

# ESS 설치공간의 환경 데이터를 활용한 화재 진단 방안에 관한 연구

최형석<sup>\*,\*\*</sup>, 황소연<sup>\*,\*\*</sup>, 김세진<sup>\*\*</sup>, 호삼 실라<sup>\*\*</sup>, 노대석<sup>\*\*</sup>

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

e-mail:elroi91@tfactory.kr

## A Study on the Fire Diagnosis Method Using Environmental Data in ESS Installation Area

Hyoung-Seok Choi<sup>\*,\*\*</sup>, So-Yeon Hwang<sup>\*,\*\*</sup>, Se-Jin Kim<sup>\*\*</sup>, Hossam S. Mohamed<sup>\*\*</sup>,

Dae-Seok Rho<sup>\*\*</sup>

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

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

### 요약

정부의 녹색성장 및 탄소중립 정책에 따라 대용량 에너지저장장치(ESS, energy storage system)의 보급이 급속히 확대되고 있으나, 2017년 8월 이후 현재까지 총 58건의 ESS 화재사고가 발생하여 산업 전반에 심각한 피해가 보고되고 있다. 하지만, 기존 ESS에 설치된 센서와 감시장치는 주로 화재 조기 감지에 초점이 맞추어져 있어, 발생한 화재의 위험도와 규모를 정확하게 진단하기 어려운 실정이다. 특히, ESS에 사용되는 리튬이온배터리 화재는 일반 화재와 구별되는 열폭주 특성으로 인하여, 급격히 확산되고 폭발로 이어질 가능성을 가지므로, 화재 특성과 운용환경 데이터를 바탕으로 정확한 진단 기법이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 화재 발생 메커니즘을 제시하고, 온도, 습도, 산소, 가스, 압력, 먼지, 분진, 연기, 고열 등 주요 환경 데이터를 바탕으로, 화재 위험도와 규모를 진단하는 알고리즘을 제안한다. 여기서, 진단 알고리즘은 환경 데이터에 대하여 가중치를 부여하고, 상호 연산을 통해 ESS에서 발생한 화재의 위험도와 규모를 구분하며, 이를 바탕으로 센서 모듈과 제어 장치로 구성된 ESS 화재 진단 장치를 구현한다. 상기에서 제안한 알고리즘과 구현한 시험장치를 바탕으로 ESS의 화재 진단 특성을 분석한 결과, 발생한 화재의 위험도와 규모를 효과적으로 판단할 수 있어, 본 논문에서 제안한 알고리즘의 유효성을 확인할 수 있다.

## 1. 서론

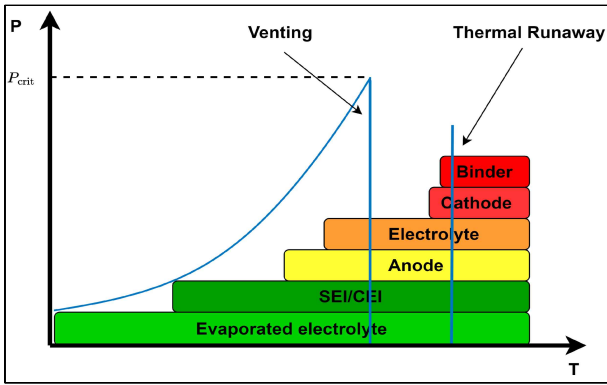
2015년 유엔기후 변화회의에서 채택된 '파리 협정' 이후, 국내에서도 탄소중립 정책을 실시함에 따라 신재생에너지원 및 에너지저장장치(ESS, Energy Storage System)의 설치 사례가 증가하고 있지만, 2017년부터 시작된 ESS의 화재 사고가 관련 산업계에 악영향을 끼치고 있다[1-3]. ESS의 화재는 리튬이온전지의 열폭주(thermal runaway) 때문에 피해가 커지며, 열폭주가 연쇄적으로 발생하게 되면 일반적인 소화장치로 화재를 억제할 수 없는 것이 현실이다. 즉, ESS 화재에 대한 정확한 상황과 규모를 판단하여 적절한 화재 대응과 진압이 필요한 상황이지만, ESS에 설치된 센서와 감시장치들은 화재를 조기에 감지하는 것에 초점이 맞춰져 있어, 발생한 화재의 위험도나 규모를 진단하는 역할은 수행하기 어렵다. 또한, ESS에는 대부분 온도, 습도를 비롯한 환경 요인을 모니터링 할 수단이 설치되어 있지만, 리튬이온배터리의 화재 특성과 연관 지어 화재 위험을 판단하지는 못하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS 화재 발생 메커니즘을 분석하여 일반 화재

와의 차이점을 도출하고, 열, 압력, 산소, 가스, 습도, 먼지, 분진, 연기, 고열 등 화재 위험도와 규모 진단에 유효한 환경 데이터를 정의한다. 또한, 환경 데이터에 가중치를 부여하고 연산을 통해 ESS에서 발생한 화재의 위험도와 규모를 진단하는 알고리즘을 제안하며, 화재 모의시험을 통해 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 그림 1과 같이 배터리 내부 압력이 증가하며, 압력이 일정 수준을 초과하면 배터리 표면이 개방되는 벤팅(venting) 현상이 발생한다. 이 때, 전해질 증기와 분해가스가 외부로 배출되는데, 이를 통칭하여 오프가스(off-gas)라 한다. 오프가스는 다량의 가연성 성분을 포함하고 있어 주변 온도 상승 시 폭발 위험을 크게 높이는 요인으로 작용한다.



[그림 1] 리튬이온배터리 내부 압력 상승에 따른 열폭주 과정

한편, 리튬이온배터리에 스트레스가 지속되면 내부 온도가 더욱 상승하여 분리막이 손상되고 결국 내부 단락이 발생한다. 내부 단락은 전해질의 급격한 분해와 압력 상승을 동반하며, 이 과정에서 다량의 반응가스가 방출된다. 축적된 가스는 짧은 시간 내에 점화되며, 이후 고열에 의해 화재가 발생하는데 이러한 현상을 열폭주라 한다. 열폭주는 단일 셀에서 발생하더라도 인접한 셀로 열적 스트레스가 빠르게 전달되어 연쇄적인 반응을 유발한다. 또한, 리튬이온배터리의 열폭주는 내부 에너지가 모두 소진될 때까지 열과 산소를 계속 생성하므로 일반적인 소화 장비로는 진압이 어렵다. 이러한 특성 때문에 리튬이온배터리의 열폭주는 단순한 화재 현상을 넘어 복합적인 폭발 재해로 확대될 수 있으며, 초기에 조기 감지가 무엇보다 중요하다.

## 2.2 ESS의 화재 발생 메커니즘

상기 2.1의 리튬이온배터리 열폭주 특성을 바탕으로, ESS 화재는 정상동작, 비(非)배터리 화재, 배터리 벤팅, 배터리 열폭주, ESS 화재 확산의 5가지 상태로 구분한다. 먼저, 정상동작은 ESS 구성 장치가 고장 없이 운전되는 상태로, BMS와 PMS 등을 통해 상태가 모니터링 및 제어된다. 비배터리 화재는 케이블·부스바 과열이나 장치 결함 등으로 발생한 국부 화원이 배터리에 열적 스트레스를 가하는 상태이다. 배터리 벤팅은 내부 압력 상승으로 오프가스가 방출되는 초기 상태이다. 여기서, 오프가스를 조기에 검출하고 시스템 비상정지·냉각·강제배기 등의 조치를 통해 열폭주 발생을 억제할 수 있다. 배터리 열폭주는 벤팅 이후 열 생성 반응이 통제되지 않으며 인접 셀 및 모듈로 열 전파가 이루어지는 상태이다. 이때, 불활성 가스 소화 시스템이 적용되어 산소 농도를 낮추고 배터리를 냉각시킴으로써, 열폭주가 인접 셀로 확산되는 것을 억제하거나 지연시켜 피해를 최소화할 수 있다. 마지막으로 ESS 화재 확산은 열폭주가 모듈·랙 단위로 확산되는 상태로 화재 폭발 위험이 높다. 열감지기와 연동된 고압 워터미스트 시스템이 작동하여 배터리 룸 내 가연성 가스를 냉각·희석시켜 폭발을 방지하고, ESS 전체 화재로의 확산을 차단해야 한다.

## 3. ESS 설치공간의 환경 데이터를 활용한 화재 진단 방안

### 3.1 화재 발생 위험도 진단 방안

ESS 화재 발생 위험도를 판단하기 위하여, ESS에 설치된 각종 센서에서 취득한 데이터, 즉 환경 데이터에 기반한 화재 위험도 파라미터를 제안한다. 먼저, 온도가 정상범위에서 벗어나 상승하거나 먼지로 인해 절연상태가 나빠지면, 배터리와 시스템에 스트레스를 전달할 수 있다. 또한, 낮은 습도는 정전기 및 아크로 화재 가능성을 만들 수 있으며, 높은 습도는 습기로 인한 PCB 오동작, 절연과피 등을 야기할 수 있다. 한편, 높은 습도에서 낮은 온도가 되면 급격한 결로 발생으로 절연과피의 가능성이 증대되며, 높은 습도에서 다량의 먼지는 수분과 결합해 절연을 파괴할 수 있다. 배터리에서 발생한 오프가스는 열폭주의 확실한 이상징후이기 때문에 높은 위험도를 가지며, 가연성 가스인 오프가스가 농축된 상태에서 건조나 고온으로 인한 아크나 화재를 만나게 되면 화재 폭발이 일어날 가능성이 있다. 각 파라미터가 임계 조건을 초과하면 해당 상태를 이상으로 판정하고, 이에 대응하는 가중치를 표 1과 같이 부여한다.

[표 1] ESS 화재 위험도 진단을 위한 운용환경 데이터 가중치

항목	고온	저온	건조	분진	다습	오프가스
가중치	1	1	1	1	5	$\alpha$

ESS는 리튬이온배터리의 열폭주를 비롯하여 배선, PCB 화재 등 비(非)배터리 화재의 발생 가능성도 존재한다. 이러한 화재의 발생 가능성을 ESS 화재 발생 위험도라 명명하고, 화재 발생 위험도에 따라 H1, H2, H3으로 정의한다. 화재 발생 위험도 H1은 배터리를 비롯한 시스템에 스트레스를 유발할 수 있으며, 운용환경 요인이 직접적으로 화재에 관여하지 않는 상태이다. 위험도 H2는 ESS 화재 발생 가능성이 생긴 상태이며, 위험도 H3은 리튬이온배터리 열폭주의 가능성이 높은 상태로, 배터리의 열폭주는 대규모 ESS 화재로 이어질 가능성이 높다. 또한, 표 1의 파라미터의 가중치 합을 R값으로 정의하고, R값이 속하는 구간에 따라 화재 위험도를 판정한다.

[표 2] ESS 화재 발생 위험도 정의

화재발생위험도 ( $f_R$ )	운용환경 요인에 의한 화재 가능성	가중치합(R)
H1	시스템에 스트레스를 유발할 수 있음	1~4
H2	ESS 내 화재 발생 가능성 있음	5~9
H3	ESS 내 열폭주 가능성 높음	$+ \alpha$

### 3.2 화재 규모 진단 방안

ESS의 화재 규모를 정량적으로 진단하기 위해서 산소 농도와 압력, 오프가스, 연기, 고열의 다섯 가지 인자를 핵심 파라미터로 선정하고 표 3과 같이 가중치를 부여한다. 산소 농도와 압력은 화재의 진행을 간접적으로 반영하는 지표이므로 낮은 수준의 가중치를 부여하였으며, 오프가스는 열폭주의 직접적 전조이므로 중간 수준의 가중치를 적용한다. 연기는 실제 화재 상태를 의미하므로 높은 가중치를 부여하였으며, 고열은 ESS 설치 공간에서 화재가 확산되고 있음을 설명하는 지표이므로 특수 계수  $\beta$ 를 부여하여 대규모 화재 판단에 큰 변수로 반영하였다.

[표 3] 화재 규모 진단을 위한 운용환경 데이터 가중치

항목	저농도 산소	고압	오프가스	연기	고열
가중치	1	1	3	6	$\beta$

ESS의 화재는 발생 위험성을 진단할 뿐만 아니라, 실제로 발생한 화재가 어느 정도의 규모로 전개되고 있는지를 판단하는 것이 중요하다. 표 4와 같이, 규모 N은 비(非)배터리 화재가 명확하게 발생한 상태로 정의하며, 예를 들어 케이블이나 전력변환장치 내부에서 화재가 발생한 경우가 이에 해당한다. N1은 단일 장치에서 비배터리 화재가 발생한 상태, N2는 화재가 확대되어 인접 시스템에 피해를 줄 가능성이 높은 상태, N3는 비배터리 화재가 큰 규모로 발전하였으나 배터리 자체가 개입하지 않은 상태를 의미한다. 규모 I는 배터리가 직접 개입한 화재로 정의되며, 이는 열폭주가 발생하여 ESS 전체 화재로 확대될 가능성이 높은 상태이다. I1은 배터리 화재가 시작된 상태, I2는 배터리 화재가 확대되어 폭발 가능성이 높은 상태, I3는 대규모의 배터리 화재가 전개되어 ESS 전체를 위협하는 상태로 정의한다. 또한, 표 3의 파라미터의 가중치 합을 S값으로 정의하고, S값이 속하는 구간에 따라 화재 규모를 판정한다.

[표 4] ESS 화재 규모 정의

화재규모 ( $f_s$ )	상태	정의	가중치합(S)
화재미발생			0~5
규모 N (비배터리 화재)	N1	비(非)배터리 화재 발생	6
	N2	비배터리 화재가 확대되어 큰 규모의 화재로 이어질 수 있는 상태	7~8
	N3	큰 규모의 화재가 발생하였으나, 배터리 개입은 없는 상태	7~8+ $\beta$
규모 I (배터리 화재)	I1	배터리 열폭주 발생	9
	I2	배터리 열폭주가 확산되어 큰 규모의 화재 폭발 가능성 존재	10~11
	I3	큰 규모의 ESS 화재가 발생한 상태	10~11+ $\beta$

### 3.3 ESS 화재 진단 방안

ESS 설치공간의 운용환경 데이터를 활용한 화재 진단을 위해서는 먼저 화재 발생 유무를 확인하는데, 화재 미발생 시 화재 위험도를 진단하고, 화재 발생 시 화재 규모를 진단하여 최종 화재 상태를 결정한다. 화재는 연기 감지기의 동작 상태  $F(t)$ 로 발생 여부를 판단하며, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(t) = \begin{cases} 0, & \text{연기감지기 미동작시} \\ 1, & \text{연기감지기 동작시} \end{cases} \quad (1)$$

ESS 화재 위험도 점수  $R(t)$ 는 식 (2)과 같이 나타낸다. 여기서, 위험도 운용환경 데이터가 표 1의 조건을 충족하는 경우 지시함수  $r_k(t) = 1$ , 그렇지 않은 경우  $r_k(t) = 0$ 으로 정의하며, 각 파라미터별 가중치  $w_k$ 는 가중치 표를 따른다. 또한, 오프가스 조건이 발생하는 경우 특수 계수  $\alpha$ 를 적용한다.

$$R(t) = \sum_{k \in \text{온도, 습도, 먼지}} w_k r_k(t) + \alpha \cdot 1_{\text{오프가스}} \quad (2)$$

산정된 위험도 점수  $R(t)$ 는 표 2의 구간별 매핑 함수  $f_R$ 을 통해 최종 위험도  $D_R(t)$ 로 확정되며, 이는 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$D_R(t) = f_R(R(t)) \quad (3)$$

다음으로, 규모 운용환경 데이터가 표3의 조건을 충족하는 경우 지시함수  $s_m(t) = 1$ , 그렇지 않을 경우  $s_m(t) = 0$ 으로 정의하고, 각 파라미터별 가중치  $v_m$ 는 가중치 표에 따른다. 또한, 고열 조건이 발생하는 경우 특수 계수  $\beta$ 를 적용한다. 이에 따라 화재 규모 점수  $S(t)$ 는 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$S(t) = \sum_{m \in \text{산소, 압력, 오프가스, 연기}} v_m s_m(t) + \beta \cdot 1_{\text{고열}} \quad (4)$$

산정된 화재 규모 점수  $S(t)$ 는 표 4의 구간별 매핑 함수  $f_S$ 를 통해 최종 화재 규모  $D_S(t)$ 로 확정되며, 이는 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$D_S(t) = f_S(S(t)) \quad (5)$$

따라서, 연기 감지 여부를 나타내는  $F(t)$ 와 위험도  $D_R(t)$ , 규모  $D_S(t)$ 를 종합하면, 최종 화재 상태  $D(t)$ 는 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$D(t) = \begin{cases} D_R(t), & F(t) = 0 \\ D_S(t), & F(t) = 1 \end{cases} \quad (6)$$

### 4. 시험 결과 및 분석

ESS 화재 진단 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해, 모의 시험장치를 구축하고 특성분석 시험을 수행한다. 시험은 ESS 설치공간 간의 환경 데이터에 기반하여, 각 파라미터별로 임계 조건을 모의 발생시켜 ESS 화재 위험 상황과 화재 발생 상황을 구현하고, 알고리즘이 이를 정확히 진단하여 상태별로 진단하는지를 확인한다.

[표 5] ESS 설치공간의 화재 진단 알고리즘 출력 신호

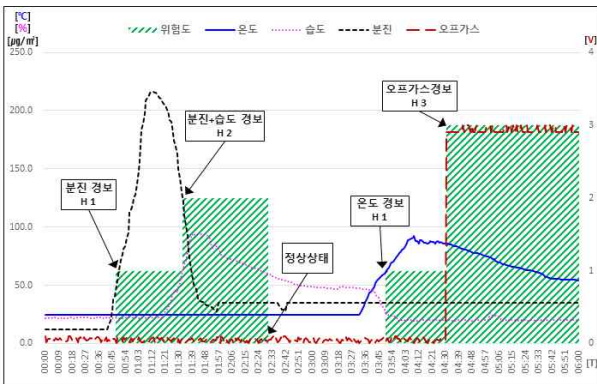
시험구분	목표 상황	시험 방법
화재 위험도 진단	분진 발생	청소기 배출 기체 활용
	습도 제어 고장	가습기를 통해 다습환경 구성
	정상상태	송풍기를 통해 정상상태 구성
	온도 제어 고장	열풍기를 통해 고온환경 구성
	벤딩 발생	DEC 전해질 시료 분사
화재 규모 진단	케이블 화재	케이블 터미를 강제로 발화
	고압 경고	압력 신호 제어 장치를 통해 경고 발생
	고열 경고	고열 경고 발생
	배터리 화재	열 확산으로 리튬배터리 열폭주 발생

모의 시험장치는 ESS 설치공간의 화재 진단 알고리즘을 기반으로 운영되며, 화재 진단 결과를 표 6과 같이 전압 신호로 출력한다.

[표 6] ESS 설치공간의 화재 진단 알고리즘 출력 신호

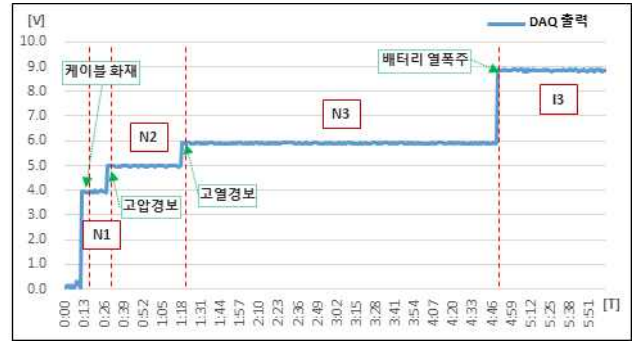
상태	의미	출력 전압
정상 상태	정상 운용 상태	0 Vdc
H1	시스템 스트레스 발생 가능성	1.0 Vdc
H2	ESS 화재 발생 가능성 있음	2.0 Vdc
H3	ESS 배터리 열폭주 가능성 있음	3.0 Vdc
N1	비배터리 화재 발생	4.0 Vdc
N2	비배터리 화재 확산	5.0 Vdc
N3	큰 규모의 비배터리 화재 발생	6.0 Vdc
I1	배터리 열폭주 발생	7.0 Vdc
I2	배터리 열폭주 확산	8.0 Vdc
I3	큰 규모의 ESS 화재 발생	9.0 Vdc

상기의 시험조건을 바탕으로, ESS 환경 데이터를 통한 화재 위험진단 특성분석 시험을 수행한 결과는 그림 2의 그래프와 같다. 시험장치 내부 환경이 분진 → 습도 → 정상 → 고온 → 벤딩으로 변화함에 따라, 알고리즘이 이를 진단하여 위험도에 해당하는 전압을 정확하게 출력하는 것을 알 수 있다.



[그림 2] ESS 화재 발생 위험도 진단 특성

또한, 화재 규모 진단 특성분석을 수행한 결과는 그림 3과 같다. 케이블화재 → 열 확산 → 배터리 열폭주로 화재가 이어지는 동안 화재 종류와 규모를 정확히 진단하여 출력함을 알 수 있다.



[그림 3] ESS 화재 규모 진단 특성

### 5. 결론

본 논문에서는 ESS의 화재 위험도와 화재 규모를 정확하게 진단하기 위하여, 먼저 화재 위험도와 화재 규모를 정의하고, 이를 진단하기 위한 ESS 설치공간의 환경 데이터를 선정하였다. 여기서, 환경 데이터는 일반적으로 측정되는 온도, 습도와 더불어 먼지, 산소 농도, 오프가스, 압력과 연기, 고열 등의 파라미터로 정의하며, 각 데이터에 가중치를 부여한 뒤 이를 합산하여 화재를 진단하는 알고리즘을 제안하였다. 이후, 모의 시험장치를 통한 특성 분석 시험 결과, 화재 위험도와 화재 규모를 정상적으로 결과를 출력함으로써, 제안한 알고리즘이 ESS 화재 진단에 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(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.