

위험성 평가기법을 활용한 선박용 액화수소 사용시설 기준개발

허영택 · 한혜수 · 노경민 · 정희수 · †채충근

미래기준연구소

(2022년 10월 31일 접수, 2022년 12월 20일 수정, 2022년 12월 26일 채택)

Development of Standards for the Use of Liquefied Hydrogen for Ship Using Risk Assessment Techniques

Young-taeg Hur · Hye-Soo Han · Gyoung-min Noh · Hee-soo Chung · †Chung-keun Chae

Mirae EHS-Code Research Institute, Gwangmyeong, 14353, Korea

(Received October 31, 2022; Revised December 20, 2022; Accepted December 26, 2022)

요약

정부의 수소 경제 활성화 로드맵에 따라 다양한 산업 분야에서 액화수소를 에너지원으로 하는 사업을 진행하고 있고, 액화수소 설비 및 취급시설의 제작 및 운영 실증 사업 또한 수행되고 있다. 그러나 운영 실증 사업에 필요한 안전기준이 국내에는 마련되지 않아 실증 사업의 걸림돌로 작용하고 있어 조속한 안전기준 마련이 필요한 실정이다. 따라서 액화수소 설비 및 취급시설의 안전성 확보를 위하여 액화수소의 위험성을 종합적으로 고려한 안전기준의 마련이 반드시 필요하다고 본다. 본 연구에서는 일반적인 방법과 같이 국외 사고 사례 분석 및 유사 분야의 안전기준을 참고로 도출한 선박용 액화수소 사용 시설 안전기준을 위험성 평가기법인 ETA, FMEA와 의사 결정방법인 AHP를 활용해 안전기준 항목의 우선순위 도출하여 안전기준 항목 선정에 타당성을 제시하고자 한다.

Abstract - According to the government's roadmap for revitalizing the hydrogen economy, various industries carry out projects using liquefied hydrogen as an energy source. However, safety standards necessary for operational demonstration projects are not prepared in Korea, thus, it is necessary to prepare safety standards as soon as possible. Therefore, in order to secure the safety of liquefied hydrogen instrumentation and handling facilities, it is necessary to prepare safety standards that comprehensively consider the risk of liquefied hydrogen. This study aims to prioritize safety standard items using ETA, FMEA, and AHP, which are risk assessment techniques, to present the feasibility of selecting safety standard items.

Key words : hydrogen economy, liquefied hydrogen facilities, ETA, FMEA, AHP, safety standard

1. 서론

정부의 수소경제 활성화 로드맵에 따라 수소경제는 탄소 경제를 대체하는 새로운 에너지 패러다임 전환을 추동하는 동시에 우리나라 성장의 핵심 분야로 주목받고 있다.

특히 수소경제 활성화 로드맵의 3대 정책 방향 중 경제 구조의 저탄소화를 위한 수소 활용 방안으로 수

소자동차, 수소 택시·버스, 수소 선박·열차·드론 등 모빌리티 분야 확대 계획을 추진하고 있다.

수소는 일반적으로 기체 상태로 제조되어 유통되고 있으며, 그 특성상 낮은 폭발 한계, 빠른 확산성, 넓은 폭발범위 등으로 인해 수소가스 누출시 대형 사고가 발생할 여지가 있다. 이에 반해 액화수소는 기체 수소와 달리 대기압에서 저장이 가능하고, 저압에서 운용되기 때문에 상대적으로 안전성이 우수하다고 할 수 있다.[1]

이에 따라 다양한 산업 분야에서 액화수소를 에너지원으로 하는 사업을 진행하고 있고, 액화수소 설비

†Corresponding author:huryt@meri.co.kr

Copyright © 2022 by The Korean Institute of Gas

및 취급시설의 제작 및 운영 실증 사업 또한 수행되고 있다. 그러나 운영 실증 사업에 필요한 안전기준이 국내에는 마련되지 않아 실증 사업의 걸림돌로 작용하고 있어 조속한 안전기준 마련이 필요한 실정이다.

따라서 액화수소 설비 및 취급시설의 안전성 확보를 위하여 액화수소의 저온 위험성, 보일오프의 위험성, 누출가스의 폭발 위험성 등을 종합적으로 고려하여 액화수소 설비 및 취급시설에 필요한 안전기준의 마련이 반드시 필요하다고 본다.

안전기준을 마련한다는 것은 그 안전기준을 준수하면 그 시스템의 최소한의 안전은 확보할 수 있다는 것을 전제로 한다. 국내는 물론 국외의 경우에도 안전기준의 마련 방법은 다른 분야에 비하여 과학화 수준이 높지 않은 편이다. 사고사례를 분석하고 유사 분야의 안전기준을 참고하여 초안을 작성한 후 이해관계자의 의견을 들어 최종 안전기준으로 확정하는 절차를 밟는 것이 일반적이다. 어떤 시스템에 대한 안전기준이 빈틈없이 최소한의 안전 확보가 가능하도록 구성되었는지에 대한 검토는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 일반적인 방법과 같이 국외 사고사례 분석 및 유사 분야의 안전기준을 참고로 도출한 선박용 액화수소 사용시설 안전기준을 위험성 평가기법인 ETA, FMEA와 의사 결정방법인 AHP를 활용해 안전기준 항목의 우선순위 도출하여 안전기준 항목 선정에 타당성을 제시하고자 한다.

II. 연구의 방법론

이 연구의 목적은 가연성 물질인 액화수소를 대상으로 하여 위험성 평가기법인 ETA, FMEA와 의사결정방법인 AHP를 통해 SAPN(Standards Availability Priority Number(기준 효용성 우선순위)) 값을 도출하여

Table 1. Methods used in the study

Sortation	Method	How to use
Risk assessment	ETA(Event tree analysis)	Deriving the circumstances of the accident of Liquefied Hydrogen Utilization Facilities by Step
	FMEA(Failure Modes and Effects Analysis)	Relative assessment of effectiveness and economics for each item and deriving SAPN values
decision making	AHP(Analytic Hierarchy Process)	Derive the importance of each cause of accident

액화수소를 사용하는 선박에 적합한 안전기준을 마련하는 것이다. 연구에 활용한 위험성 평가기법과 의사결정 방법에 따른 활용 방법은 Table. 1과 같다.

2.1 ETA(Event Tree Analysis)

ETA는 이진 논법에 기반을 두고 있는 위험성 평가기법이다. 어떤 사건(Event)이 일어난 경우나 일어나지 아니한 경우 또는 어떤 구성요소에 고장(사고)이 발생한 경우나 발생하지 아니한 경우를 표현한다. 이 기법은 고장의 발생과정을 고장원인들의 연쇄로 파악하여, 고장 발생의 초기사상으로부터 재해 사고까지의 연쇄적 전개를 나뉘어 가지 형태로 표현하는 귀납적인 시스템 분석기법이다. 이러한 분석의 흐름은 어떠한 과정을 거쳐 사고가 발생하는지 직관적으로 파악할 수 있다. 추가로 각 사고 발생 요인의 발생확률을 계산할 수 있다면, 정성적인 분석기법인 동시에 정량적인 분석기법의 장점도 활용할 수 있다. [2]

사고는 하나가 아닌 여러 사고 발생 요인들이 연관되어있다. 이 요인들을 도식화하고자 하는 도표의 왼쪽에서부터 오른쪽으로 순서대로 나열한다.

Fig. 1은 일반적인 ETA 기법에 의한 사고 전개 과정을 나타낸 것이다.

가장 왼쪽의 요인은 시스템의 고장 또는 사고가 발생하게 되는 초기사상을 기입하고, 오른쪽 끝은 시스템 구성요소의 조합을 통한 결과 사고를 기입한다. 중간 사고 발생 요인들은 시간 경과에 따라 사고가 전파되는 데에 관계되는 요인들을 나열하도록 한다. 사고 초기사상이 결정되었다면 그 점에서 다음 사고의 발생 요인으로 가지를 나눈다. 작동 성공의 경우를 맨 윗가지로 위치시키고, 작동 실패의 경우를 맨 아래 가지에 위치시킨다. 다음 단계에서는 뻗어진 가지의 끝점에서 다음 사고 발생 요인의 성공, 실패에 따라 가지를 나누어 간다. 결과적으로 시스템에 발생할 수 있는 모든 사고들이 오른쪽 가지 끝에 나열되게 된다.[3]

ETA는 초기 사고에서 시작하여 여러 가지 결과로

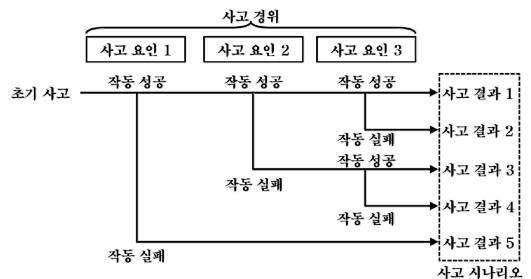


Fig. 1. Generic ETA showing primary and secondary trees.

전이해가는 경로를 결정하고, 각 결과의 발생 빈도를 추정하는 데에 사용하는 bottom-up 방식의 연역적 분석기법이다. ETA는 FMEA와 통합하여 사용하는 것도 가능하다. [4]

본 연구에서는 ETA 기법을 활용하여 선박용 액화수소 사용시설의 단계별 사고의 전개 과정을 규명하였다.

2.2 FMEA(Failure Modes and Effects Analysis)

FMEA는 심각도, 발생도 및 검출도에 의해 잠재적인 실패를 규명하는 bottom-up 접근기법 중 하나이다. 이 기법은 시스템 또는 시스템의 구성요소에 존재하는 고장원인 및 고장 영향을 분석하고, 그것이 시스템에 미치는 영향을 결정하여, 그것의 심각도에 따라 우선순위를 결정한다.[4]

FMEA는 Fig. 2와 같이, 대상 item 선정에서 시작하여 우선순위 산출까지 단계적으로 진행된다. 여기에서 item은 project의 대상을 의미하고, Function은 주어진 성능 기준 또는 요구조건에서 그 item이 의도하는 기능을 지칭한다.[5]

고장 형태는 의도하는 기능 또는 요구조건을 충족하지 못하는 고장(Failure)의 유형(mode)을 지칭한다. Effect는 그 시스템 또는 최종 사용과정에서 발생하는 고장의 영향을 지칭한다. Severity는 주어진 고장 형태 영향의 심각성을 나타내는 등급이다. 이것은 특정 FMEA 범위 내에서 매겨진 상대적인 순위이며, 발생도 또는 검출도와 독립적으로 결정된다.

위험 우선 순위(Risk Priority Number, RPN)는 각 고장 영향(failure mode) 또는 발생 원인의 위험도 등급을 나타내는 수치이며 실패 모드의 심각도, 발생도 및 검출도 3가지 요소의 산술적 곱으로 계산한다. 제안 행위(Recommended action)는 failure의 잠재 원인 위험성을 감소시키거나 제거하기 위한 제안 활동을 지칭한다.

제안 활동을 도출하는 때에는 기존 control, 이슈의 상대적 중요성, 개선 활동의 비용 및 효율성 등을 고려한다. 각 원인에 대하여는 다수의 제안 행위가 존재할 수 있다.

본 연구에서는 도출된 선박용 액화수소 안전기준의 타당성을 검증하기 위하여 FMEA의 심각도와 발생도를 대체하여 기준항목의 효과성과 경제성을 평가함으로써 우선순위를 도출하였다.

2.3 AHP(Analytic Hierarchy Process)

AHP는 대안들의 이원 비교를 통하여 모든 대안을 서열화하고, 의사결정 요소들을 계층으로 구조화함으로써 복잡한 의사결정 요소들을 비선형적이고 간

략한 구조로 나타내어 의사결정과정과 결과에 대한 이해의 틀을 제공하는 기법이다. 평가자의 지식, 경험 및 직관을 포착하고자 하는 의사 결정방법으로, 의사 결정자는 하나의 결론에 도달하기 위하여 다수의 요인을 동시에 고려하고 의사결정 문제를 일련의 연계된 계층으로 모델링하게 된다.[6]

AHP의 분석은 문제 정의 및 목표 설정, 계층구조 설계, 가중치 계산, 우선순위 결정 순으로 진행된다. Fig. 3은 일반적인 AHP기법의 계층구조를 나타낸 것이다. [7]

Fig. 3과 같이 문제를 단계별로 계층 구조화한 후 계층별로 의사결정 요소 간의 이원 비교를 수행하여 가중치를 계산한다. 이원 비교 행렬의 수학적 방법이란 구체적으로 eigenvalue 방법을 말하는 것으로 다음 식을 만족하는 가장 큰 $\lambda(\lambda_{max}, \text{람다인})$ 와 그에 상응하는 ω 벡터(vector)를 구한다.

$$A \cdot \omega = \lambda_{max} \cdot \omega \tag{1}$$

여기서 A 는 이원 비교 행렬을 나타내며, 위 식을 통해 도출되는 ω 벡터는 평가기준들의 상대적 중요도

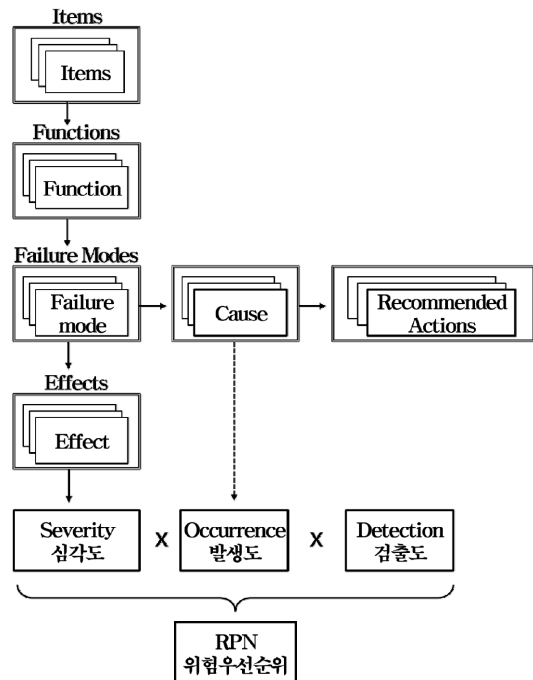


Fig. 2. The logical relationship between FMEA elements.

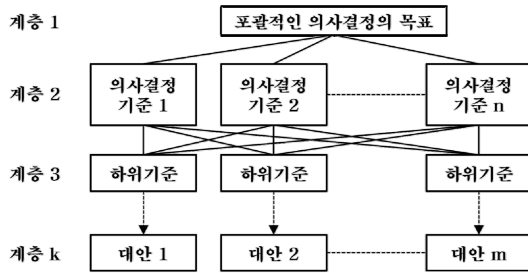


Fig. 3. Hierarchy of Problems in AHP Analysis.

나 각 평가기준 하에서 대안들의 상대적 선호도를 나타낸다. 모든 의사 결정 요소들의 상대적 중요도와 상대적 선호도를 결합하여 대안의 우선순위를 결정한다.

본 연구에서는 ETA의 결과로 도출된 선박용 액화수소 사용시설에서 일어날 수 있는 사고원인에 대하여 AHP기법을 적용하여 안전기준의 중요도를 평가하고 우선순위를 도출하였다.

2.4 평가 기법의 활용 및 분석

선박용 액화수소 사용시설의 사건 발생 원인은 ETA 기법을 통해 분석해낼 수 있다. FMEA에서 사고영향을 체계적으로 분석하기 위하여 Fig. 1에서 보는 바와 같이 ETA 기법을 접목할 수 있는 것이다. ETA의 결과로 도출된 사고 항목들을 사고 전개 과정이 유사한 기준항목별로 분류하고 FMEA를 통해 기준항목들에 대한 효과성·경제성을 평가하였다. ETA 결과로 도출된 사고에 대하여 AHP 기법으로 중요도에 따라 안전기준을 도출하였다.

FMEA를 통해 산출된 평가 결과와 AHP를 통해 산출된 평가 결과값을 곱하여 SAPN(기준효용성 우선순위) 값을 도출하였다. SAPN 값이 50점 이상인 항목을 안전기준으로 우선 선정하고 50점 미만의 항목은 안전기준으로의 채택을 재검토하거나 삭제하는 것으로 하였다.

III. 연구의 결과 및 고찰

3.1 ETA기법을 통한 사고 경위 분류

ETA 위험성 평가기법을 통하여 액화수소 사용시설에서 발생할 수 있는 사고 경위를 나열하였다. 가장 왼쪽은 액화수소 사용시설에서 발생하게 되는 초기 사상을 기입하고 오른쪽 끝은 고장 또는 사고가 발생하는 구성요소의 조합을 통한 결과사고를 입력하였다. ETA 결과, 사고 전개 순서는 다음과 같이 7개의 사고 경위로 분류됨을 확인하였다.

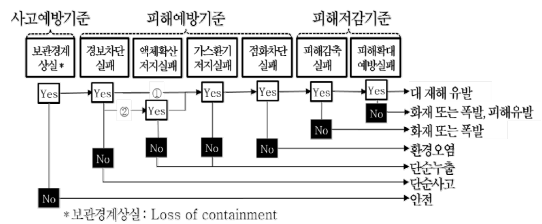


Fig. 4. Application of ETA to Derive Safety Standards of Liquefied Hydrogen.

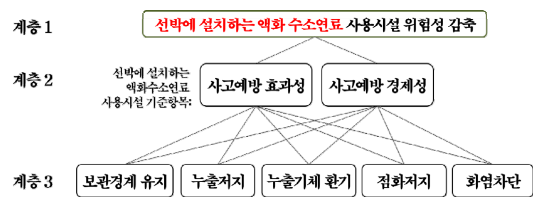


Fig. 5. Hierarchical Design for Weight Derivation of Events.

- (1)보관 경계 상실
- (2)경보 차단 실패
- (3)액체 확산 저지 실패
- (4)가스 환기 저지 실패
- (5)점화 차단 실패
- (6)피해 감축 실패
- (7)피해 확대 예방 실패

Fig. 4와 같이 사고 전개 순서의 좌측으로 갈수록 대체 유발 발생률이 높아지기 때문에 보관 경계 상실의 경우가 중요도가 가장 높은 것으로 나타났다.

3.2 AHP기법을 통한 기준 가중치 도출

ETA를 통하여 확인된 선박용 액화수소 사용시설의 사고원인에 대하여 AHP기법을 활용하여 가중치를 도출한다.

먼저 Fig. 5와 같이 3단계 계층구조를 설계하여 최상위 수준에는 본 의사결정의 목표인 '선박에 설치하는 액화 수소연료 사용시설 위험성 감축'을 두었다. 제2수준에는 평가항목으로 사고 예방의 효과성과 사고 예방 경제성을 위치시켰다. 제3수준은 ETA를 통하여 도출된 사고원인 중 액화수소 사용시설에 대한 사고원인을 위치시켰다.

제2수준의 사고 예방 효과성은 발생빈도의 감축 등 사고 예방의 효과를 의미하고, 사고 예방 경제성은 시설설치 또는 장비의 구입비용 등을 의미한다.

Table 2. Example of a double contrast

factors	Effectiveness	Economic feasibility
Effectiveness	1.000	3.915(a)
Economic feasibility	0.255(b)	1.000
Sum	1.255	4.914

Table 3. Example of importance derivation

factors	Derivation method
Effectiveness	$\{(1.000/1.255)+(3.915/4.914)\} \div 2$
Importance	0.797

Table 4. FMEA of Loss of containment.

No.	Standard content	Effectiveness	Economic feasibility
1	A system shall be provided to prevent overcharging of the liquefied hydrogen storage tank and to protect the liquefied hydrogen storage tank in the event of overcharging.	5	3
2	The storage facility is provided with a control device for preventing condensation of air in the storage facility.	3	3
3	A connector is installed in the outer tank of the liquefied hydrogen storage tank to measure the vacuum level in the annular space.	5	4

평가항목 및 세부 평가항목별 가중치를 계산하기 위해 전문가를 대상으로 5점 척도를 기준으로 쌍대비교를 실시하였다.[8]

기준항목에 대한 쌍대비교에 대한 예시는 Table.2와 같으며 (a)와 (b)는 역수의 값을 취하고 있다.[9]

쌍대비교 행렬의 원소를 열의 합으로 나누어 표준화 행렬을 도출하여 평균우선순위를 계산한 후 기준항목 대비 영향요인 기준도 동일한 방법으로 표준화 행



Fig. 6. AHP Survey Results.

렬을 통해 각 영향요인 별 가중치를 도출하였다.[10] 가중치를 도출하는 예시는 Table.3 와 같다.

계층2(기준항목)와 계층 3(영향요인)의 쌍대비교 분석을 통해 가중치를 종합한 결과 결과 사고원인의 가중치는 Fig.6과 같이 보관 경계 유지(27%), 누출기체 환기(21%), 누출 저지(21%), 점화 저지(18%), 화염 차단(13%)으로 나타났다.

3.3 FMEA기법을 통한 기준항목 우선순위 도출

ETA의 결과로 도출된 사고 항목들을 사고 전개과정이 유사한 기준항목별로 분류하고 액화수소 사용 시설에 대한 효과성·경제성을 평가하였다. 효과성이란 동일 비용 투입 대비 사고 예방의 효과를 의미하고, 경제성이란 시설설치 또는 장비 구입비용 대비 사고 예방 효과를 의미한다. 기준항목 중요도 평가는 전문가를 대상으로 1~5점 내에서 상대적으로 평가하여 기입하도록 하였다. 예를 들어 Table.4의 1번의 안전 기준은 경제성 측면에서는 아주 중요함(5), 효율성 측면에서는 중요함(3)으로 평가된 것을 확인할 수 있다.

FMEA 기법을 활용하여 각 사고별 기준항목들에 대한 중요도 평가표의 예는 Table. 4 같다.

FMEA 분석 결과, 액화수소 사용시설의 보관 경계 상실 관련 기준 28항목, 누출 저지 관련 기준 8항목, 누출액체 방류저지 관련 기준 1항목, 누출기체 환기 관련 기준 3항목, 점화 저지 관련 기준 1항목, 화염차단 관련 기준 1항목에 대하여 효과성과 경제성을 평가하여 우선순위를 도출하였다. [11]

3.4 SAPN 값 도출을 통한 최종 안전기준 대상 항목 선정

Table. 5와 같이 AHP 분석 결과 도출된 기준의 가중치와 FMEA를 통해 도출된 효과성, 경제성의 값을

Table 5. Derivation of SAPN.

No.	Standard content				
1	A system shall be provided to prevent overcharging of the liquefied hydrogen storage tank and to protect the liquefied hydrogen storage tank in the event of overcharging.				
	Effectiveness	Economic feasibility	Importance	SAPN	Per cent conversion
	3.33	3.5	0.27	3.15	80
2	The storage facility is provided with a control device for preventing condensation of air in the storage facility.				
	Effectiveness	Economic feasibility	Importance	SAPN	Per cent conversion
	2.66	3	0.27	2.16	55
3	A connector is installed in the outer tank of the liquefied hydrogen storage tank to measure the vacuum level in the annular space.				
	Effectiveness	Economic feasibility	Importance	SAPN	Per cent conversion
	3.33	4	0.27	3.6	91

곱해 SAPN 값을 계산하였다.

계산 결과 SAPN 값을 비교하기 편하도록 백분위 환산하였을 경우 80점 이상인 항목이 8항목, 60~79점인 항목이 13항목, 40~59점인 항목이 18항목, 20~39점인 항목이 2항목, 0~19점의 항목이 1항목으로 분석되었다.

SAPN 순으로 정리한 기준 중에서 선박용 액화수소 사용시설에 적용하기에 적합할 것으로 예상되는 수준의 SAPN값의 범위를 SAPN 값 50점 이상으로 선정하였다.

Table. 6는 SAPN값 90점 이상으로 안전기준으로 선정된 항목의 예시이며, 추후 추가적인 연구를 통하여 SAPN 값의 범위가 적절하게 선정되었는지 등의 심도 있는 검증이 필요할 것으로 사료 된다.

VI. 결론

현행 액화 수소연료 사용시스템에 대한 국내 안전기준이 완비되지 않아 본 연구를 통해 액화수소를 연료로 사용하는 선박에 적용할 수 있는 안전기준을 개발하였다.

Table 6. Examples of selected safety standards

Sortation	Standard content
Storage facilities	A connector is installed in the outer tank of the liquefied hydrogen storage tank to measure the vacuum level in the annular space.
Overpressure safety device	The overpressure safety device shall not be exposed directly to liquefied hydrogen except when it is in operation.
Valve performance	Ultra-low temperature valves installed in liquefied hydrogen storage facilities shall be products certified by authorized agencies for liquefied hydrogen or those proven to be safe through previous use history.

본 연구에서는 위험성 평가기법인 ETA, FMEA와 의사 결정방법인 AHP를 활용하여 안전기준 항목의 우선순위를 도출함으로써 선박용 액화수소 사용시설에 대한 안전기준의 적합성과 효용성을 검증하였다. 구체적인 안전기준의 개발 절차는 다음과 같다.

첫째, ETA를 활용하여 선박용 액화수소 사용시설의 단계별 사고 경위(event sequence)를 도출하였다.

둘째, 액화수소 관련 국내·외 안전기준 및 저인화점 연료 추진 선박 관련 안전기준을 조사·분석하여 각각의 사고를 예방하고 그로 인한 피해를 예방하기 위한 안전기준 항목을 도출하였다.

셋째, AHP 기법을 활용하여 ETA 수행 결과로 도출된 사고(event)의 예방에 대한 효과성 및 경제성 측면의 가중치를 도출하였다.

넷째, FMEA 기법을 활용하여 ETA의 결과로 도출된 사고 항목들을 사고 전개 과정이 유사한 기준항목별로 분류하고 각 사고별 기준항목들에 대한 효과성·경제성을 평가하였다.

다섯째, FMEA를 통해 산출된 평가결과와 AHP를 통해 산출된 평가결과 값을 곱하여 SAPN(기준효용성 우선순위) 값을 도출하였다.

위의 도출된 SAPN의 값을 기반으로 50점 이상의 기준항목을 선박용 액화수소 사용시설의 안전기준으로 선정하였다.

본 연구와 선행연구와의 차이점은 안전기준 분석방법을 체계화하기 위하여 ETA와 FMEA 기법을 통합하였다는 것과 AHP 기법을 추가로 활용하여 시스템의 효과성, 경제성 및 가중치를 동시에 고려하였다는 것이다. [4]

본 연구를 통해 선박용 액화수소 사용시설에 대해 안전 확보가 가능하도록 기준항목을 도출하고, 도출된 안전기준의 항목별 중요도를 평가함으로써 안전

성과 경제성을 동시에 고려한 실효성 있는 기준임을 검증하였다.

수소경제 활성화를 위해 선박뿐만 아니라 수소 트램 · 기차 및 UAM 등과 같은 수소 활용 분야, 더 나아가 생산 · 저장 · 유통 등의 분야에 걸쳐 수소 신기술 개발 및 도입이 추진되고 있다. 이러한 신기술에 대한 안전관리 방안을 마련하는 과정에서 본 연구에서 활용한 위험성 평가 통합기법 및 AHP 기법을 활용하여 실효성 있는 안전기준을 개발한다면 빈틈없는 안전관리를 통한 수소 산업의 안착화에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2022년도 산업통상자원부 에너지 기술 개발 사업의 수소 전주기 통합 위험성 평가 프로그램 및 액화수소 설비 안전기준 개발(과제번호 : 2021581 0100060)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

사용기호

- ω : Relative importance of evaluation criteria
- A : Two-way comparison matrix
- λ_{\max} : Maximum value of the Eigen Value Index

REFERENCES

[1] Chae, C.K., Hur, Y.T., Jee, D.L., Oh, C.H., Kim, Y.G., Bae, S.J., Noh, G.M., *Overview of Hydrogen Related Laws and Regulations in Korea*, 1-280, (2022)

[2] Kim, D.H., Kim, S.C., Kim, E.S. Park, Y.H., “Risk Assessment of Energy Storage System using Event

Tree Analysis”, *Journal of the Korean Society of Safety*, **31**(3), 34-41, (2016)

[3] Park, Y.H., Kim, D.H., Kim, S.C., “Risk Analysis of Electrical Fire for Electric Power Installations by Event Tree Analysis”, *Journal of the Korean Society of Safety*, **31**(5), 16-21, (2016)

[4] Chae, C.K., “Validity Verification Technique Based on FMEA-FTA/ETA for Safety Codes and Standards”, *Department of Chemical Engineering Graduate School Kwangwoon University*, 1-125, (2017)

[5] S. C. Carl, *Effective FMEAs*, Wiley, Hoboken, New Jersey, 82, 109~150, (2012)

[6] Min, J.H., “Smart Management Science”, *Saeng-neng Co., Ltd*, **3**(1) 16-759, (2015)

[7] Kim, S. C., Uh, H. J., “Priority Aggregation for AHP based on experts Opinions”, *Journal of the Korean Society of Management Science*, **19**(3), 41-51, (1994)

[8] Song, K. W., Lee, Y., “Re-scaling for Improving the Consistency of the AHP Method”, *Social Science Research Review Kyungsung University*, **29**(2), 271-288, (2013)

[9] Kim, J.h., Jo, Y.D., “A Development of Representative Condition Evaluation Standard for LNG Storage Tank Structures”, *KIGAS*, **22**(6), 44-51, (2018)

[10] Kim, T.W., Kim, S.H., Ha, J.J., Chang, S.H., “AHP Method for Comprehensive National Energy Systems”, *2005년도 에너지 · 가스 · 기후변 화학회 연합 춘계학술대회 및 특별심포지움*, 170-175, (2005)

[11] Ko, J.W., Yoo, J.H., Kim, D.H., “A Study on Product Liability Response System of Chemical Products by Using Failure Mode and Effect Analysis”, *KIGAS*, **7**(4),30-35, (2003)