

퍼지 다기준 HAZOP 기법을 이용한 해상용 LPG 엔진의 위험성 평가

여실중^{*†}

* 해양수산부 부산지방해양수산청 선박검사관

Risk Assessment of Marine LPG Engine Using Fuzzy Multicriteria HAZOP Technique

Siljung Yeo^{*†}

* Busan Regional Office of Ministry of Oceans and Fisheries, Busan 48755, Republic of Korea

요 약 : 선박 연료로서 LPG는 현재의 기술과 경제성 등을 고려하였을 때 매력적인 연료이다. 하지만, 아직 LPG 연료 선박의 안전 지침을 개발 중에 있고, 국내에서는 중소형 선박에 LPG 추진 시스템을 적용한 사례가 없다. 본 연구에서는 국내 최초 개발된 해상용 LPG 엔진 시스템에 대해 보다 객관적인 위험성 평가를 수행하고 안전 운용 기준을 제안하고자 한다. 우선, 위험과 운전 분석 기법을 통해 동 엔진 시스템을 5개의 검토 구간으로 분할하고 총 58가지의 위험요소를 식별하였다. 그다음 정성적 평가인 HAZOP 기법의 주관성을 보완하기 위해 퍼지 이론을 사용하고 검출도, 민감도 등 위험 요인을 추가하여 퍼지 분석적 계층 과정을 통해 위험 요인의 상대적 가중치를 비교하였다. 그 결과, 5가지의 위험 요인 중, 위험성에 가장 큰 영향을 미치는 위험 요인은 발생 빈도와 심각도로 평가되었다. 마지막으로, 위험 요인에 대한 가중치를 고려하여 위험 순위를 세밀하게 선정하기 위해 퍼지 TOPSIS 기법을 적용하였다. 그 결과, 위험 등급은 47개 그룹으로 구분할 수 있었고, 동 엔진 시스템의 운용 중 가장 위험도가 높은 위험요소는 LPG 공급 라인 유지 보수 중 가스 누출로 분석되었다. 본 연구에 제안된 기법을 LPG 공급계통 등 다양한 설비에도 적용하여, 향후 LPG 추진 선박의 안전 기준 마련을 위한 위험성 평가의 표준절차로 활용할 수 있기를 기대한다.

핵심용어 : LPG 엔진 시스템, 위험성 평가, 위험과 운전 분석 기법, 퍼지 분석적 계층 과정, 퍼지 TOPSIS

Abstract : Liquefied petroleum gas (LPG) is an attractive fuel for ships considering its current technology and economic viability. However, safety guidelines for LPG-fueled ships are still under development, and there have been no cases of applying LPG propulsion systems to small and medium-sized ships in Korea. The purpose of this study was to perform an objective risk assessment for the first marine LPG engine system and propose safe operational standards. First, hazard and operability (HAZOP) analysis was used to divide the engine system into five nodes, and 58 hazards were identified. To compensate for the subjectivity of qualitative evaluation using HAZOP analysis, fuzzy set theory was used, and additional risk factors, such as detectability and sensitivity, were included to compare the relative weights of the risk factors using a fuzzy analytical hierarchy process. As a result, among the five risk factors, those with a major impact on risk were determined to be the frequency and severity. Finally, the fuzzy technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) was applied to select the risk rank more precisely by considering the weights of the risk factors. The risk level was divided into 47 groups, and the major hazard during the operation of the engine system was found through the analysis to be gas leakage during maintenance of the LPG supply line. The technique proposed can be applied to various facilities, such as LPG supply systems, and can be utilized as a standard procedure for risk assessment in developing safety standards for LPG-powered ships.

Key Words : LPG engine system, Risk assessment, HAZOP, Fuzzy AHP, Fuzzy TOPSIS

† kmaritime56@korea.kr, 051-609-6545

1. 서론

선박으로부터 발생하는 오염물질의 저감을 위해 기존 연료인 중질유(Heavy Fuel Oil, HFO) 대비 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG), 액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas, LPG) 등의 대체 연료 사용이 중장기적으로 실행 가능한 해결책으로 널리 인식되고 있다(Xing et al., 2021). 또한, 최근에는 바이오연료를 비롯하여, 장기적으로 해운의 완전한 탈탄소화를 위해 무탄소 연료인 암모니아, 수소 연료에 대한 연구개발에도 관심이 증가하고 있다(Ampah et al., 2021). 다양한 대체 연료 중, 특히 LPG 연료는 LNG와 유사한 수준의 대기오염물질 저감이 가능할 뿐만 아니라, 기존 연료인 중질유 대비 연간 연료 소모량과 연료 소모 비용을 저감시킬 수 있다. 또한, 연료 저장·수송의 용이성, 풍부한 공급 인프라, 소형부터 대형까지 선박 크기 제한 없이 광범위하게 적용 가능한 점 등의 많은 이점이 있다. 그러나, LPG 연료의 경우 LPG 특성에 따른 위험성이 존재한다. LPG는 가스로서의 높은 밀도와 점화 범위가 낮고, 폭발하한계가 약 2% 정도이다. 또한 공기보다 무거워 누출 시 바닥면으로 흐르며, 낮은 공간에 축적되어 대기로는 잘 확산되지 않는다(DNV, 2017). 특히 중소형선박의 경우 LPG 연료를 이용한 선박 추진시스템 기술을 탑재하여 운용된 실적이 거의 없으며, 해당 시스템에 적용 가능한 안전규정 또한 아직 미비한 실정이다(Yeo et al., 2022).

한편, 우리나라에서는 친환경성과 경제성이 입증된 LPG 연료를 중·소형 선박에 적용할 수 있도록 LPG 엔진발전 복합(hybrid) 전기추진선을 건조 중에 있다. 이에 새로이 개발되는 LPG 연료 선박 엔진 시스템의 안전성에 대한 적용 가능한 규정이 미비하기에 설계 과정에서부터 위험성 기반 접근법이 사용되어야 한다(Cao et al., 2022; Monzingo, 2020). 또한, 중요한 안전 문제점을 식별하고 안전성 향상을 위해 필요한 개선방안을 도출하기 위해서는 보다 객관적이고 합리적인 위험성 평가의 수행이 필요하다. 위험성 평가 도구 중 위험과 운전 분석(hazard and operability analysis, HAZOP)은 산업분야에서 잠재적인 위험과 운용 문제를 식별하는데 사용되고 있는 효과적인 기법이다(Ahn and Chang, 2016; O Herrera et al., 2018). 잠재적 위험에는 사람, 재산 및 환경에 부정적 영향을 미칠 수 있는 모든 유형의 예상치 못한 상황이 포함될 수 있다. HAZOP 기법은 초기 설계 단계에서 발견되지 않은 프로세스 및 운용상의 위험을 식별하고 평가하는 것으로서, 위험요소를 식별하고, 각 위험요소(hazards)의 발생 빈도(frequency)와 심각도(severity)를 평가하여 위험도 지수(risk index)를 산정한다(IEC, 2001). 그러나 다른 전통적인 위험성 평가 기법과 마찬가지로 평가 과정에서 제한된 지식과 전문

성 부족 등에 따른 팀원의 주관적인 평가로 인해 부정확성, 모호성, 불완전성 등 다양한 불확실성이 제시된다(Cheraghi et al., 2019). 이러한 위험 분석의 불확실성을 보완하기 위해 다양한 학문분야에서 연구가 진행되었다.

1) 위험성 평가의 품질을 향상시키기 위해, 기존 HAZOP의 위험 요인(risk factors)인 발생 빈도와 심각도에서 유지보수에 대한 민감도(Grassi et al., 2009), 안전문화(Pinto, 2014) 및 스트레스(Aras et al., 2014) 등의 작업장 특성과 인적 요인과 같은 위험 요인을 추가하여 위험성 평가를 수행한 바 있다.

2) 데이터 부족과 전문가의 불완전한 지식으로 인해 발생하는 불확실성을 보완하기 위해 퍼지(fuzzy) 집합 이론을 적용하여 위험성 평가의 신뢰성을 제고하였다. 퍼지 이론을 통해 근사치 또는 주관적인 숫자를 고려하고 언어 변수의 모호성과 불명확성을 수치화함으로써 언어적 변수를 정량화하여, 전통방식의 HAZOP 기법과 대비하여 효율적인 안전관리를 할 수 있다는 것을 입증하였다(Cheraghi et al., 2019).

3) 전통적인 HAZOP은 위험 요인에 대해 동일한 가중치를 부여하는 한편, 낮은 발생 확률의 높은 심각성의 위험요소와 높은 발생 확률의 낮은 심각성의 위험요소에 대해 동일한 위험 순위를 부여한다. 이를 보완하기 위해 제안된 기술에는 다기준 의사결정(multi criteria decision making, MCDM) 방식도 있다. 그중, 분석적 계층 과정(analytic hierarchy process, AHP)과 TOPSIS(Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution)는 각각 위험 요인의 상대적 가중치를 결정하고, 여러 관점에서 대체안들에 대한 위험도 순위(risk rank)를 매기는 데 널리 사용되고 있다(Carpitella et al., 2018; Raviv et al., 2017).

따라서, 본 연구에서는 현재 국내 최초로 개발된 200 kW 급 LPG 엔진에 대해 이전의 위험성 평가 방법론을 통합하여 위험성 평가를 수행하고 안전 운용 기준을 마련하고자 한다. 우선 퍼지 다기준 HAZOP 기법을 통해, 전통적인 HAZOP 기법으로 동 엔진 시스템의 운용상의 위험요소를 식별한다. 다음으로, AHP 및 TOPSIS 기법은 각각 퍼지 환경에서 위험 요인에 대한 가중치를 부여하고, 위험 요소를 평가하여 위험 요소의 순위를 선정하는 데 사용한다. 또한, 새로운 위험 요인으로, 효과적인 유지보수 및 안전조치 실패 등에 따른 위험도에 미치는 영향을 고려하기 위해 민감도(sensitivity)와 사용자가 사고가 발생하기 전에 이를 미리 감지할 수 있는 지에 대한 평가척도인 검출도(detectability)를 추가하였다.

이를 통해 HAZOP 기법과 퍼지 다기준 HAZOP 기법의 결과를 비교·분석하고, 더욱 세밀하게 분류된 위험요소 중 위험 순위가 높은 항목들에 대하여 위험성 감소 방안을 검토하고자 한다. 아울러 향후 개발되는 새로운 LPG 엔진 시스템에도 안전 운용방안 마련을 위한 적용 가능성에 대하여 검토하였다.

2. 연구 대상

현재 중소형 선박의 LPG 연료 추진시스템 상용화를 위해 진행 중인 사업은 국내 최초의 LPG 추진선인 LPG 연료 엔진 발전 하이브리드 전기추진선을 건조하는 것이다.

길이 24m 가량의 관공선(어업지도선)에 탑재될 추진 시스템은 선박 안전운항과 국내 최초 LPG 엔진 개발 등을 고려하여 LPG 연료 엔진 발전기(2대)와 배터리(2대)를 추진 동력원으로서 이중화 할 예정이다. LPG 연료 엔진 발전기에서 생산된 전력으로 추진 전동기를 구동하여 선박 프로펠러를 회전시키는 반면, 배터리는 비상용 전원으로 사용될 예정이다.

LPG 연료 엔진 시스템은 구성과 주요 명세는 Fig. 1, Table 1과 같다. 본 연구 대상인 해상용 LPG 연료 엔진의 경우, 육상용 압축천연가스(Compressed natural gas, CNG) 엔진을 개조한 것이다. CNG engine을 LPG 연료 엔진으로 개조하기 위해 압축비 변경에 따른 실린더 유닛(unit) 변경, 액체 상태의 LPG 연료 분사(압축천연가스 연료 엔진은 기체 상태로 연료 분사)를 위한 연료 공급장치 교체 및 해상 엔진을 고려한 해수 냉각 시스템 적용 등이 반영되었다.

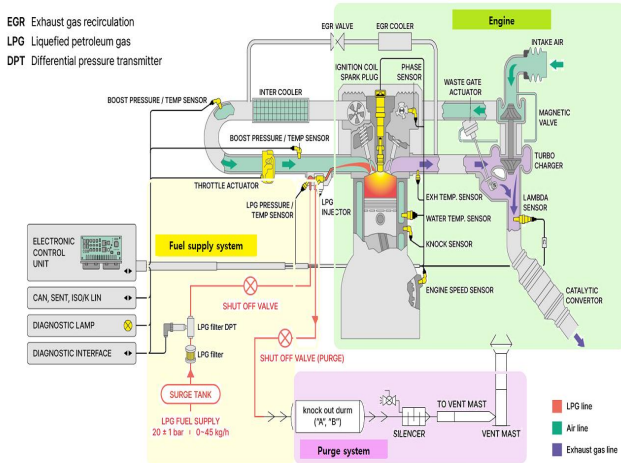


Fig. 1. P&ID for LPG engine systems (Yeo et al., 2023).

LPG 연료 공급은 20 bar의 정압으로 액체 상태에서 엔진에 분사될 예정이고, LPG의 주성분은 프로판(100%)이다. 이론 공연비로 운전하기 위해 배기가스 출구 측에 람다 센서(lambda sensor)가 설치되어 있어 배기가스 중에 산소 농도를 측정하여 연료의 양을 제어하는 기능을 가지고 있다. 또한, 촉매 컨버터(catalytic convertor)를 통해 LPG 연료 연소에 따라 배출되는 배기가스 내의 질소산화물을 삼원 촉매에 의해 정

화시켜주고 있다. 엔진 운전 중 이상연소에 따른 노크를 감지할 수 있도록 노크 센서(knock sensor)를 설치해 두었고, 노크를 감지하면 점화 시기를 변경하여 노크가 일어나지 않는 구역으로 이동시켜 출력을 떨어뜨리고 엔진을 보호하도록 하고 있다. 아울러, 기체 상태 연료를 사용하는 기타 가스 이중 연료 시스템과 구별되는 특징으로 액체 상태의 LPG 연료를 엔진에 공급하기에 퍼지(purge) 과정에서 액체 상태로 바로 유출되는 것을 방지하기 위해 벤트 마스트 측에 기액 분리기(knock out drum, KOD)를 설치한다. 추가로, 연료 분사 및 점화 순서를 결정하는 센서가 고장 난 경우(phase fail 발생) 등에는 질소 가스를 이용하여 퍼지 과정을 수행한다. LPG 배관은 LPG 누설에 따른 화재나 폭발 가능성을 최소화하기 위해 이중관 및 용접 이음으로 되어 있다. 또한, 육상 차량에서 사용되고 있는 흡기 재순환 시스템을 사용하여 크랭크케이스 내의 미연소 가스를 외부로 방출하지 않고 다시 흡기로 재순환시켜 연소하도록 하고 있다.

Table 1. Design specification of LPG marine generator

Category	Specification
Engine power	210 kW @ 1,800 rpm
Engine type	In-line type 4 cycle water cooled, turbo charged & intercooled (air to water)
Combustion type	Stoichiometric Combustion, Spark Ignition
Number of cylinders	6
Bore × stroke	133 mm × 140 mm
Displacement	11,670 cc
Compression ratio	9.5 : 1

3. 연구 개요 및 방법

3.1 연구 개요

본 연구의 퍼지 다기준 HAZOP 기법에서는 두 가지 위험 요인을 고려하는 전통적인 HAZOP 기법에 민감도 및 검출도 등을 추가하였다. 이러한 다섯 가지 위험 요인에 대하여 AHP를 사용하여 가중치를 부여하였다. 위험요소와 그에 해당하는 위험도 지수를 결정한 후, TOPSIS 기법을 사용하여 우선 순위에 따라 위험요소를 선정하였다. 또한 위험 요인을 평가하는데 있어 주관성과 불확실성을 보완하기 위해 AHP와 TOPSIS를 모두 퍼지 논리와 결합하였다. 퍼지 다기준 HAZOP 기법 단계는 Fig. 2에 제시되어 있으며 세부 항목은 3.2절에서 자세히 설명한다.

퍼지 다기준 HAZOP 기법을 이용한 해상용 LPG 엔진의 위험성 평가

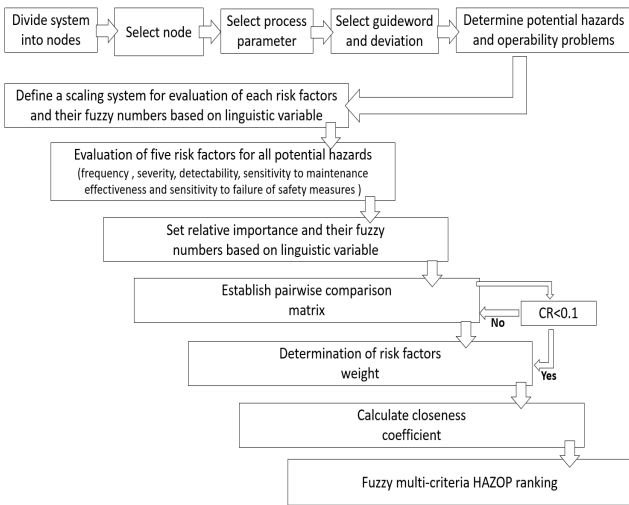


Fig. 2. Flowchart of fuzzy multi-criteria HAZOP.

3.2 연구 방법

3.2.1 HAZOP 기법의 개념 및 적용

HAZOP은 시스템 운용 중 발생할 수 있는 위험요소와 운용 문제를 식별하는 체계적인 위험성 평가 방법이다. 대상 시스템이나 공정이 설계 한계를 벗어나면 사고를 유발할 수 있다. HAZOP 기법은 공정 설명서, 흐름도 및 P&ID와 관련 전문가의 의견을 통해 시스템의 설계 한계와 가능한 이탈 및 그에 따른 잠재적 결과를 파악한다. HAZOP의 수행절차는 다음과 같다. 1) 각 분야의 전문가들이 참여하여 팀을 구성하고, 브레인스토밍(brainstorming) 등의 방법으로 위험요소를 식별하고 분석한다. 2) 시스템은 간단한 섹션으로 분할되며, HAZOP 기법에서 각 섹션은 검토구간(node)으로 정의된다. 공정 의도에 따라 유량(flow), 온도(temperature), 압력(pressure) 등 변수(parameter)와 “no, more, less” 등 공정변수의 질, 양 또는 단계를 나타내는 간단한 단어인 가이드워드(guide word)와 결합하여 설계 의도에서의 가능한 이탈(deviation)을 식별한다. 3) 정의된 이탈의 잠재적 원인과 그에 따른 잠재적 결과를 고려하고 필요한 경우 위험성 감소 방안을 제안하고 HAZOP 검토 결과에 따른 분석표를 작성한다. 본 연구에서 HAZOP 기법은 국제 기준에 따라 수행되었다(IEC 2001; ISO 2009). Table 2, 3은 각각 LPG 엔진 시스템을 대상으로 HAZOP 분석에서 사용되는 검토구간과 가이드워드를 나타낸다. 또한, 위험요소에 대한 발생 빈도(Table 4)와 결과의 심각도(Table 5)를 정성적으로 평가하여 위험 매트릭스(Fig. 3)를 사용하여 위험 순위를 매겼다. 추가로, 동 엔진 시스템에 대한 경험이 부족하기에 학계, 정부, 선급, 엔진 제조·설계사 등의 전문가 그룹을 형성하여 HAZOP 워크숍을 수행하였다.

Table 2. List of nodes for HAZOP analysis of LPG engine system

Node	Title
1	Fuel supply system
2	Engine
3	Nitrogen system
4	Double wall piping line with ventilation system
5	Purge system

Table 3. Guide words used in HAZOP and their meaning subject to this study

Guide word (Abbreviation)	Description
MP	More Pressure
LP	Less Pressure
EP	Entrapped Pressure
MT	More Temperature
LT	Less Temperature
HL	High Level
LL	Low Level
NF	No Flow
LF	Less Flow
MF	More Flow
RF	Reverse Flow
CIS	Contamination in System
COE	Contamination of Environment
CCM	Composition Change/Media Mix
R	Relief

Table 4. Frequency index for HAZOP in this study

Index	Level	Description
1	Improbable	Unlikely but possible to occur once or twice in the total life of all the vessels
2	Remote	For dozens of vessels, likely to occur several times during their whole lifetime
3	Probable	For the operation of one vessel, likely to occur several times during its whole lifetime
4	Frequent	For the operation of one vessel, likely to occur several times per year

Table 5. Consequence index for HAZOP in this study

Index	Consequence	Description	
		Effect on human safety	Effect on system
1	Moderate	Slight injury	Slight damage
2	Minor	Minor injury	Local damage
3	Significant	Severe injury	Severe damage
4	Severe	Single fatality	Major damage
5	Catastrophic	Multiple fatalities	Total loss

		Consequence index					
		1	2	3	4	5	
		Moderate	Minor	Significant	Severe	Catastrophic	
Frequency index	4	Frequent	5	6	7	8	9
	3	Probable	4	5	6	7	8
	2	Remote	3	4	5	6	7
	1	Improbable	2	3	4	5	6

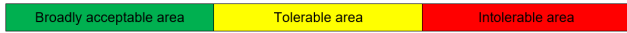


Fig. 3. Risk matrix of HAZOP analysis.

3.2.2 퍼지 이론(Fuzzy logic)의 개념 및 적용

퍼지 논리에 의하면, 전체집합(X) 내의 퍼지 집합 \tilde{M} 은 X의 각 원소 x가 구간 [0, 1] 내의 어떤 실수와 관련된 하나의 소속 함수 $\mu_{\tilde{M}}(x)$ 로서 나타낸다. 함수값 $\mu_{\tilde{M}}(x)$ 은 \tilde{M} 내에 x의 소속 정도를 표현한다. 또한, X 전체집합 내의 퍼지 집합 \tilde{M} 이 $\exists x_i \in X, \mu_{\tilde{M}}(x) = 1$ 라면, 정규화된 퍼지 집합이라고 부른다. 소속도에 따라 산출되는 퍼지 수를 예측하기 위해 본 연구에서는 삼각형 형태로 가정하여 퍼지 형상을 모델링하고, 삼각형 퍼지 수 \tilde{M} 은 (l, m, n) 으로 정의할 수 있다. 퍼지 수 \tilde{M} 의 소속 함수 $\mu_{\tilde{M}}(x)$ 은 식(1)과 같다 (Zimmermann, 2011).

$$\mu_{\tilde{M}}(x) = \begin{cases} 0, & x < l \\ \frac{(x-l)}{(m-l)}, & l \leq x \leq m \\ \frac{(u-x)}{(u-m)}, & m \leq x \leq u \\ 0, & x > u \end{cases} \quad (1)$$

3.2.3 퍼지 분석적 계층 과정(Fuzzy AHP)의 개념 및 적용

퍼지 분석적 계층 과정은 퍼지 이론과 분석적 계층 과정을 혼합하여 대안을 선정하고 문제를 해결하는 접근법이다. 이는 분석적 계층 과정의 주관성과 불확실성을 보완하기 위해 퍼지 수를 사용하여 의사결정자가 근사 또는 유연한 선호도를 표현할 수 있다(Vahidnia et al., 2009).

본 연구에서는 퍼지 AHP를 사용하여 위험요소의 가중치를 결정하였다(Chang, 1996). 퍼지 AHP의 상대비교에 활용되는 상대적 중요도의 삼각형 퍼지 척도는 Table 6과 같다.

Table 6. Fuzzy numbers of relative importance in pairwise comparison

Description	Triangular fuzzy number
Complete and utter importance	$(\frac{5}{2}, 3, \frac{7}{2})$
Much stronger importance	$(2, \frac{5}{2}, 3)$
Stronger importance	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$
Low importance	$(1, \frac{3}{2}, 2)$
Approximately equal importance	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$
Exactly equal importance	$(1, 1, 1)$

이러한 방식으로 마련된 상대비교 행렬(pairwise comparison matrix)의 일관성은 일관성 비율(consistency ratio, CR)을 사용하여 확인할 수 있다. 이를 위해 삼각형 퍼지 수 $\tilde{M} = (l, m, u)$ 의 상대비교 행렬을 식(2)을 이용하여 비퍼지화(defuzzification) 과정을 통해 크리스프(crisp) 수인 M으로 변환하였다.

$$P(\tilde{M}) = M = \frac{l+4m+u}{6} \quad (2)$$

상대비교 행렬의 각 퍼지 수를 비퍼지화하고 행렬의 CR 값은 0.1 이하이면 유효성이 인정된다(Saaty, 1980).

한편, 퍼지 AHP는 통상의 AHP 분석 절차를 따르면서 퍼지 수를 이용하고 있으며, 그중 본 연구에서는 확장분석방법(extend analysis method)을 사용하였다(Chang, 1996).

Chang(1996)의 확장분석의 단계는 다음과 같다.

1) 1단계: i번째 요소에 대한 퍼지합성확장값은 식(3)과 같이 정의된다.

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^m \tilde{M}_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \tilde{M}_{gi}^j \right]^{-1} \quad (3)$$

2) 2단계: $M_2 = (l_2, m_2, u_2) \geq M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ 의 가능성의 정도는 식(4)와 같이 정의된다.

$$V(\tilde{M}_2 \geq \tilde{M}_1) = \begin{cases} 1 & \text{if } m_2 \geq m_1 \\ 0 & \text{if } l_1 \geq u_2 \\ \mu_{M_1}(d) = \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 d 는 Fig. 4와 같이 $\mu_{\tilde{M}_1}$ 과 $\mu_{\tilde{M}_2}$ 간의 큰 교집합 지점인 D 의 세로 좌표이다.

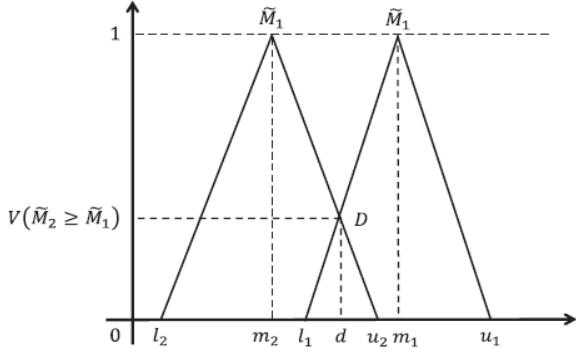


Fig. 4. The intersection between two triangular fuzzy numbers M_2 and M_1 (Chang, 1996).

3) 3단계: 삼각 퍼지 수 M 이 다른 k 개의 퍼지 수 M_1 ($i=1,2,\dots,k$) 보다 높은 확률의 정도는 식(5)와 같이 정의된다.

$$V(\tilde{M} \geq \tilde{M}_1, \tilde{M}_2, \tilde{M}_3, \dots, \tilde{M}_k) = \min V(\tilde{M} \geq \tilde{M}_i), \quad (5)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, k$$

$d'(A_i) = \min V(\tilde{S}_i \geq \tilde{S}_k) k = 1, 2, \dots, n; k \neq i$ 를 가정하면 가중치 벡터는 식(6)과 같다.

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (6)$$

4) 4단계: 정규화를 통해 식(7)에 따라 각각 항목들의 정규화된 가중치 벡터는 W 로 나타내고, 이는 비퍼지 수이다.

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (7)$$

추가로, 앞서 3.1절에서 언급하였듯이, 본 단계에서는 3.2.1절에 따른 HAZOP 분석 단계에서의 위험 요인(발생 빈도, 심각도)에서 세 가지 위험 요인을 추가하여 퍼지 AHP를 수행하였다. 추가된 세 가지 위험 요인은 검출도(detectability, D), 유지 보수에 대한 민감도(sensitivity to maintenance effectiveness, SM) 및 안전조치 실패에 따른 민감도(sensitivity to failure of safety measures, SSM) 등이 있다.

특히, 비효율적 유지 보수 및 안전조치 실패는 위험요소의 발생 빈도와 심각도를 증가시키기에 추가로 고려되었다. (Grassi et al., 2009; Lees, 2012).

3.2.4 퍼지 TOPSIS 기법의 개념 및 적용

퍼지 TOPSIS는 불확실성 하에서 특히 고려해야 할 대안의 수가 많을 때 사용하는 기법 중 하나이다(Grassi et al., 2009). 여기서, 최적의 대안은 각각 양의 이상적인 해(fuzzy positive ideal solution, FPIS)와 음의 이상적인 해(fuzzy negative

ideal solution, FNIS)로부터 최단 거리 및 최장 거리를 가진다. 의사결정자가 선택해야 하는 m 개의 대체안과 n 개의 의사결정기준에 따른 퍼지 다기준 의사결정 문제는 다음과 같다.

$$D = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ A_1 & \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ A_2 & \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_m & \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{matrix} \quad (8)$$

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_n] \quad (9)$$

여기서 $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n, A_1, A_2, \dots, A_m$ 은 선택해야 할 대체안들(위험요소)이고 C_1, C_2, \dots, C_n 은 의사결정기준(위험 요인)이며, w_j 는 의사결정자의 각 의사결정기준에 대한 가중치이다. 본 연구에서 퍼지 TOPSIS 기법을 적용하는 단계는 다음과 같다.

1단계에서는 위험 요인별 다섯 가지 위험요소에 대한 평가를 수행하고, 그 결과인 퍼지 의사결정행렬을 도출한다. 퍼지 다기준 의사결정 문제에서 성과측정치 \tilde{x}_{ij} 는 양의 삼각형 퍼지 수로 측정 가능하다고 가정한다. 본 연구에서는 위험요소별 위험 요인에 대한 평가를 위해 퍼지 TOPSIS에서 사용되는 언어적 변수와 해당 삼각 퍼지 수는 Table 7과 같다.

Table 7. Linguistic variables and the corresponding fuzzy numbers in fuzzy TOPSIS

linguistic variable	Symbol	Triangular fuzzy number
Negligible	NE	(0,0,1)
Very low	VL	(0,1,2)
Low	LO	(1,2,3)
Medium low	ML	(2,3,4)
Fair	FA	(3,4,5)
Medium high	MH	(4,5,6)
High	HI	(5,6,7)
Very high	VH	(6,7,8)
Absolutely high	AH	(7,8,9)
Maximum	MA	(8,9,9)

2단계에서는 다기준 의사결정 문제에서 서로 다른 척도로 평가된 측정값들을 정규화 한다. 정규화 퍼지 의사결정 행렬은 다음과 같다.

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad (10)$$

여기서 B 와 C는 각각 이득 기준과 비용 기준의 집합이다.

$$\tilde{r} = \left(\frac{\tilde{a}_{ij}}{C_j^*}, \frac{\tilde{b}_{ij}}{C_j^*}, \frac{\tilde{c}_{ij}}{C_j^*} \right), j \in B, \quad (11)$$

$$\tilde{r} = \left(\frac{\tilde{a}_{ij}}{C_j^-}, \frac{\tilde{b}_{ij}}{C_j^-}, \frac{\tilde{c}_{ij}}{C_j^-} \right), j \in C, \quad (12)$$

만약 $j \in B$ 라면 $C_j^* = \max C_{ij}$ 이고, $j \in C$ 이면 $C_j^- = \min C_{ij}$ 이다.

3단계에서 산출된 정규화 퍼지 의사결정 행렬에서 각 위험 요인에 대해서 서로 다른 가중치가 할당된 정규화 퍼지 의사결정 행렬(\tilde{V})을 계산한다.

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad (13)$$

여기서 $\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \otimes \tilde{w}_j$, 그리고 $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$ 이다. \tilde{w}_j 는 위험 요인 C_j 에 대한 중요도를 나타내는 가중치이다.

4단계에서는 가중치가 부여된 정규화 된 퍼지 의사결정 행렬 \tilde{V} 에 따라서, 정규화 된 양의 삼각형 퍼지 수의 요소 $\tilde{v}_{ij}, \forall i, j$ 를 계산한다. 퍼지 긍정적인 해(FPIS*)와 퍼지 부정적인 해(FNIS)는 다음과 같이 계산한다(Chen, 2000). 여기서 $\tilde{v}_j^* = (1,1,1), \tilde{v}_j^- = (0,0,0)$ 그리고 $j = 1, 2, \dots, n$ 이다.

$$A^* = \{\tilde{v}_1^*, \tilde{v}_2^*, \dots, \tilde{v}_n^*\}, A^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-\} \quad (14)$$

5단계는 n차원의 유클리디안 거리를 이용해서 각 대안들에 대한 FPIS A* 와 FNIS A로부터의 거리를 다음과 같이 계산한다. 여기서 $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$ 이다.

$$d_i^* = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^*), d_i^- = \sum_{j=1}^n d_v(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad (15)$$

마지막 7단계에서 모든 위험요소들의 우선순위를 최종적으로 확정하기 위해서, 각 대안(위험요소)들의 상대적 근접도 계수(closeness coefficient, CC)를 계산한다.

$$CC_i = \frac{d_i^*}{d_i^* + d_i^-}, i = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

여기서 근접도 계수가 가장 높은 대안이 최적의 대안을 나타낸다(Salih et al., 2019).

4. 연구 결과 및 고찰

4.1 HAZOP 분석 결과

Fig. 1에 따른 LPG 엔진 시스템을 대상으로 Table 2와 같이 다섯 개의 검토구간으로 구분하여 전문가 그룹 워크숍을 통해 HAZOP 분석을 수행하였다. Fig. 5, Table 8과 같이, 총 58건

의 위험요소가 식별되었고 발생 빈도와 심각도를 평가하였다. 그중 3개의 위험요소(hazard no. 17, 29, 34)가 허용 불가능한 영역(intolerable area)으로 식별되었고, 대부분의 위험은 견딜 수 있는 영역(tolerable area) 또는 허용 가능한 수준으로 평가되었다. 특히, LPG 엔진(node 2) 운전 중, 피스톤 링 손상 등에 따른 크랭크케이스로의 연소 가스 누설, 흡기변 손상 등에 따른 연소 압력 누설로 LPG 인젝터 손상 및 소기 라인 내 화재가 주요 위험요소로 식별되었다. 평가된 위험도 지수 값에 따라 위험도 순위는 6개 그룹으로 구분(그 값이 2~7) 할 수 있다.

		Consequence index					
		1	2	3	4	5	
		Moderate	Minor	Significant	Severe	Catastrophic	
Frequency index	4	Frequent	-	-	-	-	-
	3	Probable	14	18, 20, 25, 40	12, 13	17, 29	-
	2	Remote	5, 6, 8, 9	3, 7, 11, 19, 21, 23, 27, 28, 31, 33, 35, 39, 41, 46, 48, 54, 56, 57, 58	10, 15, 26, 30, 37, 38, 45, 47, 51, 55	24, 36, 42, 43	34
	1	Improbable	22, 32	4, 49, 50	1, 2, 16, 44	52, 53	-

Broadly acceptable area
Tolerable area
Intolerable area

Fig. 5. Results of HAZOP analysis with risk matrix.

4.2 퍼지 분석적 계층 과정(AHP) 분석 결과

Table 6에 따라 5가지의 위험 요인에 대한 상대비교 결과는 Table 9와 같다. 여기서 일관성 검사 결과 CR은 0.013으로, 그 비율이 0.1보다 훨씬 낮게 산출되었다. 퍼지 AHP를 통해 분석된 위험 요인의 상대적 가중치는 Table 10과 같이 나타났다. LPG 엔진 시스템을 대상으로 5가지의 위험 요인 중, 발생 빈도와 심각도 항목이 안전 운용에 가장 큰 영향을 미치고, 유지 보수에 따른 민감도는 위험성에 미치는 영향이 가장 적게 평가된 것을 알 수 있다.

Table 9. Pairwise comparisons matrix for risk factors

Risk factors	F	S	U	SSM	SM
F	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, $\frac{3}{2}$, 2)	(1, $\frac{3}{2}$, 2)	($\frac{3}{2}$, 2, $\frac{5}{2}$)
S	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, $\frac{3}{2}$, 2)	(1, $\frac{3}{2}$, 2)	($\frac{3}{2}$, 2, $\frac{5}{2}$)
U	($\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, 1)	($\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, $\frac{3}{2}$, 2)
SSM	($\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, 1)	($\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, $\frac{3}{2}$, 2)
SM	($\frac{2}{5}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$)	($\frac{2}{5}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$)	($\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, 1)	($\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$, 1)	(1, 1, 1)

Table 10. Relative weight of risk factors

Risk factors	F	S	U	SSM	SM
Weight	0.298	0.298	0.172	0.172	0.060

퍼지 다기준 HAZOP 기법을 이용한 해상용 LPG 엔진의 위험성 평가

Table 8. Result of HAZOP analysis

Hazard No.	Node	Operating mode	Guide word(s) ^a	Hazardous event(s)	Failure/Causes	Consequence(s)
1	1	Installation test	MP, EP, COE	Pipe rupture	Entrapped liquid	Gas leak to environment
2	1	Start up	MP, COE	Pipe rupture	High pressure pump overshoot	Gas leak to environment
3	1	Start up	LP, NF, LF, LL	No gas supply	Pump malfunction	Gas supply to the engine is stopped
4	1	Start up	MT, LT	Damage to sealing	Loss of heat control	Gas leak to environment
5	1	Start up	MF, CIS	Damage of filter	Wrong position of valve	Contamination of system
6	1	Start up	CCM	Clogged filter	Hydrates	Start failure
7	1	LPG operation	LP, HT	Changed LPG to gas	Pump supply pressure low	LPG engine operation failure
8	1	LPG operation	CIS	Clogged filter	Particles in LPG	Stop of LPG operation
9	1	LPG operation	CCM	Clogged filter	Hydrates	Stop of LPG operation
10	1	LPG operation	COE	LPG release to vent	Valve leaks	LPG leakage to vent
11	1	Stop/blowoff	MP, R	Pipe rupture	Liquid hammering effect	Gas leak to environment
12	1	Stop/blowoff	EP	Damage of sealings	Valve stuck in closed position	Gas leak to environment
13	1	Stop/blowoff	MF	LPG to vent line	Valve stuck in open position	Gas leak to environment
14	1	Stop/blowoff	NF	Loss of electric control	Operator failure	Valves in fail safe mode
15	1	Purge	LP, NF, LF	Insufficient purging	Operator failure	Engine contains LPG
16	1	Maintenance	MP, EP	LPG exposure	Maintained when purge valve closed	Personal injury
17	1	Maintenance	LP, COE, HL, NF, LF	Gas on components during disassembly	Low N ₂ pressure	Potential explosive atmosphere
18	1	Maintenance	CIS	Damage to components	Poor housekeeping	Operation not possible
19	2	Installation test	LP	Inner pipe test not possible	Low N ₂ supply	Operation not possible
20	2	Installation test	CCM, NF, LF	N ₂ in electric control system	Poor valve sealing	Electric cable or control part damaged
21	2	Installation test	COE, R	Leakage of N ₂	Leakage from LPG components	Operation not possible
22	2	Start up	MT	Unable desired engine load	Loss of heat control	Start-up sequence abandoned
23	2	Start up	LT	Cold LPG supply to engine	Insulation failure in LPG line	LPG leakage to double wall
24	2	LPG operation	MP, COE	LPG injector module leak	Leakage of injector module	Engine room fire/choke
25	2	LPG operation	MF	Too early injection of LPG	LPG injector failure	Engine load control not made properly
26	2	LPG operation	MF	LPG system: Too high	LPG injector stuck in open position	Too high cylinder expansion
27	2	LPG operation	LP, MF	Electric cable cut-off	Mechanical damage of cable	Engine shutdown
28	2	LPG operation	NF, LF	Loss of LPG injection	Electric control signal fails	Engine shutdown
29	2	LPG operation	CCM	LPG blow-by	Piston ring damaged/worn out	LPG leaks into crankcase
30	2	LPG operation	MP, COE	LPG supply pipe rupture	High pressure pump overshoot	LPG leak to environment
31	2	LPG operation	MT	Engine load control fails	Loss of heat control	Engine load control not made properly
32	2	LPG operation	MP	Too high LPG injection	High pressure pump overshoot	Higher maximum cylinder pressure
33	2	LPG operation	MF, LF	Air flow not	Broken throttle actuator	Incomplete LPG combustion
34	2	LPG operation	RF, CIS, CCM	Combustion pressure leaking to air intake valve	Leaking air intake valve seat	Damage of LPG injector and throttle actuator
35	2	LPG operation	RF, CIS, CCM	Leaking to exhaust valve	Leaking exhaust gas valve seat	Damage of exhaust temp sensor
36	2	LPG operation	R, MF	Excessive LPG injection	LPG injector failure	Cylinder cover lift
37	2	LPG operation	CIS, COE	Unbured LPG	LPG miss firing	LPG/air mixture is vented
38	2	LPG operation	CIS, COE	Unbured LPG	Incomplete combustion	LPG/air mixture is vented
39	2	Stop	CIS, COE	Unbured LPG	Leakage from LPG injector	LPG/air mixture is vented
40	2	Stop/blowoff	MP, CIS	N ₂ in electric control system	Poor valve sealing	Electric cable or control part damaged
41	2	Stop/blowoff	MP, LF, NF	Insufficient purge of LPG line	N ₂ purge valve stuck	LPG remain in the system line
42	2	LPG operation	COE	LPG pipe rupture	External impact on pipes	Major gas leak to engine room
43	2	Maintenance	MP, EP	LPG exposure	Maintained when purge valve closed	Personal injury
44	3	All	MP	Pipe rupture	Excessive nitrogen pressure	Gas leak to environment
45	3	LPG operation	RF	LPG in nitrogen line	N ₂ supply valve stuck open	Liquid LPG to deck via N ₂ line
46	3	Purge	LP, NF, LF	Insufficient purging	Blocked N ₂ main valve	Engine contains LPG
47	3	Maintenance	MP, EP	Nitrogen exposure	N ₂ supply valve stuck open	Personal injury
48	3	Maintenance	CIS	Damage to components	Poor housekeeping	Operation not possible
49	4	Installation test	MP	Leakage inner pipe	Wrong assembly	Installation test failed
50	4	Installation test	LP	Leakage outer pipe	Wrong assembly	Installation test failed
51	4	LPG operation	CIS	LPG leakage	LPG inner pipe leak/rupture	Engine shutdown
52	4	LPG operation	CIS	LPG leak to engine room	External damage	Inner and outer pipes rupture
53	4	LPG operation	COE	LPG leak to engine room	Inner and outer pipes rupture	Potential of flammable atmosphere
54	5	Installation test	COE	Leakage of N ₂	Leakage during test	Risk of asphyxiation
55	5	Start up	COE	LPG leakage to environment	leakage during pressure up	Possible fire or explosion
56	5	LPG operation	MP, LF, NF	Pipe rupture	Valve falling in closed position	Failing operation
57	5	Stop/blowoff	NF, LF	Purge unavailable	Valve blocked or malfunction	Failure to blow off LPG
58	5	Purge	CIS	Valve not operable	Electric signal failed	Loss of control of valves

^a Refer to table 3 for the meaning of the guide words.

4.3 퍼지 TOPSIS 분석 결과

Table 11은 앞서 4.2절에 따른 5가지 위험 요인에 대한 가중치를 고려하여 3.2.4절에 따른 퍼지 TOPSIS 기법을 적용한 결과이다. 위험도 순위는 총 58개의 위험요소를 근접도 계수 값의 크기로 분류하여 47개 그룹으로 구분할 수 있다. Table 8에서 알 수 있듯이, 4.1절에 따른 HAZOP 분석을 통해 위험도 지수 값이 가장 높은 그룹(위험도 지수: 7)에 있는 위험요소(3개)의 경우, 퍼지 TOPSIS를 통해 위험 순위가 세밀하게 매겨질 수 있음을 알 수 있다. 위험 순위가 높게 분석된 위험요소는 LPG 공급 라인 유지 보수 중 가스 누출 (hazard no 17) > 운전 중, 크랭크케이스로의 연소 가스 누설(no 29) > 운전 중, 흡기변으로 연소 압력 누설에 따른 인젝터 손상 등 (no 34)으로 분석되었다.

Table 11. Risk ranking by fuzzy TOPSIS HAZOP

Hazard no.	CC _i	Rank no.	Hazard no.	CC _i	Rank no.
1	0.1923	56	30	0.2809	29
2	0.1923	56	31	0.2499	41
3	0.2549	38	32	0.2499	41
4	0.1998	55	33	0.2305	47
5	0.2062	51	34	0.3814	3
6	0.2062	51	35	0.3117	14
7	0.2934	23	36	0.3518	5
8	0.2062	51	37	0.2862	26
9	0.2062	51	38	0.2862	26
10	0.3241	10	39	0.2366	45
11	0.2463	44	40	0.3014	18
12	0.3042	17	41	0.2556	37
13	0.3143	13	42	0.3260	8
14	0.2353	46	43	0.3626	4
15	0.2716	32	44	0.2602	35
16	0.2799	30	45	0.2923	24
17	0.4809	1	46	0.2618	33
18	0.2835	28	47	0.3311	6
19	0.2464	43	48	0.2912	25
20	0.2738	31	49	0.2273	49
21	0.2593	36	50	0.2273	49
22	0.1352	58	51	0.3055	16
23	0.2305	47	52	0.3159	12
24	0.3299	7	53	0.3196	11
25	0.3088	15	54	0.2999	19
26	0.2616	34	55	0.3245	9
27	0.2501	39	56	0.2953	20
28	0.2501	39	57	0.2953	20
29	0.4349	2	58	0.2953	20

CC_i: Closeness coefficient

4.4 위험성 평가 결과에 따른 위험도 감소 방안 검토

4.1절에 따른 HAZOP 분석 결과 특히, 허용 불가능한 영역 (위험도 지수: 7)에 포함된 위험요소는 위험성 감소 방안을 마련하여 허용 가능한 영역으로 낮출 필요가 있다. 또한, 본

연구 대상인 LPG 엔진 시스템은 국내 최초 개발되고 경험이 부재하기에 안전 운용을 위한 사전 조치가 무엇보다 중요하다. 이에, 4.1절 및 4.3절에 따른 위험성 평가 결과 위험도가 높은 위험요소에 대해 위험도 감소 방안을 제안하면 Table 12와 같다. LPG 공급 시스템 및 엔진에 대한 유지 보수 과정에서 발생 가능한 위험성을 예방하기 위해 관련 절차를 마련하고 숙지하는 것은 새로운 형태의 엔진 시스템 운용에 친숙화가 되어 있지 않은 선원에게는 필수적으로 제공되어야 할 것이다. 이는 향후 개발되는 다양한 연료 엔진 시스템에도 안전 운용을 위해 우선적으로 고려되어야 할 것이다.

Table 12. List of recommendations and details for high rank hazards

Hazard no.	Risk rank	Recommendation
17	1	Prepare procedure for safe maintenance
29	2	Prepare detailed evaluation against blow-by, crankcase blow by separator
34	3	LPG engine shutdown when boost temperature sensor is high, prepare procedure for safe maintenance
43	4	Prepare procedure for safe maintenance
36	5	If necessary, calculations are recommended
47	6	Prepare procedure for safe maintenance

5. 결론

본 연구는 국내 최초 개발된 200 kW 급 LPG 엔진을 대상으로 퍼지 다기준 HAZOP 기법을 통해 위험성 평가를 수행하고 안전 운용을 위한 위험도 감소 방안을 제안하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 전문가 그룹을 통한 HAZOP 분석 결과, 5개의 검토구간에 대해 총 58개의 위험요소를 식별하였고, 위험도 지수에 따라 위험 순위를 4개 그룹으로 분류할 수 있었다.

2) 퍼지 AHP 기법에 따라 5가지의 위험 요인에 대한 상대비교 결과, 발생 빈도 및 심각도에 대한 가중치가 가장 높았다.

3) 퍼지 TOPSIS 분석 결과, HAZOP 대비 위험요소의 위험 순위를 47개 그룹으로 세밀하게 구분할 수 있었다. 그 결과, 동 엔진 시스템의 경우 LPG 공급 라인 유지 보수 중 가스 누출 > 운전 중 연소가스의 blow-by > 흡기변으로 연소 압력 누설 순으로 위험 순위가 가장 높게 평가되었다.

4) 동 엔진 시스템에 대한 위험성 평가 결과 위험 순위가 높은 위험요소의 위험도 감소 방안을 위해 특히 안전한 작업을 위해 해당 절차를 마련하고 제공하는 것이 필수적이다.

본 연구가 동 엔진 시스템뿐만 아니라 앞으로 출현하게 될 다양한 친환경 연료 시스템의 안전 운용을 위한 위험성 평가의 표준절차로 활용할 수 있기를 기대한다.

References

- [1] Ahn, J. and D. Chang(2016), Fuzzy-based HAZOP study for process industry, *J. Hazard. Mater.*, 317, pp. 303-311.
- [2] Ampah, J.D., Yusuf, A.A., Afrane, S., Jin, C., Liu, H.(2021), Reviewing two decades of cleaner alternative marine fuels: towards IMO's decarbonization of the maritime transport sector, *J. Clean. Prod.*, 320, pp. 128871.
- [3] Aras, F., E. Karakaş, and Y. Bicen(2014), Fuzzy logic-based user interface design for risk assessment considering human factor: a case study for high-voltage cell, *Saf. Sci.*, 70, pp. 387-396.
- [4] Cao, Y., Q. J. Jia, S. M. Wang, Y. Jiang, and Y. Bai(2022), Safety design analysis of a vent mast on a LNG powered ship during a low-temperature combustible gas leakage accident, *J. Ocean Eng. Sci.*, 7(1), pp. 75-83.
- [5] Carpitella, S., A. Certa, J. Izquierdo, and C. M. La Fata (2018), A combined multi-criteria approach to support FMECA analyses: a real-world case, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 169, pp. 394-402.
- [6] Chang, D.-Y.(1996), Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP, *Eur. J. Oper. Res.*, 95(3), pp. 649-655.
- [7] Chen, C. T.(2000), Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy sets and systems*, 114(1), pp. 1-9.
- [8] Cheraghi, M., A. E. Baladeh, and N. Khakzad(2019), A fuzzy multi-attribute HAZOP technique (FMA-HAZOP): Application to gas wellhead facilities, *Safety science*, 114, pp. 12-22.
- [9] DNV(2017), *LPG as a Marine Fuel*, p. 21.
- [10] Grassi, A., R. Gamberini, C. Mora, and B. Rimini(2009), A fuzzy multi-attribute model for risk evaluation in workplaces, *Saf. Sci.*, 47(5), pp. 707-716.
- [11] IEC:61882(2001), *Hazard and Operability Studies (HAZOP Studies) - Application Guide*, International Electrotechnical Commission.
- [12] ISO(2009), "IRisk management - Risk assessment techniques", British standard, pp. 50-52.
- [13] Lees, F.(2012), *Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*, Butterworth-Heinemann.
- [14] Monzingo, D. G.(2020), *The Propane-Fueled Ship*, In SNAME Maritime Convention, OnePetro, p. 8.
- [15] O Herrera, M. A. de la, A. S. Luna, A. C. A. da Costa, E. M. B. Lemes(2018), *Risk Analysis: A generalized Hazop methodology state-of-the-art, applications, and perspective in the process industry*. *Vigilância Sanitária em Debate: Sociedade, Ciência & Tecnologia*, 6(2), pp. 106-121.
- [16] Pinto, A.(2014), QRAM a qualitative occupational safety risk assessment model for the construction industry that incorporate uncertainties by the use of fuzzy sets, *Saf. Sci.*, 63, pp. 57-76.
- [17] Raviv, G., A. Shapira, and B. Fishbain(2017), AHP-based analysis of the risk potential of safety incidents: case study of cranes in the construction industry, *Saf. Sci.*, 91, pp. 298-309.
- [18] Saaty, T. L.(1980), *The Analytic Hierarchy Process*, Mac Graw-Hill, New York.
- [19] Salih, M. M., B. B. Zaidan, A. A. Zaidan, M. A. Ahmed(2019), Survey on fuzzy TOPSIS state-of-the-art between 2007 and 2017, *Computers & Operations Research*, 104, pp. 207-227.
- [20] Vahidnia, M. H., A. A. Alesheikh, and A. Alimohammadi (2009), Hospital site selection using fuzzy AHP and its derivatives, *J. Environ. Manage.*, 90(10), pp. 3048-3056.
- [21] Xing, H., C. Stuart, S. Spence, and H. Chen(2021), Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050, *J. Clean. Prod.*, 297, 126651.
- [22] Yeo, S. J., J. Kim, and W. J. Lee(2022), Potential economic and environmental advantages of liquid petroleum gas as a marine fuel through analysis of registered ships in South Korea, *J. Clean. Prod.*, Vol. 330, 129955.
- [23] Yeo, S., B. Jeong, and W. J. Lee(2023), Improved formal safety assessment methodology using fuzzy TOPSIS for LPG-fueled marine engine system. *Ocean Engineering*, Vol. 269, 113536.
- [24] Zimmermann, H. J.(2011), *Fuzzy Set Theory - And Its Applications*, Springer Science & Business Media.

Received : 2023. 03. 10.

Revised : 2023. 04. 06.

Accepted : 2023. 04. 27.