

전기차 해상운송량 증가에 따른 PCTC RO-RO 구역 전기차 배터리 화재 대응을 위한 연구

조장원* · 최윤원* · 채원성** · 손태원** · 김기선†
한국해양수산연수원(*†교수 · **교관)

A Study on Emergency Response to Battery Fires in RO-RO Area of PCTC According to the Increase in Maritime Transportation Volume of Electric Vehicles

Jang-Won CHO* · Yoon-Won CHOI* · Won-Seong CHAE** · Tea-Won SON** · Ki-Sun KIM†

Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology(*†professor · **instructor)

Abstract

The rapid increase in the production and distribution of electric vehicles (EVs) is driven by the global policies promoting the adoption of eco-friendly vehicles to regulate greenhouse gas and air pollutant emissions. As the maritime transport volume of EVs increases, the risk of electric vehicle fires in PCTC is increasing. A notable incident occurred in 2022 where a cargo area fire on a car carrier ship was caused by a thermal runaway of lithium-ion batteries in EVs, resulting in the vessel's combustion and sinking due to the failure of fire-fighting efforts. Such incidents highlight the growing risk of battery fires in the confined spaces of RO-RO cargo areas. Despite the increasing risk of battery fires in EVs transportation, there is a lack of research on fire suppression systems, emergency response procedures, and crew training specifically addressing the fire hazards in confined RO-RO cargo areas. This study aims to investigate the characteristics and response methods for battery fires in EVs, analyze fire incidents in the cargo areas of car carrier ships, identify necessary fire suppression equipment for battery fires in confined RO-RO cargo areas, develop emergency response procedures for crew members, and contribute foundational research materials for handling fire incidents occurring during the maritime transportation of EVs.

Key words : Fire emergency response, Electric vehicle, Battery fires, Lithium-ion battery(LIB), Ro-Ro ship

I. 서론

온실가스 및 대기오염물질 배출 규제에 대응하기 위해 각 국가에서 친환경 차량의 보급정책을 장려함에 따라 전기차의 생산 및 보급이 급속도로 늘고 있다. 2021년 국제에너지기구(IEA)에 따르면 글로벌 친환경 자동차 판매 대수는 2020년 299만대에서 2030년 2,243만대로 증가할 것으로 예상된다. 또한, 2022년 한국자동차산업협회에 따

르면 전기차의 보급이 빠르게 증가함에 따라 전기차의 해상운송량 수출량이 매년 증가하고 있다. 2023년 M/V Fremantle Highway호에 선적된 전기차의 리튬이온배터리 열 폭주에 의한 화재로 인해 선박이 전소되어 침몰한 사고가 발생하여 RO-RO 화물구역(Roll on Roll off, 이하 RO-RO 구역) 전기차 배터리 화재 위험성이 대두되고 있다.

전기차를 포함한 자동차는 국제해상위험물 규

† Corresponding author : 051-620-5842, kskim@seaman.or.kr

칙(International Maritime Dangerous Goods Code, 이하 IMDG Code)상 소포장 화물로 운송할 경우 위험화물로 분류되어 있다. 국제항해에 종사하는 자동차운반선(Pure Car & Truck Carrier, 이하 PCTC)은 국내법 및 국제해상인명안전협약(International Convention for the Safety of Life at Sea, 이하 SOLAS) 요건에 따라 RO-RO 구역 내에 일반 화물선과 같은 소화장치가 설치되어있으나, RO-RO 구역의 휘발성 연료유와 같은 위험물에 대한 추가 소화장치를 설치하지는 않고 있다. 지속해서 발생하고 있는 RO-RO 구역 내연기관 차량 화재 사고와 함께 전기차 해상운송량의 증가는 RO-RO 구역 내 전기차 배터리 화재 위험성을 증가시키고 있다. 특히, 전기차에 사용하고 있는 리튬배터리 화재는 배터리팩 내부의 화학반응에 의한 열 폭주에 의한 화재·폭발 사고로 선박이 침몰로 이어지는 사고사례가 보고되고 있다.

전기차 보급이 급속히 늘어남에 따라 ‘리튬이온배터리 화재 대응 방안의 실효성 분석을 위한 실 규모 화재진압실험(Lim et al., 2021)’ 및 ‘인접한 전기자동차의 화재 성상에 관한 실험 연구(Kim et al., 2022)’ 등 전기차 배터리 화재 대응 및 원인분석을 위한 다양한 선행연구가 이루어지고 있다. 현재 진행되고 있는 전기차 화재 대응에 관한 연구는 개방된 공간에 주차 중이거나 충전 중에 단독으로 발생하는 전기차 화재, 외부 열에 의한 리튬이온배터리(Lithium-ion Battery, 이하 LIB)의 화재 진행 양상에 관한 연구 등이 이루어지고 있다. 그러나 밀폐된 선박의 화물구역에 다수의 전기차를 적재한 상태에서 발생하는 전기차 화재 대응에 관한 연구는 거의 이루어지고 있지 않다. 밀폐구역 화재는 단시간에 화재구역에 열 축적 현상이 발생하고 플래시오버(Flash Over)현상, 역류(Back Draft) 현상에 의한 급속한 화재 확산 및 폭발 현상이 발생한다. RO-RO 구역에서 배터리화재발생 시 열 폭주 현상으로 소화 작업에 어려움이 발생할 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 PCTC의 RO-RO 구역과

같은 밀폐된 공간에서 발생하는 전기차 화재에 대응하기 위한 요소를 식별하기 위해 배터리 화재의 특성과 선박화재의 특성을 비교·분석하였다.

II. 연구 방법

선내화재 대응은 가연물의 특성 및 소화 방법, 적절한 소화설비, 화재구역의 특성, 화재 비상대응 절차, 선원의 비상대응 숙련도 등 많은 요소를 고려해야 한다.

이 연구는 PCTC의 화물구역에서 발생하는 전기차 연료전지 화재 대응을 위하여 배터리 화재의 특성과 밀폐구역의 화재 특성을 비교·분석하기 위해 선행연구 조사 및 규정을 검토하였다.

이를 뒷받침하기 위하여 해양안전심판원의 사고사례를 조사하고 배터리 화재 선행연구를 통하여 RO-RO 구역 특성과 LIB 화재 특성을 분석하였다. 그리고 소화장치 및 비상대응 절차 분석을 위하여 SOLAS 협약, 선박소방설비기준, 선원법, PCTC 화물적재기준 등 관련 규정을 검토하였다.

이를 바탕으로 RO-RO 구역의 전기차 배터리 화재의 문제점을 식별하였다. 그리고 화재 대응을 위한 방안으로 선원에 대한 교육내용, LIB 화재 대응을 위한 비상대응절차, 소화장치, 전기차 화물 적재 방법을 제시하였다.

III. 연구 결과

1. 친환경 차량의 시장 동향

가. RO-RO 선을 통한 해상화물 운송량

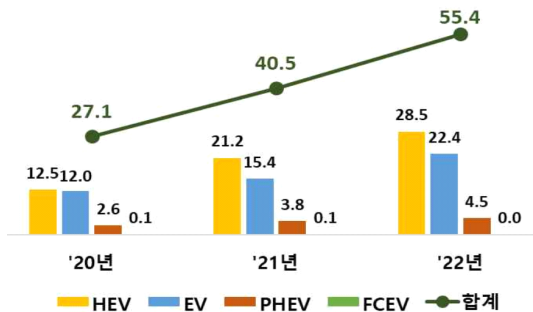
최근 각 국가의 친환경 정책에 따라 내연기관차의 생산량은 감소하는 반면 Hybrid Electric Vehicle, Battery Electric Vehicle, Plug-in Hybrid Electric Vehicle, Fuel Cell Electric Vehicle과 같은 친환경 차량의 생산량이 증가하고 있다. 자동차 산업 협회에서 발표한 최근 3년간(2020~2022년)

친환경 차 수출량은 <Table 1>, [Fig. 1]과 같다. 2022년 친환경 차 수출량은 지난해보다 36.8% 증가한 554,019대이었고, 순수전기차는 2021년 대비 45.2% 증가한 223,623대를 수출하였다. 2022년 기준 친환경 차 수출량의 91.8% (508,518대)가 HEV와 BEV이다. 특히, BEV의 수출량은 2020년 12만여대에서 22년 22만여대로 큰 폭으로 상승하였다.

<Table 1> Eco-friendly vehicle export(unit:ea)

year	2020	2021	2022
Total	271,327 (100%)	404,897 (100%)	554,019 (100%)
HEV	124,503 (45.9%)	211,807 (52.3%)	284,895 (51.4%)
BEV	119,718 (44.1%)	154,014 (38.0%)	223,623 (40.4%)
PHEV	26,065 (9.6%)	37,957 (9.4%)	45,140 (8.1%)
FCEV	1,041 (0.4%)	1,119 (0.3%)	361 (0.1%)

HEV(Hybrid Electric Vehicle, HEV), BEV(Battery Electric Vehicle), PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle), FCEV(Fuel Cell Electric Vehicle)



[Fig. 1] Eco-friendly vehicle export.

Source: Korea Automobile Industry Association

European Union(EU)은 2030년까지 온실가스 배출량을 55% 감축하여 2050년까지 탄소 중립을 달성하겠다는 목표를 설정하고 2035년에는 내연기관차 판매를 금지할 예정이다. 2022년 한국은행에 따르면 국제적인 환경규제에 따라 국내 자동차 수출량 또한 내연기관 차량의 수출량 대비 전

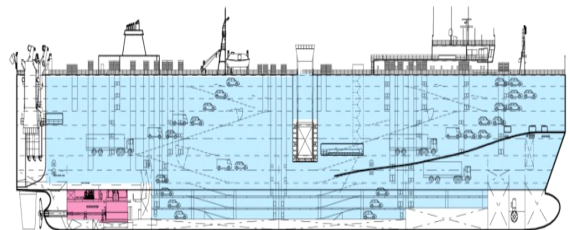
기차의 수출이 증가할 것으로 예상된다.

2. RO-RO 화물구역 화재 특성

가. RO-RO 화물구역의 특성

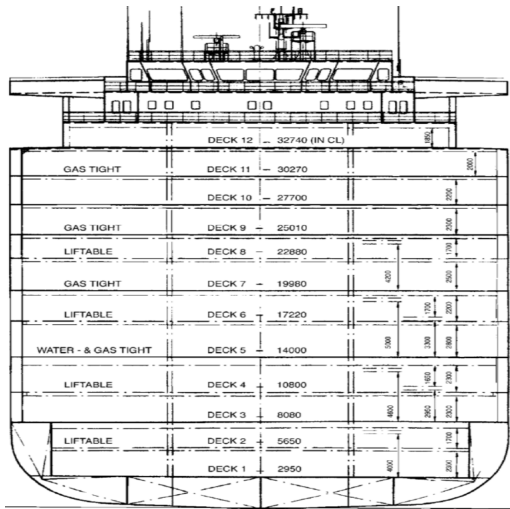
고체 산적 화물선과 컨테이너선과 같이 수직 방향으로 화물의 적·양하가 이루어지는 선박의 화물구역은 여러 개의 화물창(Cargo Hold)이 수직 격벽에 의해 독립된 공간으로 구분되어 있다. 그러나 PCTC는 RO-RO 화물의 적·양하 특성 때문에 [Fig. 2], [Fig. 3]과 같이 화물구역의 차량 갑판이 A급 방화 구획으로 구분된 주수직구역 격벽이 존재하지 않고 선수·미 방향으로 하나의 폐위된 공간으로 구성되어 있으며(파란색), 구분된 각 차량 갑판(Car Deck)은 램프(Inner Ramp)를 이용하여 연결된다. 동일 차량 갑판에 차량이 만개된 상태에서 화재 발생 시 종방향 방화 구획이 구별되어 있지 않기 때문에 화재를 통제하기 어렵다. 짧은 시간 내에 차량 갑판 전 구역으로 화재 확산이 이루어지고 화재 진화에 어려움이 있다. 또한, RO-RO 구역의 적·양하 시 차량의 배기 가스 배출을 위한 대형 환기 팬이 설치되어 있다. RO-RO 구역 차량 갑판을 연결하는 램프가 개방되었을 때 밀폐가 어려운 구조이다.

RO-RO 구역의 방화 구획은 A-0급(강 또는 이와 동등한 재질, 60분의 표준화재시험 동안 연기와 화염의 통과를 막을 수 있고, 화염에 노출되지 않은 면의 온도가 최초온도보다 104℃를 초과 상승하지 않고 0분간 유지하는 방화 구획)이다.



[Fig. 2] A longitudinal cross-section of PCTC.

Source: YONHAPNEWS/2019.09.09



[Fig. 3] A transverse section of PCTC.
Source: The other car workers

열전도율이 좋은 재질로 되어있어 화재복사열에 의한 선체 구조물의 변형으로 인한 밀폐의 어려움이 발생할 수 있고, 항 내에서 화물 적·양하 작업을 진행하고 있을 때 각 차량 갑판을 연결하는 램프(Ramp)가 개방된 상태에서 탄산가스 소화장치(Fixed CO₂ Fire-extinguishing System, 이하 CO₂ 소화장치)를 이용한 질식 소화에 어려움이 있다. 2018년에 발생한 MV AUTO BANNER호 화재사고 조사보고서에 따르면 소화재(CO₂가스)를 화재 구역에 방사하였으나 소화되지 않고 재발화 되었다.

나. RO-RO 화물구역의 화재 위험 요소


RO-RO 구역의 화물 적·양하는 자동차와 같은 자력으로 바퀴를 굴러 적재할 수 있는 화물이나, 포장하기 어려운 대형 강관, 요트, 기차 등을 트랜스포터의 도움을 받아 적·양하 할 수 있어 다양한 형태의 화물을 운송할 수 있다. PCTC에 선적되는 자동차에는 시동용 배터리와 휘발성이 강한 가연성 물질 등이 포함된 상태로 선적되기 때문에 소포장 화물로 운송될 경우 화재 위험성이 높은 화물로 분류되어 IMDG Code에 따라 <Table 2>와 같이 연료유가 충전된 상태의 차량은 UN

No. 3166, 배터리를 동력원으로 사용하는 차량은 <Table 3>과 같이 UN No. 3171로 분류하여 위험물의 종류에 따라 비상조치(Emergency response procedures for ships carrying dangerous goods, EMS)를 취하여야 한다.

<Table 2> IMDG code for internal combustion engine vehicle

UN No.	3166
Class	9
Label	N/A
Stowage Category	Category A
EMS	Gas fuel: F-D, S-U liquid fuel: F-E, S-E

<Table 3> IMDG code for electric vehicle

UN No.	3171
Class	9
Label	
Stowage Category	Category A
EMS	F-A, S-I

EMS에는 일반화재 조치와 유출에 대한 조치로 구별하여 조치사항을 제시하고 있으나 자동차 전용 운반선에 의해 차량을 운송할 경우 추가적인 안전조치는 면제하고 있다(IMDG Code 제3.3장 특별규정 961). PCTC의 경우 개별차량을 소포장하여 운송하는 형태가 아닌 차량 갑판 및 선체 자체가 화물(차량)을 보호하고, 통풍차단 장치 및 소화장치가 설치되기 때문에 해당 규정 적용을 면제하는 것으로 판단된다. 그러나 해당 규정의 적용이 면제된다고 해서 RO-RO 화물구역에서 휘발유를 포함한 가연성 물질의 화재 위험성이 사라지는 것은 아니다. 화물구역 내에서 차량의 결함, 손상 등으로 인한 차량 화재 발생 가능성에 주의하여야 하고 화재구역을 밀폐하지 못하면 대형화재로 번질 수 있음을 주의하여야 한다.

3. 화재 비상대응

가. 화재 비상대응을 위한 선원의 자격요건

선박은 육상에서 멀리 떨어져 운항하는 근로환경의 특수성으로 인하여 선박에서 화재 발생 시 외부 구조기관의 즉각적인 도움을 받을 수 없는 경우가 많다. 선행연구(Cho, 2016)에 의하면 선원이 되고자 하는 사람은 선박화재 발생 시 적절한 비상대응을 통한 화재피해를 최소화하기 위하여 선원법 제116조, STCW 국제협약(제A-6장 제1절)에 따라 <Table 4>, <Table 5>와 같은 소화 교육을 이수하고 선원에 대하여 화재 대응 자격을 부여하기 위하여 승선 자격요건으로 정하고 있다.

<Table 4> Specification of minimum standard of competence in fire prevention and fire fighting

Minimize the risk of fire and maintain a state of readiness to respond to emergency situations involving fire

1. Shipboard fire-fighting organization
2. Location of fire-fighting appliances and emergency escape routes
3. The elements of fire and explosion (the fire triangle)
4. Types and sources of ignition
5. Flammable materials, fire hazards and spread of fire
6. The need for constant vigilance
7. Actions to be taken on board ship
8. Fire and smoke detection and automatic alarm systems
9. Classification of fire and applicable extinguishing agents

source: STCW Code Part A / Section A-VI/1

나. 화재 비상대응 훈련요건

선박화재 비상대응을 위한 기본자격요건을 갖춘 선원은 선박 내 화재의 피해를 최소화하고 생존하기 위하여 선원법(제15조) 및 SOLAS (SOLAS Ch.III/Reg.19)에 따라 매월 1회 이상 화재 비상 대응훈련을 시행하고 기록하여야 한다. 소화 훈련은 적재화물을 고려하여 발생 가능한 다양한 형태의 화재 상황을 고려하여야 한다. 또한, 외부 지원이 없이 해상에 고립된 상태에서 선원 개개

<Table 5> Specification of minimum standard of competence in advanced fire fighting

Control fire-fighting operations aboard ships

1. Fire-fighting procedures at sea and in port, with particular emphasis on organization, tactics and command
2. Use of water for fire-extinguishing, the effect on ship stability, precautions and corrective procedures
3. Communication and coordination during fire-fighting operations
4. Ventilation control, including smoke extraction
5. Control of fuel and electrical systems
6. Fire-fighting process hazards (dry distillation, chemical reactions, boiler uptake fires, etc.)
7. Fire fighting involving dangerous goods
8. Fire precautions and hazards associated with the storage and handling of materials (paints, etc.)
9. Management and control of injured persons
10. Procedures for coordination with shore-based fire-fighter

source: STCW Code Part A / Section A-VI/3

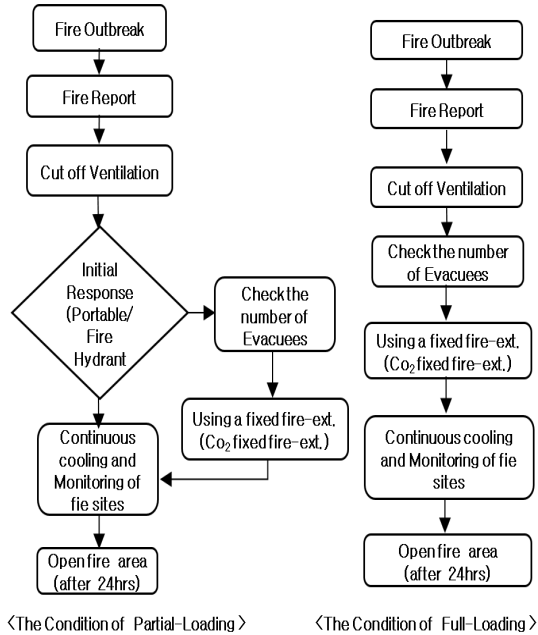
인이 초기대응(Emergency Response)을 능동적으로 수행해야 하고, 화재사고 당사자인 선원이 심리적 공황(Panic) 상태를 극복하는 방법으로 실습 교육 및 훈련이 효과적임을 알 수 있다(Cho and Lee 2016).

다. 화재 비상대응 절차

선내화재 비상 대응훈련은 선종 및 화재발생구역의 특성을 고려하여 화재 시나리오를 작성하고, 그 절차를 반복하여 시행한다. 선박화재 대응 절차 및 훈련시나리오는 기본적인 절차훈련을 위해 준비되어 있다. 또한 선내훈련지침서(SOLAS Training Manual)에 기본적인 소화 훈련 절차를 제공하고 있으나, 선박의 화재구역의 특성 및 가연물의 특성을 반영하여 실제 화재 대응에는 해당 선박 선원의 숙련도와 비상대응 책임자인 선장의 지식과 경험에 의존하고 있다.

선행연구(Kim and Kim, 2018)에서는 PCTC의 화재 비상대응 절차는 [Fig. 4]와 같이 화물의 적

재 상태(만재 상태/부분 적재상태)에 따라 적용하는 것이 합리적이라고 주장하였다.



[Fig. 4] Fire emergency response procedure of PCTC.

RO-RO 구역에 차량이 부분 적재된 상태에서는 휴대식 소화장치를 이용한 초기대응 후 화재 진화 실패 시 대피하였으나, 만재 상태에서는 초기대응을 위한 공간확보가 부족하므로 밀폐 후 고정식 소화장치를 바로 사용하였다. 화물 적재 상태에 따라 초기화재 대응을 할 수 있는지를 판단하여 고정식 소화장치 사용 시점에 차이가 있음을 알 수 있다.

4. RO-RO 구역 소화설비

Ro-Ro 화물구역은 자동차와 같은 화물의 화재 위험성에 대비하여 SOLAS 협약과 국내 선박 소방설비 기준에 따라 소화기, 물분사소화장치, 고정식소화장치를 화물구역에 비치하고 있다.

가. SOLAS 협약 기준

(1) 화재 성장 억제를 위한 통풍차단 장치

화물구역의 공기 유입을 막아 화재의 급격한 성장 억제 및 확산 방지를 목적으로 SOLAS 협약에 따라 통풍을 차단하기 위한 장비를 설치하여야 한다(SOLAS Ch. II-2/Reg.5.2). 그리고 화물구역의 통풍 설비는 다른 구역의 통풍설비와 상호간섭이 발생하지 않도록 구분되어야 한다(SOLAS Ch. II-2/Reg.7.2).

(2) 고정식소화장치

선박에 설치할 수 있는 소화장치는 방화구역의 특성과 선적된 가연물(화물)의 특성에 따라 설치 가능한 소화장치를 SOLAS 협약과 선박 소방설비기준에 정하고 있다. RO-RO 구역에 설치할 수 있는 고정식 소화장치는 화물구역의 외부로부터 밀폐 가능 여부에 따라 설치할 수 있는 소화장치가 결정된다. G/T 2,000톤 이상 국제항해에 종사하는 RO-RO 선은 화물구역에 <Table 6>의 소화장치 중 1가지 이상을 반드시 설치하여야 한다(SOLAS Ch. II-2/Reg.20.6.1). 현재 운항하고 있는 국제항해 종사하는 PCTC의 선형은 해상 악천후로부터 화물(차량)을 보호하기 위해 화물구역이 폐워된 형태가 일반적이다. 또한, 설치하고 있는 소화설비는 FSS Code(Fire Safety System Code)에 적합한 고정식 가스 소화장치를 설치하고 있다. 고정식 가스소화장치는 CO₂ 소화장치와 할론 소화장치 2가지 종류가 있으나 오존층파괴물질 사용 제한에 대한 환경규제(Montreal protocol on Substances that Deplete the Ozone Layers, 1978년)로 인하여 할론 소화장치는 추가로 사용할 수 없다. 현재 운항하고 있는 화물선 대부분의 소화장치로는 불활성 가스인 탄산가스(CO₂)를 이용한 CO₂ 소화장치가 사용되고 있다.

<Table 6> Vehicle space & RO-RO space fixed fire-ext. Sys

An enclosed RO-RO space	an unsealed RO-RO space
Fixed gas fire- ext. Sys.	
Fixed high-expansion foam fire- ext. Sys. Fixed water-based fire- ext. Sys.	Fixed water-based fire- ext. Sys.

(3) 휴대식 소화기

연료가 연료탱크에 충전된 차량을 RO-RO 구역에 적재하기 위해서는 화물구역의 각 차량 갑판 양쪽 현에 최소한 20m를 넘지 않는 간격으로 국제협약에서 요구하는 수량의 휴대식 소화기와 포말방사기(Foam Applicator)를 비치하여야 한다(SOLAS Ch.Ⅱ-2/Reg.20.6.1 및 MSC.1/Cir.1275). 비치하는 소화기는 해당 공간의 화재 위험에 적합해야 한다.

나. 선박 소방설비 기준

총톤수 500톤 이상의 연료를 탑재한 자동차를 적재하는 3중 선의 차량 구역 및 RO-RO 구역에는 아래 <Table 7>과 같이 소화장치를 비치하여야 한다(선박 소방설비기준 제66조). 고정식 소화장치는 밀폐가 가능한 RO-RO 구역인 경우 고정식 소화장치 3가지 중 1가지를 설치해야 하며, 1개의 차량 및 RO-RO 구역이 격벽 또는 갑판에 의해 4개 이상의 장소로 분리되는 특수한 구조인 경우 3개의 장소마다 1개의 포말방사기를 비치하여야 한다. 또한, 휴대식 소화기는 갑판상 양현에 20m를 초과하지 않도록 비치하여야 하며, 각 입구에는 최소 1개 이상의 소화장치를 비치하여야 한다. 국내 소방설비 기준과 SOLAS 협약의 소화설비 비치 기준에 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

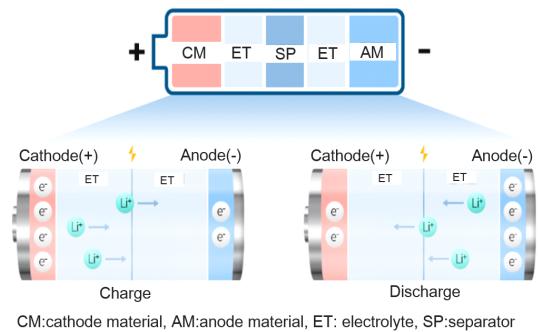
<Table 7> Vehicle space & RO-RO space fixed fire-ext. Sys.

Kind	kind of fire-extinguishing system	
Fixed	An enclosed RO-RO space	An unsealed RO-RO space
	Fixed gas fire- ext. Sys.	Fixed water-based fire- ext. Sys.
	Fixed high-expansion foam fire- ext. Sys.	fixed fire- ext. Sys.
	Fixed water-based fire- ext. Sys.	
Portable	Place 1 foam applicator near the entrance	
	Place at least 2 portable foam, CO2, dry chemical powder fire-ext.	

5. 배터리 화재의 특성 및 위험성

가. 리튬배터리 특성

리튬배터리는 전해액을 전해질로 사용하는 전지로, 배터리의 종류는 리튬이온을 전해질로 사용하는 리튬이온배터리와 폴리머 전해질을 사용하는 리튬폴리머 배터리가 있다. 리튬이온배터리(이하 LIB)는 [Fig. 5]와 같이 리튬이온이 양극재와 음극재 사이를 이동하는 화학반응을 통해 전기를 만들어낸다. 양극(+)에 있던 리튬이온(Li+)이 음극(-)으로 이동하면 배터리가 충전되고 음극(-)에 있던 리튬이온(Li+)이 양극(+)으로 이동하면 에너지가 방출되면서 방전된다. LIB는 체적 에너지밀도가 높고 충전 효율이 높아 2차전지로 널리 사용되고 있지만, 에너지밀도가 높아 과전류, 과충·방전 및 쇼트 등 원인에 의해 화재 및 폭발 위험성이 있다(Lee et al., 2017). 폴리머 배터리는 리튬이온 전지보다 가볍고 화재 위험성이 낮은 전지이나 상대적으로 고가여서 일반적인 전기차 충전용 배터리는 리튬이온 전지를 일반적으로 적용하고 있다. 전기차 구동용 배터리는 구동용 전기모터를 원활하게 구동하기 위하여 고전압이 필요하므로 LIB 셀을 직렬로 연결해 고전압을 얻게 되고, 외부의 충격으로부터 배터리를 보호하기 위해 다량의 LIB 셀이 금속하우징(LIB 팩)에 패키징되어 설치된다(Lim et al., 2021).



[Fig. 5] Principles of charging and discharging LIB. source: posco newsroom/google.

나. 리튬이온배터리 화재 특성

전기차 화재 원인을 밝히기 위해 다양한 형태의 배터리 화재 연구가 진행되고 있다. 배터리

화재는 배터리의 물리적 충격, 전기적 문제, 배터리팩 불량 등 다양한 원인에 의해 화재가 발생하고 있다(Choi et al., 2021). LIB의 열 폭주는 기계적·전기적·열적 이상조건, 내부 단락에 의해 발생한다. LIB 내부 분리막 손상 때문에 음극과 양극이 접촉하면서 저장된 전기화학적 에너지가 열에너지로 방출되어 LIB의 열 폭주의 직접적인 원인이다(Park and Choi, 2021). 구동용 고전압 배터리를 탑재하고 있는 전기차는 특정 배터리의 열화에 의해 배터리 내부 SEI(Solid Electrolyte Interface)가 분해되면서 열이 발생하고, 리튬이 전해액과 반응하여 가연성 기체가 발생하여 배터리팩 내부에서 가연성 기체가 연소하여 열 폭주 현상이 발생한다(Kim et al., 2022). 또한, Choi et al.(2021)의 전기차의 실물 화재 연소실험에서는 전기차의 외부에 점화하였을 경우 차량 외부 최고온도 631.0°C, 내부 최고온도 1,362.0°C가 측정되었다. 연소과정 중 LIB 폭발이 발생하면서 급격한 온도변화를 확인할 수 있었다. 그리고 Kim et al.(2022)의 전기차 화재 실험에서는 차량 외부 점화 후 6분 후에 화재 최성기(663.2°C)에 도달했으며, 자동차에서 발생한 외부 열에 의해 배터리가 가열될 때 화염이 전이되어 배터리팩 내부 열 축적 및 분리막 손상 등으로 4분 뒤 1차 폭발, 1차 폭발 후 6분 뒤 2차, 3차 연쇄 폭발이 발생함을 알 수 있다. 전압을 사용하는 전기차 LIB 화재는 휘발성 유기화합물(VOCs)이 포함된 Off-Gas에 의한 화재·폭발 위험성뿐만 아니라 전해액의 누출, 유독성 가스 유출에 따른 2차 피해 위험성이 있다. LIB 팩이 정상이면 전해액(Electrolyte) 누설이 발생할 가능성은 매우 희박하나, 손상되거나 화재가 발생하면 누출의 위험성이 있다. 전해질은 휘발성 탄화수소 기반 액체, 리튬플루오포스페이트(육불화인산리튬(LiPF6))와 같은 리튬염을 포함하고 있다. LiPF6는 약간의 열과 공기 중 노출만으로도 다량의 불화수소가 발생한다. 전해질 및 전해질 분해생성물이 기화된 배출가스(Vented Gas, Off-Gas)에는 메탄, 에틸렌, 에탄, 수

소기체, 일산화탄소 등 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)이 포함되어 있어 화재·폭발 위험성뿐만 아니라 전해액 및 유독성 가스 유출에 따른 2차 피해 위험성이 있다 (Industrial Lithium-Ion Battery Emergency Response Guide, TESLA, 2022).

또한, 전기차 화재사고 발생 시 1차 소화 후 LIB의 재발화 가능성이 매우 큰 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2017). 전기차 구동용 LIB 팩의 구조적 특징으로는 외부충격으로부터 배터리 손상을 보호하기 위해 수밀이 되는 견고한 스틸하우징에 패키징 되어 설치되어 있다. 배터리팩 내부에서 화재 발생 시 LIB 팩 내부로 소화수 또는 기타 소화약제 등을 침투시켜 소화하기 어려운 구조로 소화에 어려움이 있다(Lim et al., 2021).

6. RO-RO 화물구역 내의 전기차 화재

선박을 이용한 자동차의 해상운송은 차량을 포장하지 않고 다수의 차량을 한 공간에 선적하고 차량 갑판에 고박하여 한꺼번에 운송한다. 차량을 개별적으로 차량 갑판에 고박(Lashing)하여 차량이 움직이지 않도록 조치하고 있다. 그러나 황천항해 등 심한 선체 동요로 인하여 차량 고박에 문제가 생겨 차량 손상으로 인한 화재사고가 발생하고 있다. 전기차에 외부충격이 가해지거나, 고박의 불량에 의한 손상이 발생하면 배터리팩 손상에 의한 화재 위험성을 배제할 수 없다. 제3장 제5절 ‘배터리 화재의 특성 및 위험성’에서 설명한 바와 같이 고용량 LIB 팩은 외부충격에 의한 화재·폭발 위험성이 높다. 인접한 전기자동차의 화재 성상에 관한 실험 연구(Choi et al., 2021)에서도 알 수 있듯이 인접한 차량의 화재 발생 시 차량 주변 열 축적으로 인해 화재가 쉽게 확산하고 화재복사열에 의해 배터리의 2차, 3차 연쇄 화재·폭발이 발생하여 짧은 시간 내에 급격한 화재 확대 현상을 확인할 수 있다. 육상에서 발생하는 전기차 화재는 개방된 공간에서

개별전기차(1대 또는 2대) 화재 형태로 발생하기 때문에 가연물이 한정적이고 화재복사열이 대기 중으로 쉽게 방출되어 화재 현장 주변에 열 축적이 발생하지 않는다. 그러나 Yun et al.(2017)의 연구에서 알 수 있듯이 밀폐구역 화재 발생 시 구획 제적 증가에 따른 천장 높이가 증가하면 연층이 화염 대에 도달하는 시간을 연장해 체적변화에 따라 최대 열 발생률과 총열량의 증가 함으로써 층높이가 높고 용적이 큰 밀폐구역은 확대 현상이 잘 발생함을 알 수 있다. RO-RO 구역의 전기차 화재는 차량 갑판이 밀폐되어있어 심한 열 축적 현상이 발생하고 다수의 전기차가 인접한 거리에 선적되기 때문에 화재 발생 시 초기대응을 하지 못하면 대형화재로 이어질 가능성이 매우 크다. 최근 내연기관 차량과 같이 선적되어 운송되고 있던 전기차에서 화재가 발생하여 소화작업의 실패로 선박이 침몰한 사례가 보고되고 있다.

7. 문제점 식별 및 대응 방법

PCTC는 RO-RO 화물구역의 화재 대응을 위한 소화설비 및 선내 자체 비상대응 시스템이 갖춰져 있다. 그러나 현재의 소화설비와 화재 대응 방법으로는 전기차 LIB와 같은 폭발력이 높고 화재 지속력이 높은 가연물의 화재에 적절히 대응하기에는 한계점이 있다. RO-RO 구역 LIB 화재 대응을 위해 아래와 같이 문제점을 식별하고 개선안을 제시하였다.

가. 선원의 교육·훈련

선원의 안전교육은 국내외 법에 따라 지정 교육기관에서 법정 교육이 시행되고 있다. 그러나 STCW 협약의 선원 소화 교육 최저요건에는 <Table 4>, <Table 5>에서 살펴본 바와 같이 LIB 화재에 관한 내용이 포함되어 있지 않다. LIB 화재는 배터리팩 내부의 화학반응에 의한 셀 배기가스 유출에 의한 열 폭주에 의한 화재·폭발, 전해액의 유출에 의한 2차 인명사고 등의 위험성이

존재한다. 그러므로 전기차를 운송하는 PCTC에 종사하는 선원에 대한 승선요건을 신설하여 LIB 가연물의 특성 및 화재의 위험성, 인명사고 예방을 위한 안전조치에 대한 기본적인 교육이 이루어져야 할 것이다.

나. 선내 비상대응 절차 문제점

선박화재 비상 대응훈련은 SOLAS 제3장 제19조에 따라 화재 위험 요소 및 장소의 특성을 충분히 고려하여 주기적으로 시행하여야 한다. 그리고 선내 화재진압훈련은 화재 발생 시 즉각적인 대응을 위하여 화재 시나리오에 따라 절차훈련 위주로 이루어지고 있다. UK MCA(Maritime and Coast guard Agency)에서는 선박의 전기차 화재 진화를 위한 별도의 비상대응 절차를 수립하고 선원에 대한 주기적인 훈련을 시행하기를 권하는 지침서를 발행하였다(Electric Vehicles On board Passenger RO-RO Ferries(MCA Marine Guidance Note, MGN 653(M), 2021). LIB 화재는 초기대응이 늦어지면 배터리팩 내부 열 폭주에 의한 대형화재로 이어지므로 다른 화재에 비하여 초기화재 대응이 무엇보다 중요할 수 있다. 그러므로 LIB 화재의 단계별 화재 양상을 고려하여 PCTC는 별도의 LIB 화재 대응 절차를 수립하고 훈련시나리오를 작성하여 선원에 대한 주기적인 훈련이 필요하다.

다. 소화설비의 문제점

제3장 제4절 ‘RO-RO 구역 소화설비’에서 논한 바와 같이 RO-RO 구역에는 국내외 규정에 따라 휴대식 및 고정식 소화설비를 설치하고 있으며, 일반적으로 밀폐가 가능한 PCTC의 기관구역 및 화물구역에는 질식성 소화제를 사용하는 고정식 소화장치를 설치하고 있다. 밀폐가 가능한 RO-RO 구역에 다량의 이산화탄소(CO₂)를 주입하여 희석에 의한 질식 효과를 이용하여 화재구역의 산소(O₂)농도를 15% 이하로 유지하여 소화하고 있다(FSS Code/Ch.5/2.2.1).

그러나 Yuan et al.(2021)의 연구에서는 LIB 화

체에 이산화탄소를 포함한 가스계 소화제를 사용하여 화재진화할 경우 재발화 위험성이 높다는 것을 알 수 있으며, Lim et al.(2021)의 LIB 소화 실험에서는 질식 소화 덮개는 산소공급의 차단으로 차량 내장재 연소의 지연효과는 있었으나 LIB 화재를 직접 소화하는 데는 한계가 있으며, 초기 화재 또는 화재 확산을 지연시키는 데 효과가 있음을 확인하였으나 전기차 LIB 화재의 경우 질식 소화 방법을 통한 완전 소화에는 한계가 있음을 알 수 있다.

또한, RO-RO 구역은 주수직격벽이 설치되어 있지 않은 하나의 대형 밀폐구역이다. 밀폐구역화재는 화재복사열, 연기, 화재가스의 대기 방출이 어려운 구조로 단시간 내에 화재구역 열 축적이 발생한다. LIB의 초기화재 대응이 늦어지면 근거리 선적된 전기차의 화재 확산으로 인한 LIB 연쇄 폭발이 발생할 수 있다. 그러므로 RO-RO 구역의 전기차 화재 발생 시 초기화재 대응을 위한 소화장치가 필요하다. MCA 지침서에는 배터리 화재 전조 증상이 내부 발열 및 셀 배기(Off-Gas)가 발생함으로 RO-RO 구역에 열화상 카메라 및 CCTV를 설치하여 화재구역을 감시토록 권고하고 있고, 소화설비를 사용하기 전에 화재가 확산하는 것을 막기 위해 [Fig. 6]과 같이 질식용 방화 포를 사용하기를 권고하고 있다.

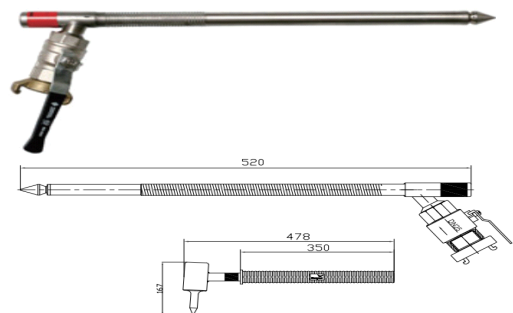


[Fig. 6] Suffocation fire blanket for EVs-fire (source: hyundai glovis).

전기차의 LIB 팩은 스틸하우징에 패키징 되어 있어 외부에서 소화제를 배터리팩 내부로 침투시키

기 어려운 구조이다. 선행연구에서도 알 수 있듯이 소화 호스 및 휴대식 소화장치에 의한 소화는 큰 효과를 내기 어려운 이유이다.

Lim et al.(2021)의 선행연구에서도 알 수 있듯이 LIB 팩 내의 열 폭주를 막지 못하면 2차, 3차 폭발 사고로 이어지므로 가장 효과적인 소화 방법은 화재가 발생한 LIB 팩 내부에 직접 주수에 의한 냉각 작용이 가장 효과적인 소화 방법임을 알 수 있다. 현재 컨테이너 운송선은 [Fig. 7]과 같이 SOLAS 협약에 따라 2016년 01월 이후 건조된 컨테이너 선박은 컨테이너 내부화재 대응을 위해 철제 컨테이너를 뚫을 수 있는 물분무장(Water Mist Lance)을 비치하고 있다(SOLAS Ch. II-2/Reg.10.7.3, Res. MSC.365(93)), MSC.1/Circ.1472). PCTC에 이와 같은 장치를 설치하여 배터리팩 스틸케이스를 뚫어 직접 주수하는 소화장치 설치가 필요하다. Kim and Kim(2018)의 연구에서는 고정식 CO₂ 소화설비를 이용한 화재 진화가 실패할 경우 RO-RO 구역에 소화 수(해수)를 살수하는 방법을 제안하였다. 이는 배터리의 열 폭주를 막기 위한 대안이 될 수도 있다. 그러나 Woo and So(2020)의 연구에서 알 수 있듯이 손상된 LIB가 염수에 노출될 경우 발열이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 2014년에 발생한 MV ASEAN EMPIRE 호 화재사고에 의하면, RO-RO 구역에 염수 분사에 의한 2차 발화사고사례가 있으므로 많은 전기차가 선적된 RO-RO 구역에 염수를 살수 하는 것은 추가적인 검토가 필요하다.



[Fig. 7] Water Mist Lance and Hammer.

라. 차량 화물 적재 기준

단위화물(Cargo Unit) 및 다른 사물을 운송하는 선박은 MSC. 1/Cir. 1353에 따라 정부 또는 선급 협회에서 승인된 화물고박지침서(Cargo Securing Manual, CSM)를 비치하여서 한다. PCTC의 화물 적재는 RO-RO선 Cargo Securing Manual에 따라 시행한다. 효율적인 차량운송을 위하여 CSM에서 허용하는 범위 내에서 최대한 많은 수의 차량을 동일 차량 갑판에 최대한 근접하여 적재한다. 2017년 차량운반선 대상 하역 최적화 및 운항 안전성 지원 서비스 개발에 따르면 차량의 적재 간격은 [Fig. 8]과 같이 앞뒤 300mm 좌우 100mm의 간격을 유지하고 선체 동요 운동에 의한 화물 손상 및 이동 방지를 위해 선박의 종방향 선적 시 2점식, 횡방향 선적시 3점식으로 고박하여 적재한다.



[Fig. 8] Vehicle loading and lashing plan of PCTC source: development for loading optimization and ship operation safety support service for vehicle carriers(2017).

이처럼 차량이 만재된 상태에서 개별차량 화재 발생 시 소화 작업을 진행하기 어렵고 차량 갑판

전체로 화재가 확산할 우려가 크다. Kim and Kim(2018)의 선행연구에서도 화물의 만재 상태에서는 소화를 위한 공간확보에 어려움이 있어 화재 인지 후 해당 구역을 밀폐한 후 고정식 소화장치를 바로 사용하는 것이 효율적이라 주장했다. 전기차 LIB 팩 화재는 화재 초기 배터리팩 내부의 열 폭주를 막는 것이 무엇보다 중요하다. 기존 CO₂ 소화설비로 완전 소화하기에는 LIB의 화재 특성상 한계점이 존재하므로 소화장치를 사용하기 위한 공간확보가 필요하다. 또한, 인근 내연기관 차량 연료유에 의한 화재의 외부 열에 의한 LIB 팩의 폭발 사고를 막기 위해 내연기관 차량과 격리하여 분리 적재가 필요하다.

IV. 결론

화재 위험성이 높은 가연물이 포함된 상태에서 차량의 해상운송은 항상 화재의 위험성이 내포되어 있다. 전기차의 증가로 인해 전기차의 해상운송량이 늘어나고 있으며, 이로 인해 화재 위험이 증가하고 있다. 특히 전기차의 리튬이온배터리는 에너지 밀집도가 높아 화재 위험성이 높다. PCTC의 화물구역에서 전기차 화재로 인하여 선박이 전소되거나 침몰하는 사례가 발생하고 있다. 본 연구에서는 해상 차량운송 중 전기차 배터리 화재 대응 방법을 제시하기 위하여 LIB 화재의 특성, 소화 방법 등을 조사하고 기존 선박의 소화설비, 비상대응 절차 등을 비교 연구하여 문제점을 도출하고 아래와 같이 개선안을 제시하였다.

(1) LIB 화재 진화에 적합한 소화장치를 비치하여야 한다. 기존 선박에 설치되어 있는 휴대식 및 고정식 이산화탄소 소화장치는 LIB 팩은 스틸 케이스에 패키징 되어있어 화재 발생 시 소화제의 침투가 어려운 구조이고, 배터리셀의 화학반응에 의해 산소가 생성되어 질식 소화장치로 소화에는 많은 시간이 걸리고 재발화 위험성이 높음을 알 수 있었다. LIB 화재에 대응하기 위한 가장 효과

적인 방법은 배터리팩의 냉각 소화이므로 소화제를 LIB 팩 내부에 직접 주수할 수 있는 장치가 필요하다. 또한, 화재감시를 위한 장치와 화재 초기에 화재 확산 방지를 위한 질식용 방화 포의 비치도 필요하다.

(2) 전기차 선적 방법에 대한 지침을 만들어야 한다. RO-RO 구역은 운송 효율성을 높이기 위해 CSM 기준이 허용하는 안의 범위에서 최대한 화물을 적재하고 있다. 그러나 기존 CSM에는 전기차에 관한 별도의 적재 기준을 두고 있지 않다. 좁은 공간에 다수의 전기차 선적되면 ① 다른 차량(내연기관)의 화재에 의한 복사열에 의한 LIB 팩의 연쇄 폭발, ② 선체 동요에 의한 충격으로 인한 배터리셀 손상에 의한 화재, ③ 화재 발생 시 초기대응을 위한 화재진화를 위한 공간 부족으로 인하여 화재진화에 문제가 발생함으로 전기차는 다른 차량과 분리해 별도의 차량 갑판에 선적하여야 하고 소화 도구를 사용하기 위한 충분한 공간을 확보해야 한다.

(3) 선원의 비상대응 교육 훈련 및 절차를 마련하여야 한다. PCTC의 RO-RO 화물구역의 밀폐된 공간에 인접하여 다수의 전기차와 내연기관 차량이 선적된 상태에서의 화재 대응에는 큰 차이가 있다. 밀폐구역 내의 화재의 특성과 인접한 차량의 연쇄 폭발, 유독가스, 연기에 의한 소화작업의 어려움, LIB의 열 폭주 등 다양한 요소들을 포함하여 선원 안전교육을 시행하고, 선내비상 대응 절차에 반영해야 한다.

선박의 소화설비, 선원의 교육 및 훈련 제도는 국내외 규정에 따라 시행되고 있다. 위와 같이 제시한 내용이 개선되기 위해서는 반드시 국내 선원법, SOLAS, STCW 협약 등 규정 개정이 동반되어야 한다. 이번 연구에서는 전기차의 화재 대응을 위한 기초연구로 개선해야 할 화재 비상대응 요소식별에 의의가 있다. 추후 PCTC 전기차 화재 대응을 위한 소화설비, 비상대응 절차, 규정 개정을 포함한 선박에서 발생하는 전기차 화재에 대응하기 위한 추가 연구가 진행되길 기

대한다.

References

- Bank of Korea(2022), International Economic Review No. 2022-4, Global eco-friendly car market trends and characteristics.
- Cho JW and Lee(2016), A Study on the Improvement for Basic Advance Safety Training Course Focusing on the Crew's Fire Fighting Training, JFMSE 28(2), 417~427.
<http://dx.doi.org/10.13000/JFMSE.2016.28.2.417>
- Choi AY, Lee SH, Part TH and Kim HS(2021), Comparative Analysis of Real Fires for Electric Vehicles and Gasoline Vehicles, J. Korean Soc. Hazard Mitig. 21(6), 119~124.
<http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2021.21.6.119>
- Choi JS(2017), Development of loading optimization and ship operation safety support service for vehicle carriers, Total Soft bank, s0602-17-1014.
- Erol K, Theo N(2006), The Other Car Workers: Work, Organization and Technology in the Maritime Car Carrier Industry
- International Maritime Dangerous Goods Code(IMDG) Chapter 3.
- International Convention on Standards of Training, Certification and Watch keeping for Seafarers Code (STCW) Part A/ Section A-VI/1, Part A/ Section A-VI/3.
- International Convention for the Safety of Life at Sea(SOLAS) Ch. II-2/Reg.5.2, Reg.7.2, Reg.10.7.3, Reg.20.6.1.
- Kim HS, Lee SH, Kim TD and Choi AY(2022), Experimental Study on Fire Characteristics of Adjacent Electric Vehicles, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society 23(4), 343~350.
<http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.4.343>
- Kim DB and Kim HY(2018), A Perspective on the Ship Fire Accident Caused by Automobile Fire, Journal of Korean Maritime Police Science 8(4), 65~77.
<https://doi.org/10.30887/LKMPS.2018.8.4.065>
- Korea Maritime Safety Tribunal(2020), Marine accident special investigation report, Fire accident

- on the car carrier Auto Banner.
- Lim OK, Kang SW, Kwon MJ and Choi JY(2021), Full-scale Fire Suppression Tests to Analyze the Effectiveness of Existing Lithium-ion Battery Fire Response Procedures for Electric Vehicle Fires, *Fire Science and Engineering* 35(6), 21~29.
<http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.8172e9b4>
- Lee BJ, Choi GJ, LEE SH and Jeong YM(2017). A Study on Explosion and Fire Risk of Lithium-Ion and Lithium-Polymer Battery, *Journal of Korean Institute of Communication and Information Science* 42(04), 855~861.
<http://dx.doi.org/10.7840/kics.2017.42.855>
- MSC.1/Circ.1275(2008), Unified Interpretation of SOLAS Ch. II-2 on the Number and Arrangement of Portable Fire Extinguishers on Board Ships.
- MSC.1/Circ.1353(2010), Revised Guideline For the Preparation of the Cargo Securing manual.
- MSC.1/Circ.1472(2014), Guidelines for the Design, Performance, Testing and Approval of Mobile Water Monitors used for the Protection of On - Deck Cargo areas of Ships Designed and Constructed to Carry Five or More Tiers of Containers On or Above the Weather Deck.
- Park MW and Choi DM(2021), Experimental Study on Prevention of Thermal Runaway Propagation in Pouch-type Lithium-ion Batteries, *Fire Science and Engineering* 35(6), 30~36.
<https://doi.org/10.7731/KIFSE.6487b16b>
- S Yuan, C. Chang, S. Yan, P. Zhou, X. Qian, M. Yuan and K. Liu(2021), A review of fire-extinguishing agent on suppressing lithium-ion batteries fire *Journal of Energy Chemistry* 62, 262~280.
<https://doi.org/10.1016/j.jechem>
- TESLA(2022), Industrial Lithium-Ion Battery Emergency Response Guide for Tesla Industrial Energy Products including Mega pack and Power pack.
- UK Maritime Coastguard Agency(2021), Electric Vehicle on board Passenger RO-RO Ferries, *Marine Guidance Note MGN 653(M)*.
- Woo JS and So SH(2020), Analysis of Discharge Characteristics and Fire Risk of Mobile Phone Batteries according to the Concentration of Salt Water, *Fire Science and Engineering* 34(1), 66~71.
<http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2020.1.066>
- Yun HS, Nam DG and Hwang CH(2017), A Numerical Study on the Effect of Volume Change in a Closed Compartment on Maximum Heat Release Rate, *Fire Science and Engineering*. 31(5), 19~27.
<https://doi.org/10.7731/KIFSE.2017.31.5.019>
-
- Received : 27 September, 2023
 - Revised : 31 October, 2023
 - Accepted : 06 November, 2023