Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 708~713
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.708

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

정성적 위험성평가를 통한 수소 반복 가압 시험설비 위험요인 파악

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

[1]호서대학교 안전공학과, [2]피에스피

Identifying Risk Factors for Hydrogen Repetitive Pressurization Test Equipment through Qualitative Risk Assessment

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

[1]Department of Safety Engineering. Hoseo Univ. 8-20, Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnam-do, Korea
[2]PSpp. 140-9, Wolbong 4-ro, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, Korea

†Corresponding author :
sdhyoun02@naver.com

Received 25 September, 2025
Revised 12 November, 2025
Accepted 24 November, 2025

Abstract >> In order to reduce carbon emission, one of the main causes of environmental pollution, attention is being focused on the activation of the hydrogen economy, which uses hydrogen as the main energy source. In order to verify the safety of the pipe before applying hydrogen pipes to eco-friendly hydrogen cities, repeated pressure tests are conducted. In order to find various hazards and risk factors that exist when designing repeated pressure test facilities, a qualitative risk assessment, HAZOP (Hazard and Operability) Study, was conducted, and various hazards and risk factors were derived and appropriate improvement recommendations were presented to secure safety. If countermeasures for risks are prepared based on this, it is believed that the safety of the facility will be secured.

Key words : Hydrogen(수소), Hydrogen pipe(수소 배관), Repeated pressure test facility(반복가압설비), HAZOP(공정위험분석), Risk factor(위험요인)

1. 서 론

기후변화는 인류가 직면한 가장 시급한 전 지구적 과제 중 하나이다. 온실가스 배출량의 지속적인 증가는 극단적인 기상 현상, 해수면 상승, 생태계 파괴 등 전 지구적인 기후변화 문제를 심화시키고 있다. 이러한 기후위기에 대응하고 경제적, 사회적 안정을 도모하기 위한 핵심적인 해결책으로 ‘탄소 중립’이 전 세계적인 의제로 부상하고 있다. 탄소 중립이 부상함에 따라 수소에 관한 관심 또한 커지고 있다[1)].

이러한 시대적 요구 속에서 수소는 연소 시 이산화탄소를 배출하지 않는 청정 에너지원으로 주목받고 있으며, 탄소 중립 사회로의 전환을 촉진하는 데 중요한 역할을 한다[2)]. 수송 부문에서의 탄소 배출량 감축을 위해 2030년까지 30만 대의 수소차 보급과 660기 이상의 수소충전소 구축이 추진되고 있으며

이러한 정책 목표는 수소 운송 인프라의 구축과 효율적인 운영이 얼마나 중요한지를 명확히 보여준다. 대한민국은 2019년 수소 경제 활성화 로드맵을 발표하며 수소 경제 선도국가로의 도약을 위한 노력을 가속화 하고 있으며, 이는 수소 운송 기술과 인프라의 발전을 필수적인 요소로 만든다. 이에 따라 주요 에너지원으로 수소를 사용하는 수소 도시에 관심도 커지고 있다.

수소 도시는 수소를 주 에너지원의 하나로 사용하여 도시 내 생활 전반(주거, 교통, 산업 등)에 필요한 에너지와 서비스를 공급하는 도시 기반 시설을 갖춘 특화된 도시를 의미한다[3]. 이는 도시의 에너지 시스템을 수소를 중심으로 재구성하여 청정 에너지 전환을 선도하고, 환경 문제와 에너지 자립 문제를 동시에 해결하는 혁신적인 도시 모델을 지향한다. 수소도시는 온실가스 배출을 최소화하고 에너지 효율성을 높이며, 재생에너지를 기반으로 한 친환경·제로에너지 스마트 시티의 대안으로 추진되고 있다.

효율적인 수소 운송은 수소 생산지와 사용처를 효과적으로 연결하고, 수급 불균형을 완화하는 데 기여한다. 또한, 에너지 저장, 교통, 산업 연료 등 다양한 분야에서 수소의 활용을 촉진하며, 수소의 전체 공급 비용을 절감하여 경제성을 향상할 수 있다. 재생 가능한 에너지로 생산된 수소를 효율적으로 이송하는 것은 환경친화적인 수소 경제를 구현하는 데 필수적이며, 적절한 이송 기술과 인프라 구축은 수소의 안전한 저장과 운반을 보장한다[4]. Table 1은 수소 운송 방식 중 튜브 트레일러를 통한 운송과 배관을 통한 운송의 특징을 정리한 표이다.

Table 1. Characteristics of each hydrogen transport method

Division	Tube trailer transport	Pipeline Transport
Method	High pressure compressed gaseous hydrogen	Transportation using pipelines
Advantage	Mobility, relatively low initial investment costs	Stable supply and economic feasibility
Disadvantage	Limited transport capacity, high transport costs	High initial investment costs and safety concerns
Suitable case	Hydrogen charging stations, small-scale demand sources	Large-scale demand

본 연구에서는 기존 가스 배관으로 주로 사용되는 배관 재질(X52, X65, X70)을 수소 배관으로 사용하는데 필요한 반복 가압 시험을 수행하기에 앞서 해당 설비에 대하여 정성적 위험성평가인 HAZOP (Hazard and Operability) Study를 실시하여 설비 내 존재하는 유해·위험요인들을 찾았다. 해당 설비는 배관 반복 가압 시험 설비이기는 하나 특징적으로 수소 압축설비와 크게 다른점은 없기에 기존에 수행했던 비슷한 설비의 평가내용들도 참조하였다. 위험성이 높은 시나리오의 경우 추가적인 적절한 개선권고사항을 제시하여 안전성을 확보하였다.

2. 위험성평가

2.1 HAZOP

정성적 위험성평가인 HAZOP의 핵심은 가이드 워드(guide word)와 공정변수(process parameter)의 조

Table 2. Deviation which combined with guide words and process parameters

Guide Word	Process Parameter	Explanation
No/Not	Flow	The design intent is completely denied
More/High	Pressure	Quantitative increase in process variables
Less/Low	Temperature	Quantitative reduction of process variables
Reverse	Reaction	Logically opposite to the design intent
As well as	Flow	In addition to the design intent, other phenomena are added.
Part of	Flow	Only part of the design intent is achieved
Other than	Composition	The design intent has been replaced by something completely different

Table 3. Classification of risk levels (Frequency)

5	More than once a year
4	Once every 1 to 5 years
3	Once every 5 to 10 years
2	Once every 10 to 30 years
1	Less than once every 30 years

Table 4. Classification of risk levels (Criticality)

5	2 or more deaths or injuries	Property loss of 1 billion won or more
4	1 or more injured	Property loss of KRW 100 million or more, less than KRW 1 billion
3	2 or more people with minor injuries	Property loss of 10 million won or more, less than 100 million won
2	1 or less casualties	Property loss of less than 10 million won
1	Safety design	Changes to improve drivability

Table 5. Risk Maxrix

Frequency \ Intensity	5	4	3	2	1
5	(25) Grade 5	(20) Grade 5	(15) Grade 4	(10) Grade 3	(5) Grade 2
4	(20) Grade 5	(16) Grade 4	(12) Grade 3	(8) Grade 3	(4) Grade 2
3	(15) Grade 4	(12) Grade 3	(9) Grade 3	(6) Grade 2	(3) Grade 1
2	(10) Grade 3	(8) Grade 3	(6) Grade 2	(4) Grade 2	(2) Grade 1
1	(5) Grade 2	(4) Grade 2	(3) Grade 1	(2) Grade 1	(1) Grade 1

Table 6. Risk Level

Grade 5	Unacceptable risk	Stop work immediately
Grade 4	Grave danger	Emergency temporary safety measures
Grade 3	Significant risk	Safety measures during maintenance period
Grade 2	Slight risk	Periodic training
Grade 1	Negligible risk	Maintain current safety measures

합을 통해 설계 의도에서 벗어난 발생 가능한 시나리오를 살펴보고 분석하는 기법이다. Table 2는 가이드 워드와 공정변수의 조합으로 만들어진 이탈상태이다. 설계 의도에서 벗어나는 이탈을 위험요인으로 보고, 브레인스토밍을 통해 잠재된 위험 요소를 도출하는 데 효과적이다. HAZOP은 복잡한 공장의 설계, 시공, 운전 단계 전반에 걸쳐 안전성을 확보하기 위해 수행하며 전문가로 구성된 팀이 P&ID (Piping and Instrumentation Diagram)를 기반으로 각 node별로 평가를 진행한다[5].

평가 이후 Table 3에서 빈도 값과, Table 4에서 강도 값을 조합해 Table 5를 참고하여 위험등급을 정한다. 이후 Table 6을 참고하여 위험등급에 따라 추가적인 안전조치가 필요한지, 현재 안전조치로 충분한지 결정한다. 현재 안전조치 이외에 추가적으로 필요한 사항들은 개선권고사항을 작성하여 해당 설비의 안전성을 추가로 확보할 수 있도록 한다[6].

2.2 평가대상설비

해당 설비는 수소를 반복가압하여 시험에 사용되는 배관에 이상이 없는지 안전성을 확인하기 위한 시험 실증 설비이다. 기존 가스 배관으로 사용하는 API 5L X52, X60, X70에 대하여 수소를 반복적으로 가압함으로써 수소 배관망으로 활용 가능한지 확인한다.

튜브 트레일러에서부터 수소를 공급받아 버퍼탱크에 수소를 저장한 뒤 후단에 설치된 압축기를 통해 가압하여 시험 배관쪽으로 수소가 공급된다. 이후

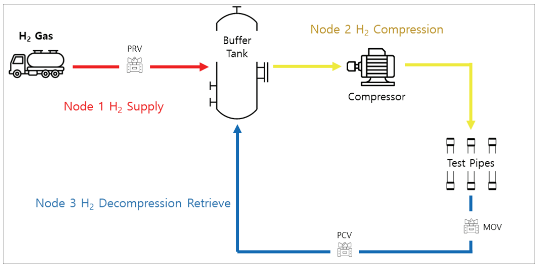

Fig. 1. Hydrogen repeat pressurization facility PFD

감압설비를 통해 수소는 감압되어 다시 버퍼탱크로 회수되는 순환공정이다. Fig. 1은 해당 설비에 대한 흐름을 대략적으로 나타낸 그림이다.

2.3 Node

Node는 총 3개로 나누어 각 node 별 흐름, 특징, 주요 장치 등을 파악하고 위험성평가를 수행했다.

Node 1은 수소 공급부로 튜브 트레일러에서 수소를 공급받아 제어판넬에서 감압하여 저장탱크에 수소를 저장한 후 압축기측으로 공급한다. 주요 장치로는 튜브 트페일러, 제어판넬, PRV (Pressure Regulator Valve), 버퍼탱크, 필터 등이 있다.

Node 2는 수소 반복가압 시험부로 수소 저장시스템에서 압축기로 최대 10MPa까지 가압하여 시험 후 감압한다. 주요 장치로는 압축기와 필터가 있다.

Node 3은 수소 감압 회수 공정부로 시험배관에서부터 PCV (Pressure Control Valve)를 통해 4MPa로 감압하여 다시 수소 저장부로 회수하는 공정이다. 주요 장치로는 감압을 위한 PCV가 있다.

2.4 HAZOP 수행

HAZOP을 수행한 결과 유해·위험 시나리오는 Table 7과 같이 총 62개가 파악되었다. 총 3개의 node에서 Table 8과 같이 27개의 비정상상태가 도출되었고 그에 따른 개선권고사항은 41개 도출하였다. 위험 등급별 분포는 Fig. 2와 같다. 위험등급이 3등급 이상인 시나리오는 5개 도출되었고 각 시나리오별로 개선권고사항을 도출하여 위험을 감소시킬 수 있는 방법을 찾았다. 위험등급 3등급 시나리오는 불순물에 따른 내부 설비 손상 및 수소 순도 저하, 밸브 오작동으로 인한 설비 내 과압 형성 등에 관한 내용이며 필터 교체주기, 상황 별 퍼지, 밸브 car seal조치 등 필요한 안전조치를 도출하였다. Table 9는 HAZOP 결과 중 일부이다.

Table 7. Distribution of risk levels by node and recommendations

Node	Risk Level						Recommendation
	1	2	3	4	5	Total	
#01	11	8	2	0	0	21	17
#02	13	10	2	0	0	25	15
#03	8	7	1	0	0	16	9
Total	32	25	5	0	0	62	41

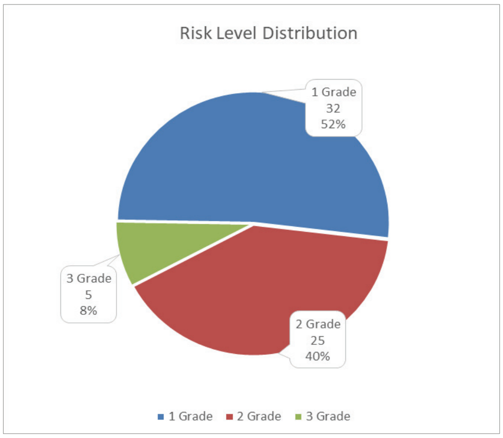

Fig. 2. Risk level distribution

Table 8. Abnormal state for each node

NODE No.	FLOW							PRESS.			TEMP.		LEVEL			SAFETY	SUM
	NO	LESS	MORE	REVERSE	PART OF	AS WELL	OTHER	NO	LESS	MORE	LESS	MORE	NO	LESS	MORE	OTHER	
#01	O	O	O	O	X	O	X	O	O	O	O	O	X	X	X	O	11
#02	O	O	X	O	X	O	X	X	O	O	X	O	X	X	X	O	8
#03	O	O	O	O	X	X	X	X	O	O	O	X	X	X	X	O	8
SUM																	27

Table 9. Example of HAZOP result

NODE	Deviation	Cause	Consequence	Safety	Recommendation
#01	No/Low Flow (None/Les)	- PRV open, regulation failure	- Hydrogen supply shortages and delays	- FIT detection - No manipulation after initial setup - Operator training and manual development	- PRV Car Seal Open
	Added Component (As well as)	- Impurities entering the tube trailer	- Blockage or damage to equipment	- Check hydrogen report	- Installing a DECANT PANNEL filter before the storage tank
	Safety (Other)	- Problems with vehicle entry and exit routes	- Collisions with surrounding buildings - Unreasonable movement	- Protective Guard - Signaler Deployment	- Consider vehicle traffic flow when finalizing the layout.
#02	No/Low Flow (None/Les)	- Compressor signal reception error	- Test delay	- PIT	- PIT sequence control review
	High Temp. (More)	- Compressor cooling supply failure	- Test Delay - Test Unavailable	- Compressor automatic trip - Compressor TT	- Review of unifying the two overlapping TIT on the line
#03	No/Low Flow (None/Less)	- Maintenance Gate valve opening failure	- Hydrogen recovery is not possible - Test Unavailable	- Worker Training - Manual Development	- Gate Valve Car Seal Measures - Gate Valve Unification
	Low Press. (Less)	- PCV malfunction due to PIT sensing error	- Buffer tank not recoverable - Test Unavailable	- PI, FIT - Confirmation of calibration certificates during construction	- Regular calibration verification review
	High Press. (More)	- When the PCV is opened, there is a time difference until the rear PIT sensing adjustment is made.	- Overpressure is formed momentarily at the rear end of the PCV	- PSV	- Review of PCV pressure relief line

PI: Pressure Indicator
PIT: Pressure Indicating Transmitter
TT: Temperature Transmitter
TIT: Temperature Indicating Transmitter
PRV: Pressure Regulator Valve
PCV: Pressure Control Valve
PSV: Pressure Safety Valve

3. 개선권고사항

해당 설비에서 도출된 유해·위험요인 시나리오에 따른 주요 개선권고사항들은 아래와 같다.

3.1 배관/밸브에 관한 사항

PRV 열림, 조절실패로 인하여 수소 공급 불량 및 지연이 우려되므로 PRV Car Seal 조치. PRV 고장으로 인하여 튜브 트레일러 측 20MPa 압력 공급이 우려되므로 PSV 전단 보수용 밸브 설치 시 Lock Out 검토. 유지보수용 Gate 밸브 열림실패로 인하여 수소 회수 및 시험 불가가 우려되므로 Car Seal 조치. 버퍼탱크 압력이 공급측 압력보다 높은 경우 튜브 트레일러 측으로 수소 역류가 우려되므로 체크밸브 설치 검토 등이 도출되었다.

3.2 설비/설계에 관한 사항

튜브 트레일러 내부 불순물 유입으로 인하여 설비 내부 막힘, 손상이 우려되므로 저장탱크 전단 Decant Pannel 필터 설치. 차량 출입 동선의 문제점으로 인해 주변 건축물의 충돌 및 동선의 불편함이 우려되므로 레이아웃 확정시 차량 동선 고려. 압축기 신호 수신 오류로 인하여 시험 지연이 우려되므로 PIT (Pressure Indicator Transmitter) 시퀀스 제어 검토. 유지보수용 Gate 밸브 열림 실패로 인하여 수소 회수 및 시험 불가가 우려되므로 버퍼탱크 전단 밸브 단일화 등이 도출되었다.

3.3 시험에 관한 사항

시험배관 시편 수급 어려움이 있을 수 있으므로 배관 형식 및 크기 수급 확인. 시험 시 압력·온도 데이터 확인이 필요하므로 시험배관 전·후단 센서 설치 검토. 시험배관 압력(일반 배관 설계압 기준) 문제로 인하여 배관 파손이 우려되므로 시험 배관 설계압에 따라 반복가압 시험 압력 결정 및 설비 설계압 검토. 수소 감압 시 단열 냉각으로 인하여 피팅부 응결이 우려되므로 시험 시 확인 등이 도출되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 수소 반복가압 시험 설비에 대하여 성정석 위험성평가인 HAZOP을 실시하여 다양한 유해·위험요인을 찾고 이를 예방하고자 대책 및 방안들을 도출하였다. 해당 설비는 총 3개의 Node로 나누어 위험성평가를 진행하였고 62개의 유해·위험요인, 27개의 비정상상태, 41개의 개선권고사항을 찾아냈다. 다양한 유해·위험요인 중 배관·밸브 Leak로 인한 수소 누출, 밸브 오작동으로 인한 과압 등이 주요 위험·요인으로 도출되었으며 위험등급이 3등급으로 제일 높았다.

초기 수소 반복가압 시험설비 설계 시 HAZOP을 적용한다면 실질적 위험요인을 감소시킨 설비 구축이 가능할 것으로 보인다. 추후 설치 위치와 누출 포인트 등을 고려하여 정량적 위험성평가를 수행한다면 종합적인 위험성 분석이 될 것이며 그에 따른 안전관리방안 구축을 통해 안전성 확보가 가능할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 수소도시용수소배관망국산화및실증기술개발(RS-2023-00245737)에 의하여 연구되었음에 감사드립니다.

Reference

1. S. Kang and D. Lee, “Risk Assessment for Performance Evaluation System of Hydrogen Refueling Station”, Transactions of the korean hydrogen and new energy society, Vol. 33, No. 3, pp. 232-239, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.3.232.
2. S. Park, B. Hashim, U. Zahid, and J. Kim, “Global risk assessment of hydrogen refueling stations: trends, challenges, and future directions”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 106, 2025, pp. 1462-1479, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.438.
3. S. Kikukawa, H. Mitsuhashi, and A. Miyake, “Risk assessment for liquid hydrogen fueling stations”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, No. 2, pp. 1135-1141, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.093.
4. I. Mohammadfam and E. Zarei, “Safety risk modeling and major accidents analysis of hydrogen and natural gas releases: a comprehensive risk analysis framework”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 40, No. 39, pp. 13653-13663, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.117.
5. P-82-2023, “Technical Guidelines on Hazard and Operational Analysis (HAZOP) Techniques for Continuous Processes”, Korea Occupational Safety & Health Agency, Retrieved from https://www.kosha.or.kr/kosha/data/guidanceDetail.do.
6. Y. S. Byun, “A study on safety improvement for mobile hydrogen refueling station by HAZOP analysis”, Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 32, No. 5, pp. 299-307, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.5.299.