

## FDS를 사용한 420톤급 전기추진 차도선에 대한 화재 확산 해석

김남형<sup>1</sup> · 김병모<sup>2</sup> · 김현석<sup>3</sup> · 김영식<sup>4</sup> · 하승현<sup>5,†</sup><sup>1</sup>국립한국해양대학교 해양과학기술융합학과 대학원생<sup>2</sup>국립한국해양대학교 해양공학과 조교수<sup>3</sup>선박해양플랜트연구소 친환경연료추진연구센터 선임연구원<sup>4</sup>선박해양플랜트연구소 친환경연료추진연구센터 센터장<sup>5</sup>국립한국해양대학교 해양공학과 교수

## Fire Development Analysis on 420-ton Class Electrified Car Ferry Using Fire Dynamics Simulator

Nam-Hyeong Kim<sup>1</sup>, Byungmo Kim<sup>2</sup>, Hyun-Seok Kim<sup>3</sup>, Young-Shik Kim<sup>4</sup>, and Seung-Hyun Ha<sup>5,†</sup><sup>1</sup>Graduate Student, Department of Convergence Study on the Ocean Science and Technology, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea<sup>3</sup>Senior Researcher, Alternative Fuels and Power System Research Center, Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea<sup>4</sup>Director, Alternative Fuels and Power System Research Center, Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea<sup>5</sup>Professor, Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

## 요 약

국제해사기구(IMO)의 환경 규제 강화와 함께 친환경 연료 추진 선박 기술이 발전하고 있으나, 대용량 리튬이온배터리(LIB) 탑재에 따른 화재 위험성 또한 새로운 안전 문제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 실선 실험이 어려운 선박 화재의 특성을 고려하여, 화재 동역학 시뮬레이터(FDS)를 활용해 420톤급 전기추진 차도선 내 화재 확산 특성을 정량적으로 분석하였으며, 배터리실 단독 화재에 대한 열전달 및 연기 확산 거동을 시뮬레이션하였다. 연구 결과, 화재 발생 시 고온의 열과 유해 가스는 굴뚝 효과에 의해 수직 통로인 계단을 따라 급격하게 확산하였으며, 특히 차도선 내 중간부 계단에서는 IMO 인명 안전 기준인 60°C를 크게 초과하는 온도가 발생하였다. 반면, 차도선의 개방된 상부 갑판은 자연 환기 효과로 인해 상대적으로 낮은 온도를 유지하여 승객의 생존 가능성을 높이는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 전기추진 선박의 화재 안전 기준 수립 및 방재 설계 최적화를 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

**Abstract** – As environmental regulations by the International Maritime Organization (IMO) strengthen, eco-friendly fuel propulsion ship technologies are advancing; however, the fire risk associated with the installation of large-capacity Lithium-Ion Batteries (LIB) has emerged as a new safety issue. Considering the difficulties of conducting full-scale ship fire experiments, this study quantitatively analyzed the fire spread characteristics within a 420-ton class electrified car ferry using the Fire Dynamics Simulator (FDS). Specifically, a fire scenario solely in the battery room was established to simulate heat transfer and smoke diffusion behaviors. The results indicated that high-temperature heat and toxic gases spread rapidly into the staircase, a vertical passage, due to the stack effect. In particular, the intermediate section of the stairs presented a risk that significantly exceeded the IMO life safety criterion of 60°C. Conversely, the open upper deck maintained relatively lower temperatures due to natural ventilation, thereby enhancing passenger survivability. These findings can serve as foundational data for establishing fire safety standards and optimizing disaster prevention designs for electric propulsion ships.

---

<sup>†</sup>Corresponding author: shha@kmou.ac.kr

**Keywords:** Fire Dynamics Simulator(화재 동역학 시뮬레이터), Electrified Car Ferry (전기추진 차도선), Fire Development Analysis(화재 확산해석), Transient Heat Transfer Analysis(과도 열전달 해석), Fire Evacuation Route(화재 대피 경로), Battery Fire(배터리 화재)

## 1. 서 론

국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)의 강력한 환경 규제와 전 세계적인 2050 탄소중립 실현 목표에 따라, 해양 산업에서는 기존 화석연료 기반 선박에서 전기, 수소, 암모니아 등 친환경 연료를 사용하는 선박으로의 전환이 가속화되고 있다(Lee *et al.*[2023]). 이러한 기술적 흐름 속에서 전기추진 선박의 보급이 확대되고 있으나, 핵심 에너지원인 대용량 리튬이온배터리(Lithium-ion battery, LIB)의 탑재는 기존 내연기관 선박과는 다른 새로운 화재 위험성을 야기하고 있다. 리튬이온배터리 화재는 열폭주 현상을 동반하여 급격한 온도 상승과 폭발적인 연소 반응을 일으키며, 진압이 어렵고 재발화 위험이 크다는 특징이 있다(Jung *et al.*[2021]). 그러나 현재의 선박 안전 기준은 대부분 기존 연료 시스템에 맞춰져 있어, 새로운 위험 요소를 포괄적으로 평가하는 데 한계가 존재한다. 선박은 육상 건축물과 달리 격벽으로 구획된 협소한 공간과 복잡한 수직 수평 통로로 이루어져 있어, 화재 발생 시 열과 연기가 간헐거나 통로를 따라 굴뚝 효과(Stack effect)를 일으키며 상부로 급격히 확산되는 경향을 보인다(Krystosik[2002]). 특히 본 연구의 대상인 차도선의 경우 배터리실이나 차량에서 발생한 화재가 승객 구역으로 전이되어 대규모 인명 피해로 이어질 가능성이 존재한다. 따라서 화재 취약 구역에서 발생한 고온의 열이 인접 구역으로 유입되는 경로를 파악하고, IMO 안전 기준(온도 60°C, 가스 농도 등) 만족 여부를 검토하여 승객의 피난 안전성을 확보하는

것이 필수적이다(IMO[2016]). 실제 선박이나 실물 크기 모형을 대상으로 한 화재 실험은 비용 및 안전 문제로 수행에 제약이 따르므로, 이에 대한 대안으로 화재 동역학 시뮬레이터(Fire Dynamics Simulator, 이하 FDS)를 활용한 수치해석 연구가 활발히 진행되고 있다(Zhang *et al.*[2007]; Kim and Hwang[2017]). FDS는 화재 시 발생하는 열과 연기의 유동을 Navier-Stokes 방정식에 기초하여 해석하는 전산유체역학 코드로, 복잡한 구획 내에서의 화재 거동을 예측하는 데 효과적인 도구로 평가받고 있다. 본 연구에서는 전기추진 선박의 화재 안전성을 평가하기 위해 FDS를 활용하여 420톤급 전기추진 차도선 내 화재 확산 특성을 분석하고자 한다. 이를 위해 배터리실 내 화재 발생 시 연소 특성을 고려한 시나리오를 설정하고, 시간에 따른 열방출률(Heat release rate, 이하 HRR), 온도 분포, 연기 확산 거동을 정량적으로 분석하였다. 최종적으로 도출된 해석 결과를 IMO 안전 기준과 비교·분석하여, 전기추진 선박의 구조적 안전 설계 및 피난 가이드라인 수립을 위한 기초 자료를 제공하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 연구의 범위와 방법

### 2.1 해석 대상 선박

본 연구의 수치해석 대상은 선박해양플랜트연구소에서 개발된 420톤급 전기추진 차도선으로, 차량 적재 용량은 약 20대이며 여객 정원은 약 120명이다. 해당 선박은 개방형 차량 갑판과 승객 구



Fig. 1. 420-ton class electrified car ferry [5].

Table 1. Specification of the electrified car ferry [5]

Length [m]	Width [m]	Tonnage [ton]	Capacity	
			Car [e.a]	Passenger
60	13	420	20	120

역이 공존하는 복잡한 구조를 가지고 있어 화재 확산 및 피난 안전성 분석에 적합한 모델이다. 대상 선박의 외관 모습과 주요 제원은 Fig. 1과 Table 1에 요약하였다.

## 2.2 수치해석의 지배방정식

본 연구에서는 전기추진 차도선 내부의 화재 발생 시 열 및 연기의 확산 거동을 수치적으로 해석하기 위하여, 미국 국립표준연구소에서 개발한 전산유체역학 기반의 화재 전용 해석 코드인 FDS(Ver. 6.10.1)를 사용하였다. 또한 모델링 및 전-후처리 과정에는 Pyrosim 2024 프로그램을 활용하였다. FDS는 저속의 열 유동 해석에 적합한 Navier-Stokes 방정식을 기반으로 하며, 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 및 이상기체방정식을 주요 지배방정식으로 채택하여 연소 현상을 계산한다. 이에 대한 방정식은 다음과 같다.

### 1) Continuity equation(연속방정식)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

### 2) Momentum equation(운동량방정식)

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\rho \vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \rho g \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (2)$$

### 3) Energy equation(에너지방정식)

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \vec{u} \cdot \vec{\tau} + S \quad (3)$$

### 4) Ideal gas equation(이상기체방정식)

$$p = \frac{\rho RT}{W} \quad (4)$$

### 5) Combustion reaction(연소반응식)

$$v_F Fuel + v_O Oxidizer \rightarrow \sum_i v_{P_i} Product_i \quad (5)$$

여기서  $\rho$ 는 유체 밀도,  $t$ 는 시간,  $\vec{u}$ 는 속도벡터,  $p$ 는 정압,  $g$ 는 중력 가속도,  $\vec{\tau}$ 는 응력텐서,  $T$ 는 온도,  $c_p$ 는 정압 비열,  $k$ 는 열전도도,  $S$ 는 외부 에너지원,  $W$ 는 분자량(몰 질량),  $R$ 은 기체상수,  $v_F$ 는 연료의 반응 계수,  $Fuel$ 는 연료의 화학종,  $v_O$ 는 산화제의 반응 계수,  $Oxidizer$ 는 산화제,  $v_{P_i}$ 는  $i$ 번째 생성물의 반응 계수,  $Product_i$ 는  $i$ 번째 생성물의 화학종이다. 추가적으로 이번 해석에서 난류 유동 모델의 경우에는 격자 크기 및 해석 시간을 고려하였을 때, 이번 선박 내 화재와 같은 대규모 화재 시뮬레이션에 상대적으로 보다 적합한 것으로 알려진 LES(Large Eddy Simulation) 기법을 적용하였다(McGrattan *et al.* [2014]).

## 3. 전기추진 차도선 열전달 해석조건

### 3.1 해석 대상 선박 격자 생성 및 경계조건

화재 시뮬레이션에서 격자의 해상도는 화염의 거동과 열 확산을 결정짓는 가장 중요한 요소이므로, 다음의 식 (6)과 같이 화원의 열 방출률( $\dot{Q}$ )에 따른 화원의 특성 직경( $D^*$ )을 계산하여 이를 기준으로

격자 크기를 설정하였다. 이를 바탕으로 격자 크기( $\delta$ )가 화원의 특성 직경의 적정 비율인  $\delta = D^*/10$ 이 되도록 설정(Kim and Hwang[2017])하였으며 총 격자 수는 약 180만 개(격자 크기 약 0.18 m)로 산정하여 해석 결과의 신뢰성을 확보하였다. 적용된 경계조건은 해석 연산의 효율성을 극대화하기 위해 화원을 제외한 모든 벽면은 화학적 반응이나 연소가 발생하지 않는 비활성 표면(INERT surface)으로 가정했으며, 벽체로 구획된 선박의 바닥면을 제외한 나머지 모든 해석 영역의 경계면에 대해 개방 대기 조건(Open surface condition)을 적용하였다.

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_{p,air} T_\infty \sqrt{g}} \right)^{0.4} \quad (6)$$

여기서  $\dot{Q}$  = 화재의 총 열방출률(Total heat release rate, kW)

$\rho_\infty$  = 공기 밀도(Air density, kg/m<sup>3</sup>)

$c_{p,air}$  = 공기 비열(Air specific heat, kJ/kg·K)

$g$  = 중력 가속도(Gravitational constant, m/s<sup>2</sup>)

$T_\infty$  = 주위 대기 온도(Ambient temperature, K)

### 3.2 배터리 화재의 열방출률 산정

화재 시뮬레이션의 핵심 입력조건인 열방출률을 산정하기 위하여, Kang *et al.*[2023]이 수행한 64 kWh급 전기차 배터리 팩 실물 화재 실험 데이터를 기반으로 화재 시나리오를 구성하였다. 본 연구의 대상 공간인 배터리실은 가연성 내장재 등을 배제하고 선박에 탑재되는 250 kWh 용량의 배터리 2개 세트만 고려하여, 총 8개의 배터리 팩(약 500 kWh)이 동시에 발화하는 조건을 가정하였다. 실험 데이터에 기반하여 산출된 총 열방출량(Total heat released, 이하 THR)은 4.8GJ이며, 이를 화재 지속 시간인 1,200초 동안의 평균값으로 환산하여 4,000 kW의 열 방출률을 도출하였다.

### 3.3 화재 해석 시나리오

본 연구의 해석 시나리오는 배터리실 내부에서 발생한 화재를 대상으로, 적용되는 연소 반응의 특성에 따라 두 가지 시나리오로 구분하여 수행하였다. 우선 Case 1은 일반적인 화재 시뮬레이션에서 표준적으로 사용되는 프로판 가스 화재 수준의 그을음(Soot) 및 일산화탄소(CO) 생성률을 적용한 조건이다. 반면, Case 2는 배터리 화재 발생 시 인접한 케이블이나 단열재 등 주변 가연성 물질의 동반 연소 가능성을 고려하여, 유해 물질 생성률(CO yield: 0.1, Soot yield: 0.05)을 보다 높게 설정한 조건이다. 이를 통해 연소 생성물 발생량의 가정에 따른 배터리실 내 인명 안전 위험성을 정량적으로 비교 분석하였다.

### 3.4 주요 측정 지점 선정

일반적으로 여객선은 한 개의 출입구와 여러 층으로 이루어져 있기 때문에 선박 화재 시 대피를 위해 계단을 이용하여야 하지만, 계단은 굴뚝 효과와 같이 연기와 열기가 급격히 확산하는 주요 수직 이동 경로가 되기도 한다. 본 연구에서는 계단 내부의 위험도를 정

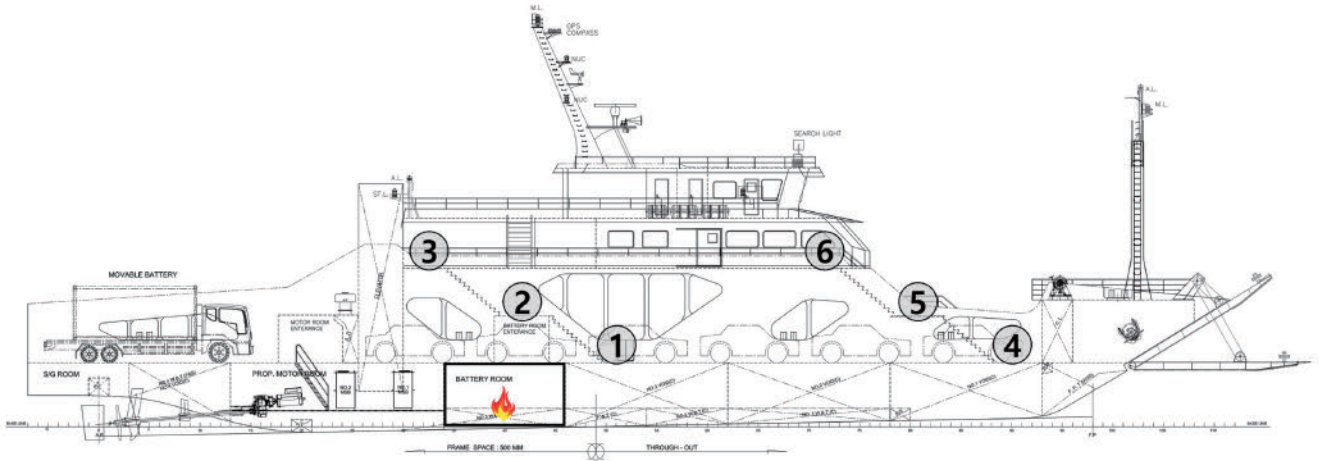


Fig. 2. Measurement point configuration.

량적으로 파악하기 위해, Fig. 2와 같이 배터리실과 인접한 계단과 선수부 계단의 초입부(①, ④), 수직 경로의 중간부(②, ⑤), 그리고 상부 갑판으로 이어지는 상단부(③, ⑥)에 각각 측정점을 배치하였다. 이를 통해 화재 성장에 따른 높이별 온도 분포 및 유해 가스 농도의 시간적 변화 추이를 추적 분석하였다.

#### 4. 화재 확산 및 열전달 해석 결과

##### 4.1 열방출률 및 화재 확산

본 연구의 해석 시나리오는 모두 배터리실 내부 화재를 가정하였으며, 이에 따라 단일 배터리 팩 실험에 기반하여 과도 열전달 및 전반적인 연기 확산 양상을 정량적으로 파악하기 위해 동일한 열방출률 곡선을 적용하였다. Fig. 3(a)는 해석 결과 도출된 열방출률의 시간적 변화를 나타낸다. 그래프에서 확인되는 바와 같이 평균 약 4,000 kW 수준의 일정한 화재 강도가 유지되었으며, 총 열방출량은 4.8GJ로 산출되어 동일한 화재 성상 조건을 보였다.

이러한 화재 강도 조건에서 시뮬레이션을 수행한 결과, 두 케이스 모두 열과 연기가 부력 효과에 의해 상층부로 강하게 상승하는 공

통된 유동 특성을 나타내었다. Fig. 3(b) 및 Fig. 4에 시각화된 바와 같이, 화재 발생 초기에 형성된 고온의 기류는 천장면을 따라 이동하다가 선박 내부의 수직 통로인 계단실로 유입되는 양상을 보였다. 이때 좁고 긴 수직 공간의 특성상 굴뚝 효과가 가속화됨에 따라, 계단실이 연기와 열기를 상부 갑판까지 신속하게 확산시키는 주요 경로로 작용함이 뚜렷하게 확인되었다.

##### 4.2 배터리실 출구 온도 및 그을음 농도

배터리실 출구 위치에서의 온도 및 그을음 농도 변화를 각 케이스에 대하여 비교 분석한 결과는 Fig. 5와 같다. 우선 Fig. 5(a)를 살펴보면, 두 시나리오 모두 화재 발생 직후 급격한 기울기로 온도가 상승하는 공통된 거동을 보였다. Case 1은 최고 약 320°C, Case 2는 최고 약 350°C에 도달하였으며, 이후 약 200~300°C 범위의 고온 상태가 지속되는 유사한 경향을 나타내었다. 이는 시나리오 조건과 관계없이 배터리실 인접 구역은 화재 초기부터 즉각적인 열적 위험에 노출됨을 시사한다. 반면, Fig. 5(b)를 통해 그을음 농도는 시나리오별로 차이가 뚜렷하게 확인되었다. 일반적인 연소 조건을 가정한 Case 1은 낮은 농도를 보인 반면, 악조건을 가정한 Case 2는

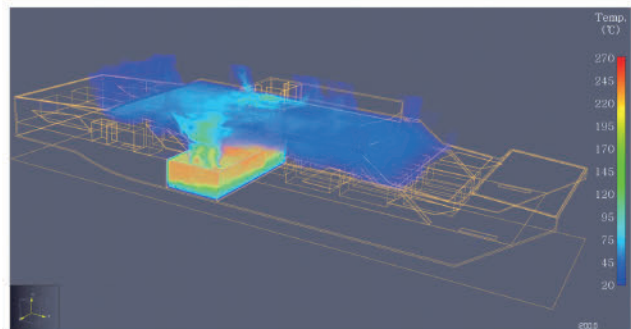
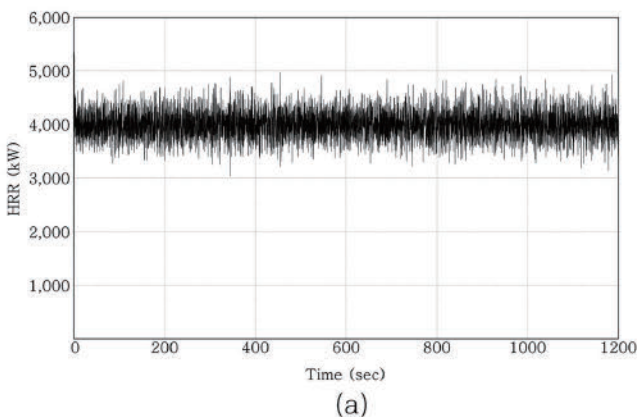


Fig. 3. (a) Heat Release Rate curve; (b) Temperature distribution.

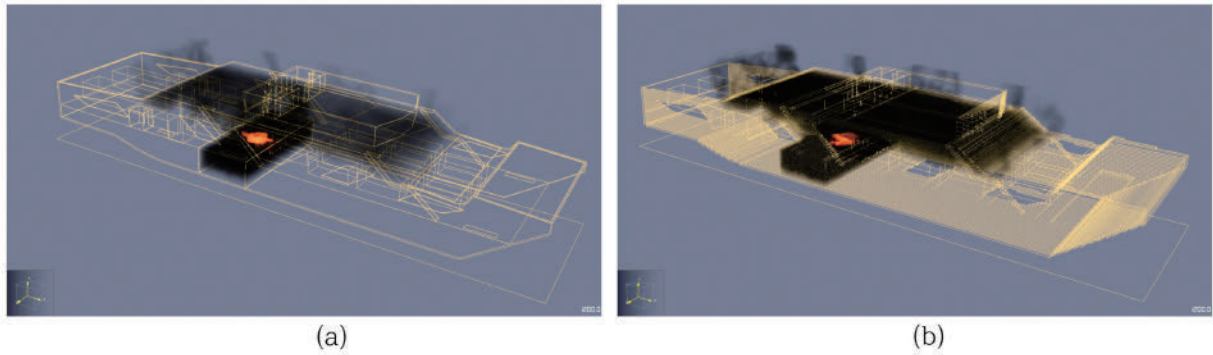


Fig. 4. Fire and smoke spread, 1,200s: (a) Case 1; (b) Case 2.

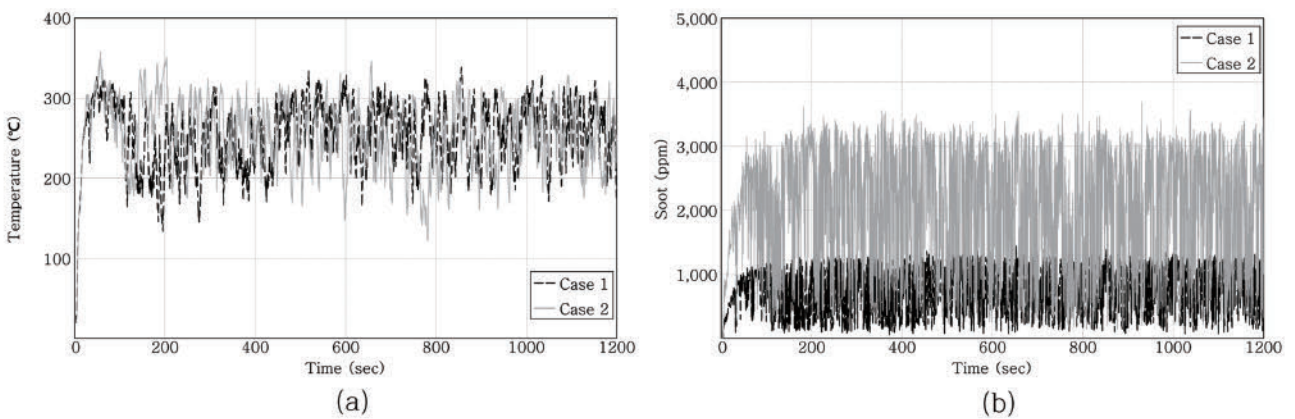


Fig. 5. Result at the battery room exit: (a) Temperature; (b) Soot density.

최고 약 3,000 ppm 수준까지 상승하였다. 그러나 두 경우 모두 선행 연구(Lee et al.[2025])에서 제시한 인명 안전을 위한 피난 허용 한계 기준인 4,000 ppm을 하회하는 것으로 나타나, 사용된 조건 내에서는 해당 구역의 그을음 농도가 임계치를 초과하지 않음을 확인하였다.

4.3 계측점 ①~⑥에서의 온도

배터리실 인접 계단(계측점 ①~③)과 떨어진 계단(계측점 ④~⑥)의 온도 분포를 비교 분석한 결과, 화재 원점과의 거리에 따라 위험도가

확연히 구분되는 경향을 보였다. 우선 배터리실 상부에 위치한 계단(계측점 ①~③)의 경우, Fig. 6(a)와 같이 굴뚝 효과가 집중되는 중간부 지점에서 온도가 최고 130°C까지 상승하였다. 이는 IMO에서 인명 안전을 위해 제시한 생존 한계 온도인 60°C를 2배 이상 초과하는 수치로, 해당 구간이 화재 시 치명적인 열적 위험 구간임을 시사한다. 다만, 동일한 계단 내에서도 초입부(계측점 ①)는 약 20°C를 유지하였으며, 상부 갑판과 연결되는 최중부(계측점 ③)는 약 50°C까지 상승하였으나 개방된 구조에 의한 자연 환기 및 열기 희석 효과로 인해 IMO 안전 기준(60°C)을 초과하지 않는 것으로 분석되

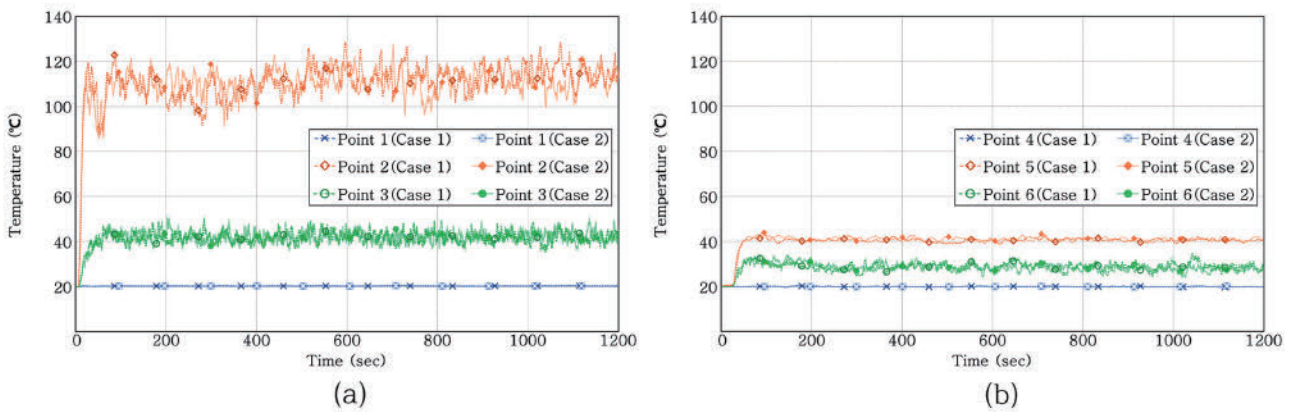


Fig. 6. Temperature: (a) points ①~③; (b) points ④~⑥.

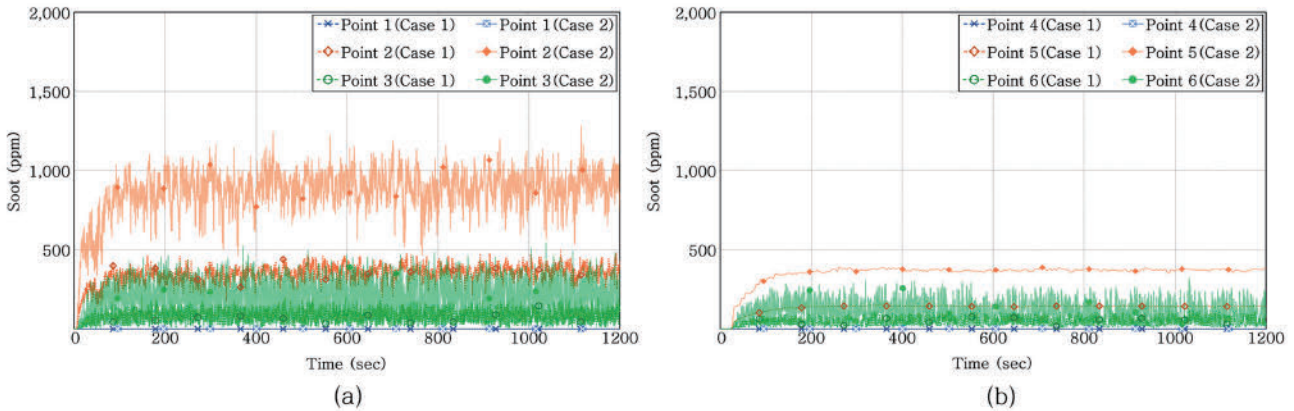


Fig. 7. Soot density: (a) points ①~③; (b) points ④~⑥.

었다. 반면, 배터리실과 떨어진 위치에 있는 계단(계측점 ④~⑥)은 Fig. 6(b)에서 확인되는 바와 같이 화재의 열적 영향이 상대적으로 미미하였다. 해당 구역은 초입부, 중간부, 최종부 측정 지점에서 온도가 IMO 안전 기준인 60℃ 이내로 안정적인 분포를 보였으며, 이는 화재 원점과의 거리로 인해 열기 확산이 제한적이었기 때문으로 판단된다.

4.4 계측점 ①~⑥에서의 그을음 농도

계측점 ①~⑥에 대한 그을음 농도 해석 결과는 Fig. 7과 같다. 온도 분포에서 확인된 위험성과 달리, 그을음 농도의 경우 배터리실 인접 여부와 관계없이 모든 측정 지점에서 인명 안전 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 배터리실 상부 계단(계측점 ①~③)과 배터리실과 떨어진 계단(계측점 ④~⑥) 모두 전체 시간 동안 그을음 농도가 피난 허용 한계 기준인 4,000 ppm을 크게 하회하였다. 특히 유해 물질 생성률을 높게 설정한 Case 2의 보수적인 조건에서도 임계치를 넘지 않는 수치를 유지하는 것으로 확인되었다. 결과적으로 본 해석 시나리오 조건 하에서는, 열적 위험(고온)에 비해 그을음 농도에 의한 직접적인 피해 가능성은 상대적으로 낮으며, 배터리실과 떨어진 계단은 피난 경로로서의 안전성이 충분히 확보되는 것으로 판단된다.

4.5 계측점 ①~⑥에서의 일산화탄소 농도

Case 1과 Case 2 시나리오에 따른 일산화탄소 농도 해석 결과는 Fig. 8과 같다. 그래프 분석 결과, 배터리실 상부 계단(계측점 ①~③)과 배터리실과 떨어진 계단(계측점 ④~⑥) 모두 시나리오 조건과 관계없이 중간부 지점에서 가장 높은 일산화탄소 농도 분포를 보였다. 안전성 측면에서는 시나리오별로 확인한 차이를 보였다. 일반적인 화재 조건을 가정한 Case 1은 모든 측정 지점에서 IMO 인명 안전 기준(500ppm)을 초과하지 않는 안정적인 범위 내에 머물렀다. 반면, 보수적인 악조건을 가정한 Case 2의 경우 Fig. 8(a)에서 확인되는 바와 같이 배터리실 상부 계단의 중간부에서 일산화탄소 농도가 최고 1,000 ppm까지 급격히 상승하였다. 이는 허용 기준인 500 ppm을 2배 이상 초과하는 수치로, 해당 구역이 화재 시 질식 등 심각한 인명 피해가 발생할 수 있는 치명적인 위험 구간임을 시사한다. 단, 배터리실과 떨어진 계단 Fig. 8(b)는 Case 2 조건에서도 기준치 이내의 농도를 유지하여 상대적인 안전성이 확인되었다.

4.6 대피 경로 분석

Fig. 9에 도식화된 종합 대피 경로 분석 결과, 배터리실 상부에 위치한 계단(계측점 ①~③)은 비상 대피로의 기능을 완전히 상실

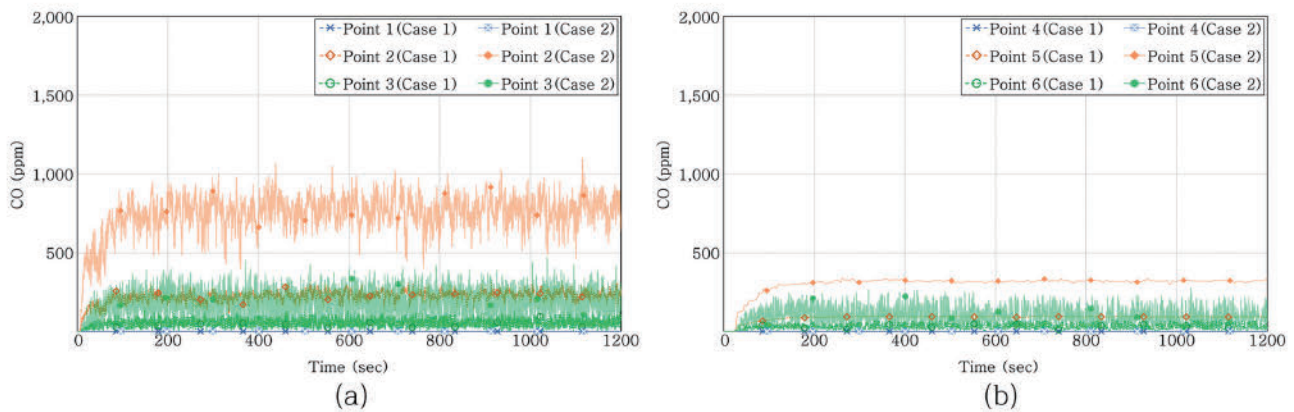


Fig. 8. CO density: (a) points ①~③; (b) points ④~⑥.

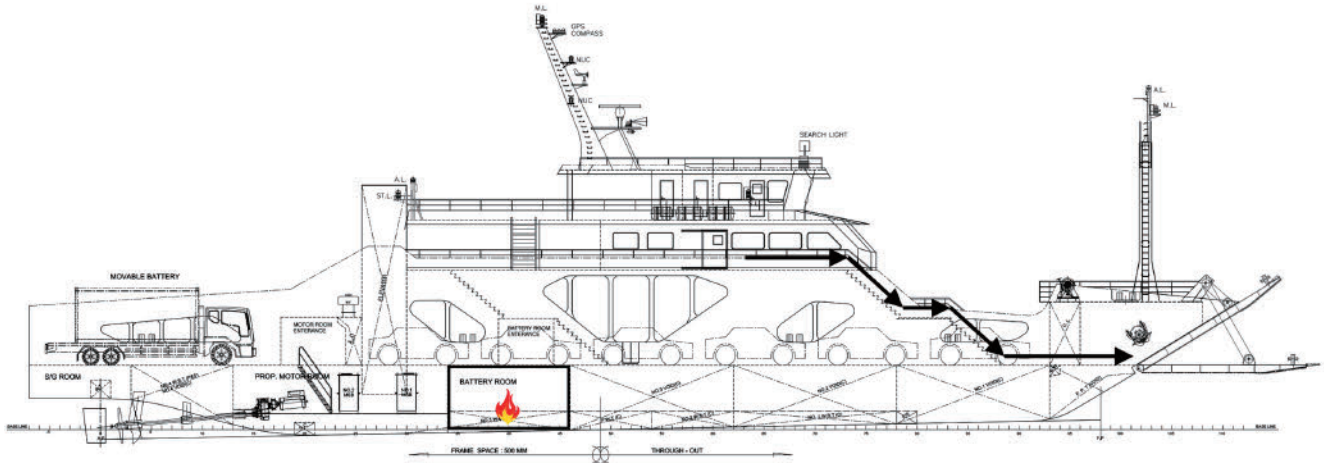


Fig. 9. Evacuation route for Case 1,2.

한 것으로 판단된다. 해당 구역은 두 시나리오 모두에서  $130^{\circ}\text{C}$ 를 상회하는 고온이 형성되었으며, 특히 보수적 조건인 Case 2에서는 치명적인 농도의 일산화탄소(1,000 ppm) 위험까지 중첩되는 것으로 나타나 승객의 생존이 불가능한 위험 구역으로 식별되었다. 이에 반해, 배터리실과 떨어진 반대편 계단(계측점 ④~⑥)은 최악의 조건을 가정한 Case 2 시나리오 하에서도 온도, 독성 가스 농도 등 모든 인명 안전 기준을 충족하는 것으로 확인되었다. 따라서 실제 화재 대응 매뉴얼 수립 시, 승객과 승무원은 화재 발생 즉시 오염 확산이 빠른 배터리실 인접 구역 진입을 철저히 배제하고, 안전성이 검증된 선수부 계단을 활용하여 이동하는 우회 대피 전략이 필수적이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 420톤급 전기추진 차도선을 대상으로 FDS를 활용하여 배터리 열폭주 화재 시 발생하는 열 및 연기의 확산 특성을 정량적으로 분석하였다. 화재 시뮬레이션 결과 선박 내부의 좁고 복잡한 구조적 특성상, 배터리실에서 발생한 고온의 열기류와 유독 가스는 대규모 화원에 의한 급격한 열팽창 압력과 화재 플룸(Fire plume)의 부력, 그리고 수직 공간의 굴뚝 효과가 결합된 복합적인 유동 거동을 보이며 수직 통로인 계단으로 급격히 유입되는 거동을 보였다. 특히 배터리 화재 특성을 반영하여 보수적으로 설정한 Case 2 조건에서, 배터리실 상부 계단의 중간 높이는 최고 온도  $130^{\circ}\text{C}$ , 일산화탄소 농도 1,000 ppm까지 상승하였다. 이는 국제해사기구의 인명 안전 기준(온도  $60^{\circ}\text{C}$ , 일산화탄소 500 ppm)을 2배 이상 초과하는 수치로, 해당 구역이 대피 경로의 기능을 상실함을 확인하였다.

배터리실과 떨어진 위치에 있는 선수부 계단의 경우, 모든 해석 시나리오에서 온도 및 유해 가스 농도가 안전 기준치 이내로 유지됨을 확인하였다. 또한 상부 갑판으로 이어지는 출구 구역은 개방된 공간 특성에 따른 자연 환기 및 희석 효과로 인해 인명 생존 가능성이 상대적으로 높은 것으로 분석되었다.

결론적으로 전기추진 차도선의 화재 안전성 확보를 위해서는 화재 발생 시 오염 확산이 빠른 배터리실 인접 수직 통로를 즉각적으로 차단하고, 안전성이 검증된 배터리실과 떨어진 계단을 활용하는 우회 대피 전략의 수립이 필수적이다. 본 연구의 결과는 향후 친환경 선박의 방재 구조 설계 및 비상 대응 매뉴얼 수립을 위한 기초 자료로 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소 학연 공동연구 및 기술정보 공유지원사업(과제번호 PRS0490) 및 과학기술정보통신부 재원의 한국연구재단 신진연구자지원사업(과제번호 NRF-2021R1C1C2009719)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- [1] IMO(2016), International Maritime Organization, MSC.1/ Circ.1552, Amendments to the Guidelines on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety, p. 4.
- [2] Jung, J.Y., Kwon, T.S., Park, W.H. and Lee, D.H., 2021, Numerical Evaluation of Cooling Technology for Preventing Thermal Runaway in Batteries, J. Korean Soc. Hazard Mitig., 21(5), 107-113.
- [3] Kang, S., Kwon, M., Choi, J.Y. and Choi, S., 2023, Full-scale fire testing of battery electric vehicles, Fire Safety Journal, 140, 103891.
- [4] Kim, B. and Hwang, K.I., 2017, A Study on Grid Size and Generation Method for Fire Simulations for Ship Accommodation Areas, J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 23(7), 791-800.
- [5] Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering(선박해양플랜트연구소), Eco-friendly Ships, Engine for Commercializing Electric Propulsion Car Ferry: Development of Mobile Power Supply System(친환경 선박, 전기추진 차도선 상용화의 엔진:

- 이동식 전원공급 시스템 개발), [https://blog.naver.com/kriso\\_pr/223640837621](https://blog.naver.com/kriso_pr/223640837621), 2024 (accessed 2026.05.12.)
- [6] Krystosik, A., 2002, Analysis of fire spread between two vertical bulkheads on the ship, in Proc. of AMAS Course on Reliability-Based Optimization (RBO'02), Warsaw, Poland, 247-258.
- [7] Lee, H.K., Choi, J., Joo, B.M. and Choi, H.S., 2025, Research Evacuation Route Search in Case of Fire Using the F\_A\* Algorithm Based on the A\* Algorithm, Fire Sci. Eng., 39(1), 22-32.
- [8] Lee, J.Y., Hwang, D.J. and Kim, M., 2023, A Study on the Comprehensive Impact of the 2023 IMO GHG Strategy on International Shipping, J. Soc. Nav. Archit. Korea, 60(6), 397-405.
- [9] McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C. and Overholt, K., 2014, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model, NIST Special Publication 1018-1, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- [10] Zhang, X.G., Guo, Y.C., Chan, C.K., Lin, W.Y., 2007, Numerical simulations on fire spread and smoke movement in an underground car park, Building and Environment, 42, 3446-3475.

---

Received 5 January 2026

1st Revised 27 January 2026, 2nd Revised 13 March 2026

Accepted 16 March 2026