

# ESS 화재 확산 방지를 위한 불활성기체 분사제어 알고리즘에 관한 연구

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

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

e-mail: conishwang@gmail.com

## A Study on the Inert Gas Injection Control Algorithm for Preventing Cascading ESS Fires

So-Yeon Hwang<sup>\*,\*\*</sup>, Hyung-Seok Choi<sup>\*,\*\*</sup>, Se-Jin Kim<sup>\*</sup>,

Jin-Taek Jeon<sup>\*</sup>, Dae-Seok Rho<sup>\*</sup>

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

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

### 요약

2015년 유엔기후변화 회의에서 채택된 파리협정 이후, 전 세계적으로 탄소배출 저감을 위한 신재생에너지 보급이 확대되고 있지만, ESS(energy storage system), 전기자동차, 데이터센터 및 배터리 제조공장에서 화재가 지속적으로 발생하고 있어, 리튬이온배터리의 화재 안전성에 대한 관심이 급격히 증가하고 있다. 또한, 리튬이온배터리 단일 셀에서 열폭주가 발생하면, 인접 셀에 열적 충격을 가해 대형 화재로 이어질 수 있어, 화재 확산을 방지하기 위한 대응 방안이 요구되는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 화재 확산 방지에 효과적인 대응 방안 중 하나인 불활성기체의 분사제어 알고리즘을 제안하고, 이를 바탕으로 감지부, 제어부, 배터리부 등으로 구성된 리튬이온배터리 화재 시험장치를 구현한다. 상기에서 제안한 알고리즘과 구현한 시험장치를 바탕으로 불활성기체의 분사제어에 의한 열폭주 특성을 분석한 결과, 리튬이온배터리 셀에서 열폭주가 발생하는 경우, 불활성기체에 의하여 인접 셀로 화재가 확산되지 않으므로, 본 논문에서 제안한 알고리즘이 ESS 화재 확산 방지에 효과적임을 알 수 있다.

## 1. 서론

2015년 유엔기후변화 회의에서 채택된 파리 협정 이후, 우리나라는 재생에너지 3020 이행계획을 수립하여 재생에너지 비중 증가를 위해 힘쓰고 있지만, 리튬이온배터리를 사용한 ESS(energy storage system)와 전기자동차에서 지속적으로 화재가 발생하고 있으며, 리튬이온배터리의 화재와 안전에 관한 관심이 크게 증가하고 있다[1]. 리튬이온배터리의 화재는 열폭주(thermal runaway)라 하는데, 이는 일반 화재와는 다른 발생 메커니즘을 가지고 있어 기존의 소화 방식으로는 진압이 어렵다. 특히, 리튬이온배터리는 셀 1개의 열폭주가 인접 셀에 열적 충격을 가해 화재가 전파되는 특성이 있어, 열폭주 발생 특성을 고려한 화재 대응 기술이 필요한 실정이다. 한편, 해외 리튬이온배터리 화재시험 보고서에 따르면 불활성기체를 활용해 산소농도를 제어하면 리튬이온배터리의 화재가 전파되는 것을 방지할 수 있다고 보고된 바 있다[2]. 따라서, 본 논문에서는 리튬이온배터리의 화재 특성과 불활성기체의 소화특성을 분석하고, 열폭주 확산을 방지하기 위한 불활성기체를 선정한다. 또한, 오프가스 검출 센서를 활용한 불활성기체 분사제어 방안을 제안하고, 이를 검증

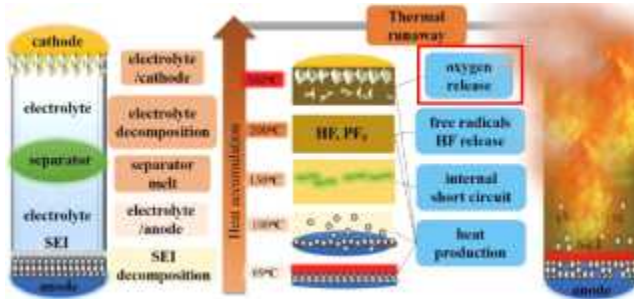
하기 위하여 4개 이상의 리튬이온배터리 셀로 구성된 시험 시료와 배터리 화재 시험장치를 구현하여 열폭주 확산 방지 시험을 수행한다. 시험 결과, 불활성기체 분사에 의해 산소농도가 제어된 챔버 내에서 리튬이온배터리 단일 셀의 열폭주 발생에도 불구하고 인접 셀로 열폭주가 확산되지 않아, 제안한 화재 확산 방지 알고리즘의 유용성을 확인할 수 있다.

## 2. ESS 화재 확산 메커니즘

### 2.1 리튬이온배터리 열폭주 발생 메커니즘

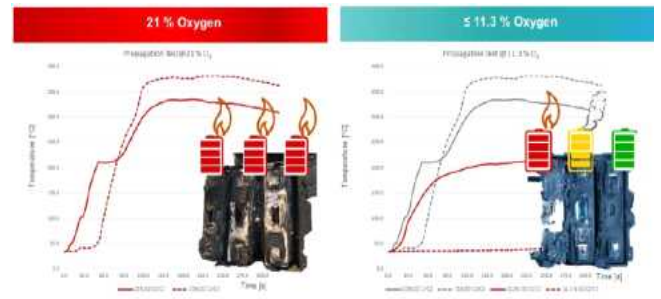
일반적으로 ESS는 리튬이온배터리를 활용하는데, 여기서 리튬이온배터리는 열적, 전기적 또는 기계적 충격이 가해지는 경우, 배터리 내부 온도가 상승하여 전해질이 끓어오르게 된다. 이때 전해질이 기화되면 배터리 내부 압력이 증가하고, 일정 압력 이상이 되면 배터리 표면이 개방되는 벤팅(venting) 현상이 발생하여 전해질 증기와 분해가스가 외부로 배출되는데, 이를 통칭하여 오프가스(off-gas)라 한다[3]. 한편, 스트레스가 지속되면 내부 온도가 상승하여 분리막이 손상되고 결국 내부 단락이 발생한다. 내부 단락 시 다량의 반응가스(연기)가 방출되며, 고열에 의해 접

화가 되어 화재가 발생하는데 이를 열폭주(thermal runaway)라 한다. 또한, 그림 1과 같이 열폭주는 내부 에너지가 모두 소진될 때까지 열과 산소를 지속적으로 발생시키므로 일반적인 소화 장비로는 진압이 어렵고, 배터리 주변에 농축된 가연성 가스는 폭발을 유발할 수 있다.



[그림 1] 리튬이온배터리 열폭주 개략도 (화재보험협회, 2022)

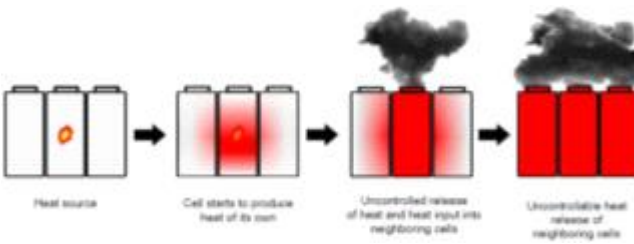
체는 화재를 억제하는 세 가지 효과를 가진다. 첫째, 산소 농도를 낮추어 연소 반응을 억제한다. 해외 시험 보고서에 따르면 챔버 내부 산소 농도를 약 11.3% 이하로 제어하면 화염 크기가 감소하고 인접 셀로 화재가 전파되지 않는 것으로 보고 되었으며, 이는 그림 3의 그래프로 검증된다.



[그림 3] 산소농도 제어를 통한 열폭주 확산 방지 (Siemens, 2020)

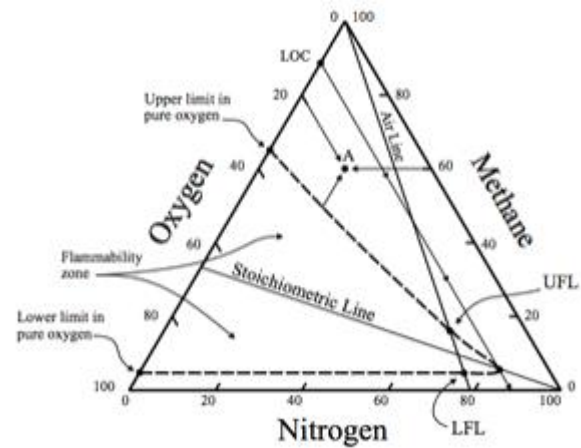
## 2.2 리튬이온배터리 화재 확산 메커니즘

리튬이온배터리 셀은 스트레스로 인한 열화나 품질 불량으로 열폭주가 발생할 수 있으며, 이때 발생한 열이 인접 셀로 전파되어 열폭주가 확산된다. 그림 2와 같이 모듈 또는 팩 내부에서 셀이 동시에 화재에 개입하는 것이 아니라, 열 전이에 따라 주변 셀로 점진적으로 확산되기 때문에 1~2개 셀의 열폭주 발생 시 초기에 대응하지 못하면 화재가 급속히 확산될 수 있다. 이러한 열폭주 확산은 화재가 장시간 지속되는 특징을 가지며, 가연성 가스가 농축됨에 따라 폭발 위험도 함께 증가한다. 따라서, 대규모 화재를 방지하기 위해서는 리튬이온배터리 화재 발생 초기에 대응하여 열폭주 확산을 차단할 수 있는 기술이 필요하다.



[그림 2] 리튬이온배터리 화재 확산 특성

둘째, 고압 용기에 충전된 질소는 분사 시 급격한 유속으로 배출되어 저온의 기체가 배터리에 직접 분사됨으로써 강제 냉각 효과를 제공한다. 셋째, 불활성기체는 활성 라디칼(active radical)과의 반응에는 직접 참여하지 않지만, 그림 4와 같이 화재 공간 내 반응성을 낮추어 자유 라디칼 농도의 성장을 지연시키는 역할을 한다. 여기서, 라디칼은 원자나 분자가 화학적으로 매우 불안정하고 다른 분자와 빠르게 반응하려는 성질을 의미하며, 이에 따라 열폭주로 발생한 화염이 인접 셀로 전파되는 시간을 지연시킬 수 있다. 이러한 화재 억제 효과를 기반으로, 불활성기체는 리튬이온배터리 열폭주의 확산 방지에 효과적인 소화 특성을 갖는 것으로 평가된다.



[그림 4] 질소의 연소 반응 억제 효과 (Green & Perry, 2008)

## 3. 화재 확산 방지를 위한 불활성기체 분사제어 알고리즘

### 3.1 불활성기체의 소화 특성

불활성기체(inert gas)는 주어진 조건에서 화학적 반응을 일으키지 않는 기체를 의미하며, 대표적으로 질소(N<sub>2</sub>), 아르곤(Ar), 헬륨(He) 등이 있다. 이 가운데 질소는 자연 대기 중 약 78%를 차지하며, 공급이 용이하고 비용이 저렴하여 리튬이온배터리 화재 확산 방지 기술에 가장 적합한 불활성기체로 선정된다. 불활성기

### 3.2 불활성기체의 분사제어 알고리즘

리튬이온배터리 화재 확산을 방지하기 위한 불활성기체 분사제어 알고리즘은 산소/오프가스/화재 검출 장치와 밸브를 비롯한 불활성기체 분사제어 장치의 연동을 기반으로 한다. 먼저, 배터리 설치 공간에 산소 농도와 오프가스, 화재 감지 여부를 실시

간으로 모니터링한다. 여기서, 센서가 오프가스를 검출하면 불활성기체가 분사되는데, 챔버 내부 산소 농도가 10.1% 이하로 도달하면 불활성기체 분사를 중지한다. 10.1%는 해외 보고서 기준인 11.3%의 약 90%에 해당하는 수치이며, 이후 환경 요인으로 산소 농도가 상승하여 11.3%에 도달하면 제어부는 다시 불활성기체를 분사 제어해 산소 농도를 10.1%로 만들어, 불활성기체 농도가 10.1~11.3%의 범위를 유지하도록 산소 농도를 제어한다.

한편, 센서부에서 화재를 감지하면, 제어부는 불활성기체를 분사하고 중지하는 것을 반복하는 인터벌 분사 제어를 실시한다. 인터벌 분사 제어는 30초 분사 10초 중지의 동작을 1사이클로 정의되며, 제어부는 열폭주가 지속되는 시간 동안 사이클을 반복 제어한다. 열폭주 지속시간이 종료된 이후, 인접 배터리 표면의 온도가 상승하는 김새가 있다면, 불활성기체를 1~3사이클 정도 추가로 분사 제어한다. 이후 30분 동안 온도가 상승하지 않고 추가적인 열폭주 징후가 없을 경우, 리튬이온배터리 열폭주 확산 방지에 성공한 것으로 판단한다. 이를 알고리즘으로 정리하면 다음과 같다.

- [기호]  $S_O(t)$  [%]: 산소 농도
- $S_G(t) \in \{0,1\}$ : 오프가스 검출 상태
- $S_F(t) \in \{0,1\}$ : 화재 발생 상태
- $U(t) \in \{0,1\}$ : 불활성기체 분사 상태
- $t_{on}$ : 분사 시간,  $t_{off}$ : 분사 중지 시간
- $T_{on}$ : 30초,  $T_{off}$ : 10초
- $N_{add} \in \{1,2,3\}$ : 추가 분사 사이클 수
- $TR_{active}(t) \in \{0,1\}$ : 열폭주 지속 여부

[Step 1] 리튬이온배터리의 산소 농도, 오프가스, 화재 상태를 실시간으로 모니터링 한다.

$$\text{mod}[S_O(t), S_G(t), S_F(t)] \quad (1)$$

[Step 2] 오프가스 검출 시 불활성기체를 분사한다.

$$S_G(t) = 1 \Rightarrow U(t) = 1 \quad (2)$$

[Step 3] 산소 농도가 10.1% 이하로 도달 시 불활성기체 분사를 중지한다.

$$S_O(t) \leq 10.1 \Rightarrow U(t) = 0 \quad (3)$$

[Step 4] 산소 농도가 11.3%를 초과하면 [Step 2]로 이동한다.

화재 감지 시 [Step 5] 로 이동하며, 오프가스가 검출되고 30분이 지났으면 [Step 6]로 이동하고, 오프가스 검출 상태가 해제될 시 [Step 1]로 이동한다.

$$\begin{cases} S_F(t) = 1, & \Rightarrow [\text{Step}5] \\ S_O(t) > 11.3\%, & \Rightarrow [\text{Step}2] \\ S_G(t) = 1 \wedge (\Delta t \geq 30\text{min}), & \Rightarrow [\text{Step}6] \\ S_G(t) = 0, & \Rightarrow [\text{Step}1] \end{cases} \quad (4)$$

[Step 5] 불활성기체 분사 제어는 30초 분사, 10초 중지로 정의되어 수행되며, 분사 제어 후 열폭주가 지속 중이면 [Step 5]를 다시 수행하고, 열폭주가 종료되었으면 [Step 6]으로 이동한다.

$$U(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t_{on} < T_{ON} \\ 0, & 0 \leq t_{off} < T_{OFF} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} TR_G(t) = 1, & \Rightarrow [\text{Step}5] \\ TR_A(t) = 0, & \Rightarrow [\text{Step}6] \end{cases}$$

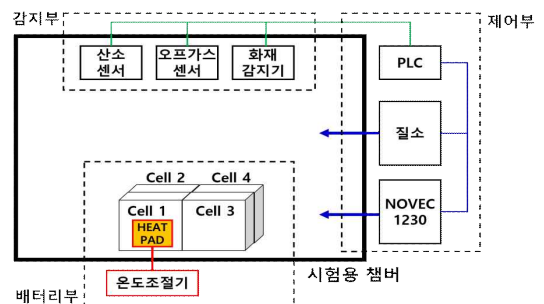
[Step 6] 인접 셀의 온도 상승률이 0보다 크면 [Step 5]로 이동하고, 0보다 작으면 [Step 7]로 이동한다.

$$\begin{cases} R_T(t) > 0, & \Rightarrow [\text{Step}5] \\ R_T(t) \leq 0, & \Rightarrow [\text{Step}7] \end{cases} \quad (6)$$

[Step 7] 추가적인 열폭주 징후가 없으면 확산 방지 성공으로 판단하고 종료한다.

#### 4. 리튬이온배터리 화재 시험장치 구현

리튬이온배터리 열폭주 확산 방지를 위한 불활성기체 운용 방안의 유용성을 검증하기 위하여, 리튬이온배터리 화재 시험장치를 구현한다. 전체 시험장치는 그림 5와 같이 구성하는데, 불활성기체의 소화특성 효과를 비교하기 위하여, Novec 1230 소화약제를 분사하는 시험을 병행한다.



[그림 5] 리튬이온배터리 열폭주 시험 구성

## 5. 시험 결과 및 분석

### 5.1 시험 조건

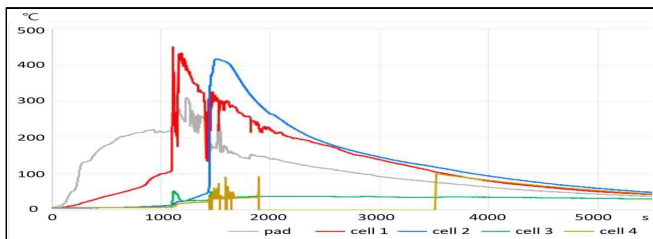
리튬이온배터리 열폭주 확산방지 특성분석을 위하여, 시험은 표 1과 같이 총 3번 진행하는데, 첫 번째 시험은 리튬이온배터리의 열폭주 기준 시험이고, 두 번째 시험은 불활성기체 분사시험, 세 번째 시험은 불활성기체 기반 소화약제 분사 시험이다.

[표 1] 시험 조건

| 시험번호 | 시험 조건   | 불활성기체      |
|------|---|------------|
| 시험 1 | cell 1의 히팅패드를 분당 5~7℃ 상승시켜 cell 1의 열폭주 발생을 유도함. | 없음         |
| 시험 2 | 오프가스 검출 센서 동작 시 불활성기체 분사제어 알고리즘에 기반하여 질소 분사     | 질소         |
| 시험 3 | 열폭주 발생 시 가스계 소화약제를 분사함.                         | Novec 1230 |

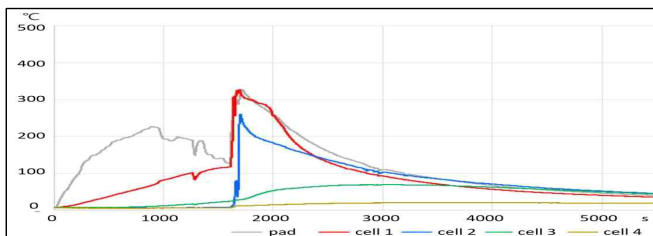
### 5.2 불활성기체 분사제어에 의한 열폭주 특성

상기에서 제시한 시험 조건을 바탕으로, 시험 1의 조건에 대하여 리튬이온배터리의 열폭주 특성을 나타내면 그림 6과 같다. 시험 시작 1050초(17분 30초) 후, 히팅패드가 부착된 1번 셀에서 열폭주가 발생하는 것을 알 수 있다. 약 360초(6분) 후, 1번 셀 후면에 위치한 2번셀에서도 열폭주가 발생하여 열폭주의 확산을 확인할 수 있다.



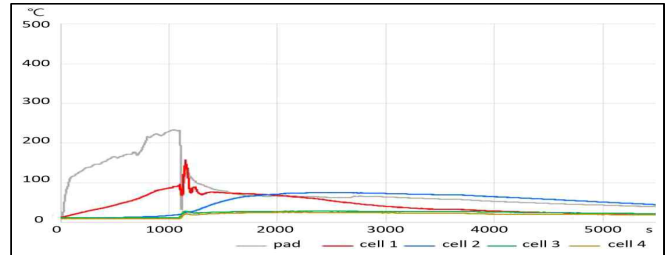
[그림 6] 리튬이온배터리의 열폭주 특성

시험 2의 조건에 대하여 불활성기체 분사 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 시험 시작 1268초(21분 8초) 후에 오프가스 검출 알람이 발생하여 질소를 투입하고, 산소농도 11.3%를 유지하는 것을 알 수 있다. 1613초(26분 53초) 정도에 1번 셀에서 열폭주가 발생하고, 2번 셀의 온도가 지속적으로 증가하지만 시험 종료까지 열폭주는 발생하지 않은 것을 알 수 있다.



[그림 7] 불활성기체 분사제어에 의한 열폭주 특성

시험 3의 조건에 대하여 불활성기체 분사제어 특성을 나타내면 그림 8과 같다. 시험 시작 1098초(18분 18초) 후에 1번 셀에서 열폭주가 발생하자마자 NOVEC 1230 소화약제를 분사하고, 순식간에 주변 온도와 산소농도가 하강하며 인접 셀의 온도를 낮추는 효과를 확인할 수 있다. 시험 2보다 인접 셀의 온도가 안정적이며, 시험이 종료될 때까지 인접 셀로 열폭주가 확산되지 않음을 알 수 있다.



[그림 8] 가스계 소화약제 분사에 의한 열폭주 특성

## 6. 결 론

본 논문에서는 리튬이온배터리의 열폭주 특성과 불활성기체의 소화특성을 기반으로, ESS 화재 확산 방지를 위한 불활성기체 분사제어 알고리즘을 제안한다. 또한, 제안한 알고리즘의 유용성을 검증하기 위하여, 리튬이온배터리 열폭주 시험과 불활성기체 분사제어 시험, 소화약제 분사 시험을 수행한 결과, 리튬이온배터리의 열폭주 확산을 방지 효과를 확인하여, 제안한 불활성기체 분사제어 알고리즘의 유용성을 알 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부, 소방청의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행한 연구(RS-2025-25395160)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] “ESS Causes Investigation and Safety Reinforcement Measures Announcement”, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019.06.
- [2] Siemens AG, Fire Protection for Li-ion Battery Energy Storage Systems, White Paper, May 2020.
- [3] 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