

# ESS용 리튬이온전지의 화재 이상징후 검출방안에 관한 연구

최형석\*, 황소연\*, 유현상\*\*, 신진\*\*, 노대석\*\*

\*㈜티팩토리, \*\*한국기술교육대학교

e-mail: elroi91@tfactory.kr

## A Study on the Detection Method of Fire Abnormal Signs in a Li-ion Battery for ESS

Hyoung-Seok Choi\*, So-Yeon Hwang\*, Hyeon-sang Yu\*\*, Jian Shen\*\* and Dae-Seok Rho\*\*

\*TFactory, Inc., \*\*Korea University of Technology

### 요약

2015년 유엔 기후변화회의에서 채택된 ‘파리 협정’ 이후, 전 세계가 탄소중립 정책에 따라 신재생에너지원 및 에너지 저장장치(energy storage system, ESS)의 설치가 크게 증가하고 있지만, 국내에서는 2017년 8월부터 시작된 에너지 저장장치의 화재사고를 시작으로 현재까지 총 38건이 발생하여, 관련 업계에 큰 타격을 주고 있는 실정이다. 한편, 에너지 저장장치의 화재는 한번 발생하면 쉽게 소화할 수 없고 대규모 화재로 이어질 가능성이 높는데, 그 이유는 ESS에 사용된 리튬이온전지의 화재 특성이 일반 화재 특성과 큰 차이가 있기 때문이다. 따라서, 본 논문에서는 ESS용 리튬이온전지의 화재를 예방하거나 조기에 검출하기 위하여, ESS용 리튬이온전지의 화재 특성을 분석하고, 이를 기반으로 리튬이온전지의 화재 이상징후를 도출하며, 이를 정확하게 검출할 수 있는 방안을 제안한다. 또한, 리튬이온전지 화재 이상징후 검출방안이 적용된 검출장치를 구현하여 특성시험을 수행한 결과, 본 논문에서 제안한 ESS용 리튬이온전지 화재 이상징후 검출방안을 통해 화재 이상징후를 조기에 검출할 수 있음을 확인하였다.

### 1. 서론

2015년 유엔기후변화회의에서 채택된 ‘파리 협정’ 이후, 국내에서도 탄소중립 정책을 실시함에 따라 신재생에너지원 및 에너지저장장치(energy storage system, ESS)의 설치사태가 증가하고 있지만, 국내에서는 2017년 8월부터 시작된 에너지 저장장치의 화재사고를 시작으로 현재까지 총 38건이 발생하여, 관련 업계에 큰 타격을 주고 있는 실정이다. [1-2]. 특히, 리튬이온전지의 화재와 일반 화재의 특성에 큰 차이가 있는데, 일반 화재의 경우, 적절한 소화장비를 사용하면 가연성 물체가 전소하기 전에 화재를 진압할 수 있다. 하지만, 리튬이온전지 기반의 에너지저장장치에서 발생하는 화재는 리튬이온전지의 열폭주(thermal runaway)로 인해 화재가 급속하게 확산되며 인접한 전지에 전이되어, 여러 대의 에너지저장장치에서 열폭주가 연쇄적으로 발생할 수 있으므로, 에너지저장장치가 전소하기 전에 화재를 진압하는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서, 본 논문에서는, ESS용 리튬이온전지의 화재 발생 메커니즘을 분석하고, 이를 바탕으로 온도, 전압, 오프가스, 산소, 압력, 먼지, LEL 등과 같이 리튬이온전지의 화재 이상징후와 직접적으로 관련된 내부 및 외부 요인들을 분석하여, 이상징

후 검출의 필요성과 검출 방안을 제시한다. 또한, 제시한 검출 방안을 바탕으로, 센서부, 관제장치부, 시험장치부로 구성된 리튬이온전지 화재 이상징후 검출장치를 구현하여 특성분석 시험을 수행한 결과, 제안한 ESS용 리튬이온전지 화재 이상징후 검출방안을 통해 화재 이상징후를 조기에 검출할 수 있음을 확인하여, 본 논문의 유용성을 알 수 있었다.

### 2. ESS용 리튬이온전지의 화재 발생 메커니즘

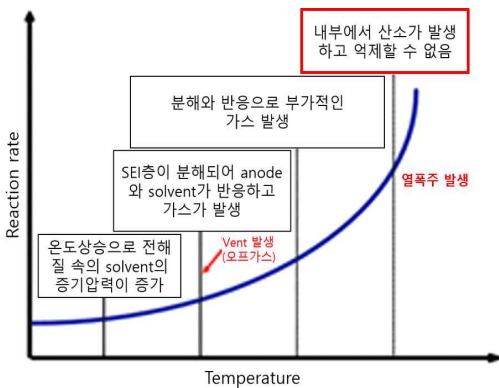
에너지저장장치의 ESS 화재는 단전지 1개의 열폭주로부터 발생하여 확산되는 것이며, 그림 1과 같이 전지의 열폭주는 일정한 단계를 거쳐 발생하게 된다. 전지에 열적, 전기적 또는 기계적 충격이 가해지고, 이것이 검출되거나 제어되지 못하여 전지에 지속적인 충격이 발생하면 내부 온도가 상승하여 전해질이 끓어오르게 된다. 전해질이 기화되면 전지 내부 압력이 증가하게 되고, 일정 단계를 지나면 전지 표면이 개방되거나 터지는 벤팅(venting) 현상이 발생하여 전해질 증기 및 분해가스가 외부로 배출된다. 여기서, 전해질 증기는 벤트시 초기에 전해질이 기화되어 나오는 것이고, 분해가스는 전해질 성분의 분자들이 고온/고압에 의해 분해되어 생성되는 것이며, 전해질

증기와 분해가스를 통칭하여 오프가스로 명명한다[3]. 전지마다 벤팅이 발생하는 위치가 있는데, 이는 구조적으로 리튬이온 전지 내부 압력 증가 시 안전하게 압력을 배출하기 위함이다. 원통형, 각형 리튬이온전지에서는 설계된 특정 위치에서 벤트가 발생하고, 파우치 전지에서는 극판과 가까운 위치에서 벤트가 발생한다. 초기에는 전해질이 기화된 증기가 다량 배출되다가 시간이 지날수록 분해가스의 배출량이 증가한다.



[그림 1] 리튬이온전지의 화재 단계

또한, 벤팅 이후 열폭주까지 일정 시간이 존재하는데 이를 골든 타임(golden time)이라고 할 수 있으며, 스트레스가 지속되면 전지 내부 온도 증가로 분리가 되어 결국 내부단락이 일어난다. 내부 단락이 시작되면 다량의 반응가스(연기)가 배출되고, 이후 고열에 의해 접화가 되어 화재가 발생하는데 이것을 열폭주라 한다. 리튬이온전지의 열폭주는 그림 2와 같이 내부 에너지가 모두 소진될 때까지 끊임없이 열과 산소를 만들어내므로, 일반적인 소화 장비로는 소화할 수 없다. 이러한 전지의 열폭주는 인접 전지로 열적 충격을 가해 화재를 전파하며, 전지 근처에 농축되어 있던 가연성 가스가 화재에 개입하여 큰 폭발로 이어질 수 있다.



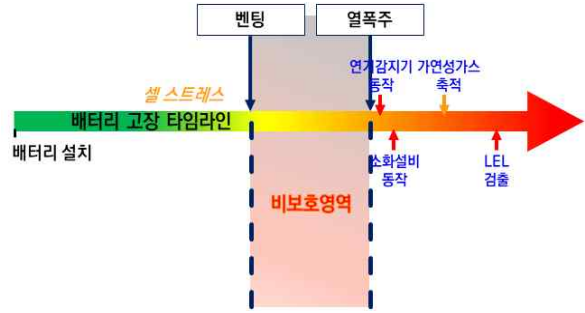
[그림 2] 리튬이온전지의 열폭주 메커니즘

### 3. 리튬이온전지 화재 이상징후 검출방안

#### 3.1 기존 ESS 화재 감지장치의 문제점

대부분의 ESS의 경우 화재 감지를 위한 설비로 연기감지

기를 사용하고 있다. 공기흡입식 연기감지기는 능동적인 시스템으로 오작동율이 적고 화재를 조기에 감지할 수 있어 ESS 화재감지기로 사용되지만, 그림 3과 같이 연기감지기는 열폭주 이후에 동작하여 화재를 감지하기 때문에, 화재 이상징후를 파악하거나 예방하는 장치로서 동작을 기대하기 어렵다. 여기서, 벤팅부터 열폭주 사이에 리튬이온전지의 화재 이상징후를 감지하여 비보호 영역을 줄일 수 있다면 ESS 화재 예방 및 조기 감지가 가능하다.



[그림 3] 리튬이온전지의 화재 타임라인

#### 3.2 리튬이온전지 화재 이상징후 검출방안

상기에서 언급한 리튬이온전지의 화재특성을 기반으로 화재 이상징후를 선정하면 표 1과 같다.

[표 1] ESS 화재 이상징후

구분	항목
배터리 내부 요인	온도
	전압
	오프가스
배터리 외부 요인	산소
	압력
	먼지
	LEL

##### 3.2.1 온도

먼저, 리튬이온전지의 화재 이상징후로 가장 확실하게 알 수 있는 요인은 온도이다. 전지에서 벤팅 및 열폭주가 발생하게 되면 내부 온도가 상승하는 것이 필수조건인데, 셀 표면에 온도센서를 설치하여 온도를 감지하게 된다면 화재 이상징후를 가장 빠르게 확인할 수 있다. 단, 전지 품질이 불량하여 내부단락이 발생하는 경우, 급격한 온도상승과 함께 열폭주가 동반될 수 있어, 이 경우 화재의 이상징후로 검출하고 판단하는데 어려움이 있을 수 있다.

##### 3.2.2 전압

전압은 특정 리튬이온전지 타입에서 화재 이상징후로 큰 역할을 할 수 있다. 원통형/각형 전지의 경우, 전지에 고장이

발생하게 되면 내부 보호회로가 동작하여 전압이 소실되게 된다. 또한, 과충전/과전압 등의 이상상황은 전압을 감지하는 것으로 발견할 수 있다.

### 3.2.3 오프가스

한편, 상기의 리튬이온전지의 화재특성에서 알 수 있듯이, 리튬이온전지의 열폭주 메커니즘은 일반 화재와는 다르게 벤딩과 오프가스 발생이라는 특이사항이 존재한다. 따라서, 오프가스는 리튬이온전지의 확실한 화재 이상징후로 설정할 수 있으며, 반드시 검출할 필요성이 있다.

### 3.2.4 산소

산소는 화재의 필수적인 요인으로, 리튬이온전지 열폭주 시 산소를 차단하더라도 내부에서 발생하는 산소로 인해 화재가 지속되는 특징이 있다. 이를 토대로, 산소가 리튬이온전지의 화재 이상징후로 의미있는 변화가 있을 것으로 판단되어 이상징후 항목으로 설정한다.

### 3.2.5 압력

리튬이온전지의 벤딩은 전지 내부 온도 상승으로 인한 압력 증가로 발생하는 것으로, 벤딩과 열폭주 시 전지와 전지 주변에 유의미한 압력의 변화가 있을 것으로 추정된다.

### 3.2.6 먼지

먼지는 리튬이온전지에 직접적으로 화재를 유발하는 요인은 아니지만, 시스템의 절연과피 및 오작동을 유발할 가능성이 있다. 또한, 벤딩 및 열폭주 시 먼지와 비슷한 입자 크기를 가진 부산물이 발생할 수 있으므로, 먼지를 화재 이상징후로 선정한다.

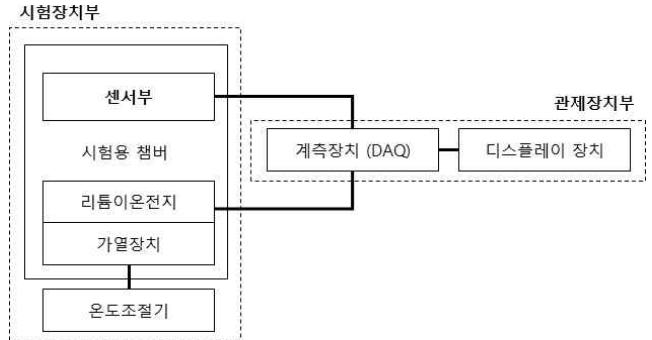
### 3.2.7 LEL

LEL(lower explosive limit)는 기존 납축전지를 활용한 장비 또는 룸에 설치되는 센서로, 가연성 가스의 농도를 확인하고 화재가 발생할 수 있는 정도의 가스 축적상태를 알리는 장치이다. 리튬이온전지에서는 벤딩 이후 오프가스와 같은 가연성 가스가 열폭주까지 배출되기 때문에, 화재 이상징후 항목으로 선정한다.

## 4. 리튬이온전지 화재 이상징후 검출장치의 구현

상기에서 선정한 리튬이온전지 화재 이상징후 요인을 검출하기 위하여 센서 시스템을 구축하고, 이를 토대로 그림 4와

같이 센서부, 관제장치부, 시험장치부로 구성된 리튬이온전지의 화재 이상징후 검출장치를 구현한다.



[그림 4] 리튬이온전지 화재 이상징후 검출장치

먼저, 센서부는 표 2와 같이 온도, 오프가스, 산소, 압력, 먼지, LEL, 열 측정 센서로 구성한다. 전압은 따로 센서가 없이 바로 계측장치와 연결하고, 나머지 이상징후는 센서를 통해 계측장치로 연결하여 측정한다.

[표 2] 리튬이온전지 화재 이상징후 검출용 센서

구분	사용 센서	제조사	비고	형태
온도	thermocouple	-	T타입 열전쌍	모듈
오프가스	Li-ion Tamer	Nexceris	오프가스 검출용	PCB
	GSBT11-P110	Ogam	VOCs 측정	PCB
산소	Oxy-sen	AOI	산소 농도 측정	모듈
압력	CP116	Entron	대기압 측정	모듈
먼지	DSM101	FTLAB	미세먼지 측정	모듈
LEL	NAP-100AM	NEMOTO	수소계열 LEL 측정	PCB

또한, 관제장치부는 이상징후 검출 센서의 측정값을 기록하고 그래프로 출력하는 DAQ와 디스플레이 장치로 구성되며, 시험장치부는 리튬이온전지의 열폭주를 발생시키는 가열장치와 온도조절기, 시험용 챔버로 구성된다.

## 5. 시험 결과 및 분석

### 5.1 시험 조건

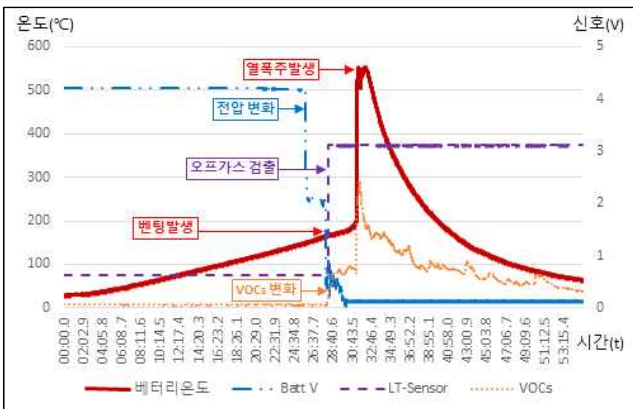
리튬이온전지의 화재 이상징후 검출방안의 유용성을 확인하기 위하여, 표 3과 같이 리튬이온전지 열폭주 시험을 수행한다. 리튬이온전지 열폭주 시험은 UL9540A 시험방법을 참고하여, 국내 원통형 리튬이온전지를 외부가열하여 진행하고, 전지 상단에 화재 이상징후를 검출할 수 있는 리튬이온전지 화재 이상징후 검출장치를 설치하여 진행한다.

[표 3] 리튬이온전지 화재 이상징후 검출 시험 조건

항목	조건
시험 구분	리튬이온전지 화재 이상징후 검출
시료	원통형 리튬이온전지 셀
충전율	SOC 100%
스트레스 요인	전지 표면 외부 가열
스트레스 파라미터	분당 57°C 상승
스트레스 제어방식	RAMP

### 5.2 리튬이온전지 화재 이상징후 특성분석

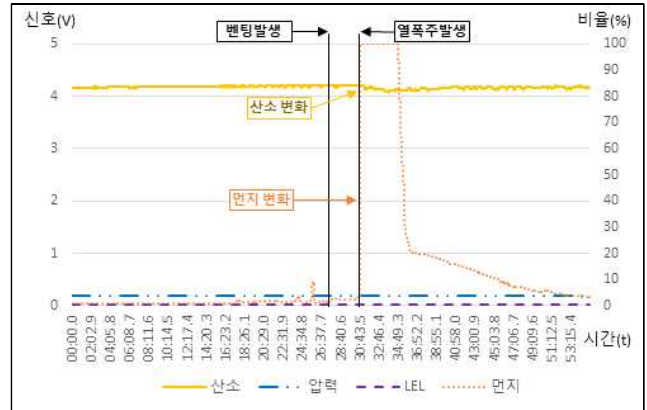
시험 조건을 바탕으로, 리튬이온전지의 외부 가열 및 화재 이상징후 검출 시험을 수행한 결과는 그림 5, 그림 6과 같다. 먼저, 그림 5의 배터리 온도는 지속적으로 상승하다가 28분 9초경 순간적으로 온도가 소폭 하락하였다가 다시 상승하였는데, 이것은 벤팅 발생에 따른 현상이다. 이때, 오프가스 검출 센서와 VOCs 센서의 값에 변화를 통해 오프가스를 검출하였다. 여기서, 오프가스 전용 센서는 오프가스 발생시 트리거 형태로 값을 출력하여 벤팅이 발생함을 확실히 알 수 있었지만, VOCs 센서는 아날로그 값으로 출력하기 때문에, 급격한 값의 변동이 있기 전까지는 벤팅이 발생하였는지 확인하는데 어려움이 있었다. 이후 30분 경, 온도가 급격히 치솟으면서 리튬이온전지 열폭주가 발생하였는데, 마찬가지로 VOCs 센서의 값이 크게 치솟는 것을 확인하였다. 다만 전압의 경우, 벤팅 이전에 전압이 순간적으로 소실되는 현상을 보였는데, 이는 원통형 전지 내에 포함된 보호회로가 고열에 의해 동작한 것으로 추측되며, 벤팅 시기에 전압이 2차적으로 소실된 것으로 보아 벤팅시에도 전압값에 변화가 있는 것을 확인할 수 있다.



[그림 5] 리튬이온전지 화재 이상징후 특성분석 (온도, 전압, 오프가스)

또한, 산소는 열폭주 시 값이 소폭 하락하였다가 천천히 회복하는 모습을 보여, 열폭주 간 주변 공기 중 산소를 소모하는 것을 확인할 수 있었다. 여기서, 먼지 역시 벤팅시에는 유의미한 값의 변화가 없었지만 열폭주시 포화상태

(saturation)까지 값이 상승하는 것을 확인하였다. 한편, 압력과 LEL은 열폭주 이후까지 값의 변화가 일어나지 않았는데, 이는 시험용 챔버가 개방형 구조인 이유로 추측된다. 산소와 먼지, 압력, LEL 센서 모두 벤팅 시 특별한 값의 변화는 없었다.



[그림 6] 리튬이온전지 화재 이상징후 특성분석 (산소, 압력, LEL, 먼지)

## 6. 결 론

본 논문에서는 ESS용 리튬이온전지의 화재 이상징후를 선정하고, 이상징후 검출을 위한 방안을 제안하였다. 제안한 검출방안의 유용성을 확인하기 위해 검출장치를 구현하여 특성 분석을 수행한 결과, 오프가스 전용 센서와 VOCs 검출 센서는 리튬이온전지의 오프가스를 검출할 수 있음을 알 수 있었으며, 전압, 온도, 오프가스 검출을 통해 리튬이온전지의 화재 이상징후를 알 수 있어, 본 논문에서 제안한 검출방안의 유용성을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20214910100010) & No.20215910100030)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] 산업통상자원부, “ESS 사고원인 조사결과 및 안전강화 대책 발표”, 보도자료, 2019.06.
- [2] 장홍제 외, “에너지저장장치의 안전성 확보를 위한 화재 요인 분석 및 표준.안전기준 개발방향 연구”, 표준인증안전학회지, 2019.09.
- [3] Nexceris, LLC, “Off-gas detection for Lithium-ion Battery System”, Data Pack for NFPA855 Committee, July 11, 2018.