Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 37, No. 5, 2026, pp. 636~644
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2026.37.5.636

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

HAZOP 기법 기반의 과냉각 액화수소 충전소 안전설계 방안에 관한 연구

이학태[1,2] · 이동민[2,3] · 심제우[1] · 정해관[4] · 김완진[2] · 이광원[3] · 이철진[1†]

[1]중앙대학교 일반대학원 화학공학과, [2]㈜와이엘에너지기술, [3]호서대학교 일반대학원 안전공학과, [4]한국가스안전공사

A HAZOP Study on the Safety Design of a Subcooled Liquid Hydrogen Refueling Station

HAK-TAE LEE[1,2], DONG-MIN LEE[2,3], JE-WOO SHIM[1], HAE-GWAN JEONG[4], WAN-JIN KIM[2], GWANG-WON RHIE[3], CHUL-JIN LEE[1†]

[1]Department of Chemical Engineering, Graduate School of Chung-ang University, 84 Heuksuk-ro Dongjak-gu, Seoul 06974, Korea
[2]YL Energy Co. Ltd., The 1st Tower Floor 8 Room 1, 10, Dongtan-daero 21-gil, Dongtan-gu, Hwaseong 18471, Korea
[3]Department of Safety Engineering, Hoseo University Graduate School, 20 Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan 31499, Korea
[4]Korea Gas Safety Corporation, 1467-51, Songhakjucheon-ro, Jucheon-myeon, Yeongwol-gun, Gangwon-do, Korea

†Corresponding author : cjlee@cau.ac.kr

Received 8 September, 2026
Revised 29 September, 2026
Accepted 30 September, 2026

© The Korean Hydrogen and New Energy Society

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits non-commercial use, sharing, adaptation, distribution, and reproduction in any medium or format, provided the original work is properly cited.

Abstract >> Hydrogen refueling stations in South Korea began with gaseous hydrogen and expanded to liquefied hydrogen from 2024, where hydrogen is stored as a liquid but pressurized and vaporized before being dispensed in gaseous hydrogen. As heavy-duty vehicles drive demand for large-capacity refueling, a liquid-to-liquid (L2L) method that dispenses hydrogen directly into the onboard tank without vaporization is under demonstration. The hydrogen refueled is subcooled liquid hydrogen (sLH_2), pressurized to remain a single-phase liquid during transfer and dispensing. Because the technology is pre-commercial, no safety code is established yet. This study conceptually designed an sLH_2 refueling station and conducted a hazard and operability study (HAZOP) on four nodes. Identified hazards included overpressure from loss of subcooling, insufficient cooldown, wrong action, and backpressure in the vent system. Some existing facility requirements are applicable, but a separate safety code is needed, with quantitative risk assessment required for safety distances.

Key words : Hydrogen(수소), Subcooled Liquid Hydrogen(과냉각 액화수소), Hydrogen Refueling Station(수소충전소), HAZOP(위험과 운전 분석), Qualitative Risk Assessment(정성적 위험성 평가), Safety criteria(안전기준)

1. 서 론

전세계적으로 수소에너지는 탄소중립 달성을 위한 차세대 친환경 에너지로 주목받으면서 에너지 안보 확립을 위한 한국, 미국, 일본, 독일 등 주요국 에너지 정책이 2019년을 중점으로 다수 발표되었다. 특히, 우리나라는 2018년 2세대 수소전기차인 넥쏘(Nexo)가 개발되고 시장에 출시되면서 수소 활용 기

2026 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

술의 상용화 시작을 알리는 배경으로 2019년 수소경제 활성화 로드맵이 발표되었다[1]. 로드맵에는 수소전기차 보급과 수소충전소 구축을 단·중기 목표치로 제시하였으며, 2030년까지 660기 구축 목표를 제시한 바 있다[1]. 수소경제 초기에는 기체수소 저장·충전 방식의 수소충전소 모델이 주를 이루었으나, 2024년부터는 액화수소 충전소 구축이 시작되며 수소를 액체 상태로 저장하고, 약 900 bar 이상으로 승압함으로써 기체 상태로 충전하는 수소충전소 모델이 구축되기 시작했다. 액화수소 충전소는 2026년 7월 기준, 96기 액화수소 충전소가 구축되었으며, 수소전기차 보급 통계를 보더라도 액화수소 충전소 구축이 시작된 시기와 맞물려 수소를 대용량으로 저장·소모하는 수소전기버스 및 기타 상용차 보급 비중도 2023년 2% 대비 2026년 7월 기준 7%로 증가하는 것을 확인할 수 있다[1-3]. 이처럼 수소전기차는 탈탄소화에서 대형 상용차로 전환되는 추세로 보이며, 액화수소는 상온 고압 기체수소보다 약 800배 높은 저장밀도 특성으로 대형 상용차에 적용된다면 장거리 주행에 최적화된 친환경 에너지원으로 활용될 수 있을 것으로 전망한다[4].

독일 Linde와 Daimler Truck은 공동 프로젝트로써 과냉각 액화수소(Subcooled liquid hydrogen, sLH_2)를 활용한 수소충전 시스템을 개발하고 실증 중에 있다[4]. 프로젝트의 주요 배경은 수소를 액체 상태로 대용량 저장하여, 장거리 운행이 가능한 상용차를 개발하는 것에 있다. 해당 기술은 Fig. 1에서 제시한 P-T Phase Diagram에서 나타낸 것처럼 액체와 기체의 특정 온도에서의 압력 포화 곡선(A)에서 가압(C)하여 과냉각 액체 상태로 유지함으로써 차량에 충전·저장하는 것이 핵심이다. 이 기술은 현재 상용화 전(前)단계로 2021년 White paper가 발간되는 것을 시작으로 2026년 ISO 13984 'Liquid hydrogen-Land vehicle fuelling protocol'이 발표되었다[5].

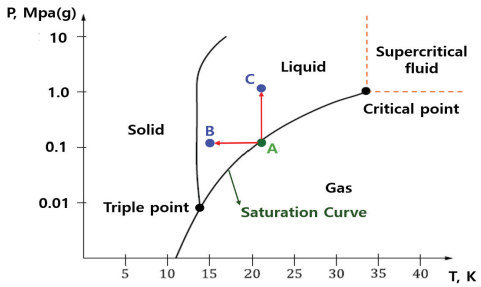


Fig. 1. The phase diagram of hydrogen and sLH_2[5]

백서와 표준에서는 sLH_2 충전을 전(Pre)·본(Main)·후(Post) 3단계로 나누어 충전하는 것으로 시스템이 구성되어 있으며, 이는 충전 시 퍼지 및 누출 점검, 쿨다운(Cooldown) 등 안전성을 확보하기 위한 것으로 판단된다. Linde에서 발표한 sLH_2 충전 기술의 기본적인 공정 특징은 펌프당 400-500 kg/h 유량과 약 1.6 MPa (ab) 목표 압력으로 15분 내 충전하는 것이다. 충전소에는 액화수소 저장시설, 펌프 및 디스펜서, 기타 유틸리티 시설만 필요하며 필요 부지 면적은 약 50 m^2 내외로 보고되어 있다[5-8].

sLH_2 충전 시스템에 대한 특징과 공정 개요도는 Table 1과 Fig. 2에 나타내었다.

수소충전소 위험성 평가는 기체, 액체수소 충전소에 대해 다수 선행된 바 있다. 또한, 현재 기체수소 충전소는 KGS Code FP216, 217을 중심으로 안전성 확보를 위한 시설 및 기술기준이 법·제도적 근거로 실제 상용화되어 구축·운영되고 있다. 액화수소

Table 1. sLH_2 fueling station specifications[4-8]

Parameters	Unit	Value
Fueling Capacity	kg	40-120
Flow rate	kg/h	400-500
Target Fueling Pressure	MPa (abs)	1.6 (± 0.05)
Initial Pressure demand (Onboard)	MPa (abs)	0.2～1.0
Fueling time	min	10-15

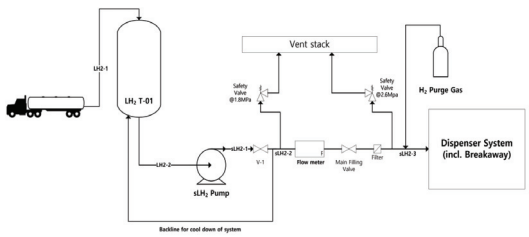


Fig. 2. sLH_2 fueling station process diagram[4,6]

충전소는 아직 제도화가 진행되지 않았지만, 실증을 위한 추가 안전기준안이 별도로 운용되고 있으며 제조시설 기준과 FP216, 217 기준을 일부 준용하고 있다[9-12].

하지만 이 안전기준들은 기체 상태로 수소를 충전하는 공정을 전제로 하며, 선행된 수소충전소 정성·정량적 위험성 평가 연구도 기존 수소충전소 형태에 대한 비교 분석만 진행하였다[13-17]. 반면, sLH_2 충전 공정은 기화 과정 없이 액체 상태의 수소를 차량 저장시스템에 이송하는 공정이므로, 기존 안전기준의 공정 구성과 상이하다. 따라서 과냉각 상태를 유지하기 위한 공정 특징을 고려한 정상 운전조건 이탈 상황을 새롭게 고려할 필요가 있다.

기술개발은 안전기준을 동시에 개발하여야 안전성이 확보된 상태에서 상용화가 가능하다. 신기술 상용화·표준화 이전 단계에서 안전성 확보 근거를 선제적으로 마련하기 위한 사전 연구의 필요성은 액화수소 분야에서 지속적으로 강조되어 왔다[18]. 대부분 실증 단계에서 정성적 위험성 평가를 수행하여 해당 공정 고유의 위험요인과 요구되는 안전조치 도출을 요구하고 있다. 따라서 본 연구는 안전기준이 부재한 sLH_2 충전소 공정과 시설 사례를 기반으로 정성적 위험성 평가를 실시하고, 평가 결과를 기반으로 안전설계 및 안전기준 개발 방향성을 고찰하는 데 목적이 있다.

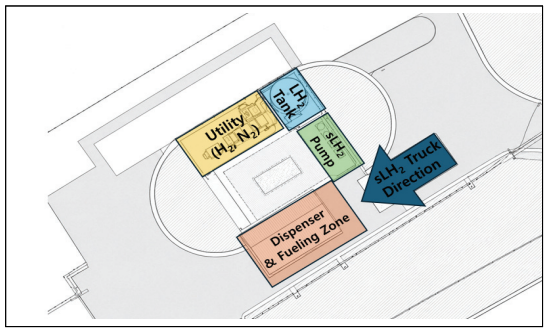


Fig. 3. sLH_2 fueling station layout for HAZOP

2. 연구 방법

2.1 위험성 평가 대상 정의

위험성 평가 대상 시설 및 시스템은 독일의 Linde에서 발표한 실증 시스템 공개자료와 CEP, ISO를 근거로 하였다[5-8]. 본 연구팀은 기존 액화수소 충전소 인프라 설계 Philosophy를 일부 준용하여 공개된 시스템을 구체화하여 개념적 설계안을 도출하였다. 본 연구에서는 Fig. 3에 제시된 배치도를 기준으로

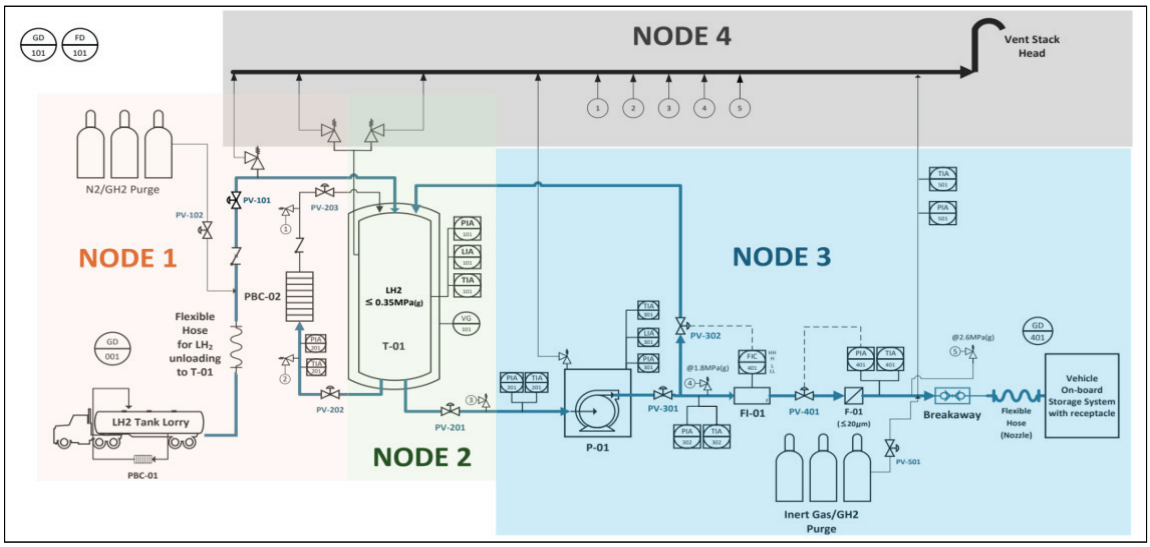


Fig. 4. sLH_2 process flow diagram for HAZOP

충전소 시설 운영 관점에서의 잠재적인 위험요인도 같이 고려하였으며, 재구성한 공정흐름도는 Fig. 4와 같다. 액화수소는 탱크로리(Tank Lorry)로부터 충전소의 고정식 저장탱크로 이충전되는 형태이며, 주요 저장 조건은 관련 선행 연구에서 제시한 값 기준인 0.2~0.25 MPa (g)로 설정하였다[6-8].

2.2 위험성 평가 방법 및 절차

2.2.1 방법론 선정

본 연구에서는 위험성 평가 방법으로 HAZOP 기법을 채택하였다. HAZOP은 KS A IEC 61882, KOSHA GUIDE C-C-37-2026에서 제시하는 절차를 준용하여 진행하였으며, 주요 연구 수행 체계는 Fig. 5로 나타냈다[19].

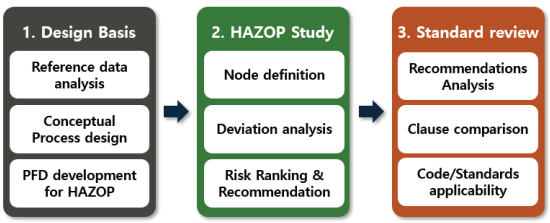


Fig. 5. Overall procedure for HAZOP based risk assessment

2.2.2 노드(Node) 및 위험성 평가 기준

HAZOP 평가는 Fig. 4의 PFD를 기반으로 총 4개 노드(Node)로 구분하여 평가하였다. 각 노드별 주요 내용은 Table 2에 정리하였다. 각 노드별로 적용한 가이드워드는 공정 유체 및 유틸리티의 정상 운전 여부를 판단하기 위한 요소로 유량, 압력, 레벨, 온도를 중점으로 구성하였다. HAZOP 평가의 위험등급(Risk Rate, RR)은 Fig. 6과 같이 발생 가능성(F)과 피해 중대성(C)을 각각 5단계로 분류하고, risk matrix에 따라 위험등급을 1-5등급으로 결정하였다. 위험등급은 3~5등급인 경우 고위험 등급으로 분류하여 우선 개선대상으로 분류하고, 개선조치 이후 시설이 가동되어야 함을 전제로 하였다. 2등급으로 분류된 케이스 중에 발생 가능성이 높은 경우에는 개선권고를 통해 시설 안전성을 확보하는 것으로 제안하였다.

3. 연구 결과

3.1 노드별 위험성 평가 결과

위험성 평가 결과, 4개 노드에 대해서는 총 45개의 위험 시나리오 및 개선권고사항이 발굴되었다. 그 중, 고위험 등급은 41개, 허용 가능 위험 등급은

Table 2. Definition of HAZOP study nodes

Node	Process	Design Intention
N1	LH_2 unloading (Tank lorry to Storage Tank)	· LH_2 unloading line from the tank lorry to the LH_2 Storage tank, equipped with shut-off valves, safety valves and a nitrogen purging system
N2	LH_2 storage tank	· Vacuum-insulated LH_2 Storage Tank (T-01) operating at approximately 0.25 MPa (g) · The tank is equipped with a vacuum-measurement nozzle and gauge, a pressure, level and temperature instrumentation.
N3	LH_2 Pressurization and Dispensing	· The process in which LH_2 is brought to a subcooled state by pressurization (P-01) to Max. 1.9 MPa (g) and dispensed to the vehicle LHSS (Liquid hydrogen storage system) at a target pressure 1.5 MPa (g). The backline, which maintains T-01 and LH_2 process line in a cooled-down condition before the main fueling. · At the dispenser, the flow rate is measured and the temperature and pressure are monitored and controlled during fueling of trucks and other vehicles through the nozzle.
N4	Vent system	· When overpressure builds up as a result of boil-off gas (BOG), the PSV (Pressure safety valve) or TSV (Thermal safety valve) opens and the hydrogen is vented through the vent stack. · Gases released during unloading from Tank Lorry to T-01, initial pressure setting of the LHSS and purging procedure, are also transferred through the vent system.

		C1	C2	C3	C4	C5
		Negligible	Minor	Moderate	Major	Catastrophic
F1	Improbable	1	1	1	2	2
F2	Remote	1	2	2	3	3
F3	Rare	1	2	3	3	4
F4	Occasional	2	3	3	4	5
F5	Frequent	2	3	4	5	5

Fig. 6. Risk matrix for HAZOP

4개로 도출되었다. 허용 가능 위험 등급은 높은 빈도로 원인이 발생하지만 심각도가 낮은 경우와 낮은 빈도이지만 높은 심각도로 구성된 경우로써 개선권고가 필요하다고 판단된 시나리오이다. 노드별로는 N3 LH_2 승압 및 충전 공정이 17개, N2 LH_2 저장탱크가 11개, N1 LH_2 이충전이 10개로 과반 이상을 차지하였다. Fig. 7은 각 노드별 고위험 등급 분포를 주요 가이드워드에 따라 나타낸 것이다. N1에서는 이충전 행위와 관련된 행동 오류(Wrong Action)이 높은 비중을 차지하고, N2~4는 저장, 승압, 충전과 관련하여 유량이 가장 높은 비중을 차지하고 있다.

3.2 안전성 확보를 위한 주요 개선권고사항

평가 결과로써 도출된 45개 시나리오 개선권고사

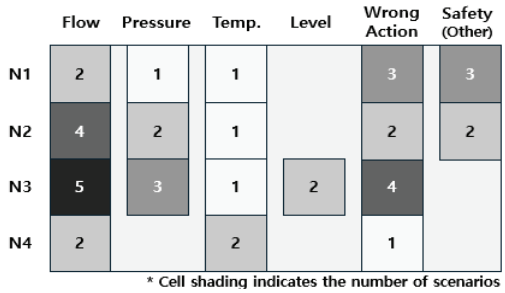


Fig. 7. Number of high-risk scenarios by node and guideword category

항 중 sLH_2 충전 시설 설계와 운전의 안전성 확보를 위한 주요 개선권고사항은 Table 3에 정리하여 제시하였다. N1에서는 충전소 시설의 LH_2 이충전 절차를 마련하고, 공정변수의 모니터링과 과압안전장치 설치를 중점으로 개선권고하였다. N2에서는 LH_2 저장 상태 유지 관점에서 과압 또는 부압 방지를 중점으로 평가되었다. N3는 sLH_2 충전 과정으로써 대부분 쿨다운과 펌프(P-01)의 sLH_2 물성 유지를 위한 효율 성능과 건전성 유지, ISO 13984 프로토콜을 준수한 공정 운전 중점으로 개선권고사항이 도출되었다. N4에서는 LH_2 이충전과 sLH_2 충전 단계 중 퍼지, LHSS (Liquid hydrogen storage system) 압력 조정 등에 따라 발생될 수 있는 가스 방출과 비정상 운전 상태에서 과압에 따라 발생될 수 있는 수소 방출 시나리오를 중점으로 평가하여 방출 시스템의 안전성 확보 방안을 도출하였다. 제시된 주요 개선권고사항은 Fig. 7의 유량(flow), 압력(pressure), 행동 오류(wrong action) 이탈(deviation)이 전체 고위험 등급 시나리오의 약 71%, 과반 이상을 차지하는 점에서 운전 절차 수립과 충전 프로토콜 기반의 안전 운전 기능을 포함한 공정 인터록 설정을 요구하고 있다. 이는 모든 충전 공정이 액체수소 상태로 유지되는 것을 전제로 하고 있기 때문에 공정 운전 조건 모니터링과 성능 유지 절차에 집중된 것을 확인할 수 있었다.

Table 3. Summary of HAZOP study recommendations to secure the safety measurement for sLH_2 station

Node	Cause	Consequence	Recommendation
N1	· Improper hose coupling with unloading initiated or Tank lorry valves fail to open. · Hose disconnection without residual pressure verification. · Insufficient purging; air ingress, hose rupture and ageing. · Loss of vacuum insulation and heat ingress	· possibility of flexible hose coupler disconnection and LH_2 leakage. · Residual LH_2/GH_2 leakage. · Residual air-H_2 mixture, N_2 condensate. · LH_2 thermal expansion in blocked line and process line rupture.	· Establish a LH_2 unloading procedure and operator training; a system that verifies hose connection and integrity through purging. · Install PI, TI and TSV on the unloading and blocked process line.
N2	· PV-101/202/203 Full Open (Rapid). · Continuous top loading. · Operator disregards alarm. · Loss of vacuum insulation and heat ingress.	· T-01 Pressurization caused by BOG. · T-01 negative pressure development and risk of tank collapse. · Equipment damage due to unattended emergency condition.	· Set PV interlocks based on T-01 PI and LI signals. ·Comply with the installation criteria for the prevention of a negative pressure development (in accordance with KGS FP216) · Establish process parameter variable alarm～ESD interlocks and operator training.
N3	· High pressure fluid entering through backline. · PV-201/301 Partially/fully fail to open. · Low LH_2 level in the P-01 can vessel LH_2 low level and blockage of the suction line by impurity. · PV-302 fails to open, insufficient cool-down and PV-301/401 open into warm downstream line. · a high on-board tank inventory of a vehicle. · Insufficient purging with N_2, GH_2. · Improper coupling connection of the fuelling nozzle.	· Flashing and self-pressurization of LH_2 in T-01 with the possibility of rupture. · Pressurization of P-01 can vessel by BOG, and P-01 failure by cavitation and vibration. · Deviation from sLH_2 condition, insufficient delivered mass to LHSS, or rapid pressure rise from warm H_2. · Overpressure and rupture possibility of LHSS due to overfilling. · Formation of a flammable air-H_2 mixture. · Blockage by N_2 and moisture condensate.	· a pressure reduction measure to the backline and the recirculation time limit (New criteria considered) · P, T, vibration instrumentation installation on P-01 Suction/Discharge line, and set T-01/P-01 vessel LI, TI, FI-01～P-01 permissible start/stop interlock Including PV on/off control. (New criteria considered) · Establish a cool-down procedure. · Comply with a fuelling protocol in which fuelling starts only after the LHSS pressure is confirmed via IR communication. · Conduct purge and leak checks through the pre-fuelling procedure, and adopt He as purge gas. (New criteria considered based on ISO)
N4	· Safety valve working caused by overpressure of upstream equipment. · Ingress of rainwater and formation of condensate. · Vent out of cold H_2 · Improper operation of purge gas line.	· Vent head capacity exceeded and high back pressure, disabling the operation of low pressure relief devices. · Blockage of vent head. · Formation and detection of ground level H_2 concentration and risk of flammable gas ingress into nearby buildings. · GH_2 mistaken for inert gas, with the risk of flammable mixture.	· Comply with back pressure calculation for each relief line under emergency operation conditions. · Drain valve installation on vent stack and design to prevent rainwater ingress. · Apply heat exchanger to the exhausted line before vent stack. · Design the vent stack based on consequence risk analysis. · Inert and H_2 gases separation completely by manifold, mark by label and colour, and application of an automated system. * In accordance with KGS Code, additional criteria for LH_2 facility.

4. 결론 및 고찰

본 연구는 과냉각 액화수소(sLH_2) 충전소를 개념적으로 설계한 공정흐름도를 기반으로 HAZOP 기법을 적용하여 위험성 평가를 수행하고, 도출된 고위험 등급에 대한 개선권고사항을 현행 안전기준과 대조하여 기준 개발 방향성을 고찰하였다. 국외 선행 연구 및 실증 사례의 공정 구성과 운전 절차를 참고하여 평가 대상 공정을 구성하였으며[5,6,8], 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 검토구간 N1~4에서 45개의 주요 사고 시나리오가 도출되었으며, 이 중 3등급 이상의 고위험 시나리오는 41건이었다. 유량, 압력, 행동 오류 deviation이 약 71%를 차지하였고, 이는 전체 공정 구간에서 수소가 액체상태를 유지하는 공정 특성상 개선권고사항이 공정 운전 조건 모니터링 및 인터록 설정과 성능 유지 절차에 집중된 결과로 해석된다.

(2) sLH_2 충전 시설의 개선권고사항을 KGS Code FP216, 217, 액화수소 제조시설 및 저장식 액화수소 충전시설 추가 안전기준과 대조한 결과, 액화수소 저장, 충전시설 및 충전 행위에 따른 위험 요인과 관련하여 기초공사, 저장설비, 가스설비, 물리적 방호조치, 검지경보장치, 저장탱크의 과압 및 부압파괴 방지조치에 관한 기준은 준용이 가능할 것으로 판단된다. 다만, sLH_2 충전 공정은 기존 충전소와 달리 액체상태로 수소를 유지하여 차량 저장시스템으로 이송하기 때문에 기존 기준 적용만으로 공정 고유의 위험요인을 충분히 관리할 수 있는지 검토가 필요하다. 공통적인 시설·설비 요건은 현행 기준을 준용하되 과냉각 상태 유지, 쿨다운 및 충전 단계별 운전 조건에 대해서는 sLH_2 공정 특성을 반영한 기준 보완 혹은 신설이 필요할 것으로 보인다.

(3) sLH_2 승압 펌프는 현재 규제샌드박스에서 적용 중인 액화수소 추가 안전기준에 토출압력 감시, 설계압력 초과 시 정지 및 긴급차단 연동 기준이 마련되어 있다. 하지만 해당 기준은 토출 측을 중심으로 규정되어 있어 흡입 측 온도·압력의 모니터링과 연계 설비의 액위 계측값에 따른 펌프 가동 허용 조건은 포함되지 않는 것으로 해석된다. 따라서 토출 측 공정 감시 기준에 상응하는 흡입 측 공정 변수 모니터링 기준을 추가하고, 관련 계측값과 연동한 펌프 가동 조건을 구체화할 필요가 있다. 아울러, 쿨다운 과정에서 저장탱크로 순환되는 회수라인(backline)에 대해서는 정상 운전과 비정상 운전 조건을 구분하여 안전장치의 설치 및 작동 기준을 마련할 필요가 있다.

(4) 충전 관련 기술기준에서는 ISO 13984에 따른 3단계 충전 프로토콜을 바탕으로 퍼지·누출 점검, 쿨다운, 차량 액화수소 저장 시스템(LHSS) 조건 확인 등의 단계별 안전조치의 적용 조건을 구체화할 필요가 있다. 특히, 쿨다운 부족과 펌프 성능 저하는 과냉각 상태 유지 및 충전 전(全) 과정에 공정 이탈 영향을 줄 수 있으므로 충전 개시 조건과 펌프 성능 유지를 위한 운전 매뉴얼 및 점검 절차를 마련해야 한다. KGS Code 부록 A에 따른 충전 안전성능 확인 평가 제도를 적용할 경우, sLH_2 LHSS 초기 상태와 충전 중 운전 특성을 모사할 수 있는 평가 기준이 필요하다.

(5) 가스 방출관의 경우에는 과압안전장치 벤트스택 공유를 허용하고 있는 연결배관의 압력강하를 10% 이내로 제한하고 있다. 이를 sLH_2 공정에 적용하기 위해서는 복수 안전장치의 동시 방출 시나리오를 산정하고, 각 시나리오에서 저압 측 안전장치에 작용하는 배압을 검증할 필요가 있다.

다만 본 연구는 공정 계장 설정값과 안전장치 세부 사양이 확정되지 않은 개념설계 단계의 공정흐름도를 대상으로 안전조치 존재 여부를 중점으로 위험성 평가를 수행하였다. 따라서 향후 기술개발 및 실

증 단계에서는 공정 배관 계장도(P&ID)와 운전 조건을 바탕으로 정성·정량적 위험성 평가를 수행하고, 사고 피해영향 범위를 분석하여 시설 및 설비 간 이격거리를 현행 기준과 비교하고 제안된 안전기준의 적정성을 검증할 필요가 있다. 본 연구의 분석 결과는 이러한 후속 평가와 sLH_2 충전 공정의 안전기준 마련을 위한 기초 자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2022년도 기획재정부(국토교통부)의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(RS-2022-00155807, 상용급 액체수소 플랜트용 압축기 핵심기술 개발 및 실증)이며 지원에 감사드립니다.

References

1. MOTIE, “Hydrogen economy roadmap”, Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea, 2019.
2. H2KOREA, “Statistics of hydrogen refueling stations”, Hydrogen Economy Portal, Korea, 2026, Retrieved from https://h2hub.or.kr/main/stat/stat_distribute_charge_domestic.do.
3. MOLIT, “Statistics on motor vehicle registration”, Statistics System of MOLIT, Korea, 2026, Retrieved from https://stat.molit.go.kr/portal/cate/statMetaView.do?hRsId=58&hFormId=5498&hSelectId=5498&hPoint=00&hAppr=1&hDivEng=&oFileName=&rFileName=&midpath=&sFormId=5498&sStart=202609&sEnd=202609&sStyleNum=2&settingRadio=xlsx.
4. E. Pizzutilo, T. Acher, B. Reuter, C. Will, and S. Schäfer, “Subcooled liquid hydrogen technology for heavy-duty trucks”, World Electric Vehicle Journal, Vol. 15, No. 1, 2024, pp. 22, doi: https://doi.org/10.3390/wevj15010022.
5. ISO, “Liquid hydrogen - Land vehicle fuelling protocol (ISO 13984:2026)”, International Organization for Standardization, 2026, Retrieved from https://www.iso.org/standard/86295.html.
6. V. Molkov, H. Ebne-Abbasi, and D. Makarov, “Liquid hydrogen refuelling at HRS: description of sLH2 concept, modelling approach and results of numerical simulations”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 93, 2024, pp. 285-296, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.10.392.
7. Y. B. Ham, S. J. Lee, and D. H. Lee, “A study on the design of a cryogenic pump for subcooled-liquid hydrogen (sLH2) supply”, The Korean Society of Automotive Engineers, 2025, pp. 2761, Retrieved from https://www.ksae.org/journal_list/search_index.php?mode=view&page_mode=all&sid=58168&page=240.
8. J. Sun, T. Shi, R. Wang, X. Chen, and X. Peng, “Thermodynamic performance investigation and multi-objective optimization of the subcooled liquid hydrogen centrifugal pump for hydrogen refueling stations”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 244, 2026, pp. 155709, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2026.155709.
9. KGS, “Facility/technical/inspection code for hydrogen fuel refueling by type of on-site hydrogen production (KGS Code FP216)”, Korea Gas Safety Corporation, Korea, 2026, Retrieved from https://cyber.kgs.or.kr/kgscode.codeSearch.view.ex.do?onEngYn=F&pblcRlmCd=01&pblcMdclCd=&pblcCd=FP216_260508&stDayY=2008&stDayM=01&etDayY=2026&etDayM=10.
10. KGS, “Facility/technical/inspection code for hydrogen fuel refueling by type of compressed hydrogen delivery (KGS Code FP217)”, Korea Gas Safety Corporation, Korea, 2026, Retrieved from https://cyber.kgs.or.kr/kgscode.codeSearch.view.ex.do?onEngYn=F&pblcRlmCd=01&pblcMdclCd=&pblcCd=FP217_260508&stDayY=2008&stDayM=01&etDayY=2026&etDayM=10.
11. KGS, “Additional safety standards for technical inspection, supervision and safety assessment of liquid hydrogen production facilities”, Korea Gas Safety Corporation, Korea, 2023.
12. KGS, “Additional safety standards for technical inspection of liquid hydrogen storage-type hydrogen vehicle fuelling facilities”, Korea Gas Safety Corporation, Korea, 2023.
13. N. G. L. Jones, “A schematic design for a HAZOP study on a liquid hydrogen filling station”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 9, No. 1-2, 1984, pp. 115-121, doi: https://doi.org/10.1016/0360-3199(84)90039-9.
14. B. H. Yoo, S. Wilailak, S. H. Bae, H. R. Gye, and C. J. Lee, “Comparative risk assessment of liquefied and gaseous hydrogen refueling stations”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 46, No. 71, 2021, pp. 35511-35524, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.073.
15. E. Yu, B. Kim, M. Kim, and S. Kang, “Study on methods for conducting quantitative risk assessment of liquid hydrogen fueling stations”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 6, 2024, pp. 681-689, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.6.681.
16. D. Shin, K. Rhie, D. Lee, H. Kim, and D. Seo, “A study

on the analysis of layer of protection analysis (LOPA) to large-capacity liquefied hydrogen unloading and refueling facilities", 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.

17. D. Seo, K. Rhie, D. Lee, H. Kim, and D. Shin, "A study on the application of HAZOP and LOPA to liquefied hydrogen charging stations", 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.
18. PRESLHY, "Prenormative research for safe use of liquid hydrogen: Project overview", Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Grant Agreement No. 779613, 2021. Retrieved from https://preslhy.eu/project-overview/.
19. Korea Occupational Safety and Health Agency, "Technical guideline on the hazard and operability (HAZOP) study for continuous processes (KOSHA GUIDE C-C-37-2026)", Korea, 2026, Retrieved from https://portal.kosha.or.kr/archive/resources/tech-support/search/all?page=1&rowsPerPage=10.