 양극과 음극을 외부저항으로 연결하는 외부단락 시험은 단락 경로를 통해 순간적으로 높은 전류가 흐르게 되고 그에 따른 높은 줄(Joule)열이 발생하여 높은 온도에 도달하게 된다.[6] 시험 배터리가 시험 시 발생하는 높은 전류 및 온도에 대한 충분한 내구성을 갖고 있다면 발화 및 폭발로 이어지는 않게 된다. 하지만 내구성이 충분하지 않다면 화재로 이어지는 열폭주상태로 접어들게 된다. 열폭주는 제어가 되지 않는 온도 상승 상태로 초기 발열 반응이 온도 상승이 발생하고, 이에 따른 다른 발열 반응이 생기면서 온도가 상승하게 되는 과정을 반복하여 화재나 폭발로 이어지게 된다.[7] 이에 따라 외부단락 시험에서 단락 전류 및 온도 상승은 배터리의 안전성과 연결되는 중요한 요소로 단락 시 해당 파라미터의 추이를 통해 화재 폭발 위험성을 유추할 수 있다.

2.2 외부단락 사고 및 시험 사례

실제 화재사고를 조사하고 발표한 『ESS 화재사고 원인조사 결과 보고서』 내 '버스타가 과손되어 배터리 랙 보호장치의 외함을 타격하는 2차 단락사고가 발생하여 동시다발적인 화재가 발생하였다'라고 언급하고 있고, 수분·분진 시험에서 절연 성능 저하 후 화재가 발생한다[4] 메커니즘도 2차 지락에 의한 단락 사고로 추정된다. 이와 같이 리튬이온전지의 안전성에 영향을 크게 미칠 수 있는 외부단락 시험은 다수의 문헌에서 다루어져 왔다. 기존 문헌에서 SOC에 따른 외부단락을 진행한 경우, 앞서 언급한바와 같이 공통적으로 단락 초반 급격한 전류 상승과 함께 온도가 증가하는 현상을 보인다.[8~12] 다만 대부분의 시험이 전기자동차나 에너지저장장치에 사용되는 중대형 배터리 셀이 아닌 소형 배터리 셀 혹은 원통형 셀을 사용하였다. 일반적으로 소형 배터리 셀의 경우 국내 제조업체 기준 대부분 양극활물질로 LCO 계열을 사용하고 있고 원통형 셀 역시 LCO 혹은 NCA 계열의 양극재를 사용하고 있다. 하지만 중대형 배터리 셀의 경우 일부 원통형을 제외하고, 국내 제조업체는 NMC(삼원계) 계열을 주로 사용 중으로 해당 배터리 셀에 대한 외부단락 안전성 자료, 특히 SOC별 시험결과에 대한 자료는 전무하다고 볼 수 있다. ESS 화재사고 중 대부분의 사고가 중대형 배터리 셀에서 발생하고 있으며, 이에 따라 본 논문에서는 상용 중대형 이차전지 배터리 셀의 외부단락 시험을 통해 안전성을 진단하고 나아가 현재 적용 중인 표준에 대한 고찰을 하고자 한다.

3. 외부단락 시험방법 설계

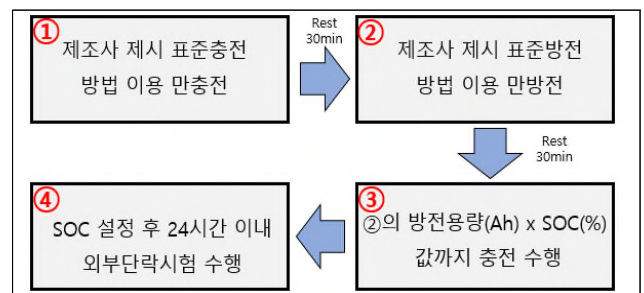
외부단락 시험은 크게 2가지 유형의 배터리 셀로 진행한다. 국내 중대형 Application에서 가장 널리 쓰이는 NMC계열 배터리를 사용하고, 형태에 따라 각형과 파우치형 배터리를 구분하여 시험한다. 외부단락 시험을 위해 그림 1과 같이 시험장치를 구성한다. 시험 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 외부단락 시험에 사용된 계측기는 모두 공인시험교정기관에서 교정을 받고 유효기간 내의 장비를 사용한다. 더불어 외부단락 시험 전 SOC 세팅 시에 사용된 충전 설비와 환경온도를 제어하는 챔버 뿐만 아니라, 외부저항을 측정하는 저항 측정기 역시 공인교정 받은 장비를 사용한다. 또한 시험별 온도의 위치에 따른 편차를 최소화하기 위해 각 셀 유형에 따라 온도 측정 위치를 지정한다.



[그림 1] 외부단락 수행 모식도 및 장치

3.1 외부단락 시험 시 배터리의 SOC 설정

외부단락 시험에 있어 SOC는 시험 결과에 영향을 미칠 수 있는 중요한 요소이다. 대부분의 배터리는 SOC 상한 기준 100%까지 사용하는 것이 일반적이거나 2019년 초 에너지저장장치 화재가 빈번하게 일어나자 정부에서는 SOC를 70%로 제한 권고하였고, 2020년 2월 2차 사고조사 이후 발표 시 SOC를 90%로 권고하였다. 이에 따라 본 시험에서는 SOC 기준 70%, 80%, 90%, 100% 배터리를 충전하여 시험을 진행하고, SOC 설정을 위한 절차는 다음과 같다.



[그림 2] 외부단락 시험 전 SOC 설정 절차

3.2 외부단락 시험 시 단락저항 설정

외부단락 시험 시 단락저항 설정을 위해 현재 중대형 리튬이온전지에 적용되는 표준 및 규격을 표1과 같이 살펴본 결과, 에너지저장장치용 표준 내 단락저항이 전기자동차 표준 내 단락저항보다 높은 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 전기자동차 표준에서 가장 많이 쓰이는 5mΩ과 에너지저장장치용 표준에서 가장 많이 쓰이는 30mΩ을 본 시험에 적용되는 단락 저항으로 설정한다.

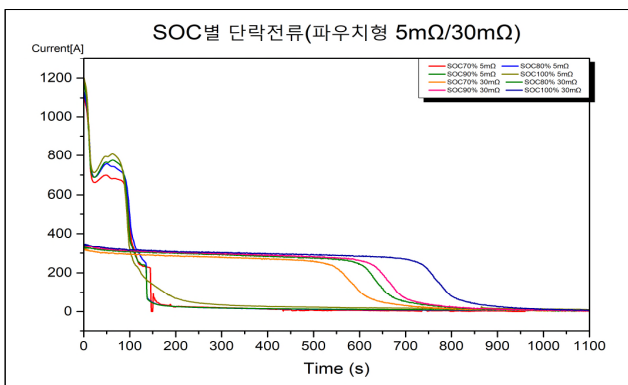
[표 1] 중대형 리튬이차전지용 표준·규격 내 단락저항 기준

구분	표준·규격	단락저항(셀 기준)
전기자동차 (EV)	IEC 62660-2	5mΩ 이하
	KS C IEC 62660-2	5mΩ 이하
	ISO 12405-2	(20 ± 10)mΩ
	UL 2580	20mΩ 이하
	UN ECE R 100	5mΩ 이하
에너지 저장장치 (ESS)	KBIA-10104-03	(30 ± 10)mΩ
	KC 62619	(30 ± 10)mΩ
	IEC 62619	(30 ± 10)mΩ
	UL 1973	20mΩ 이하

4. 외부단락 시 SOC 및 단락저항에 따른 배터리 특성

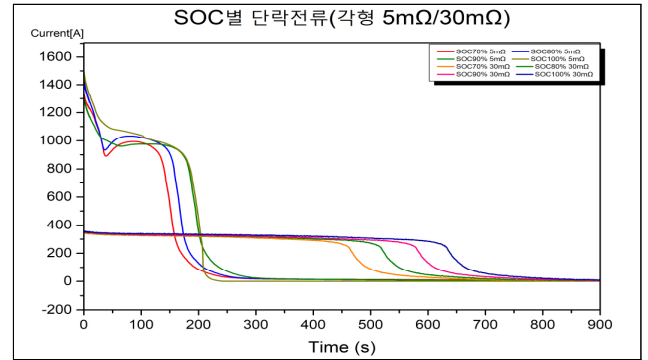
4.1 SOC 및 단락 저항별 전류 변화

그림3과 같이 파우치형 배터리의 SOC 및 단락 저항별 전류를 비교한 결과 5mΩ의 단락저항을 적용한 배터리가 30mΩ을 적용한 배터리에 비해 큰 전류가 빠른 시간동안 흐르게 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 SOC에 관계없이 동일한 현상을 보이고 있으나, 5mΩ 시험의 경우 SOC가 높을수록 최대 전류값이 다소 높은 경향을 보이고 30mΩ 시험의 경우 지속 시간이 길어지는 현상을 보이고 있다.



[그림 3] 파우치형 배터리 SOC 및 단락 저항별 전류 비교

그림4와 같이 각형 배터리의 SOC 및 단락 저항별 전류를 비교한 결과 파우치형과 유사한 결과를 보인다. 다만 파우치형에 비해 다소 높은 부분을 확인할 수 있고, 특히 각형 5mΩ/SOC 100%의 경우 가장 높은 Peak전류를 보이고 방전 말단에 가장 가파른 기울기를 보이고 있다.



[그림 4] 각형 배터리 SOC 및 단락 저항별 전류 비교

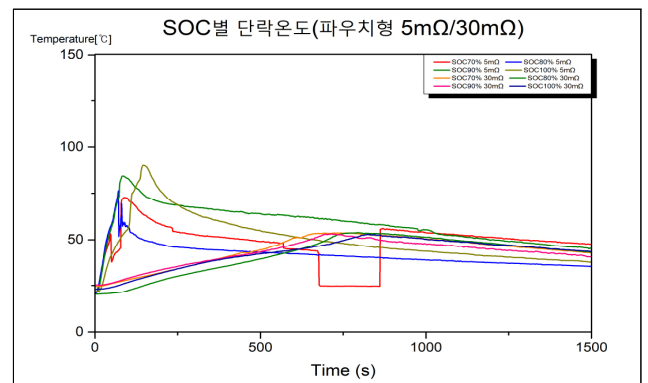
표2와 같이 시험별 최대 전류를 비교한 결과 각형, 파우치형 모두 30mΩ을 단락저항으로 적용한 경우 SOC에 따른 전류의 차이가 크지 않는 것을 확인할 수 있다. 하지만 각형, 파우치 모두 5mΩ을 적용한 경우 SOC에 따라 최대 전류가 증가하는 폭이 가팔라졌으며, 특히 각형의 경우 파우치에 비해 해당 증가폭이 가팔라지는 것을 확인할 수 있다.

[표 2] 시험별 최대 전류(Peak Current) 비교표

최대 전류(A)	SOC	SOC	SOC	SOC	SOC
		70%	80%	90%	100%
각형	5mΩ	961.9	1111.2	1230.5	1492.1
	30mΩ	347.9	354.3	356.5	356.5
파우치형	5mΩ	1110.9	1133.2	1186.6	1220.7
	30mΩ	322.3	332.0	344.6	346.7

4.2 SOC 및 단락 저항별 온도 변화

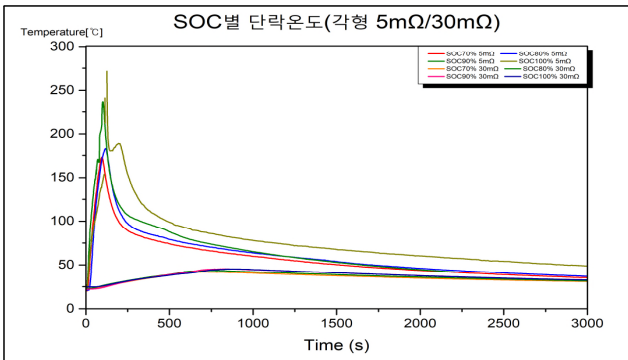
그림5와 같이 파우치형 배터리의 SOC 및 단락 저항별 온도를 비교한 결과 5mΩ의 단락저항을 적용한 배터리가 30mΩ을 적용한 배터리에 비해 SOC와 큰 관련 없이 높은 온도와 급격한 상승 기울기를 보이고 있다.



[그림 5] 파우치형 배터리 SOC 및 단락 저항별 온도 비교

그림6과 같이 각형 배터리의 SOC 및 단락 저항별 온도를 비교한 결과 파우치형과 유사한 결과를 보인다. 다만, 5mΩ을 적용한 각형 배터리의 경우 파우치형에 비해 월등히 높은 온도를 기록하고 있고, 온도 상승 기울기가 매우 가파른 것을

확인할 수 있다.



[그림 6] 각형 배터리 SOC 및 단락 저항별 온도 비교

표3과 같이 시험별 최고 온도를 비교한 결과 각형, 파우치형 모두 30mΩ을 단락저항으로 적용한 경우 SOC에 따른 온도 차이가 유사한 것을 확인할 수 있다. 하지만 각형, 파우치형 모두 5mΩ을 적용한 경우 SOC에 따른 최고 온도가 높아지는 것을 확인할 수 있으며, 특히 각형의 경우 파우치에 비해 해당 상승 상승폭이 큰 것을 확인할 수 있다.

[표 3] 시험별 최고 온도 비교표

최고 온도(°C)		SOC 70%	SOC 80%	SOC 90%	SOC 100%
각형	5mΩ	173	182.9	236.2	271.6
	30mΩ	38.0	43.5	45.5	45.4
파우치형	5mΩ	72.8	76.4	84.2	89.9
	30mΩ	53.7	53.9	53.3	53.0

5. 결 론

본 논문에서 단락 저항을 30mΩ으로 설정하여 시험한 경우, SOC에 따른 전류와 온도의 변화가 크지 않는 것을 확인하였으며 이는 각형, 파우치형 모두 동일한 경향을 보이고 있다. 또한 두가지 타입의 셀 모두 SOC에 관계없이 최대 전류는 350A 수준, 최고 온도는 55°C 이하로 배터리에 큰 피해를 가하기 어려운 수준의 시험 결과가 확인된다.

반면 단락 저항을 5mΩ으로 설정하여 시험한 경우 각형, 파우치형 모두 SOC에 따른 전류와 온도의 변화가 큰 것을 확인하였다. SOC 70%와 SOC 100%의 시험 결과를 비교해본 결과 각형은 약 55%의 최대전류 상승과 56%의 최고온도 상승을 확인하였고, 파우치형은 약 10%의 전류 상승과 23%의 온도 상승을 확인할 수 있다. 특히 각형의 경우 최고온도 기준 270°C에 이르러 배터리가 열폭주로 이어질 수 있는 위협적인 온도까지 상승하였다. 또한 실제 설치된 배터리에 단락경로가 형성되는 것을 가정할 경우, 해당 단락저항이 낮다면 SOC를 낮추는 것이 화재를 방지하는 좋은 대책이 될 수 있는 것을 확인할 수 있다. 더불어 현재 적용되고 있는 에너지저장장

치용 배터리의 표준에서 외부단락 시 적용하는 단락저항보다 전기자동차 표준과 같이 낮은 저항으로 시험하는 것이 배터리의 안전성을 보다 유의미하게 판단할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] 장홍제, “에너지저장장치(ESS)의 안전성 확보를 위한 화재요인 분석 및 표준·안전기준 개발방향 연구”, 표준인증 안전학회지, 제 9권 3호, 25-49, 2019년
- [2] 정부 관계부처 합동, “미래자동차 산업 발전전략, 2030년 국가 로드맵-”, 10월 2019년
- [3] 정재범, “에너지저장장치(ESS)의 안전성 증대를 위한 화재사고 사례연구”, 대한전기학회, 6월, 2020년
- [4] 민관합동 ESS 화재사고 원인조사 위원회, “ESS 화재사고 원인조사 결과”, 6월, 2019년
- [5] ESS 화재 조사단, “ESS 화재사고 조사결과 보고서”, 2월, 2020년
- [6] 이선홍, “외부충격에 의해 발화/폭발된 리튬 이차전지의 사고분석”, 한국과학수사학회, 제 10권 1호, pp. 55-62, 3월 2016년
- [7] Qingsong Wang, “Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery”, Journal of Power Sources 208(2012), pp. 210-224, March 2012
- [8] 심상보, “고온 및 단락전류에 따른 리튬배터리의 폭발 및 화재 위험성에 관한 연구”, Fire Sci. Eng, Vol.30, No. 2, pp. 114-122, 4월 2016년
- [9] Hao Ji, “Study of lithium-ion battery module’s external short circuit under different temperatures”, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, March 2020
- [10] 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
- [11] 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