Check for updates

Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 32, No. 5, 2021, pp. 299~307
DOI: https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.5.299

KHNES
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

위험과 운전 분석을 통한 이동식 수소충전소 안전성 향상에 관한 연구

변윤섭†

울산과학대학교 화학공학과

A Study on Safety Improvement for Mobile Hydrogen Refueling Station by HAZOP Analysis

YOON-SUP BYUN†

Department of Chemical Engineering, Ulsan College, 57 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea

†Corresponding author : ysbyun@uc.ac.kr

Received 30 August, 2021
Revised 9 October, 2021
Accepted 14 October, 2021

Abstract >> In order to expand the supply of hydrogen vehicles, the first thing to be done is to build an infrastructure to supply hydrogen. There are fixed and mobile types of hydrogen refueling stations that can supply hydrogen. Mobile hydrogen refueling stations have the advantage of supplying hydrogen to two or three areas, so the introduction of mobile hydrogen refueling stations is considered at the initial stage of hydrogen vehicle dissemination. However, mobile hydrogen refueling stations have greater risks than fixed hydrogen refueling stations due to the hazard associated with movement and intensive installation of facilities in vehicle, so stricter design standards to lower the risk must be applied. Therefore, in this study, basic data for establishing safety standards for mobile hydrogen refueling stations were proposed by suggesting improvements such as the location of emergency shutoff valves, the number of gas detectors etc., using HAZOP analysis.

Key words : Mobile hydrogen refueling station(이동식 수소충전소), Hydrogen vehicle (수소자동차), HAZOP analysis(위험과 운전분석), Hazard(위험요소), Risk assessment(위험성평가)

1. 서 론

정부는 2019년 1월 세계 최고 수준의 수소경제 선도국가로 도약하기 위해 「수소경제 활성화 로드맵」을 발표하였고[1], 같은 해 12월에 안전과 산업이 균형있게 발전하는 「수소 안전관리 종합대책」을 발표하였다[2].

또한, 수소자동차 누적 생산량을 2018년 2천 대에서 2040년 620만 대로 확대하고, 이를 위해 수소충전소를 2018년 14개소에서 2022년 310개소, 2040년 1,200개소로 확충할 예정이다[1]. 그리고 3대 핵심시설(수소충전소, 수소생산기지, 연료전지 시설)에 대

2021 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

한 안전관리 종합대책을 수립하고, 일반 국민들이 안전하게 수소충전소를 이용할 수 있게 안전시스템을 구축할 예정이다[2].

이러한 정부의 계획에 따라 수소자동차 생산량을 확대하기 위해 우선 선행돼야 하는 것은 수소충전소이다.

2022년까지 수소충전소를 310개소 구축할 계획인데 2021년 8월 전국에 72개소 수소충전소만 운영되고 있다[1,3]. 이렇게 수소충전소 구축이 늦어지는 것은 수소충전소 구축에 필요한 초기 투자비용, 부지확보의 어려움, 안전성에 대한 우려 등이 종합적으로 영향을 미친 것이다[4,5].

그런데 수소충전소 구축이 늦어지면 수소자동차 생산량에도 영향을 미칠 수 있으므로 수소경제를 활성화하기 위해 수소자동차 보급 초기에는 2-3개 지역에 수소를 공급할 수 있는 이동식 수소충전소 구축을 고려해야 하는데[5], 이동식 수소충전소는 2-3개 지역에 수소를 공급할 수 있는 장점[4,5]이 있는 반면 이동에 따른 위험성과 수소충전소를 차량에 집약적으로 설치함으로 인해 고정식 수소충전소보다 더 큰 위험성을 가지고 있으므로 위험성을 낮추기 위한 더 엄격한 설계기준을 적용해야 한다.

따라서 본 연구는 수소자동차 보급 초기에 활용성이 높은 이동식 수소충전소 표준모델[5]의 전반적인 시스템을 위험과 운전분석을 통해 안전성 향상방안을 제안함으로써 수소충전소의 위험성에 대한 우려를 해소하고, 이동식 수소충전소 안전기준 마련의 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 이동식 수소충전소

2.1 수소충전소

산업통상자원부 고지 제2020-109호 「융·복합, 패키지형 및 이동식 자동차충전소 시설시준 등에 관한 특례기준」에 따라 수소충전소는 제조식 수소자동차 충전소와 저장식 수소자동차 충전소가 있다[6].

또한, 수소자동차 충전에 필요한 설비(충전기는 제외할 수 있음)를 하나의 보호함에 장착한 충전시설을 일정한 장소에 배치하고, 수소자동차에 압축수소를 충진하는 패키지형과 필요한 설비(충전설비는 제외할 수 있음)를 차량에 탑재하고, 이동이 가능한 이동식 수소자동차 충전소가 있다[6].

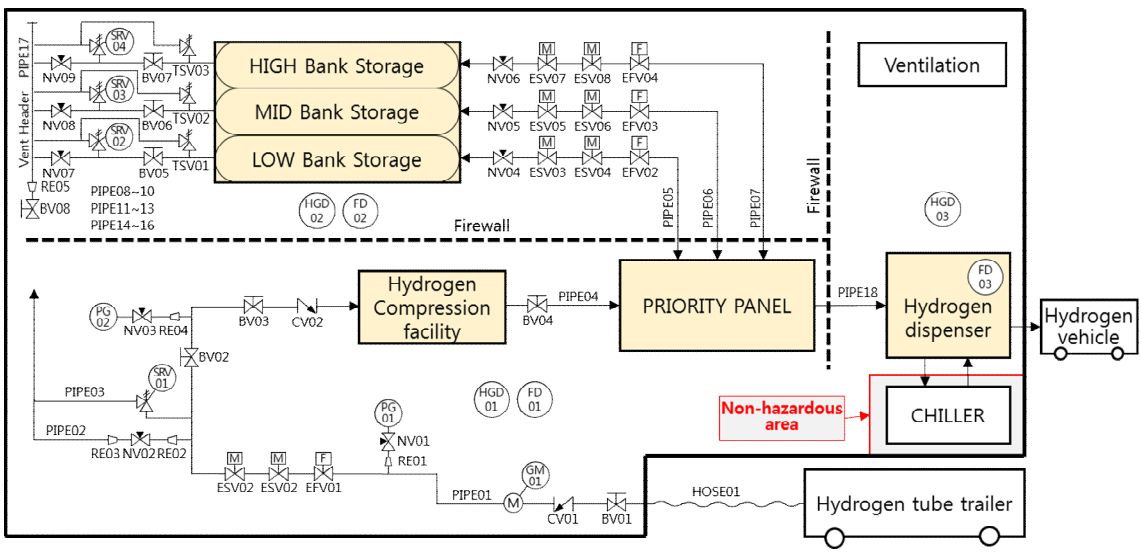

Fig. 1. P&ID of mobile hydrogen refueling station[5]

2.2 이동식 수소충전소 개요

이동식 수소자동차 충전소는 처리능력이 30 ㎥ 이상인(압축기 등 가압장치 없이 자압에 의해 충전하는 설비 제외) 이동식 수소자동차 충전소와 처리능력이 30 ㎥ 미만이거나 압축기 등 가압장치가 없이 자압에 의하여 충전하는 소규모 이동식 수소자동차 충전소로 구분할 수 있다[6].

이동식 수소충전소는 구동이 가능한 차량 적재함에 수소 충전 설비인 압축기, 압력용기, 충전기 등을 설치하여 이동이 가능한 수소자동차 충전소를 의미한다[4,5].

2.3 이동식 수소충전소 표준모델

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 「융·복합 패키지형 및 이동식 자동차충전소 시설기준 등에 관한 특례기준」[6]에서 제시한 압력릴리프밸브, 가스검지경보기, 과류방지장치, 긴급차단밸브, 열작동식안전밸브 등 안전설비를 반영하고, 수소튜브트레일러, 압축설비, 압축가스설비(priority panel, 저장탱크), 충전설비(충전기, 냉각기) 등으로 구성된 이동식 수소충전소의 P&ID를 표준모델로 사용하였다[4,5].

Fig. 1에서 바깥쪽 굵은 실선은 이동식 차량에 탑재된 설비로 수소튜브트레일러에서 공급된 수소(최대압력 20 MPa)는 압축설비에서 90 MPa의 고압으로 압축된 후 압축가스설비에 저장하고, 충전설비를 통해 약 35 MPa 혹은 70 MPa의 압력으로 수소자동차에 수소를 충전하게 된다[4]. 그리고 P&ID에서 직사각형 테두리 영역(압축설비, 압축가스설비, 충전설비)은 설비 전문업체가 공급하는 패키지 설비로 해당 패키지 설비에 대한 P&ID, 사양 등은 기업의 비밀과 관계되는 자료이므로 본 연구에서는 제외하고, 관련 설비를 연결하는 시스템과 부속 설비의 구성요소에 대해서만 연구를 수행하였는데 수소충전소의 주요설비를 연결하는 배관 및 배관 부속품과 부속설비의 종류 및 기능은 Table 1과 같다.

수소튜브트레일러에서 압축설비까지 배관 및 배관 부속품은 flexible hose (HOSE), pipe (PIPE), ball valve (BV), check valve (CV), gas meter (GM), reducer (RE), needle valve (NV), pressure gauge (PG), excess flow shutoff valve (EFV), emergency shutoff valve (ESV), safety relief valve (SRV)로 구성되어 있고, 수소를 공급해 주는 역할을 한다.

압축설비에서 압축가스설비(priority panel)까지 배관 및 배관 부속품은 pipe, needle valve로 구성되어 있고, 압축된 수소를 공급해 주는 역할을 한다.

압축가스설비는 priority panel과 저장탱크로 구성되어 있는데 관련 배관 및 배관 부속품은 pipe, needle valve, emergency shutoff valve, excess flow shutoff valve, thermal type safety valve (TSV), ball valve, safety relief valve, needle valve, reducer로 구성되며, 압축된 수소를 저장 및 충전설비로 공급해 주는 역할을 한다.

Table 1. Types and functions of pipe and accessories

Components	No.	Function
Flexible hose	HOSE1	Hydrogen transfer hose
Pipe	PIPE 1, 4-7, 18	Hydrogen transfer pipe
	PIPE 2, 3, 8-17	Emergency or vent pipe
Ball valve	BV 1-8	Cut off hydrogen flow
Check valve	CV 1, 2	Prevention of hydrogen backflow
Gas meter	GM 1	Hydrogen flow rate measurement
Reducer	RE 1-5	Different sized pipe connection
Needle valve	NV 1-9	Cut off hydrogen flow
Pressure gauge	PG 1, 2	Hydrogen pressure measurement
Excess flow shutoff valve	EFV 1-4	When the hydrogen flow rate exceeds a certain valve, the flow is blocked
Emergency shutoff valve	ESV 1-8	Shut off the hydrogen flow urgently
Safety relief valve	SRV 1-4	Release the pressure when the pressure rises to a constant valve
Thermal type safety valve	TSV 1-3	Release the pressure when the temperature rises to a constant valve
Hydrogen gas detector	HGD 1-3	Detect hydrogen gas leak
Flame detector	FD 1-3	Detect the flame

압축가스설비와 충전설비는 배관으로 연결되어 있고, 충전설비는 충전기와 냉각기로 구성되어 있다. 여기서, 냉각기는 충전기 수소의 온도를 낮추어 주는 역할을 한다.

차량에 탑재된 압축설비 및 priority panel, 저장 탱크 그리고 충전설비 사이는 방호벽으로 구분되어 있고, 각 영역에는 hydrogen gas detector (HGD)와 flame detector (FD)가 설치되어 있다. 또한, 비위험지역으로 구분된 냉각기 영역을 제외하고 전 영역의 전기기계기구는 방폭형 전기기계기구로 설치하고, 차량 상부에는 환기설비가 설치되어 있다.

3. 이동식 수소충전소 위험성평가

3.1 운전과 위험분석 개요

위험성평가는 대상 공정의 유해·위험요인을 파악하여 감소시킬 수 있는 대책을 수립하여 개선하는 일련의 과정이다. 화학공정의 정성적 위험성평가 기법으로 preliminary hazard analysis (PHA), failure mode and effects analysis (FMEA), HAZOP 기법 등을 주로 사용하는데[7], 본 연구에서는 화학공정에 많이 사용되고 있는 HAZOP 기법을 사용하여 이동식 수소충전소의 안전성을 평가하고, 안전성 향상을 위한 개선대책을 제안하였다.

HAZOP은 위험성(HAZard)과 운전성(OPerability)을 결합한 용어로 공정에 존재하는 위험요인과 공정의 효율을 떨어뜨릴 수 있는 운전상의 문제점을 찾아내어 그 원인을 제거하는 위험성평가기법으로써 정해진 규칙에 따라 설계 의도, 설계도면, 각종 기술명세 등을 활용하여 위험성평가를 실시한다[8].

본 기법은 공정변수의 질이나 양을 표현하는 간단한 용어인 가이드워드(guide ward)를 사용하여 공정변수를 이탈시켜 공정의 위험성과 운전상의 문제점을 도출함으로써 공정의 모든 문제를 체계적으로 검토할 수 있을 뿐만 아니라 공정 설계 의도나 조건 등에 대한 상세히 설명을 제공할 수 있다[8,9].

본 연구에서는 Table 2와 같은 양식을 사용하여 설계 의도를 기준으로 도출된 공정변수에 가이드워드(guide words)를 조합하여 이탈을 발생시키고, 각 이탈에 대해 원인, 결과 및 현재 안전조치사항을 평가하여 허용 가능한 범위 내의 위험도(risk)일 경우 평가를 종료하고, 허용범위를 벗어 난 경우에는 개선사항을 제안하였다. 이때 제안한 개선사항을 반영한 위험도를 재평가하여 위험도가 허용범위 내에 있는 경우 위험성평가를 종료하고 허용범위를 벗어날 때에는 추가적인 개선사항을 도출하여 허용범위 이내가 될 때까지 평가를 계속하였다.

HAZOP 기법은 일반적으로 사고 발생 확률(occurrence)과 치명도(severity)의 곱으로 위험도를 추정하는데 본 연구에서는 주변 주민들의 이동식 수소충전소의 안전성에 대한 불신 등을 고려하여 안전성 기준을 향상하고자 위험도 추정 시 이탈 발생 시 이를 검출할 수 있는 정도(detectability)[10]를 포함하였다. 즉, 위험도는 다음 식으로 산출하였다.

$$\text{Risk} = \text{Occurrence} \times \text{Severity} \times \text{Detectability} \quad (1)$$

여기서, 사고발생확률, 치명도 및 검출할 수 있는 정도는 Tables 3-5[10]와 같이 각각 5등급 척도로 하여 위험도(risk)를 평가하였다.

3.2 위험성평가 범위

이동식 수소충전소는 2-3개 지역으로 이동해야 하므로 교통사고, 진동으로 인한 피로 누적 등으로 인

Table 2. HAZOP analysis form

Deviation	Causes	Consequences	Current safety measures	Risk				Improvement recommendation
				Occurrence	Severity	Detectability	Risk	

해 수소가 누출될 가능성이 고정식 수소충전소보다 상대적으로 높을 수 있다. 또한, 주변 주민들의 이동식 수소충전소의 안전성에 대한 불신, 이동식 수소충전소 탑재 차량의 인구 밀집 지역 통과 그리고 이동식 충전소가 설치될 장소 주변의 변동 가능성이 높으므로 고정식 수소충전소보다 더 높은 안전기준의 적용이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 수소튜브트레일러, 압축설비, 압축가스설비 및 충전설비로 구성된 이동식 수소충전소에서 해당 설비를 연결하는 시스템(배관 및 배관 부속품)과 부속 설비에 한정하고 위험성평가를 실시하였다.

즉, 수소튜브트레일러, 압축설비, 압축가스설비 및 충전설비는 제작업체에서 패키지로 공급되고, 제작업체에 따라 상세 P&ID, 사양 등에 차이가 날 수 있으므로 관련 설비의 안전성에 대해서는 본 연구에서 제외하고, 이러한 패키지 설비를 차량에 탑재 시 범용적으로 적용할 수 있는 관련 설비를 연결하는 시스템과 부속 설비의 안전성 향상에 중점을 두고 연구를 수행하였다.

Table 3. Criteria of assessment by occurrence

Occurrence	Criteria
5	Occurs about once in 1 year
4	Occurs about once in 5 year
3	Occurs about once in 10 year
2	Occurs about once in 100 year
1	Almost no frequency of occurrence

Table 4. Criteria of assessment by severity

Severity	Criteria
5	Catastrophic accident
4	Critical accident
3	Bad production or marginal accident
2	Minor accident
1	Negligible accident

Table 5. Criteria of assessment by detectability

Detectability	Criteria
5	Probability of detection impossible
4	Probability of detection is slim but possible
3	Low probability of detection
2	Confirmation through management system
1	High probability of detection

3.3 운전과 위험분석 결과

본 연구에서는 전문업체에서 공급하는 패키지 설비를 제외하고 관련 설비를 연결하는 배관과 배관 부속품에 대해 수소 누출 가능성을 염두에 두고 위험과 운전분석을 실시하였는데 위험성평가 결과의 주요 내용을 정리하면 Table 6과 같다.

이동식 차량에 탑재된 수소충전소의 연결 배관 및 배관 부속품의 위험과 운전분석을 위해 Fig. 2와 같이 수소튜브트레일러와 압축설비 연결 구간, 압출설비와 압축가스설비(priority panel과 저장탱크) 연결 구간, 압축가스설비 내부 priority panel과 저장탱크 연결 구간, 저장탱크와 vent header 연결 구간, 압축가스설비와 충전설비 연결 구간으로 총 5개의 노드(node)로 구분하고, 각 노드별로 HAZOP 분석을 실시하여 이동식 수소충전소의 안전성 향상 방안을 제안하였다.

수소튜브트레일러와 압축설비 연결 구간(노드 1)에는 배관(LINE 01)에서 수소가 누출될 경우 수소 누출을 차단하기 위해 긴급차단밸브(ESV 01, 02) 2개가 설치되어 있는데 CV 01, GM 01, NV 01 등에서 수소가 누출될 경우 그 기능을 수행할 수 없으므로 긴급차단밸브 2개 중 1개는 수소튜브 트레일러에 근접할 수 있는 BV 01 후단으로 이동하여 설치한다. 또한, 압력릴리프밸브(SRV 01)가 고장 날 경우 그 기능을 수행할 수 없으므로 압력릴리프밸브 2개를 설치하고, 배관 배출구(LINE 02)에서 수소가 배출될 경우 수소가 이동식 수소충전소 탑재 차량 내부에 체류할 수 있으므로 배관 배출구는 vent header (LINE 17)로 연결한다. 그리고 배관(LINE 01)의 유량과 압력이 정상 운전조건을 벗어난 때 관리자가 신속히

조치를 취할 수 있도록 flow alarm low/high (FAL/H)와 pressure alarm low/high (PAL/H)를 설치한다.

압축설비와 압축가스설비 연결 구간(노드 2)에는 수소가 압축설비로 역류하는 것을 방지하기 위해 배관(LINE 04)의 BV 04 전단에 check valve를 설치한다.

저장탱크와 vent header 연결 구간(노드 4)에는 vent header의 배출구가 탑재 차량 내부에 설치될 경우 배출된 수소가 이동식 수소충전소 탑재 차량 내부로 확산되어 화재·폭발사고가 발생할 수 있으므로 vent header의 배출구는 차량 상부의 외부에 위치하도록 하고, 고압의 수소가 분출될 경우 vent header의

Table 6. HAZOP analysis results

Node No.	Deviation	Causes	Consequences	Safety device	Improvement recommendation
1	Less Pressure	• Leak from CV 01, GM 01, NV 01 etc.	• Fire and explosion caused by hydrogen leakage	• PG 01 • HDG 01 • ESV 01, 02	• Move and install ESV 01 to a place close to the hydrogen tube trailer
		• SRV 01 operation	• Hydrogen is discharged into the vehicle equipped with a mobile hydrogen refueling station, causing fire and explosion	• SRV 01 • PG 01 • HDG 01 • ESV 01, 02	• Connect the discharge port of the safety relief valve discharge pipe (LINE 02) to the vent header (LINE 17)
	More/Less Pressure	• SRV 01 failure • Hydrogen leak from LINE 01	• Fire and explosion caused by hydrogen leakage	• SRV 01 • PGO 1 • HDG 01 • ESV 01, 02	• Dual installation of SRV 01 • PAL/H installation
	More/Less Flow	• Hydrogen flow rate increases rapidly • Hydrogen leak from LINE 01	• Fire and explosion caused by hydrogen leakage	• GMO 1 • HDG 01 • ESV 01, 02 • EFV 01	• FAL/H installation
2	Reverse Flow	• The pressure of the compressed gas facility is higher than that of the compression facility	• Back flow	• BV 04	• Install check valve in front of BV 04
4	More Pressure	• SRV or TSV operation	• Fire at the end of the vent header (LINE 17)	• TSV 01-03 • SRV 01-04	• Installation of anti-static ring at the end of vent header
	Wrong Amount	• BV08 leak or open	• Fire and explosion caused by hydrogen leakage	• No	• Install plug/cap on BV 08
1-4	Less Pressure	• Hydrogen leakage	• Fire and explosion caused by hydrogen leakage	• HDG 01, 02, 03 • ESV 01-08	• ESV 01-08 are operated remotely from the outside of the mounted vehicle
1, 5	Wrong Action	• Operator misoperation	• Fire and explosion caused by hydrogen leakage	• No	• Gas detection and alarm installation at hydrogen tube trailer and hydrogen vehicle stop
1-5	Less Pressure	• Hydrogen leakage	• If the gas detector fails, fire and explosion occur • Hydrogen is not available	• HDG 01, 02, 03 • ESV 01-08	• Install 3 gas detectors in each area and shut off the emergency shutoff valve when 2 or more show a constant valve (2 out of 3)
		• Hydrogen leakage	• Hydrogen is discharged into the vehicle equipped with a mobile hydrogen refueling station, causing fire and explosion	• Ventilation	• Ventilation system is set to operate all the time or interlocked to operate when the gas detector shows a constant value

배출구에서 정전기로 인해 화재가 발생할 수 있으므로 배출구에는 정전기 방지링을 설치한다. 또한, vent header에서 설치된 BV 08이 열리거나 샐 경우 수소가 탑재 차량 내부로 누출되므로 BV 08에는 플러그나 캡을 체결한다.

그리고 탑재 차량에 설치된 가스검지기가 각 영역에 1개 설치되어 있어 가스검지기가 고장으로 인해 수소가 누출되지 않은 상태에서 설정값을 나타낼 때는 긴급차단밸브가 닫혀 이동식 수소충전소의 기능을 수행할 수 없게 되고, 반대로 가스검지기가 고장으로 인해 누출된 수소를 검지하지 못할 경우에는 대형 화재·폭발사고가 발생할 수 있다. 따라서 이동식 수소충전소의 기능을 유지하고, 안전성을 동시에 확보하기 위해 각 영역에 가스검지기를 3개 설치하고, 3개 중 2개 이상이 설정값을 나타낼 때 긴급차단밸브를 작동하도록 시스템을 개선한다.

또한, 긴급차단밸브(ESV 01-08)는 누출된 수소 농도가 설정값이 되면 자동으로 차단되는데 수소농도가 설정값 미만이라도 관리자가 수동으로 수소 누출을 차단할 수 있도록 이동식 수소충전소 외부에서 원격으로 조작할 수 있는 조작스위치를 설치한다.

마지막으로 수소튜브트레일러와 수소자동차 정차지점에 수소가 추출될 경우 관리자가 즉시 조치할 수 있도록 해당 지점에 가스검지기를 설치하고, 가스경보기는 관리자가 상주하는 곳에 설치한다.

배기설비는 항상 작동하게 설정하는 것이 바람직하다. 그러나 항상 작동하지 않을 경우에는 가스검지기가 일정한 값(긴급차단밸브의 설정값보다 적은 값)을 나타낼 때 배기설비가 작동하도록 연동한다.

이상의 위험성평가 결과 개선사항(구름마크로 표기)을 표준 이동식 수소충전소에 반영하여 안전성이 향상된 이동식 수소충전소의 P&ID는 Fig. 3과 같다.

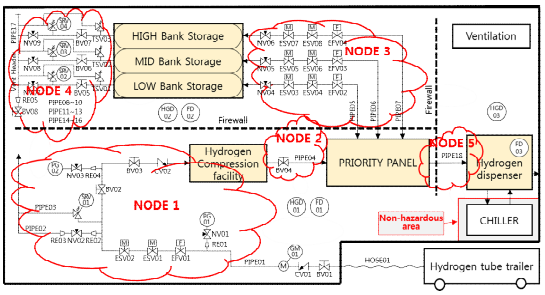

Fig. 2. Node classification for HAZOP analysis

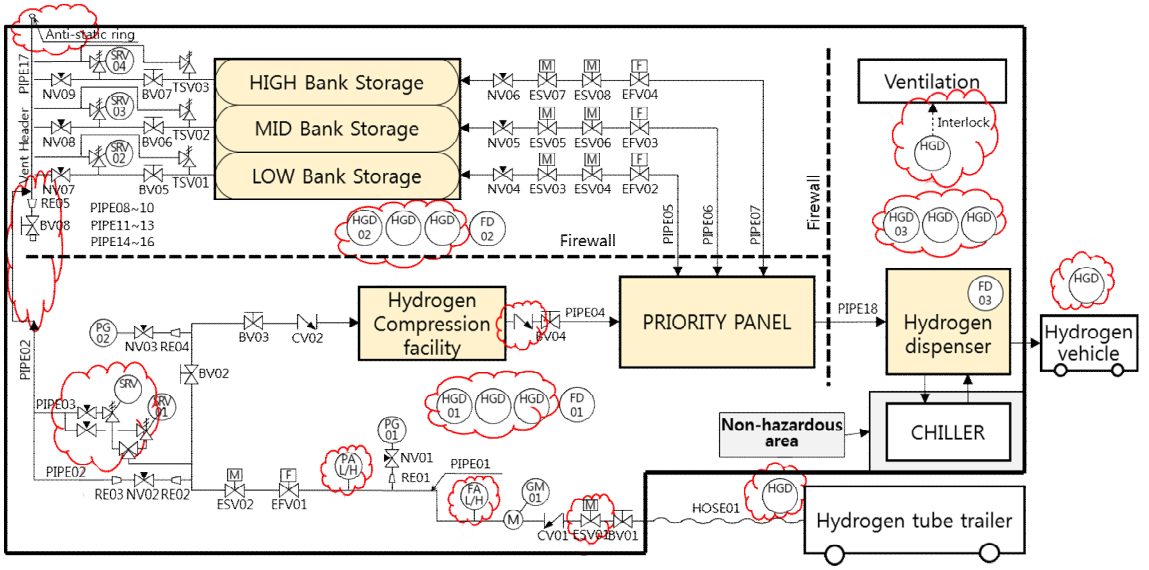

Fig. 3. P&ID of mobile hydrogen refueling station reflecting HAZOP analysis results

4. 결 론

수소자동차 보급 확대를 위해 우선 이루어져야 하는 것은 수소를 공급하는 수소충전소를 구축하는 것이다. 본 연구에서는 수소자동차 도입 초기에 수소충전소 구축 확대를 위해 활용성이 높은 이동식 수소충전소의 주요 위험요소를 규명하고, 위험요소를 완화하거나 제거할 수 있는 안전조치 사항을 다음과 같이 제안한다.

1) 수소튜브트레일러와 압축설비의 연결 배관에 설치되어 있는 긴급차단밸브 2개 중 1개는 수소튜브트레일러에 근접한 곳으로 이동하여 설치한다. 또한, 긴급차단밸브는 수소충전소 탑재 차량 외부에서 원격으로 조작할 수 있도록 설치한다.

2) Vent 배관(LINE 02)은 vent header (LINE 17)로 연결하고, vent header 배출구에는 정전기 방지링을 설치한다.

3) 압력릴리프밸브(SRV 01)는 이중으로 설치하고, 배관(LINE 02)에는 유량과 압력이 정상 운전조건을 벗어날 때 관리자에게 이상 상태를 알려줄 수 있는 FAL/H와 PAL/H를 설치한다.

4) 배관(PIPE 04)의 BV 04 전단에 check valve를 설치하고, 대기로 노출된 모든 밸브의 말단부에는 플러그나 캡을 체결한다.

5) 이동식 수소충전소 탑재 차량의 3영역에 각각 가스검지기를 3개 설치하고, 3개 중 2개 이상이 설정값을 나타낼 때 긴급차단밸브가 닫히도록 연동한다.

6) 수소튜브트레일러 및 수소자동차 정차 시점에 가스검지기를 설치하고, 관리자가 상주하는 곳에 가스경보기를 설치한다.

7) 배기설비는 항상 작동하도록 설정하거나 수소농도가 일정한 값을 나타낼 때 배기설비가 작동하도록 가스검지기와 연동한다.

이동식 수소충전소는 이동에 따른 위험성, 차량에 설비를 집약적으로 설치함으로 인한 위험성 등으로 인해 고정식 수소충전소보다 더 큰 위험성을 가지고 있다. 따라서 위험성을 낮추기 위해 더 엄격한 설계기준을 적용해야 하는데 본 연구에서 제안한 안전성 향상 방안은 이동식 수소충전소의 안전기준 마련을 위한 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2021년 울산과학대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

References

1. Ministry of Trade, Industry and Energy, “Hydrogen economy revitalization roadmap”, 2019. Retrieved from http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=161262&bbs_cd_n=81&currentPage=1&search_key_n=&cate_n=&dept_v=&search_val_v=.
2. Ministry of Trade, Industry and Energy, “Comprehensive measures for hydrogen safety management”, Korea It Times, 2019, Retrieved from http://www.motie.go.kr/motie/py/td/tradefta/bbs/bbsView.do?bbs_cd_n=72&cate_n=3&bbs_seq_n=210274.
3. Hydrogen Convergence Alliance, “Location of hydrogen re-fueling station”, 2022. Retrieved from http://gis.h2korea.or.kr/.
4. D. H. Kim, S. M. Lee, C. H. Joe, S. K. Kang, and Y. S. Huh, “A study on the quantitative risk assessment of mobile hydrogen refueling station”, Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 605-613, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.605.
5. P. J. Kim, S. K. Kang, M. J. Yoo, and Y.S. Huh, “A study on safety analysis of stationary LPG - mobile hydrogen complex refueling station”, Journal of Energy Engineering, Vol. 28, No. 4, 2019, pp. 48-60, doi: https://doi.org/10.5855/ENERGY.2019.28.4.048.
6. Ministry of Trade, Industry and Energy, “Special case standard for complex, packaged and mobile hydrogen refueling stations”, 2020, Retrieved from https://www.law.go.kr/admRulSc.do?menuId=5&subMenuId=41&tabMenuId=183&query=%20%EC%9D%B4%EB%8F%99%EC%8B%9D%20%EC%9E%90%EB%8F%99%EC%B0%A8%EC%B6%A9%EC%A0%84%EC%86%8C#liBgcolor0.
7. C. H. You and J. Y. Kim, “HAZOP study for risk assessment and safety improvement strategies of CO_2 separation process”, Korean Chem. Eng. Res, Vol. 56, No. 3, 2018, pp. 335-342, doi: https://doi.org/10.9713/kcer.2018.56.3.335.
8. KOSHA, “Technical Guidelines on Hazard and Operability (HAZOP) Analysis for Continuous Processes”, P-82-2012, 2012. Retrieved from https://www.kosha.or.kr/kosha/info/searchTechnicalGuidelines.do.

9. S. H. Yu, "Hazard analysis on package type hydrogen station", Hoseo University, 2018, Retrieved from http://www.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p_mat_type=be54d9b8bc7cdb09&control_no=a984952ead7ca6d1ffe0bdc3ef48d419.
10. D. H. Seo, K. W. Rhie, and T. H. Kim, "A study on the hazard factor of packaged hydrogen station by failure mode & effect analysis", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 31, No. 1, 2020, pp. 65-72, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.1.65.