

# 불활성기체를 활용한 리튬이온배터리 열폭주 확산 방지 장치의 구현

황소연\*, 최형석\*, 신하은\*, 이진호\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail: conishwang@gmail.com

## Implementation of an Inert Gas-Based Device for Preventing Thermal Runaway Propagation

So-Yeon Hwang\*, Hyoung-Seok Choi\*, Ha-Eun Shin\*, Jin-Ho Lee\*, Dae-Seok Rho\*

\*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

### 요약

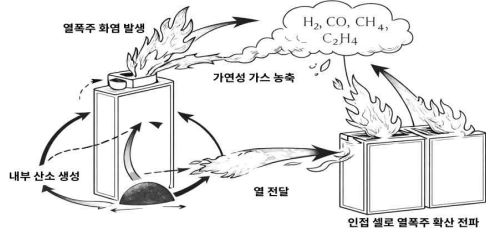
최근, 국내 ESS, 전기자동차, 데이터센터 등에서 리튬이온배터리 화재가 지속적으로 발생하고 있으며, 2025년 9월 국가정보자원관리원 대전 본원에서 발생한 UPS용 리튬이온배터리의 열폭주 화재로 정부 전산시스템이 대규모로 마비되는 피해가 발생한 바 있다. 특히, 리튬이온배터리 단일 셀에서 열폭주(thermal runaway)가 발생하면 인접 셀로 화재가 확산될 수 있어, 기존 소화 방식과 다른 새로운 대응 기술이 요구되는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 불활성기체의 산소 농도 희석, 강제 냉각 및 자유 라디칼 성장 지연 효과를 바탕으로, 오프가스 검출 단계에서부터 산소 농도를 선제적으로 제어하고 화재 감지 시 인터벌 분사를 통하여 지속적인 냉각 및 산소 농도를 유지하는 불활성기체 운용제어 알고리즘을 제안한다. 또한, 감지센서부, 소화약제부, 운용제어부 및 주변장치부 등으로 구성된 시험장치를 구현하고, 가스계 소화약제 분사 시험과 불활성기체 운용제어 시험을 모듈 단위로 수행한다. 상기의 내용을 바탕으로, 불활성기체의 열폭주 확산 방지 특성을 분석한 결과, 가스계 소화약제는 약제 소진 후 인접 셀로의 열폭주 확산을 방지할 수 없지만, 제안한 리튬이온배터리 열폭주 확산 방지 장치는 모듈 단위 시험에서 인접 셀로의 열폭주를 방지할 수 있어, 본 논문의 유효성을 알 수 있다.

## 1. 서론

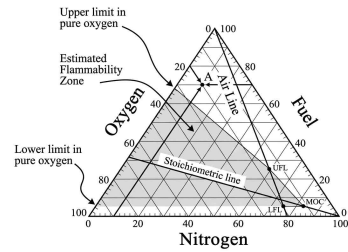
최근, 우리나라는 재생에너지 3020 및 탄소중립 2050 정책에 따른 ESS 및 전기자동차 보급 확대에 인하여, 리튬이온배터리의 화재 안전성에 대한 관심이 급격히 증가하고 있다 [1]. 특히, 2025년 9월 국가정보자원관리원 대전 본원에서 UPS용 리튬이온배터리의 열폭주로 인한 화재가 발생하여 정부 전산시스템이 마비되는 대규모 피해가 발생한 바 있다. 리튬이온배터리의 화재는 열폭주(thermal runaway)라 하는데, 단일 셀의 열폭주가 인접 셀로 확산되어 연쇄 화재로 이어질 수 있어, 기존의 소화 방식과 다른 새로운 대응 기술이 요구되는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 리튬이온배터리의 열폭주 발생 메커니즘과 확산 특성을 분석하고, 불활성기체의 소화 특성을 바탕으로 오프가스 검출 단계에서부터 산소 농도를 선제적으로 제어하는 불활성기체 운용제어 알고리즘을 제안한다. 또한, 감지센서부, 소화약제부, 운용제어부 및 시험장치부로 구성된 시험장치를 구현하고, 모듈 단위의 열폭주 확산 방지 시험을 수행한 결과, 모듈 단위 시험에서 인접 셀로의 열폭주 확산이 발생하지 않아, 본 논문의 유효성을 알 수 있다.

## 2. 리튬이온배터리의 열폭주 및 소화 특성

ESS 및 전기자동차 등에 사용되는 리튬이온배터리는 열적, 전기적 또는 기계적 충격이 가해지는 경우, 배터리 내부에서 비정상적인 발열 반응이 연쇄적으로 진행되는 열폭주현상이 발생할 수 있다. 열폭주가 발생하면 배터리 내부 온도가 급격히 상승하고, 수계 전해질이 기화되어 내부 압력이 증가함에 따라 벤팅(venting) 현상이 발생하며, 배터리 내부의 전해질 증기와 분해가스가 오프가스(off-gas) 형태로 외부로 배출된다. 이후 분리막이 완전히 붕괴되어 내부 단락이 발생하고, 양극 물질과 전해질 사이의 반응이 급격히 진행되어 화재가 발생하게 된다. 특히, 열폭주가 발생한 셀에서 방출된 열에너지는 인접 셀의 내부 온도를 상승시키고, 해당 셀이 열폭주 임계 온도에 도달하면 그림 1과 같이 연쇄적으로 열폭주가 전파되므로, 초기 단계에서 적절히 대응하지 못하면 화재는 인접 셀로 급속히 확산될 수 있다. 이때, 열에너지의 전이는 전도, 대류 및 복사의 세 가지 메커니즘에 의하여 복합적으로 이루어지며, 특히 밀폐된 모듈 내부 환경에서는 열에너지가 축적되어 인접 셀로의 열 전이 속도가 더욱 빠르게 나타나는 경향이 있다.



[그림 1] 리튬이온배터리 화재 확산 특성



[그림 2] 질소의 연소 반응 억제 효과

한편, 리튬이온배터리의 열폭주는 일반 화재와 상이한 소화 특성을 가진다[2]. 일반적인 질식 소화 방식은 외부의 산소 공급을 차단하여 화재를 억제하지만, 리튬이온배터리의 경우 열폭주가 진행되는 동안 양극 활물질(cathode active material)의 열분해 반응에 의하여 배터리 내부에서 산소가 자체적으로 생성된다. 따라서, 외부 산소 공급을 완전히 차단하더라도 배터리 내부의 전기화학적 반응은 지속되므로, 연소의 삼요소 중 산소를 제거하는 방식만으로는 열폭주 자체를 억제하는 데 한계가 있다. 또한, 열폭주 과정에서 외부로 배출되는 오프가스에는 가연성 기체가 포함되어 외부 화염을 형성하고, 형성된 화염은 열 전달을 가속시켜 인접 셀로의 열폭주 확산을 촉진하는 주요 요인으로 작용한다. 이로 인하여, 오프가스에 의한 외부 화염의 형성을 억제하고 인접 셀로의 열 전이를 차단하는 것이 열폭주 확산 방지에 보다 효과적인 방안임을 알 수 있다.

### 3. 열폭주 확산 방지 알고리즘

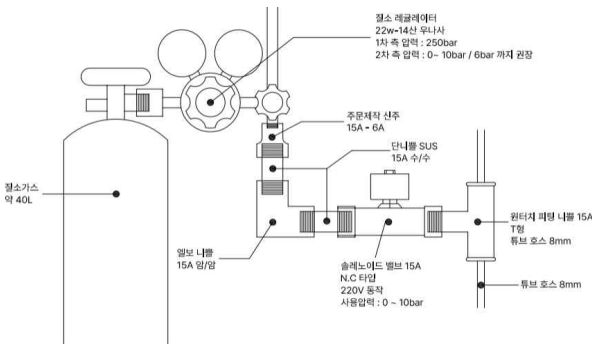
리튬이온배터리의 열폭주 확산 방지에 적용할 불활성기체를 선정하기 위하여, 주요 불활성기체인 질소(N<sub>2</sub>), 아르곤(Ar), 헬륨(He)의 물리적 특성을 비교·분석한다. 먼저, 질소는 자연 대기 중 약 78[%]를 차지하며, 아르곤 및 헬륨에 비하여 공급이 용이하고 비용이 저렴한 장점을 가진다. 또한, 질소의 밀도는 1.25[kg/m<sup>3</sup>]로 공기(1.29[kg/m<sup>3</sup>])와 유사하여, 분사 후 배터리 설치 공간 내에서 균일하게 확산되어 산소 농도를 효과적으로 제어할 수 있다. 이에 비하여, 헬륨은 밀도가 0.16[kg/m<sup>3</sup>]으로 분사 후 상부로 빠르게 확산하여 밀폐 공간에서의 산소 농도 제어에 불리하며, 아르곤은 밀도가 1.78[kg/m<sup>3</sup>]으로 하부에 체류하는 특성을 보이고 비용이 상대적으로 높다. 따라서, 공급 용이성, 경제성 및 공간 내 확산 특성을 종합적으로 고려하여 질소를 불활성기체로 선정한다. 한편, 질소에 의한 화재 억제 효과는 그림 2와 같이 산소 농도 희석에 의한 연소 반응 억제, 강제 냉각에 의한 열전이 억제, 자유 라디칼 농도의 성장 지연의 세 가지로 구분할 수 있다. 여기서, 질소의 비열은 아르곤에 비하여 약 2배 높으므로, 동일한 질량의 기체가 분사되는 경우 더 많은 열에너지를 흡수할 수 있어 냉각 효과가 우수함을 알 수 있다[3].

이를 바탕으로, 본 논문에서 제안하는 질소가스 운용 알고리즘은 다음과 같다. 먼저, 배터리 설치 공간의 산소 농도, 오프가스, 화재 발생 여부를 실시간으로 모니터링 하는데, 오프가스가 검출되면 제어부는 즉시 질소를 분사하여 챔버 내부의 산소 농도를 10.1[%] 이하로 제어한다. 여기서, 오프가스 검출은 열폭주의 초기 징후에 해당하므로, 화재가 발생하기 이전 단계에서 선제적으로 산소 농도를 제어하기 위함이다. 이후, 기밀성 저하 등의 환경 요인으로 산소 농도가 상승하여 11.3[%]에 도달하면 질소를 재분사하여 산소 농도를 10.1~11.3[%] 범위로 지속적으로 유지한다. 한편, 화재가 감지되면 제어부는 30초 분사, 10초 중지를 1사이클로 하는 인터벌 분사 제어를 실시한다. 이러한 인터벌 분사 방식은 산소 농도 희석 효과뿐만 아니라, 고압으로 분사되는 질소의 단열팽창에 의한 강제 냉각 효과와 자유 라디칼 농도의 성장 지연 효과를 주기적으로 제공하여, 열폭주가 발생한 셀에서 인접 셀로 전달되는 열에너지를 감소시키고 화염의 연소 강도를 약화시킨다. 또한, 분사 중지 구간을 설정함으로써 질소의 과다 소비를 방지하고 분사 효율을 확보할 수 있다.

### 4. 리튬이온배터리 열폭주 확산 방지 장치 구현

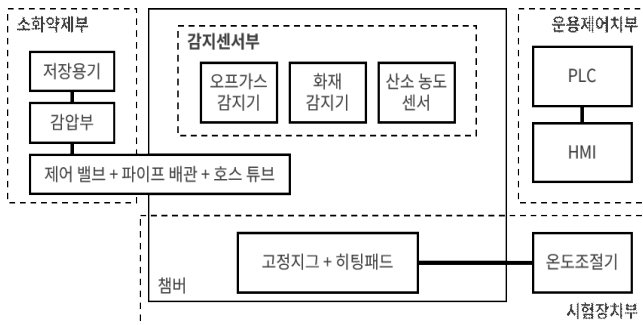
제안한 질소가스 운용 알고리즘의 유용성을 검증하기 위하여, 감지센서부, 소화약제부, 운용제어부 및 시험장치부로 구성된 열폭주 확산 방지 장치를 구현한다. 먼저, 감지센서부는 리튬이온배터리의 열폭주 상태 및 환경 정보를 실시간으로 감지하기 위하여, 오프가스 감지기, 화재 감지기, 산소 농도 센서로 구성된다. 여기서, 오프가스 감지기는 해외 오프가스 검출 규격인 FM Approvals 6540에 부합하는 센서를 선정하여 검출 성능을 확보한다. 또한, 화재 감지기는 열폭주 발생 시 신속하고 정확한 감지가 요구되므로, 미세 연기 입자의 조기 검출이 가능한 공기흡입식 연기감지기를 선정한다. 한편, 산소 농도 센서는 운용 알고리즘에 따라 실시간 측정값이 활용되므로, 아날로그 측정값을 RS-485 통신으로 전송할 수 있는 장비로 선정한다. 또한, 운용제어부는 제안한 알고리즘이 탑재되는 핵심 제어장치인 PLC를 중심으로, 릴레이 모듈, 데이터 저장장치, HMI 및 경광등 등으로 구성된다. 여기서,

PLC는 RS-485 및 TCP/IP LAN 통신 모듈과 디지털 I/O 모듈을 포함한 다채널 입출력 시스템으로 구성하며, HMI는 알고리즘의 운용 상황을 실시간으로 모니터링하고 필요시 수동 관제가 가능하도록 터치 디스플레이 기능이 포함된 장비로 선정한다. 한편, 소화약제부는 질소가스의 저장 및 분사를 수행하는 부분으로, 저장용기, 감압부(레귤레이터), 파이프 배관, 제어 밸브(솔레노이드) 및 튜브 호스 등으로 구성된다. 여기서, 저장용기의 1차측 압력은 제어 밸브의 허용 압력을 초과하는 경우가 빈번하며, 이로 인하여 파이프 배관과 밸브 접합부에서 질소가스의 누출이 발생할 수 있다. 따라서, 저장용기 밸브 후단에 감압부를 설치하여, 제어 밸브가 제안한 운용 알고리즘에 따라 안정적으로 작동할 수 있도록 구성한다. 소화약제부의 제작 설계도를 나타내면 그림 3과 같다.



[그림 3] 소화약제부 제작 설계도

시험장치부는 리튬이온배터리의 열폭주 확산 시험을 수행하기 위한 부분으로, 챔버, 배터리 고정 지그, 히팅패드 및 온도조절기로 구성된다. 여기서, 챔버는 리튬이온배터리 셀 및 모듈의 열폭주를 견딜 수 있는 강철 재질로 제작하며, 벤딩 및 열폭주 시 발생하는 가연성 가스의 집진과 배출을 위한 정화설비를 구현한다. 또한, 고정 지그는 실제 모듈 내부 환경과 유사하게 배터리의 스웰링을 억제하며, 히팅패드는 파우치형 및 각형 셀에 균일하게 열을 전달할 수 있도록 유연성이 높은 필름 히터 형태의 제품으로 선정한다. 전체 장치의 구성도를 나타내면 그림 4와 같다.



[그림 4] 전체 시험장치 구성

## 5. 시험 결과 및 분석

### 5.1 시험 조건

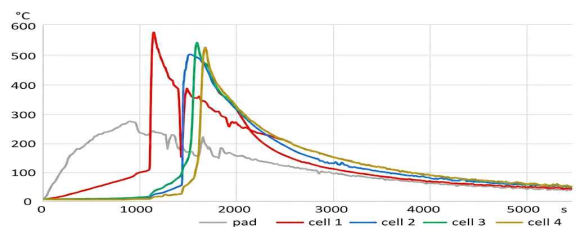
제안한 질소가스 기반의 리튬이온배터리 열폭주 확산 방지 장치의 유효성을 검증하기 위하여, 표 1과 같이 배터리 모듈 단위 시험을 총 3가지 항목으로 구성한다. 첫째는 소화약제를 적용하지 않은 레퍼런스 시험으로 열폭주 발생 시 인접 셀로의 확산 성상을 확인하고, 둘째는 기존 가스계 소화약제의 열폭주 진압 효과를 확인하며, 셋째는 제안한 알고리즘 및 장치의 열폭주 확산 방지 효과를 가스계 소화약제와 비교하여 상대적 유효성을 검증한다. 모듈 단위 시험에서는 SOC 100[%]의 파우치형 리튬이온배터리 4개를 직렬로 연결고정하고, 기준 셀을 외부 가열하여 열폭주를 유도한다. 배터리의 외부 가열 조건은 UL9540A의 셀 외부 가열 시험 기준을 바탕으로, 히팅패드의 온도를 분당 5~7[°C]의 속도로 상승시키는 것으로 설정한다. 또한, 가스계 소화약제는 냉각 성능과 전기절연성이 우수한 NOVEC 1230을 적용하고, 불활성기체는 3장에서 분석한 바와 같이 질소를 선정한다.

[표 1] 시험 조건 및 절차

번호	시험명	시험 시료	소화약제	분사 방식
1	열폭주 레퍼런스 시험	리튬이온 배터리	-	-
2	가스계 소화약제 분사	파우치형	NOVEC 1230	전역 살포
3	질소가스 운용제어	모듈	질소가스(N <sub>2</sub> )	인터벌 분사

### 5.2 질소가스에 의한 열폭주 확산 방지 특성분석

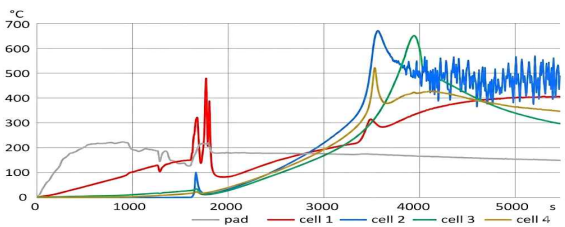
먼저, 레퍼런스 시험에 대한 리튬이온배터리의 열폭주 특성을 나타내면 그림 5와 같다. 시험 시작 후 기준 셀의 표면 온도는 급격히 상승하여 열폭주가 발생하고, 최고 온도는 약 600[°C]에 도달한다. 이후, 기준 셀에서 방출된 열에너지가 인접 셀로 전이되어 2번 셀에서 열폭주가 발생하고 최고 온도는 약 580[°C]에 도달한다. 또한, 2번 셀의 열폭주에 의하여 3번 셀과 4번 셀에서도 열폭주가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 여기서, 모듈 케이스 내부의 밀폐된 공간에서 열에너지가 축적되므로 인접 셀로의 열 전이가 연쇄적으로 빠르게 진행되는 경향을 알 수 있다.



[그림 5] 리튬이온배터리 열폭주 레퍼런스 시험 특성분석

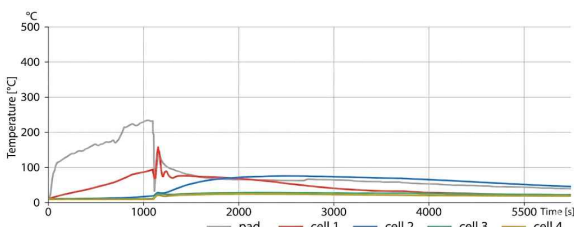
한편, 가스계 소화약제 분사 시험에 대한 열폭주 특성을 나

타내면 그림 6과 같다. 기준 셀에 열폭주가 발생하고, 열폭주 감지와 동시에 NOVEC 1230 소화약제를 전역 살포 방식으로 분사한다. 소화약제가 분사된 직후 챔버 내부의 산소 농도와 주변 온도는 급격히 하강하여 일시적인 온도 저감 효과를 확인할 수 있다. 그러나, NOVEC 1230은 일회성 전역 살포 방식으로 분사되므로 약제가 소진된 이후에는 기준 셀의 열폭주가 지속되는 동안 발생한 열에너지는 다시 인접 셀로 전이되기 시작하고, 2번 셀의 표면 온도는 지속적으로 재상승하여 열폭주가 발생한다. 또한, 2번 셀의 열폭주에 의하여 3번, 4번 셀에서도 연쇄적으로 열폭주가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여, 가스계 소화약제는 열폭주 발생 초기에 일시적인 온도 저감 효과를 제공하지만, 약제 소진 후 열폭주가 지속되는 환경에서는 인접 셀로의 열폭주 확산을 방지하는 데 한계가 있음을 알 수 있다.



[그림 6] 가스계 소화약제 분사 시험 특성분석

질소가스 운용제어 시험에 대한 열폭주 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 시험 시작 후 약 17.5분이 경과한 시점에서 오프가스가 검출되고, 제어부는 알고리즘에 따라 질소 분사를 개시하여 챔버 내부의 산소 농도를 11.3[%] 이하로 선제적으로 제어한다. 이후, 약 25분경 기준 셀에 열폭주가 발생하는데, 여기서, 기준 셀의 최고 온도가 가스계 소화약제 분사에 비하여 현저히 낮게 나타난 것은, 오프가스 검출 단계에서부터 산소 농도가 사전에 제어되어 화염에 의한 연소 반응이 억제되었기 때문으로 판단한다. 한편, 2번 셀의 표면 온도는 기준 셀의 열폭주에 의하여 약 165[°C] 부근까지 상승하나, 질소의 인터벌 분사에 의한 강제 냉각 효과와 산소 농도 제어에 의하여 열폭주 임계 온도에는 도달하지 않고 이후 점진적으로 하강하는 경향을 나타낸다. 또한, 3번, 4번 셀은 시험 전체 구간에 걸쳐 열폭주 징후가 나타나지 않음을 알 수 있다.



[그림 7] 질소가스 분사제어 시험 특성분석

상기의 시험 결과를 종합하면 표 2와 같다. 가스계 소화약제는 약제 소진 후 인접 셀로의 열폭주 확산을 방지하지 못한 반면, 제안한 질소가스 운용 알고리즘은 오프가스 검출 단계부터 산소 농도를 선제적으로 제어하고, 열폭주 발생 후에도 인터벌 분사를 통해 지속적인 냉각 및 산소 농도 유지가 가능하여, 모듈 단위 시험에서 인접 셀로의 열폭주 확산이 발생하지 않음을 알 수 있다.

[표 2] 전체 시험 결과

구분	열폭주 시험	가스계 소화약제	불활성 기체
소화방식	미적용	일회성 전역 살포	인터벌 분사
산소농도제어	미적용	일시적 저감	지속 제어
냉각효과	없음	일시적	지속적
셀 단위 확산	확산 발생	확산 방지	확산 방지
모듈 단위 확산	확산 발생	확산 발생	확산 방지

## 6. 결 론

본 논문에서는 리튬이온배터리의 열폭주 확산 방지를 위한 불활성기체 운용제어 알고리즘을 제안한다. 열폭주 특성분석 시험을 통하여 소화약제를 적용하지 않은 조건에서는 기준 셀의 열폭주가 인접 셀로 연쇄적으로 확산되는 것을 확인한다. 또한, 가스계 소화약제는 일회성 전역 살포 방식으로 분사되므로 약제 소진 이후에는 추가적인 냉각 및 산소 농도 제어를 기대할 수 없어, 리튬이온배터리의 열폭주 확산 방지에 한계가 있음을 알 수 있다. 이에 비하여, 제안한 불활성기체 운용제어 알고리즘은 오프가스 검출 단계부터 선제적으로 산소 농도를 제어하고, 인터벌 분사를 통하여 지속적인 냉각 및 산소 농도 유지가 가능하며, 셀 단위 및 모듈 단위 시험 모두에서 열폭주 확산이 발생하지 않음을 알 수 있었다.

### 감사의 글

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

### 참고문헌

- [1] 산업통상자원부, "ESS 사고원인 조사 및 안전강화 대책 발표", 6월, 2019년.
- [2] T. Liu, Y. Liu, X. Wang, X. Kong, G. Li, "Cooling control of thermally-induced thermal runaway in 18,650 lithium ion battery with water mist," Energy Conversion and Management, 제 199권, 2019년.
- [3] D. A. Crowl, J. F. Louvar, "Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications", Pearson, 4판, pp. 241-320, 3월, 2019년.