

리튬이온배터리의 화재발생메커니즘을 고려한 ESS 화재감지 알고리즘에 관한 연구

최형석^{1,2}, 황소연², 김남현³, 김현재³, 김지명¹, 노대석^{1*}
¹한국기술교육대학교, ²(주)티팩토리, ³한국산업기술시험원

A Study on Fire Detection Algorithm in ESS by Considering Fire Mechanism for Li-ion Battery

Hyoung-Seok Choi^{1,2}, So-Yeon Hwang², Nam-Hyun Kim³,
Hyun-Jae Kim³, Ji-Myung Kim¹, Dae-Seok Rho^{1*}
¹Korea University of Technology and Education
²TFactory Inc
³Korea Testing Laboratory

요약 정부의 녹색성장 및 탄소 중립 정책에 따라, 대용량 ESS(energy storage system)의 보급이 급속히 확산되고 있지만, 2017년 8월부터 시작된 ESS의 화재사고로 인하여 관련 업계가 큰 타격을 받고 있다. 이에 정부의 권고사항과 배터리 제조사의 화재대응 대책이 적용되고 있지만, 여전히 ESS의 화재가 발생하고 있다. 한편, ESS의 화재는 한번 발생하면 쉽게 진압되기 어렵고, 대규모 화재로 이어질 가능성이 높는데, 그 이유는 ESS에 사용된 리튬이온배터리의 화재 특성이 일반 화재 특성과 큰 차이가 있기 때문이다. 또한, ESS 화재의 발생 단계에 따라 초기에 진압하거나 화재 확산을 방지해야 하는데, 현재는 ESS의 화재 발생단계를 구분할 수 있는 방안이 없어 화재 발생 시 ESS가 전소될 가능성이 많은 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 ESS용 리튬이온배터리의 화재를 예방하거나 초기에 검출하기 위하여, ESS용 리튬이온배터리의 화재 특성을 분석하고, 이를 기반으로 리튬이온배터리의 화재 이상징후를 선정하며, 이를 검출할 수 있는 방안을 제안한다. 또한, 화재 발생단계를 구분하여 판단하는 ESS 화재감지 알고리즘을 제시하고, 제안한 알고리즘의 유효성을 검증할 수 있는 화재시험장치를 구현한다. 이를 토대로 ESS 화재시험을 수행한 결과, 리튬이온배터리의 화재 이상징후를 초기에 검출하고 ESS 화재단계를 정확하게 구분할 수 있어 제안한 알고리즘의 유효성을 확인하였다.

Abstract According to the government's green growth and carbon-neutral policy, the supply of large-capacity energy storage systems (ESS) is rapidly spreading, but related industries are being severely impacted by ESS fire accidents that began in August 2017. Despite the implementation of government recommendations and fire response measures by battery manufacturers, ESS fires continue to occur. Moreover, once a fire breaks out in an ESS, it is difficult to extinguish easily, and there is a high possibility that it will lead to a large-scale fire because the fire characteristics of the lithium-ion battery in the ESS are significantly different from those of a general fire. In addition It is necessary to suppress the fire early or prevent its spread based on the stage of the ESS fire, but there is currently no way to distinguish the fire's stage, which could result in the complete destruction of the ESS. Therefore, this paper presents the fire occurrence mechanism of an ESS and proposes parameters and sensors capable of evaluating the fire occurrence stage. Based on this, a assessment algorithm is presented to classify the stages of fire occurrence, and a fire occurrence testing device is implemented to verify the algorithm's effectiveness. The step-by-step ESS fire test using the assessment algorithm and test device presented in this paper confirms that the algorithm is effective in distinguishing the fire occurrence stages.

Keywords : Li-ion Battery, ESS, Fire Occurrence Mechanism, Fire Detection, Detection Algorithm

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구임(No.20215910100030, ESS 설치공간의 화재예방·차단 시스템 및 유지관리 가이드라인 개발).

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)
email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received December 11, 2023

Revised February 5, 2024

Accepted February 6, 2024

Published February 29, 2024

1. 서론

2015년 유엔기후 변화회의에서 채택된 ‘파리 협정’ 이후, 국내에서도 탄소중립 정책을 실시함에 따라 신재생에너지원 및 에너지저장장치(energy storage system, ESS)의 설치사례가 증가하고 있지만, 2017년부터 시작된 ESS의 화재사고가 관련 산업계에 악영향을 끼치고 있다[1-3]. 일반적인 화재의 경우, 적절한 소화장비를 사용하면 가연성 물체가 전소하기 전에 화재를 진압할 수 있지만, 리튬이온배터리 기반의 ESS에서 발생하는 화재는 리튬이온배터리의 열폭주(thermal runaway)로 인해 화재가 급속하게 확산되며 인접한 배터리에 전파(propagation)되어, 열폭주가 연쇄적으로 발생할 수 있다[4-6]. 이러한 ESS 화재는 발생 단계에 따라 조기에 진압하거나 화재 확산 방지를 해야 하는데, 현재는 ESS의 화재 발생단계를 구분할 수 있는 방안이 없어 화재 발생 시 ESS가 전소될 가능성이 있다. 또한, ESS의 전기설비에서 발생한 비(非)배터리 화재 발생시, 배터리 화재와 구분할 수 없어서 화재진압 시도를 하기가 어려우므로, 배터리 열폭주와 비배터리 화재를 구분하여 대응해야 한다. 따라서, ESS의 화재 단계에 따라 예방, 진압, 차단하는 대응책의 필요성이 증가하고 있으며, 이를 위하여 리튬이온배터리의 특성을 고려한 ESS 화재감지 및 화재 발생단계를 판단하는 방안이 요구된다[7-9]. 따라서, 본 논문에서는 리튬이온배터리 ESS의 화재 발생메커니즘을 분석하고 이를 바탕으로 온도, 전압, 오프가스, 산소, 압력, 먼지, LEL 등과 같은 리튬이온배터리의 화재 이상징후를 분석하여 검출하는 방안을 제시하며, ESS 화재 발생단계를 판단하는 알고리즘을 제안한다. 또한, 이상징후 검출방안과 화재단계 감지알고리즘의 유효성을 검증하기 위해, 화재감지장치부, 감시제어장치부, 화재발생장치부로 구성된 ESS 화재 시험장치를 구현한다. 이를 바탕으로 특성시험을 수행한 결과, 리튬이온배터리의 화재 이상징후를 신속하게 검출하고, ESS 화재 발생단계를 정확하게 구분할 수 있어서, 본 논문의 유용성을 확인할 수 있었다. 즉, 기존의 ESS의 화재 진압 방식과 다르게, 배터리 화재와 비화재를 구분하여 화재발생 단계별로 예방, 진압, 차단하는 대응책을 제시하여 효과적으로 ESS를 보호할 수 있었다.

2. 리튬이온배터리 ESS의 화재 발생 메커니즘

2.1 ESS용 리튬이온배터리의 열폭주 개념

에너지저장장치의 ESS 화재는 배터리 1개의 열폭주로부터 발생하여 확산되는 것이며, Fig. 1과 같이 배터리의 열폭주는 일정한 단계를 거쳐 진행된다[10]. 즉, 배터리에 열적, 전기적 또는 기계적 충격이 가해지는 경우, 이것이 검출되거나 제어되지 못하면 배터리의 내부온도가 상승하여 전해질이 끓어오르게 된다. 또한, 전해질이 기화되면 배터리 내부 압력이 증가하게 되고, 일정 단계를 지나면 배터리 표면이 개방되는 벤팅(venting) 현상이 발생하여 전해질 증기 및 분해가스가 외부로 배출된다. 여기서, 전해질 증기는 벤팅 초기에 전해질이 기화되어 발생하는 것이고, 분해가스는 전해질 성분의 분자들이 고온/고압에 의해 분해되어 생성되는 것이며, 이들을 통칭하여 오프가스로 정의된다[11]. 한편, 배터리 형태마다 벤팅이 발생하는 위치가 다른데, 이는 구조적으로 리튬이온배터리 내부 압력 증가 시 안전하게 압력을 배출하기 위함이다. 또한, 벤팅 초기에는 전해질이 기화한 증기가 다량 배출되지만, 시간이 지날수록 분해가스의 배출량이 증가한다.

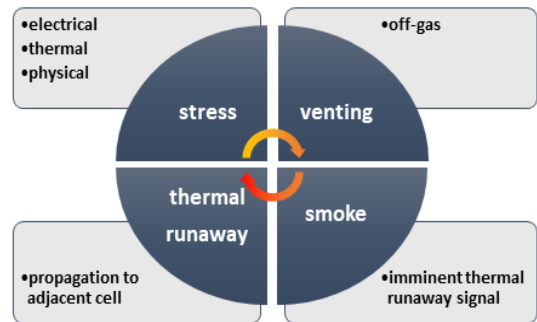


Fig. 1. Stage of thermal runaway in Li-ion battery

한편, 벤팅이 발생한 이후 열폭주 지점까지 일정한 시간이 나타나는데 이를 골든타임(golden time)으로 정의되고 있다. 또한, 열적, 전기적, 기계적 스트레스가 지속되면, 배터리 내부 온도 증가로 분리막이 녹게 되고 결국 내부단락이 일어난다. 내부 단락이 발생하면 다량의 반응가스(연기)가 배출되고, 이후 고열에 의해 접화가 되어 화재가 발생하는데 이것을 열폭주라 한다. 또한, 리튬이온배터리의 열폭주는 내부 에너지가 모두 소진될 때까지 끊임없이 열과 산소를 만들어내므로, 일반적인 소화 장비로는 진압할 수 없다. 이러한 열폭주는 인접 배터리로 열적 충격을 가해 화재를 전파시키며, 배터리 근처에 놓여 있는 가연성 가스는 큰 폭발을 일으킬 수 있다.

2 ESS의 화재 발생 메커니즘

상기에서 제시한 리튬이온배터리의 열폭주에 의한 화재 발생특성을 고려하여 ESS 화재 단계를 구분할 수 있다. 즉, 리튬이온배터리의 화재 발생단계는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있으며, 먼저 정상동작 단계는 ESS 구성 장치들이 고장 없이 정상적으로 동작하는 단계로, BMS와 PMS 등을 통해 모니터링 또는 제어된다. 또한, 비(非)배터리 화재 발생단계는 리튬이온배터리의 개입 없이 화재가 발생하는 단계로, 과부하로 인한 케이블, 부스바 등의 화재와 장치의 결함이나 과열로 발생하는 화재로, 이것은 리튬이온배터리에 열적 스트레스를 가하여 배터리 화재로 이어질 수 있다. 한편, 배터리 벤팅 단계는 배터리가 열적, 전기적, 물리적 요인에 의하여 지속적으로 스트레스를 받거나 비배터리 화재로 인하여 배터리에 벤팅이 발생하는 단계이다. 이 단계에서 시스템 긴급정지(emergency stop)나 메인 전력 차단 등의 적절한 대응 조치를 취하지 않을 경우, 배터리 열폭주 발생단계로 이어질 수 있다. 한편, 배터리 열폭주 단계는 리튬이온배터리의 벤팅 단계 이후 열폭주가 발생하는 단계이다. 여기서, 배터리의 열폭주는 인접 배터리로 열적 스트레스를 전파하여 연쇄적인 열폭주를 일으키기 때문에, 초기에 열폭주를 감지하여 냉각 또는 소화 등의 화재진압 조치를 수행해야 한다. 마지막으로, ESS 화재 발생단계는 리튬이온배터리의 열폭주로 인한 배터리의 화재가 인접 배터리로 열충격을 주어 모듈, 랙 단위로 확산하게 되는 단계이다.

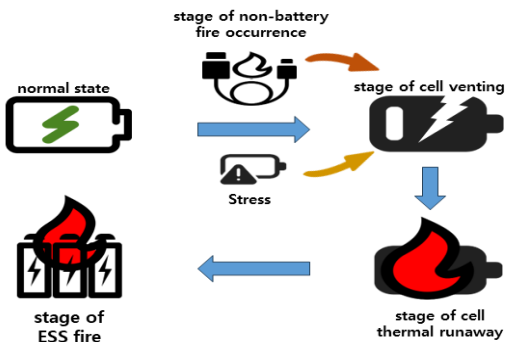


Fig. 2. Fire mechanism of Li-ion battery in ESS

3. 리튬이온배터리의 화재 발생단계를 고려한 ESS 화재감지 알고리즘

3.1 기존 ESS 화재 감지장치의 문제점

대부분의 ESS의 경우, 화재 감지를 위한 장치로 연기감지기 등을 사용하고 있다. 여기서, 공기흡입식 연기감지기는 능동적인 작동방식으로 오동작율이 낮고 화재를 조기에 감지할 수 있어 ESS 화재감지기로 주로 사용되고 있다. 하지만, Fig. 3과 같이 공기흡입식 연기감지기는 배터리의 열폭주 이후에 동작하여 화재를 감지하기 때문에, 화재 이상징후를 사전에 파악하거나 예방하는 장치로서 역할을 기대하기 어렵다. 즉, 연기감지기가 동작하지 못하는 배터리의 벤팅부터 열폭주에 이르는 기간 동안, 배터리의 화재 이상징후를 감지하여 연기감지기의 비보호 영역을 줄일 수 있다면 ESS의 조기 감지 및 화재 예방이 가능하다.

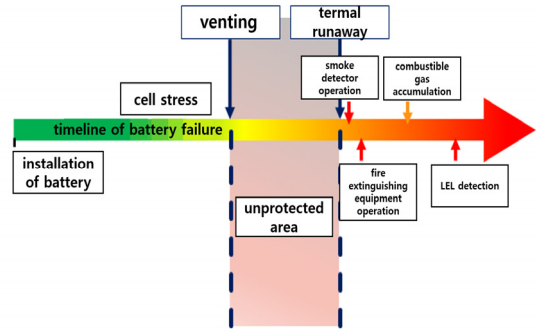


Fig. 3. Fire timeline of Li-ion battery

3.2 ESS 화재 발생단계 감지방안

3.2.1 화재 이상징후의 감지방안

리튬이온배터리는 일반화재와는 달리, 벤팅이라는 독특한 현상이 나타나며, 벤팅을 감지함으로써 열폭주 전의 화재의 이상징후를 사전에 알 수 있다. 화재 이상징후는 직접적인 이상징후와 간접적인 이상징후로 Table 1, Table 2와 같이 각각 구분할 수 있다. 먼저, Table 1과 같이, 리튬이온배터리의 열폭주 전의 직접 이상징후 중 벤팅을 감지할 수 있는 요인은 온도이다. 즉, 배터리에서 벤팅 및 열폭주가 발생하는 시기에는 내부 온도가 상승하는 것이 일반적이는데, 셀 표면에 온도센서를 설치하여 온도를 감지하면 화재 이상징후를 가장 빠르게 추정할 수 있다. 하지만, 벤팅 전후의 변동율의 차이가 크지 않고, 배터리의 결함으로 내부단락이 발생하는 경우, 벤팅과 열폭주의 시간차가 적어, 화재의 이상징후로 검출하고 판단하기에 한계점을 가지고 있다. 또한, 전압의 변동은 원통형/각형 리튬이온배터리 타입에서 화재 이상징후

를 감지하는데 중요한 요인으로 평가되고 있으며, 배터리에 벤팅이 발생하면 내부 보호회로가 동작하여 배터리의 전압이 급격하게 강하되나, 파우치형 배터리의 경우에는 이상징후가 명확하지 않다. 한편, 벤팅시 발생하는 오프가스는 리튬이온배터리의 화재 이상징후를 감지하는데 있어서 가장 확실한 요인으로 평가되어, 반드시 검출할 필요성이 있다.

Table 1. Direct abnormal signs of fire in Li-ion battery

factor	characteristics
temperature	Venting and thermal runaway from the battery increases the internal temperature
voltage	The voltage of cylindrical and prismatic type Li-ion batteries drops as thermal runaway progress, but the pouch-type Li-ion battery does not change regularly
off-gas	Off-gas is the clearest direct sign of abnormalities in Li-ion battery and occurs in the venting stage before Li-ion battery thermal runaway occurs

한편, 화재의 간접적인 징후는 Table 2와 같이 나타낼 수 있으며, 리튬이온배터리 열폭주 발생시 산소를 차단하더라도 배터리 내부에서 발생하는 산소로 인해 화재가 지속되는 특징을 가지고 있다. 따라서, 산소 발생은 리튬이온배터리의 화재 이상징후를 검출하는데 있어서 하나의 요인으로 선정할 수 있다. 또한, 벤팅과 열폭주 발생시 배터리와 배터리 주변에 발생하는 압력의 변화는 화재감지에 중요한 간접적인 요인으로 평가된다. 한편, 먼지는 배터리의 절연파괴 및 오작동을 유발할 가능성이 있으며, 벤팅 및 열폭주 시 먼지와 비슷한 입자 크기를 가진 부산물이 발생할 수 있으므로 화재의 간접적인 이상징후로 평가된다. 한편, 벤팅과 열폭주시에 배출되는

Table 2. Indirect abnormal signs of Li-ion battery fire

factor	characteristics
oxygen	Even if oxygen is cut off during thermal runaway of lithium-ion batteries, fires continue due to oxygen generated inside
pressure	The change in pressure around the battery during venting and thermal runaway is evaluated as an important indirect factor in fire detection
dust	By-products with particle sizes similar to dust may occur during venting and thermal runaway
Combustible gas	As combustible gases such as off-gas are generated until thermal runaway after venting, they are selected as indirect abnormal signs of fire

오프가스와 유사한 가연성 가스도 화재의 간접적인 이상징후를 판단하는데 중요한 요인으로 평가된다. 또한, 가연성 가스는 리튬이온배터리의 벤팅 시 발생하는 오프가스와 같이 열폭주 시까지 배출되기 때문에 화재의 간접적인 이상징후로 선정한다.

3.2.2 화재 단계별 감지방안

리튬이온배터리를 적용한 ESS의 화재 단계를 판단하기 위하여, 각 화재 단계를 검출할 수 있는 센서를 선정하고 동작특성을 평가하여 화재단계를 결정하는 알고리즘이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 Table 3과 같이, 정상 단계, 비배터리 화재 발생 단계, 배터리 벤팅 단계, 배터리 열폭주 단계, ESS 화재 발생 단계로 분류하여, 화재 단계별 감지방안을 제안한다. 여기서, 정상 단계에서는 모든 센서가 동작하지 않으며, 비배터리 화재 발생 단계에서는 연기 감지 센서가 동작한다. 또한, 배터리 벤팅 발생 단계는 명확한 벤팅 징후인 오프가스의 검출을 통해 판단하며, 공기흡입식 연기감지기를 통해 배터리의 열폭주 단계를 구분한다. 마지막으로, ESS의 화재 발생 단계는 배터리의 설치공간 상부에 열감지 센서를 설치하여 ESS의 화재를 판단할 수 있다.

Table 3. Detection Method for ESS fire stage

stage	ESS status	sensor operation	content
1	normal	-	-
2	non-battery fire	smoke detection	fire without battery
3	battery venting	off-gas sensing	battery cell venting
4	battery thermal runaway	off-gas sensing, smoke detection	battery cell thermal runaway
5	ESS fire	off-gas sensing, smoke detection, heat sensing	ESS fire on the module or rack

3.3 ESS 화재 단계별 감지 알고리즘

상기에서 제시한 화재 감지기들을 바탕으로, 리튬이온 배터리를 적용한 ESS의 화재 단계를 판단하는 알고리즘을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] ESS 설치공간의 적절한 위치에 오프가스 검출 센서, 연기감지센서, 열감지센서를 설치한다.

[Step 2] 설치한 센서들은 PLC와 연결하여 센서 동작

상태를 실시간으로 감시한다.

[Step 3] 설치한 센서들 중에서 오프가스 검출센서가 동작하면 [Step 4]로 이동한다. 만약, 오프 가스 검출기가 동작하지 않으면 [Step 6]으로 이동한다.

[Step 4] 오프가스 검출센서가 동작하고 연기감지센서가 동작하지 않으면 배터리의 벤팅단계로 판단하고, 연기감지센서가 동작하면 [Step 5]로 이동한다.

[Step 5] 열감지 센서에 알람이 발생하지 않으면 배터리 열폭주 단계, 알람이 발생하면 ESS 화재 발생단계로 판단한다.

[Step 6] 연기감지센서만 동작하고 다른 센서들은 동작하지 않으면 비배터리 화재 발생단계로 판단하며, 설치한 모든 센서가 동작하지 않으면 정상상태로 판정한다.

상기에서 제시한 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 Fig. 4와 같다.

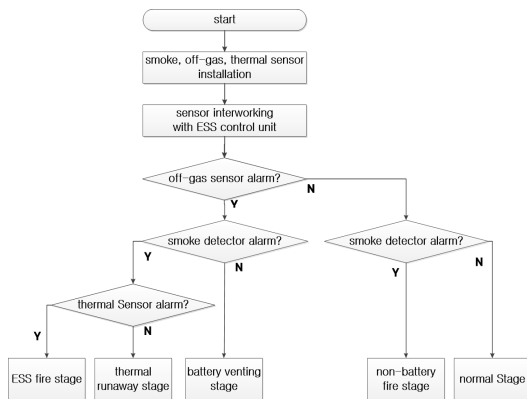


Fig. 4. Fire detection algorithm for ESS fire stage

4. ESS 화재 감지장치 구현

4.1 화재 감지장치부

ESS의 화재를 감지하기 위한 화재 감지장치부는 이상 징후 감지와 연기감지기, 열감지기로 구성되며, 각각 ESS 화재 이상징후 조기 검출 및 화재 단계를 판단하는 용도로 활용한다. 먼저, 이상징후 감지기는 Table 4와 같이 오프가스 검출 센서를 비롯하여 온도, 산소, 압력, 먼지, LEL(lower explosive limit) 측정 센서로 구성된

다. 여기서, 전압은 직접 계측장치와 연결하고, 나머지 이상징후는 센서를 통해 계측장치로 연결하여 측정한다. 또한, LEL 측정 센서는 화재가 발생할 수 있는 정도의 가스 측정 상태를 검출한다.

Table 4. Composition of abnormal sign detector

factor	sensor name	measurement	range
temperature	Thermo-coupler	T-type thermocouple	0~400℃
off-gas	Li-ion Tamer	Off-gas sensing	Normal Detect
oxygen	Oxy-sen	oxygen concentration	0~100%
pressure	CP116	atmospheric pressure	800~1100hPa
dust	DSM101	fine dust	0~999 ug/m3
combustible gas	NAP-100AM	LEL	1~50% LEL

또한, Table 5와 같이, 연기감지기는 공기흡입형 감지기, 열감지기는 차동식 감지기를 선정한다. 여기서, 차동식 열감지기는 급격한 온도상승이 있을 때 알람이 발생하는 장치로, 특정 온도에서 알람이 발생하는 정온식 열감지기와 기능적으로 차이가 있다.

Table 5. Composition of smoke and heat detector

item	product section	detection
smoke detector	VESDA	aspirating smoke
thermal sensor	P101-15000	rate of heat rising

4.2 화재 감시제어 장치부

화재 감시제어 장치부는 Table 6과 같이, 감지장치부의 센서 값을 측정하는 DAQ와 전체 감지기의 동작 상태를 분석하고 화재 단계를 판단하는 PLC 및 디스플레이 장치, 온도조절기로 구성된다. 여기서, 디스플레이 장치는 DAQ, PLC와 시리얼 통신으로 연결되어 데이터를 실시간으로 취득하고, 터치패널 화면을 통해 측정 값과 상태 값을 출력한다. 한편, 온도조절기는 화재발생 장치부의 가열온도를 제어하는 장치로, 입력한 데이터에 따라 자동으로 온도 상승제어를 수행한다.

Table 6. Configuration of fire monitoring control section

item	product section	content
DAQ	NI-9207	16-channel analog input
PLC	PLC-S CM3	digital I/O module
display	cMT3162X	15.6" IPS touch panel
thermostat	CS8DPT	PID/RAMP control

4.3 화재 발생장치부

화재 발생장치부는 Table 7과 같이, 열선, 구리동관을 포함한 발화장치와 시험용 챔버로 구성된다. 여기서, 발화장치는 온도조절기와 연결하여 UL9540A의 시험방법에 따라 원통형 리튬이온배터리의 표면을 분당 5~7°C 상승할 수 있도록 구성한다. 한편, 구리 동관은 열을 리튬이온배터리 표면에 전달하기 위하여 원통형 배터리 사이즈와 동일한 크기로 제작하고, 열선은 정확한 온도제어를 위해 최대 400°C까지 온도상승이 가능한 UL 인증 제품으로 구성한다.

Table 7. Configuration of fire generation section

item	product type	content
heating wire	3641K21	-73~482°C
copper pipe	8967K21	cylindrical 21700

4.4 전체 시험장치

제안한 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여, 화재감지 장치부, 화재 감시제어 장치부, 화재 발생장치부로 구성된 ESS 화재 감시장치의 전체 구성도를 나타내면 Fig. 5와 같다. 여기서, 감시제어장치부는 온도조절기를 통해 화재발생 장치부의 가열장치를 제어하여 배터리의 열폭

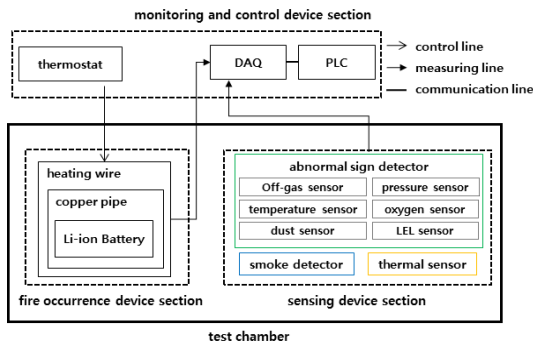


Fig. 5. Configuration of fire detection device

주를 발생시키며, 감지 장치부는 센서 및 감지기를 통해 측정된 데이터를 감시제어 장치부의 DAQ에 의하여 열폭주의 단계를 판단한다.

5. 시험 결과 및 분석

5.1 시험 조건

리튬이온배터리를 대상으로 한 ESS의 화재감지 시험은 Table 8의 시험조건을 바탕으로, 화재 이상징후 및 발생단계 감지로 나누어 수행한다. 또한, 시료는 국내 원통형 리튬이온배터리를 대상으로 하며, 시험방법은 UL9540A를 바탕으로 외부가열을 수행하고, 이상징후 감지기 및 연기감지기, 열감지기의 출력값을 측정하여 분석한다.

Table 8. Test condition of ESS fire detection

item	test condition
sample	cylindrical Li-ion battery cell 18650 SDI 3500mAh
charge rate(SOC)	100%
stress factor	battery surface heating heat up 5 to 7°C per minute ramp and sock control
temperature	5~7°C increase per minute

한편, 화재단계 시험은 배터리가 개입되지 않은 화재 시험과 배터리 및 ESS 시스템의 화재 발생 시험으로 분류한다. 여기서, PLC에는 리튬이온배터리 ESS의 화재감지 알고리즘을 바탕으로, 전압 레벨(analog output)에 따라 화재단계를 분류하여 출력한다. 또한, 계측기에서는 PLC의 아날로그 전압 출력 측정을 통해 화재단계를 구분하는데, 여기서 PLC 출력 전압은 Table 9과 같이 5 단계로 나누어 판정한다.

Table 9. Detection value of ESS fire stage

stage	voltage(V _{dc})	content
1	1.0	normal stage
2	2.0	non-battery fire
3	3.0	battery venting
4	4.0	battery thermal runaway
5	5.0	ESS fire

5.2 리튬이온배터리 화재 이상징후 특성분석

상기의 시험조건을 바탕으로, 리튬이온배터리의 화재 이상징후 검출 시험을 수행하여, 화재 직접징후와 간접 징후에 대한 특성을 나타내면 Fig. 6, Fig. 7과 같다. 먼저, 화재 직접징후 특성을 분석하기 위하여, 배터리의 화재를 발생시키면 Fig. 6과 같이, 배터리 온도는 지속적으로 상승하다가 28분 9초에, 벤팅 소리와 함께 순간적으로 온도가 소폭 하락하다가 다시 상승하는데, 이것은 벤팅 발생에 따른 온도변화로 추정된다. 이때, 오프가스 전용 센서는 오프가스 발생시 트리거 형태로 값을 출력하여 벤팅이 발생함을 확실히 알 수 있지만, 온도 센서는 적절한 임계치를 설정할 만큼의 아날로그 값의 변화량이 보이지 않아 벤팅 발생을 판단하는 이상징후의 근거로는 부족하다. 또한, 전압의 경우, 벤팅 이전과 벤팅 시기에 전압이 소실되어 전압변동을 확인할 수 있으나, 이는 원통형 배터리 내에 포함된 보호회로가 동작한 것으로 추정되며 파우치형의 전압변동도 확인이 필요하다.

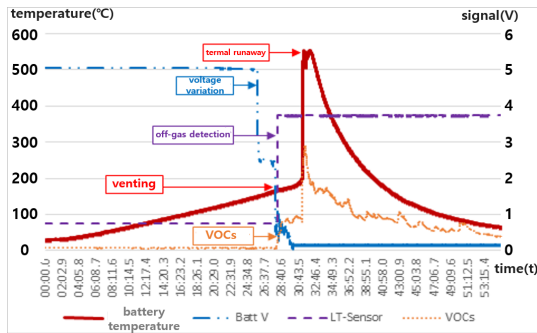


Fig. 6. Characteristics of direct signs of fire

또한, 화재 간접징후의 특성을 분석하기 위하여, 산소, 압력, LEL, 먼지에 대하여 센서 동작 특성을 나타내면 Fig. 7과 같다. 여기서, 산소는 벤팅시에 유의미한 변화가 없지만, 열폭주 시 값이 소폭 하락하다가 천천히 회복하는 형태를 나타내어, 주변 공기 중의 산소를 소모하는 것을 알 수 있으며, 먼지 역시 벤팅시에 유의미한 변화가 없지만 열폭주 시 값이 상승하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 압력과 LEL은 열폭주 이후까지 값이 변화하지 않는데, 이는 시험용 챔버가 개방형 구조인 것으로 추정된다. 즉, 산소와 먼지, 압력, LEL 센서 모두 벤팅 시 특별한 값의 변화는 없어, 이상징후 검출용으로 적절하지 않음을 알 수 있다.

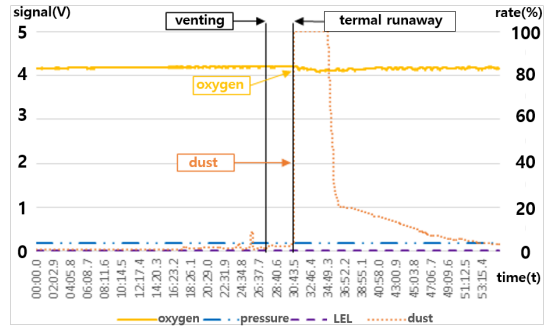


Fig. 7. Characteristics of indirect signs of fire

5.3 화재 발생단계 특성분석

상기의 화재 직접징후와 간접징후를 바탕으로, 화재발생단계 특성을 나타내면 Table 10과 같고, 시험 시작 시에 모든 센서에 알람이 발생하지 않아 감지장치에서 1.0 Vdc를 출력하여 정상상태임을 알 수 있다. 또한, Table 10(a)와 같이, 30초 후에 시험장치 내 케이블 터미에 접화가 시작되고, 그리고 7초 후에 공기흡입형 연기감지기에서만 알람이 발생하여, 비배터리 화재 발생단계로 판정된다. 그 이후, Table 10(b)와 같이, 배터리 가열장치를 동작시켜 배터리에 열적 스트레스를 가하고, 약 12분 후에 오프가스 검출 센서만 알람이 발생하여, 배터리 벤팅 발생단계임을 알 수 있다. 그리고 약 3분 후에, 배터리 열폭주가 발생하고, 10초 이내에 공기흡입형 연기감지기의 알람이 발생하면서 배터리 열폭주 발생단계임을 알 수 있다. 한편, 약 2분 후에 차동식 열감지기에 강제적인 열 자극에 의하여, 알람을 발생시켜 ESS 화재 발생 단계를 판정할 수 있다. 상기의 ESS 화재시험 결과에 따른 감지장치의 화재 단계별 특성은 Fig. 8과 같으며, 여기서 Fig. 8(a)는 비배터리 화재특성, Fig. 8(b)는 배터리 화재특성을 나타낸다.

Table 10. Fire test result of Li-ion battery in ESS

(a) non-battery fire

time (mm:ss)	voltage (Vdc)	stage	content
00:00	1.0	1	normal state
00:30	1.0	1	cable ignition
00:37	2.0	2	non-battery fire stage alarm
01:27	1.0	1	remove cable initialization smoke detector

(b) battery fire

time (mm:ss)	voltage (Vdc)	stage	content
01:27	1.0	1	heat battery
13:54	3.0	3	battery venting alarm
16:18	4.0	4	battery thermal runaway alarm
18:38	5.0	5	ESS fire stage alarm

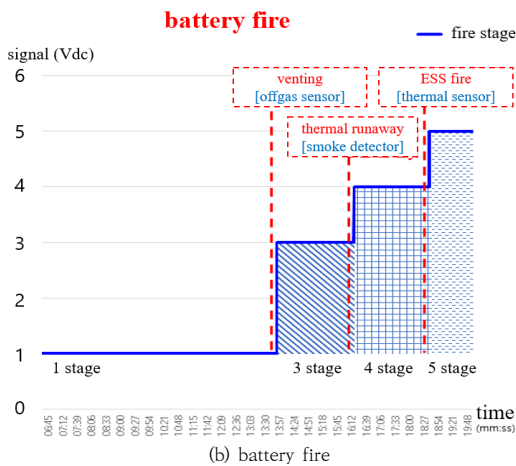
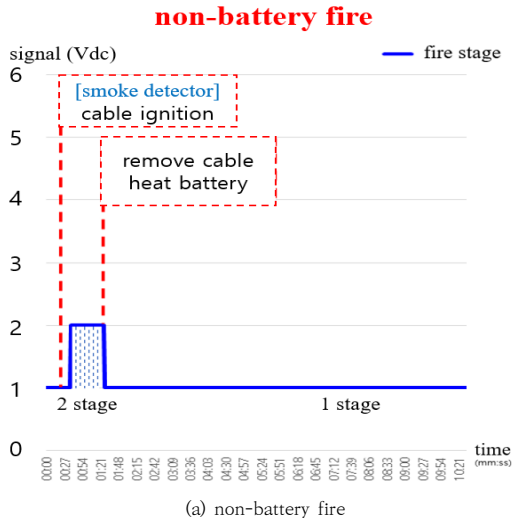


Fig. 8. Characteristics of ESS fire stage

6. 결론

ESS 화재사고에 적절하게 대응하기 위하여, 본 논문에서는 ESS용 리튬이온배터리의 화재 이상징후를 선정하고, 화재 발생단계 판단을 위한 ESS 화재감지 알고리

즘을 제안한다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 제시한 시험장치의 분석결과, 산소는 벤팅시에 유의미한 변화가 없지만, 열폭주 시 값이 소폭 하락하다가 천천히 회복하는 형태를 나타내어, 주변 공기 중의 산소를 소모하는 것을 알 수 있으며, 먼지 역시 벤팅시에 유의미한 변화가 없지만 열폭주 시 값이 상승하는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 압력과 LEL은 열폭주 이후까지 값이 변화하지 않는데, 이는 시험용 챔버가 개방형 구조인 것으로 추정된다. 즉, 산소와 먼지, 압력, LEL 센서 모두 벤팅 시 특별한 값의 변화는 없어, 이상징후 검출용으로 적절하지 않음을 알 수 있었다.
- (3) 배터리 화재 이상징후 특성시험을 수행한 결과, 오프가스 센서가 배터리 벤팅시 트리거 형태로 값을 출력함으로써 벤팅 발생을 확인하여 이상징후를 감지함을 알 수 있었다.
- (4) 화재 발생단계 특성시험을 수행한 결과, 제안한 알고리즘이 비배터리 화재 및 배터리 벤팅단계, 배터리 열폭주 단계, ESS 화재 발생단계를 구분함을 알 수 있어 본 논문의 유효성을 확인하였다.

References

- [1] "ESS Causes Investigation and Safety Reinforcement Measures Announcement", Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019.06.
<https://www.kats.go.kr/content.do?cmsid=240&cid=20839&mode=view>
- [2] Sung-Duck Cho, "A Study on Mechanism and Modeling of CMV in Sharing Energy Storage System", Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.24, no.4, pp. 616-625, 2023.04..
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.4.616>
- [3] Sung-Moon Choi, "A Study on Characteristics and Modeling of CMV by Grounding Methods of Transformer for ESS", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.22, no.4, pp. 587-593, 2023.04.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.4.587>
- [4] Eungsang Kim, "Standardization and technical standards for new renewable energy and ESS power converters," Fall Conference for Society A of KIEE(Korean Institute of Electrical Engineers), Journal of Power Electronics, pp. 31-35, April, 2017.

- [5] S. Y. Hwang, 'A Study on the Detection Algorithm of Off-gas to Prevent Thermal runaway of Li-ion Battery for ESS', the Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE), vol.71, no.12, pp.1,787-1,795, 2022.12
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2022.71.12.1787>
- [6] K. M. Park, J. H. Kim, J. Y. Park, S. B. Bang, "A Study on the Fire Risk of ESS through Fire Status and Field Investigation", FIRE SCIENCE AND ENGINEERING, vol.32, no.6, pp.91-99, 2018.12.
DOI: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2018.32.6.091>
- [7] H. J. Jang, T. S. Song, J. Y. Kim, S. J. Kim, T. H. Jang "Study on Analysis of Fire Factor and Development Direction of Standard/safety Requirement to Keep Safety for Energy Storage System (ESS)", Journal of Standards, Certification and Safety, vol.3, no.9, pp.25-49, 2019.9.
DOI: <https://doi.org/10.34139/JSCS.2019.9.3.25>
- [8] J. B. Jung, "Characteristics of External Short-Circuit in Li-ion Battery Considering Operation and Environment Factors", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 22, no. 8, pp.663-672, 2021.8.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.8.663>
- [9] Ben Gully, Henric Helgesen, John Erik, Dimitrios Kostopoulos, "Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression", DNV-GL, Norway, Rev 4, pp.16-18.
<https://www.dnv.com/Publications/technical-reference-for-li-ion-battery-explosion-risk-and-fire-suppression-165062>
- [10] S.Y.Hwang, S.M.Choi, S.Jian, H.S.Choi, D.S.Rho, "A Study on the Detection Algorithm of Off-gas to Prevent Thermal runaway of Li-ion Battery for ESS", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 71, no. 12, pp. 1787~1795, 2022
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2022.71.12.1787>
- [11] UL9540A, "Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems", UL, U.S., Third Edition, vol.6, no.2, pp.10-11, 2018.1
<https://www.ul.com/services/ul-9540a-test-method>

최형석(Hyoung-Seok Choi) [정회원]



- 1997년 8월 : 광운대학교 전기공학과 (공학사)
- 2020년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2023년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (박사수료)
- 2010년 3월 ~ 현재 : ㈜티팩토리 대표이사

<관심분야>

신재생에너지, 전기저장장치, 마이크로그리드

황소연(So-Yeon Hwang) [정회원]

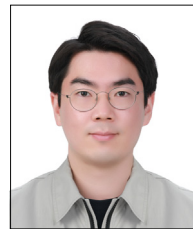


- 2023년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2024년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중
- 2018년 5월 ~ 현재 : ㈜티팩토리 기술연구소 연구소장

<관심분야>

신재생에너지, 전기저장장치, 제어관리시스템

김남현(Nam-Hyun Kim) [정회원]



- 2013년 2월 : 고려대학교 전자전기공학과 (공학사)
- 2017년 10월 ~ 현재 : 한국산업기술평원원 주임연구원 재직 중

<관심분야>

에너지저장장치, 재사용배터리, 신재생에너지

김현재(Hyun-Jae Kim) [정회원]



- 2012년 2월 : 동아대학교 산업공학과 (공학사)
- 2022년 9월 ~ 현재 : 한국산업기술평원원 주임연구원 재직 중

<관심분야>

전기자동차, 재사용배터리, 신재생에너지

김 지 명(Ji-Myung Kim)

[정회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

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 : 한국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전계통, 분산전원연계, 전력품질해석