

Received: 2024/07/25  
Revised: 2024/08/08  
Accepted: 2024/09/04  
Published: 2024/09/30

**\*Corresponding Author:**

**Ok-Hee Kim**

Dept. of Science, Republic of Korea Naval Academy,  
Republic of Korea  
1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,  
Gyung-sangnam-do, 51704, Republic of Korea  
Tel: +82-55-907-5236  
Fax: +82-55-907-5231  
E-mail: koh0715@gmail.com

**Abstract**

본 연구는 잠수함용 리튬 이온 배터리(LIB)의 기본 개념과 열폭주 메커니즘 및 해상 사고 사례를 분석하고, 열폭주 개선 연구와 안정성 설계 현황을 조사하였다. 잠수함용 LIB는 다층 안전장치를 도입하여 설계되었으며, 엄격한 검증시험을 통해 모든 안전성 기준을 충족하고 있다. 우리나라의 LIB 및 ESS 기술은 세계적인 수준이지만, LIB 열폭주로 인한 사고의 심각성을 고려할 때, 지속적인 연구개발, 엄격한 안전 관리, 승무원 교육이 필요하다. 이를 통해 LIB의 안전성을 확보하고, 잠수함 운용의 신뢰성을 높여야 한다.

This study analyzes the fundamental concepts, thermal runaway mechanisms, and maritime incident cases of lithium-ion batteries (LIBs) used in submarines. Additionally, it examines the current research on improving thermal runaway and the state of safety design for submarine LIB systems. Submarine LIBs are designed with multi-layered safety mechanisms and have passed rigorous validation tests, meeting all safety standards. Despite the world-class level of LIB and ESS technology in South Korea, the severity of incidents caused by LIB thermal runaway underscores the need for continuous research and development, stringent safety management, and crew education. These measures are essential to ensure the safety of LIBs and enhance the reliability of submarine operations.

**Keywords**

리튬이온전지(Lithium-ion battery),  
열폭주(Thermal runaway),  
잠수함(Submarine), 과열(Overheat),  
전기선박(Electric ship),  
안전 관리(Safety management)

# 안전 항해를 위한 리튬이온전지 위험 관리: 열폭주 극복과 안전성 향상 방안

## Risk Management of Lithium-ion Batteries for Safe Navigation: Overcoming Thermal Runaway and Enhancing Safety

김옥희\*

해군중령/해군사관학교 기초과학과 교수

Ok-Hee Kim\*

Commander, ROK Navy/Professor, Dept. of Science, Republic of Korea  
Naval Academy

### 1. 서론

2026년 우리 해군에 인도될 예정인 잠수함 장보고-III Batch-II에는 리튬이온전지(lithium-ion battery, LIB)가 최초로 적용된다. 따라서 납축전지 기반의 기존 전력에 비해 수중 지속 항해 및 고속 기동 시간이 크게 늘어나고 수명은 2배 이상 연장되는 등 잠수함의 전투능력 향상이 기대된다[1]. 이처럼 LIB는 높은 에너지 밀도, 긴 수명 및 낮은 비용 등의 경쟁 우위를 바탕으로 휴대기기/가전제품/운송수단(전기차·선박 등)/에너지저장장치(energy storage system, EES)를 비롯하여 우주·군사용과 같은 특수목적에 이르기까지 다양한 분야에서 널리 활용된다. 하지만 리튬 기반 전지는 뛰어난 성능에도 불구하고, 열폭주(thermal runaway)라는 심각한 위험 요소가 존재하는데, 이는 전지가 과열·불안정해져 내부적으로 연쇄 반응을 일으키는 현상으로, 급격한 온도 상승 및 화재·폭발을 초래할 수 있다.

특히 2024년 6월 24일 경기 화성 아리셀에서 발생한 리튬 폭발 화재는 31명의 사상자를 낸 참사였는데, 이는 업체가 제조하던 군납용 리튬 일차전지에서 비롯된 사고였다. 안규백 의원실이 2023년 육·해·공군과 방위사업청 산하 국방기술품질원으로부터 입수한 자료에 따르면, 최근 3년간(2021년 1월~2023년 9월) 육군에서만 31건의 리튬배터리 폭발·화재 사고가 발생했다[2]. 해군과 공군은 아직 리튬전지 폭발 사고는 발생하지 않았지만, 무인 수상

함/잠수정/드론 등 미래전 무기체계에 일·이차전지를 막론하고 리튬 기반의 전지가 대량으로 사용될 것이 예상됨에 따라서 리튬전지의 안전성 확보는 국방 분야에서도 중요한 과제로 떠오르고 있다. 더군다나 해상에서 운행하는 선박의 경우 주전원 또는 보조전원 용도의 추진 에너지원으로서의 전지뿐 아니라, 컨테이너로 선적되는 전지나 전기차 등 화물로서의 전지 또한 상당하여 운송 과정에서 화재 및 폭발이 발생할 수 있어 LIB의 화재에 대한 우려가 커지고 있다. 무엇보다 수중에서의 밀폐된 공간이라는 잠수함 특성을 고려하면 LIB의 안전성 확보와 사고 예방을 위한 대책 마련은 그 중요성이 날로 증가하고 있다.

본 연구에서는 이차전지인 LIB 기본 개념과 열폭주 메커니즘 및 해상 사고사례를 분석하고, 학계에 보고된 열폭주 개선 연구현황을 소재와 시스템으로 구분하여 정리하며, 잠수함용 LIB 체계의 안정성 설계 현황을 알아보하고자 한다.

## 2. 리튬이온전지의 열폭주

### 2.1 LIB 개요 및 열화(degradation) 현상

다양한 금속 중에서 Li이 전지 소재로 널리 사용된 이유는 Na, K, Mg, Al 등 다른 금속보다 가벼워 무게당 에너지 밀도 측면에서 유리하기 때문이다. 또한, Li의 표준환원 포텐셜( $E_{red}^{\circ}$ )이  $-3.045$  V로, 금속 중 가장 큰 음의 값을 가지므로 환원체의 전자 에너지가 높아서 환원력이 강하고 양이온이 되기 쉬운 성질을 갖고 있다. 즉, Li 기반 전지는 높은 에너지 밀도 및 출력 밀도, 높은 전지 전압, 높은 충·방전 에너지 효율이라는 장점이 있다.

LIB의 4대 구성요소는 ① 양극(cathode), ② 음극(anode), ③ 전해질(electrolyte) 및 ④ 분리막(separator)으로, 이 재료들의 물성에 따라 전지의 성능과 수명이 결정된다(Fig. 1 참조).

- (1) 양극에는 활물질인 리튬이 위치하는데, 순수한 금속형태(Li)가 아닌 다른 금속과의 산화물 형태로( $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiFePO}_4$ ,  $\text{LiMn}_2\text{PO}_4$  등) 존재하며, 이러한 활물질의 양과 종류에 따라서 전지의 용량과 전압이 결정된다.

- (2) 음극은 리튬 이온( $\text{Li}^+$ )을 함침할 수 있는 물질로, 대표적으로 흑연(graphite), Si,  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ , Li metal 등이 있다.
- (3) 전해질의 경우, LIB의 작동 전압이 물의 전기분해 전압인 1.23 V보다 훨씬 높은 약 4.2 V이므로 수계 전해질은 이용할 수 없다. 따라서 리튬염이 용해된 유기용매가 주로 사용된다.
- (4) 분리막은 양극과 음극이 직접 접촉하지 않도록 분리하는 역할을 하며,  $\text{Li}^+$ 의 이동이 가능하도록 절연 특성과 열적 안정성이 뛰어난 다공성 구조 고분자 합성수지가 사용된다.

현재 양극 및 음극 소재는 학계에서 지속해서 연구되고 많은 논문이 발표되었으나, 초기에 개발된 양극 소재인  $\text{LiCoO}_2$ 와 동일한 계열이 아직도 가장 많이 활용 중이며, 음극도 여전히 초기에 개발된 흑연 소재가 대부분 사용되고 있다[3].

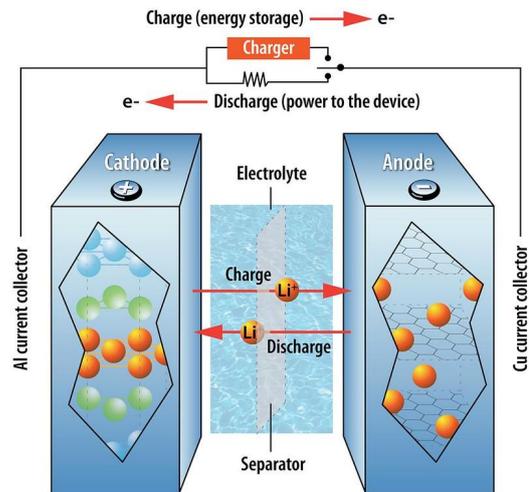


Fig. 1. Configuration of LIB[4]

LIB를 충전하면 양극에서 떨어져 나온  $\text{Li}^+$ 가 전해액과 분리막을 통과하여 음극에 저장되었다가(충전, charge), 다시 양극으로 돌아가는 과정(방전, discharge)이 반복되는데, 충·방전이 지속해서 진행되면 전지의 총 용량이 감소하게 되는 열화현상이 발생한다. 열화현상의 원인은 다양하나, 주요한 원인은 SEI(solid electrolyte interphase)에 기인하여 살펴볼 수 있다.  $\text{Li}^+$ 가 양극에서 음극으로 이동하는 동안, 음극 전해액 내 첨가물과의 화학반응으로 인해 음극 계면 앞에 얇은 고체 막이 형성되는데, 이를

SEI 층이라고 한다. SEI 층이 적절하게 형성되면 추가적인 분리막 역할을 하여 배터리의 수명과 안정성을 향상시킨다. 그러나 SEI 층이 과도하게 성장하면 하나의 고체 막이 되어 저항이 증가하고,  $\text{Li}^+$ 의 이동이 방해받게 되어  $\text{Li}^+$  손실에 따른 전지 열화에 큰 영향을 미치게 된다. 또한, SEI 층이 불균일하게 형성된 얇은 영역에서는  $\text{Li}^+$ 와 전류가 집중되어 덴드라이트(dendrite)가 형성되며, 이는 분리막을 관통하여 양극과 접촉해 단락을 초래한다. 이러한 단락은 열폭주의 원인이 된다. 아울러, 충·방전 과정 중 급격한 부피 변화로 인해 음극과 전기적으로 연결되지 않는 'dead Li'가 형성되어 전지의 쿨롱 효율과 수명을 감소시킨다[5].

## 2.2 열폭주 메커니즘

앞서 살펴보았듯이, LIB는 산화력이 강한 양극, 환원력이 강한 음극, 가연성 유기 탄산염 전해질이 함께 구성되어 있어서 열역학적인 불안정성을 본질적으로 지니고 있다. 따라서 정상적인 충전·방전 반응 외에도 다양한 발열 부반응(exothermic side reactions)이 발생할 가능성이 존재한다[6]. 이러한 부반응의 예로는 SEI의 열분해, SEI 보호 기능이 소실된 고활성 음극 표면에서의 전해질의 환원 분해, 양극과 전해질의 열분해 등이 있다.

LIB가 제조결함, 내부 단락, 과충전, 과방전, 고온 환경, 기계적 손상, 전기적 또는 열적 충격 등의 다양한 원인으로 오작동(abuse)할 경우, 내부 온도가 비정상적으로 상승하게 된다. 그런데 SEI 층은 열 안정성이 떨어져 비교적 낮은 온도인  $69^\circ\text{C}$ 에서도 열분해가 시작될 수 있다. Ouyang 연구팀의 연구에 따르

면[7], LIB의 열폭주는 온도에 따라 세 단계로 나눌 수 있으며, Fig. 2와 같이 열 발생 시작 단계, 열폭주 유발 단계, 열폭주 단계로 구분되며 각각  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ 로 특징지을 수 있다.

- (1) 열 발생 시작 단계( $T_1$ ): 기존 연구들은  $T_1$ 이 음극 표면의 SEI 층 열분해와 밀접한 관련이 있다고 밝혀냈다[6-8]. 흑연 음극의 리튬화 전위가 유기 전해질의 환원 전위보다 상당히 낮아 전지의 첫 번째 충전 과정에서 전해질이 환원 분해되어 음극 표면에 SEI 층을 형성하는데, 바로 이 SEI 층이 전해질과 음극의 직접적인 접촉을 차단하여 열역학적(thermodynamic)으로 불안정한 LIB를 운동학적(kinetic)으로 안정된 상태로 만드는 역할을 한다. 즉 SEI 층은 전지 안정성에 긍정적 역할을 하며, 일반적으로 무기염( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{LiF}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$  등)으로 구성된 안정된 내부층과 유기 탄산염( $(\text{CH}_2\text{OCO}_2\text{Li})_2$ ,  $\text{ROCO}_2\text{Li}$  등)으로 구성된 불안정한 외부층으로 구성된다[5]. 그러나 SEI 층은 전반적인 열 안정성이 낮아  $100^\circ\text{C} - 130^\circ\text{C}$ 로 온도가 상승하면 열분해가 시작된다. SEI 막의 분해로 인해 내부 온도가 상승하면, 삽입된 리튬과 전해액이 화학반응을 일으켜 열에너지와 함께 가연성 탄화수소 가스를 방출한다. 이때 전해액에서 발생된 가스는 비록 발화점을 초과하더라도, 이 단계에서는 전지 내에 산소가 부족하여 발화되지 않는다. 이러한 일련의 발열 부반응은 많은 열을 방출하고, 그 결과 온도가  $T_1$ 에서  $T_2$ 로 상승하게 된다.
- (2) 열폭주 유발 단계( $T_2$ ):  $T_2$ 는 일반적으로 고분

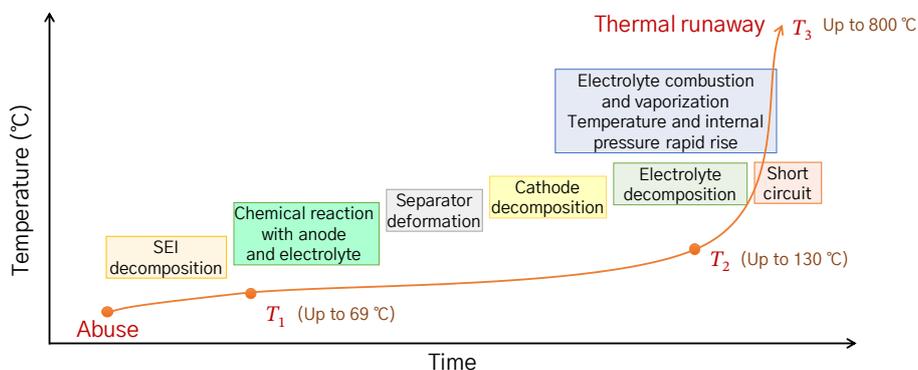


Fig. 2. Schematic diagram of LIB thermal runaway stage and associated exothermic reactions

자 분리막의 열 용해(thermal melting)와 관련이 있다고 알려져 있다[8]. 1단계에서 발생한 가스가 전지 내부 압력을 증가시키고 전지 내부 온도가 분리막의 녹는점에 도달하면 급격한 내부 단락이 발생하여 배터리 온도가 급격히 상승한다. 이때 전해액 내 화학물질의 변화로 인해 양극 금속 산화물의 화학적 불균형이 초래되고, 열적으로 불안정한 양극은 격렬한 열분해를 일으켜 많은 열과 반응성이 높은 산소를 방출한다. 방출된 산소는 전해액을 즉시 산화시켜 열 방출과 축적을 더욱 가속화하며, 다량의 가스 혼합물과 증기가 방출된다. 이로 인해 온도가  $T_2$ 에서  $T_3$ 로 상승하고 열폭주와 배터리 화재 또는 폭발이 발생한다.

- (3) 열폭주 단계( $T_3$ ): 고온에 노출된 전해액은 기화되어 전지 내부 압력이 외피를 파괴할 정도로 상승한다. 또한, 전해액에 포함된 유기물은 가연성이 있어서 화재 또는 폭발의 원인이 될 수 있는데, 파손된 배터리 외피를 통해 방출된 기체가 대기 중의 산소와 급격하게 반응하면서 연소 및 폭발이 일어난다. 이로 인해 전지 온도는  $800\text{ }^\circ\text{C}$  이상까지 치솟는다. 이러한 특성으로 전지의 열폭주가 시작되면 내부의 에너지가 모두 소진될 때까지 열과 산소가 생성되므로 기존의 소화 방법으로는 화재 진압이 어렵다. 따라서 LIB의 안전성을 향상하기 위한 전략은  $T_1$ 과  $T_2$ 를 높이고  $T_3$ 는 낮추는 데 중점을 두고 진행되고 있다[9].

참고로, 아리셀 화재사고의 원인이었던 리튬 일차 전지는 이차전지인 LIB와 구성 및 열폭주 메커니즘이 다르다. 리튬 일차전지는 금속 리튬을 음극재로 사용하여 저장 수명이 길고 다른 일차전지보다 작고 가벼워 군사 및 산업 분야에서 많이 사용되나, 금속 리튬은 반응성이 매우 높아 대기 중 수분과 닿으면 급격한 화학반응으로 폭발성이 강한 수소기체가 발생해 열폭주와 폭발을 일으킬 수 있다.

### 3. 사고사례: 해상 사고를 중심으로

최근 해양 분야에서 친환경 선박용 전기추진시스템이 주목받으며, 배터리 구동 선박의 수가 급증하고

있다. 그러나 시스템의 안전성에 대한 우려 또한 증가하고 있으며 실제로 배터리 선박 화재사고가 지속적으로 발생하고 있다.

2020년 노르웨이에서 발생한 MS Brim호 화재 사고는 790 kWh 용량의 LIB와 디젤 엔진을 탑재한 하이브리드 선박에서 LIB 열폭주로 인해 발생한 것으로 확인되었다. 해당 사고에서 열폭주는 해수가 선박의 배터리 구역 환기 시스템을 통해 침투하여 고전압 부품과 낮은 IP 등급의 배터리 모듈에 누전되어 발생한 것으로 추정되었다. 또한, 2019년 노르웨이에서 발생한 MF Ytterøyningen호 화재 사고는 1,989 kWh 용량의 LIB를 탑재한 선박에서 발생했다. 초기 화재는 진압되었으나, 다음날 오전 배터리 구역에서 폭발이 다시 발생했다. 사고 원인은 냉각 시스템의 냉각수 누출 및 배터리 팩과 배터리 관리 시스템(BMS) 미연결로 인해 발생한 열폭주로 추정되었다.

또한 유럽해사안전청(EMSA, European Maritime Safety Agency)의 최근 보고서에 따르면, 대부분의 대형 선박 화재사고는 LIB가 포함된 화물과 관련이 있는 것으로 조사되었다. 대표적인 사례로는 2023년의 ‘프리맨틀 하이웨이(Fremantle Highway)’, 2022년의 ‘펠리시티 에이스(Felicity Ace)’, 2020년의 ‘호그 샤먼(Höegh Xiamen)’ 등이 있다[10]. 2023년 7월 29일, 네덜란드 북해를 지나던 프리맨틀 하이웨이 호에서 화재가 발생해 1명의 선원이 사망하고 여러 명이 부상을 입었다. 불을 진압하는 데 3일 이상 소요되었고 약 3,000대의 자동차가 전소되었다. 선사에 따르면 선적된 총 3,783대의 차량 중 498대가 전기차였다. 정확한 화재 원인은 밝혀지지 않았으나 전문가들은 전기차 LIB가 폭발하면서 주변 차량으로 화염이 확산된 것으로 추정했다. 로이터통신은 이 사건이 전기차 배터리 기술의 취약성을 드러냈다고 분석했다.

2022년 2월 16일에는 펠리시티 에이스 호가 포르쉐, 벤틀리, 람보르기니 등 고급 승용차 3,965대를 싣고 독일 폭스바겐 공장에서 미국으로 운항하던 중, 선내에서 발생한 화재로 선적된 차량이 전소되고 선박이 침몰하는 사고가 발생하였다. 화재 원인은 선적된 포르쉐 전기차 타이칸의 LIB 열폭주로 추정되었으며, 피해액은 인양 비용 포함 총 5억 달러에 달할 것으로 전망되었다. 선사 관계자는 전기차 배

터리 화재로 인해 진화 작업이 지연되었다고 설명하며, 폭스바겐 그룹이 차량 운송의 위험성을 충분히 알리지 않았다고 주장하며 소송을 제기했다.

군 시설에서 발생한 해상 리튬전지 사고는 군사 작전에 사용되는 장비의 안전성과 신뢰성에 큰 영향을 미치기 때문에 주의 깊게 다루어지고, 외부로 알려진 바가 드물다. 그나마 알려진 사례는 2008년 미국 해군의 Advanced SEAL Delivery System(ASDS) 화재사고이다[12]. ASDS는 미 해군과 특수작전사령부(USSOCOM)가 SEAL팀을 은밀하게 수송하기 위해 개발한 소형 잠수함이었다. 하지만 개발 과정에서 여러 기술적 문제를 겪었고, 2008년 11월 9일, 하와이 진주만에서 ASDS 프로토타입 충전 중 화재가 발생하여 잠수함이 심각하게 손상되었다. 정확한 화재 원인은 밝혀지지 않았지만, LIB의 열폭주로 인한 것으로 추정되었으며, 이로 인해 시스템의 안전성과 신뢰성이 크게 저하되었다. 예상 수리 비용은 2억 3천만 달러로 개발 프로그램 전체 예산의 3배를 초과했다. 결국, 2009년 7월 24일, ASDS 개발 프로그램은 취소되었다.

이와 같이 해양 환경에서는 전지 시스템에 작용하는 다양한 환경적 요인이 LIB 열폭주를 유발하여 화재 발생 위험을 증가시킬 수 있다.

#### 4. LIB 열폭주 방지 연구현황

본 장에서는 LIB 안정성을 높이기 위해 학계에서 연구된 내용을 전지 소재 측면과 시스템 측면으로 구분하여 정리하고자 한다[11].

##### 4.1 열 안정성 전지 소재 개발

기존 연구에서 LIB의 안전성을 향상하기 위해 시도된 주요 방법은 전지 소재의 열 안정성을 개선하여  $T_1$ 과  $T_2$ 를 증가시키는 것으로, 주로 벌크 도핑과 표면 코팅을 통해 양극의 열 안정성을 높이고, 필름 형성 첨가제를 사용하여 전극/전해질 계면과 분리막의 열 안정성을 향상하는 방향이다.

층상 산화물 구조인 양극에 Co, Mg, Ti, Al, Nb, Ga 등의 금속 원소를 벌크 도핑하면 양극의 열 안정성을 효과적으로 향상시킬 수 있다. 이는 도핑된 원소들이 격자점의 산소와 강한 화학 결합을 형성하여

고온에서 활성산소의 방출을 억제하기 때문이다. 또한 활성산소 방출과 구조적 열화는 주로 양극 표면에서 발생하므로, 이러한 표면 코팅을 통해 양극의 열저항성과 열안정성을 동시에 향상시킬 수 있다. 금속 산화물( $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $ZrO_2$  등), 금속 불화물( $LiF$ ,  $FeF_3$ ,  $AlF_3$  등), 인산염 물질( $Li_3PO_4$ ,  $AlPO_4$  등) 또한 표면 코팅 재료로 연구되었다.

비닐렌 카보네이트(VC), 1,3-프로판설통(PS), 불소에틸렌 카보네이트(FEC) 등의 첨가제들은 전해질 분해 전에 환원 또는 산화되어 주로  $Li_2CO_3$ ,  $Li_2SO_4$ ,  $LiF$ 로 구성된 무기물 풍부한 계면을 형성하여 SEI와 CEI(양극 전해질 계면) 필름의 열 안정성을 향상하고 LIB의  $T_1$ 과  $T_2$ 를 증가시킨다.

그러나 이와 같은 열안정성이 뛰어난 소재 개발은  $T_1$ 과  $T_2$ 를 올릴 수 있을 뿐, 열폭주를 근본적으로 방지하는 데는 한계가 있다. 따라서 LIB의 본질적인 안전성을 향상하기 위해서는 과충전과 과열 방지부터 시작해야 하며, 이를 위하여 자체 작동 반응 제어 메커니즘(self-actuating reaction control mechanisms) 기술이 집중적으로 연구되고 있다. 이는 주로 전극 전위 및 전지 온도의 비정상적 상승을 감지하여 전극 반응을 차단하는 소재 개발 연구이다.

과충전 방지 방법은 작동 방식에 따라 세 가지로 분류된다.

- (1) 전위 민감 고분자화 가능 단량체 첨가제(potential sensitive polymerizable monomer additives): 전해질 첨가제로, 과충전 시 단량체 분자가 중합되어 양극 표면에 치밀한 고분자층을 형성, 이온 이동과 전극 반응을 차단하고 배터리 전압을 안전하게 유지한다.
- (2) 레독스 셔틀(redox shuttles): 높은 산화/환원 가역성을 가진 전해질 첨가제로, 과충전 시 양극에서 산화되고 음극에서 환원되어 반복적으로 외부 충전 전류를 우회하고 배터리 전압을 안전하게 유지한다.
- (3) 전위 민감 분리막(potential sensitive separators): p형 전기활성 고분자로 제작된 다공성 막으로, 과충전 시 양극과 음극 사이에 전도성 연결 루트가 형성되어 과충전으로부터 배터리를 보호하는 전류 우회 경로를 생성하는 방식이다.

과열을 방지하는 방법의 기본 원리는 전기화학적 관점에서 반응에 필요한 전자와 이온의 이동을 차단하는 것으로, 위험한 온도에서 전자나 이온 이동을 자동으로 차단하는 메커니즘이 있다면, 반응을 즉시 중단시켜 열 폭주를 방지할 수 있다. 이를 위해 다양한 열 보호 메커니즘이 제안되었다.

- (1) 열 차단 분리막: 폴리올레핀 분리막 표면에 열 가소성 미소구체(microsphere)를 코팅하여, 과열 시 미소구체가 녹아 이온 이동을 차단한다.
- (2) 온도 계수(positive temperature coefficient, PTC) 전극: 온도 상승에 따라 저항이 급증하는 PTC 재료를 전극에 적용하여, 위험한 온도에 도달할 경우 전류를 차단한다.
- (3) 열중합 첨가제: 고온에서 열중합을 통해 전해질을 고체화하거나 전극 표면을 수정하여 이온 이동을 막는다. 단량체는 고온에서 전해질을 고체화하고, 올리고머는 전극 표면을 치밀하게 만든다.
- (4) 가역적 상전이 전해질: 낮은 임계 용해 온도(lower critical solution temperature, LCST) 고분자를 사용하여, 온도에 따라 용해와 침전을 반복하며 이온 이동을 조절한다. LCST 이하에서는 고분자가 전해질에 용해되어 이온 이동을 허용하고, LCST를 초과하면 고분자가 침전하여 이온 이동을 차단하는 원리이다.

#### 4.2 시스템 및 제도 측면

LIB의 단위 셀(unit cell) 소재의 물성 개선뿐 아니라 전지 시스템 측면에서도 다양한 안전장치들이 연구·도입되고 있으며, 그 중 대표적인 내용은 다음과 같다.

- (1) 가스 배출 장치(vent): 전지 내부에 가스가 누적되면 압력이 상승하여 폭발위험이 커지므로 이를 방지하기 위해 전지 내부에 가스 배출구를 적용하여 내부 압력 상승을 막는다.
- (2) 단락 차단 장치: 퓨즈(fuse)는 문제가 있는 셀로 전류가 흐르지 않도록 하여 연쇄 반응을 막는다.

- (3) 과충전 방지 장치(overcharging safety device, OSD): 과충전 시 셀 내부 압력 상승으로 셀 외벽 캡이 팽창하여 외부와 내부 회로를 격리, 외부 전류 유입을 차단한다.
- (4) 배터리 관리 시스템(battery management system, BMS): 각 셀의 전압·회로 전류·외장 온도를 관찰하여 팩의 오작동을 파악하고, 충·방전 제어용 스위치로 전류 회로를 차단해 셀과 시스템을 보호하며, 정보 통신, 수명 계산 및 셀 밸런싱 기능을 수행한다.

그러나 이러한 기술들이 적용되어도, 다수의 셀로 구성된 배터리 팩은 각 셀을 개별적으로 관리하기 어렵고, BMS 고장으로 인한 안전사고도 발생한다. 또한, PTC 서미스터와 안전밸브는 LIB 외부에 필수적인 안전장치로 장착되나 이들 장치는 악조건에서 LIB의 안전을 완전히 보장하지는 못한다.

미국 해군에서는 리튬전지 안전 프로그램 책임 및 절차에 대한 기술 매뉴얼을 작성하였으며[12], ESS 매뉴얼 또한 제시하고 있다. 민간 부분에서도 리튬 배터리 위험성을 인식하여 2020년에 관련 지침을 마련하고 2021년에 개정했다. 미국 ‘국가화재방호협회(NFPA) 855’ 지침은 ESS와 리튬 배터리의 관리와 화재 진압 방식을 규정하며, 저장 시 소분과 이격 기준, 자동 스프링클러 설치 등의 규정을 포함하나, 구체적인 열폭주 방지 솔루션은 제공하지 않는다. 반면, 한국은 아직 전반적인 리튬 배터리 안전 규정이 없고, 관련 법규도 미비하다. 2022년 발표된 전기저장시설 화재 안전성능 기준은 일반적인 내용만 포함하고 있다.

#### 4.3 잠수함용 LIB 안전성 설계 현황

방위사업은 계획부터 실제 도입까지 수년이 소요되기 때문에, 4.1절에서 언급한 학계 연구 단계의 최첨단 소재는 현재 건조 중인 장보고-III Batch-II에 적용되지 않았다. 하지만 열폭주의 근본적 차단 대책 중 하나인 과충전 방지 장치(OSD)를 비롯하여  $T_1$ 과  $T_2$ 를 증가시키기 위한 세라믹 코팅 분리막(CCS), 안전 기능층(SFL)과 같은 상용 개발기술은 셀 단위에서 이미 적용되고 있다. 특히 잠수함 탑재용 LIB 시스템은 운용 환경특성을 고려하여 민수용보다 안

전기준을 더욱 향상시키고 폭발 및 화재 위험을 근본적으로 제거하도록 설계되었다[13-15]. 잠수함 탑재용 LIB 시스템은 Table 1과 같이 총 5단계의 계층 구조로 이루어져 있으며, 단계마다 관리장치와 안정성을 위한 설계가 적용되었다. 특히 모듈 단계에서는 셀 내부 단락 및 화재 확산 차단 등에 특화된 안전 강화 설계를 도입하여 절연 성능, 보호 협조 기능, 셀 안정성, 고장진단 등 4대 분야에 중점을 둔 다중 안전장치를 도입했다.

또한, 잠수함의 LIB 그룹은 선체 하부에 배치되므로 해수 노출 시 방전 및 발열, 전류 누설로 인한 폭발과 화재 위험 가능성이 있다. 이를 방지하기 위해 절연 밀폐 성능을 강화하고 다중 안전장치를 적용하였다. 모듈은 6면을 막는 압력용기로 설계되어 화염을 막고, 고온에도 견디는 STS 소재를 사용했다. IP44 방진 설계를 적용해 화염이 구조물 내부로 전이되지 않도록 했다. 또한, 8 kVdc 내전압 성능의 절연지를 개발해 염수와의 전류 누설을 줄였으며, 모듈 내부 단락 보호 퓨즈/BMS 통신 이중화/고속 차단 장치 등을 통해 안전성을 강화하고, 특수 밸브 시스템 및 밀폐 구조를 도입하여 외부 화재 확산 방지 구조를 적용하였다. 그리고 과충전·과방전, 단락, 고온·고압 노출, 연소, 염수 침수 등과 같은 극한 상황에서의 안전성 시험을 통해 국제 기준을 만족하는 성능을 입증하였으며, 국제공인규격(MIL, ISO, IEC 등)에 따라 모듈의 전기적 성능, 충격, 온·습도, EMI/EMC에 대한 성능을 입증하여 신뢰성을 확보하였다.

이외에도 LIB의 화재 특성을 고려하여, 특정 셀에

화재가 발생해도 주위로 확산하지 않도록 최적 소화설비 기술이 잠수함에 적용되었다. 익히 알려진 바와 같이 일반적인 소화 방식으로는 LIB/ESS의 리튬 화재 진압이 어려워, LIB 화재전용 소화약제에 대한 다양한 연구가 진행된 바 있는데, 현재 성능이 인정된 소화약제로는 F-500 EA(HCT) 및 Novec-1230(3M) 등이 있다. 잠수함 탑재 LIB 트레이 내부에는 특수 소화 시스템이 적용되어, 일정 온도 이상이 되면 트레이 상단 커버에 부착된 스티커 형태의 소화 시트에서 Novec-1230이 분출되어 초기 화재를 진압한다. 이 소화약제는 나노 크기의 입자를 가진 마이크로 두께의 캡슐 형태로, 냉각 및 억제 소화가 가능하다. 또한, 셀 사이에는 운모 스페이서가 적용되어 열전도가 최소화되도록 설계되었다[13].

이러한 잠수함 탑재용 LIB는 삼성 SDI에서 셀 24개가 직렬로 구성된 트레이 단계까지 제작되었으며, 모듈/스트링/그룹 및 체계 통합은 한화디펜스에서 주관하였다. 이후 실 구동 환경에서 그룹 단위의 LIB 안전성 시험은 한국전기연구원에서 육상 기반 통합 시험 플랫폼(land-based test site, LBTS)을 활용하여 진행되었다. 시험결과보고서의 세부내용은 공개되지 않았으나, 총 19개 항목에 대한 시험 결과를 ① 기능, ② 연동성능, ③ 외부고장에 대한 안정성 측면에서 검토하여 29건의 개선·보완사항이 식별되었다. 이 중 6건은 탐색개발 단계에서 보완되었고, 23건은 함건조개발 단계에서 개선 검토가 추진되었다. 이를 기반으로 잠수함용 LIB 체계는 TRL 6를 통과하여 함건조개발 단계로 진입하였다[16].

**Table 1.** Configuration of submarine-mounted LIB

Div.	Configurations	Capacity (kWh)	Voltage (Vdc)	Major safety device
Unit cell	-	-	3.68	OSD, CCS, SFL, safety fuse/vent, AI case
Tray	Cell 24EA (serial connection)	-	88.3	Dual surveillance system, hybrid busbar, automatic fire suppression extinguishing agents
Module	Tray 8EA (serial connection)	80	706.6	Closed structure, multi-fuse, relay, module management system
String	Module 10EA (parallel connection)	800	706.6	Short-circuit fault current limiter, string management system
Group	String 14EA (parallel connection)	11,200	706.6	Sealed rack structure, IP44 standard dustproof/waterproof design

## 5. 결론

본 연구에서는 LIB의 기본 개념, 열폭주 메커니즘, 해상 사고 사례를 조사하고, 열폭주 개선 연구와 잠수함용 LIB 시스템의 안정성 설계 현황을 분석하였다. 잠수함용 LIB는 전기차용과 달리 다층 안전장치가 도입되어, 가혹한 검증 시험을 통과해 모든 안전 기준을 충족한다. 우리나라의 LIB 및 ESS 기술은 세계적인 수준으로, 안정성 확보에 큰 제한사항은 없다고 본다. 그러나 LIB 열폭주로 인한 사고가 빈번해 운용자들의 불안감이 높아지고 있으며, 특히 잠수함 처럼 밀폐된 공간에서 발생하는 리튬전지 폭발은 인명 피해뿐 아니라 작전 실패와 국가 안보 위협 등 심각한 결과를 초래할 수 있다. 따라서 LIB의 열폭주 방지 연구와 안전성 확보를 위해 지속적인 연구개발, 엄격한 안전 관리, 그리고 승조원 교육 등을 통해 무기체계의 안전 운영에 힘써야 한다.

## 참고문헌

- [1] 방위사업청 보도자료, “장보고-III 배치(Batch)- II 2번함 건조계약 체결,” Available online: <https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156470382> (accessed on 17 July 2024).
- [2] 연합뉴스, “화성 화재장소 ‘군 납품 리튬전지’ 보관장소...폭발위험 제기돼와,” Available online: <https://www.yna.co.kr/view/AKR20240625083300530> (accessed on 17 July 2024).
- [3] Wu, Feixiang, Joachim Maier, and Yan Yu. “Guidelines and trends for next-generation rechargeable lithium and lithium-ion batteries,” *Chemical Society Reviews* 49.5 (2020): 1569–1614.
- [4] “How a lithium-ion battery works,” Argonne National Laboratory, CC BY-NCSA 2.0, Available online: <https://www.flickr.com/photos/argonne/5029455937/in/photostream/> (accessed on 23 July 2024).
- [5] Hu, Xingjun et al. “Advancements in the safety of Lithium-Ion Battery: The trigger, consequence and mitigation method of thermal runaway,” *Chemical Engineering Journal* (2024): 148450.
- [6] Chen, Yuqing et al. “A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards,” *Journal of Energy Chemistry* 59 (2021): 83–99.
- [7] Feng, Xuning et al. “Mitigating thermal runaway of lithium-ion batteries,” *Joule* 4.4 (2020): 743–770.
- [8] Yang, Shi-Jie et al. “Thermally stable polymer-rich solid electrolyte interphase for safe lithium metal pouch cells,” *Angewandte Chemie* 134.51 (2022): e202214545.
- [9] Luo, Yang et al. “Self-actuating protection mechanisms for safer lithium-ion batteries,” *Journal of Energy Chemistry* (2024).
- [10] 해양한국, “해사업계, 선박 내 전기차 화재 리스크 커져 ‘우려’.” Available online: <https://www.monthlymaritimekorea.com/news/articleView.html?idxno=50703> (accessed on 18 July 2024).
- [11] Defense Daily. “USSOCOM Ends ASDS Effort, Requests Funds For New Submersible Effort.” Available online: <https://www.defensedaily.com/ussocom-ends-asds-effort-requests-funds-for-new-submersible-effort/navy-usmc/> (accessed on 18 July 2024).
- [12] NAVSEA S9310-AQ-SAF-010, “Technical Manual for Navy Lithium Battery Safety Program Responsibilities and Procedures,” 2020.11.03
- [13] 김범석, 손승현, 강석중. “잠수함 추진용 리튬이온전지 충방전 특성 및 안전성 확보를 위한 실험적 연구,” *대한조선학회 논문집* 58.4 (2021): 225–233.
- [14] 연제길, 류지훈. “민수용 ESS 화재사례를 고려한 잠수함용 리튬전지체계 안전성 설계 및 검증,” *Journal of the KNST* 6.3 (2023): 298–302.
- [15] 연제길, 류지훈. “한국형잠수함 리튬전지모듈 소화장치 개발 및 실증 연구,” *Journal of the KNST* 7.1 (2024): 57–60.
- [16] 한국전기연구원 연구분야, “전기추진시스템연구센터 대표성과,” Available online: [https://www.keri.re.kr/html/kr/sub02/sub02\\_02140202.html](https://www.keri.re.kr/html/kr/sub02/sub02_02140202.html) (accessed on 23 July 2024).