

Providing the best services, Creating a better world



배터리 화재 및 예방

Alternative Fuel Technology
Research Team
KOREAN REGISTER

[This Page Was Intentionally Left Blank]

요약문

리튬이온전지의 적용 분야 확대에 따라 배터리의 선박 적용 및 해상 운송이 증가하고 있으며, 배터리 화재에 대한 우려가 커지고 있습니다.

배터리의 열폭주는 배터리 내부에서 발생하는 연쇄적인 화학반응으로, 다양한 가스가 발생합니다. 특히 양극의 금속산화물로 인해 산소를 생산하기 때문에 냉각이 가장 효과적 화재 대응 방법이라고 할 수 있습니다.

다양한 연구에 따르면 배터리 화재 시 물과 폼 기반의 소화시스템이 배터리 냉각에 가장 효과적입니다. 선박에서 물 또는 폼을 사용하는 경우, 청수 용량, 폼의 전기 전도도 및 환경 영향을 고려하여 소화시스템의 설계가 필요합니다.

또한, 배터리를 안전한 SOC(State of Charge) 구간에서 운용하고, 해상 운송 시 SOC의 적절한 제한을 설정하여 안전성을 높이는 것이 필요합니다.

TABLE OF CONTENTS

1. 배터리 기술	7
2. 배터리의 수명 및 안전	9
3. 배터리의 화재 원인	10
4. 배터리 화재 대응	12
5. 배터리 화재 예방	14

REPORT

1. 배터리 기술

배터리 기술은 최근 몇 년 동안 비약적으로 발전하였습니다. 기존의 납축전지, 니켈수소전지가 주를 이루었던 배터리 기술은 높은 에너지밀도를 갖는 리튬이온전지가 개발되면서 휴대기기를 시작으로 가전제품, 자동차, 육상 대용량 에너지 저장장치를 넘어 선박을 포함한 해양분야까지 확대되고 있습니다.

선박용 배터리 시장은 유럽을 중심으로 확대되었으나 2019년부터 시작된 팬데믹으로 잠시 주춤하였습니다. 하지만 2022년 지연되었던 프로젝트의 재개로 수요 증가와 함께 선박 부문의 배터리 시장은 빠르게 성장하였습니다.

배터리를 동력원으로 사용하는 선박은 배터리 추진 선박과 하이브리드 선박으로 구분할 수 있습니다. 순수하게 배터리만을 이용하여 선박의 추진 동력원으로 사용하는 선박은 배터리의 에너지 저장 한계로 인해 연안 및 내륙의 페리에 주로 적용되었으며, 한정적인 전세계 페리 시장규모를 고려할 때 순수 배터리를 동력원으로 사용하는 선박의 증가세는 점차 줄어들 것으로 예상됩니다.

반면, 엔진 또는 대체연료를 사용한 내연기관과 배터리의 하이브리드 시스템을 구성하여 선박의 에너지를 보다 효율적으로 사용하기 위한 수단으로 활용 가치가 높아 선박의 연료 효율을 높이고 탄소 배출을 줄이기 위한 방안으로 하이브리드 시스템의 적용은 확대될 것으로 예상됩니다.

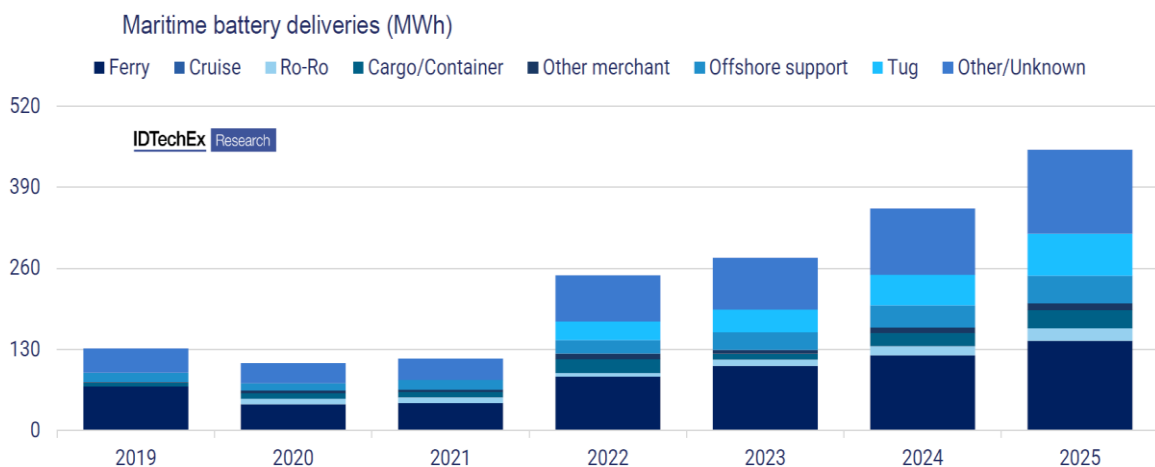


그림 1 해양분야 배터리 시장 동향 (출처 : IDTechEx)

배터리의 적용이 확대되는 만큼 화재 사례가 다수 보고되고 있으며, 안전사고에 대한 우려가 커지고 있습니다. 휴대폰의 배터리 폭발부터 태양광 발전설비의 증가에 따른 ESS 화재사고, 전기차 화재사고 등 다양한 화재 사고에서 배터리가 원인으로 지목되고 있으며, 이러한 우려는 선박에서도 나타나고 있습니다.

선박의 경우, 주전원 또는 보조전원 용도의 배터리를 포함하여 컨테이너로 선적되는 리튬이온전지, 전기차를 운송하는 PCTC 선박 등 화물 운송 과정에서도 화재 및 폭발이 발생할 수 있어 배터리의 화재에 대한 우려가 커지고 있습니다.

2022년 Felicity Ace호는 4,000대 이상의 차량을 싣고 운항하던 중, 선내에서 발생한 화재로 선적된 차량의 전소 및 선박이 침몰하는 사고가 발생하였으며, 화재의 원인과 관련하여 정확한 원인은 알려지지 않고 있으나, 선적된 전기차가 원인으로 추정되고 있습니다.



그림 2 Felicity Ace호



그림 3 MS Brim / MF Ytterøyningen

2020년 노르웨이의 MS Brim호는 790kWh의 배터리와 디젤 엔진이 탑재된 하이브리드 선박으로 배터리의 열폭주로 인해 화재가 발생하였으며, 화재의 원인으로는 해수가 선박의 배터리 구역 환기시스템을 통해 고전압 부품 및 낮은 IP등급의 배터리 모듈에 유입되어 화재가 발생한 것으로 추정하고 있습니다.

2019년 노르웨이의 MF Ytterøyningen호는 1,989kWh 배터리가 탑재된 선박으로 배터리에서 화재가 발생하였으며, 초기 화재를 진압하였음에도 다음날 오전 배터리구역에서 재폭발이 발생하였습니다. 사고의 원인은 수냉식 냉각시스템의 냉각수 누출과 배터리 미사용시 배터리팩과 배터리관리시스템을 연결하지 않아 발생한 것으로 추정하고 있습니다.

리튬이온전지의 전해액은 발화성이 있어 화재의 발생시 진압이 어렵고, 인근 셀과 연쇄적인 반응으로 이어질 수 있어 화재에 대한 소화, 방화 및 예방을 위한 대책 마련이 중요한 이슈로 떠오르고 있습니다.

2. 배터리의 수명 및 안전

배터리의 수명 및 안전에 영향을 미치는 변수는 온도, 충전속도, 충·방전 사이클, DOD(Depth of Discharge) 등이 있으며, 서로 밀접하게 연결되어 배터리의 성능, 수명 및 안전에 영향을 미칩니다.

DOD는 배터리의 완충 상태를 기준으로 얼마나 방전되었는지를 알 수 있는 지표로, 배터리의 충전량을 나타내는 SOC(State of Charge)와 반대 개념이라 할 수 있습니다.

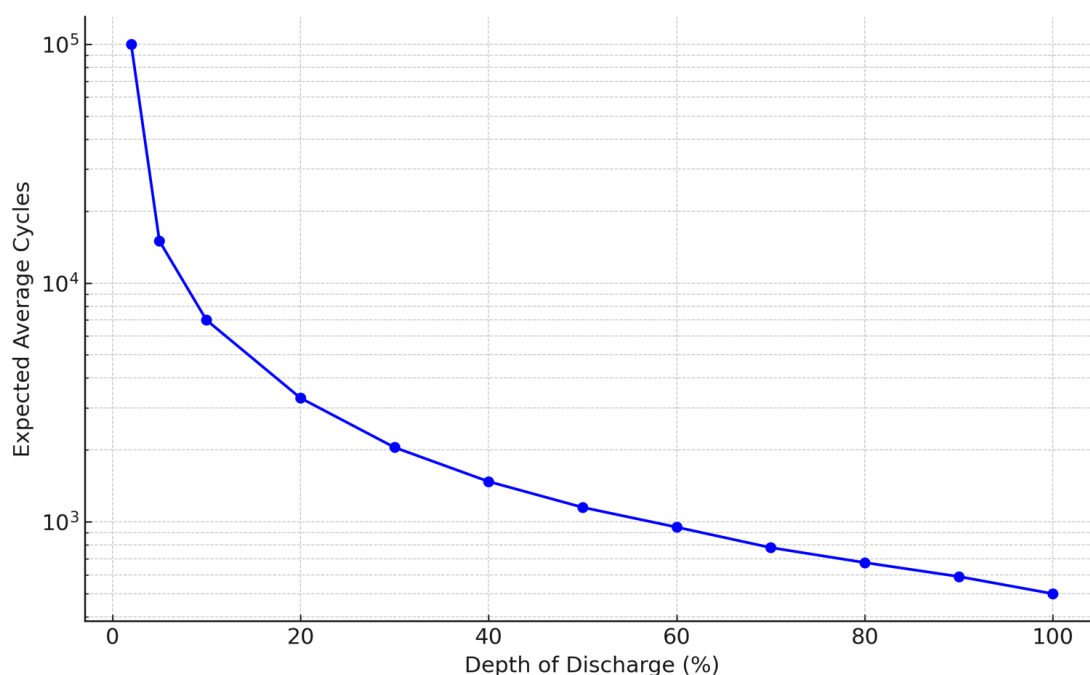


그림 4 DOD와 배터리 사이클의 상관관계

그래프와 같이 배터리의 수명은 DOD에 따라 충전-방전 사이클의 횟수가 크게 영향을 받습니다. DOD가 높을수록 한 사이클에서 배터리의 소모가 커 수명이 단축되며, 낮게 유지하면 수명을 연장할 수 있습니다. 또한 DOD가 높아지면 배터리의 전압이 떨어질 수 있으며, 배터리의 과열로 성능이 저하되고, 극단적인 경우 열폭주 및 화재/폭발로 연결될 수 있습니다.

따라서, 배터리를 오랜 시간 안전하게 사용하기 위해서는 제조사에서 제시하는 온도 범위 내에서 운전하고, 완속으로 자주 충전해 가능한 낮은 DOD를 유지하는 것이 좋습니다.

3. 배터리의 화재 원인

배터리의 화재 및 폭발은 배터리 셀의 열폭주에 의해 발생합니다. 열폭주는 배터리의 셀 단위에서 내외부의 열적 요인, 화학적 또는 물리적 충격으로 인해 온도가 상승하여 화재로 이어지는 현상을 말합니다.

열폭주의 주요 원인은 내부 단락, 과충전, 과방전, 고온 환경, 기계적 손상, 제조 과정에서의 결함에 의해 발생하는 것으로 알려져 있습니다.

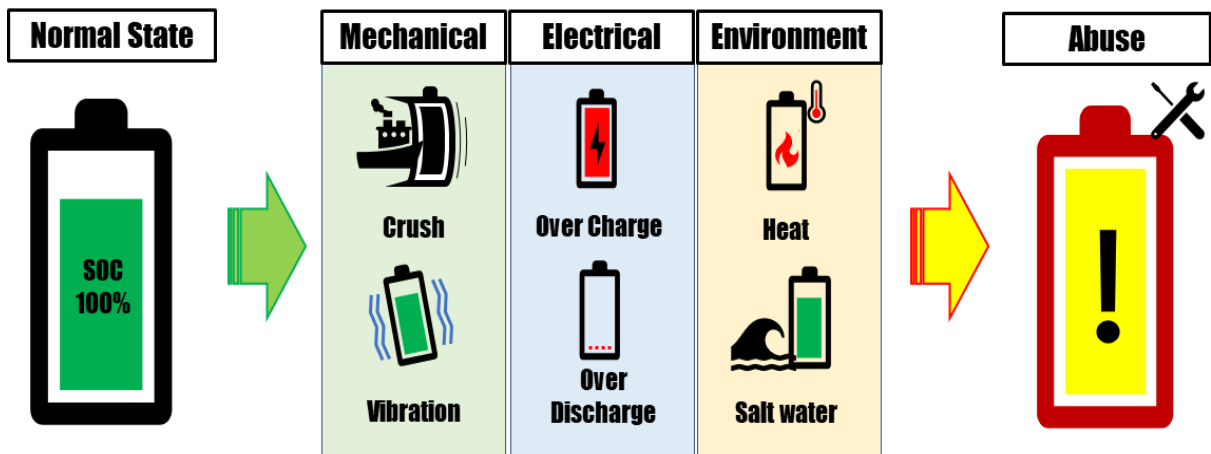


그림 5 리튬이온전지의 고장 원인

리튬이온전지의 내부에는 양극과 음극의 접촉을 막기 위해 '분리막'이라는 얇은 막이 설치되어 있으며, 기계적 손상, 리튬 플레이팅, 고온, 제조 결함으로 인해 분리막이 손상되어 내부 단락을 일으킬 수 있습니다.

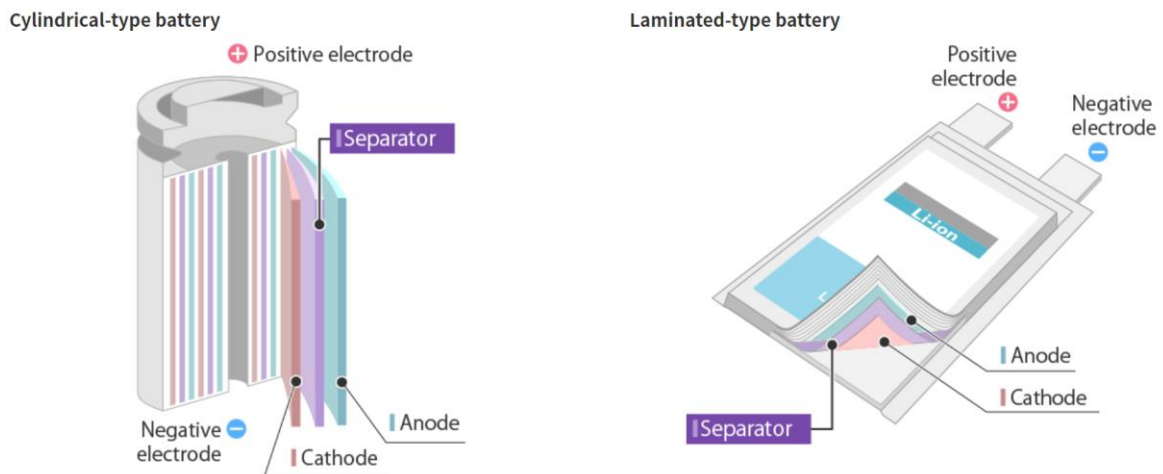


그림 6 리튬이온전지 분리막 (출처 : TEIJINM Limited)

과충전은 배터리에 저장 가능한 용량을 초과하여 충전할 때 발생하는 현상으로 과충전이 지속될 경우 배터리 내부의 화학 반응 이상으로 양극에 리튬 이온이 축적되어 화학 구조의 불안정 및 양극 붕괴가 발생할 수 있습니다. 이로 인해 온도 상승 및 off-gas가 생성되며 열폭주가 발생할 수 있습니다.

과방전은 배터리의 용량 이상으로 전력을 많이 사용하여 배터리의 전압이 지나치게 낮아지는 상황을 말하며, 배터리의 성능 저하 및 작동 불능 상태를 초래할 수 있습니다. 배터리의 과방전은 음극에서 리튬 이온이 과다하게 소모되어 리튬이온을 제외한 음극의 다른 구성요소간 화학반응으로 열이 발생하며, 이로 인해 온도 상승 및 열폭주가 발생할 수 있습니다.

또한, 고온 환경으로 인한 외부 온도 상승은 배터리의 온도를 상승시키며, 온도가 일정 이상으로 지속적으로 가열될 경우 배터리의 화학반응이 빨라져 성능 및 용량 저하가 발생하고 내부 단락 및 온도 상승으로 열폭주가 발생할 수 있습니다.

열폭주 현상은 연쇄 반응으로 설명이 가능합니다. 온도가 비정상적으로 상승하면 내부에서 화학 반응이 순차적으로 발생하는 연쇄 반응을 형성합니다. 이러한 연쇄반응은 배터리의 [발열 - 온도상승 - 반응을 상승] 의 순환고리를 형성하고, 이러한 순환고리는 배터리가 소진될 때까지 극도로 높은 온도에서 순환 반응을 이어갑니다.

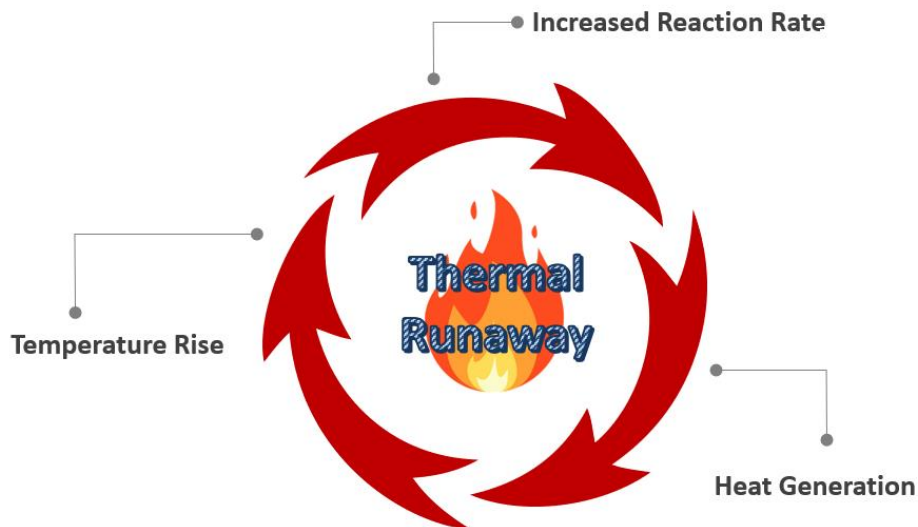


그림 7 열폭주 순환고리

또한, 열폭주 현상이 시작되면 배터리 내부에서 수소, 일산화탄소, 이산화탄소, 산소 및 다량은 탄화수소가 생성되며, 특히 배터리 양극의 금속산화물은 열폭주 과정에서 산소를 생성할 수 있습니다. 이러한 특성으로 배터리의 열폭주가 시작되면 내부의 에너지가 모두 소진될 때까지 열과 산소를 생성하기 때문에 기존의 소화 방법으로 화재의 진압이 어렵습니다.

4. 배터리 화재 대응

일반적으로 화재가 발생하기 위해서는 연료, 산소, 열의 세 가지 요소가 필요하며, 세 가지 요소 중 하나 이상을 제거하는 방법으로 화재를 진압합니다. 하지만 배터리 화재의 경우, 열폭주 과정에서 산소가 발생하기 때문에 질식을 통한 화재 진압이 어렵습니다. 따라서, 냉각을 통해 열을 제거하는 것이 가장 효과적인 방법이 될 수 있습니다.

선박의 경우, 밀폐된 공간 및 한정된 소화시스템으로 화재에 대응해야 합니다. 따라서, 선내의 배터리 구역 또는 배터리 화물이 적재된 공간의 소화시스템을 구성할 때에는 소화시스템의 성능과 안전성을 충분히 고려하여 해당 구역에 적용해야 합니다.

- 화염 진압 성능
- 소화시스템의 냉각 성능 (배터리 및 off-gas)
- 소화시스템의 배터리 냉각 부위 (배터리의 내 · 외부)
- 소화시스템과 환기시스템의 동시 가동 가능 여부
- 소화약제에 따른 추가적인 영향 (선박, 환경 및 인명 피해 등)

국내외 소방청에서는 전기차 등 리튬이온전지의 화재 대응을 위해 다수의 소화 실험을 진행하였으며, 물과 폼(foam) 기반의 소화시스템이 배터리의 냉각에 가장 효과적인 것으로 나타났습니다.

물은 배터리에 직접 분사하는 것이 냉각에 가장 효과적입니다. 따라서 화재가 발생한 배터리의 형태에 따라 최대한 가까운 곳에서 물을 분사하기 위한 방안이 고려되어야 합니다. 또한, 선박에서 발생하는 배터리 화재 대응을 위해서는 필요한 청수 용량에 대한 추가적인 고려가 필요합니다.

폼 기반 소화시스템의 적용 시 냉각 성능과 전기 전도도를 고려하여야 하며, 환경 및 인체에 미치는 영향에 대한 확인이 필요합니다.

표 1 소화시스템별 배터리 소화 특징 (출처 : Maritime Battery Forum)

소화 시스템	냉각 효율	화염 억제	소화 부위	환기시스템	Off-Gas	비고
Gas Based	낮음	가능	외부	불가	낮음	독성가스 포함
Condensed Aerosols	낮음	가능	내/외부	제한된 환기	낮음	
Water Spray	높음	가능	외부	가능	냉각 및 흡수	배터리 IP44 적용 필요
Water Mist	높음	가능	외부	가능	냉각 및 흡수	배터리 IP44 적용 필요
Direct Injection Of Water	높음	내부 한정	내부	가능	내부 한정	고전압 위험성 고려 필요
Full Submersion	높음	가능	외부	가능	냉각 및 흡수	선박 안전성 고려 필요
Foam Based	높음	가능	내/외부	가능	냉각 및 흡수	폼의 종류별 영향 고려 필요

5. 배터리 화재 예방

배터리의 화재를 예방하기 위해서는 여러 조치가 필요합니다. 이 중에서도 배터리 구역의 온도를 적절하게 관리하고, 물리적 손상을 방지하며 충분한 모니터링과 화재 대응 시스템을 구축하는 것이 매우 중요합니다.

더불어, 배터리 사용 구간 및 충전률을 관리하여 안전성을 향상할 수 있습니다. 배터리는 SOC(State of Charge) 범위에 따라 열폭주가 발생하는 시간, 온도, 전압 강하 구간 등의 차이가 있습니다.

80% 이상의 높은 SOC 구간은 배터리 내부의 활성 물질이 많고, 과충전으로 인한 열폭주 위험성이 증가합니다. 또한, 20% 이하의 낮은 SOC 구간은 과방전이 발생할 위험이 있으며, 과방전은 내부의 화학적 불균형을 일으켜 열폭주로 이어질 수 있습니다. 따라서 20% ~ 80% SOC 구간이 가장 안정적이며, 이 범위에서 사용을 권장하고 있습니다.

SOC 관리의 중요성은 배터리의 운송에도 적용됩니다. 국제 항공 운항 협회(IATA)에서는 배터리의 항공 운송 위험을 최소화하기 위해 SOC를 30%로 제한하고 있으며, 이를 초과하는 배터리는 별도의 승인을 필요로 합니다. 해상 운송의 경우, SOC를 제한하는 국제 또는 규정은 없으나 UECC(United European Car Carriers)에서 전기차의 해상 운송 안전성 확보를 위해 최소 20%, 최대 50%의 SOC를 권장하고 있습니다.

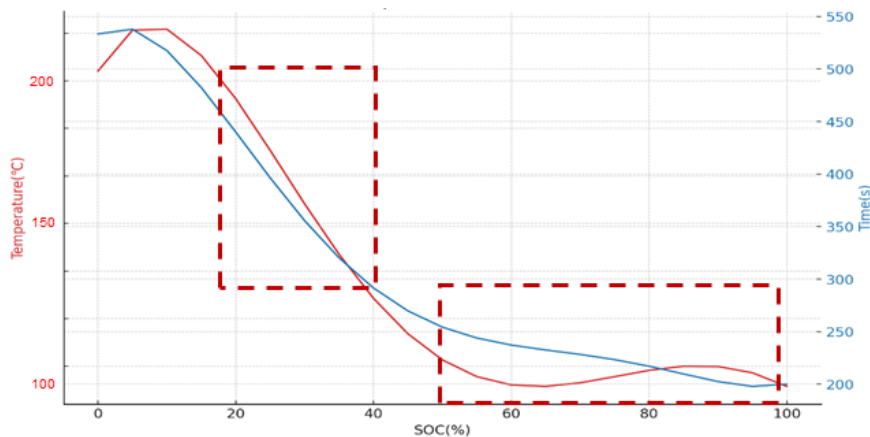


그림 8 SOC별 열폭주 경향

SOC는 배터리의 열폭주 발생에 중요한 영향을 미칩니다. SOC가 높을 때 더 낮은 온도에서 짧은 시간 내에 열폭주가 발생하며, 낮은 SOC에서는 열폭주가 발생하는 온도가 높고 이에 도달하기까지 더 많은 시간이 필요합니다. 특히 SOC 30% 이하 구간에서는 온도의 상승에도 열폭주가 발생하지 않는 경우가 종종 관찰되었습니다. 또한 40% 구간부터 열폭주 발생 온도가 낮아지고 시간이 짧아지는 것을 확인할 수 있습니다.

따라서, 배터리 화재 예방을 위해서는 배터리를 안전한 SOC 구간에서 운용하고, 해상 운송시에는 SOC의 적절한 제한을 설정함으로써 안전성을 향상시키는 것이 필요합니다.

[END OF DOCUMENT]



46762 부산광역시 강서구 명지오션시티 9로 36 (명지동)
(46762) 36, Myeongji ocean city 9-ro, Gangseo-gu, Busan Republic of Korea

TEL +82 70 8799 8760

Fax +82 70 8799 8789

Email mer@krs.co.kr

www.krs.co.kr