



Received: 2024/01/20
Revised: 2024/02/05
Accepted: 2024/03/30
Published: 2024/03/31

*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

Abstract

2019년부터 건조 중인 장보고-III Batch-II급 잠수함은 축전지로 리튬이온전지를 탑재할 예정이다. 리튬이온전지는 다른 2차 전지에 비해서 에너지 밀도와 기전력이 높고 충·방전이 쉬운 장점이 있지만, 물리적 손상이나 온도 상승, 화학적 결합에 따른 열 폭주(thermal runaway) 현상으로 인한 폭발 및 화재 위험성을 내재하고 있다. 따라서 해상에서 단독으로 활동하는 잠수함에서 대량의 리튬전지를 운용하기 위해서는 효과적인 화재 안전장치를 필요로 한다. 본 연구는 이러한 측면에서 대량의 리튬이온전지를 잠수함이라는 특수하고 한정된 공간에서 안정적으로 운용할 수 있도록 화재 발생 시에도 완벽하게 통제 가능한 모듈단위 소화장치의 개발 현황 및 실증 결과를 소개한다.

The Jang Bogo-III Batch-II class submarine, which has been under construction since 2019, is scheduled to be equipped with lithium-ion batteries as storage batteries. Lithium-ion batteries have the advantage of having higher energy density and electromotive force compared to other secondary batteries and are easy to charge and discharge, but they have the inherent risk of explosion and fire due to physical damage, temperature rise, and thermal runaway due to chemical defects. Therefore, in order to operate a large amount of lithium batteries in a submarine that operates isolated at sea, an effective fire safety device is required. In this regard, this study introduces the development status and field demonstration results of a module-based fire extinguishing device that can be completely controlled even in the event of a lithium-ion battery fire to enable stable operation of large quantities of lithium-ion batteries in Submarine.

Keywords

잠수함(Submarine), 리튬전지(Lithium Ion Battery), 소화장치(Fire Extinguishing Device), 안전성 검증(Safety Design)

Acknowledgement

이 논문은 2023년도 한국해군과학기술학회 동계학술대회 발표 논문임.

한국형잠수함 리튬전지모듈 소화장치 개발 및 실증 연구

Development and Demonstration Study on Fire Extinguishing Device for KSS-III Batch-II Submarine Lithium-ion Battery Module

연제길, 류지훈*

광운대학교 방위사업학과 박사과정

Jaegil Yeon, Ji-Hoon Ryu*

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

1. 서론

원자력 잠수함을 제외한 대부분의 재래식 잠수함은 수중에서 정속한 운항을 위해 축전지를 주 동력원으로 하는 추진 계통을 운용하고 있다. 국내에 현존하는 잠수함인 장보고-I, 장보고-II급 및 장보고-III Batch-I급 잠수함의 경우 축전지로 납축전지를 탑재하고 있지만, 2019년부터 건조 중인 장보고-III Batch-II급 잠수함(이하 '한국형잠수함')의 경우 국내 최초로 리튬이온전지(이하 '리튬전지')를 탑재할 예정이다.

리튬전지는 잘 알려진 바와 같이 다른 2차 전지에 비해서 에너지 밀도와 기전력이 높고 충·방전이 쉽다는 장점이 있지만, 물리적 손상이나 온도 상승, 화학적 결합 등에 따른 열 폭주(thermal runaway) 현상으로 인한 폭발 및 화재 위험성을 내재하고 있다는 단점도 있어 주의가 필요하다[1]. 따라서 해상에서 단독으로 완전히 고립되어 활동하는 잠수함에서 대량의 리튬전지를 안전하게 운용하기 위해서는 폭발 및 화재 위험성을 근본적으로 차단할 수 있어야 하고, 어떠한 위험 상황에도 효과적으로 대응할 수 있는 다중 안전장치가 반드시 갖춰져야 한다.

본 연구는 이러한 측면에서 대량의 리튬전지를 잠수함이라는 특수하고 한정된 공간에서 안정적으로 운용할 수 있도록 구현된 다중 안전설계 현황과 예측할 수 없는 원인에 의해 화재가 발생하더라도 완벽히 통제가 가능한 모듈단위 소화장치의 개발 현황 및 현장 실증 결과를 소개한다.

2. 본론

2.1 한국형잠수함 리튬전지체계 구성

한국형잠수함의 리튬전지체계는 Fig. 1과 같이 선체의 무게중심 등 균형을 고려하여 전후부에 분할 배치되며, 그룹 단위로 병렬 구성되는데 이는 하나의 리튬전지그룹이 차단되더라도 다른 리튬전지그룹이 동작할 수 있도록 독립적으로 구성하기 위함이다.



Fig. 1. 리튬전지그룹 구성

리튬전지그룹 하위에는 리튬전지모듈을 병렬로 연결한 리튬전지스트링과 관리장치로 구성되어 있으며, 특히 관리장치는 대용량의 리튬전지를 효율적으로 운영하고 그 상태를 세밀하게 감시할 수 있도록 리튬전지그룹 단위 상태를 감시하는 그룹관리장치, 리튬전지스트링 단위 상태를 감시하는 스트링관리장치, 리튬전지모듈 단위 상태를 감시하는 모듈전력관리장치로 각각 세분되어 있다.

리튬전지모듈은 복수의 셀 트레이가 직렬로 연결되며, 주요 구성품으로는 각각의 셀 트레이 간 고전압을 연결하기 위한 버스 바 및 통신을 위한 전기배선, 전력개폐를 위한 모듈전력관리장치, 비상시 소화수 공급을 위한 쿼 커플링, 호스조립체가 있다. 리튬전지모듈에는 다양한 안전장치 및 기능이 내장되어 있는데, 이 중 모듈전력관리장치는 퓨즈, 릴레이, 제어보드 등으로 구성되어 모듈 내 과전류, 과온 등을 실시간 감시하고 고장 발생 시 모듈 단위로 전력 차단을 수행한다. 또한 리튬전지모듈 케이스 상단의 쿼 커플링과 호스 조립체는 리튬전지모듈에 열 폭주 발생 시 외부 소화수를 모듈 내부로 직접 공급하여 열 폭주 확산을 방지하는 기능을 수행한다.

2.2 한국형잠수함 리튬전지체계 안전성 설계

한국형잠수함의 리튬전지체계는 화재에 대한 안전성을 강화하기 위하여 Table 1과 같이 절연 성능, 보호협조 기능, 셀 안정성, 고장진단 기능을 강화하는 다중 안전장치를 구현하였다.

Table 1. 안전성 설계 현황

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

2.3 리튬전지 화재 위험성

리튬전지 화재는 열기와 연기 그 자체로도 위험하지만, 연기 속에는 불화수소 등 약 20여 종의 독성 가스가 포함되어 이로 인한 중독사고 위험성도 상당히 높다. 독성 가스는 발화 후 수 분 이내에 대량으로 발생하는데, 국내 유통 중인 전기자동차의 단일 리튬전지 용량(평균 26.775 kWh)만으로도 최대 40 kg의 불화수소가 발생 가능한 것으로 알려져 있다[2]. 밀폐된 잠

수함의 특성상 화재 진압 이후에도 여전히 치명적인 위험요소가 잔류할 수 있는 것이다. 이를 고려할 때 대용량의 리튬전지를 운용하는 잠수함은 사고 시 상당한 피해가 발생할 것으로 예상된다. 따라서 잠수함에는 다양한 위험성에 대처 가능한 완벽한 화재 통제장치가 필요하다.

2.4. 리튬전지 화재 소화 방안

리튬전지는 통상 금속제 케이스나 커버로 덮여 있는 까닭에 보편적인 분말형 소화기로는 약제가 화원(火原)에 직접 침투하기 어렵고, 인접한 셀로의 연쇄적 화재 발생 가능성이 높아 소화수 살포로도 단시간에 진화하기 어렵다. 전기자동차의 경우 열 폭주가 발생한 이후 소화수 살포를 통해 진압하는 과정에서 내연기관 자동차의 약 100배에 달하는 100,000리터 가량의 물이 소비되는데, 이는 일반적인 119안전센터가 한 달에 사용하는 소화수의 양 또는 일반 가정의 2년간 소비하는 물의 양에 해당하는 막대한 소화 자원을 필요로 한다[3].

따라서 리튬전지 화재는 셀을 수조에 담가 화염을 제거하고, 잔여 에너지도 방전시켜 열 폭주를 억제하는 것이 가장 효과적인 소화 방법으로 판단된다.

2.5 한국형잠수함 리튬전지모듈 소화장치 개발

한국형잠수함의 리튬전지체계는 계층별로 다중 안전장치를 구현하여 모듈 단위의 열 폭주가 발생할 가능성은 현저히 낮지만, 예측 범위를 초과하는 미연의 상황에 대비해 모듈 케이스를 수조처럼 활용하여 모든 셀을 침수시키는 방식의 주수 소화장치를 개발하였다.

주수 소화장치는 이상 징후가 식별된 모듈에 운용자가 소화호스를 직접 연결하는 수동 방식을 채택하였는데, 전자적 제어를 통한 자동 방식 대비 운용성에서 불리하나 계통이 직관적이고 단순하여 무기체계에 필수적으로 요구되는 높은 신뢰성을 가지기 때문이다. 대신에 이를 고려하여 소화호스 체결부는 운용자가 신속하게 작업할 수 있도록 퀵 커플링 형태로 보완하였다.

주수 소화장치의 실제 운용은 특정한 셀의 온도가 65 °C를 넘거나 과충전 안전장치(OSD: overcharge

safety device)가 작동하면 소화호스를 해당 모듈의 퀵 커플링에 직접 체결하고, 이후 모듈 온도가 100 °C를 초과했을 때 잠수함을 수면으로 부상시켜 독성 가스를 외부로 배출하는 것으로 시작되며, 이후부터는 Table 2와 같은 절차를 따른다.

Table 2. 화재 소화장치 세부 운용절차

순서	세부 운용절차
1	해당 그룹 주배전반 차단기 개방 및 모듈 고전압 분리
2	외부 소화수 공급 호스 연결 및 밸브 개방
3	소화 완료 후 외부 소화수 공급계통 해제
4	이상 모듈 내 주수된 소화수 배출 및 건조
5	이상 모듈에 대한 점검

2.6. 성능시험 결과

리튬전지 소화장치 성능시험은 리튬전지모듈에 열 폭주 발생 시 주수 소화장치에 의한 화재 초기진압의 유효성을 확인할 목적으로 창원시 소재 한국전기연구원 내 방폭시험장에서 수행하였다. 모든 시험과정은 미국 내 열 폭주 화재확산 평가를 위한 표준 시험방법인 UL9540A의 열 폭주 유도방안을 준용하여 진행되었으며, 성능검증 기준은 주수 소화를 통해 인접 셀로 추가 열 폭주 전이가 없고, 주수에 의한 간접 사건이 발생되지 않도록 하는 것으로 설정하였다.

시험은 특정 셀에 필름 히터를 부착하여 인위적으로 가열하고, 해당 셀에 열 폭주 발생 시 모듈이 완전히 침수될 때까지 주수 후 인접 셀 및 모듈 전체로의 열 폭주 전이 여부를 확인하는 절차로 진행되었다.

먼저, 필름 히터가 부착된 셀을 가열하자 Fig. 2와 같이 표면온도 약 150 °C에서 venting(전지 표면이 개방되거나 터지는 현상)이 발생하였으며, 약 190 °C에서 thermal runaway(열 폭주)가 발생한 이후 약 1분 이내 최대 약 600 °C까지 급격하게 온도가 상승하였다.

그리고 이 시점에 해당 셀과 인접한 리튬전지모듈 케이스 내부 벽면에 대한 국부 온도를 측정된 결과 최대 약 210 °C까지 상승하였으나 주수 소화장치를 통한 소화수 투입 후 약 100 °C까지 온도가 하강하였으

며, 이후 2시간 동안 같은 수준을 유지하다 48시간 후 약 35 °C까지 냉각이 완료되었다.

냉각된 이후 리튬전지는 소화수에 의해 완전히 방전되었으며, 특이 이상반응은 발생하지 않았다.

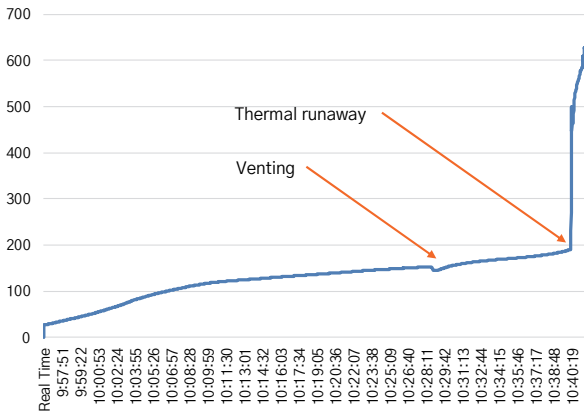


Fig. 2. 가열된 셀의 온도 변화

3. 결론

본 연구에서는 한국형잠수함의 안전성 설계현황과

리튬전지모듈 소화장치의 개발 및 성능 검증 과정을 설명하였다.

연구 과정을 통해 모듈 단위의 주수 소화방식은 리튬전지 화재 발생 시 셀의 열 폭주와 인접 모듈로의 열 폭주 전이를 효과적으로 차단할 수 있음을 확인하였다.

한국형잠수함에 적용된 리튬전지모듈 소화장치의 개발 및 실증 사례가 향후 대용량의 리튬전지를 탑재할 무기체계 플랫폼의 안전성 설계와 다양한 안전장치 개발의 이정표가 될 수 있기를 기대한다.

참고문헌

[1] Balakrishnan P. G., Ramesh, R., and Kumar, T. P., "Safety Mechanisms in Lithium-ion Batteries," *Journal of Power Sources*, 2006, Vol. 155, pp. 401-414.

[2] Oh, E., Min, D., Han, J., Jung, S., Kang, T., "Consequence Analysis of Toxic Gases Generated by Fire of Lithium Ion Batteries in Electric Vehicles," *Journal of the Korean Institute of Gas*, 2019, Vol. 23, No. 1, pp. 50-51.

[3] Yu, J., "A Study on Fire Characteristics and Fire Response Plans for Electric Vehicles," *Kyonggi University*, 2022, p. 30.