

# AHP 분석을 통한 오토 배너호 화재사고 사고요인 평가

조 장 원†

†한국해양수산연수원(교수)

## Analysis of Accident Factors in the Auto Banner Fire Incident through AHP Method

Jang-Won CHO†

†Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology(professor)

### Abstract

This study applied the Analytic Hierarchy Process (AHP) to systematically identify and quantify the causal factors of the Auto Banner fire incident that occurred at Incheon Port in 2018. Based on the investigation report of the Korea Maritime Safety Tribunal and expert surveys, the causal factors were classified into three categories: cargo, management, and facility factors. A paired-comparison survey was conducted with 74 seafarers to derive the relative importance of the factors. The results showed that the maloperation of the fixed CO<sub>2</sub> fire extinguishing system (0.2806) was the most influential factor, followed by failure to close fire compartment openings (0.1567), risk of cargo self-ignition (0.1210), insufficient initial emergency response capability (0.1007), and inadequate knowledge of firefighting equipment (0.0986). Among the upper-level criteria, management factors (0.5165) received the highest weight, indicating that human error and procedural non-compliance had a greater impact on the failure of fire suppression than structural limitations. These findings demonstrate the effectiveness of AHP as a quantitative tool for maritime accident analysis and provide empirical evidence to enhance fire safety management and emergency response training systems for roll-on/roll-off(RO-RO) vessels.

**Key words** : Auto banner fire, Analytic hierarchy process, Human error, Safety management

## I. 서론

2018년 5월 21일 인천항 내항 1부두에 접안 중이던 자동차운반선 오토 배너호(AUTO BANNER, 52,422톤급)에서 발생한 화재사고로 약 450억 원의 재산 손실(적재 차량 2,438대 소실, 선박 전손)과 해양 환경 오염을 초래하였다(KMST, 2020). 자동차 운반선(Roll On-Roll Off, RO-RO)은 구조적 특성 및 화물의 특성 때문에 화재 발생 시 소화 작업에 많은 취약점을 지닌다(Cho et al.,

2023).

이러한 취약성은 네 가지로 분류된다.

첫째, 화물의 특수성이다. 자동차 운반선에 적재되는 중고자동차들은 내부에 배터리, 연료, 냉각수, 윤활유 등 다양한 인화성 물질을 보유하고 있어 화재위험이 큰 화물로 분류된다. 해상운송 중 온도 변화, 진동, 습도 변화 등의 환경적 요인으로 인해 이러한 물질들이 화학 반응을 일으킬 수 있는 환경이 형성된다. 특히 중고자동차의 경우 선적 전 안전 점검이 충분하지 않아 배터리

† Corresponding author : 051-620-5406, [jwjo@seaman.or.kr](mailto:jwjo@seaman.or.kr)

전원이 차단되지 않거나 냉각수가 부족한 상태로 선적되는 경우가 빈번하며, 이는 장시간의 해상 운송 중 잠재적 화재위험을 증가시킨다(Cho et al., 2023).

둘째, 선박 구조의 특수성이다. 자동차 운반선의 화물구역은 11층에서 13층에 이르는 다층 갑판으로 구성되어 있고 각 차량갑판 내부에는 방화벽이 설치되어 있지 않다. 이러한 구조는 화재 초기 단계에서 화재를 매우 빠르게 확산시키고 개구부 및 통풍장치가 밀폐되지 않으면 공기공급이 지속해서 이루어져 화재 확산을 급속도로 가속하고 고정식 소화장치를 사용할 수 없는 상황이 된다.

셋째, 선박화재 대응의 특수성이다. 항해 중 선박화재는 외부의 도움을 받기 어려워 선원의 자체 대응만이 유일한 방법이다. 그래서 선원은 규정에 따라 정기적으로 비상대응 훈련을 시행하고 있다. 그러나 선원은 국적, 교육 수준, 경험이 다양하여, 실제 소화장치 조작, 화재 대응 경험이 부족한 경우가 많다. 또한, 화재 상황에서 선원은 극도의 심리적 압박을 받아 판단력과 대응능력이 저하될 수 있다(Cho and Lee, 2016).

오토 배너호 화재사고는 고정식 소화장치 오작동, 화물구역 밀폐 실패, 선적 후 화물관리 소홀, 선원의 비상대응능력 부족, 선사의 안전관리·감독 미흡 등 이러한 복합적 취약성이 상호작용하여 발생한 전형적인 사례이다. 기존 연구에서는 사고원인에 대한 정성적 분석에 중점을 두고 있으며, 각 원인이 사고에 미치는 상대적 중요도와 인과 관계에 대한 정량적 평가가 부족한 실정이다.

본 연구는 오토 배너호 화재사고 재결서를 통해 확인된 사고요인을 계층분석법(Analytic Hierarchy Process, AHP)을 활용하여 상대적 중요도를 정량적으로 평가하고자 한다. 이를 위해 해양안전심판원 재결 분석을 통해 총 14개의 사고요인을 도출하였고, 경력 10년 이상의 안전교육 전담 교원을 대상으로 한 예비 설문을 통해 핵심 사고요인 10개를 추출하였다. 이를 화물 요인(Cargo

factors), 관리 요인(Management factors), 시설 요인(Facility factors)의 3개 상위계층으로 분류하여 계층분석 모델을 구축하였다. 선박 관리자급 현직선원을 대상으로 쌍대비교 설문 조사를 시행하였으며, 일관성 비율(Consistency Ratio, CR) 0.1 미만을 신뢰도 기준으로 설정하여 총 62명(83.8%)의 유효한 설문을 확보하였다. AHP 분석을 통해 화재사고의 주요요인별 상대적 중요도를 평가하여 자동차운반선 및 유사 선종에서의 화재 예방대책 수립, 시설개선과 선원 교육·훈련 등 개선안 도출을 목적으로 한다.

## II. 연구 방법

### 1. 선행연구 고찰

자동차운반선 화재 관련 연구로 Kim and Kim(2018)은 오토 배너호 화재사고를 사례로 하여 차량 발화로 인해 선박화재로 확대되는 과정을 분석하였다. 연구 결과에 따르면 자동차운반선 화재의 주요 원인은 배터리의 전기적 결함과 고정식 소화설비의 부적절한 조작이었으며, 화재 구역의 신속한 밀폐와 CO<sub>2</sub> 소화장치의 정확한 사용이 화재진화에 핵심 요소임을 지적하였다. Cho et al.(2023)은 전기차 해상운송량의 증가에 따른 RO-RO 선의 차량갑판 전기차 배터리 화재 발생 시 구조적 화재 취약성과 배터리 화재 대응의 문제점을 분석하여 화재 대응 개선안과 소화설비를 제안하였다. 2024년 한국선급은 자동차운반선의 안전한 전기차 해상운송 보고서를 발행하였다. RO-RO 구역 내 전기차 적재 시 발생 가능한 배터리 폭발, 열 폭주(thermal runaway), 유독가스 확산 등 잠재위험요소를 체계적으로 식별하였다. 또한, 전기차 배터리 화재는 내연기관 차량보다 진압이 어려우며 재발화 가능성이 크다고 평가하였다(KR, 2024). 이와 관련하여 Lee and Min(2025)은 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 활용하여 전기차가 다수 적재된 자동차운반선 화물

공간에서의 열 및 연기 거동을 분석하였다. 연구 결과에 따르면 환기 조건에 따라 화재 확산 속도와 가시거리가 크게 달라지며, 이는 선원의 진입 및 진압 활동에 직접적인 영향을 미침을 확인하였다. 최근 전기차의 해상운송량이 증가로 선박 내 전기차화재가 빈번하게 발생하고 있다. 이와 관련하여 선박의 설비개선 및 화재특성에 관한 연구가 주로 이루어졌다. 한편, 해양사고에 대한 정량적 데이터를 활용한 분석 연구는 제한적이다. Yim et al.(2018)은 선박사고 발생 시 선장의 신속한 의사결정이 인명 피해에 직접 영향을 미침을 규명하기 위해 해양사고의 원인을 정량적 우선순위로 평가하였다. 그리고 Jeong et al.(2024)은 해양사고 예방을 목적으로 선박사고 취약성 지표를 선정하여 AHP 분석을 통한 지표를 도출하였다. 일반 해양사고 예방 및 선장의 의사결정에 관한 연구는 일부 진행되고 있으나, 화재사고의 주요 요인 분석에 관한 연구는 여전히 부족한 실정이다. 특히, 선원의 훈련, 절차 숙련도, 의사결정 능력에 관한 정량적 연구는 거의 이루어지고 있지 않다.

자동차 운반선의 구조적 복잡성과 다국적 승선원 체계는 화재 대응에 많은 어려움을 초래한다. 따라서 본 연구는 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 활용하여 오토 배너호 화재사고의 주요요인을 정량적으로 분석하고, 기술적 요인뿐만 아니라 인적·관리적 요인의 중요도를 평가하고자 한다.

## 2. 계층분석 방법 일관성 지수

### 가. 계층분석법(AHP) 이론적 고찰

계층분석법(AHP)은 1970년대 Tomas L. Saaty에 의해 개발된 다기준 의사결정 기법으로, 복잡한 의사결정 문제를 체계적이고 논리적으로 해결하기 위한 방법이다(Saaty, 1977). AHP는 의사결정 문제를 목표, 평가 기준, 대안 등의 계층구조로 분해하고, 계층 내 요소 간 쌍대비교(pairwise comparison)를 수행하여 상대적 중요도를 산출한

다. 이를 통해 최적의 대안을 찾는 데 활용된다.

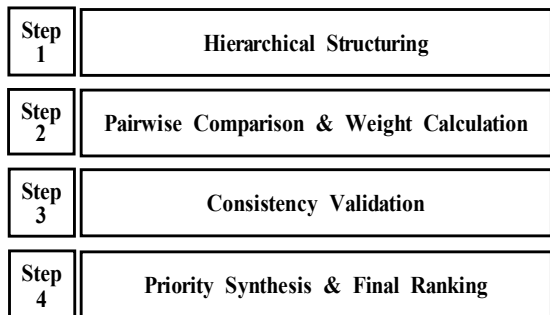
AHP의 분석 절차는 일반적으로 [Fig. 1]과 같이 네 단계로 구분된다.

첫째, 평가 기준과 대안을 설정하여 의사결정 문제를 계층화한다.

둘째, 의사결정 목표를 달성하기 위해 각 계층 내 요소 간 쌍대비교를 수행하여 하위요소의 상대적 중요도를 평가한다.

셋째, 쌍대비교 결과의 신뢰성을 검증한다. 일관성 비율(Consistency Ratio, CR)을 사용하여 CR 값이 0.1 이하면 합리적인 평가로 간주하고, 넘을 경우에는 응답자의 설문결과를 제외하거나 재평가한다.

넷째, 산출된 중요도를 바탕으로 각 대안의 우선순위를 도출하고, 통합 가중치(weighted importance)를 통해 최종 순위를 결정한다(Cho et al., 2022).



[Fig. 1] AHP analysis procedure.

### 나. 일관성 지수

일관성 검정은 AHP의 핵심이며, Saaty(1980)는 일관성 지수(Consistency Index, CI)와 무작위 지수(Random Index, RI)를 도입하여 일관성 비율을 산출하였다. CI는 최대고유값( $\lambda_{max}$ )과 행렬 크기(n)를 이용해 식(1)과 같이 계산된다.

$$CI = \frac{n-1}{\lambda_{max} - n} \dots\dots\dots (1)$$

RI는 동일 차원의 무작위 행렬에서 추출한 평균 CI 값이며, CR은 CI를 RI로 나눈 값으로 식

(2) 와 같이 정의된다.

$$CR = \frac{CI}{RI} \dots\dots\dots (2)$$

AHP 일관성을 검증하기 위해서 무작위지수 (RI) 또는 난수 지수라는 것을 사용하는데 Saaty(1980)가 제시한 RI 값은 9점 척도를 이용하여 표본 크기를 100으로 하여 무작위로 만들어진 역행렬에서 일관성 지수의 평균값으로 역수 행렬의 차원 1에서 15까지의 값을 <Table 1>에 제시하였다. 일관성에 대한 가설과 검정 통계량은 <Table 2>와 같다. CR 값이 0.1 미만이면 Ho가 기각된다. CR 값이 0의 값을 가지면 응답자가 완전한 일관성을 유지하였음을 의미하고 CR 값이 0.1 이하일 경우 일관성이 확보된 것으로 판단하였고 0.1 이상이면 일관성이 부족한 것으로 재검토가 필요하다(Saaty, 1980).

본 연구에서는 이러한 AHP의 절차와 일관성 검증 방법을 적용하여 오토 배너호 화재사고의 복잡한 사고요인을 체계적으로 분석하고, 전문가 설문 의 정량적 분석을 통해 중요한 사고원인을 도출하였다.

<Table 1> Random index

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Random index	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

<Table 2> Test statistic

Section	Content
Null Hypothesis(H <sub>0</sub> ) Alternative	The evaluation of decision-makers were randomly
Hypothesis(H <sub>1</sub> ) Alternative	The evaluation of decision-makers were not randomly Consistency Ratio = CI /RI

### 3. 사고개요 및 소화설비

가. 오토 배너호 화재사고 개요

화재사고는 2018년 5월 21일 인천항 1부두 11번 선석에 정박하여 자동차 선적작업 중 11번 차

량갑판에서 발생하였다. 초기화재 발견 및 보고는 신속히 이루어졌으나, 고정식 CO<sub>2</sub> 소화장치 오작동, 선원의 화재 비상대응 능력 부족 등 복합적인 원인에 의하여 화재진압에 실패하여 차량 2,438대, 선박 전손의 피해가 발생하였다. 화재사고의 개요 및 선박 제원은 <Table 3>과 같다.

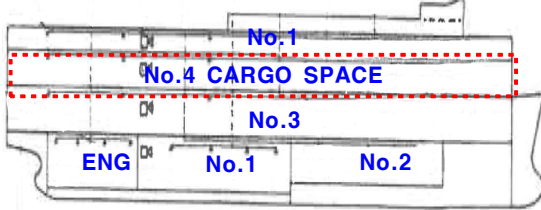
<Table 3> Overview of fire accidents and ship specifications

Sort	Content
Date	2025.05.21. 09:39(around)
Ship Spec.	Ship name:Auto Banner, G/T:52,422ton, OLA:192.7m
Dam age	Vehicle: 2,438 EA, Ship: All Burn down
Fire Accident Overview	
5/21 09:39	Bosun C/O Report fire to cargo hold number 2 on deck number 11 Attempt to enter fire using portable fire extinguisher → Failed
5/21 09:44	Firema n Fire-fighters arrive at the scene, command and control Attempted entry into fire zone (deck 11), thick smoke, flame, etc. → failed
5/21 10:05	Capt. Firema n Suggestion for use in Fixed CO <sub>2</sub> fire extinguishing equipment → Malfunction of control cylinder for engine room → Large inflow of CO <sub>2</sub> gas into engine room (No. 1 cylinder) → Stop all equipment such as generator
5/21 11:11	Capt. Firema n Release the remaining CO <sub>2</sub> gas (No. 2 cylinder) to cargo area 11 → Hydraulic pressure device cannot be operated due to engine room black out → Stern lamp cannot be closed → Fire extinguishing failure → All crew members escape to land → Fireman's sole fire extinguishing operation
5/24 04:52	Firema n Complete fire extinguishing (time required: approximately 52h)

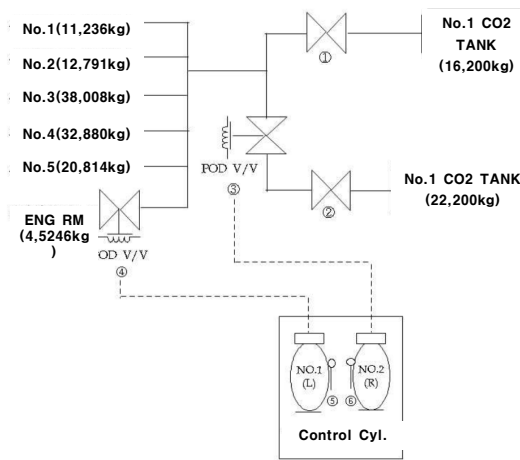
#### 나. 방화구획 및 소화장치의 구성

오토 배너호는 1번부터 13번 차량갑판으로 구성되어 있으며, 승용차를 기준으로 6,022대를 적재할 수 있다. 이 선박은 화재 확산방지를 목적으로 [Fig. 2]와 같이 기관실과 5개의 화물구역(방화구역)으로 분리되어 있다.

각 화물구역에 화재 발생 시 사용할 수 있도록 국제협약에 적합한 형식의 고정식 소화장치가 [Fig. 3]과 같이 설치되어 있다(SOLAS II-2, Chapter 20).



[Fig. 2] Arrangements for Fire Protection Compartment. [Source:Korea Maritime Safety Tribunal(2020)].



[Fig. 3] Fixed CO<sub>2</sub> Fire Extinguishing System.

No. 1 CO<sub>2</sub> 탱크에 16,200kg, No. 2 CO<sub>2</sub> 탱크에 22,000kg의 액체 CO<sub>2</sub> 를 적재하고 있으며, 기관실 및 화물구역으로 CO<sub>2</sub> 를 분리 방출할 수 있도록 개별 제어 밸브가 설치되어 있다. 화재가 발생한 No. 4 화물구역(9~11번 차량갑판)의 적정 CO<sub>2</sub> 소화제의 양은 38,008kg이므로 No. 1과 No. 2 저장 탱크의 소화제를 한꺼번에 사용하여야 한다. 그리고 화재구역(No. 4 화물구역)에는 Gas Tight Door, 차량 이동용 Slope, 방화문 등 개구부가 설치되어 있다.

화재 당시 차량갑판에서 화물 선적작업 진행중으로 차량과 작업자 이동용 개구부가 열려있는 상태였다. 각 개구부의 개폐 상태는 <Table 4>와 같다.

<Table 4> Types and conditions of openings in the fire occurrence area

Kind	EA	Situation
Gas tight dor	3	open
slope	1	open
Fire-protected door	7	close
Weathertight door	2	close
Ventilation fan	-	open

#### 4. 계층분석 모델 수립

##### 가. 화재사고 요인 도출

화재사고 요인 도출을 위하여 재결서(부산해심제2020-012호)를 분석하여 화재사고의 직접적 원인, 간접적 원인, 구조적 결함, 관리 부실 등을 포괄적으로 검토하여 총 14가지의 사고요인을 수집하였다. 오토 배너호 화재사고 주요 원인 <Table 5>와 같다.

<Table 5> The fire accident factors from literature

Code	Accident factor
S-1	Risk of self-ignition of cargo
S-2	the charterer's negligence in cargo management
S-3	Lack of cargo control after shipment
S-4	Lack of initial fire response capability
S-5	Emergency response officer's lack of ability to respond to fire sites
S-6	Failure to maintain emergency response communications systems
S-7	Fixed fire CO <sub>2</sub> extinguishing system operation error
S-8	Lack of knowledge about ship fire fighting equipment
S-9	Lack of emergency fire response training during loading
S-10	Lack of management and supervision of ship owners' education and training of crew members
S-11	Failure to establish a land-sea fire emergency response system
S-12	Limitations of Fire Compartment Opening Closure Methods
S-13	Structural limitations of fire compartments on RO/RO vessels
S-14	Structural limitations of fire fighting operations in cargo areas

나. 예비 설문을 통한 화재사고 요인 도출

재결서를 분석해 수집된 14가지 사고요인을 바탕으로 경력 10년 이상의 경력을 가지고 있는 선원 안전교육 전문가 15명을 대상으로 예비 설문을 진행하였으며, 유효한 설문은 13명이다. 전체 응답자 중 68%가 선원의 소화장치 오작동 및 훈련 부족과 같은 관리요인이 선박 화재진화 실재의 주요 원인으로 응답하였다. 그리고 전체 응답자가 30% 이상이 주요사고의 원인이라고 응답한 10개 항목을 <Table 6>과 같이 핵심 화재요인으로 선정하였다.

설문응답자가 주요원인이라고 판단하지 않는 요인 4개(S-5, S-6, S-10, S11)는 전문가집단의 의견을 반영하여 모델구축에 제외하였다.

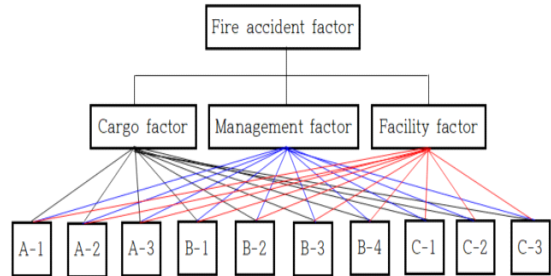
<Table 6> The fire accident factors from professional survey

Code	Accident factor	
A-1	Risk of self-ignition of cargo	Cargo factor (A)
A-2	the charterer's negligence in cargo management	
A-3	Lack of cargo control after shipment	
B-1	Lack of initial fire response capability	Management factor (B)
B-2	Fixed fire CO <sub>2</sub> extinguishing system operation error	
B-3	Lack of knowledge about ship fire fighting equipment	
B-4	Lack of emergency fire response training during loading	
C-1	Limitations of Fire Compartment Opening Closure Methods	Facility factor (C)
C-2	Structural limitations of fire compartments on RO/RO vessels	
C-3	Structural limitations of fire fighting operations in cargo areas	

다. 화재 사고요인 계층분석 모델

도출된 10가지의 화재사고 요인을 유사한 요인 들끼리 묶어 화물요인, 관리요인, 시설요인 총 3가지의 상위요인으로 나누어 <Table 6>과 같이 정리하였고, 상위요인 3가지를 1차 계층으로, 각 사고의 주요요인을 2차 계층으로 수립하였다. 화

재 사고요인의 AHP 분석모델을 [Fig. 4]와 같이 수립하였다(Yang and Kim, 2015).



[Fig. 4] Establish a hierarchical analysis model.

라. 화재 사고요인 설문 조사

본 연구에서는 RO-RO선 화재사고 요인의 중요도를 분석하기 위하여 선박에서 화재 대응책임 및 현장지휘자인 선장(Capt.), 기관장(C/E), 일등항해사(C/O), 일등기관사(1/E)를 대상으로 9점 척도 (1점: 동등, 3점: 약간 중요, 5점: 중요, 7점: 매우 중요, 9점: 극히 중요) 쌍대비교로 구성된 설문 조사를 2025년 6월~9월까지 상급소화 교육 대상자에 대하여 설문을 진행하였다. 설문의 신뢰도를 검증하기 위해 일관성 비율(CR) 0.1을 기준으로 적용하였으며, CR ≤ 0.10을 만족하는 응답만 분석에 포함 시켰다. 유효 표본은 <Table 7>과 같이 총 74명 중 62명(83.8%)이다. 직급별로는 선장 15명, 기관장 13명, 일등항해사 18명, 일등기관사 16명이다.

<Table 7> Survey overview

Rank	Valid	Invalid	CR≤0.10 Rate(%)
Capt.	15	3	83.3
C/E	13	4	76.5
C/O	18	2	90.0
1/E	16	3	84.2
Total	62	12	83.8

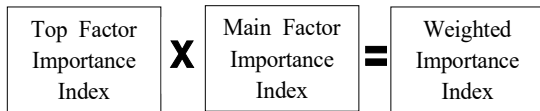
설문의 신뢰도 검증을 위해 설문응답자의 일관성을 검증하기 위하여 일관성 비율을 척도로 사

용하였다. 일관성 비율(CR) 0.1 미만 기준을 적용하였다. CR이 0.1 미만이면 합리적이라 평가할 수 있고 기준에 충족하지 못한 설문지는 분석에서 제외하였다. 총 74명 중 62명의 설문이 유효한 표본으로 나타났다.

### Ⅲ. 연구 결과

#### 1. 화재사고 요인 중요도 평가

화재사고 요인별 중요도 우선순위 도출을 위하여 [Fig. 5]와 같이 상위계층 요인과 하위계층 요인은 고려하여 통합가중치 값 계산하였다. AHP 가중치는 요인 간 상대적 중요도를 나타내며, 값이 클수록 사고에 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다.



[Fig. 5] Weighted Criticality Analysis Process.

#### 2. 선장 중요도 평가결과

선박의 운항과 비상대응 책임자인 선장 18명에 대하여 설문을 시행하였으며 총 15명의 설문 응답이 유효하였다. 선박화재 주요요인을 서로 쌍대비교하여 사고요인의 중요도를 <Table 8>과 같이 평가하였다. 선장의 화재사고 요인 중요도 평가는 B-2 (0.2803), C-1 (0.1592), A-1 (0.1192) 순으로 나타났다. 화재사고 주요요인을 고정식 CO<sub>2</sub> 소화장치의 작동 실수, 개구부 폐쇄 방법의 한, 화물의 발화위험, 비상대응훈련의 부족을 사고의 주요요인으로 평가하고 있다.

선장은 CO<sub>2</sub> 장치 오작동(인적과실), 화물구역의 구조적 한계, 화물의 화재 위험관리를 주요 원인으로 평가했다. 이는 선장은 선박 전체 안전관리와 비상대응 최종 의사결정자이기 수련도, 설비, 의사결정을 고려했을 것으로 판단된다.

<Table 8> Priority vector of each level(Captain)

Code	Main factor	Importance Rank	
A-1	Risk of self-ignition of cargo	0.1192	3
A-2	the charterer's negligence in cargo management	0.0836	6
A-3	Lack of cargo control after shipment	0.0226	10
B-1	Lack of initial fire response capability	0.1006	4
B-2	Fixed fire CO <sub>2</sub> extinguishing system operation error	0.2803	1
B-3	Lack of knowledge about ship fire fighting equipment	0.0986	5
B-4	Lack of emergency fire response training during loading	0.0508	8
C-1	Limitations of Fire Compartment Opening Closure Methods	0.1592	2
C-2	Structural limitations of fire compartments on RO/RO vessels	0.0611	7
C-3	Structural limitations of fire fighting operations in cargo areas	0.0240	9

#### 3. 기관장 중요도 평가결과

선박의 기관구역 책임 및 선박 안전관리 담당자인 기관장 17명에 대하여 설문을 시행하여 총 13명의 설문이 유효하였다. 선박화재 주요요인을 서로 쌍대비교하여 사고요인의 중요도를 <Table 9>와 같이 평가하였다. 기관장의 화재사고 요인 중요도 평가는 B-2 (0.3072), C-1 (0.1539), B-1 (0.1103) 순으로 나타났다. 화재사고 주요요인을 고정식 CO<sub>2</sub> 소화장치의 오작동, 개구부 폐쇄 방법의 한계, 비상대응훈련 부족을 사고의 주요요인으로 평가하고 있다.

기관장은 CO<sub>2</sub> 소화장치 오작동을 선장보다 더 높은 가중치(0.3072)를 부여했다. 다량의 CO<sub>2</sub> 가 기관실로 유입되어 정전(Black-out)이 발생하여 개구부를 폐쇄하지 못한 원인이다. 이는 기관장이 기관실의 책임자로서, 기기 조작의 기술적 오류의 중대성을 강하게 인식하고 있음을 일 수 있다.

<Table 9> Priority vector of each level(C/E)

Code	Main factor	Importance Rank	
A-1	Risk of self-ignition of cargo	0.0977	5
A-2	the charterer's negligence in cargo management	0.0684	6
A-3	Lack of cargo control after shipment	0.0185	10
B-1	Lack of initial fire response capability	0.1103	3
B-2	Fixed fire CO <sub>2</sub> extinguishing system operation error	0.3072	1
B-3	Lack of knowledge about ship fire fighting equipment	0.1080	4
B-4	Lack of emergency fire response training during loading	0.0557	8
C-1	Limitations of Fire Compartment Opening Closure Methods	0.1539	2
C-2	Structural limitations of fire compartments on RO/RO vessels	0.0591	7
C-3	Structural limitations of fire fighting operations in cargo areas	0.0232	9

#### 4. 일등항해사 중요도 평가결과

선박 화물관리 책임 및 화재 비상대응 현장지휘자인 C/O 20명에 대하여 설문을 시행하여 총 18명의 설문이 유효하였다. 선박화재 주요요인을 서로 쌍대비교하여 사고요인의 중요도를 <Table 10>과 같이 평가하였다. 일등항해사의 화재사고 요인 중요도 평가는 B-2 (0.2526), C-1 (0.1539), A-1 (0.1508) 순으로 나타났다. 화재사고 주요요인을 고정식 CO<sub>2</sub> 소화장치의 오작동, 개구부 폐쇄 방법의 한계, 화물의 발화 위험성(가중치: 0.1508), 용선주의 선적 화물관리 미흡이 사고의 주요요인으로 평가하고 있다.

일등항해사는 CO<sub>2</sub> 소화장치 오작동(25.26%)과 화물 요인(A-1: 15.08%)을 균형 있게 평가했다. 화물관리 책임자인 일등항해사는 화물의 특성상 선적 후 화물관리 소홀이 화재사고로 이어질 수 있고, 소화장치의 정확하고 신속한 작동을 화재 진화의 가장 중요한 요인으로 인식하고 있음을 알 수 있다.

<Table 10> Priority vector of each level(C/O)

Code	Main factor	Importance Rank	
A-1	Risk of self-ignition of cargo	0.1508	3
A-2	the charterer's negligence in cargo management	0.1057	4
A-3	Lack of cargo control after shipment	0.0286	9
B-1	Lack of initial fire response capability	0.0907	5
B-2	Fixed fire CO <sub>2</sub> extinguishing system operation error	0.2526	1
B-3	Lack of knowledge about ship fire fighting equipment	0.0889	6
B-4	Lack of emergency fire response training during loading	0.0458	8
C-1	Limitations of Fire Compartment Opening Closure Methods	0.1539	2
C-2	Structural limitations of fire compartments on RO/RO vessels	0.0591	7
C-3	Structural limitations of fire fighting operations in cargo areas	0.0232	10

#### 5. 일등기관사 중요도 평가결과

선박 기관구역 주기 및 보기관리 책임 및 화재 현장지휘자인 1/E 19명에 대하여 설문을 시행하여 총 16명의 설문이 유효하였다. 선박화재 주요요인을 서로 쌍대비교하여 사고요인의 중요도를 <Table 11>과 같이 평가하였다. 일등기관사의 화

<Table 11> Priority vector of each level(1/E)

Code	Main factor	Importance Rank	
A-1	Risk of self-ignition of cargo	0.1084	3
A-2	the charterer's negligence in cargo management	0.0760	6
A-3	Lack of cargo control after shipment	0.0205	10
B-1	Lack of initial fire response capability	0.1043	4
B-2	Fixed fire CO <sub>2</sub> extinguishing system operation error	0.2907	1
B-3	Lack of knowledge about ship fire fighting equipment	0.1022	5
B-4	Lack of emergency fire response training during loading	0.0527	8
C-1	Limitations of Fire Compartment Opening Closure Methods	0.1600	2
C-2	Structural limitations of fire compartments on RO/RO vessels	0.0614	7
C-3	Structural limitations of fire fighting operations in cargo areas	0.0242	9

## 조 장 원

재사고 요인 중요도 평가는 B-2 (0.2907), C-1 (0.1600), A-1 (0.1084) 순으로 나타났다. 화재사고 주요요인을 고정식 CO<sub>2</sub> 소화장치의 오작동, 개구부 폐쇄 방법의 한계, 화물의 발화 위험성, 초기 화재 대응능력 부족을 사고의 주요요인으로 평가하고 있다.

일등기관사는 CO<sub>2</sub> 소화장치 오작동(29.07%)을 가장 높게 평가했으며, 특히 방화구역 개구부 폐쇄 장치(16.00%)의 중요성을 강조했다. 일등기관사는 기관실 밀폐구역 화재 현장지휘자로서 소화장치의 효과적인 사용을 위해서는 화재구역의 신속한 밀폐로 외부 공기 유입 차단이 중요한 요인으로 인식하고 있음을 알 수 있다.

### 6. 전체 AHP 설문 중요도 평가 및 분석

본 연구는 총 62명의 선원을 대상으로 AHP 분석을 수행했다. 전체설문에 대한 화재사고 중요도 평가결과는 <Table 12>와 같이 B-2 (0.2806), C-1 (0.1567), A-1 (0.1210), B-1 (0.1007), B-3 (0.0986) 순으로 나타났다.

<Table 12> Priority vector of each level(All field)

Tire-2 code	Tier-1 code	Tier-1 importance	Tire-2 importance	Weighted importance
B-2	B	0.5165	0.5433	0.2806
C-1	C	0.2547	0.6154	0.1567
A-1	A	0.2289	0.5290	0.1210
B-1	B	0.5165	0.1950	0.1007
B-3	B	0.5165	0.1910	0.0986
A-2	A	0.2289	0.3708	0.0849
C-2	C	0.2547	0.2363	0.0602
B-4	B	0.5165	0.0985	0.0509
C-3	C	0.2547	0.0929	0.0237
A-3	A	0.2209	0.1002	0.0229

전체설문에 대한 요인별 중요도 평가결과 고정식 소화장치의 오작동, 화물구역 개구부 폐쇄 방법의 문제, 화물의 발화 위험성, 선원의 초기 비

상대응 능력 부족 및 소화설에 대한 지식 부족으로 나타났다. 모든 직급에서 B-2(고정식 CO<sub>2</sub> 소화장치 오작동)를 1순위로 평가한 것은 조작 오류가 화재진압 실패의 가장 중요한 원인임을 일관되게 보여준다. CO<sub>2</sub> 소화장치 오작동은 기관실 정전을 초래하여 개구부 밀폐 실패로 이어졌으며, 이는 소화제 부족으로 연결되는 연쇄적 실패의 시작점이었기 때문에 판단된다. 직급별 사고요인 중요도 평가에서는 업무별 특성이 반영되어 중요도 우선순위에 직급별 편차가 있으나, 전체설문 분석내용과 비교하여 큰 차이는 있지 않다. 설문에 응답한 선원은 상위 5개의 요인에 대하여 공통으로 중요도를 인식하고 있음을 알 수 있다.

그리고 화재사고 상위요인 평가에서는 관리 요인(0.5165)이 가장 중요한 요인으로 평가되었다. 이는 선원의 숙련도와 인적오류를 최소화할 수 있는 비상대응 훈련·교육, 화재 구역의 신속한 통제와 의사결정이 화재진압의 성패를 결정하는 가장 중요한 요소임을 의미한다. 상위계층 3개 요인의 가중치 분석 결과는 <Table 13>과 같다.

<Table 13> 1-Tier Priority vector of each level

Main factor	Importance	Key Features	Rank
Management Factors (B)	0.5165	Human error and training issues	1
Facility Factors (C)	0.2547	Structural defects and design limitations	2
Cargo Factors (A)	0.2289	Cargo characteristics and poor management	3

### 7. 개선 방안 제안

밀폐구역에서 화재 발생 시 화재의 특성상 화재구역에 진입하여 소화 작업을 진행하기는 매우 위험한 조건이다. 그래서 신속하고 정확한 고정식 소화장치의 사용은 화재진화의 가장 중요한

요소이다. 사건 개요에서도 알 수 있듯이 화재 발견 후 1차 CO<sub>2</sub> 가스방출 결정까지 불과 26분이 지난 시점이다. 그러나 선원의 가스방출 밸브를 착각하여 화재구역이 아닌 기관구역으로 다량의 가스가 투입되었다. 발전기 등 기관구역의 모든 기기가 정지되고 기관실은 Black-out 상태가 되었다. 추후 유압기기 전원이 공급되지 않아 선미를 단지 못해 화재구역을 밀폐하지 못하는 원인이 되었고, CO<sub>2</sub> 가스 오작동으로 화재진화에 필요한 소화제 양이 부족하여 화재진화 실패의 주요 원인이다. 이처럼 식별된 요인을 AHP 분석을 통하여 화재사고 주요 원인의 우선순위를 분석하였고 화재 예방 및 신속한 대응을 위하여 상위 5개 요인에 대하여 개선안을 제시하였다.

가. 고정식 CO<sub>2</sub> 소화장치 오작동(B-2, 0.2806)

선박의 밀폐구역 화재진압에서 신속하고 정확한 소화장치 조작이 화재진화의 핵심이며, 사소한 조작 오류가 전체 소화 작업의 실패로 이어질 수 있으므로 ① CO<sub>2</sub> 소화장치 밸브의 오조작이 발생하지 않도록 밸브 색상의 표준화 및 오조작 방지 커버 설치가 필요하다. ② 소화장치 사용의 숙련도를 높이기 위한 훈련절차 개선이 필요하고, ③ 간단명료한 작동절차의 비치가 필요하다.

나. 방화구역 개구부 폐쇄 한계(C-1, 0.1567)

가스 소화장치(CO<sub>2</sub>) 소화장치의 효과를 위해서는 공기가 유입되지 않도록 화물구역의 완전한 밀폐가 필수적이다. 그러나 구조적 한계로 개구부 폐쇄장치를 적절히 작동하지 못하고 소화 약제를 투입하여 화재진화 실패의 주요 원인이었으므로 ① 화재 발생 시 외부갑판에서 신속히 개구부를 폐쇄할 수 있는 장치설치가 필요하다. ② 기관실 전원이 공급되지 않아도 독립적으로 작동할 수 있도록 개선이 필요하다.

다. 화물의 발화 위험성(A-1, 0.1210)

화물의 특성상 차량에는 연료, 배터리 등 다양한 형태의 가연물이 포함되어 화재 위험성이 높은 화물이지만, RO-RO 선은 예외규정을 적용하

고 있다( IMDG Code 3166). 화물구역에서 차량 1대만 화재가 발생해도 전체 차량갑판으로 화재가 번질 우려가 매우 크므로 예방조치가 필요하다. 화물의 발화 위험성을 최소화하기 위하여 ① 선적 후 화물관리 절차 강화해야 하고(배터리 분리, 가연물 제거 의무화), ② 중고차량은 선적 전 화재위험요소(누유, 전기적 문제) 제거를 위한 절차를 강화한다. ③ 추가적인 화물구역 화재 감시 장치 설치를 고려해야 한다.

라. 초기 대응능력 부족 및 소화설비 지식 부족 (B-1, B-3)

화재 초기 단계에서 신속한 의사결정과 선원의 기술 숙련도가 화재진압 성과를 결정한다. 그러므로 선원의 화재 대응능력 향상을 위하여 ① 비상대응 훈련 시 고정식 소화장치를 시뮬레이션 작동할 수 있도록 장치 개선이 필요하고, ② 선박의 화물구역 특성을 고려한 훈련시나리오의 개선이 필요하다. ③ 화대 대응훈련 VR 시뮬레이션 도입 및 주기적 훈련을 위한 선원의 동기 부여가 필요하다.

### IV. 결론

본 연구는 오토 배너호 화재사고의 원인을 기존 재결서·보고서의 정성적 서술에만 의존하지 않고, AHP를 통해 사고요인별 상대적 중요도를 계량화하였다. 분석 결과, 고정식 CO<sub>2</sub> 소화장치 오작동/오조작(B-2, 0.2806)이 가장 높은 중요도를 보였고, 방화구역 개구부 폐쇄 한계(C-1, 0.1567), 화물 발화 위험성(A-1, 0.1210), 초기 대응능력 부족(B-1, 0.1007), 소화설비 지식 부족(B-3, 0.0986)이 뒤를 이었다. 상위기준에서는 관리요인(0.5165)이 시설(0.2547)·화물(0.2289)보다 크게 나타나, 화재진압 실패가 구조적 제약 자체보다 인적오류 및 절차 미이행, 훈련·의사결정 역량에 더 크게 좌우되었음을 보여준다. 이를 Reason의 Swiss-cheese 모델로 해석하면, 사고는 ‘단일 실

수'가 아니라 다층 방어층(defenses)이 연쇄적으로 관통할 때 발생한다(Reason, 2000). 즉, (1) 예방층(화물 위험관리)에서 증고차량의 선적 전 점검 미흡(배터리 전원 미차단 등)이 잠재적 발화위험을 높이고, (2) 격리/밀폐 층(방화구획 유지)에서 자동차운반선 화물구역의 다층 구조와 방화벽 부재, 그리고 개구부·통풍장치가 밀폐되지 않으면 공기공급이 지속하여 화재가 급격히 확산하는 취약점이 존재하며, (3) 소화 층(고정식 CO<sub>2</sub> 운용)에서 결정적 '구멍'으로서 CO<sub>2</sub> 운용 오류가 발생한다. 실제로 화재 발견 후 비교적 단시간 내(26분) CO<sub>2</sub> 방출을 결정했음에도, 선원이 방출 밸브를 착각하여 화재구역이 아닌 기관구역으로 CO<sub>2</sub>가 투입되면서 발전기 등이 정지되어 기관실 Black-out이 발생했고, 그 결과 유압기기 전원 상실로 선미 폐쇄를 수행하지 못해 화재구역의 완전 밀폐가 실패했으며, CO<sub>2</sub> 오작동으로 소화 가스 부족까지 겹쳐 화재진압이 실패하였다. 요컨대, AHP에서 상위로 도출된 요인들은 각각의 방어층에 존재하던 취약점이며, 특정 시점에 이 구멍들이 정렬되면서(발화위험→밀폐 취약→CO<sub>2</sub> 운용 실패→정전·밀폐 불가→초기대응·지식 부족) 방어층이 연속 관통되어 대형화재로 확대되었다는 인과구조가 성립한다. 따라서 화재 재발 방지 전략은 '개인 실수 감소'를 넘어, Swiss-cheese 모델이 강조하는 것처럼 각 방어층의 구멍을 동시에 축소하고, 구멍 정렬 가능성을 낮추는 방향으로 설계되어야 한다. 우선 CO<sub>2</sub> 소화장치의 오조작 가능성을 낮추는 설계(밸브 색상 표준화, 오조작 방지 커버)와 더불어, 숙련도를 높이는 훈련절차 개선 및 간단·명료한 작동절차 비치가 필요하다. 다음으로 CO<sub>2</sub> 소화장치 효과의 전제조건으로, 개구부 폐쇄장치의 개선을 통해 CO<sub>2</sub> 가스방출 시 완전 밀폐가 가능하도록 자동화·원격제어 등 설비 보강이 요구된다. 마지막으로 조직·관리는 상위기준에서 51.6%로 가장 크게 나타난 만큼, 교육·훈련을 '이수 중심'이 아니라 실제 장비의 조작 등 선원의 대응능력을 실제 검증(절차

준수의 실천 작동성 확보), 초기대응능력을 지속해서 검증·개선하는 체계로 고도화할 필요가 있다. 본 연구는 74명 설문 기반 AHP 결과로서, 판단자료가 응답자의 경험·직무·선종 경험에 따라 영향을 받을 수 있으며, 단일 사고사례 중심 분석이라는 한계가 존재한다. 이에 따라 후속 연구에서는 표본 확대 및 직무·경력별 하위집단 비교를 통해 가중치의 안정성을 검증하고, 다수 RO-RO 화재사례를 대상으로 스위스 치즈 관점의 '방어층(예방·밀폐·소화·대응·관리)별 취약지표'를 구축하여 일반화 가능성을 높이며, 훈련 개선(절차 단순화·교차확인·설비개선)이 실제 현장 대응 성과(밀폐 성공률, 오조작 감소, 초기대응 시간 단축 등)로 이어지는지에 대한 실증(모의훈련·시뮬레이션·사후평가)을 병행할 필요가 있다.

## References

- 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>
- Cho JW, Choi YW, Chae WS, Son TW and Kim KS(2023). 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, JFMSE, 35(6) 1010~1022.  
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2023.12.35.6.1010>
- Cho YR, Kang SW and Shin YS(2022). A Study on the Importance of Tower Crane Safety Accident Factors at Construction Sites by AHP Analysis, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 23(9), 23~31.  
<https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.9.23>
- International Maritime Organization(IMO) MSC.1/Circ.1615, Interim Guidelines for Minimizing the Incidence and Consequences of Fires in Ro-Ro Spaces and Special Category Spaces of New and Existing Ro-Ro Passenger Ships.
- International Maritime Organization(IMO) SOLAS II-2, Chapter 20: Fire Protection for Cargo Ships.

- International Maritime Dangerous Goods Code(IMDG) Chapter 3.
- Jeong WS, Pyun YB and Lee JJ(2024). Research on Vulnerability Assessment Indicators and Weights for Ship Accident Using AHP Analysis, *Journal of the Society of Disaster Information*, 20(3), 609~619. <https://doi.org/10.15683/kosdi.2024.9.30.609>
- 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.
- Korea Register(2024). Safe Maritime Transport of Electric Vehicles on PCTC, Fire Safety HAZID.
- Lee SH and Min SH(2025). Risk Assessment of Firefighting Areas in PCTC Logistics Spaces Using EV FDS, *Journal of the Society of Disaster Information*, 21(1), 118~127. <https://doi.org/10.15683/kosdi.2025.3.31.118>
- Reason J(2000). Human error: models and management. *BMJ*, 320(7237), 768~770. <https://doi.org/10.1136/bmj.320.7237.768>
- Saaty TL(1977). A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234~281. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](http://dx.doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty TL(1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York, McGraw-Hill. <https://doi.org/10.15683/kosdi.2025.3.31.118>
- Yang GN and Kim GH(2015). Collapse Accident Factors of Pangyo vents by Analyzing AHP, *J. Korean Soc. Hazard Mitig*, 15(6) 1~8. <http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2015.15.6.1>
- Yim SG, Youn DH and Shin IS(2018). Analysis of Decision-making Factors for Ship and Passenger Evacuation Using AHP, *J. Navig. Port Res.* 42(3), 195~200 <http://dx.doi.org/10.5394/KINPR.2018.42.3.195>
- 
- Received : 17 November, 2025
  - Revised : 19 December, 2025
  - Accepted : 29 December, 2025