Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 5, 2025, pp. 598~605
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.5.598
JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

액화수소 충전소에 대한 HAZOP과 LOPA 적용 연구

서두현[1†] · 이광원[2] · 이동민[2] · 김현기[2] · 신단비[2]

[1]호서대학교 안전행정공학과, [2]호서대학교 안전공학과

A Study on the Application of HAZOP and LOPA to Liquefied Hydrogen Charging Stations

DOOHYOUN SEO[1†], KWANGWON RHIE[2], DONGMIN LEE[2], HYEONKI KIM[2], DANBEE SHIN[2]

[1]Department of Safety and Administrative Engineering, Hoseo University, 12 Hoseodae-gil, Dongnam-gu, Cheonan 31066, Korea
[2]Department of Safety Engineering, Hoseo University, 20 Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan 31499, Korea

[†]Corresponding author :
080201@vision.hoseo.edu

Received 9 September, 2025
Revised 23 October, 2025
Accepted 23 October, 2025

Abstract >> This study applies HAZOP and LOPA methodologies to a liquefied hydrogen refueling station. HAZOP identified potential hazards, while LOPA quantitatively assessed high-risk scenarios based on accident frequency and the effectiveness of independent protection layers (IPLs). Results show that existing safety systems achieved acceptable risk reduction in many scenarios, but some required additional measures. These findings suggest that integrating HAZOP and LOPA can enhance safety management in liquefied hydrogen refueling stations.

Key words : LOPA(방호계층분석), HAZOP(위험과 운전분석), Risk assessment(위험성평가), Liquefied hydrogen refueling station(액화수소 충전소)

1. 서 론

국내 수소 경제 본격화를 위해 액화수소 기반 인프라 투자가 빠르게 확대되고 있다. 특히 대형 액화수소 플랜트 및 충전 인프라 확충이 가속화되고 있다[1). 2024년 말 기준 약 386기의 수소충전소가 구축・계획되어 있으며, 특히 상용차용 대용량 충전소 중심으로 설비 규모와 복잡성이 증가하는 추세이다[2)].

이에 따라 액화수소 충전소 및 액화수소 대형 설비의 새로운 위험요소에 대응하기 위한 안전관리 기준이 제정 또는 개정되고 있으며, 충전소 설계・시공 단계에서의 안전영향평가가 의무화되는 등 제도적 안전 요구 수준이 높아지고 있다.

특히 액화수소는 극저온(-253°C) 조건과 누출 시 대규모 증기 구름 형성 등 특유의 위험 특성을 보이므로[3)], 충전소 단계에서의 체계적 위험성평가가 필수적이다.

일반적으로 수소충전소의 인허가 시에 위험요인을 확인하기 위해 HAZOP 등을 수행하고 있으나, 액화수소 충전소의 경우 고안전성 확보를 위한 추가적 위험성평가가 필요한 상황도 있을 수 있다.

따라서 본 연구는 HAZOP(정성적 위험성평가)과

LOPA(반 정량적 위험성평가)를 연계 적용하여 액화수소 충전소의 주요 위험 시나리오를 도출 · 분석하고, 독립적 방호계층(IPL)의 적정성과 잔여 위험 수준을 허용위험 기준과 비교 · 평가함으로써 국내 액화수소 충전소의 고안전성 확보를 위한 위험성평가 적용 방법을 연구하고자 한다.

2. 적용 대상과 연구 방법

2.1 적용 대상

본 연구의 대상은 액화수소 충전소(LH_2 Refueling Station)이다. 이는 극저온 상태의 액화수소를 대형 저장탱크에 보관하고, 이를 고압으로 가압한 후 기체로 전환하여 수소 차량에 공급하는 형태의 충전소이다. 전체 공정은 크게 저장(Storage) – 펌프 가압(Pump Pressurization) – 기화(Vaporization) – 충전(Dispensing) 단계로 구분된다.

액화수소 충전소의 일반적인 PFD는 Fig. 1과 같다.

우선 액화수소는 극저온 단열 저장탱크(Cryogenic LH_2 Storage Tank)에 저장된다. 저장탱크는 내부 압력 및 온도를 일정하게 유지하도록 설계되며, 진공단열(Vacuum Insulation) 구조를 통해 열유입을 최소화한다. 저장된 액화수소는 이송라인을 통해 펌프(Pump)로 이송되며, 여기서 고압 펌프가 액화수소를 차량 충전에 필요한 압력(약 90 MPa)까지 상승시킨다. 가압된 액화수소는 기화기(Vaporizer)를 거치며, 외부 열원(주로 공기 열교환기)을 이용해 액체에서 기체로 상변환이 이루어진다. 기화 과정에서 발생할 수 있는 압력 변동이나 동결 현상은 충전소 운영 안정성에 중요한 요소이므로, 안전밸브(PSV), 온도 · 압력 제어장치가 동시에 설치된다. 이후 기화된 고압 수소는 버퍼탱크(Buffer Tank) 또는 매니폴드(Manifold)를 통해 안정화 과정을 거쳐, 최종적으로 디스펜서(Dispenser)를 통해 수소차량 연료탱크에 충전된다.

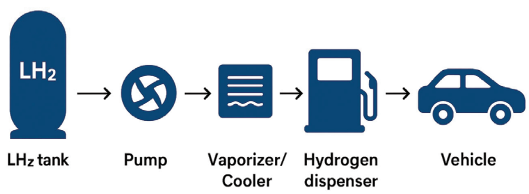

Fig. 1. PFD of LH_2 Refueling Station system

이와 같은 가압형 액화수소 충전소 공정은 상대적으로 단순하면서도 대용량 · 고압 · 극저온이라는 위험요소를 동시에 내포한다. 특히, 저장탱크 및 배관의 단열파괴, 극저온 펌프의 이상, 기화기 결빙 등의 사고 시나리오는 액화수소의 누출 및 화재 · 폭발 사고로 직결될 수 있어 고안전성이 요구되므로 정성적 위험분석(HAZOP)뿐만 아니라 정량적 평가(LOPA)를 통한 통합적 위험성 검증이 필요할 것으로 생각된다.

2.2 적용 방법

2.2.1 HAZOP (Hazard and Operability Study)

HAZOP은 화학 공정 및 가스 공정에서 널리 활용되는 정성적 위험성평가 기법으로, 공정 흐름에 대한 체계적인 검토를 통해 잠재적 위험요소와 운전상의 문제점을 도출하는 방법이다. 특히, 설계 단계에서 적용하는 방법으로 체계적이고 포괄적인 위험 식별이 가능하기 때문에 현재 대부분의 가스시설에 대해 적용하고 있다. 그러나 정성적인 방법이므로 결과를 정량화 하거나 안전장치 등의 신뢰성에 대한 분석은 어려움이 있다.

2.2.2 LOPA (Layer of Protection Analysis)

LOPA는 HAZOP 이후 단계에서 적용할 수 있는 반정량적(semi-quantitative) 위험성 평가이다. 특정 고위험 시나리오를 대상으로 수행하며, 개시사건을 정하기 위해서는 별도의 정성적 위험성평가를 수행하는 것이 권고된다. 사고가 발생될 수 있는 개시사건(Initiating Event)에 대해 위험을 감소할 수 있는 독립적 방호계층(IPL: Independent Protection Layer)의 신뢰도를 고려하여 최종 사고 발생빈도를 산정하

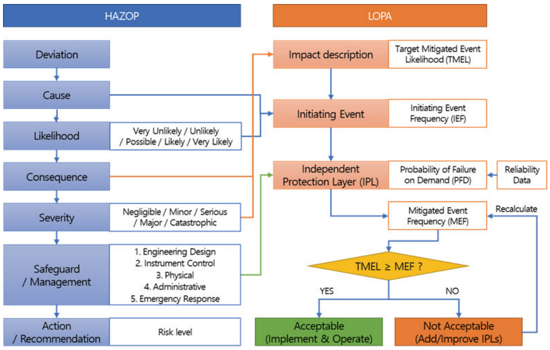

Fig. 2. Workflow linking HAZOP results to LOPA for risk evaluation

여 반정량적으로 분석한다.

위험의 수준을 정량적으로 표현하고 있으나, 빈도 데이터(개시사건 빈도, IPL 신뢰도 등)의 불확실성이 결과에 큰 영향을 줄 수 있는 단점이 있다.

게다가 LOPA는 화학공정을 기반으로 고안된 방법이기에 정립화된 방법론(CCPS: Center for Chemical Process Safety[4]) 및 KOSHA GUIDE P-113-2023)이 가스시설에 대해 적용하기에 불완전한 부분이 많이 있다.

HAZOP과 LOPA의 차이는 Table 1과 같다.

2.2.3 HAZOP-LOPA 연계

HAZOP은 광범위한 위험요소를 빠짐없이 식별할 수 있는 장점이 있으며, LOPA는 그중에서 우선순위가 높은 시나리오를 대상으로 정량적 위험수준을 제시할 수 있다[5].

따라서 본 연구에서는 액화수소 충전소에 대해 HAZOP을 수행하여 도출된 고위험 시나리오를 LOPA로 연계하여 평가함으로써 주요 위험 시나리오별로 정량적 위험수준을 평가하고자 한다.

HAZOP 결과와 LOPA 분석을 순차적・연계적으로 적용하기 위해서 우선 HAZOP 단계에서 발생가능한 이탈상태(Deviation)에 따라 체계적으로 잠재위험요인을 전부 검토하였다. 이 과정에서 잠재적 원인, 결과, 기존 안전대책, 권고사항을 도출하고, 각 시나리오별 위험 정도를 정성적으로 평가하였다. 이를 통해 다수의 위험 시나리오 중 고위험군 시나리오를 선별하였다. 이는 주로 누출 및 화재, 폭발을 야기할 수 있는 시나리오에 해당될 수 있다.

선별된 시나리오는 LOPA 분석 단계에서 개시사건으로써 HAZOP에서의 빈도를 고려하여 개시사건의 발생 빈도(Initiating Event Frequency)를 설정하고, 독립방호계층(IPL)의 신뢰도(Probability of Failure on Demand, PFD)를 반영하여 최종 위험빈도(Final Event Frequency)를 산출하였다. 이 과정에서 각 IPL은 CCPS 및 KOSHA GUIDE 등을 참고하여 적용하였다. 여기서 독립방호계층(IPL)은 HAZOP에서의 모든 Safeguard가 해당되지 않고, 독립성(Independence), 신뢰성(Reliability), 구체적 위험 시나리오에 대한 효과성(Effectiveness), 감지・작동 능력(Functionality), 검증 가능성(Auditability) 등의 조건을 만족하는 방호계층만을 고려해야 한다[6,7].

최종 위험빈도(MEF: Mitigated Event Frequency)

Table 1. Differences between HAZOP and LOPA

Category	HAZOP (Hazard and Operability Study)	LOPA (Layer of Protection Analysis)
Evaluation Level	Qualitative	Semi-quantitative
Main purpose	Identify hazards & effect of operability	Quantify risk levels of scenarios
Scope	All processes	Selected critical scenarios
Purpose	A comprehensive review of potential risks.	Evaluate acceptability against quantitative risk criteria.
Output	List of hazards, recommendations	Frequency, probability, IPL adequacy
Application	Basic design and detailed design	After HAZOP and decision for safety layers
Limitations:	Lack of quantitative criteria, Unable to conduct reliability analysis	Insufficient reliability data, High difficulty of analysis

는 각 시나리오의 심각성에 따라 허용 가능한 사고 발생빈도(TMEL: Target Mitigated Event Likelihood)에 합당한지 확인하여 위험이 허용 기준을 초과하는 경우 추가적인 IPL 도입, 설비 개선, 운영 절차 강화 등의 대책을 마련할 수 있다.

다음 Fig. 2는 위험성평가를 위한 HAZOP 결과와 LOPA 적용에 대한 흐름도이다.

3. 위험성평가 수행 및 결과

본 연구의 연구 방법은 크게 두 단계로 진행하였다. 첫 번째 단계는 정성적 기법인 HAZOP을 통해 액화수소 충전소의 공정에서 발생 가능한 잠재 위험을 식별하고, HAZOP 결과 중 액화수소의 누출 및 화재 · 폭발 등이 발생할 수 있는 높은 위험수준의 사고 시나리오에 대해 LOPA (Layer of Protection Analysis)를 통해 반 정량적 위험성 평가를 수행하는 것이다. 이때, LOPA는 KOSHA GUIDE의 방법론을 참고하였으며, CCPS 등에서 제시[8] 한 방호계층을 적용하였다. 또한 액화수소 충전소 시설의 특성을 고려하여 기존 방법론에 제시되지 않은 개시사건 및 방호계층에 대해 적용하여 보았다.

Table 2. Excerpt from HAZOP Worksheet

Node	Deviation	Cause	Consequence	Safeguard/Management	Action/ Recommendation
Node 1 Liquefied H_2 Storage Tank	HIGH FLOW	Excessive opening of Tank Truck Pressure Build-up Unit line	Increased unloading speed and tank truck pressure rise	Operator standby and training, tank truck Pressure Transmitter	—
		Over-supply due to instrument error	Overflow and H2 loss through vent line	TRY COCK, Operator check, Auto shut valve close logic when vent line temperature drops, Temperature Transmitter, Level Indicating Transmitter (L, LL alarm)	Confirm unloading valve before operation
	HIGH PRESS.	Vacuum break in double pipe and annular space	Temperature rise	TCE periodic vacuum check, Operator patrol inspection	Add Pressure Safety Valve
Node 2 Liquefied H_2 Pump	NO/LOW FLOW	Pipe rupture between feed pump and cryopump	Possible liquid hydrogen leak accident	Operator standby, Temperature Transmitter, Pressure Transmitter	—
	HIGH FLOW	Feed pump overrun	Excessive Boil-Off Gas (BOG) Generation due to Temperature Rise	Pressure Safety Valve, BOG recovery, Feed pump via VFD panel	—
Node 3 Vaporizer	HIGH FLOW	LN_2 pump overrun	Temperature rise, H2 loss	Pressure Transmitter	—
		High-pressure pump overrun	Equipment damage, Pressure rise	Pressure Transmitter	O&M manual
Node 4 Dispenser	HIGH FLOW	Over-control of flow control valve	Storage tank pressure rise	Temperature Transmitter	—
	SAFETY	Hose pull-away incident during refueling (drive-off accident)	Dispenser damage	Break-away	Review break-away installation direction

3.1 HAZOP 분석

HAZOP 분석은 액화수소 충전소의 주요 공정 노드(저장탱크, 이송 배관, 기화기, 디스펜서 등)에 대해 체계적으로 수행하였다. 각 노드별로 압력, 유량, 온도 등의 공정변수에 대해 No, More, Less, Reverse와 같은 표준 가이드워드를 적용하여 잠재적 위험요인를 도출하였다. Table 2는 분석된 HAZOP의 일부를 요약한 내용이다.

평가대상에 대하여 총 107개의 유해·위험요인 시나리오가 파악되었으며, 각 위험등급별 분포는 다음과 같으며, 도출된 개선권고사항은 총 40개 사항이 도출되었다.

이 중 수소충전소에서 발생할 수 있는 심각한 누출 및 화재, 폭발을 야기시킬 수 있는 시나리오를 다음 단계인 LOPA 분석 대상으로 선정하였다.

3.2 LOPA 분석

LOPA 단계에서는 HAZOP에서 선정된 고위험 시나리오를 반 정량적으로 평가하였으며, 국내 KOSHA GUIDE를 참고하여 분석하였다.

분석한 시나리오는 주요 8가지 영향에 대해 분석하였으며, 총 19가지 시나리오에 대한 방호계층을 고려하였다.

Table 3은 분석한 주요 8가지 영향에 대한 시나리오이다. 여기서, 심각도의 수준은 HAZOP에서 결정한 수준을 적용하였다.

각 시나리오에 대해 발생빈도(initiating event frequency)를 문헌자료, 산업 DB, 과거 사고 사례 등을 기반으로 산정하였으며, 평가팀의 의견을 수렴하여 결정하였다. 또한, 독립적 방호계층(IPL)에 대해서는 KOSHA GUIDE를 참고하여 공정설계, 제어시스템, 경보 등을 고려하고 추가적인 완화대책 및 완화대책 등을 검토하였고, 각 IPL의 요구 시 고장확률(PFD, Probability of Failure on Demand)을 추정하였다. 발생빈도와 방호계층의 신뢰도를 결합하여 잔여 위험을 계산하였으며, 심각도 수준에서 요구되어지는 관리 수준을 만족할 수 있는지를 분석하였다[9).

Table 4는 LOPA 수행 sheet의 일부 예시이다.

Table 3. Key Scenarios from LOPA Linked with HAZOP

Hazard Description	Cause (Initiating Event)	Severity Level (TMEL)
1. Explosion of a LH2 tank	Tank Internal Pressure Increase	Critical (1.0E-05)
	Vacuum or Insulation Failure	
	External Fires such as Forest Fires	
	Overfilling of LH2	
	External impact such as vehicle collision	
	lightning strike	
2. Explosion of a pressure vessel	vessel Internal Pressure Increase	Critical (1.0E-05)
	External Fires such as Forest Fires	
	Exceeding the Design Life of Pressure Vessel (20 years / 340,000 cycles)	
	Design or Assembly Defect (Omission of Pressure Vessel Connection)	
	Pressure Vessel Damage from Cold Capture System Pump Overrun	
3. Leak from a pressure vessel	Design or Assembly Defect (Omission of Pressure Vessel Connection)	Critical (1.0E-05)
4. Leak from LH_2 Pump	Leak from Damaged High-Pressure Pump Seal	Severe (1.0E-04)
5. Leak from Pipe Rupture	Pump Overpressure due to Discharge Blockage	Severe (1.0E-04)
6. Leak due to Insulation Failure of LH2 Piping	Vacuum or Insulation Failure of LH2 Piping due to External Impact	Critical (1.0E-05)
7. Leak during Tank Truck Unloading	Hose disconnection during unloading	Severe (1.0E-04)
	Hose pull-away incident during refueling (drive-off accident)	
	Purge with Unconnected Coupler (Operator Error)	
8. Vehicle Vessel Damage due to High Temperature	Overfilling due to Dispenser FCV Malfunction (BPCS Defect)	Severe (1.0E-04)

3.3 위험성평가 수행 결과

LOPA 결과, 대부분의 고위험 시나리오는 독립적 방호계층의 적절한 설계 · 운영을 통해 허용위험 기준 이하인 것을 확인하였으나, 일부 시나리오의 경우 추가적 대책이 필요한 것으로 나타났다.

저장탱크 초과압 시나리오는 진공 파괴로 인한 압력 상승 가능성에 대해 HAZOP 단계에서 검토하였으나, LOPA를 통해 초기 사고빈도를 1.0E-2/yr로 가정하고 PSV 및 ESD 시스템을 독립 방호계층(IPL)으

Table 4. Excerpt from LOPA Worksheet

Consequence /Severity (TMEL)	Initiating Event /Likelihood (IEF)	Independent Protection Layer (IPL)			Mitigated Event Frequency (MEF)	Remarks (Improvement Measures)
		General Process Design, Control System, Alarm, etc.	Additional Mitigation, Access Restriction etc.	Additional Mitigation (Dike, Pressure Relief, etc.)		
Explosion of a LH2 tank/Critical (1.0E-05)	Tank Internal Pressure Increase/Possible (1.0E-02)	Auto emergency vent valve open logic (1.0E-01)	Rupture Disc (1.0E-01)	Pressure Safety Valve (1.0E-02)	1.0E-06	-
	External Fires such as Forest Fires/Possible (1.0E-02)	Fire detector (1.0E-01)	-	Pressure Safety Valve, Rupture Disc (1.0E-02) Blast Walls (1.0E-01)	1.0E-06	-
	Overfilling of LH2/Likely (1.0E-01)	supply ESD (1.0E-01) Alarm (1.0E-01)	-	Try Cock, Operator Monitoring (1.0E-01)	1.0E-04	Install Additional LT (2 out of 3)
Leak from LH_2 Pump/Severe (1.0E-04)	Leak from Damaged High-Pressure Pump Seal/Possible (1.0E-02)	Explosion-proof design (1.0E-01) Gas detector > ESD (1.0E-01)	-	-	1.0E-04	-
Leak due to Insulation Failure of LH2 Piping/Critical (1.0E-05)	Vacuum or Insulation Failure of LH2 Piping due to External Impact/Unlikely (1.0E-03)	Gas detector > ESD (1.0E-01)	Periodic Vacuum Check, Access Restriction (1.0E-01)	Blast Walls (1.0E-01)	1.0E-06	-
Leak during Tank Truck Unloading/Severe (1.0E-04)	Hose disconnection during unloading/ Possible (1.0E-02)	Panel monitoring > ESD (1.0E-01) Gas detector > AOV shutdown (1.0E-01)	-	-	1.0E-04	Check the interlock with Tank truck ESD Function
	Hose pull-away incident during refueling (drive-off accident) /Possible (1.0E-02)	Gas detector > AOV shutdown (1.0E-01)	Wheel Chock, Engine stop (1.0E-01)	-	1.0E-04	-

로 반영한 결과, MEF는 1.0E-6/yr로 감소하였으며, 허용 가능한 위험 수준을 초과하지 않아 추가적인 보완조치가 필요하지 않은 것으로 판단되었다.

반면, LH2 하역 과정에서의 과충전 시나리오는 액화수소의 특성상 계측기에 어려움이 많아 과공급 가능성이 상당히 높다고 판단하여 초기 사고빈도를 1.0E-1/yr로 산정하였다. LIT 알람과 운전원 대응을 IPL로 적용하였음에도 불구하고 MEF는 1.0E-4/yr로 계산되어 TMEL 허용 기준(1E-5/yr)을 초과하였다. 따라서 해당 시나리오에서는 추가적인 방호계층이 요구되며, 이에 1.0E-1/yr 이상의 신뢰성을 갖는 자동 차단밸브 로직 또는 LT 추가 설치로 교차 검증과 같은 추가적인 IPL 도입이 요구된다.

또한, LH2 하역 과정 중 호스 체결 불량 등으로 호스 이탈 시에 대해서는 분석 결과 MEF 수준이 TMEL 수준에 일치하여 별도의 추가적 대책이 필요하지 않는 것으로 나타났으나, 갑작스런 호스 이탈이 발생할 경우 탱크로리 측에서도 공급을 차단할 수 있는 효과적 방법(interlock 등)이 마련되어 있는지 확인하여 안전을 확보하는 것이 좋을 것으로 판단하였다.

전체 분석 결과, 대부분의 고위험 시나리오는 독립적 방호계층의 적절한 설계·운영을 통해 허용 위험 기준(TMEL) 이하로 보여진다. 다만, LOPA 역시 평가팀의 주관적 판단이 포함되는 방법이며 액화수소 충전소에 적용하기에 몇 가지 한계점이 있는 것을 확인하였다.

3.4 HAZOP과 LOPA 연계의 문제점

HAZOP과 LOPA는 상호 보완적으로 적용될 수 있으나, 액화수소 충전소와 같이 단일 가스를 사용하는 공정이면서 기존 화학물질 공정에서 사용되는 방호계층과 다른 공정에 LOPA를 적용할 경우 몇 가지 한계점과 문제점이 나타난다.

첫째, 데이터 불확실성의 문제이다. LOPA 분석에서 요구되는 개시사건 빈도 및 독립적 방호계층(IPL)의 신뢰도 값은 주로 해외 데이터베이스나 문헌에 의존하는 경우가 많다. 국내 액화수소 충전소의 실제 운전 경험이나 사고 데이터는 부족하기 때문에, 적용된 수치의 불확실성이 최종 위험빈도에 크게 영향을 미칠 수 있다.

둘째, 분석 범위의 불일치이다. HAZOP은 공정 전반을 대상으로 다수의 위험 시나리오를 도출하지만, LOPA는 이 중 일부 고위험 시나리오만 선택하여 정량적으로 평가한다. 이로 인해 위험 관리의 “선택 편향(selection bias)”이 발생할 수 있으며, 저위험으로 분류된 시나리오가 실제 운전 환경에서 사고로 이어질 가능성을 완전히 배제하기 어렵다.

셋째, 독립적 방호계층 검증의 어려움이다. LOPA에서 가정하는 IPL(예: 압력방출밸브, 가스누출검지기, 긴급차단시스템)은 독립적이고 높은 신뢰도를 가진 것으로 가정되지만, 실제 운전 환경에서는 상호의존성이 존재할 수 있다. 예를 들어 전력 공급 장애나 제어시스템 오류는 복수의 IPL에 동시에 영향을 미칠 수 있으며, 이는 LOPA 결과를 과도하게 낙관적으로 만들 수 있다.

넷째, 정성적–정량적 결과의 연계성 부족이다. HAZOP의 권고사항은 운전자의 경험이나 현장 관찰에 기반하는 경우가 많아 정성적 판단에 치우칠 수 있고, 반면 LOPA는 수치 기반으로 결과를 제시하기 때문에 두 결과를 일관성 있게 통합하기가 쉽지 않다. 이러한 차이는 의사결정 과정에서 혼선을 유발할 수 있다.

마지막으로, 법·제도적 반영의 한계가 있다. 국내에서는 「수소경제법」 및 고압가스안전관리법, KGS CODE 등에서 위험성 평가의 수행을 요구하고 있으나, HAZOP과 LOPA 연계 적용을 구체적으로 규정하지 않고 있다. 따라서 사업자·설계자에 따라 방법론 적용 수준이나 결과 해석 방식에 차이가 발생할 수 있으며, 이는 안전성 평가의 표준화 부족으로 이어질 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 액화수소 충전소를 대상으로 HAZOP과 LOPA 기법을 적용하여 위험성을 평가하였다. 그

결과, 일부 시나리오는 기존 안전시스템과 독립방호계층(IPL)에 의해 허용 가능한 수준으로 위험이 저감되었으나, 과충전, 배관 누출, BOG 회수 실패와 같은 경우에는 허용 기준을 초과하는 잔여위험이 확인되었다. 이에 따라 자동 차단밸브 로직, 이중 차단 밸브, BOG 시스템 이중화 등 추가적인 안전대책이 요구됨을 알 수 있었다.

HAZOP은 잠재적 위험을 폭넓게 식별하는 데 효과적이며, LOPA는 이를 정량적으로 평가하여 허용 가능 여부와 추가 방호대책 필요성을 명확히 제시한다는 점에서 상호 보완적임을 확인하였다. 다만, 액화수소 충전소와 같은 수소 인프라에 LOPA를 적용할 경우 신뢰성 데이터 부족과 불확실성, 독립방호계층 검증의 한계가 여전히 존재함을 확인하였다.

따라서 향후에는 보다 정밀한 데이터 확보와 검증 체계 마련이 필요하며, 본 연구 결과는 액화수소 충전소의 위험 기반 설계 및 운영 단계에서 안전관리 수준을 향상시키기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원 액화수소충전핵심부품및시설안전기술개발사업(RS-2022-KP002758)에 의하여 연구되었음에 감사드립니다.

References

1. C. H. KIM, G.W. KIM, and H. S. KIM, “Analysis of domestic and foreign policy and technology trends for hydrogen industry development”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 2, 2023, pp. 122-131, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.2.122.
2. Y. J. Heo, “Status of hydrogen deployment and policy trends”, World Energy Market Insight, Korea Energy Economics Institute, Vol. 24-22, pp. 27-39, 2024, Retrieved from https://www.keei.re.kr/board.es?mid=a10103020000&bid=0014&act=view&dist_no=123884&act=view&dist_no=123884.
3. N. P. Brandon and Z. Kurban, “Clean energy and the hydrogen economy”, Philosophical Transactions of the Royal Society A, Vol. 375, No. 2098, 2017, pp. 20160400, doi: https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0400.
4. Center for Chemical Process Safety (CCPS), Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment, American Institute of Chemical Engineers, 2001, doi: https://doi.org/10.1002/9780470935590.
5. Y. S. Byun, “A study on the improvement of safety instrumented function of hydrogen refueling station considering individual risk”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 3, 2023, pp. 297-306, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.3.297.
6. J. H. Park, D. H. Park, C. K. Chae, J. L. Heo, and K. H. Park, “Improvement of Hydrogen Fueling Protocol by HAZOP and LOPA”, Korean Journal of Hazardous Materials, Vol. 10, No. 1, 2022, pp. 82-90, doi: 10.31333/kihm.2022.10.1.82.
7. I. J. Lee and R. H. Kim, “Safety enhancement of LPG terminal by LOPA & SIF method”, Korean Chemical Engineering Research, Vol. 53, No. 4, 2015, pp. 431-439, doi: https://doi.org/10.9713/kcer.2015.53.4.431.
8. Center for Chemical Process Safety (CCPS), “Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis”, CCPS, 2015, doi: https://doi.org/10.1002/9781118948743.
9. C. H. Lee, K. W. Rhie, D. H. Seo, D. M. Lee, and T. H. Kim, “Methodology for applying LOPA risk assessment to liquefied hydrogen stations”, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 28, No. 3, 2024, pp. 87-94, doi: https://doi.org/10.7842/kigas.2024.28.3.87.