

불활성기체를 활용한 리튬이온배터리 화재 확산 방지 알고리즘에 관한 연구

황소연^{*,**}, 한병길^{**}, 곽충근^{**}, 태동현^{**}, 노대석^{**}

^{*}(주)티팩토리, ^{**}한국기술교육대학교

e-mail:conishwang@gmail.com

A Study on the Prevention Algorithm of Fire Propagation in Li-ion Battery Using Inert Gas

So-Yeon Hwang^{*,**}, Byeong-Gill Han^{*}, Chung-Guen Kwak^{*}, Dong-Hyun Tae^{*}, Dae-Seok Rho^{**}

^{*}Dept. of Electric Engineering, Korea University of Technology and Education

^{**}TFactory Co.,Ltd,

요 약

2015년 유엔기후변화 회의에서 채택된 파리 협정 이후, 전 세계적으로 탄소배출을 줄이기 위하여 신재생에너지 보급을 위해 노력하고 있다. ESS(energy storage system)와 전기자동차에서 지속적으로 화재가 발생하고 있으며, 데이터센터의 UPS용 리튬이온배터리 화재로 인하여, 리튬이온배터리의 화재와 안전에 관한 관심이 증가하고 있다. 리튬이온배터리는 셀 1개의 열폭주가 인접 셀에 열적 충격을 가해 화재가 전파되기 때문에, 초기에 셀 화재를 진압하거나 확산을 막지 못하면 건잡을 수 없는 대형 화재로 이어질 수 있으므로, 열폭주 발생 특성을 고려한 화재 대응 방안이 필요한 실정이다. 한편, 해외 리튬이온배터리 화재시험 보고서에 따르면 불활성기체를 활용해 산소농도를 제어하면 리튬이온배터리의 화재가 전파되는 것을 방지할 수 있다고 주장하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 리튬이온배터리 화재 확산을 방지하기 위하여, 리튬이온배터리의 화재 특성을 분석하고, 이를 기반으로 산소농도 제어를 위한 불활성기체를 선정한다. 또한, 2개 이상의 리튬이온배터리 셀로 구성된 시험 시료와 배터리 화재 시험장치를 구현하고, 리튬이온배터리의 화재 확산 시험을 수행한다. 제안한 알고리즘과 시험장치에 의하여, 불활성기체로 산소농도가 제어된 챔버 내에서 리튬이온배터리 셀 1개의 열폭주가 발생하지만 인접 셀로 열폭주가 전이되지 않아, 제안한 화재 확산 방지 알고리즘의 유용성을 알 수 있다.

1. 서 론

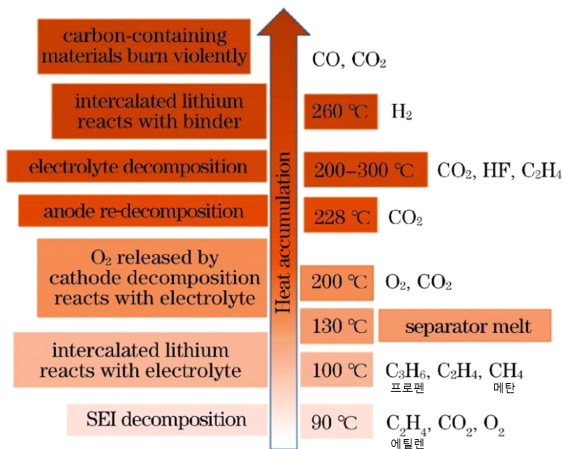
2015년 유엔기후변화 회의에서 채택된 파리 협정 이후, 전 세계가 탄소배출을 줄이기 위하여 신재생에너지 보급을 위해 노력하고 있다. 우리나라도 재생에너지 3020 이행계획을 수립하여 재생에너지 비중 증가를 위해 힘쓰고 있지만, 리튬이온배터리를 사용한 ESS(energy storage system)와 전기자동차에서 지속적으로 화재가 발생하고 있으며, 데이터센터의 UPS용 리튬이온배터리 화재로 야기된 사회 혼란 이후, 리튬이온배터리의 화재와 안전에 관한 관심이 증가하고 있다 [1-2]. 리튬이온배터리의 화재는 열폭주라고 하는데, 일반 화재와는 다른 발생 메커니즘을 가지고 있어 일반적인 소화 방식으로는 화재를 진압하기 어렵다[3]. 또한, 리튬이온배터리는 셀 1개의 열폭주가 인접 셀에 열적 충격을 가해 화재가 전파되는 특성이 있어, 초기에 화재를 진압하거나 확산을 막지 못하면 건잡을 수 없는 대형 화재로 이어질 수 있으므로, 열

폭주 발생 특성을 고려한 화재 대응 기술이 필요한 실정이다 [4]. 한편, 해외 리튬이온배터리 화재시험 보고서에 따르면 불활성기체를 활용해 산소농도를 제어하면 리튬이온배터리의 화재가 전파되는 것을 방지할 수 있다고 주장하고 있다[5]. 따라서, 본 논문에서는 리튬이온배터리 화재 확산을 방지하기 위하여, 리튬이온배터리의 화재 특성을 분석하고, 이를 기반으로 산소농도를 제어에 활용할 불활성기체를 선정한다. 또한, 2개 이상의 리튬이온배터리 셀로 구성된 시험 시료와 배터리 화재 시험장치를 구축하고, 리튬이온배터리의 화재 확산 시험을 시행하여 제안한 알고리즘을 검증한다. 시험 결과, 불활성기체로 산소농도가 제어된 챔버 내에서 리튬이온배터리 1개의 열폭주가 발생하였으나, 인접 셀에서 열폭주가 발생하지 않아 제안한 화재 확산 방지 알고리즘의 유용성을 알 수 있었다.

2. 리튬이온배터리 열폭주 특성

2.1 리튬이온배터리 화재 발생 메커니즘

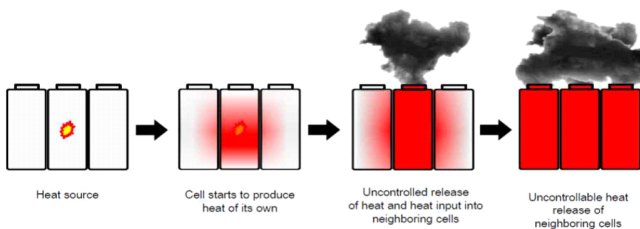
리튬이온배터리에 열적, 전기적 또는 기계적 충격이 가해지는 경우, 배터리의 내부온도가 상승하여 전해질이 끓어오르게 된다. 이때, 전해질이 기화되면 배터리 내부 압력이 증가하게 되고, 이것이 지속되면 배터리 표면이 개방되는 벤팅(venting) 현상이 발생하여 전해질 증기 및 분해가스가 외부로 배출되는데, 이들을 통칭하여 오프가스로 정의된다[4]. 한편, 리튬이온배터리에 스트레스가 지속되면, 배터리 내부 온도 증가로 분리막이 녹게 되고 결국 내부단락이 일어난다. 내부 단락이 발생하면 다량의 반응가스(연기)가 배출되고, 이후 고열에 의해 점화가 되어 화재가 발생하는데 이것을 열폭주라 한다. 또한, 그림 1과 같이 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.



[그림 1] 리튬이온배터리 열폭주 발생 메커니즘

2.2 리튬이온배터리 화재 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 걷잡을 수 없이 확산된다.



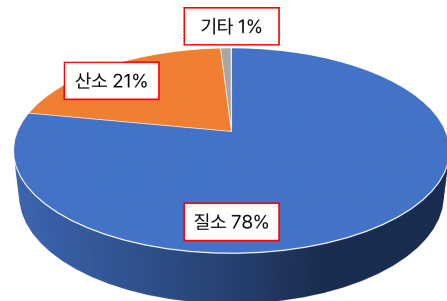
[그림 2] 리튬이온배터리 화재 확산 특성

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

3. 불활성기체를 활용한 리튬이온배터리 열폭주 확산 방지 알고리즘

3.1 불활성기체 선정

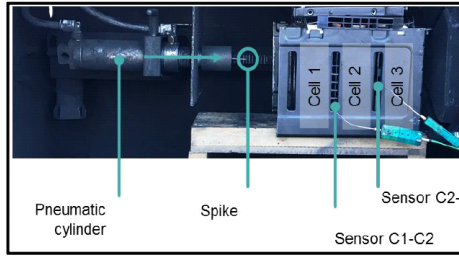
불활성기체(inert gas)는 비반응성 기체(unreactive gas)라고도 불리며, 주어진 일련의 조건 아래에서 화학 반응을 겪지 않는 기체를 의미한다[6]. 일반적으로 불활성기체는 비활성기체라고 부르는 18족의 원소와, 반응성이 낮은 기체류 모두 불활성기체에 포함된다. 대표적인 18족 원소(원소기호)는 헬륨(2), 네온(10), 아르곤(18) 등이 있으며, 반응성이 낮은 기체에는 대표적으로 질소(7)가 있다. 여기서, 질소는 그림 3과 같이 자연상태의 대기에서 각각 약 78%와 1%를 차지할 정도로 흔한 기체로 분류되며, 높은 자연 존재비 및 상대적으로 저렴한 비용으로 불활성기체로 사용된다. 따라서, 리튬이온배터리의 화재 확산 방지 알고리즘에 활용될 불활성 기체로는 쉽게 구할 수 있고 구축 비용도 낮은 질소를 선정한다.



[그림 3] 자연상태의 대기 구성 성분 비율

3.2 리튬이온배터리 화재 확산 방지 알고리즘

리튬이온배터리의 화재 확산 방지를 위한 불활성기체의 활용 효과는 크게 산소농도 제어와 강제 냉각으로 구분된다. 먼저, 그림 4는 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 않는다고 한다. 이에 기반하여, 리튬이온배터리의 화재가 예상되거나 화재 이상지후를 확인하였을 때, 배터리 공간에 불활성기체를 투입하여 산소 농도를 11.3% 이하로 낮추도록 제어한다.



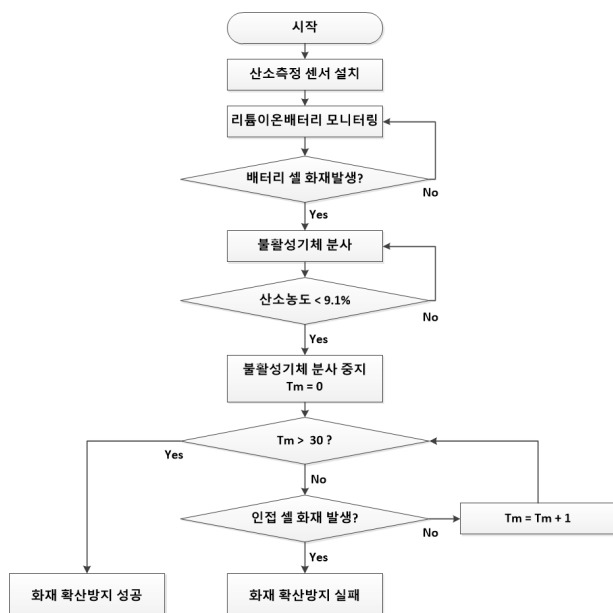
[그림 4] 산소농도 제어를 통한 화재 확산 방지 해외시험 구성

한편, 질소는 산업용 가스를 보관하기 위한 전용 용기에 담겨 사용되는데, 높은 압력으로 용기에 담겨있어 분사 시 빠른 유속으로 배출되기 때문에 온도가 낮은 특성이 있다. 따라서, 리튬이온배터리 열폭주 시 빠르게 질소를 분사하면, 리튬이온배터리에 강제 냉각효과가 전달되어 배터리 간 열 전달을 방해하고, 화재 확산을 방지할 수 있다. 다만 11.3%라는 산소 농도는 시스템 상황에 따라 정상적인 결과를 도출하지 못할 수 있기 때문에, 기준농도의 80%인 9.1%로 산소농도를 제어한다. 제시한 리튬이온배터리 화재 확산 방지 알고리즘을 구체적으로 나타내면 표 1과 같다.

[표 1] 리튬이온배터리 화재 확산 방지 알고리즘

순서	내용
1	리튬이온배터리 설치공간에 산소측정 센서 설치
2	리튬이온배터리 화재 이상징후 검출 시 불활성기체 분사
3	리튬이온배터리 화재 발생 시 불활성기체 분사
4	불활성기체는 산소농도가 9.1% 될 때까지 분사
5	지속적으로 산소 농도 모니터링하고, 산소농도가 상승 시 불활성기체 추가 투입

상기에서 제시한 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 그림 5와 같다.

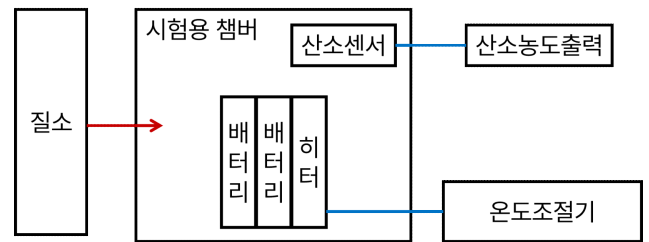


[그림 4] 산소농도 제어를 통한 화재 확산 방지 해외시험 구성

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

리튬이온배터리 화재 확산 방지 특성시험을 위해, 시험용 챔버를 비롯하여 산소센서, 히터, 온도조절기, PLC, 리튬이온배터리 및 불활성기체인 질소로 시험장치를 구성하는데, 이는 그림 6과 같다. 시험용 챔버 내에는 리튬이온배터리 2개를 나란히 붙여두고, 그 중 한 셀에 배터리 히터를 설치하고, 온도조절기를 연결한다. 산소센서는 챔버 내에 설치하고, 산소농도를 출력하는 디스플레이장치는 챔버 외부에 설치한다.



[그림 6] 리튬이온배터리 화재 확산 방지 특성시험 구성

여기서, 질소는 질소통에 보관된 상태로 시험용 챔버 내부와 배관으로 연결되는데, 리튬이온배터리의 화재가 임박한 경우 수동으로 밸브를 열어 질소를 분사한다.



[그림 7] 시험용 챔버와 질소 분사 장치

화재 시험의 안전성과 규모를 고려하여, 리튬배터리는 1300mAh 용량의 리튬폴리머 파우치 배터리를 선정한다. 다만, 사전 시험 시 선정한 배터리의 화염으로는 인접 셀의 열폭주를 발생시키는데 한계가 있어, 열폭주를 발생시킬 리튬이온배터리는 18650 3000mAh 원통형 배터리를 사용하고, 인접 셀 역할로 열폭주의 전파를 확인하기 위한 리튬배터리는 리튬폴리머 1300mAh 파우치 배터리로 구성한다. 원통형 배터리 셀은 UL9540A 시험 규격을 참고하여 히터를 통해 분당 5~7°C 온도 상승제어로 열폭주를 발생시키고, 인접 셀에 열폭주가 전파되는지 시험 종료 후 육안으로 확인한다. 시험용 챔버에는 배터리 열폭주 연기를 집진할 수 있는 장비와, 시험장소 인근에는 화재를 대비한 소화설비와 집진장치를 구성한다.

4.2 리튬이온전지 화재 확산 방지 특성분석

상기의 시험조건을 바탕으로, 리튬이온전지 화재 확산 방지 특성분석 시험을 수행한 결과는 표 2와 같다.

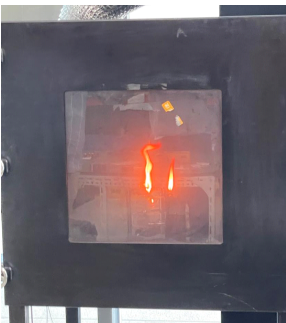
[표 2] 열폭주 확산 방지 특성 분석시험 결과

시간	내용
00:00	원통형 리튬이온배터리 셀 외부과열 시작
00:35	시험용 챔버 내에 질소 분사 챔버 내 산소농도 20.3% → 9.1%
00:40	원통형 리튬이온 배터리 셀 열폭주 발생
01:12	시험 종료 인접 파우치형 리튬폴리머 셀 열폭주 미발생

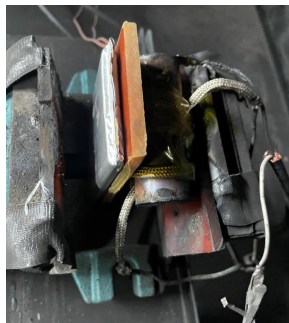
먼저, 열폭주를 발생시킬 원통형 리튬이온배터리를 외부가열 하였고, 약 35분경 열폭주가 임박한 것으로 판단하고 질소를 분사해 그림 8 (a)와 같이 시험용 챔버 내부의 산소 농도를 9.1%까지 낮추고 유지하도록 제어하였다. 이후 약 40분경, 그림 8 (b)와 같이 원통형 배터리에서 열폭주가 발생하였고 약 5초가량 화재가 지속되다가 종료되었다. 인접 육안상으로는 인접 파우치 셀에 화염이 닿은 것으로 확인하였지만, 이후 30 분이 지나는 동안 열폭주가 발생하지 않았다. 시험 종료 후 시험에 사용한 배터리를 확인한 결과, 그림 8 (c)와 같이 원통형 배터리는 열폭주 발생으로 소손되었으나, 인접 셀인 파우치형 배터리는 열폭주가 발생하지 않았다.



(a) 시험용 챔버 내 산소농도



(b) 열폭주 발생



(c) 리튬이온배터리

[그림 8] 열폭주 확산 방지 특성 분석시험 이미지

5. 결 론

본 논문에서는 리튬이온배터리 화재 확산을 방지하기 위하여, 불활성기체를 활용한 리튬이온배터리 열폭주 화재 확산 방지 알고리즘을 제안하였으며, 배터리 화재 시험장치를 구축하고 특성분석 시험을 수행하였다. 시험결과, 제안한 알고리즘과 시험장치에 의하여, 불활성기체로 산소농도가 제어된 챔버 내에서 리튬이온배터리 셀 1개의 열폭주가 발생하지만 인접 셀로 열폭주가 전이되지 않아, 제안한 화재 확산 방지 알고리즘의 유용성을 알 수 있었다.

향후에는 불활성기체를 투입하는 시점을 좀 더 명확하게 해 줄 수 있는 기술을 접목하고, 기체 계열의 소화약제와 불활성 기체의 진압 능력의 차이를 분석하는 연구를 진행하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No. 20213030160080)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.
- [5] 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
- [6] Wikipedia, “Inert gas”, https://en.wikipedia.org/wiki/Inert_gas