



Received: 2023/08/05  
Revised: 2023/08/21  
Accepted: 2023/09/11  
Published: 2023/09/30

**\*Corresponding Author:**

**Ji-Hoon Ryu**

Dept. of Defense Acquisition Program,  
Kwangwoon University,  
Hwado Hall 204, 20 Kwangwoon-ro, Nowon-gu,  
Seoul 01897, Republic of Korea  
Tel: +82-2-2079-5547  
E-mail: parantz@gmail.com

# 민수용 ESS 화재사례를 고려한 잠수함용 리튬전지체계 안전성 설계 및 검증

## Safety Design and Verification of Lithium Ion Battery System for Submarine Considering Commercial ESS Fire Accident Cases

연제길, 류지훈\*

광운대학교 방위사업학과 박사과정

Jaegil Yeon, Ji-Hoon Ryu\*

Ph.D. candidate, Dept. of Defense Acquisition Program, Kwangwoon University

**Abstract**

대부분의 재래식 잠수함은 스노클 없이 보다 오랜 시간 동안 잠항하기 위해 축전 용량 증대에 노력하고 있다. 국내에서는 최근 건조 중인 장보고-III Batch-II급의 경우 축전 용량 증대를 위해 리튬전지를 탑재할 예정이다. 리튬전지는 납축전지에 비해 대용량의 에너지를 저장할 수 있고 내구성은 물론 유지보수 측면에서도 유리하지만, 액체 전해질을 사용하는 만큼 온도 변화로 인한 팽창이나 외부 충격에 의한 누액 등 전지 손상 시 위험성이 높은 편이다. 본 연구는 이러한 측면에서 대량의 리튬전지를 잠수함이라는 특수하고 한정된 공간에서 안정적으로 운용할 수 있도록 안정성 설계방안과 검증 결과를 제시한다.

Most conventional submarines are trying to increase their storage capacity to stay submerged for longer periods without a snorkel. In Korea, the Jang Bogo-III Batch-II class, which is currently under construction, will be equipped with lithium batteries to increase storage capacity. Compared to lead-acid batteries, lithium batteries can store large amounts of energy and are advantageous in terms of durability as well as maintenance. In this respect, this study presents a safety design plan and verification results so that a large amount of lithium batteries can be stably operated in a special and limited space such as a submarine.

**Keywords**

리튬전지(Lithium Ion Battery),  
안전성 설계(Safety Design),  
안전성 검증(Safety Verification),  
잠수함(Submarine)

**Acknowledgement**

이 논문은 2023년도 한국해군과학기술학회  
하계학술대회 발표 논문임.

### 1. 서론

최근 환경에 대한 범세계적인 관심과 각종 규제 증가에 따라 지상의 전기자동차에 이어 해양에서도 탄소배출이 없는 전기선박이 주목 받고 있다. 우리 정부도 선박 배출 온실가스 70% 저감기술 확보를 위한 그린십(Green Ship)-K 정책을 추진 중이며, 이 정책에 따라 2030년까지 관공선 388척, 민간선박 140척 등 총 528척을 친환경 선박으로 교체할 예정이다.

자동차나 선박은 통상적으로 장거리를 이동하므로 대용량의 효율적인 에너지 저장장치가 필요한데, 일반적으로 리튬이온전지(이하 리튬전지)가 많이 사용되고 있다. 리튬전지는 Texas 대학의 John B. Goodenough가 1970년대에 리튬 원소의 이온을 저장할 수 있는 티타늄 이황화 물질을 발견한 이래로 수많은 발전과정을 거쳐 왔다. 특히 Meijo 대학의 Yoshino Akira가 흑연을 리튬전지 음극재로 제시하여 대대적으로 상용화된 이후 휴대전화부터 전기차에 이르기까지 우리 주변의 다양한 생활영역에서 폭넓게 활용되고 있다.

많이 알려진 바와 같이 우리나라는 리튬 일차/이차전지 개발 및 제조에 있어 높은 경쟁력을 가지고 있고, 몇몇 국내 선두기업은 전기자동차용 전지를 포함해 대용량 에너지 저장체계(ESS)용 리튬전지 기술 분야에서 두각을 나타내고 있다. 이러한 국가적 기술 역량에 힘입

어 국방 분야에서도 리튬전지가 다양한 무기체계에 적용되는 추세인데, 그중에서도 가장 선도적으로 리튬전지를 도입하는 곳이 바로 해군 잠수함이다.

현재 건조 중인 장보고-III Batch-II 잠수함은 재래식 잠수함 중 전세계적으로 일본에 이어 역대 두 번째로, 국내 잠수함으로는 최초로 납축전지 대신 리튬전지를 도입한다. 기존의 잠수함들이 사용한 납축전지에 비해 대용량의 에너지를 저장할 수 있는 리튬전지는 잠수함의 위치 노출에 취약한 스노클 항해를 최소화하고, 효율성과 내구성에서도 유리하여 전략적, 작전적 측면에서 두루 우수한 성능을 발휘할 것으로 기대된다.

다만 이렇게 특정 플랫폼에 대용량으로 체계화되어 탑재되는 리튬전지는 높은 효율성과 쉬운 제어를 목적으로 대개 유기용제를 전해질로 사용하는데, 전지팩의 온도 변화로 인한 팽창이나 외부 충격에 의한 누액 시 화재(폭발) 위험성이 높은 편이다. 따라서 해상에서 단독으로 완벽히 고립되어 활동하는 해군함정에서 리튬전지체계를 운용하기 위해서는 필연적으로 안전성이 중요시된다. 선박의 특성상 화재(폭발) 시 해상에서 단독으로 대응이 어렵고, 특히 밀폐된 공간에 장비와 인원이 공존하는 잠수함의 경우 수상함에 비해 더욱 심각한 피해가 예상되므로 가장 엄정한 기준 아래 안전성이 보장되어야 한다.

본 연구는 이러한 측면에서 잠수함이라는 특수하고 한정된 공간에서 리튬전지를 안정적으로 운용할 수 있도록 민수용 ESS 화재사례 분석을 바탕으로 한 잠수함용 리튬전지체계의 안정성 설계방안과 검증 결과를 제시한다.

## 2. 리튬전지체계 연구개발 개요

본 연구에서 대상으로 하는 잠수함용 리튬전지체계는 정부투자자 2016년부터 2018년까지 기본설계(탐색개발), 2019년부터 2022년까지 상세설계(체계개발)를 거쳤으며, 현재 건조 중인 장보고-III Batch-II 잠수함에 탑재될 예정이다. 국내에서 처음으로 독자 개발하는 만큼 함정 탑재 이전에 성능을 검증하기 위하여 LBTS(land based test system/site: 육상 시험체계 및 기지)를 별도로 구성하고 시제품을 제작하여 다양한 성능시험을 수행하였으며, 성능과 더불어 안전성이 검증되어 2023년 현재는 함정에 실제로 탑재할 리튬전지체계가 생산되고 있다.

## 3. 리튬전지체계 구성

### 3.1 리튬전지체계

리튬전지체계는 복수의 리튬전지그룹으로 구성되며, 함정 내부에 분할되어 그룹 단위로 병렬 배치된다. 이는 하나의 리튬전지그룹이 차단되더라도 다른 리튬전지그룹이 동작할 수 있도록 독립적으로 구성하기 위함이다. 리튬전지체계를 구성하는 관리장치는 리튬전지그룹 단위 상태를 감시하는 그룹관리장치, 리튬전지스트링 단위 상태를 감시하는 스트링관리장치, 리튬전지모듈 상태감시 및 보호기능을 가진 모듈전력관리장치로 구성된다.

### 3.2 리튬전지그룹

리튬전지그룹은 Fig. 1과 같이 리튬전지스트링, 그룹관리장치, 그룹 전기배선, 단락전류 제한장치로 구성된다. 리튬전지스트링은 병렬로 구성되며, 그룹관리장치를 통해 리튬전지그룹의 각종 상태정보를 감시한다. 그룹관리장치는 리튬전지그룹 단위의 상태를 감시하고, 리튬전지스트링 단위의 상태를 감시하는 스트링 관리장치 및 리튬전지모듈을 통합적으로 관리하게 된다. 그룹 전기배선은 각종 전원공급 및 통신용 전기배선으로 구성되며, 단락전류 제한장치는 단락 발생 시 리튬전지스트링 및 함정의 배전반으로 과도한 고장전류가 유입 및 유출되지 않도록 제한하고 전력을 완전히 차단하는 보호기능을 수행한다.



Fig. 1. 리튬전지그룹 구성

### 3.3 리튬전지스트링

리튬전지스트링은 복수의 리튬전지모듈을 병렬로

구성하며 리튬전지스트링 내 각각의 리튬전지모듈은 버스바로, 전원공급 및 통신은 전기배선으로 연결된다. 버스바는 리튬전지모듈 간 병렬 연결 및 충·방전 시 전력이 이동하는 전기적 통로 역할을 수행하며, 전기배선은 스트링 내 제어전원 공급을 위한 전기배선과 모듈전력관리장치 통신용 전기배선으로 구성된다.

### 3.4. 단락전류 제한장치

단락전류 제한장치는 리튬전지스트링 내외부 단락 사고 발생 시 리튬전지스트링의 단락전류를 제한하기 위한 각종 저항, 전자식스위치, 제어기, 전류센서 등으로 구성된다.

### 3.5. 리튬전지모듈

리튬전지모듈은 복수의 셀트레이가 직렬로 연결되며, 각각의 셀트레이 간 고전압을 연결하기 위한 버스바 및 통신을 위한 전기배선, 전력개폐를 위한 모듈전력관리장치, 비상시 소화를 위한 쿼커플링, 호스조립체로 구성된다.

모듈 버스바 및 전기배선은 리튬전지모듈 내부의 복수의 셀트레이 간 전기적 연결 및 셀트레이 내부 셀감시장치의 상태정보 신호를 모듈전력 관리장치로 전송하는 기능을 수행하며, 모듈전력관리장치는 퓨즈, 릴레이, 제어보드 등으로 구성되어 리튬전지모듈 단위의 과전류, 과온 등 고장 발생 시 리튬전지모듈 단위 전력차단을 수행한다. 쿼커플링, 호스조립체는 리튬전지모듈에 열폭주 발생 시 외부 소화수를 공급하여 열폭주 확산을 방지하는 기능을 수행한다.

## 4. 민수용 ESS 화재사고 현황 및 시사점

### 4.1. 민수용 ESS 화재사고 현황

산업통상자원부에서 출범한 민관합동 ESS 화재사고 원인조사위원회 발표 자료[1]와 이후 집계된 통계자료[2]에 따르면 Fig. 2와 같이 2017년부터 2022년까지 총 39건의 화재사고 발생으로 약 600 MWh 이상의 배터리가 소실되었다. 전체 화재사고의 약 80%는 태양광 및 풍력 등 신재생 에너지 연계형 ESS에서 발생하였으며, 이는 산지나 해안가 등 불리한 설치환경

과 매일 DOD<sup>1)</sup> 100% 충·방전이 반복되는 가혹한 운용환경의 영향 때문으로 파악되었다.

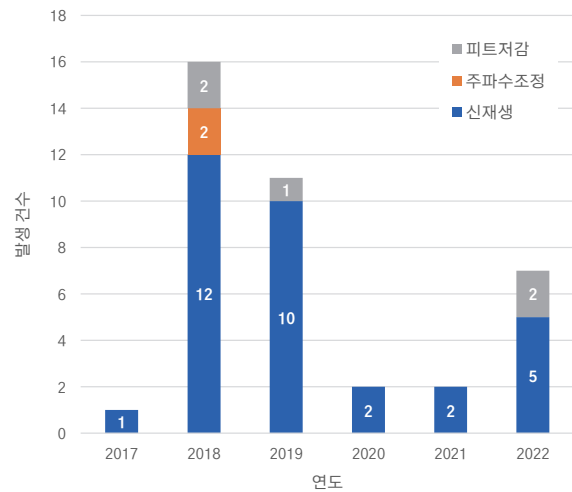


Fig. 2. 연도별 민수용 ESS 화재사고 현황

### 4.2. 민수용 ESS 화재사고 시사점

민관합동 ESS 화재사고 원인조사위원회는 원인조사 및 분석 결과와 이에 대한 대책을 총 2회에 걸쳐 Table 1과 같이 공시한 바 있다.

Table 1. 민수용 ESS 화재사고의 원인과 대책

구분	1차 조사위원회	2차 조사위원회
원인	배터리 보호체계 미흡	배터리 이상
	운용환경 관리 미흡	외부 이물질의 접촉
대책	설치 부주의	충전율 하향 (옥내 80%, 옥외 90%)
	주요 부품 제조기준 수립 설치 기준 강화	옥내 설비의 옥외 이전
	온/습도, 먼지 등 관련 운용관리 기술 신설	ESS 운영데이터 별도 보관
	소방 기준 신설	

공시된 자료에 따르면 민수용 ESS 화재사고의 주요 원인은 아래와 같이 정리할 수 있다.

<sup>1)</sup> DOD(depth of discharge): 배터리가 얼마나 방전되었는지를 표시하는 지표로서 '방전심도' 또는 '방전깊이'를 의미하며, 배터리 수명과 관련이 깊다.

첫 번째는 먼지나 수분, 접지 잡음과 서지 전압에 기인한 고전압의 절연파괴 및 단락과 특정 모듈의 내부 단락 시 나머지 모듈에 과도한 단락전류가 유입되는 다병렬 구성의 위험성이다. 다수의 화재사고가 최대 전압으로 충전 완료 후 대기 중인 배터리에서 발생한 만큼 이러한 위험성은 가장 주요한 원인으로 지목된다. 특히 태양광·풍력 등 신재생 에너지 연계형 ESS는 보통 팩 40여 개가 병렬 연결되어 있고, 공통 접지를 적용한 경우가 많아 이러한 위험성에 상당히 취약하다.

두 번째는 원가절감에 따른 보호장치(퓨즈) 축소 등 체계적 취약성이다. 중소 배터리팩 업체 난립과 복잡한 경쟁 구도 속에서 매년 원가절감이 가속화됨에 따라 최신 도입 장비일수록 보호장치가 줄어들어 기현상이 나타나고 있으며, 실제로 14건 이상의 화재사고가 운용 기간 1년 이하의 최신 제품에서 발생하였다.

세 번째는 ESS가 산지나 해안가 등 일교차로 인한 결로와 다량의 먼지에 노출되기 쉬운 열악한 환경에 설치되는 반면, 이에 대한 충분한 대비가 부족한 체계적 불안전성이다. 민수용 ESS는 유지보수 및 모니터링 편의성, 원가절감에 의한 오픈형 랙을 주로 사용하여 결로와 먼지에 취약하며, 특히 조립식 패널이나 컨테이너에 전체 체계를 설치하여 구조적으로 내(耐)환경성을 갖추지 못한 경우가 많았다.

민수용 ESS 화재사고 이후 각 배터리 제작업체에서는 포장용지에 충격 감지 센서를 부착하여 제품 설치 전까지 배터리에 대한 품질을 보장하는 체계를 마련하고, 외부 환경요인에 의한 스트레스가 ESS에 미치는 영향을 조기에 식별할 수 있도록 별도의 모니터링 체계를 추가하였다. 또한 화재사고 발생 시 확산을 방지하기 위하여 모듈 단위로 소화약제 또는 소화수를 직접 분사하는 체계와 단열 스페이서 등을 적용하였다.

### 5. 잠수함용 리튬전지체계 안전성 설계

잠수함용 리튬전지체계는 민수용 ESS 화재사례를 고려하여 안전성을 강화하고 군사용에 적합하도록 민수용 ESS의 보완사항은 물론, Table 2와 같이 모듈 절연 및 모듈 내부 단락, 화재 전이 차단에 특화된 안전성 설계방안을 적용하였다. 또한 화재 안전성을 특히 강화하기 위하여 Table 3와 같이 절연 성능, 보호협조 기능, 셀 안정성, 고장진단 분야를 4대 안전성 설계 중점 사항으로 설정하고 다중 안전장치를 구현하였다.

Table 2. 안전성 설계 현황

화재 원인	미흡 사항	안전성 설계방안	
원인	이송 시 셸트레이 손상	셸트레이 충격 감지 센서	
	설치 불량 (오결선, 파손)	모듈 단위 성능인증 시험 및 출하 검사	
	모듈 단위 절연/내전압 사양 및 검사 미흡		모듈 절연 시트 적용
			내전압 성능시험
			절연저항 전수 확인
	모듈 절연 감시 기능 없음		ON 시퀀스/hot swap 절연저항 측정
		그룹 절연저항 상시 감시	
먼지/수분/곤충 유입		방진·방수 처리로 유입 차단	
대책	고전압/전류 차단 시 릴레이 폭발 → 버스바 이탈 → 1/2차 지락 → 모듈 내부 절연파괴	모듈전력관리장치 절연 강화 (릴레이 및 버스바 절연커버 적용)	
	모듈 내부 퓨즈 미적용	트레이 내부 다중 퓨즈 적용	
	고속 단락전류제한 또는 차단 미흡 (고속 차단이 되지 않아 퓨즈가 손상되는 동안 셀 발열량 과대)	모듈전력관리장치 고속퓨즈 적용 및 모듈 단위 단락전류 제한장치 적용 (단락 후 특정 시점 전류 제한)	
제어전원 상실(정전) 후 복귀 시 전류 쏠림 및 돌입전류 발생		함정 전원 이중화 및 UPS 백업 설계(무정전)	
		제어전원 상실(정전) 후 복귀 시 sequence 보완으로 전류 쏠림 및 돌입전류 차단	
BMS 오류	BMS 통신 오류 시 전압, 전류, 온도 이상 차단 불가	통신 이중화 적용	
		셀 분리막 강화 (민수용: PP-PE-PP, 녹는점 165 °C) (잠수함용: 세라믹-PE, 녹는점 200 °C)	
화재 전이 취약	1셀 발화시 전체 체계로 화재 전이	특수 소화 체계 적용	
		밀폐형 모듈 (소화약제, 소화수 손실 최소화로 전이 방지 극대화)	
		외함 재질을 녹는점이 높은 강재로 사용	

**Table 3.** 안전성 설계 중점사항

구분	다중 안전장치 구현 세부내용
절연 성능 강화	모듈 구조물 내부 절연 시트 및 도료 적용
	절연저항 / 내전압 시험기준 강화
	셀트레이 외부 절연파괴 대응 (셀트레이 내부 절연파괴 대책 강구)
	모듈전력관리장치 내 단락방지장치 적용
보호협조 기능 강화	스트링 단락전류제한장치 적용
	리튬전지모듈/스트링/그룹 레벨 단락 안전성 검증 시험
	보호협조 modelling & simulation을 통한 기능 최적화
셀 안전성 강화	과충전 전압 차단 기능 강화
	과충전 전류 차단 기능 강화
	가스 안전 방출 기능 강화
	셀 과열에 대한 안전성 강화
	셀 내부 단락에 대한 안전성 강화
고장진단 SW 강화	리튬전지모듈 절연저항 불량 감지
	비정상 전압 감지
	비정상 전류 감지
	고온 운용기준 초과 감지
	저온 운용기준 초과 감지

### 6. 리튬전지체계 안전성 검증

리튬전지체계는 Table 2의 안전성 설계방안을 기준으로 각종 안전장치가 구현되었으며, 리튬전지모듈, 그룹관리장치, 단락전류제한장치, 스트링관리장치 등 주요 구성품 단위로 안전성 검증시험을 수행하였다.

검증 과정에서 셀트레이 열선과 외부 단락, 셀트레이 관통 시 열폭주 전이 상황을 다양하게 모사하여 가능한 모든 환경에서 안전장치가 정상적으로 작동되거나 유효한지를 확인하였으며, 특정 안전장치 외에도 셀 및 셀트레이 간 이격거리가 주어진 조건 하에서 최적의 열전도 차단 특성을 가지는지 등 최적화 적정성 차원의 검증도 병행하여 이상 없이 완료하였다.

또한 가장 마지막 단계의 화재 대응 수단인 특수 소화 체계의 경우 선행 안전장치의 작동 또는 유효 여부와 관계없이 단독으로 화재가 발생한 리튬전지모듈의 열폭주와 인접 모듈로의 전이를 차단하는 것으로 확인되었으며, 소화장치 및 구성품의 미손상, 미변형은 물론, 장시간 경과 후에도 리튬전지의 완전 방전과 기타 이상 반응이 없음을 확인하였다.

### 7. 결론

본 연구에서는 민수용 ESS 화재사례를 고려하여 잠수함에 탑재되는 리튬전지체계의 안전성 설계방안과 검증 결과를 제시하였다.

연구 과정을 통해 도출된 잠수함용 리튬전지체계의 안전성 설계방안은 특수한 환경하에서 가장 높은 기준을 적용한 만큼 향후 다양한 무기체계에서 리튬전지 도입 시 안전성 확보를 위해 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

[1] Ministry of Trade Industry and Energy, “ESS Accident Cause Investigation Result and Safety Enhancement Measures,” Policy Briefing(www.korea.kr), 2019. 6.11.  
 [2] Jung, J., Lim, M., Kim, N., and Kim, J., “A Case Study on Domestic Fire Accidents of Li-ion Battery ESS for Safety Improvement,” KSES Annual Spring Conference, 2022, p. 163.