



# 용융염원자로 컨테이너선 개발을 위한 화재위험요인 분석

최수빈<sup>1</sup>·김도훈<sup>1</sup>·이훈석<sup>1</sup>·김혜진<sup>2,†</sup>  
홍익대학교 조선해양공학과<sup>1</sup>  
홍익대학교 미래모빌리티융합전공<sup>2</sup>

## Fire Risk Factor Analysis for Development of MSR-Powered Container Ships

Soo-Vin Choi<sup>1</sup>·Do-Hun Kim<sup>1</sup>·Hun-Seok Lee<sup>1</sup>·Haejin Kim<sup>2,†</sup>  
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Hongik University<sup>1</sup>  
Future Mobility, Hongik University<sup>2</sup>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This study presents a quantitative fire risk assessment framework for MSR-based container ships, addressing the combined hazards of structural damage and radiation release unique to molten salt reactors. Major fire causes were identified through maritime accident statistics, with scenarios developed via Event Tree Analysis and uncertainties evaluated using Monte Carlo simulations. CFD-based fire modeling revealed that ultrafast electrical fires pose the greatest structural risk, with potential long-term thermal fatigue in MSR shielding walls and carbon steel bulkheads. The findings provide a foundation for future MSR ship design and safety standards.

**Keywords** : Small modular reactor(SMR, 소형 모듈형 원자로), Molten salt reactor(MSR, 용융염 원자로), Fire hazard(화재 위험)

## 1. 서론

친환경 연료 사용이 해운 산업의 핵심 과제로 부상함에 따라, 소형 모듈형 원자로(Small Modular Reactor, SMR)가 차세대 선박 동력원으로 주목받고 있다(American Bureau of Shipping, 2024a). 특히 용융염 원자로(Molten Salt Reactor, MSR)는 고온에서 운전이 가능하고 저압계통을 활용하는 특성상, 고에너지 효율과 구조 간소화를 동시에 달성할 수 있어 대형 컨테이너선 적용에 적합한 차세대 원자로 기술로 평가된다(American Bureau of Shipping, 2024b; IAEA, 2022). 그러나 MSR은 기존 가압경수로(Pressurized Water Reactor, PWR)와 달리 연료와 냉각재가 동일한 용융염으로 구성되어 있어, 화재 발생 시 차폐재인 납(Pb) 및 탄소강(Carbon Steel) 구조물에 열응력이 누적되어 구조 손상이 발생할 수 있다(Electric Power Research Institute (EPRI) and U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), 2005). 이러한 구조적 손상은 방사선 차폐 성능 저하로 이어져, 단순 화재를 넘어 방사선 누출이라는 2차 재난으로 확대될 수 있는 복합 위험성을 내포한다. 따라서 MSR 기반 선박을 대상으로 한 체계적 화재 위험 분석 연구가 필요하다(Anderson and Krasniqi, 2023).

본 연구에서는 선박 사고 통계 기반 위험도 평가, Event Tree Analysis(ETA), Computational Fluid Dynamics(CFD) 해석을 통한 정량적 위험 분석 프레임워크를 제시한다. 본 연구는 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 불확실성을 반영하고, CFD 기반 화재 시뮬레이션을 수행하여 실제 구조적 영향을 체계적으로 검증함으로써 MSR 컨테이너선의 화재 시나리오와 구조적 영향을 정량적으로 평가하고자 한다.

## 2. 화재 위험 분석

### 2.1 원자력 선박 화재 안전 규정 분석

원자력 추진 선박은 화재 발생 시 단순한 구조물 손상에 그치지 않고 원자로 손상과 이에 따른 방사선 유출까지 동반할 수 있는 복합적 위험을 내포하고 있다. 이에 따라, 원자력 추진 선박에 적합한 화재 안전 기준의 검토는 필수적이다. 본 연구에서는 우선적으로 IMO A.491(XII) 규정과 ABS 2024 기준을 중심으로 주요 내용을 비교·분석하였다. Table 1은 두 규정을 간략 비교한 표

Table 1 A.491(XII) vs. ABS 2024 Fire Safety Standards

Category	A.491(XII)	ABS 2024
Application	Nuclear Merchant Ship	Marine Nuclear Power Systems
Reactor type	PWR-based ships	Various reactor types included
Core concept	Design focused on minimizing fire and explosion impacts	Integrated safety objectives linked to SOLAS, risk-based design and system redundancy
Characteristics	Baseline standard adopted in 1981	Updated standard reflecting recent technologies and regulations

를 나타내었다.

A.491(XII)은 1981년 IMO에서 제정된 원자력 상선을 위한 기본 설계 기준으로, 원칙 중심의 규정 체계를 가지고 있으며, 가압 경수로 기반 원자로 중심이다. 반면, ABS 2024는 미국선급협회(ABS)에서 제정한 기준으로, 다양한 원자로 유형을 포함할 수 있으며 SOLAS 및 리스크 기반 설계 원칙을 반영하여 최신 기술과 국제 규제 동향을 반영하고 있다.

하위 규정의 비교에서도 두 기준은 뚜렷한 차이를 보인다. 예를 들어, A.491의 3.9.1절은 ‘기능 유지를 위한 내화 격리 구조’만을 요구하는 반면, ABS 2024는 이를 FIR(Fire Integrity Rating) 번호 체계에 따라 구체화하여, 중복 시스템 간의 물리적 분리 요건을 명확히 제시하고 있다. 또한 ABS 2024는 A.491 대비 시스템 단위 운영, 자동 제어 및 화재 감지/경보 시스템 요건을 구체적으로 제시함으로써, MSR과 같은 차세대 원자로의 적용에도 적합한 기준을 제공하고 있다. 따라서 본 연구는 ABS 2024의 기술 기준을 기반으로 MSR 추진 컨테이너선의 화재 안전성을 정량적으로 평가하기 위한 위험도 분석 프레임워크를 제시하고자 하며, 이 프레임워크의 구체적 절차인 사고통계 분석, 사건 수목 기법(ETA), 확률분포 모델링, Monte Carlo 시뮬레이션, 그리고 Risk Matrix 평가를 순차적으로 기술한다.

## 2.2 선박 화재 사고 통계 분석

화재 위험 요인을 정량적으로 평가하기 위해, IMO GISIS(Global Integrated Shipping Information System)에서 제공하는 해양 사고 보고서 데이터를 활용하였다(IMO, 2024). 전체 3,828건의 보고 중 1995년부터 2023년까지의 선박 화재 사고 142건을 선별하여 분석 대상으로 삼았다.

수집된 142건의 사고를 Fig.1과 같이 사고 원인별로 분류한 결과, 총 7가지 주요 원인이 도출되었으며, 기타 및 불명확을 제외한 사고 원인 중 연료 및 엔진 계통 관련 화재가 41건(28.87%)으로 가장 많았고, 전기 계통은 28건(19.71%)으로 약 1/5를 차지했으며, 특히 고온 부하와 절연 손상 등으로 인한 4단계(Level

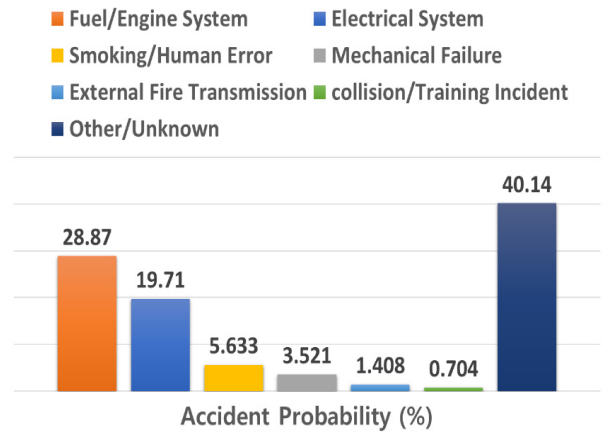


Fig. 1 Fire occurrence probability by accident cause

Table 2 IMO FSA severity index

SI	Severity	Effects on ship
1	Minor	Local equipment damage
2	Significant	Non-severe ship damage
3	Severe	Severe damage
4	Catastrophic	Total loss

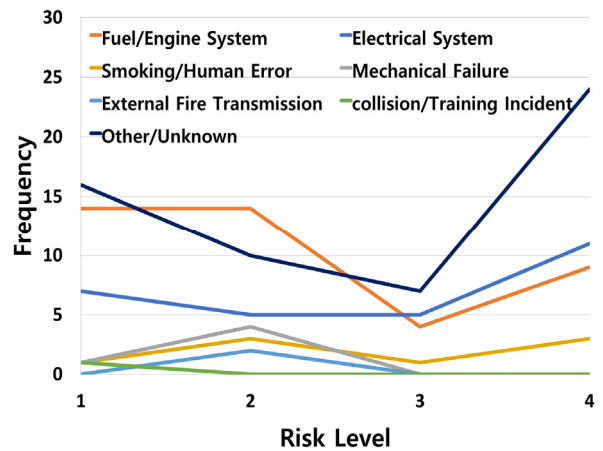


Fig. 2 Frequency-Risk level curve for 7 main causes of ship fires

4) 심각도 비율이 가장 높게 나타났다.

또한, 각 사고의 영향 수준을 평가하기 위해 Table 2와 같이 IMO FSA(Formal Safety Assessment)에서 정의한 심각도(SI, Severity Index) 기준을 적용하였다. 해당 기준은 선체 손상 정도를 바탕으로 1단계(국소 장비 손상)부터 4단계(전체 또는 전손)에 이르기까지 총 4단계로 구성된다. 이러한 기준을 바탕으로 단순 발생 빈도뿐 아니라 심각도까지 반영한 통합 위험도 평가를 수행하였다.

Fig. 2는 IMO GISIS(1995-2023)에서 수집된 142건의 선박 화재 사고 보고서를 원인별로 재분류하고, IMO FSA 심각도(SI) 기준을 적용하여 4단계 위험 수준으로 구분한 결과이다.

Table 3 Frequency of initiating events

Accident scenario	Accidents frequency (per ship year) ( $\times 10^{-5}$ )
Fuel/Engine system	1.63
Electrical system	1.11
Smoking/Human error	0.317
Mechanical failure	0.198
External fire transmission	0.0793
Collision/Training incident	0.0396
Other/unknown	2.26
Total	5.63

### 2.3 선박 연수 기반 사고 발생 빈도 산정

정량적 사고 빈도 산정을 위해서는 전체 선박 연수(ship year)를 계산해야 하며, 이는 일반적으로 각 연도에 운항하였던 선박 수를 연도별로 합산하여 산출한다. 이를 위해 UNCTAD(United Nations Conference on Trade and Development)에서 제공하는 최근 12년간(2011~2022)의 운항하였던 선박의 통계를 바탕으로 연평균 선박 수를 추정하여 전체 선박 연수를 계산하였다(UNCTAD, 2023).

전 세계 선박 운항 수는 2011년에 약 83,000척, 2022년에는 104,000척으로 확인되었으며 12년간 선박 운항 수는 꾸준히 증가하였다. 이를 고려하여, 1995년에는 약 70,000척 수준에서 선박 수가 시작되어 연평균 약 1,214척씩 증가하였다고 가정하여 연도별 선박 운항 수를 기반으로 누적 선박 연수를 추산한 결과, 약 2,523,000 ship year로 산정되었다.

이러한 선박 연수 값을 바탕으로, 선박 화재 사고 142건에 대한 사고 빈도를 계산한 결과, 전체 선박 연수 대비 화재 사고 발생률은 약  $5.63 \times 10^{-5}$ 으로 나타났다. Table 3은 각 사고 시나리오에 대한 선박 연간 사고 발생 빈도이다.

Table 4는 앞서 도출한 사고 원인별 데이터를 기반으로 IMO FSA에서 정의한 심각도 기준에 따라 각 사고를 재분류하고, 이에 해당하는 연간 발생 빈도를 산출하였다. Table 3과 Table 4는 모두 선박 화재 사고의 발생 확률을 다루지만, 계산 대상과 확률의 정의가 다르기 때문에 값이 일치하지 않는다. Table 3은 IMO GISIS 데이터베이스에서 추출된 화재 사고 142건을 대상으로, 각 원인별 사고가 화재 사고 내에서 차지하는 비율, 즉 화재 발생 시 특정 원인이 될 확률을 계산한 결과이다. 따라서 Table 3

은 화재 사고가 이미 발생했다는 조건 하에서의 원인별 상대적 발생 확률을 의미한다. 반면 Table 4는 IMO GISIS의 전체 해양 사고(화재 + 충돌 + 기계고장 등) 3,828건의 데이터를 기반으로, 화재 사고가 전체 사고 중 얼마나 자주 발생하는지를 계산한 값이다. 즉, 모든 유형의 선박 사고를 각 위험 수준(Level 1~4)의 빈도를 산정하였다. 따라서 Table 3은 화재 사고 내부의 상대적 발생 확률, Table 4는 전체 사고 대비 화재 사고의 절대 발생 확률을 나타낸다.

특히 주목할 점은, 연료 및 엔진 계통 사고는 전체적으로 가장 높은 빈도를 보였지만, 가장 높은 심각도(Level 4)에 해당하는 사고는 전기 계통에서 더 빈번하게 발생한 것으로 나타났다. 이는 전기 계통 화재가 더 적은 빈도로 발생하더라도, 심각도는 더 높다는 것을 시사한다. 이러한 분석 결과는 후속 단계에서 수행된 CFD 화재 시뮬레이션의 대상 시나리오를 전기 계통 화재로 설정하는 데 주요 근거로 활용되었다.

### 2.4 Event Tree Analysis

앞서 수행한 사고 통계 분석 및 위험 수준 평가를 통해, 주요 화재 원인별 정량적 발생 가능성을 도출하였다. 그러나 화재 사고는 단일 발생 이벤트로 끝나는 것이 아니라 일련의 전개 과정에 따라 결과의 심각도가 크게 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 사건 수목 기법(Event Tree Analysis, ETA)을 적용하였다. ETA는 초기 사건 발생 이후, 각 단계에서의 성공 또는 실패 여부에 따라 시나리오가 분기되며, 이에 따른 최종 결과의 발생 확률을 도출할 수 있는 분석 도구이다.

Table 5는 각각의 분기점에서 발생할 확률값을 정리한 표이다. 본 연구에서는 화재 감지, 초기 진압, 성장 속도, 후기 진압의 네 가지 주요 단계를 설정하였다. 각 단계의 발생 확률은 원전 화재 확률론적 안전성 평가 지침 NUREG/CR-6850 및 전 해군 함정 화재 위험도 평가 연구 (Jeon and Kim, 2008)를 기반으로 설정하였다. 후기 진압 성공률은 NUREG/CR-6850에 기반한 Suppression model을 적용하였으며 수식은 아래와 같다.

$$P_{n,s}(t) = e^{-\lambda t} \tag{1}$$

여기서  $\lambda$ 는 화재 억제 시스템의 단위 시간당 진압 성공 가능성을 나타내는 억제 계수(suppression coefficient)이다. 즉,  $\lambda$  값이 클수록 빠르게 화재를 억제할 수 있으며, 그만큼 억제 실패 확률은

Table 4 Risk level-based fire accident frequency by cause

Risk level	Fuel/Engine system ( $\times 10^{-6}$ )	Electrical system ( $\times 10^{-6}$ )	Smoking/Human error ( $\times 10^{-6}$ )	Mechanical failure ( $\times 10^{-6}$ )	External fire transmission ( $\times 10^{-6}$ )	Collision/Training incident ( $\times 10^{-6}$ )	Other/Unknown ( $\times 10^{-6}$ )	Total ( $\times 10^{-6}$ )
1	5.55	2.77	0.40	0.39	0	0.39	6.34	15.9
2	5.55	1.98	1.19	1.59	0.79	0	3.96	15.1
3	1.59	1.98	0.40	0	0	0	2.77	6.74
4	3.57	4.36	1.19	0	0	0	9.51	18.6

Table 5 Probability of each factor

Contents		Probability
Fire detection	Success	0.95
	Failure	0.05
Initial fire suppression	Success (after successful detection)	0.94
	Failure (after successful detection)	0.06
	Success (after detection failure)	0.90
	Failure (after detection failure)	0.10
Fire growth rate	Ultra fast	0.38
	Fast	0.62
Final fire suppression	Success (fast)	0.70
	Failure (fast)	0.30
	Success (ultrafast)	0.24
	Failure (ultrafast)	0.76

줄어든다. 본 연구에서는  $\lambda$  값이 화재 유형별로 다르다는 점에 주목하였으며, 공식 문서에 따라 fast 성장 화재의  $\lambda$ 는 0.12, Ultrafast 성장 화재의  $\lambda$ 는 0.03으로 설정하였다. 문서에 제시된  $t = 10$ 분 시점의 억제 실패 확률을 활용하여, fast 화재는 실패 확률을 0.30, 성공 확률이 0.70이며, Ultrafast 화재는 실패 확률이 0.76, 성공 확률을 0.24로 적용하였다.

앞서 정의한 네 가지 주요 단계를 기반으로, 화재 감지, 초기 진압, 성장 속도, 후기 진압의 경로를 따라 총 10개의 시나리오를 구성하였다. 각 시나리오는 단계별 성공/실패 여부의 조합에 따라 분기되며, 각 분기점의 확률값을 곱하여 전체 시나리오의 고정 발생 확률(Fixed Probability)을 산출하였다. Fig. 3은 각 시나리오의 분기 구조를 나타낸다.

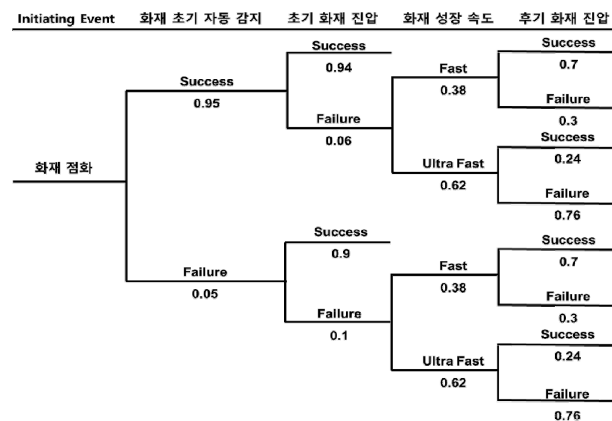


Fig. 3 Event tree scenario

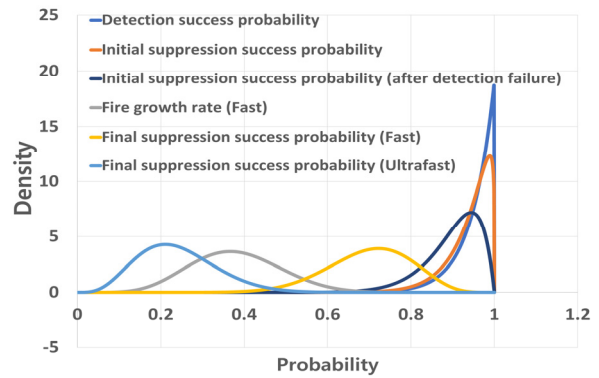


Fig. 4 Beta Distributions of Scenario Input Variables

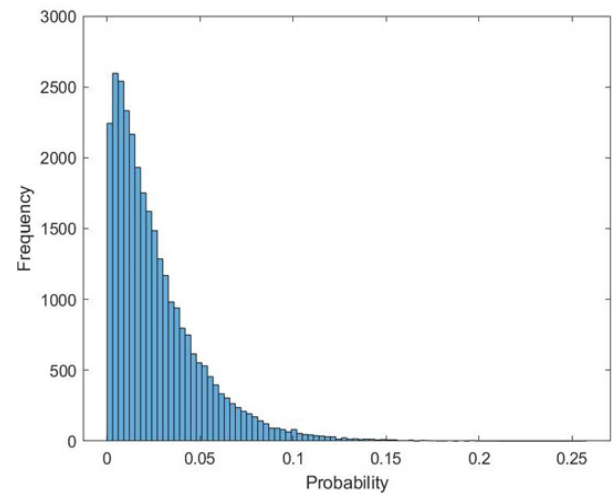


Fig. 5 Distribution of S5

### 2.5 Monte Carlo simulation

앞서 수행된 Event Tree Analysis(ETA)는 각 단계의 성공/실패 확률이 고정되어 있다는 가정 하에 시나리오별 발생 확률을 계산한 것이다. 그러나 실제 상황에서는 각각의 분기점에서의 확률이 설비 상태, 환경 조건, 운영자 대응 등 다양한 요인에 따라 변화할 수 있다. 따라서 이러한 불확실성을 고려한 확률 기반 분석이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 Palisade Corporation에서 개발한 XLRisk 프로그램을 이용하여 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였다(Palisade Corporation, 2023). XLRisk는 확률 분포 함수에 대한 다양한 정의와 샘플링 기능을 제공하며, 특히 확률값과 같이 [0,1] 구간으로 제한되는 변수에 대해서는 Beta 분포를 권장한다. Beta 분포는  $\alpha, \beta$  파라미터에 따라 분포의 비대칭성 및 분산을 조절할 수 있어, 감지 성공률(평균 0.95), 후기 진압 성공률(평균 0.24) 등 특정 확률 주변의 불확실성을 표현하는 데 적합하다. 반면 Normal 분포는 음수 확률이나 1을 초과하는 값이 산출될 수 있고, Uniform 분포는 모든 값이 동일 확률이라는 비현실적 가정을 내포한다. 따라서 Beta 분포를 채택한 것은 본 연구의 불확실성 모델링에도 가장 합리적인 접근이라 판단하였다.

Table 6 Probability of each scenario

NO	Scenario	ETA (Fixed Probability, %)	Monte Carlo (Simulated Probability, %)
S1	Detection success → Initial suppression success → Termination	89.30	89.2999
S2	Detection success → Initial suppression failure → Fast growth → Final suppression success	1.510	1.5157
S3	Detection success → Initial suppression failure → Fast growth → Final suppression failure	0.650	0.6488
S4	Detection success → Initial suppression failure → Ultrafast growth → Final suppression success	0.850	0.8485
S5	Detection success → Initial suppression failure → Ultrafast growth → Final suppression failure	2.680	2.6840
S6	Detection failure → Initial suppression failure → Fast growth → Final suppression success	4.500	4.5020
S7	Detection failure → Initial suppression failure → Fast growth → Final suppression failure	0.130	0.1330
S8	Detection failure → Initial suppression failure → Fast growth → Final suppression failure	0.060	0.0570
S9	Detection failure → Initial suppression failure → Ultrafast growth → Final suppression success	0.070	0.0453
S10	Detection failure → Initial suppression failure → Ultrafast growth → Final suppression failure	0.240	0.2337

Fig. 4는 각각의 분기점의 확률 분포를 나타낸다. 이러한 조건 하에서 총 30,000회의 반복 샘플링을 통해 모든 케이스에 대한 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. 대표적으로 S5의 확률분포는 Fig. 5와 같다. 선박 화재에 대한 기존 ETA 연구는 화재 성장률이나 억제 확률을 단일 고정값으로 설정하는 한계가 있었다. 본 연구는 각 단계별 확률을 확률분포 함수(Beta distribution)로 설정하고, 30,000회 샘플링을 통해 Monte Carlo 기반 시나리오 확률을 도출하였다.

Table 6은 같은 구조를 대상으로 각 단계에서의 성공, 실패 확률을 고정값으로 계산한 ETA를 통해 도출된 결과와 확률의 변동성을 고려해 Monte Carlo 시뮬레이션으로 계산한 결과값을 비교한 표이다. 두 결과가 거의 비슷하게 나타난 이유는, 입력된 확률들이 평균값 주변에 모여 있어(분산이 매우 작아), 반복 계산을 해도 대부분 ETA의 고정 확률과 비슷한 값으로 수렴했기 때문이다. 즉, 감지 성공률(0.95)이나 후기 진압 성공률(0.24) 등 주요 입력 확률이 안정적인 값으로 설정되어 있어 불확실성을 반영하더라도 전체적인 시나리오 확률의 차이가 나타나지 않았다. 따라서 ETA와 Monte Carlo 결과가 전반적으로 유사하게 나타난 것은 주요 입력 확률의 불확실성이 작고 모델이 안정적임을 보여준다.

### 2.6 Risk Matrix 기반 종합 위험도 평가

Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 각 화재 시나리오의 발생 확률을 정량화하였지만, 확률 정보만으로는 사고의 잠재적 피해 수준을 충분히 설명할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 각 시나리오가 초래할 수 있는 구조적 손상의 정도, 즉 심각도(Severity

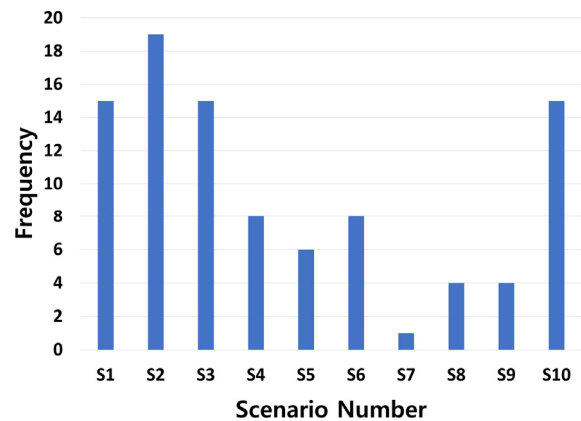


Fig. 6 Occurrence frequency of each fire scenario

Table 7 Frequency of initiating events

NO	Frequency	Severity	Risk
S1	Very high	Minor	Low
S2	High	Significant	Medium
S3	Medium	Catastrophic	High
S4	Medium	Severe	Medium
S5	high	Catastrophic	High
S6	High	Minor	Low
S7	Medium	Severe	High
S8	Low	Catastrophic	Medium
S9	Low	Catastrophic	Medium
S10	Medium	Catastrophic	High

	Very High (≥10%)	High (1~10%)	Medium (0.1~1%)	Low (<0.1%)
Level 4	Critical	High	High	Medium
Level 3	High	High	Medium	Low
Level 2	Medium	Medium	Low	Low
Level 1	Low	Low	Low	Negligible

Fig. 7 Risk matrix

Index, SI)를 평가하여 리스크 수준을 보완적으로 판단하였다.

이를 위해 위에 조사하였던 사고사례 중 총 100건의 선박 화재 사고사례를 분석하고, 각 사고를 감지 여부, 초기 진압 여부, 화재 성장 속도, 후기 진압의 4단계 조건에 따라 10개의 전형적 시나리오로 재분류하였다. 각 시나리오에 따른 사고사례의 분포는 Fig. 6과 같다. Severity Index(SI)는 실제 IMO GISIS 보고서에 기록된 구조 손상 수준으로 정량화하였고, 이로부터 시나리오별 평균 SI 값을 산출하였다.

각 시나리오의 심각도(Severity Index, SI)는 Table 1에 나타나는 IMO FSA의 분류 기준과 실제 사고 사례의 구조적 피해 데이터를 결합하여 산정하였다. 사고별 피해 범위를 구조물 손상 정도, 화재 확산 구획 수, 전소 여부 등을 기준으로 Severity 등급을 결정하였다.

그 결과, Table 7과 같이 S1과 S6은 초기 대응이 신속히 이루어져 피해가 국소 장비 수준에 그친 사례로 Minor에 해당하였다. S2, S4, S8, S9는 부분적 구조 손상 또는 구획 내 확산이 보고된 사례로 Significant~Severe 수준으로 평가되었다. 반면 S3, S5, S7, S10은 화재 확산이 빠르거나 감지·진압 실패로 인한 전소·격벽 붕괴 등이 보고되어 catastrophic에 해당하였다. 이와 같은 분류는 진압 성공 여부보다는 사후 피해 수준에 기반한 결과로, 실제 사고 데이터의 심각도 분포를 반영함으로써 평가의 일관성과 객관성을 확보하였다.

Frequency 값은 Table 5에서 Monte Carlo 시뮬레이션으로 도출된 시나리오별 발생 확률값을 Fig. 7의 미국 원자력규제위원회(NUREG)와 IMO의 FSA 기준을 참고하여, Risk Matrix를 구성하여 등급 기준에 맞게 분류하였다. 즉, Table 5의 확률값을 기준

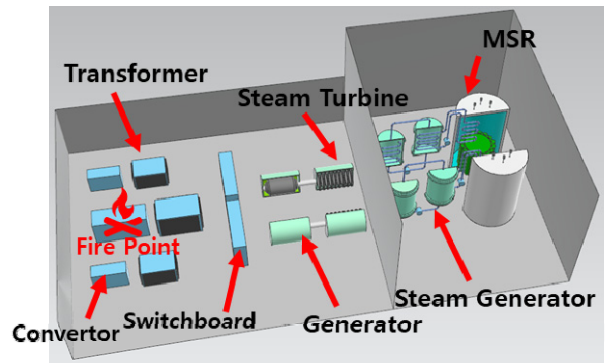


Fig. 9 Fire simulation model

로 빈도 구간을 설정하여, 10% 이상은 Very High, 1~10%는 High, 0.1~1%는 Medium, 0.1% 미만은 Low로 등급화하였다.

앞서 도출된 각 시나리오의 발생 확률과 구조 손상 기반 심각도를 종합적으로 고려하여, 최종 위험도를 평가하기 위해 Risk Matrix 기법을 적용하였다. 각 시나리오는 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 도출된 발생 확률값과 사고사례 기반 심각도 레벨을 바탕으로, Risk Matrix 상의 위치를 결정하였다. 그 결과, S5 시나리오는 Ultrafast 성장 조건과 높은 발생 확률을 동시에 충족하여 High Risk로 분류되었으며, 반대로 S1 시나리오는 발생 확률이 매우 높음에도 불구하고 구조적 피해가 경미하여 Low Risk로 평가되었다. 각 시나리오의 Risk 등급은 Table 7과 같다.

이와 같은 리스크 평가 방식은 단순히 사고 발생 가능성만이 아니라, 발생 시 기대되는 피해 수준까지 함께 반영함으로써, 우선 관리가 필요한 고위험 시나리오를 효과적으로 식별할 수 있다. 이러한 결과는 향후 설계 개선, 안전 시스템 강화, 대응 자원 우선순위 결정 등에서 중요한 전략적 기준으로 작용할 수 있다.

### 3. 화재 시뮬레이션

#### 3.1 시나리오 선정 및 모델링

앞서 수행한 사고 위험 분석과 ETA 결과를 바탕으로, 본 연구에서는 구조적 영향이 가장 클 것으로 판단되는 S5 시나리오를

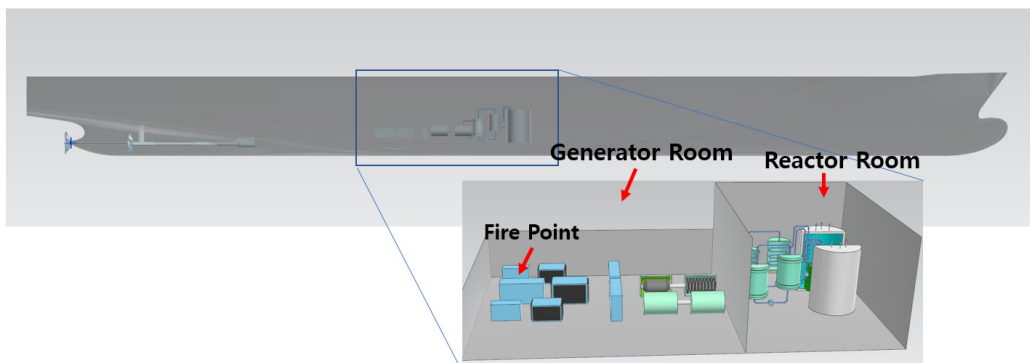


Fig. 8 Sectional view of MSR powered container ship

대상으로 CFD 기반 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 해당 시나리오 오는 초기 감지에는 성공하였지만, 초기 진압 실패, Ultrafast 성장, 후기 진압 실패의 조건을 포함하는 사고 전개 경로에 해당한다. 화재 발생 위치는 발전 구획 내부의 전기 컨버터(converter)로 설정하였으며, SMR 차폐 구역에 대한 열적 영향을 분석하는 것을 주목적으로 하였다.

시뮬레이션은 STAR-CCM+를 사용하였으며, 해석 대상 선박은 Triple Skeg 구조를 갖는 MSR 추진 컨테이너선으로 설정하고, 주요 시스템은 선체 중앙부에 위치한 reactor room과 generator room으로 구분되었다. Fig. 9는 해당 시뮬레이션에 사용된 선박 단면도이며, Fig. 8은 3D CAD 화재 모델로, 각 장비와 화재 발생 위치가 표시되어 있다.

CFD 해석은 시간에 따른 열방출률을 고려한 모델을 기반으로 수행되었으며 식은 아래와 같다.

$$Q = \alpha t^2 \tag{2}$$

선박의 generator room과 같은 복잡하고 밀폐된 구획은 화재 발생 시 내부 공기층의 급격한 열팽창과 압력 상승으로 인해 열 전달 속도가 빠르며, 복잡한 배관과 전기 장비로 인한 화재 확산 경로의 다중성이 존재한다. 특히 본 연구의 시나리오 S5에서 가정한 초기 발화원은 전기적 절연 파괴(electrical insulation failure)로 인한 아크(arc) 및 단락(short circuit) 현상이며, 이는 발전기·변환기 계통 주변의 고밀도 케이블 트레이, 절연체, 윤활유 배관 등 고가연성(high combustibility) 물질을 거의 즉각적으로 착화시킨다. 이러한 환경에서는 화재 성장 단계에서 전기적 에너지 방출 + 2차 가연물 연소가 동시에 발생하여 매우 짧은 시간 내에 최대 열 방출률에 도달할 수 있다. 실제로 NUREG/CR-6850 및 NFPA 555(2017)에서는 전기기기실(electrical equipment room)이나 발전기실(generator room)을 “ultrafast 성장형 화재(ultrafast-growing fire)”의 대표 사례로 분류하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 물리적 특성과 통계적으로 도출된 최악의 심각도(Level 4) 시나리오를 합리적으로 모델링하기 위해, 화재 공학에서 제시하는 가장 보수적인 성장 조건인 ultra fast 성장 조건을 반영하여  $\alpha=0.1875\text{kW/s}^2$ 를 적용하였다. 또한 Mayfield and Hopkin (2011)에서도, 고밀도 연료가 수직 또는 밀집 형태로 배치된 환경(high-rack storage conditions)에서 초고속 화재

성장이 나타나며  $\alpha$ 가  $0.1876\text{kW/s}^2$ 로 정의되어 있다. 이러한 가정은 실제 선박 내 전기구획의 밀폐성과 열적 누적 효과를 반영하여, 전기적 발화가 초기에 국소적이더라도 복합 가연물의 연쇄 연소로 인해 급격히 확산될 수 있음을 실질적으로 재현한다.

최대 열 방출률(Heat Release Rate, HRR)은 국내외 화재 시뮬레이션 기준 및 선행 연구를 종합적으로 검토하여 10MW로 보수적으로 설정하였다. 국내 기준인 건설교통부 철도시설 안전 세부 기준에서는 화재 및 대피 시뮬레이션 시 10MW 이상의 peak HRR를 적용하도록 규정하고 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013). 또한 Kim et al. (2013)은 인천터미널역 CFD 기반 화재 해석에서 20MW 규모의 화원을 설정하여 대형 실내 공간을 대상으로 한 시뮬레이션을 수행한 바 있다(Kim et al. 2013). 본 연구의 대상 구획인 Generator Room은 해당 연구의 터미널 구획보다 체적이 약 50% 이하로 작고 환기율이 낮은 밀폐형 공간에 해당하므로, 동일한 수준의 화재 부하를 적용할 경우 과도한 조건으로 평가될 수 있다. 따라서, 공간 체적 대비 열 방출 밀도(heat release density) 기준으로 환산 시 약  $250\sim 300\text{kW/m}^2$  수준에 해당하는 peak HRR = 10MW를 보수적 설계 화재(design fire)로 채택하였다. 이는 화재 공학에서 제시하는 고밀도 전기실·기계실 구획의 대표 설계 화재 조건과 일치하며(Mayfield and Hopkin (2011); NFPA 555, 2017), 본 시뮬레이션에서 적용된 Ultrafast 성장 조건과의 조합을 통해 generator room 환경의 최대 열적 부하를 합리적으로 재현할 수 있다. Fig. 10은 CFD 해석에 적용된 HRR 곡선을 나타낸다.

화재 발생 구획의 평면 치수는 가로 39m, 세로 33m, 인접한 원자로 구획은 가로 23m, 세로 33m이다. 두 구획은 두께 12mm의 탄소강(carbon steel) 격벽으로 구분되며, 원자로 구획 외측에는 두께 60mm의 납(Pb) 차폐 벽체가 배치되어 있다. 구조물 재질은 ABS 개념설계를 기반으로 선정하였다(ABS, 2024). 각구조물의 물성치는 Table 8과 같다.

Table 8 Properties of materials used in the fire simulation

Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat (J/kg·K)	Thermal conductivity (W/m·K)
Carbon steel	7,832	434	63.9
Pb	11,340	129	33

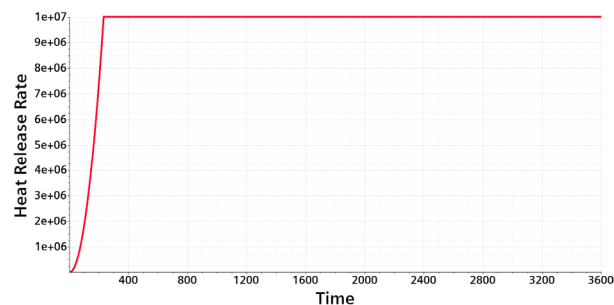


Fig. 10 Heat Release Rate in CFD simulation

화염 및 열 확산은 컨버터 상부에서 시작해 상향 및 인접 격벽 방향으로 진행되는 형태로 정의하였다. 초기 조건은 구획 내의 온도 20°C, 압력은 101.3kPa로 설정하였다. 유동 해석에는 RANS 기반의 Realizable k-ε 모델을 채택하였으며, 난류 효과를 반영하고 연기 확산 및 복사 열전달을 포함할 수 있도록 구성하였다. 복사 열전달은 Discrete Ordinate Method(DOM)을 적용하였다. 벽체는 고체 구역으로 정의하여 열전도 해석을 수행하였으며, 화염으로부터 복사대류 열전달을 동시에 고려하였다. 해석 대상 유체는 이상기체(ideal gas)로 가정하였다.

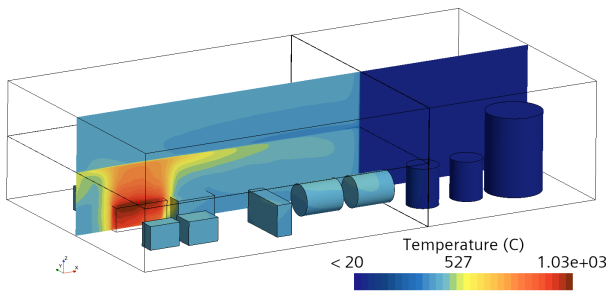


Fig. 11 Thermal spread during fire

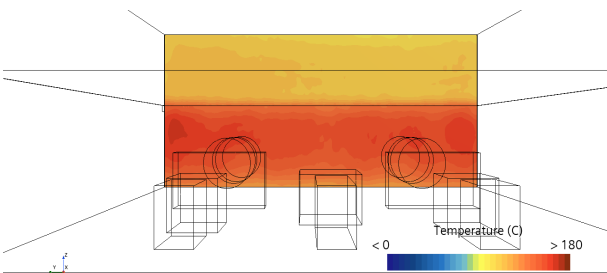


Fig. 12 Carbon steel wall temperature scene

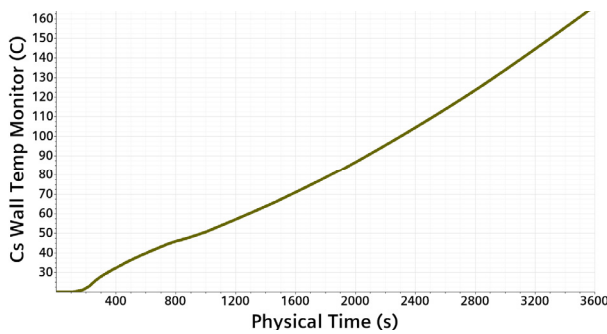


Fig. 13 Carbon steel wall temperature monitor

$$p = \rho RT \quad (3)$$

격자 생성에는 polyhedral mesh를 사용하였으며, base size는 0.5m, 전체 격자 수는 약 556,660개로 구성되었다. 이와 같은 메쉬 구성은 화재 중심부의 온도 변화와 주변 구조물의 열 전달 경향을 효과적으로 추적할 수 있도록 설정되었다.

### 3.2 시뮬레이션 결과

화재 시뮬레이션 결과, Fig. 11에서 확인할 수 있듯이 발전 구획 내부 화염 중심부의 온도는 약 1,030°C까지 상승하였으며, 주변 온도도 400°C 이상으로 유지되는 고온 환경이 형성되었다. 이와 같은 열 환경은 화재 발생 구획뿐 아니라, 인접한 MSR 원자로 구획까지 영향을 미칠 수 있는 수준임을 확인할 수 있었다.

MSR 구획 내부 일부 구조물의 표면 온도가 최대 96.4°C에 도달하였다. 해당 온도는 직접적인 구조 손상을 발생시키지 않으나, 장기적으로는 재료 피로 누적, 센서 오작동 및 시스템 신뢰성 저

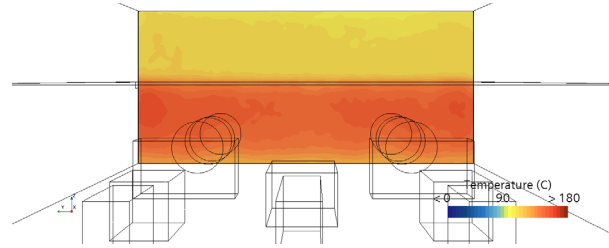


Fig. 14 Pb wall temperature scene

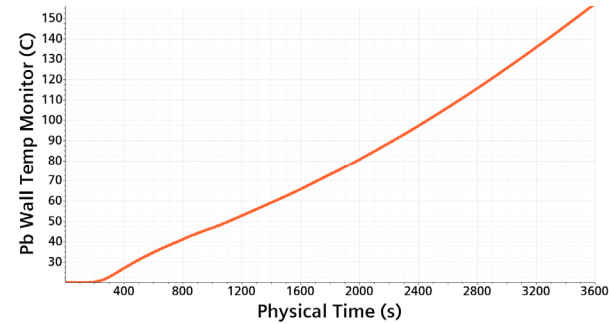


Fig. 15 Pb wall temperature monitor

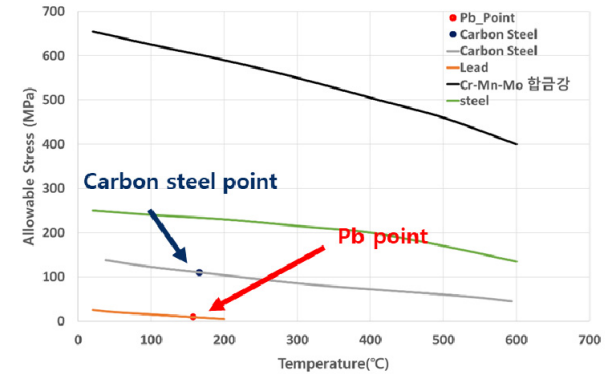


Fig. 16 Temperature-Dependent Allowable Stress of Structural Materials

하 등의 간접 영향을 유발할 수 있는 임계 수준으로 판단된다.

화재 시뮬레이션 결과, 발전 구획과 원자로 구획을 구분하는 탄소강(carbon steel) 격벽에서도 유의미한 열전달이 확인되었다. Fig. 12는 시뮬레이션 종료 시점의 벽체 단면 온도 분포를 나타내며, Fig. 13은 시간에 따른 격벽 표면 온도 상승 곡선을 보여준다. 전체 해석 시간 동안 벽체는 점진적이고 지속적인 온도 상승 경향을 보였으며, 특정 시간대의 급격한 온도 증가는 관찰되지 않았다. 최종적으로 격벽 온도는 약 166°C에 도달하였으며, 이는 탄소강의 녹는점(약 1,425~1,540°C)보다는 낮지만, 장시간 노출 시 재료 피로 누적, 강도 저하, 또는 열 변형을 유발할 수 있는 수준이다. 온도 분포는 구조물의 상단 중심부에 집중되는 양상을 보였으며, 이는 복사열 및 대류 효과가 상부 공간에 집중되었기 때문으로 해석된다. 따라서 실제 설계에서는 격벽의 두께 및 열 차단 성능, 또는 상부 환기 구조의 최적화 설계가 병행되어야 할 필요성이 제기된다.

화재 발생 구획과 인접한 MSR 차폐 벽체(Pb 소재)에서도 유

의미한 열전달이 관찰되었다. Fig. 14는 화재 종료 시점에서의 납(Pb) 벽체 단면 온도 분포를 나타내며, Fig. 15는 간에 따른 벽체 온도 상승 추이를 보여준다. 해석 결과, 차폐 벽체의 최종 온도는 약 157°C에 도달하였다.

이는 납의 녹는점인 327.5°C에는 미치지 않지만, 납은 낮은 온도에서도 열팽창에 민감한 재료로 구조적인 팽창 또는 장기 피로 손상의 가능성이 존재한다. 또한, Fig. 16에 제시된 재료별 허용 응력 곡선에 따르면, 납은 157°C에서 허용 응력이 약 9.3 MPa에 불과하며, 같은 조건에서의 탄소강은 약 110.2MPa를 유지하는 것으로 나타났다.

이러한 재료 특성 차이는 동일한 열 환경에서 납이 구조적으로 더 취약할 수 있음을 시사한다. 따라서 향후 MSR 기반 차폐 설계에서는 고온에서의 기계적 안정성을 확보할 수 있는 대체 합금재료, 예를 들어 Cr-Mn 계 합금강 등의 적용 가능성을 함께 고려해야 하며, 열적 차폐 성능과 기계적 강도 간의 균형 있는 설계 전략이 요구된다.

## 4. 결론

본 연구는 MSR(Molten Salt Reactor) 기반 컨테이너선을 대상으로, 화재 사고에 대한 통합적이고 정량적인 위험 분석을 수행하였다. 기존 선박 화재 분석이 과거 사고 통계나 정성적 시나리오 중심에 머물러 있었던 반면, 본 연구는 화재 발생 확률, 전개 과정의 불확실성, 구조적 영향까지 포함하는 다층적 분석 체계를 최초로 적용하였다.

구체적으로는 IMO GISIS 기반 사고 통계 분석을 통해 주요 화재 원인을 도출하고, 이를 기반으로 Event Tree Analysis(ETA) 및 Monte Carlo 시뮬레이션을 연계하여 단계별 성공/실패 확률의 변동성을 수치화하였다. 특히, 각 시나리오의 구조 손상 정도를 정량화하고, 이를 바탕으로 Risk Matrix를 구성함으로써 고위험 시나리오를 식별할 수 있는 체계적 기준을 제시하였다. 이후 선정된 대표 시나리오 S5에 대해 STAR-CCM+ 기반 CFD 해석을 수행하여, 실제 선체 구조와 차폐 재료에 대한 열적 영향 및 응력 분포를 분석함으로써 화재의 물리적 결과까지 정량적으로 검증하였다.

연구 결과, 전기 계통에서의 ultrafast 성장 화재가 구조 손상 가능성이 가장 높은 고위험 시나리오 S5로 확인되었으며, 해당 시나리오에 대한 CFD 해석을 통해 MSR 차폐 구조물과 탄소강 격벽이 열 스트레스에 노출될 수 있음을 정량적으로 입증하였다. 이는 단기적인 손상은 없더라도, 장기 노출 시 재료 피로, 센서 오작동, 기능 저하 등의 문제로 이어질 수 있는 물리적 근거를 제공한다. 또한 시나리오 기반 리스크 평가 결과는 단순 위험 분류에 그치지 않고, 화재 구획 설계, 격벽 재료 선택, 차폐 두께 설정 등 실질적 구조 설계 요소에 직접 활용될 수 있는 수준의 기술적 정량 데이터도 제공한다.

특히, 연구 대상이 기존의 PWR 또는 일반 SMR이 아닌, MSR 기반 컨테이너선이라는 점에서 기술적·규제적 선례가 거의 없는

분야에 대한 최초 수준의 시도라는 데 의의가 있다.

본 연구는 MSR 선박에 특화된 위험 기반 설계 기초자료를 제공함으로써, MSR 기반 추진선 설계 시, 위험 기반 설계(RIPB) 및 성능 기반 안전 기준 정립을 위한 실증적 근거를 제공하며, 향후 국제 규제 체계 수립 및 선급 인증 대응 시 기초 자료로 활용될 수 있다.

다만, 본 연구는 특정 시나리오에 대한 단일 CFD 해석에 국한되며, 다양한 화재 위치 및 구조형태에 따른 복수 시나리오 해석이 이루어지지 않았다는 점에서 한계가 존재한다. 또한, 실선 데이터를 활용한 검증 실험이 병행되지 못한 점도 향후 보완이 필요하다.

결론적으로, 본 연구는 MSR이라는 새로운 해양 원자력 기술과 불확실성 기반 화재 분석 기법을 결합한 최초 수준의 시도로서, 향후 친환경 원자력 선박의 설계 안전성 향상 및 규제 대응 전략 마련에 있어 기술적·제도적 기반을 제공할 수 있는 실질적 연구 성과로 평가될 수 있다.

## 후 기

본 논문은 한국연구재단의 주요 사업인 “민관합작차세대원자 로개발프로젝트”에 의해 수행되었습니다 (RS-2024-00430408).

## References

- Anderson, M. and Krasniqi, A., 2023. Fire risk assessment of the stealth naval vessel VISBY. *Marine Structures*, 87, 103315.
- American Bureau of Shipping (ABS), 2024a. *Requirements for marine nuclear power systems*. ABS-346, American Bureau of Shipping, Houston, TX.
- American Bureau of Shipping (ABS), 2024b. *Pathways to a low carbon future: LNG carrier nuclear ship concept design*. American Bureau of Shipping, Houston, TX, USA. Available at: <https://ww2.eagle.org/en/innovation/advanced-nuclear-for-commercial-shipping.html> [Accessed 14 August 2025].
- Electric Power Research Institute (EPRI) and U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), Office of Nuclear Regulatory Research, 2005. *EPRI/NRC-RES Fire PRA methodology for nuclear power facilities: Volume 2 - Detailed methodology*, NUREG/CR-6850, EPRI 1011989.
- International Atomic Energy Agency (IAEA), 2022. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*, IAEA, Vienna.
- International Maritime Organization (IMO), 2024. *Global Integrated Shipping Information System (GISIS)*. Available at: <https://gisis.imo.org> [Accessed 20 Aug. 2025].

Jeon, G.R. and Kim, D.J., 2008. A study on risk assessment for fire onboard a naval vessel. *Journal of the Korean Institute of Fire Science & Engineering*, 22(5), pp.35-42.

Kim, M.G., Joo, Y.J., and Park, S.H., 2013. Risk evaluation and analysis on simulation model of fire evacuation based on CFD - Focusing on Incheon Bus Terminal Station. *Journal of Korea Spatial Information Society*, 21(6), pp.43-55.

Mayfield, C. and Hopkin, C., 2011. *Design Fires for Use in Fire Safety Engineering.*, IHS BRE Press, Watford, United Kingdom.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2013. *Detailed Standards for Railway Facility Safety, MOLIT Notification No. 2013-186*, Seoul, Korea.

National Fire Protection Association (NFPA), 2017. NFPA 555: *Guide on Methods for Evaluating Potential for Room Flashover*. NFPA, Quincy, MA, USA.

Palisade Corporation, 2023. XLRisk User Manual v3.0., Palisade Corporation, Ithaca, NY.

United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), 2023. UNCTADstat: Merchant fleet by flag of registration and by type of ship (1995-2023). Available at: <https://unctadstat.unctad.org> [Accessed 6 May 2025].

## Authorship Contribution Statement

**Soo-Vin Choi:** Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Validation, Visualization, Writing-original draft, Writing-review & editing; **Do-Hun Kim:** Investigation, Data curation, Formal analysis, Methodology; **Hun-Seok Lee:** Investigation, Data curation, Formal analysis; **Haejin Kim:** Conceptualization, Funding acquisition, Methodology, Supervision, Project administration, Validation, Writing-review & editing.

