

상용급 수소액화 플랜트 압축기 테스트베드의 HAZID/HAZOP 위험성평가에 관한 연구

이성우 · 김모세 · 김동민 · 변병창 · 김기덕
김정훈 · 이상윤 · 채효병* · 김진욱** · †이근태
한국기계연구원 LNG 극저온 · 기계기술 시험인증센터
*경상국립대학교 기계시스템공학과 석사과정, **기초과학연구원
(2024년 7월 23일 접수, 2024년 9월 20일 수정, 2024년 9월 21일 채택)

Study on HAZID/HAZOP Risk Assessment of Compressor Test Bed for the Shape of Hydrogen Liquefaction Plant

Seong-Woo Lee · Mo-Se Kim · Dong-Min Kim · Byeong-Chang Byeon · Gi-Dock Kim
Jung-Hun Kim · Sang-Yoon Lee · Hyo-Byung Chae* · Jin-Wook Kim** · †Keun-Tae Lee
Korea Institute of Machinery and Materials, LNG Cryogenic Technology, Korea
**Dept. of Mechanical System Engineering, Gyeongsang national University, Korea*
***Institute for Basic Science, Daejeon, Korea*
(Received July 23, 2024; Revised September 20, 2024; Accepted September 21, 2024)

요약

본 연구에서는 수소액화 플랜트에서 사용되는 주요 기기 중 하나인 압축기의 테스트베드를 구축하기 위한 위험 요소를 정량적으로 분석하기 위해 HAZID & HAZOP 기법을 사용하여 위험성평가를 수행하였다. HAZID를 기반으로 한 위험성 평가에서는 대표적인 위험 요인인 Natural events, Flammable hazards, High pressure 등 3가지를 포함하여 7가지 주요 위험 요소를 도출하였다. HAZOP을 기반으로 한 위험성 평가에서는 총 36개의 이탈을 전개하였으며 압축기 테스트베드의 위험성 평가 및 안전도 향상을 위한 조치계획이 필요한 위험 요소로 총 15개가 도출하였다. 도출한 주요 위험에 대한 안전성을 향상하기 위해 안전계장 기능, 경보 등 추가 안전장치 설치를 제안하였다.

Abstract - In this study, a test bed for a compressor, one of the main devices used in a hydrogen liquefaction plant, was established, and a risk assessment was conducted using the HAZID & HAZOP technique to quantitatively analyze the risk factors of the compressor. The risk assessment based on HAZID derived seven major risk factors, including three representative risk factors: Natural events, Flammable hazards, and High pressure. The risk assessment based on HAZOP developed a total of 36 deviations, and a total of 15 risk factors were derived as risk factors that require risk assessment and safety improvement measures for the compressor test bed. In order to improve safety for the major risks identified, the installation of additional safety devices such as safety instrumentation and alarms was proposed.

Key words : hydrogen, compressor, HAZID, HAZOP, risk assessment

†Corresponding author: ktleee@kimm.re.kr
Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

주요 에너지원으로 사용되고 있는 화석연료인 석탄과 석유는 연소 시 대량의 이산화탄소와 아황산가스와 같은 공해물질이 발생한다. 대기 중 이산화탄소 농도와 온실가스의 증가로 인해 지구온난화가 가속화되며, 불규칙한 기후 변화를 초래할 수 있다. 이에 기후변화를 극복하기 위해 화석연료 대신 수소 같은 청정에너지 사용을 모색하고 있다. 수소는 친환경적이고 지속 가능한 에너지원으로, 현대 에너지 시스템에서 주목받는 중요한 자원이다[1-3]. 수소경제 시대는 환경 보호와 에너지 안보 측면에서 새로운 전망이 될 수 있다. 수소는 효율적인 저장을 위해 에너지 밀도가 높은 극저온 상태로 액화시켜 저장하는 과정이 필요하다. 기체 수소를 20K(-253°C)로 액화하여 얻을 수 있는 액체수소는 기체 수소 대비 부피가 1/800에 달해 에너지 저장 밀도 및 운송 효율을 7배 이상 향상할 수 있다[4-6]. 또한 초전도 장치의 극저온 냉각 시스템에서도 활용될 수 있으며 냉각, 저장, 운반, 그리고 다양한 산업 분야에서의 응용할 수 있어 수소가 지속 가능한 에너지 기술의 핵심 구성 요소가 될 수 있다. 이에 따라 수소의 생산, 이송, 저장 인프라에 대한 수요가 증가할 것으로 보인다. 상용급 수소액화 플랜트는 대규모 수소 공급을 위한 핵심 시설이며 수소의 안정적인 공급과 운송에 중요한 시설로, 수소 경제의 발전과 지속 가능한 친환경 에너지 시스템 구축의 핵심 시설이다.

수소액화 플랜트는 독일의 Linde와 프랑스의 Air Liquide와 같은 해외 선진사의 기술로 구축되고 있다. 하지만 해외 선진사의 기술 독점은 기술 의존도 증가, 기술 비용 상승 및 경쟁력 약화 등 국가의 기술자주성 및 주권 우려를 초래할 수 있다. 그림 1은 한국기계연

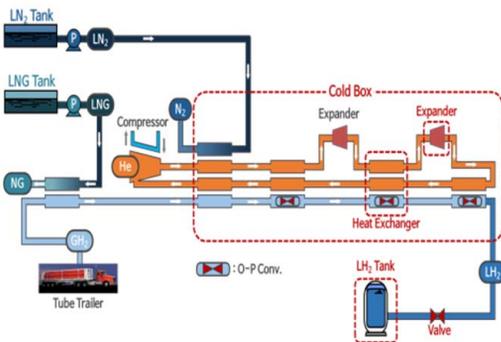


Fig. 1. Hydrogen liquefaction plant process technology

구원에서 연구개발 수행 중인 수소액화 플랜트 공정 기술을 보여준다. 본 시스템은 역브레이튼 극저온 냉각시스템인 압축기, 팽창기, 열교환기로 구성된 극저온 환경을 조성하는 기본적인 시스템이다[7-9]. 수소액화 플랜트의 경우 사고 발생 시 인명 및 자산에 미치는 피해가 크고 대응이 힘들기 때문에, 철저한 안전관리가 중요하다. 국내에서도 2019년 5월 23일 강릉시에 위치한 수소 생산공장에서 수소탱크가 폭발하는 사고로 인해 2명이 숨지고 6명이 중경상을 입었으며, 잠정 피해액은 340억 원이 발생하였다[10]. 이 같은 사고의 재발을 방지하기 위해 더 철저한 위험성 평가가 필요하다. 본 연구에서는 수소 액화 플랜트에서 사용되는 주요 기기인 압축기를 대상으로 위험 요소를 정량적으로 분석하는 HAZID & HAZOP 기법을 사용하여 위험성 평가를 수행하였다. 또한, 수소액화 플랜트용 압축기 테스트베드의 잠재적인 위험 요인을 파악하고, 안전성을 높이는 방안을 제시하였다.

II. 압축기 테스트베드 및 공정

그림 2는 수소액화 플랜트용 압축기 테스트베드의 공정 흐름도를 보여준다. 시스템은 7bar, 20°C의 헬륨 가스를 26bar, 42°C 상태가 되도록 만들어주는 압축기와 급격한 압력변동에 즉각적으로 대응하는 Control Valve, Joule-Thomson Valve, 가스 정화 시스템(Gas Purifier System), GMP(Gas Management Panel), 압축기로 들어가는 헬륨을 7bar, 20°C의 상태로 만들어주는 헬륨 냉각용 열교환기로 구성된다.

GW(글리콜워터) 냉각처리 시스템은 냉각수 순환 펌프, 냉각기 및 냉각탑, 펌프가 장착된 GW 탱크로 구성된다. 추가로 테스트베드 작동에 앞서 배관 내 수분 및 미세 입자를 제거하기 위한 N₂ 공급 시스템이 있는데 기화기를 갖춘 LN₂ 저장 탱크, 진공 펌프로 구성된다.

공정 절차는 Purging, Vacuuming, 헬륨 Filling, GW 냉각처리, 압축기 테스트 공정, 시스템 종료로 진행된다.

Purging은 Main Loop 내부의 이물질(수분 및 미세 파티클 등)을 제거하여 밸브 등 부품을 보호하고 순도 높은 실험 유체를 확보하기 위해 진행한다. Purging이 완료 후, 순도 높은 실험 유체를 사용하기 위해, Main Loop 내 압축기 후단에 배치된 진공 펌프를 사용하여 목표 진공도(10⁻³Torr)까지 Vacuuming을 진행한다. 시험장치 내 목표 진공도에 도달하면 압축기 테스트베드에 공급한다. 실험 유체는 헬륨 버퍼 탱크(29~35bar(g) 유지)에서부터 공급된다.

GW 냉각처리는 테스트 압축기 패키지 내의 인터쿨러와 메인 루프의 He 열교환기에 Ethylene Glycol 30%, Water 70%의 냉각수를 공급하면서 진행된다.

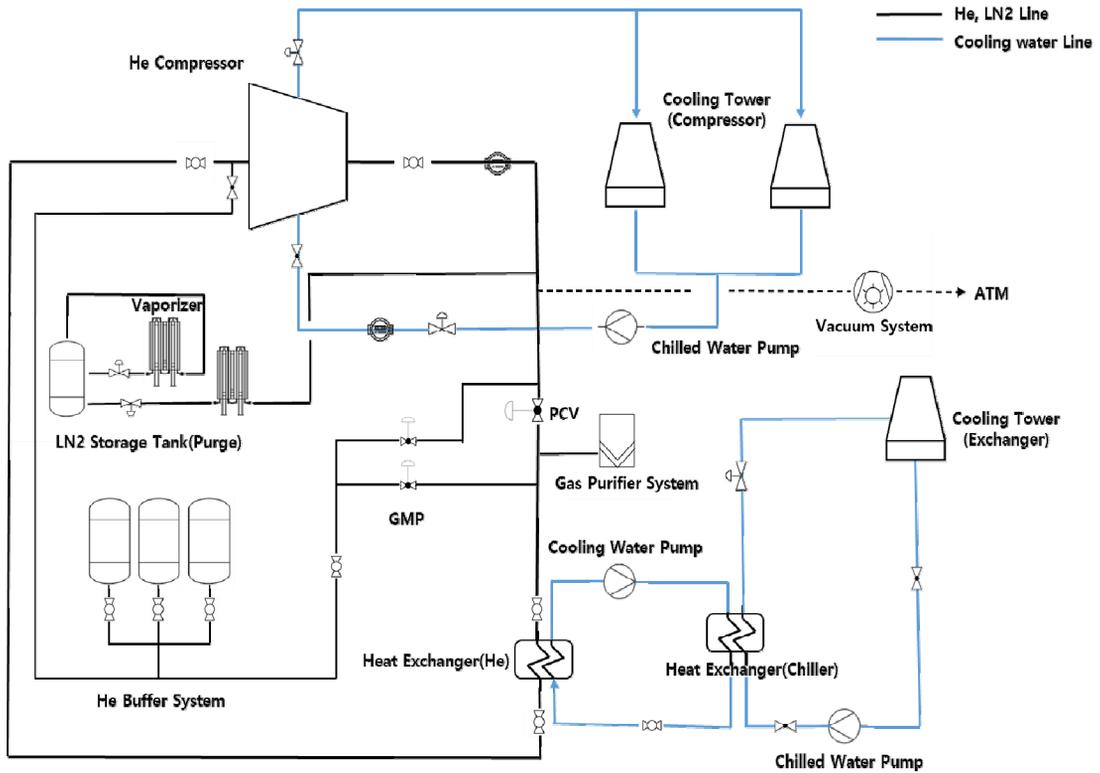


Fig. 2. Process flow diagram of compressor testbed for hydrogen liquefaction plant.

Table 1. operating conditions of Test compressor

Compressor Inlet			Compressor Outlet		
유량 (kg/s)	온도 (°C)	압력 (bar)	유량 (kg/s)	온도 (°C)	압력 (bar)
2.2	20	7	2.2	42	26

압축기 테스트 공정은 표 1에서 볼 수 있듯이 입구 및 출구 작동 조건으로 진행된다. 운전 종료는 압축기 테스트베드의 정상운전 종료 절차에 따라 정지하고 주동력 모터를 중지한 상태로 만든다.

압축기 모터가 완전히 정지되면 일정 시간 후 냉각수 공급을 멈추며 루프 내 온도 압력 및 냉각수 온도 압력이 정상범위로 설정되면 절차에 따라 진행한다.

III. HAZID & HAZOP

3.1. 위험성 평가를 위한 위험성 변수 정의

위험성 평가란 시스템의 개발, 운용 단계에서 잠재된

유해·위험 요인(hazards)을 파악하고 발생할 수 있는 사고 시나리오의 발생빈도(likelihood)와 사고 발생 시 피해의 중대 심각성(severity)을 예측하고, 위험성을 허용할 수 있는(tolerable) 수준으로 제어 및 관리하는 일련의 기법을 의미한다[11, 12]. 위험 요소를 파악하는 방법과 종류에 따라 정량적 또는 정성적으로 평가하는 방법에서 차이를 보인다.

본 연구에서 사용된 HAZID와 HAZOP은 정성적 위험 분석 기법으로 공정 설계 구축 단계에서 위험성 평가에 널리 사용되는 방법이고 HAZOP와 HAZID 수행 절차는 그림 3과 같다.

HAZID는 주로 기본설계, FEED 단계에서 수행되며 주변 환경 및 외부에 미치는 잠재적인 위험이 있는지 판단하는 과정을 말한다.

HAZID의 경우 사람에 대한 영향 및 환경에 대한 영향 등으로 구분하며 각각의 가이드 워드(Hazardous substances, Environment, Equipment Malfunction 등)에 대해 원인을 파악하고 그 결과가 중대한지를 평가하며 기존 안전장치가 적절한지 확인하여 부적절할 경우 recommendation을 부여한다.

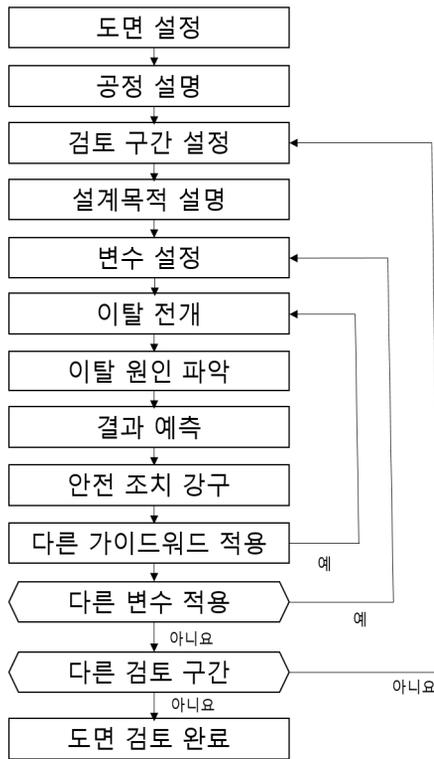


Fig. 3. Procedure of HAZOP & HAZID

HAZOP은 정상적으로 설비에 잠재된 공정 위험을 식별하고 분석하기 위해 사용하는 위험성 평가 방법론이다. HAZOP 방법론은 공정변수에 가이드 워드 (No, Less, More, Reverse, High, Low 등)를 조합하여 만들어진 공정 이탈(Deviation)을 체계적으로 분석하여 위험 시나리오의 누락을 최소화한다.

HAZID는 외부요인, 위험한 매체 등에 관계없이 위험을 식별하는 데 주로 사용되는 반면, HAZOP은 프로세스 설계로 인해 발생하는 위험과 설계 의도에서 어떻게 벗어날 수 있는지에 중점을 둔다. 위험성 평가 방법은 유사하지만 서로 다른 목적을 제공하고 프로젝트의 여러 단계에서 수행할 수 있으며 다양한 측면에 초점을 맞춘다.

위험성 변수 정의는 자산, 인명, 환경 등의 기준을 가지고 발생빈도, 피해의 심각도를 각각 6단계로 그림 4와 같이 구분하였다. 위험성 순위는 프로젝트 위험 평가 매트릭스를 사용하여 4단계로 이루어진다.

- 1) 위험으로 인해 여러 결과 중에서 신뢰할 수 있는 최악의 결과를 선택하여 순위를 매긴다.
- 2) 믿을 수 있는 최악 결과의 심각도를 추정한다.
- 3) 믿을 수 있는 최악의 결과가 발생할 가능성을 추정한다.
- 4) 현재 이용할 수 있는 안전대책의 효과를 고려하여 위험순위를 도출한다.

Consequence					Increasing probability			
Severity rating	People	Assets	Environment	Reputation	A	B	C	D
					Has occurred in E&P industry	Has occurred in operating company	Occurred several times a year in operating company	Occurred several times a year in location
0	Zero injury	Zero damage	Zero effect	Zero impact	L	L	L	L
1	Slight injury	Slight damage	Slight effect	Slight impact	L	L	L	L
2	Minor injury	Minor damage	Minor effect	Limited impact	L	L	M	M
3	Major injury	Local damage	Local effect	Considerable impact	L	M	M	H
4	Single fatality	Major damage	Major effect	Major national impact	M	M	H	H
5	Multiple fatalities	Extensive damage	Massive effect	Major international impact	M	H	H	H

Fig. 4. Risk assessment matrix.

Table. 2. HAZID results.

Deviation	Causes	consequences	Overall risk ranking	Recommendations
Natural events	Lightening	Electrical shock to the system leading to catastrophic damage to overall facilities	medium	1. Consider providing Lightening rod and Grounding for the system 2. The test facility site is recently developed by local government and Geological survey is carrying out. Ensure that the design of the system should consider the survey results for applicable earthquake level and necessary foundation ground work.
	Earthquakes	Structural damage by earthquake / land subsidence, leading to pipe rupture / leakage from the pipe connections	medium	
	Landsliding subsidence	Mechanical impact by floating debris	medium	
Layout	System location adjacent to Control building	Potential H2 gas ingress into Control building in case of leakage from Cold box, leading to fire / explosion	low	3. Consider providing H2 gas detector at the H2 processing equipment area
	Space for maintenance access	Ergonomic issues by insufficient space	low	
Cryogenic hazards	Cryogenic pipe temperature	Cold burn	low	4. Ensure that Firefighting system provided for H2 system should be suitable for H2 fire, Ensure that Zone classification should be defined considering adequate distance from H2 handling equipment 5. Ensure that Firefighting system provided for H2 system should be suitable for H2 fire
	Leakage	Potential structural damage to the equipment exposed to LH2	medium	
	Vacuum insulation failure	Over pressurization in the system including piping	medium	
Flammable hazards	Flange / valve connection failures, leading to leakage	Flammable gas dispersion, leading to potential ingress into Control building, Flash fire, Explosion, Fire escalation to adjacent area	low	6. Establish test procedure including crew access to High pressure section of the system during test operation
			medium	
			medium	
High pressure	Leakage from high pressure section - flange / valve connection failure	Crew injury by being exposed to high pressure jet stream	medium	7. Update Operation manual including limitation of GW system by hot weather condition for test operation
	Pipe rupture during operation	Damage to nearby equipment	medium	
Environmental hazards	Hot weather condition	Vacuum perlite insulation for LN2 tank	low	
Utility failure	Instrument air failure	Potential process upset, leading over pressurization	low	
	Loss of power supply during operation			
Flooding	Leakage from GW system	No critical consequences are identified	low	
Structure failure	Swinging loads during Crane lifting operation for installation of test Compressor	Potential damage to nearby equipment / piping	low	
External fire	Fire escalation from nearby area	External heat ingress leading to overpressurization in H2 / LH2 / LN2 system	low	
Erosion corrosion	Corrosion on pipe surface	Pipe corrosion leading to leakage	low	
Control and automation failure	Weather exposed wiring for Control / monitoring	Potential fault signal in Control / monitoring system	low	

그림 4는 ISO 17776(2016)에서 제안된 경험을 반영하는 위험 매트릭스와 위험 수준별 조치 사항을 보여준다. severity rating은 1,000년 이상에 한 번 발생을 가장 낮은 0단계로 정의하였으며, 이후 1, 2, 3, 4, 5단계는 각각 100~1,000년, 10~100년, 1~10년, 1년에 한 번 이상 발생하는 것으로 정의하였다. 피해의 심각도는 인명, 재산, 환경, 명성으로 나누어지며, 각각 1, 2, 3 단계는 일시적이거나 쉽게 복구할 수 있는 피해를 나타내고, 4와 5단계는 영구적이거나 재난 규모의 피해를 의미한다.

L 단계는 허용 가능한 정도의 낮은 위험도를 의미하며, M 단계는 잠재된 위험을 고려해야 하는 중간 수준의 위험도를 나타내고, H 단계는 매우 위험하여 허용할 수 없는 높은 수준의 위험을 의미한다.

3.2 HAZID 분석

HAZID 중 토론 내용은 워크시트에 기록된다. 일반적인 HAZID 워크시트를 사용하며 워크시트의 내용은 아래와 같다.

- 1) Cause - Accident causes to be sought within the system under discussion,
 - 1-1) Prevention barriers (existing),
- 2) Consequence - Consequences over the vessel itself will be imagined,
 - 2-1) Mitigation barriers (existing),
- 3) Risk ranking - Ranking will be made for each hazard,
 - 3-1) Consequence - Likelihood - Ranking,
- 4) Recommendations: Action-Responsibility-Comment.

HAZID는 전체 헬륨 압축기 테스트 시설을 하나의 Node로 검토하였다. 그러나, 보다 효과적인 논의를 위해 전체 시설 면적을 기준으로 위험 시나리오를 검토하고 특별한 고려가 필요할 수 있는 특정 작업을 추가로 고려하였다. 헬륨 압축기 테스트 시설의 위험 순위는 모든 예방 및 완화 조치와 함께 발생 빈도를 고려하여 각 위험에 관해 결정하였다.

일부 완화 조치를 통해 결과가 발생하는 것을 방지할 수 있지만 해당 완화 조치가 실패하더라도 결과의 순위를 매길 가치가 있다는 점을 확인하였다. 표 2는 HAZID의 결과를 보여준다. HAZID 세션에서는 워크숍 팀원 간의 대화형 토론을 통해 총 21개의 위험이 식별되었다.

세션에서 식별된 9개 위험 요소는 '중간' 등급 위험 등급이고 12개 위험 요소는 '낮음' 등급이다. 헬륨 압

축기 테스트 루프 시설 운영 시 잠재적인 위험을 예방하거나 완화하기 위한 조치로 총 7개의 권장 사항을 기록하였다.

3.2.1 HAZID 분석 안전도 향상 방안 제안

HAZID 수행 결과, 압축기 테스트베드의 운전 중 발생할 수 있는 위험 요소를 21개 식별하였다. 이 중 ALARP 구간을 벗어나 HAZID를 통한 압축기 테스트베드의 위험성 평가 및 안전도 향상을 위한 제안이 총 7개가 도출되었다. 7개의 위험 요소를 분석한 결과, 세 가지 형태의 위험 요소와 결과 유형이 나타났다. 본 연구에서는 특정 유형의 위험 요소를 제시하고, 이들의 위험을 제거하거나 완화하여 안전도를 향상시키는 방안을 제시하였다.

(1) Natural events.

시스템 전체 공정에 영향을 끼칠 수 있는 Natural events로는 대표적으로 악천후 및 낙뢰, 지진 및 지반 침하, 태풍, 강풍으로 인한 잔해물 충돌 등이 있다. 악천후 및 태풍의 경우 사전 방지 작업으로 예보 시 고정을 위한 점검 및 유지보수 작업을 진행한다. 악천후 및 태풍이 발생 시 공정 시스템의 전기 시스템

손상 및 구조적 손상이 예상되어 전체 시설에 치명적인 손상을 초래할 것으로 보인다. 안전성 향상을 위해 공정상에 피뢰침 및 접지 제공, 지반 벽체 지지물 고정 상태 점검 등을 고려하였다. 지진 및 지반 침하의 경우 발생 시 지진으로 인한 구조적 손상 및 배관 파열, 배관 연결부 누수 등에 문제가 발생할 것이 예상되었다. 압축기 테스트베드 설계 시 지진 수준 및 필요한 조사를 통해 공정상 안전성이 향상될 수 있다.

(2) Flammable hazards.

시스템 전체 공정에 영향을 끼칠 수 있는 Flammable hazards로는 대표적으로 플랜지/밸브 연결 불량으로 인한 누수 발생 등이 있다. 플랜지/밸브 연결 불량으로 인한 누수 발생의 경우 사전 방지 작업으로 시스템 전체 공정 주위에 가스 감지기를 설치하였다. 플랜지/밸브 연결 불량으로 인한 누수 발생 시 가연성 가스 분산으로 인해 가스가 건물로 유입하여 인근 지역으로 화재 확대 등 예상되어 인명 및 재산상 큰 손상을 초래할 것으로 예상된다. 완화 사항으로는 휴대용 소화기, 소화전 공정용 방폭형 장비 및 계기 설치 등이 있다. 공정 장비와의 적절한 거리를 고려하여 구역 분류 정의를 통해 공정상 안전성을 향상할 수 있다.

(3) High pressure.

시스템 전체 공정에 영향을 끼칠 수 있는 High pres-

sure에는 대표적으로 플랜지/밸브 연결 불량으로 인한 고압부 누수, 작동 중 파이프 파열 등이 있다. 공정 상에서 High pressure 상황은 압축기 토출부의 압력이 30bar(A)일 때를 고려하였다. 사전 방지 작업으로 공정 전체의 Leak Test와 압축기 내부의 진동 모니터링을 진행하였다. 플랜지/밸브 연결 불량으로 인한 고압부 누수 시 고압의 Jet Stream이 누출되어 인명 부상이 발생할 수 있다. 조치 사항으로는 테스트 작동 중 작업자의 접근 제한을 권고하였다. 두 번째로는 작동 중 파이프 파열 시 주변 공정 장비의 손상이 발생할 것으로 예상된다. 이에 대한 Action으로 압축기 테스트 작동 중 시스템의 고압 색선에 대한 작업자의 접근 제한을 포함한 테스트 절차를 수립하여 공정상 안전성을 향상하였다.

3.3 HAZOP 분석

(1) 검토 구간(Node) 설정

HAZOP을 수행하기 위해서는 공정의 다양한 정보를 정확하게 이해하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 공정 시뮬레이션을 통해 온도, 압력, 유량 등의 기본 운전 조건과 장치 크기 등의 설계 조건

을 도출하였다. 이를 통해 도출된 P & ID는 그림 6, 7과 같다.

본 HAZOP에서는 압축기 테스트베드 루프 시스템의 설계 및 운영 측면을 고려하여 2개의 노드를 평가하였다. HAZOP 분석의 경우 주로 기능 및 배관도를 검토하면서 진행하였다.

그림 6은 압축기 테스트베드의 Node 1에 대한 P & ID이다. Node 1에서는 압축기 테스트베드에서 기체 헬륨이 지나가는 메인 루프로 주 장비로는 압축기, 헬륨 버퍼 탱크, PRV(Pressure Regulator Valve), 가스 정화 시스템, GMP, 헬륨 냉각용 열교환기가 있다. 파란색 line이 실제 헬륨이 지나가는 라인이며 초록색 line의 경우 압축기 인터쿨러 및 애프터 쿨러에 들어가는 냉각수 라인이다.

그림 7은 압축기 테스트베드의 Node 2에 대한 P & ID이다. Node 2는 GW 냉각처리 시스템으로 냉각수 순환 펌프, 냉각기 및 냉각탑, 펌프가 장착된 GW 탱크로 구성된다. 주황색 line은 실제 냉각수가 지나가는 라인이다. 각 검토 구간별 설계 의도, 주요 장비 및 이탈(deviation)의 경우 표 3과 같이 정리하였다.

Table 3. Typical HAZOP Parameters, guide words and deviation example

Node	Main Equipment	Design Intent	Deviation
1	Test Compressor	Helium is supplied to the main loop through the compressor testbed.	More Flow, No/ Less Flow, Reverse/misdirected Flow High Pressure, low Pressure, High Level, Low Level, High Temperature, Low Temperature, Start-up/ Shutdown maintenance, Others
	He Heat Exchanger	A component that helps supply helium to the OT of the compressor testbed by heat exchanging high-temperature helium with low-temperature GW.	
	Buffer Tank	Role in immediate response to sudden pressure fluctuations.	
2	Cooling Tower	Components for cooling the large amount of GW circulating inside the cooling system.	More Flow, No/ Less Flow, Reverse/misdirected Flow High Pressure, low Pressure, High Level, Low Level, High Temperature, Low Temperature, Start-up/ Shutdown maintenance, Others
	Chiller for Heat Exchanger	A component that helps supply the GW of the OT to the He heat exchanger in the main loop.	
	Glycol Water Tank	Components that immediately respond when sudden GW supply is required	

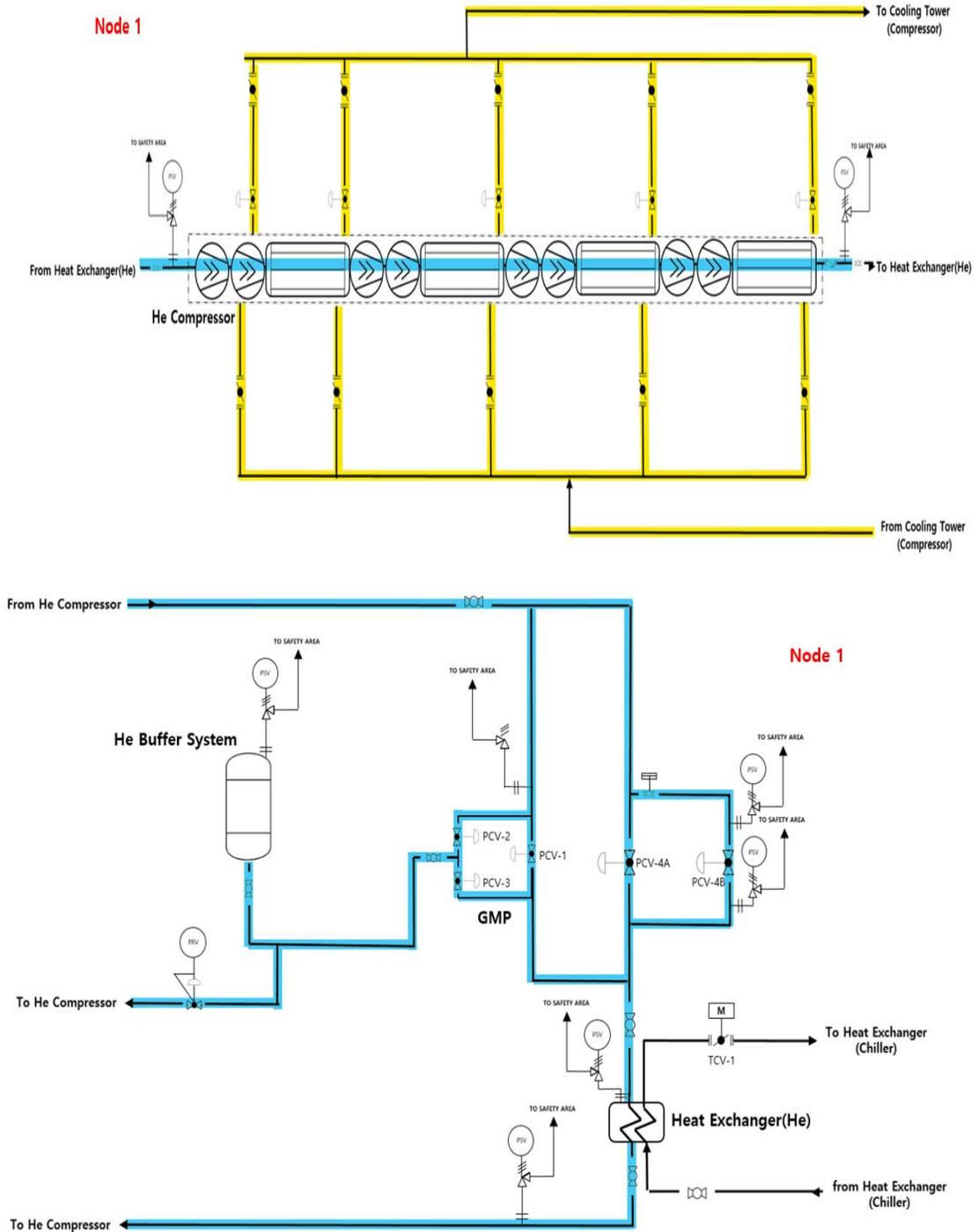


Fig. 5. Node 1 and P & ID of compressor testbed.

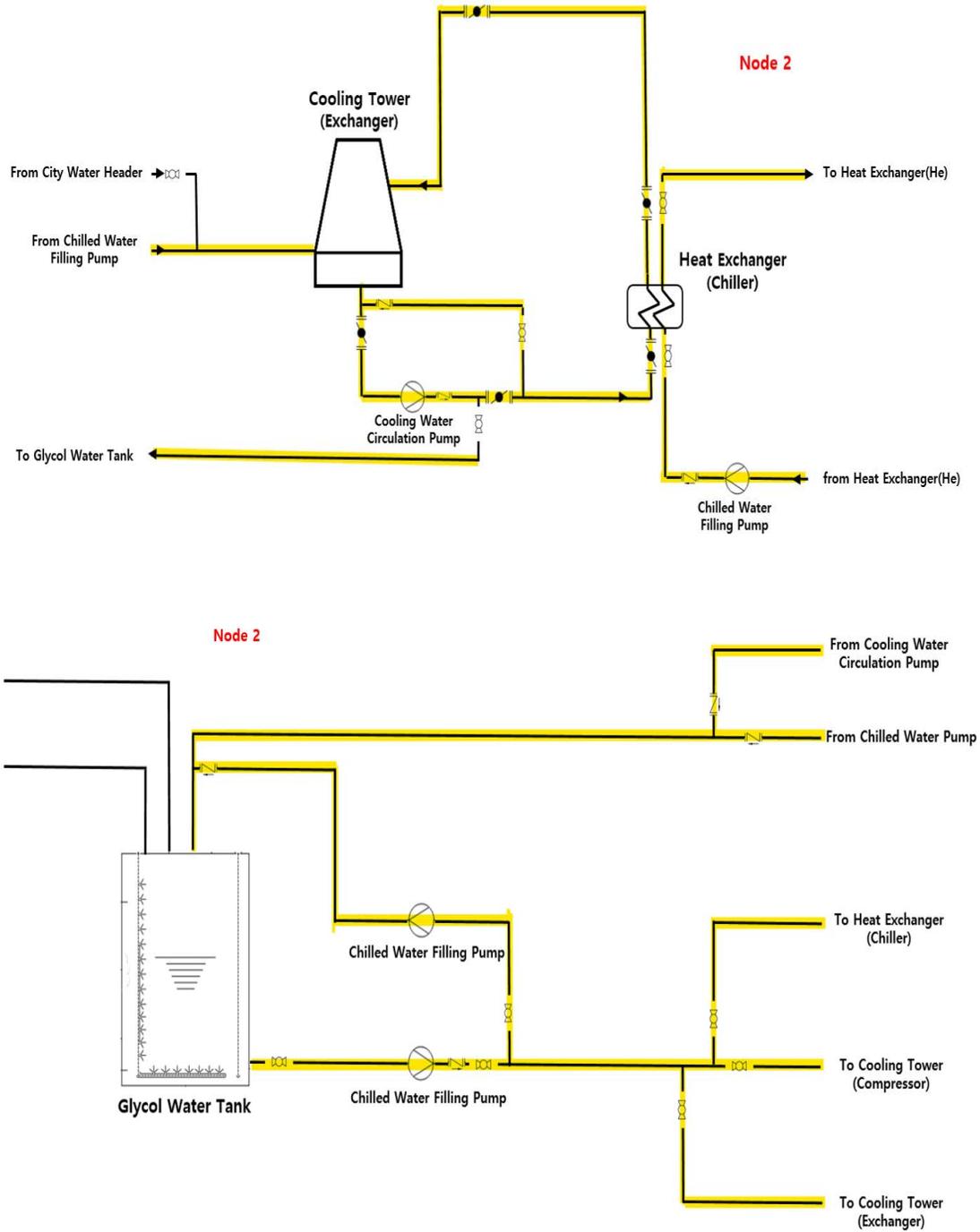


Fig. 6. Node 2 and P&ID of compressor testbed.

3.3.1 HAZOP 분석 안전도 향상 방안 제안

표 4는 HAZOP의 결과를 보여준다. 이탈을 바탕으로 압축기 테스트베드의 위험성평가를 시행한 결과 안전도 향상을 위한 제안이 필요한 위험 요소는 총 15개가 도출되었다. 15개의 위험 요소를 분석한 결과, 4가지 형태의 결과 유형이 특징적으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 Node 별 특정 유형의 위험요소를 제시하고, 이들의 위험을 제거하거나 완화하여 안전도를 향상시키는 방안을 제시하고자 한다.

(1) Node 1 - More Flow

압축기 테스트베드 시스템 전체 공정에 영향을 끼칠 수 있는 More Flow로는 대표적으로 PCV(Pressure Control Valve)-1, 3이 Failed open되었을 때 발생한다. PCV-3이 Failed open될 경우 과도한 헬륨 공급으로 인한 저압 섹션 부에 손상이 예상된다. PCV-3이 Failed open되었을 때 Safeguard로는 PAH(Pressure Alarm High), 압축기 전 후단, GMP 전단, 헬륨 냉각용 열교환기 후단 PSV(Pressure Safety Valve)가 있다. 입구 측

Table 4. HAZOP Results.

Node 1. Compressor Test Loop with Helium flow				
Deviation	Causes	consequences	Safeguards	HAZOP Recommendations
More Flow	Failed opening of PCV-505	Excessive Helium supply leading to overpressurization in the loop, damage to low pressure section	PAH-503, PCV-502, PSV-514, 503, 401, 402	1. Check if pressure monitoring and trip functions are provided within the Compressor package against high pressure condition at the inlet
	Failed opening of PCV-503	Overpressurization at the low pressure section in the loop leading to damage to low pressure section	PAH-503 PSV-502	2. Evaluate the need of providing FCV 500 in the current design 3. Consider providing separate monitoring signal and control for operation of PCV 503
No / Less Flow	Failed close of PCV-505	Insufficient Helium flow / loss of flow in the loop leading to Compressor trip	Compressor trip	4. Check if pressure monitoring and trip functions are provided within the Compressor package against high pressure condition at the inlet
	Failed close of PRV-501 / 502		PAL-503 PALL-503	
	Leakage in HX-501	Helium ingress into GW system leading to GW pump damage Degraded heat exchange performance	PT-508	5. Consider providing PAH / PAHH at PT 508
Reverse/misdirected Flow	Compressor sudden shutdown	Potential damage to Compressor by shut-off / surge pressure		6. Evaluate the need of providing non return valve at the outlet of Compressor
High Temperature	High GW temperature by environmental condition e.g. ambient temperature more than 32	Damage to Compressor by continuous operation with Helium flow in high temperature out of required range	TAH-505,506 TAHH-505,506	7. Ensure that the setpoints of instruments in the main loop are aligned with Compressor in-built instruments setpoints
Composition/ Concentration	Residual N2 gas in the loop after leak test	Degraded Helium purity which potentially impacts on test results		8. Consider applying section-wise vacuum suction operation, or more than one point vacuum measurement in the loop for N2 vent out, before Helium filling
Start-up/ Shutdown/ Maintenance	No critical issues identified			9. Ensure that max. allowable operating pressure for equipment and piping in the loop should be able to accommodate settle down pressure i.e. 16 bar_a
Others				10. Ensure that the basis for overall system design in the loop should be set to based on Compressor inlet and outlet requirements
Node 2. Glycol System				
Deviation	Causes	consequences	Safeguards	Recommendations
No / Less Flow	Failed close of TCV-501	Higher Helium temperature than target, leading to potential damage to Compressor	TAH-505, 506 FT-502	11. Consider providing alarm function at each GW loop for easy indication in ase of any fault occurred in the GW system
	STR-602 clogging at the inlet of CP-601	Degraded heat exchange performance	FT-601	12. Consider providing self-flushing type strainer for STR-602 / 801 / 802
High Pressure	Ref. More Flow			13. Provide vendor specification for HXCH-601
High Temperature	Thermal expansion / contraction with GW loop	Potential mechanical damage in GW loop		14. Consider providing GW buffer (expansion) tank for closed GW loop
Start-up/ Shutdown/ Maintenance	Potential air pocket formation in the loop during GW filling at commissioning	Damage to pump by cavitation		15. Ensure that layout of piping for GW loop should be arranged avoiding air pocket issue within the piping

고압 상태에 대비하여 압축기 패키지 내에 압력 모니터링 및 Trip 기능이 설치되었는지 확인 및 점검을 고려하였다.

PCV-1이 Failed open될 경우 메인 루프의 저압 섹션 부에서 과압이 발생하여 저압 섹션 부의 손상이 예상된다. PCV-1이 Failed open되었을 때 대표적인 안전장치로는 PAH, GMP 후단의 PSV가 있다. 안전성 향상을 위해 PCV-1의 동작을 위한 별도의 모니터링 신호 및 제어 설치를 고려하였다.

(2) Node 1-No / Less Flow

압축기 테스트베드 시스템 전체 공정에 영향을 끼칠 수 있는 Less Flow는 대표적으로 PCV-3, 헬륨 버퍼 탱크 후단의 PRV가 Failed Close 되었을 때와 헬륨 냉각용 열교환기의 누출이 있을 때가 있다.

PCV-3, 헬륨 버퍼 탱크 후단의 PRV가 Failed Close 될 경우 불충분한 헬륨 및 Loop 내 Flow 손실로 인해 Compressor Trip이 발생하여 공정 내 주요 장비의 손상이 발생할 수 있다. PCV-3, 헬륨 버퍼 탱크 후단의 PRV가 Failed Close 될 경우 Safeguard로는 PAL(Pressure Alarm Low), Pressure 모니터링 및 anti-surge line/valve가 내장된 Compressor Trip 등이 있다. 입구 측 고압 상태에 대비하여 압축기 패키지 내에 Pressure 모니터링 및 Compressor Trip 기능이 설치되었는지 확인 및 점검을 고려하였다.

헬륨 냉각용 열교환기의 누출될 경우 헬륨이 GW 시스템으로 유입되어 GW 펌프 및 주요 장비의 손상 및 열교환 성능 저하가 예상된다. 헬륨 냉각용 열교환기의 누출이 되었을 때 Safeguard로는 열교환기 전단의 PT(Pressure Transmitter)가 있다. 안전성 향상을 위해 PT에서 PAH/PAHH 설치를 고려하였다.

(3) Node 2 - No / Less Flow

GIW 시스템 전체 공정에 영향을 끼칠 수 있는 Less Flow로는 대표적으로 TCV(Temperature Control Valve)-1이 Failed Close 되었을 때와 CP(Cooling Water Circulation Pump)-601 입구 측에 STR이 막혔을 때 발생한다. TCV-1이 Failed Close 되었을 때 Safeguard로는 TAH(Temperature Alarm High), 밸브 위치 표시기 등이 있다. TCV-1이 Failed Close가 될 경우 목표로 하는 헬륨 온도보다 높은 온도로 인해 압축기가 손상될 수도 있다. 안전성 향상을 위해 GW 시스템에 오류가 발생한 경우 쉽게 표시할 수 있도록 각 GW Loop에 Alarm 기능 설치를 고려하였다.

(4) Node 1, 2-Others

Node 1인 압축기 테스트베드 시스템과 Node 2인

Glycol Water 시스템 전체 공정에 영향을 끼칠 수 있는 특정 위험 요소에 대하여 정리하였다. Node 1에서의 대표적인 위험 요소로는 Reverse/Misdirected Flow, High Temperature 부분과 Node 2에서 Start-up/Shutdown/Maintenance 부분이 있다.

압축기 테스트베드 시스템 전체 공정에 영향을 끼칠 수 있는 Reverse/Misdirected Flow로는 정전 등으로 인해 압축기가 갑자기 정지되는 상황과 버퍼 탱크의 압력이 30 Bar(A)보다 높을 경우 발생한다. Reverse/Misdirected Flow가 될 경우 차단 또는 서지 압력으로 인해 압축기에 직접적으로 손상될 수 있으며 PCV-2가 열려 있을 때 과도한 헬륨 흐름이 메인 루프로 유입되어 주요 장비의 손상이 발생할 수 있다. 헬륨 버퍼 탱크의 압력 문제의 경우 Safeguard로 헬륨 버퍼 탱크에 PAH, PSV가 있다. 정전 등으로 인해 압축기가 갑자기 정지되는 상황의 경우 안전성 향상을 위해 압축기 출구 부에 체크 밸브 설치의 필요성에 대해 고려하였다.

압축기 테스트베드 시스템 전체 공정에 영향을 끼칠 수 있는 High Temperature는 여름철 같은 환경 조건에서의 높은 GW 온도와 GW 공급이 부족할 경우 발생한다. 고온의 헬륨 flow 상태에서 공정이 계속 진행될 경우 압축기가 손상될 가능성이 높아질 것으로 예상된다. 여름철 높은 GW 온도 상승 문제와 GW 공급이 부족할 경우 Safeguard로 헬륨 냉각용 열교환기 후단에 TAH, 압축기 패키지 내에 온도 모니터링 등이 있다. 안전성 향상을 위해 메인 루프에 있는 기기의 설정 포인트가 압축기 내부 기기 설정 포인트와 일치하는지 확인 및 점검 등을 고려하였다.

Glycol Water 시스템 전체 공정에 영향을 끼칠 수 있는 Start-up/Shutdown/Maintenance로는 시운전 시 GW 충전 중 Loop에 잠재적인 에어 포켓 형성 등이 있다. 에어 포켓이 형성될 경우 캐비테이션으로 인해 GW 펌프의 손상 가능성이 예상된다. 안전성 향상을 위해 GW Loop 레이아웃 배관 내 에어 포켓 문제를 방지하도록 배열 및 조치에 대해 고려하였다.

IV. 결론

압축기 테스트베드는 상용급 액체수소 플랜트에 서 사용할 압축기를 직접 다루므로 고압 등 큰 위험성을 지니고 있어 적절한 위험성 평가와 관리가 필수적이다. 본 연구는 압축기 테스트베드에 이탈 전개 매개 변수와 가이드 워드를 HAZID & HAZOP 방법론을 통해 시스템의 모든 부분에 적용하여 위험성 평가를 진행하였다.

HAZID에서는 전체 헬륨 압축기 테스트 시설을 하

나의 Node로 검토하였다. HAZID 워크숍 결과 팀원 간의 회의를 통해 총 21개의 위험이 식별되었다. 세션에서 식별된 9개 위험 요소는 '중간' 등급 위험 등급이고 12개 위험 요소는 '낮음' 등급이다. 헬륨 압축기 테스트 루프 시설 운영 시 잠재적인 위험을 예방하거나 완화하기 위한 조치로 총 7개의 권장 사항이 기록되었다.

HAZOP에서는 먼저 수행자산, 인명, 환경, 명성에 대한 별도의 기준을 설정하고, 위험 확률과 피해도를 5단계로 구분하여 위험성 매트릭스를 결정하였다. 압축기 테스트베드 시스템의 설계 및 운영 측면을 고려하여 2개의 검토구간으로 나누고 36개의 이탈을 전개하였다. HAZOP 결과 테스트 루프 운영 시 잠재적인 위험을 예방하거나 완화하기 위한 조치로 총 15개의 권장 사항을 기록하였다.

본 연구에서는 이러한 주요 위험 요소에 대해 안정도를 향상시키기 위해 추가 안전장치 설치를 제안하였다. 본 연구는 상용급 액체수소 압축기 테스트베드 안전 설계에 도움을 줄 수 있으며 해당 장비의 국산화와 더불어 향후 액체수소 관련 연구에 크게 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

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

REFERENCES

[1] S. Z. S. Al Ghafri, S. Munro, U. Cardella, T. Funke, W. Notar-donato, J. P. M. Trusler, J. Leachman, R. Span, S. Kamiya, G. Pearce, A. Swanger, E. D. Rodriguez, P. Bajada, F. Jiao, K. Peng, A. Siahvashi, M. L. Johns, and E. F. May, "Hydrogen liquefaction: a review of the fundamental physics, engineering practice and future opportunities", *Energy & Environmental Science*, 15(7), 2690-2731, (2022)

[2] J. O'. M. Bockris, "The hydrogen economy: its history", *International Journal of Hydrogen Energy*,

38(6), 2579-2588, (2013)

[3] S. Sharma and S. K. Ghoshal, "Hydrogen the future transportation fuel: from production to applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1151-1158, (2015)

[4] V. T. Giap, Y. D. Lee, Y. S. Kim, and K. Y. Ahn, "Technoeconomic analysis of reversible solid oxide fuel cell system couple with waste steam", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, 30(1), 21-28, (2019)

[5] J. W. Ahn, "The significance of long-term perception on renewable energy and climate change", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, 29(1), 117-123, (2018)

[6] B. Lee, H. Lee, C. Moon, S. Moon, and H. Lim, "Preliminary economic analysis for H2 transportation using liquid organic H2 carrier to enter H2 Economy Society in Korea", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, 30(2), 119-127, (2019)

[7] M. S. Sadaghiani and M. Mehrpooya, "Introducing and energy analysis of a novel cryogenic hydrogen liquefaction process configuration", *Int. J. Hydrogen Energy*, 42(9), 6033-6050, (2017)

[8] Y. E. Yukel, M. Ozturk, and I. Dincer, "Analysis and assessment of a novel hydrogen liquefaction process", *Int. J. Hydrogen Energy*, 42(16), 11429-11438, (2017)

[9] U. Cardella, L. Decker, J. Sundberg, and H. Klein, "Process optimization for large-scale hydrogen liquefaction", *Int. J. Hydrogen Energy*, 42(17), 12339-12354, (2017)

[10] M. S. Wu and C. J. Lee "A Study for Key Points of PSM to Guarantee the Safety of Liquefied Hydrogen Storage Tank" *Korean Chemical Engineering Research*, 61(1), 74-79, (2023)

[11] R.E. Melchers, "On the ALARP approach to risk management", *Reliability Engineering & System Safety*, 71(2), 201-208, (2001).

[12] D.N. Tchiehe and F. Gauthier, "Classification of risk acceptability and risk tolerability factors in occupational health and safety", *Safety Science*, 92, 138-147, (2017).