

리튬이온배터리 열폭주 확산 방지를 위한 불활성기체 운용 방안에 관한 연구

황소연^{*,**}, 임민규^{**}, 이중선^{**}, 김지명^{**}, 노대석^{**}

^{*}(주)티팩토리, ^{**}한국기술교육대학교

e-mail: conishwang@gmail.com

A Study on the Inert Gas Operation Method to Prevent Thermal Runaway Propagation

So-Yeon Hwang^{*,**}, Min-Gyu Lim^{**}, Joong-Seon Lee^{**}, Ji-Myung Kim^{**},
Dae-Seok Rho^{**}

^{*}TFactory Corp, ^{**}Korea University of Technology and Education

요약

2015년 유엔기후변화 회의에서 채택된 파리 협정 이후, 전 세계적으로 탄소배출을 줄이기 위하여 신재생에너지 보급이 증가하고 있다. 하지만, ESS(energy storage system)와 전기자동차에서 지속적으로 화재가 발생하고 있으며, 최근 배터리 제조공장의 대규모 화재로 인하여 리튬이온배터리의 화재와 안전에 관한 관심이 증가하고 있다. 여기서, 리튬이온배터리는 셀 1개의 열폭주가 인접 셀에 열적 충격을 가해 화재가 전파되기 때문에, 초기에 셀 화재를 진압하거나 확산을 막지 못하면 걷잡을 수 없는 대형 화재로 이어질 수 있으므로, 열폭주 발생 특성을 고려한 화재 대응 방안이 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 리튬이온배터리의 화재 특성과 불활성기체의 소화특성을 분석하고, 리튬이온배터리 열폭주 확산을 방지하기 위한 불활성기체와 가스계 소화약제를 선정한다. 또한, 오프가스 검출 센서를 활용한 불활성기체 분사 방안을 제안하고, 이에 대한 유용성을 확인하기 위하여 4개 이상의 리튬이온배터리 셀로 구성된 시험 시료와 배터리 화재 시험장치를 구현한다. 이를 바탕으로 리튬이온배터리의 열폭주 확산 시험을 수행한 결과, 리튬이온배터리 셀 1개의 열폭주 시에 인접 셀로 열폭주가 전이되지 않아, 제안한 리튬이온배터리 열폭주 확산방지를 위한 불활성기체 분사 방안의 유용성을 알 수 있다.

1. 서론

2015년 유엔기후변화 회의에서 채택된 파리 협정 이후, 전 세계가 탄소배출을 줄이기 위하여 신재생에너지 보급을 위해 노력하고 있다. 우리나라도 재생에너지 3020 이행계획을 수립하여 재생에너지 비중 증가를 위해 힘쓰고 있지만, 리튬이온배터리를 사용한 ESS(energy storage system)와 전기자동차에서 지속적으로 화재가 발생하고 있으며, 데이터센터의 UPS용 리튬이온배터리 화재로 야기된 사회 혼란 이후, 리튬이온배터리의 화재와 안전에 관한 관심이 증가하고 있다[1]. 리튬이온배터리의 화재는 열폭주라고 하는데, 일반 화재와는 다른 발생 메커니즘을 가지고 있어 일반적인 소화 방식으로는 화재를 진압하기 어렵다. 또한, 리튬이온배터리는 셀 1개의 열폭주가 인접 셀에 열적 충격을 가해 화재가 전파되는 특성이 있어, 초기에 화재를 진압하거나 확산을 막지 못하면 걷잡을 수 없는 대형 화재로 이어질 수 있으므로, 열폭주 발생 특성을 고려한 화재 대응 기술이 필요한 실정이다. 한편, 해외 리튬이온배터리 화재시험 보고서에 따르면 불활성기체를 활

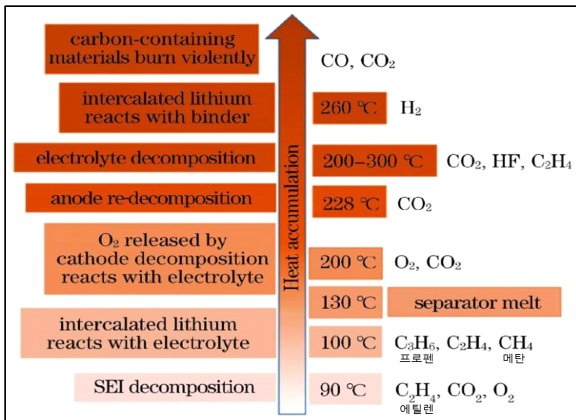
용해 산소농도를 제어하면 리튬이온배터리의 화재가 전파되는 것을 방지할 수 있다고 주장하고 있다. 이에, 불활성기체와 기존 소화약제 소화특성의 차이를 분석하고, 열폭주 확산 방지를 위한 불활성기체 분사 기준의 정의가 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 리튬이온배터리의 화재 특성과 불활성기체의 소화특성을 분석하고, 리튬이온배터리 열폭주 확산을 방지하기 위한 불활성기체와 가스계 소화약제를 선정한다. 또한, 오프가스 검출 센서를 활용한 불활성기체 분사 방안을 제안하고, 이에 대한 유용성을 확인하기 위하여 4개 이상의 리튬이온배터리 셀로 구성된 시험 시료와 배터리 화재 시험장치를 구현하며, 이를 바탕으로 리튬이온배터리의 열폭주 확산 시험을 수행한다.

2. 리튬이온배터리 열폭주 특성

2.1 리튬이온배터리 열폭주 발생 메커니즘

리튬이온배터리에 열적, 전기적 또는 기계적 충격이 가해지는 경우, 배터리의 내부온도가 상승하여 전해질이 끓어오

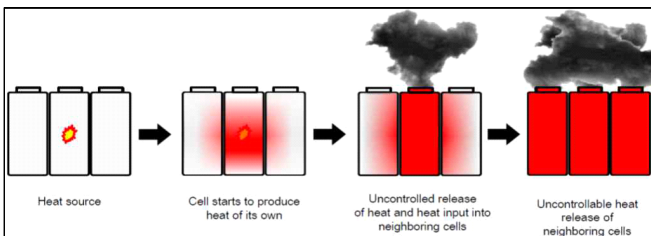
르게 된다. 이때, 전해질이 기화되면 배터리 내부 압력이 증가하게 되고, 이것이 지속되면 배터리 표면이 개방되는 벤팅(venting) 현상이 발생하여 전해질 증기 및 분해가스가 외부로 배출되는데, 이들을 통칭하여 오프가스로 정의된다. 한편, 리튬이온배터리에 스트레스가 지속되면, 배터리 내부 온도가 증가로 분리막이 녹게 되고 결국 내부단락이 일어난다. 내부 단락이 발생하면 다량의 반응가스(연기)가 배출되고, 이후 고열에 의해 점화가 되어 화재가 발생하는데 이것을 열폭주라 한다. 또한, 그림 1과 같이 리튬이온배터리의 열폭주는 내부 에너지가 모두 소진될 때까지 끊임없이 열과 산소를 만들어 내므로, 일반적인 소화 장비로는 진압할 수 없으며, 배터리 근처에 농축되어 있는 가연성 가스는 큰 폭발을 일으킬 수 있다.



[그림 1] 리튬이온배터리 열폭주 발생 메커니즘

2.2 리튬이온배터리 열폭주 확산 특성

리튬이온배터리 셀은 스트레스로 열화되거나 품질 불량으로 열폭주가 발생하고, 인접 셀로 열적 스트레스를 전파하여 열폭주를 확산시킨다. 여기서, 그림 2와 같이 모듈 또는 팩 내부의 리튬이온배터리 셀이 한번에 화재에 개입하는 것이 아니라, 열 전이에 따라 점진적으로 주변 셀에서 열폭주가 확산되어가기 때문에, 1~2개 셀의 열폭주 발생 시 대응하지 못하면 화재가 걸잡을 수 없이 확산된다. 이러한 이유로, 리튬이온배터리의 화재가 발생하면 전체 시스템이 전소되는 경향이 있다.



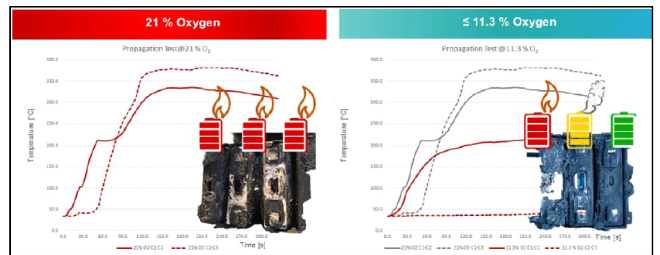
[그림 2] 리튬이온배터리 열폭주 확산 특성

한편, 리튬이온배터리 화재 확산은 오랜시간 화재가 지속되는 특징이 있으며, 가연성 가스의 농축으로 화재 폭발 가능성이 높아지게 된다[2]. 따라서, 대규모 화재를 방지하기 위해서는 리튬이온배터리 화재에 조기에 대응하여 화재 확산을 방지하는 기술이 필요하다.

3. 리튬이온배터리 열폭주 확산 방지를 위한 불활성기체 운용 방안

3.1 불활성기체의 소화 특성

불활성기체(inert gas)는 비반응성 기체(unreactive gas)라고도 불리며, 주어진 일련의 조건 아래에서 화학 반응을 겪지 않는 기체를 의미한다. 일반적으로 불활성기체는 비활성 기체라고 부르는 18족의 원소와, 반응성이 낮은 기체류 모두 불활성기체에 포함된다. 여기서, 질소는 자연상태의 대기에서 각각 약 78%와 1%를 차지할 정도로 흔한 기체로 분류되며, 높은 자연 존재비 및 상대적으로 저렴한 비용으로 불활성기체로 사용된다. 따라서, 리튬이온배터리의 화재 확산 방지에 활용될 불활성 기체로는 쉽게 구할 수 있고 구축 비용도 낮은 질소를 선정한다. 한편, 리튬이온배터리의 화재 확산 방지를 위한 불활성기체의 활용 효과는 크게 산소농도 제어와 강제 냉각으로 구분되는데, 그림 3은 해외 S社의 리튬이온배터리 화재시험 구성으로, 불활성기체를 활용해 시험장치 내부 산소 농도 낮춘 후 배터리에 불꽃을 쏘아 열폭주를 일으키는 시험이다. 시험 결과에 따르면, 산소농도 11.3% 이하에서 화염의 크기가 줄어들고 인접 셀로 화재가 옮겨가지 않는다.



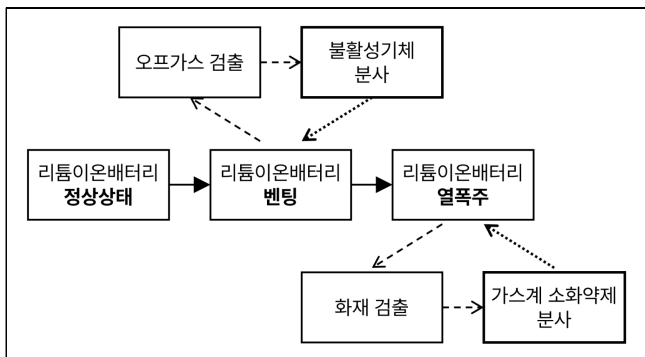
[그림 3] 산소농도 제어를 통한 화재 확산 방지 해외 시험 결과

ESS에 수계 소화약제를 투입한다는 것은, 화재가 발생한 배터리 외에 다른 설비와 배터리도 다시 사용할 수 없게 만드는 뜻을 포함한다. 하지만, 불활성기체 기반의 소화기술을 적용하면 상가에서 언급한 산소농도제어와 강제냉각 효과를 적용할 수 있을 뿐 아니라, 기타 설비와 화재에 개입하지 않은 리튬이온배터리를 재활용 할 수 있다. 따라서, 불활성기체의 소화특성 장점을 극대화 하기 위해서는 ESS 화재에 불활성기체 기반의 소화약제를 사용하는 것이 효과적이다. 여기서, 불활성기체 기반의 소화약제로는 대중적으로 널리 사용되는

NOVEC 1230 소화약제를 선정하여, 리튬이온배터리 열폭주 확산방지 방안에 활용한다.

3.2 리튬이온배터리 열폭주 확산 방지를 위한 불활성기체 분사 방안

어떤 시점에 불활성기체를 리튬이온배터리에 투입하여 산소농도를 제어할 것인지 정의하는 것은, 리튬이온배터리의 열폭주 확산 방지 방안의 중요한 요소이다. 여기서, 리튬이온배터리의 열폭주 특성에 기반하여, 열폭주 발생 전 단계인 벤팅 단계에서 불활성기체를 투입하고 산소농도를 11.3%로 제어하는 방안을 제안한다. 이를 위해, 리튬이온배터리 오프가스 검출 센서와 불활성기체 분사장치를 연동하여, 오프가스 검출 알람이 트리거 신호로 불활성기체를 분사하도록 제어한다. 또한, 불활성기체 기반의 소화약제는 리튬이온배터리의 열폭주 시 빠르게 분사하여 열폭주의 확산을 방지하도록 하는데, 그림 4는 제안하는 불활성기체 분사 방안의 흐름을 나타내고 있다.



[그림 4] 리튬이온배터리 열폭주 확산 방지 방안

상기에서 제시한 리튬이온배터리 열폭주 확산 방지를 위한 불활성기체 분사 방안을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

[Step 1] 리튬이온배터리 설치환경에 오프가스 검출 센서와 화재감지기를 설치하고, 산소농도 센서와 PLC, 불활성기체 분사장치와 불활성기체 기반의 소화약제 분사장치를 연동하여 구성한다.

[Step 2] 시스템 상태를 ‘정상 단계’로 설정하고, 오프가스 검출 센서와 화재감지기의 상태를 감시한다.

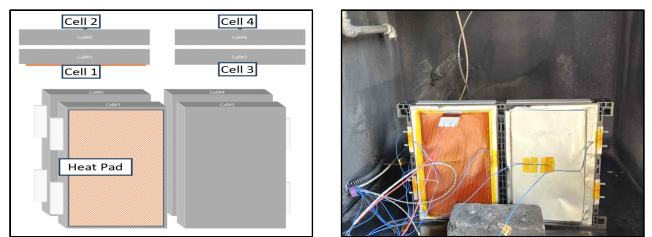
[Step 3] 오프가스 검출 센서에서 알람이 발생하면 ‘벤팅 단계’로 시스템 상태를 변경하고 불활성기체를 분사한다. 이때, 농도를 11.3%가 유지되도록 PLC에서 불활성기체 분사를 제어한다. ‘벤팅 단계’로 시스템이 변경된 상태에서 ‘열폭주 단계’로 30분간 변경되지 않으면 ‘화재 종료 단계’로 시스템 상태를 변경하며, 불활성기체는 ‘벤팅 단계’에서만 분사한다.

[Step 4] 화재감지기에서 알람이 발생하면 시스템 상태를 ‘열폭주 단계’로 변경하고, 불활성기체 기반 소화약제를 분사한다. 첫 번째 셀 열폭주가 발생한 이후 30분동안 열폭주가 확산되지 않을 시 ‘화재 종료 단계’로 시스템 상태를 변경한다.

4. 시험 결과 및 분석

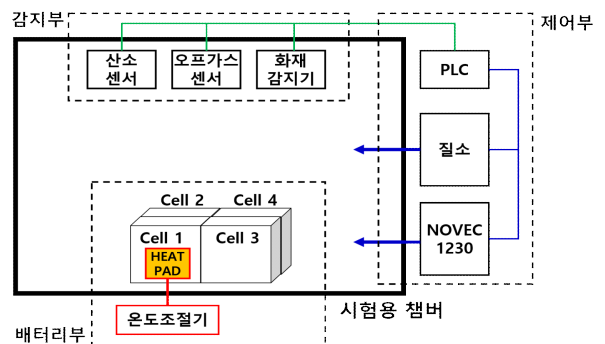
4.1 시험 조건

리튬이온배터리 열폭주 확산 방지를 위한 불활성기체 운용 방안의 유용성을 검증하기 위하여, 리튬이온배터리 화재 시험장치를 구축하여 시험한다. 전체 시험장치는 배터리부와 감지부, 제어부로 이루어지는데, 여기서 배터리부는 그림 5와 같이 파우치형 리튬이온배터리 4개를 하나의 모듈로 연결하여 구성하고, 1개 셀에 대하여 히팅패드를 통해 외부 열적 충격을 전달할 수 있도록 온도조절기를 포함하여 시험장치를 구성한다.



[그림 5] 배터리부의 리튬이온배터리 구성

감지부는 오프가스 검출 센서와 화재감지기, 산소농도 검출센서로 구성된다. 오프가스 검출 센서는 Nexceris社의 오프가스 검출 센서를 사용하고, 화재감지기는 국내 형식승인 받은 광전식 연기감지기를 사용한다. 산소농도 검출 센서는 AOI사의 oxy-sen 제품을 활용하여 감지부를 구성한다. 제어부는 불활성기체와 불활성기체 기반의 소화약제, 제어 밸브 및 PLC로 구성되는데, 각각 질소와 NOVEC 1230, CIMON社의 PLC 및 DC 전압으로 제어되는 솔-밸브를 사용하여 제어부를 구성한다. 전체 시험장치 구성은 그림 6과 같다.



[그림 6] 리튬이온배터리 열폭주 시험 구성

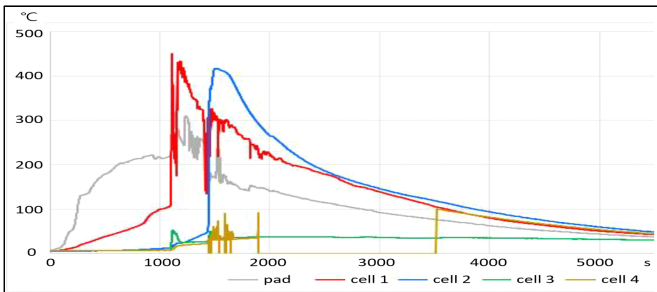
리튬이온배터리 열폭주 확산방지 특성분석을 위하여, 시험은 표 1과 같이 총 3번 진행하는데, 첫 번째 시험은 리튬이온배터리의 열폭주 기준 시험이고, 두 번째 시험은 불활성기체 분사시험, 세 번째 시험은 불활성기체 기반 소화약제 분사 시험이다.

[표 1] 시험 조건

시험번호	시험 조건	불활성기체
시험 1	cell 1의 히팅패드를 분당 5~7°C 상승시켜 cell 1의 열폭주 발생을 유도함.	없음
시험 2	오프가스 검출 센서 동작 시 질소를 분사하여 산소농도를 11.3%까지 하락시킴.	질소
시험 3	열폭주 발생 시 불활성기체 계열의 소화약제를 분사함.	Novec 1230

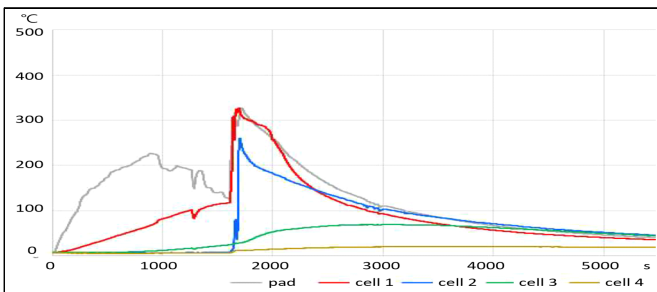
4.2 불활성기체 분사 특성분석

시험 1 리튬이온배터리 열폭주 특성분석 시험을 수행한 결과는 그림 6과 같다. 시험 시작 후 1050초(17분 30초) 경, 히팅패드가 부착된 1번 셀에서 열폭주가 발생하였다. 약 360초(6분) 후, 1번 셀 후면에 위치한 2번셀에서도 열폭주가 발생하여 열폭주의 확산을 확인하였다.



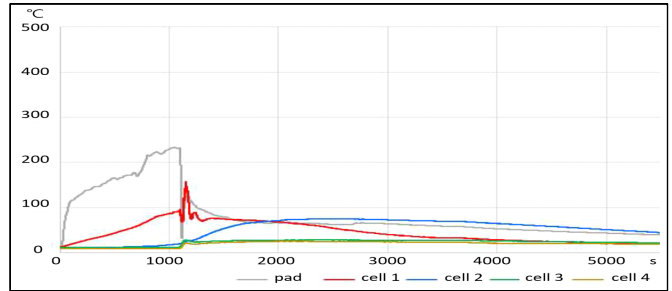
[그림 6] 시험 1 결과 그래프

시험 2 불활성기체 분사 특성분석 시험을 수행한 결과는 그림 7과 같다. 시험 시작 후 1268초(21분 8초) 경 오프가스 검출 알람이 발생하여 질소를 투입하고, 산소농도 11.3%를 유지하였다. 1613초(26분 53초) 경 1번 셀에서 열폭주가 발생하였고, 2번 셀의 온도가 지속적으로 증가하였으나 시험 종료까지 열폭주는 발생하지 않았다.



[그림 7] 시험 2 결과 그래프

시험 3 불활성기체 기반 소화약제 분사 특성분석 시험을 수행한 결과는 그림 8과 같다. 시험 시작 후 1098초(18분 18초) 경 1번 셀에서 열폭주가 발생하자마자 NOVEC 1230 소화약제를 분사하였고, 순식간에 주변 온도와 산소농도가 하강하며 인접 셀의 온도를 낮추는 효과를 확인하였다. 시험 2보다 인접 셀의 온도가 안정적이었으며, 시험이 종료될 때 까지 인접 셀로 열폭주가 확산되지 않았다.



[그림 8] 시험 3 결과 그래프

5. 결 론

본 논문에서는 리튬이온배터리의 열폭주 특성과 불활성기체의 소화특성을 기반으로, 불활성기체를 활용한 리튬이온배터리 열폭주 확산 방지 방안을 제안하였다. 또한, 제안한 방안의 유용성을 검증하기 위하여 불활성기체 분사 특성분석 시험과 불활성기체 기반의 소화약제 분사 특성분석 시험을 수행한 결과 리튬이온배터리의 열폭주 확산을 방지할 수 있어, 제안한 불활성기체 운용 방안의 유용성을 알 수 있었다. 향후에는 불활성기체와 소화약제의 분사시점과 분사량을 제어할 수 있는 알고리즘에 대한 연구를 수행하여, 리튬이온배터리의 화재 안전성을 높일 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

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] Hyoung-Seok Choi, “A Study on Fire Detection Algorithm in ESS by Considering Fire Mechanism for Li-ion Battery”, Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.25 no.2 pp. 538-547, 2024.02.