Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 724~729
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.724

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

대용량 액화수소 하역 충전시설 방호계층분석(LOPA) 적용 분석

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

[1]호서대학교 안전공학과, [2]호서대학교 안전행정공학과

A Study on the Analysis of Layer of Protection Analysis (LOPA) to Large-Capacity Liquefied Hydrogen Unloading and Refueling Facilities

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

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

†Corresponding author : 080201@vision.hoseo.edu

Received 11 November, 2025
Revised 17 November, 2025
Accepted 24 November, 2025

Abstract >> With the increase in greenhouse gas emissions since the Industrial Revolution, climate change has emerged as a major global concern, driving growing interest in renewable energy sources. Among these, hydrogen has gained significant attention, with rising demand across various sectors such as automobiles and ships worldwide. Ensuring a stable hydrogen supply is crucial for the transition to a hydrogen based society. While gaseous hydrogen is currently commercialized, the increasing demand for hydrogen energy makes the adoption of liquefied hydrogen essential. However, due to the cryogenic temperatures and large-scale storage systems involved, any leakage of liquefied hydrogen could lead to severe accidents. Therefore, this study aims to assess the safety of a large-capacity liquefied hydrogen unloading and refueling facility using Layer of Protection Analysis (LOPA) and to examine the applicability of the LOPA methodology to such systems.

Key words : LOPA(방호계층분석), HAZOP(위험과 운전분석), Risk assessment(위험성평가), Large-capacity liquefied hydrogen unloading and refueling facility(대용량 액화수소 하역 충전시설)

1. 서 론

산업혁명 이후 증가한 온실가스로 인해 기후변화가 발생함에 따라 탄소중립을 위한 노력이 지속되고 있다. 이에 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있으며, 그중 고에너지 밀도와 효율성, 환경 친화적 측면에서 수소가 각광받고 있다. 수소는 현재 자동차, 선박 등 여러 분야에 걸쳐 연구가 진행되며 국내외 많은 나라에서의 수요가 증가하고 있다[1-3].

이처럼 수소사회로 진입하기 위해선 수소의 안정

적 공급이 중요하다. 현재 기체수소 운송 및 충전은 상용화되어 운영되고 있으나, 차후 수소에너지 수요

Table 3. Risk matrix

Frequency \ Severity	5	4	3	2	1
5	5	5	4	3	3
4	5	4	3	3	2
3	4	3	3	2	2
2	3	3	2	2	1
1	3	2	2	1	1

가 증가한다면 액화수소 도입이 필수적일 것이다. 액화수소는 기체수소 대비 1/800배의 부피를 가져 대용량 저장이 가능하다는 이점이 있다. 또한 높은 에너지 밀도와 안정성을 가지기 때문에 액화수소에 대한 연구는 활발히 진행되고 있다[4]. 하지만 액화수소는 극저온의 수소와 대용량 저장설비를 사용하고 있기 때문에 누출 시 사고의 규모가 매우 클 것으로 예상되므로 안전성을 확보하는 것이 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 액화수소 도입에 따라 설치될 것으로 예상되는 대용량 액화수소 하역 및 충전 시설을 대상으로 방호계층분석을 실시하여 해당 시스템의 안전성을 평가하고 LOPA 방법론의 적용성을 검토하고자 한다.

2. 위험성평가

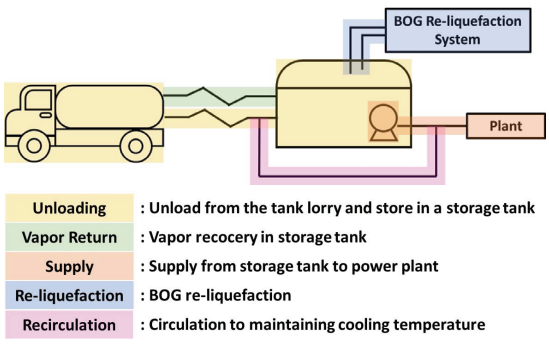

Fig. 1. PFD of Large-scale liquid hydrogen unloading and charging facility

2.1 대용량 액화수소 하역 충전시설

본 연구를 위해 가정한 대상은 탱크로리에서 액화수소를 하역하여 저장탱크에 저장하는 공정으로, 시스템의 공정흐름도(process flow diagram, PFD)는 Fig. 1과 같다.

첫 번째 하역공정은 탱크로리에서 액화수소를 하역하여 저장탱크에 저장하는 공정이다. 두 번째 Vapor 리턴공정은 저장탱크 내 Vapor를 회수하는 공정이다. 세 번째 공급공정은 저장탱크에서 발전소로 공급하는 공정이다. 네 번째 재액화 공정은 발생된 BOG (Boil-off Gas)를 재액화하는 공정이다. 다섯 번째 재순환 공정은 냉각 온도 유지를 위한 순환 공정이다.

2.2 HAZOP

HAZOP (Hazard and operability)은 공정상 존재하는 위험 요인과 공정의 효율을 떨어뜨릴 수 있는 운전상의 문제점을 찾아내어 그 원인을 제거하고자 하는 정성적 위험성 평가 방법으로 공정에 초점을 맞춰 그 자체에서 발생 가능한 위험 요인을 발견할

Table 1. HAZOP frequency

No.	Frequency
5	More than one occur on operating time
4	Not more than one occur on operating time
3	Sometime can occur on operating time
2	Probability of hazard exists on operating time
1	Very rarely occur on operating time

Table 2. HAZOP severity

No.	Severity
5	Fatality, more than two men injured
4	More than one man injured
3	More than two men hurt
2	Not more than one man hurt
1	Safely designed process

수 있는 위험성 평가 방법이다[5].

HAZOP은 평가 대상 공정을 여러 개의 검토 구간으로 구분하여 평가를 진행하였다. 각 시나리오의 빈도(Table 1) 및 강도(Table 2) 기준은 평가 참여자들의 논의를 통해 사용하였다. 빈도와 강도를 조합한 Risk matrix는 다음 Table 3과 같다.

HAZOP 수행을 통해 총 128개의 유해위험시나리오를 파악했으며 68개의 개선권고사항을 도출했다. HAZOP에서 도출된 주요 위험 시나리오는 Table 4와 같다.

첫 번째는 하역공정에서 유량이 공정조건보다 적거나 흐르지 않는 경우로 탱크로리 하역라인의 체결이 불량하거나, 연결부 leak가 발생하면 수소 대기누출이 가능하다. 이에 대한 현재안전조치는 가스감지기, 긴급차단장치 등이 있으나, 이 시나리오의 강도는 5등급으로 예상된다. 이에 Leak test 계획 수립, 비상대응매뉴얼 수립, 작업 시 개인보호장구 착용 등과 함께 LOPA에서 시나리오를 추가 검토하도록 하였다.

두 번째는 하역 종료 후 일정 구간에서 액봉현상에 의한 압력 팽창으로 과압 발생 시 배관 및 밸브가

Table 4. Risk scenarios of ammonia ship system

Deviation	Cause	Consequence	Safety/ management	Risk level			Action/ recommendation
				Frequency	Severity	Level	
No/low flow	- Poor connection of tank lorry unloading line - Leakage at the unloading line between the piping and the tank lorry	- Hydrogen leak into the atmosphere (fire, explosion, etc.)	- Visual cross-check by tank lorry side - Gas detector - Emergency shut-off device - Safety officer present	2	5	3	- Establish a leak test plan. - Establish an emergency response manual (including safety management regulations). - Confirm tank lorry monitoring measures. - Personal protective equipment - Need to discuss communication with tank lorry. - Additional review of LOPA.
High Press.	- Pressure expansion due to liquid seal phenomenon in the section after unloading	- Damage to pipes and valves	- TSV - Pressure gauge H alarm - Liquid drain	1	5	2	- Additional review of LOPA.
High Level	- Measurement errors and operator errors - Pump overruns	- Overpressure - Damage to tank top roof	- Level gauge - Level gauge H alarm - Unloading after checking the preload capacity - Automatic blocking interlock on the unloading side	1	4	2	- Establish an operating manual specifying valve operation, including sequential operation. - Confirm tank lorry's safety measures when interlocks are activated. - Additional review of LOPA.
High Temp	- Insufficient Cooldown	- Significant generation of BOG	- TSV - BOG reliquefaction facility - PSV	1	2	1	- Establish work procedures to enable supply operations after checking the temperature of pipes, etc. at the time of supply.

손상될 수 있다. 이에 대해 TSV (temperature safety valve), 압력계 high 알람, 액 드레인(Drain Line) 등의 현재안전조치가 마련되어 있지만, 강도가 5등급으로 예상되므로 LOPA를 추가 검토하도록 하였다.

세 번째는 측정 오류 및 운전원의 조작 실수 또는 펌프 과작동으로 인해 액화수소의 수위가 과도하게 상승 시 과압이 형성되거나 탱크 상부 루프가 손상될 가능성이 있다. 이에 수위계, 수위계 high 알람, 하역 측 자동차단 인터록 등이 현재안전조치로 마련되어 있으나, 구체적 밸브 조작 등을 명시한 운전매뉴얼 수립, 인터록 작동 시 선박 측 안전대응방안 확인 등을 개선권고 하였으며 해당 시나리오의 강도는 4등급이므로 LOPA를 추가 검토하도록 하였다.

네 번째는 공급공정에서 Cooldown 공정이 불충분하게 이뤄지는 경우 BOG가 대량 발생하여 고온이 발생할 수 있다. 이에 TSV, BOG 재액화 설비, PSV (Pressure safety valve) 등이 현재안전조치로 마련되어 있지만, 공급 시 배관 등 온도 확인 후 공급작업을 실시할 수 있도록 작업절차를 수립하도록 권고하였다.

2.3 LOPA

LOPA (Layer of protection analysis)는 원하지 않는 사고의 빈도나 강도를 감소시키는 독립방호계층의 효과성을 평가하는 위험성 평가 방법으로 해당 설비의 사고 시나리오를 대상으로 개시사건 및 빈도를 확인하여 각 개시사건에 적합한 독립방호계층의 사고 완화율을 고려한 위험도를 평가한다[6].

LOPA는 HAZOP에서 도출된 유해위험시나리오 중 수소 누출 및 탱크파손 등 중대시나리오 7개를 대상으로 실시하였다. LOPA 수행에 사용하기 위해 평가자들이 정한 강도 기준과 TMEL (Target Mitigated Event Likelihood)은 다음 Table 5와 같으며, 본 평가에 사용한 개시사건과 그에 대해 CCPS (Center for Chemical Process Safety)에서 제시한 IEF (Initiating Events Frequency)는 Table 6과 같다.

LOPA를 수행한 중대 위험 시나리오 7개는 다음 Table 7과 같다. 초기사고원인 및 사고빈도는 모두 CCPS에서 제시하는 빈도를 사용하였으며 센서 고장, 인적오류, 펌프 고장 등이다.

Table 5. LOPA severity

No.	Severity	TMEL
5	Fatality, more than two men injured	1.00E-06
4	More than one man injured	1.00E-04
3	More than two men hurt	1.00E-03
2	Not more than one man hurt	1.00E-02
1	Safely designed process	1.00E-01

Table 6. Types of initiating events

No.	Initiating events	IEF (per year)
1	Human error during routine tasks performed at least once a week	1
2	Human error during tasks performed between once a month and once a week	1.00E-01
3	Human error during tasks performed less than once a month	1.00E-02
4	Failure of pump, compressor, fan or blower	1.00E-01
5	Hose failures, leaks and ruptures	Leak: 1.00E-01 Rupture: 1.00E-02
6	Atmospheric tank: catastrophic failure	1.00E-05
7	Pressure Vessel: Catastrophic Failure	1.00E-05
8	Pressure regulator failure	1.00E-01

첫 번째는 하역호스의 체결 불량으로 액화수소가 대량 누출되어 화재 및 폭발이 발생하는 경우로 강도 5, 치명적, 강도수준 1.00E-06이다. 인적오류로 인해 사고 발생 시 이에 대한 방호계층은 체결 후 leak test, 접근 제한, 개인보호장구 등으로 최종 사고발생빈도는 1.00E-06으로 평가되었다.

두 번째는 액화수소 탱크의 수위 센싱 오류 및 작업자의 확인 실패 시 액화수소 탱크 overflow로 인해 누출, 화재 및 폭발이 발생하는 경우로 강도 5, 치명적, 강도수준 1.00E-06이다. 센싱 오류로 인해 사고 발생 시 이에 대한 방호계층은 수위계 오류 시 알람, PSV, 탱크 외조 등으로 최종 사고 발생빈도는 1.00E-06으로

Table 7. Critical Scenarios of LOPA

Description	Initial cause	Management Level	Mitigated incident frequency	Additional required criteria
Fatal accident caused by a large leak at the unloading line	Poor connection	1.00E-06	1.00E-06	-
Fatal accident due to leak caused by tank lorry overflow	Level sensing error	1.00E-06	1.00E-06	-
	Level check failed (human error)			
Overpressure inside the pipes and tanks due to BOG generation of stagnant liquefied hydrogen in the pipes	Cooling failure due to recirculation line failure	1.00E-06	1.00E-05	1.00E-01
Overpressure and damage inside the tank	Tank lining damage	1.00E-06	1.00E-08	-
Hydrogen gas leak due to negative pressure inside the tank and damage to the tank roof	Negative pressure formation due to non-supply of BOG gas during reloading	1.00E-06	1.00E-05	1.00E-01
Damage to piping icing and breakage due to inflow of liquefied hydrogen into the gas line	Liquid hydrogen overflow due to overcharging of liquid hydrogen	1.00E-04	1.00E-04	-
Small atmospheric leak of hydrogen (fire and explosion)	Flange joint leak	1.00E-04	1.00E-04	-

평가되었다.

세 번째는 재순환라인 실패로 냉각 실패 시 배관 내 액화수소가 정체되어 BOG가 발생, 배관 및 탱크 내부 과압이 발생하는 경우로 강도 5, 치명적, 강도수준 1.00E-06이다. 펌프 고장으로 인해 사고 발생 시 이에 대한 방호계층은 펌프 2중화, 인터록, TSV 등으로 최종 사고 발생빈도는 1.00E-05로 평가되어 SIL (Safety integrity level) 1등급의 SIS (Safety instrumented system)가 요구된다.

네 번째는 탱크 내조 파손으로 탱크 내부 과압형성 및 파손되는 경우로 강도 5, 치명적, 강도수준 1.00E-06이다. 탱크 파손으로 인해 사고 발생 시 방호계층은 PSV, 탱크 외조 등으로 최종 사고 발생빈도는 1.00E-08로 평가되었다.

다섯 번째는 하역 시 BOG 미공급으로 인해 탱크 내부에 부압이 형성 시 탱크 루프가 파손되어 수소가스가 누출되는 경우로 강도 5, 치명적, 강도수준 1.00E-06이다. BOG 공급 실패로 인해 사고 발생 시 방호계층은 압력계 알람, 인터록, PSV 등으로 최종 사고 발생빈도는 1.00E-05로 평가되어 SIL 1등급의 SIS가 요구되며 추가로 SIS loop 구성을 검토하도록 권고하였다.

여섯 번째는 액화수소 과다충전에 의한 액화수소 넘침에 의해 기체 라인으로 액화수소가 유입되어 배관 아이싱 손상 및 파손되는 경우로 강도 4, 중대함, 강도수준 1.00E-04이다. 유량조절 실패로 인해 사고 발생 시 방호계층은 배관 안전율, 수위계 인터록 등으로 최종 사고 발생빈도는 1.00E-04로 평가되었으며, 추후 자동화 로직 설계를 검토하도록 하였다.

일곱 번째는 플랜지 이음부 leak로 수소가 소량 대기 누출되는 경우로 강도 4, 중대함, 강도수준 1.00E-04이다. 플랜지 연결부 누출로 인해 사고 발생 시 방호계층은 기밀테스트 등으로 최종 사고 발생빈도는 1.00E-04로 평가되었다.

3. 결 과

HAZOP에서 파악된 128개의 유해위험시나리오 중 중대시나리오 7개를 대상으로 LOPA를 수행한 결과 시나리오 5개의 강도 수준은 1.00E-06, 2개는 1.00E-04이었다. 5개의 시나리오는 목표 빈도값을 충족하였으나, 2개는 충족하지 못했다. 미충족된 시나리오 2개는 모두 필요수준이 1.00E-01로, SIL 1등급의 SIS가 요구된다.

4. 결 론

본 연구에서는 대용량 액화수소 하역 충전시설의 주요 위험요소를 확인하고 방호계층을 평가하기 위해 위험성평가를 실시하였다. HAZOP을 통해 액화수소 시스템 특성이 반영된 유해위험시나리오를 도출하고, LOPA를 수행하여 대용량 액화수소 하역 충전시설의 독립방호계층을 확인하고 현재 목표빈도를 만족할 수 있는지 평가하였다. 그 결과 미충족 시나리오 2개에 대해 SIL 1등급의 SIS를 통해 설비의 안전성을 확보할 필요가 있는 것으로 도출되었다. 이러한 점은 HAZOP으로 확인이 어렵기 때문에 LOPA 수행을 통한 검토가 유효함을 확인하였고, 사고 빈도를 감소시키는 효과를 기대해 볼 수 있을 것이다.

본 연구를 통해 대용량 액화수소 하역 충전시설의 안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료되며, 액화수소 취급시설에 대한 보다 높은 수준의 안전성확보를 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원 액화수소 충전 핵심부품 및 시설 안전 기술개발 사업(RS-2022-KP002758)에 의하여 연구되었음에 감사드립니다.

References

1. C. Kim, G. Kim, and H. 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. 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.
3. M. Conte, A. Iacobazzi, M. Ronchetti, and R. Vellone, “Hydrogen economy for a sustainable development: state of the art and tehchnological perspectives”, Journal of Power Sources, Vol. 100, No. 1-2, 2001, pp. 171-187, doi: https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00893-X.
4. Y. M. Seo, H. W. Noh, D. W. Ha, T. H. Koo, and R. K. Ko, “Numerical Study on the Effects of Gravity Direction and Hydrogen Filling Rate on BOG in the Liquefied Hydrogen Storage Tank”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 4, 2023, pp. 342-349, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.4.342.
5. F. Crawley and B. Tyler, “HAZOP: guide to best practice”, 3rd ed, Elsevier, Netherlands, 2015, doi: https://doi.org/10.1016/C2014-0-04859-9.
6. Center for Chemical Process Safety (CCPS), “Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis”, Wiley, USA, 2015, doi: https://doi.org/10.1002/9781118948743.