

# 환경감시 데이터를 활용한 ESS 화재 규모 진단 알고리즘에 관한 연구

최형석<sup>\*,\*\*</sup>, 황소연<sup>\*,\*\*</sup>, 전진택<sup>\*\*</sup>, 김지명<sup>\*\*</sup>, 노대석<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>(주)티팩토리, <sup>\*\*</sup>한국기술교육대학교

e-mail:elroi91@tfactory.kr

## A Study on Fire Scale Diagnosis Algorithm in ESS Using Environmental Monitoring Data

Hyoung-Seok Choi<sup>\*,\*\*</sup>, So-Yeon Hwang<sup>\*,\*\*</sup>, Jin-Taek Jeon<sup>\*\*</sup>, Ji-Myung Kim<sup>\*\*</sup>, Dae-Seok Rho<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>TFactory Co. Ltd,

<sup>\*\*</sup>Dept. of Electric Engineering, Korea University of Technology and Education

### 요약

정부의 녹색성장 및 탄소 중립 정책에 따라, 대용량 ESS(energy storage system)의 보급이 급속히 확산되고 있지만, 2017년 8월부터 시작된 ESS의 화재 사고로 인하여 관련 업계가 큰 타격을 받고 있다. 또한, ESS 화재에 대한 정확한 상황과 규모를 판단하여 적절한 화재 대응과 진압이 필요한 상황이지만, ESS에 설치된 센서와 감시장치들은 화재를 조기에 감지하는 것에 초점이 맞춰져 있어, 발생한 화재의 규모나 위험성을 진단하는 역할을 수행하기 어려운 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 ESS 화재 발생 메커니즘을 통해 일반 화재와의 차이점을 도출하고, 열, 압력, 산소, 가스 등 화재 규모 진단에 유효한 환경 데이터를 정의한다. 또한, 환경 데이터에 가중치를 부여하고, 가중치의 연산을 통해 ESS에서 발생한 화재의 규모와 진단 내용을 제안한다. 여기서, 화재 진단 내용은 일반적인 비(非)배터리 화재부터 배터리가 개입한 화재, 폭발 가능성이 높은 큰 규모의 화재 등을 포함한다. 이를 기반으로 환경감시 데이터를 활용한 ESS 화재 규모 진단 알고리즘을 제시하고, ESS 화재 모의시험을 수행한 결과, 발생한 화재 종류와 상태에 따라 화재 규모를 진단할 수 있어, 제안한 알고리즘의 유효성을 알 수 있다.

## 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 화재 사고가 관련 산업계에 악영향을 끼치고 있다[1-3]. 에너지저장장치의 화재는 리튬이온전지의 열폭주(thermal runaway) 때문에 피해가 커지며, 열폭주가 연쇄적으로 발생하게 되면 일반적인 소화장치로 화재를 억제할 수 없는 것이 현실이다. 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 때문이며, 대규모 화재와 폭발 가능성을 이유로 ESS의 화재 진압에 적극적으로 대응하기 어려운 실정이다.

즉, ESS 화재에 대한 정확한 상황과 규모를 판단하여 적절한 화재 대응과 진압이 필요한 상황이지만, ESS에 설치된 센서와 감시장치들은 화재를 조기에 감지하는 것에 초점이 맞춰져 있어, 발생한 화재의 규모나 위험성을 진단하는 역할은 수

행하기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 ESS 화재 발생 메커니즘을 분석을 통해 일반 화재와의 차이점을 도출하고, 열, 압력, 산소, 가스 등 화재 규모 진단에 유효한 환경 데이터를 정의한다. 또한, 환경 데이터에 가중치를 부여하고, 가중치의 연산을 통해 ESS에서 발생한 화재의 규모와 진단 내용을 제안하는데, 여기서 화재 진단 내용은 일반적인 비(非)배터리 화재부터 배터리가 개입한 화재, 폭발 가능성이 높은 큰 규모의 화재 등을 포함한다. 이를 기반으로 환경감시 데이터를 활용한 ESS 화재 규모 진단 알고리즘을 제시하고, 알고리즘의 유효성을 검증할 수 있는 ESS 화재 모의시험을 수행하여, 화재 규모 진단 알고리즘의 유용성을 확인한다.

## 2. ESS 화재 발생 메커니즘

### 2.1 리튬이온배터리의 화재 발생 메커니즘

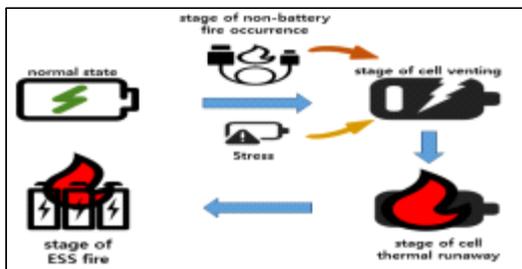
리튬이온배터리에 열적, 전기적 또는 기계적 충격이 가해지는 경우, 배터리의 내부온도가 상승하여 전해질이 끓어오르게 된다. 이때, 전해질이 기화되면 배터리 내부 압력이 증가하게 되고, 이것이 지속되면 배터리 표면이 개방되는 벤팅(venting) 현상이 발생하여 전해질 증기 및 분해가스가 외부로 배출되는

데, 이들을 통칭하여 오프가스로 정의된다[4]. 한편, 리튬이온 배터리에 스트레스가 지속되면, 배터리 내부 온도 증가로 분리막이 녹게 되고 결국 내부단락이 일어난다. 내부 단락이 발생하면 다량의 반응가스(연기)가 배출되고, 이후 고열에 의해 점화가 되어 화재가 발생하는데 이것을 열폭주라 한다. 또한, 리튬이온배터리의 열폭주는 내부 에너지가 모두 소진될 때까지 끊임없이 열과 산소를 만들어내므로, 일반적인 소화 장비로는 진압할 수 없으며, 배터리 근처에 농축되어 있는 가연성 가스는 큰 폭발을 일으킬 수 있다.

### 2.2 ESS의 화재 발생 메커니즘

상기에서 제시한 리튬이온배터리의 열폭주에 의한 화재 발생특성을 고려하여 ESS 화재 단계를 구분할 수 있다. 즉, 리튬이온배터리의 화재 발생단계는 그림 1과 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 단계로서, 과부하로 인한 케이블, 부스바 등이 화재와 장치의 결함이나 과열로 발생하는 화재이며, 이로 인해 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. 또한, 배터리 열폭주 단계는 리튬이온배터리의 벤팅 단계 이후 열폭주가 발생하는 단계이다. 여기서, 배터리의 열폭주는 인접 배터리로 열적 스트레스를 전파하여 연쇄적인 열폭주를 일으키기 때문에, 조기에 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.



[그림 1] ESS용 리튬이온배터리의 화재 발생단계

## 3. 환경감시 데이터를 활용한 ESS 화재 규모 진단 알고리즘

### 3.1 ESS 환경감시 데이터 선정

대부분의 ESS의 경우, 환경감시를 위한 온/습도 센서와 화재 감지를 위한 연기감지기 또는 화재감지기를 설치하여 운영하고 있으며, 개별 센서의 상태에 따라서 지정된 프로세스가 동작하게 되어있지만, 전체 센서의 상태를 복합적으로 연관지어 발생한 화재 규모를 진단하는 기술은 도입되지 않은 상태이다. 따라서, ESS에서 발생한 화재 규모를 진단하기 위하여 환경 데이터로 산소 농도와 압력, 오프가스, 화재 및 열을 선정하고 표 1과 같이 가중치를 설정한다. 여기서, 각 가중치의 합은 화재 규모의 지표로 활용되며, 고열의  $\alpha$ 는 큰 규모의 화재를 판단하는 지표로 사용한다.

[표 1] 환경감시 데이터 가중치

항목	저농도 산소	고압	오프가스	화재	고열
가중치	1	1	3	6	$\alpha$

### 3.2 ESS 화재 규모 정의

ESS는 리튬이온배터리의 열폭주를 비롯하여 배선, PCB 화재 등 비(非)배터리 화재의 발생 가능성이 존재한다. 이러한 화재 속성에 따라, 쉽게 대응이 가능한 화재와 폭발위험성이 있는 대규모 화재를 진단하여 대응할 필요가 있다. 따라서, 본 논문에서는 환경감시 데이터 가중치를 활용하여 표 2와 같이 화재 규모를 정의하는데, 여기서 화재 규모는 화재가 발생하기 전(A), 비배터리 화재 발생(B), 배터리 화재 발생(C)과 상세 상태로 구분한다.

[표 2] 환경감시 데이터 가중치

가중치 합	화재 규모	화재 규모 진단 내용
1~2	A1	시스템과 인명에 피해를 주는 사고가 발생할 가능성 있음.
3	A2	배터리의 열폭주로 화재가 발생할 가능성 있음.
4~5	A3	가연성 가스 농축에 의한 화재 폭발 가능성 있음.
6	B1	비(非)배터리 화재가 발생함.
7~8	B2	큰 규모의 화재(1)로 이어질 가능성 있음.
6~8+ $\alpha$	B3	큰 규모의 화재가 발생하였으나 배터리가 화재에 개입하지는 않았음.
9	C1	배터리가 개입한 화재가 발생함.
10~11	C2	배터리가 개입한 화재로, 큰 규모의 화재 폭발 가능성 있음.
9~11+ $\alpha$	C3	배터리가 개입한 화재로, 큰 규모의 화재가 발생한 상태

### 3.3 ESS 화재 규모 진단 알고리즘

상기에서 제시한 ESS 화재 규모 진단 알고리즘을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] ESS 설치공간에 환경감시 데이터를 수집할 수 있는 산소, 압력, 오프가스, 화재, 열 감지 센서를 설치한다.

[Step 2] 각 센서의 경보 상태를 확인하고, 표 3을 바탕으로 경보 상태에 따라 A<sub>0</sub>~A<sub>4</sub>에 값을 입력한다.

[표 3] 경보 상태 입력 조건

항목	경보 상태
A0	경보 없음=0, 저농도산소경보=1
A1	경보 없음=0, 고압경보=1
A2	경보 없음=0, 오프가스경보=3
A3	경보 없음=0, 화재경보=6
A4	경보 없음=0, 고열경보=a

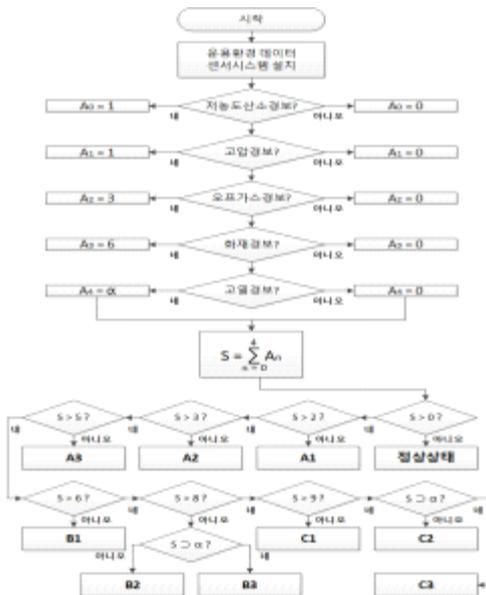
[Step 3] A<sub>0</sub>~A<sub>4</sub>의 합을 S로 연산한다.

[Step 4] S의 값에 따라 표 4를 바탕으로 위험도를 결정한다.

[표 4] S값에 따른 화재 위험도 조건

S값	화재 위험도
0	정상상태
1~2	화재 규모 A1
3	화재 위험도 A2
4~5	화재 위험도 A3
6	화재 위험도 B1
7~8	화재 위험도 B2
7~8+a	화재 위험도 B3
9	화재 위험도 C1
10~11	화재 위험도 C2
10~11+a	화재 위험도 C3

따라서, 상기의 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 그림 2와 같다.



[그림 2] ESS 화재 규모 진단 알고리즘

## 4. 시험 결과 및 분석

### 4.1 시험 조건

ESS 화재 규모 진단 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여, ESS 화재 모의 시험장치를 구축하여 시험한다. 전체 시험장치는 센서부와 계측부로 이루어지는데, 센서부는 ESS 환경데이터인 산소, 압력, 오프가스, 화재, 열을 검출할 수 있는 센서로 구성되며, 이는 표 5의 내용과 같다. 단, 시험 조건에서 압력을 큰 폭으로 변동시킬 방안이 마땅치 않아, 트리거 신호를 사용하여 고압 알람만을 발생시키도록 구성한다.

[표 5] ESS 화재 모의시험 센서부 및 계측부 구성

항목	장비	제조사	규격
산소	Oxy-sen	AOI	산소 농도 측정
압력	CP116	Entron	트리거 신호로 대체
오프가스	Li-ion Tamer	Nexceris	offgas vapor
화재	VESDA	Xtralis	화재 연기 검출
열	열감지기	리디스테크	차동식
PLC	PLC-S CM3	CIMON	DI/AI/AO/통신
DAQ	GL820	Graphtec	20채널 Logger

각 센서의 출력값은 전압신호 및 통신 데이터로 출력되어 계측부 장비인 DAQ와 PLC로 연결된다. 센서는 저장된 임계치보다 측정값이 높거나 낮으면 경보알람을 발생시키며, PLC는 센서의 출력 값을 모두 저장한다. 여기서, PLC에는 ESS 화재 규모 진단 알고리즘이 적용된 상태로, 센서들의 경보 상태를 종합하여 화재 규모를 전압(analog output) 형태로 출력하는데, 표 6과 같이 정상상태부터 B3 규모까지 총 10개 단계를 DC 0V부터 9V까지 출력한다. 또한, DAQ는 PLC의 출력을 입력받아 실시간으로 로그 저장하고, 시험 종료 후 그래프로 시각화한다.

[표 6] PLC 화재 규모 진단 출력 값

규모	정상	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
출력	0V	1V	2V	3V	4V	5V	6V	7V	8V	9V

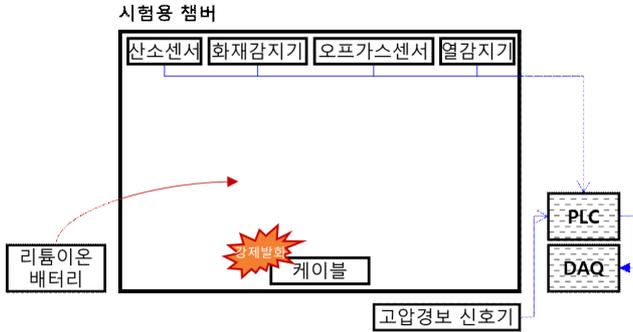
한편, 시험은 표 7과 같이, 먼저 비배터리 화재인 케이블 화재를 발생시키고, 고압경보를 트리거 신호로 PLC에 전달한다. 이후 18650 리튬이온배터리를 화재가 발생한 챔버 내에 투입하여 강제 열폭주를 일으키고, 이후 화염이 커지게 되면 열감지기가 동작하는 순서로 진행한다. 또한, 전체 시험장치 구성은 그림 3과 같다.

[표 7] ESS 화재 모의시험 조건

시험순서	세부 이벤트	시험방법
1	케이블 화재	챔버 내 케이블을 두고 강제 발화하여 화재 발생
2	고압 경보	PLC로 고압경보 신호 전달
3	배터리 화재	챔버 내 18650 배터리 투입하여 강제 열폭주 발생
4	고열 경보	배터리 열폭주 이후 챔버 내부에 열기가 강하게 가득차며 챔버 상단에 위치한 열감지기 동작

## 5. 결론

본 논문에서는 ESS에서 발생한 화재 규모를 진단하기 위하여, 일반적으로 ESS에 설치되는 화재감지기, 열감지기 뿐 아니라, 산소 센서, 압력 센서 등의 환경 센서 및 오프가스 검출 센서 데이터에 가중치를 두고 화재 규모를 정의하였다. 이에 기반하여 화재 규모 진단 알고리즘을 제안하고, 알고리즘의 유용성을 검증하기 위한 시험 및 특성분석을 수행하였다. 그 결과, 시험 간 발생한 화재의 종류와 특성에 적합하게 화재 규모가 출력되어, 제안한 화재 규모 진단 알고리즘의 유용성을 알 수 있었다. 다만, 실제 ESS에서 시험을 수행하지 않고 모의 환경인 챔버에서 시험을 수행한 만큼, 결과 순서가 다르게 나타나는 등 변수가 발생하기도 하였다. 따라서, 향후에는 실제 ESS와 유사한 환경에서 제안한 알고리즘이 적용된 시험장치를 구성하고 실 화재 모의시험을 수행하여, 화재 규모 진단 특성을 분석하는 연구를 수행하고자 한다.



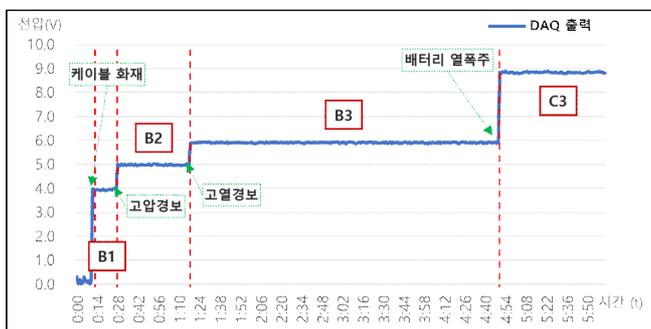
[그림 3] ESS 화재 모의시험 구성

### 4.2 화재 규모 진단 특성

상기의 시험조건을 바탕으로, ESS 환경감시 데이터를 활용한 화재 규모 진단 특성분석을 수행한 결과는 표 8과 그림 4와 같다. 먼저, 시험 시작 후 5초에 토치를 사용하여 챔버 내 케이블을 강제로 발화시켰고, 11초에 DAQ에서 B1 화재 규모에 해당하는 4V가 출력되었다. 이후 26초에 고압경보 트리거 신호를 PLC에 전달하였고, 2초 뒤 B2 화재 규모에 해당하는 5V가 출력되었다. 또한, 42초에 챔버 내로 리튬이온배터리를 투입하였는데, 1분 15초에 열감지기에서 고열 정보가 발생하며 B3 화재 규모인 6V가 출력되었다. 리튬이온배터리의 열폭주 시 열감지기가 동작할 것으로 예상했지만, 챔버 크기가 작고 내부에서 계속 화재가 이어지고 있어 열감지기가 동작한 것으로 추측된다. 한편, 리튬이온배터리 투입 약 3분 후인 4분 47초에 리튬이온배터리에서 열폭주가 발생하였고, 3초 후 열폭주 정보가 발생하며 C3 화재 규모가 출력되었다.

[표 8] ESS 화재 모의시험 조건

시간	이벤트	출력된 화재 규모
00:05	케이블 화재 발생	-
00:11	비배터리 화재 발생 판단	B1 (4V)
00:26	고압경보 신호 전달	-
00:28	비배터리화재+고압경보 판단	B2 (5V)
00:42	리튬이온배터리 투입	-
01:15	열감지기 정보 발생	-
01:18	비배터리화재+고압경보+고열정보 판단	B3 (6V)
04:47	리튬이온배터리 열폭주 발생	-
04:50	열폭주+고압경보+고열정보 판단	C3 (9V)



[그림 4] ESS 화재 규모 진단 특성분석 시험결과

### 감사의 글

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

### 참고문헌

- [1] “ESS Causes Investigation and Safety Reinforcement Measures Announcement”, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019.06.
- [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.
- [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.
- [4] 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