

액화수소 저장탱크 안전성 확보를 위한 PSM 중점사항에 관한 연구

우명선 · 이창준[†]

부경대학교 안전공학과
48513 부산시 남구 용소로 45
(2022년 6월 28일 접수, 2022년 7월 26일 수정본 접수, 2022년 8월 8일 채택)

A Study for Key Points of PSM to Guarantee the Safety of Liquefied Hydrogen Storage Tank

Myoung Sun Wu and Chang Jun Lee[†]

Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan, 48513, Korea
(Received 28 June 2022; Received in revised from 26 July 2022; Accepted 8 August 2022)

요 약

수소 수요가 증가함에 따라 수소를 저장하기 위한 설비의 중요성이 대두되었으며, 국내에서는 다양한 법으로 수소 취급 설비를 규제하고 있다. 산업안전보건법에 따르면 저장량 5톤 이상의 액화수소를 취급하는 경우 공정안전관리 제도를 운용해야 한다. 하지만 현행 산업안전보건법에는 인화성을 띠는 저온액화 물질에 적용하기엔 적절하지 않은 기준이 있다. 본 연구에서는 산업안전보건법과 KOSHA Guide를 바탕으로 PSM 구성요소 중 공정안전자료와 안전운전 계획에서 수소취급 설비를 위해 개선되어야 할 7개 주요 항목에 대해서 제시하였으며, 과학적인 분석을 통해 제시된 7개 항목이 어떤 방향으로 개선되어야 하는지 도출하였다.

Abstract – As the demand for hydrogen increases, the facilities for storing hydrogen has been important, and a few laws for hydrogen facilities should be complied. According to the Occupational Safety and Health Act in Korea, in case liquid hydrogen with a storage capacity of 5 tons or more is handled, a Process Safety Management (PSM) system should be complied. However, there are some standards which are not proper for flammable low-temperature liquefied substances on the current Occupational Safety and Health Act. In this study, 7 key points in process safety information and safety operation procedures among PSM components are suggested and how these key points should be improved is derived based on scientific analysis.

Key words: Hydrogen storage tank, Process safety management, Liquefied hydrogen

1. 서 론

수소는 우주 물질의 75%를 차지하고 있을 정도로 자원이 풍부하지만 인화 범위가 4~76%에 이르는 위험물질이다[1-2]. 또한, 취급 시에 고압으로 저장되어 있어서 누출로 인한 화재·폭발 시 그 피해가 매우 크다. 2019년 5월 23일 강릉 과학단지 수소탱크 폭발 사고, 2019년 6월 10일 노르웨이 수소충전소의 폭발 사고로 알 수 있듯이 수소 사고로 발생하는 피해로 인해 수소 시설에 대한 안전성에 우려가 매우 크며, 위험시설로 생각하는 주민의 반대로 수소 저장

시설의 건설이 지연되는 일이 빈번하다. 하지만 수소는 탄소 중립 시대에 가장 크게 검토되고 있는 대체 에너지원이다. 한국 정부는 온실가스 감축 및 미세먼지 절감을 위해 수송, 발전 등 다양한 분야의 수소 활용을 위한 수소경제 활성화 로드맵을 발표했다[3].

수소의 일반적인 물리화학적 특성은 Table 1과 같다.

액화수소 저장탱크는 용량에 따라 산업안전보건법, 고압가스 안전관리법 및 수소법에 적용을 받는다. 산업안전보건법은 유해·위험 설비로부터 화재·폭발·누출로 인해 근로자가 피해를 보지 않도록 사업주가 공정안전관리(Process Safety Management) 제도를 운영해야 하며 대상 사업장은 착공일 30일 전에 공정안전보고서를 안전보건 공단에 제출하여 심사를 받아야 한다[4,5]. 산업안전보건법 시행령 별표 13에서 인화성 가스와 수소의 규정량을 별도로 제시하고 있다. 수소의 제조·취급·저장량 기준이 5톤이기 때문에 5톤 이상을 취급하는 액화수소 저장탱크를 설치하는 경우 공정안전보고서 제출 대상이다 [5]. 수소를 상온에서 1 Mpa 이상으로 압축하거나 상용 온도에서

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: changjunlee@pknu.ac.kr

‡이 논문은 광운대학교 교재교육 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Table 1. The physical and chemical properties of hydrogen [1]

Molecular Weight	2
Melting Point	-259 °C
Boiling Point	-253 °C
Flammable range	4~76 vol%
Auto ignition Temperature	535.5 °C
Vapor Pressure	760 mmHg (-253 °C)
Solubility	1.82 g/100 ml (20 °C)
Specific Gravity	0.07

0.2 Mpa 이상의 액화가스로 취급하는 경우 고압가스 안전관리법을 준용해야 하며 고압가스 일반제조 허가를 받아야 한다. 단, 액화수소가 아닌 상태의 수소를 취급하는 설비 중 연료전지를 설치하여 전기 또는 열을 사용하기 위한 수소 연료 사용 시설은 수소법을 준용해야 한다[6,7]. 액화수소는 고압가스 안전관리법상 고압가스에 해당이 된다. 5톤 이상의 액화수소 저장탱크를 설치할 시에는 고압가스 일반제조 허가를 받아야 하며 저장탱크 검사를 받아야 한다[7,8]. 산업안전보건법과 고압가스 안전관리법은 모두 안전에 대한 기준이지만 같은 항목이라 할지라도 그 기준이 서로 다를 수 있다. 따라서, 수소 저장탱크는 동일한 항목에 대한 서로 다른 두 기준을 모두 충족해야 한다.

산업통상자원부에서는 액화수소를 취급하는 저장식 수소자동차 충전시설, 제조식 수소자동차 충전시설과 관련된 KGS Code를 제정한 바가 있다[9,10]. KGS Code에는 해당 설비에 대한 제작 및 검사 기준을 포함하고 있지만, 액화수소 저장탱크 설치, 운영에 대한 기준은 다소 미흡하다.

수소 시설 안전과 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다. 조영도 등[11]은 액체수소 사고피해 완화에 관한 연구를 수행하였고 성대현 등[12]은 수소충전소에 대한 정량적 안전성을 평가하였다. 이동열 등[13]은 수소 혼합기의 점화지연과 화학반응 특성을 연구하였으며 조영도 등[14]은 수소 폭발 및 화재 위험성을 연구하였다. 하지만, 액화수소 저장탱크의 전반적인 안전관리를 위한 제도적, 정책적인 연구는 전혀 이루어지지 않고 있다. 또한, 액화수소 저장탱크 제작에서부터 설치, 운영에 이르는 전반적인 안전관리에 대한 기준이 국내

에는 존재하지 않는다. 산업안전보건법에서도 저온 액화된 인화성 물질의 특성을 고려한 법적 기술 기준이 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 산업안전보건법상 공정안전관리 제도에 초점을 맞추어 액화수소 저장탱크의 제작, 설치부터 운영까지 전반적인 안전관리에 대한 중점사항을 검토해 보고자 한다.

2. 공정안전보고서 심사기준

Fig. 1은 공정안전보고서의 주요 내용을 보여주고 있다. 공정안전보고서는 공정안전자료, 위험성평가, 안전운전계획, 비상조치계획으로 구성되며 공정안전자료는 취급 물질의 MSDS, 물질을 취급하는 동력기계와 장치의 사양, 안전밸브 사양, 공정흐름도(PFD), 공정배관계장도(P&ID), 공장배치도, 설비배치도, 내화구조명세, 소화설비·화재탐지 설비, 가스누출감지기 설치계획, 세안·세척설비 설치계획, 폭발위험장소 구분도 및 전기단선도를 포함한다. 공장 운영을 위한 안전운전지침서, 설비검사 및 유지보수지침서, 안전작업허가지침서, 도급업체 안전관리계획, 근로자 교육계획, 가동전 점검 지침, 변경요소 관리계획, 자체감사계획, 공정사고 조사계획이 안전운전계획에 포함되며 안전운전계획의 9가지 지침서를 분리하여 12대 요소로 불린다[15]. 이 절에서는 공정안전보고서 심사에서 수소의 특성을 고려하여 중점적으로 검토되어야 하는 사항을 살펴보았다.

2-1. 설비 재질

0 °C 미만의 저온 수소를 취급하는 경우 재료의 취성파괴(Brittle fracture)를 고려해야 한다. -45 °C 이하의 온도에서는 3.5% 니켈을 함유한 합금을 사용해야 하고 -101 °C 이하에서는 9% 니켈강이나 오스테나이트 스테인리스강을 사용해야 한다고 KOSHA Guide에서 제시하고 있으며[16], KGS Code에서는 ‘95 °C 이하에서 운전하는 압력용기는 내수소취성을 만족해야 한다’라는 표현만 있을 뿐 재질 선정의 세부 기준이 제시되어 있지 않다[17]. 다른 국내외 기술기준에도 저온 액화수소 취급설비 재질에 대해 제시하는 세부적인 기준은 없다.

수소는 입자가 작아서 일반적으로 재질 선정에서 고려하는 부식뿐만 아니라 침투 특성에 대해서도 고려할 필요가 있다. 황승국[18]은



Fig. 1. Main contents of the process safety report.

수소 저장 시간에 따라 재질이 오스테나이트 스테인레스강 계열인 STS304, STS304L, STS316L은 수소 침투 특성에 의해 최대인장강도, 항복강도, 재료연성 등 재질의 내구성과 관련된 항목의 변화가 생긴다고 언급하였다. 따라서, 액화수소를 취급하는 경우 저장 시간에 따라 적합한 오스테나이트 스테인레스강재를 선택할 수 있도록 기준을 제시할 필요가 있다.

2-2. 벤트 시스템

수소 배출 배관 끝단에는 불활성 가스를 사용하여 벤트 시스템 내의 수소와 공기의 가연성 혼합물이 생기지 않도록 퍼지 해야 하며 배출 배관 운전 압력에 맞게 조정해 줄 수 있는 압력조절기 또는 오리피스, 역지밸브를 설치해야 한다[19].

일반적으로 질소가 퍼지 가스로 사용된다. 하지만 질소의 어는점은 $-210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 액체수소의 끓는점($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$)보다 $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 높다[1,20]. 어는점이 더 낮은 질소가스를 수소 벤트 배관의 퍼지 가스로 사용하는 경우, 저온의 액화수소가 방출될 때 질소가 응축 또는 응고되어 벤트 시스템을 막는 문제를 발생시킬 수도 있다. 따라서 저온 수소를 배출하는 배관에는 수소의 어는점을 고려하여 퍼지 가스가 동결되지 않을 수 있도록 연구를 진행할 필요가 있다.

안전밸브에서 배출되는 수소는 벤트 스택에서 방출되어 처리되므로 벤트 스택의 높이가 적절해야 한다.

상온 수소 벤트 스택의 경우 끝단 화재 발생을 가정하여 지표면 최대허용 복사열량 $4,652\text{ W/m}^2$ ($4,000\text{ kcal/h}\cdot\text{m}^2$)을 기준으로 한 높이, 바닥으로부터 3 m, 주변 기기 높이에서 0.6 m 합한 수치 또는 주변 건축물의 지붕 높이에 1.5 m를 합한 수치 중 가장 큰 수치로 정하도록 규정되어 있다. 저온 수소 벤트 스택의 경우는 확산모델을 이용하여 높이를 산정하거나, 일반적으로 화재 발생 시 최대 영향

Table 2. Impact of accidental damage on overpressure [22]

Overpressure		Consequences
kPa	(psi)	
7	1	Partial collapse (Unrecoverable)
20	3	Steel structures of buildings are damaged and they deviate from the foundation
70	10	Total destruction

높이인 7.5 m 중 큰 값을 기준으로 벤트 스택의 높이를 결정해야 한다[19]. 따라서, 공정안전보고서 작성 시 확산모델을 이용한 계산 또는 화재 영향범위에 대한 검토가 수행되어야 한다.

2-3. 안전거리

산업안전보건기준에 관한 규칙 제271조에서는 인화성 가스를 저장·취급하는 설비를 설치하는 경우 폭발이나 화재에 따른 피해를 줄일 수 있도록 설비와 시설 간에 충분한 안전거리를 확보하도록 한다. 다만, 다른 법령에 따라 안전거리 또는 보유 공지를 유지하거나, 공정안전보고서를 제출하여 피해 최소화를 위한 위험성 평가를 통하여 그 안전성을 확인받는 경우는 예외로 인정될 수 있다[21].

산업안전보건기준에 관한 규칙 별표 8에 따르면 수소 저장탱크는 저장용량과 상관없이 단위 공정시설 또는 사무실로부터 20 m 이상 안전거리를 확보해야 하나 저장탱크에 방호벽, 원격조종 소화설비 또는 살수설비가 설치되거나 사무실의 벽이 방호구조로 된 경우 안전거리의 보유 대상에서 예외가 가능하다[21].

KOSHA Guide 사고 피해예측 기법에 관한 기술지침에서는 Table 2와 같이 폭발 과압의 영향을 판단하고 있다. KOSHA Guide에는 폭발 과압의 영향을 산정하는 경우 실제 배관 지름에 따른 누출공의

Table 3. Damage prediction by hydrogen storage capacity

	Capacity (m^3)	Design Pressure (MPa)	Explosion Pressure (MPa)	Operating Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Explosion Damage Range		
					70 kPa	21 kPa	7 kPa
Case 1	50	0.35	0.35	-251	56	118	305
Case 2	20	0.35	0.35	-251	41	87	224
Case 3	5	0.35	0.35	-251	26	55	141

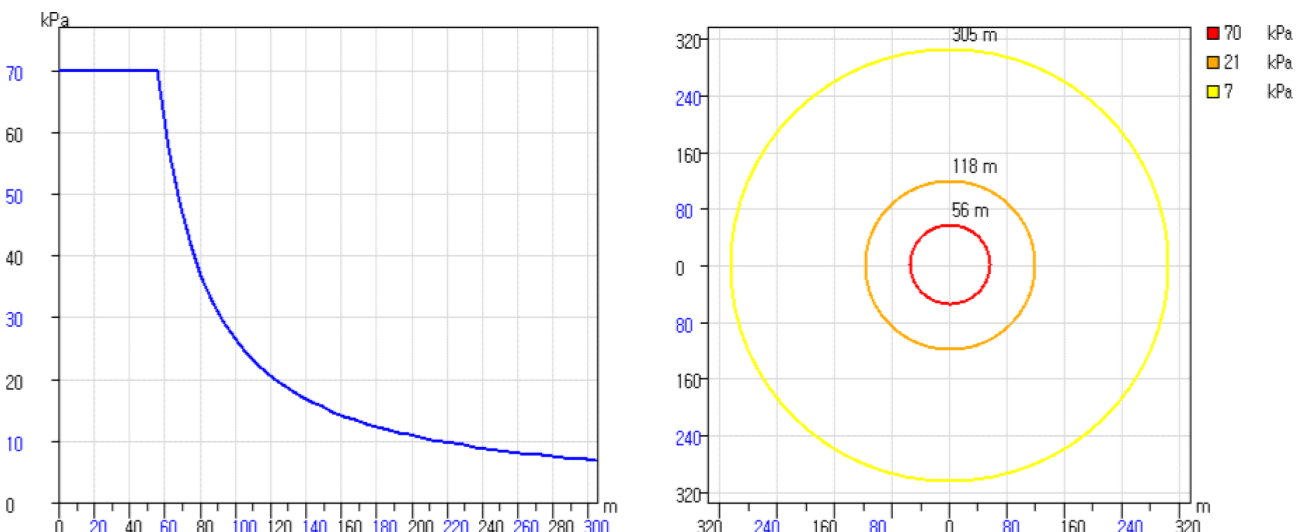


Fig. 2. Damage prediction scope of equipment explosion with storage capacity of 50 m^3 .

Table 4. Liquid hydrogen storage facility safety distance (m) [24]

Exposure	Capacity					Potential Dangerous
	①	②	③	④	⑤	
Incombustible material (minimum 2 hours)	1.5	1.5	1.5	3	6	
The opening of a building	2	3	4	8	16	Explosive atmosphere in the building due to hydrogen leakage
Activities other than fuel injection (Car wash, Car repair shop, etc)	2	3	4	8	16	Explosive atmosphere in case of leakage/ Flam radiation
Public Assembly Facilities	4	6	8	16	25	Immediate public exposure
Sidewalk, Parking, etc	2	3	4	8	16	Explosive atmosphere in case of leakage/ Flam radiation

Note ① $V \leq 0.5 \text{ m}^3$, ② $0.5 \text{ m}^3 < V \leq 2 \text{ m}^3$, ③ $2 \text{ m}^3 < V \leq 8 \text{ m}^3$, ④ $8 \text{ m}^3 < V \leq 60 \text{ m}^3$, ⑤ $60 \text{ m}^3 < V \leq 300 \text{ m}^3$

Table 5. Safety distance by storage capacity as suggested by Hydrogen Regulations [6]

Capacity (m ³)	Protection Facility	
	Type 1	Type 2
Less than 10,000	17 m	12 m
Excess 10,000	21 m	14 m
Less than 20,000		
Excess 20,000	24 m	16 m
Less than 30,000		
Excess 30,000	27 m	18 m
Less than 40,000		
Excess 40,000	30 m	20 m

크기가 명시되어 있다[23]. 액화수소 저장탱크 용량이 5 m³, 20 m³, 50 m³이며, 배관 지름이 2 inch인 경우, KOSHA Guide에는 누출공의 크기가 0.2 inch로 명시되어 있으며, 이 누출공에서 액화수소가 누출될 때, 액화수소 저장탱크의 물리적 폭발 과압크기를 안전보건공단에서 제공하고 있는 사고영향 분석 프로그램인 e-CA로 분석한 결과 폭발 과압에 따른 사고 피해영향 범위를 Table 3 및 Fig. 2에 정리하였다.

KOSHA Guide 수소충전소의 안전에 관한 기술지침에서는 Table 4와 같이 액화수소 저장량에 따른 안전거리를 제시하고 있다. 한편 수소법에도 KOSHA Guide와 같이 저장능력과 보호시설 구분에 따라서 Table 5와 같이 안전거리를 제시하고 있다. 산업안전보건기준에 관한 규칙 별표 8에서는 안전거리 20 m를 제시하고 있지만, KOSHA Guide와 수소법에서는 저장용량에 따라서 안전거리를 20 m보다 적게 확보할 수 있도록 명시되어 있다. 본 연구에서 피해 영향 범위를 산정한 결과를 보면 저장량 50 m³의 경우 액화수소 저장탱크 폭발 시 건물 대부분이 전파되는 70 kPa이 도달하는 거리는 56 m이며, 5 m³인 경우에도 70 kPa이 도달하는 거리는 26 m이다. 따라서, 안전거리와 관련된 좀 더 체계적이고 과학적인 연구가 좀 더 필요하다.

2-4. 방유제

액화수소 저장탱크에 보관되는 물질은 액체 상태의 위험물이므로 탱크로부터 누출되어 확산하는 것을 방지하기 위해 방유제를 설치하도록 산업안전보건기준에 관한 규칙 제272조에 명시되어 있다 [21]. KOSHA Guide 방유제 설치에 관한 기술지침에서 방유제는 저장탱크 용량으로 하되 높이, 저장탱크 간 거리, 저장탱크와 방유제의 거리 기준을 제시하고 있으며, 방유제의 단면적에 대한 기준은 존재하지 않는다[25].

액체 상태의 위험물이 누출되는 경우, 증발하는 위험물의 양은 방

유제의 단면적에 비례한다. 따라서, 방유제의 전체 부피는 저장탱크의 부피보다 커야 하지만, 방유제의 단면적은 위험물질이 확산되는 양과 풀 화제가 발생하는 경우 화재 영향범위에 비례한다. 액화수소 저장탱크에서 누출이 발생하여 풀을 형성하는 경우, 풀의 최대 단면적은 방유제의 단면적이다. 풀의 단면적이 클수록, 화재 영향 범위가 증가하기 때문에 액화수소 저장탱크의 경우는 풀 확산을 방지하기 위한 방유제의 단면적에 대한 기준도 제시되어야 한다.

2-5. 사무실 방호구조

산업안전보건기준에 관한 규칙에 따르면 사무실 등의 벽을 방호 구조로 설치하면 20 m의 안전거리를 준수할 의무가 없다 [21]. 하지만, 폭발이 일어나서 벽이 파손되는 경우 과압이 벽의 상부 및 후면으로 전달될 수 있다. Li 등[26]은, CFD 모델링을 통해 방호벽이 철제인 경우, 과압의 크기가 20 kPa보다 작으면 과압을 방어할 수 있지만, 그렇지 않은 경우는 방호벽 후면으로 과압이 계속해서 진행되게 되며, 이때, 과압은 20% 정도 줄어들음을 증명하였다. 사무실의 벽이 방호구조라고 해도 Table 3의 결과와 같이 가장 적은 용량인 5 m³의 탱크가 폭발하는 경우 20 m의 안전거리를 준수한다고 해도 건물 외벽 뒤쪽의 근로자와 설비가 안전하다고 볼 수 없다. 또한, 근로자의 안전을 위해서는 방호벽으로 이용되는 외벽에는 유리창을 절대 사용하지는 안 된다. 또한, 액화수소 저장탱크와의 거리가 20 m 이상인 사무실도 Table 3의 결과를 보면 절대 안전하다고 할 수 없다. 따라서, 수소 시설에서 사무실을 설치할 때에는 반드시 사고 피해에 즉을 통해 어느 정도 안전한지 분석해야 하며, 이 결과를 통해 안전하지 않다고 판단되면 반드시 방호구조로 설치해야 한다.

2-6. 불꽃 감지기

화재탐지 및 경보설비 설치계획에는 단독경보형감지기, 비상경보설비, 시각경보기, 자동화재탐지설비, 비상방송설비, 자동화재속보설비, 통합감시시설, 누전경보기의 설치 수량을 설치 지역별로 작성하여야 한다[15]. 하지만 자동화재탐지설비를 설치하는 경우, 서식상에는 수량만 작성하게 되어있으므로 수소 화재에 적합한 설비인지는 확인이 불가하다. 수소 불꽃은 눈에 보이지 않아서 불꽃 감지기로는 감지가 안 되는 경우가 많다. 따라서 불꽃감지기를 설치하는 경우 UV/IR 타입(자외선 적외선 복합형)으로 미국 FM에서 수소화재 테스트를 진행하고 인증을 받은 제품처럼 수소 화재 감지가 가능한 설비를 사용해야 한다[27,28].

2-7. 탱크 진공 관리

액화수소 저장탱크는 일반적으로 Fig. 3과 같이 이중 탱크로 제작되며 내부와 외부 탱크 사이에 진공을 형성하여 단열효과를 내도록

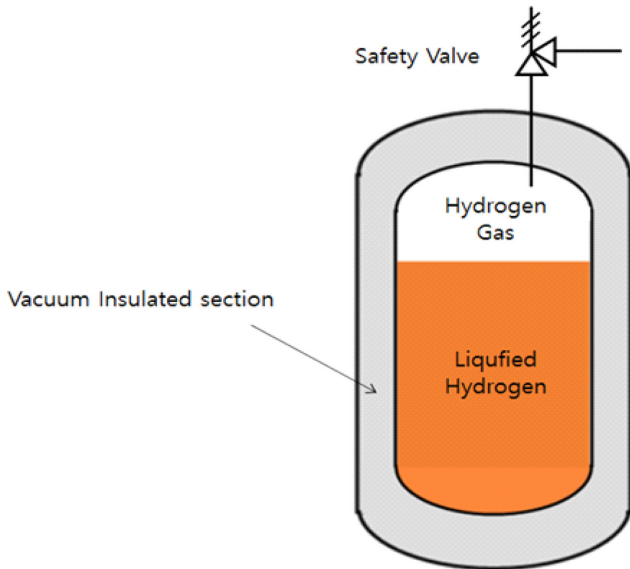


Fig. 3. The diagram of liquified hydrogen tank [29].

한다[29].

이렇게 진공을 형성하여 배관이나 저장탱크를 보냉하는 경우 외부 공기의 유입을 방지하여 진공 구간의 산소 농도가 높아지지 않도록 관리해야 하며 진공단열이 깨짐으로 인해 내부 액화수소가 기화되어 과압이 형성되는 것을 방지해야 한다. 진공 구간의 압력을 주기적으로 확인하거나 공기 농도를 확인하는 방안을 세워 설비관리 기준에 포함해야 한다.

2-8. 주요 사항 요약

Table 6에는 본 연구에서 언급한 7개의 주요 사항을 정리하였다. 중점사항 중에서 직접적인 실험이나 현장 테스트를 통해 결정되어야 할 사항도 존재하며, 안전거리나 사무실 방호구조와 같이 직접적인 실험은 불가능하며, 확산이나 폭발 모델링을 통한 검증이 필요한 항목도 존재한다. 현재 액화수소 저장탱크 제작, 설치 및 운영 시 적용되는 산업안전보건법, 고압가스 안전관리법 및 수소법에 명시된 조항으로는 액화수소의 안전성 확보가 미흡할 수 있으며, 본 연구에

서 제시된 7개 사항에 대해서는 좀 더 체계적이고 과학적인 분석이 이루어져야 한다.

3. 결 론

공정안전보고서는 근로자의 피해를 방지할 수 있도록 산업안전보건법을 충족하며 KOSHA Guide, 국내외 법규 등에서 제시하는 기준에 따라 설비를 설계하고 시공하여 안전을 확보할 수 있도록 안전에 중점을 둔 보고서이다. 하지만 사업장에서 위험물질을 취급할 때 준수해야 하는 법조항과 다양한 KOSHA Guide 중 일반적이지 않은 저온액화상태인 수소가스 취급에 대한 기술기준이 부족한 것이 현실이며 국가적인 차원에서도 수소 설비에 대한 안전성 검토가 진행되고 있는 단계이다.

PSM 구성요소 중 공정안전자료와 안전운전계획에서 수소에 특화되어 검토되어야 하는 사항이 다음과 같이 도출되었다. 액화수소 저장탱크 제작 시 수소 침투 특성을 고려하여 최대인장강도, 항복강도, 재료 연성을 차이를 고려하여 오스테나이트 스테인레스강재를 선택하여야 하며, 수소 벤트 스택 설치 시 지상을 기준으로 최대허용 복사열량이 $4,652 \text{ W/m}^2$ ($4,000 \text{ kcal/h} \cdot \text{m}^2$)을 넘지 않도록 높이를 선정해야 한다. 일반적으로 탱크 및 벤트시스템 파지에 사용하는 질소는 수소보다 어는점이 높으므로 액화수소 벤트시스템에 사용하기에 어려움이 있다. 수소보다 어는점이 낮은 헬륨을 사용할 수 있지만, 비용상의 문제가 발생하므로 현실적으로 질소를 사용할 수 있는 방안을 도출해야 한다. 액화수소 저장탱크 폭발 시 사고피해영향 범위를 고려하여 안전거리를 갖되 저장용량별로 안전거리를 다르게 함으로써 안전성과 경제성을 동시에 확보할 필요가 있으며 액화수소의 증발특성을 고려하여 방유제 면적을 선정하여야 한다. 50 m^3 의 액화수소 저장탱크 폭발 시 건물 대부분이 전파하는 70 kPa 압력이 56 m 거리까지 도달할 수 있으므로 사무실의 벽뿐만 아니라 모든 구조를 방호구조로 해야 한다. 인화성 가스이지만 불꽃이 눈에 보이지 않는 특성을 고려해 수소 화재에 적응성이 있는 제품을 불꽃감지기로 설치할 필요가 있으며 탱크 외부 진공 구간의 진공 깨짐을 방지하기 위해 압력을 주기적으로 확인하거나 진공 구간의 공기 농도를 관리하는 방안을 확보하여 설비관리 기준에 포함함으로써 액화수소의 온도상승으로 인한 급격한 부피팽창을 방지해야 한다.

Table 6. Key Review Criteria of PSM

Key elements	Occupational safety and health act (KOSHA Guide)	Review criteria
Material of Tank	Use Austenitic Stainless Steel	Selection of materials within Austenitic Stainless Steel considering corrosion and penetration characteristics
Vent System	Selection of height of vent stack considering ground radiation heat from vent stack more than $4,652 \text{ W/m}^2$ ($4,000 \text{ kcal/h} \cdot \text{m}^2$)	Selection of height of vent stack considering ground radiation heat from vent stack more than $4,652 \text{ W/m}^2$ ($4,000 \text{ kcal/h} \cdot \text{m}^2$)
Safety Distance	20 m away from unit process facilities or office	Review safe distance by reviewing explosion overpressure range according to the amount of storage and facility based on the amount of leakage
Dike	Presenting the proper capacity guidance of dike, the height of the dike and the minimum distance between the dike and the tank	Consider the size of the dike to minimize the area of the liquid pool that can be created by the leakage of hydrogen
Office Protection Structure	Safety distance is not mandatory if the walls of the office are protected	Exceptions to the safety distance obligation of all structures, such as walls and roofs, are installed as protective structures in consideration of damage to surrounding structures caused by explosions, scattering debris and reflection waves
Flame Detector	-	Installation of adaptive sensors to invisible hydrogen flame
Safety Operation Procedure (SOP)	-	Include procedures for vacuum maintenance in the vacuum insulation section of the storage tank

감 사

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2020R1F1A1055442).

Reference

1. Linde Publication MSDS, "MSDS : Hydrogen," Linde Korea, Seoul(2011).
2. <https://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=104831>.
3. Joint Ministries, A Roadmap for Revitalizing the Hydrogen Economy, Korea(2019).
4. Occupational Safety and Health Act, Korea(2021).
5. Enforcement Decree of the Occupational Safety and Health Act, Korea(2022).
6. The Economic Promotion and Safety Control of Hydrogen Act, Korea(2021).
7. High-Pressure Gas Safety Management Act, Korea(2021).
8. Enforcement Rules of the High-Pressure Gas Safety Management Act, Korea(2021).
9. KGS Publication Code AC216, "Facility/Technical/Inspection Code for Fuel Vehicles Fefueling by Type of On Site Hydrogen Production," KGS, Korea(2022).
10. KGS Publication Code AC217, "Facility/Technical/Inspection Code for Fuel Vehicles Fefueling by Type of Compressed Hydrogen Delivery," KGS, Korea(2022).
11. Jo, Y. D. and Kim, J. J., "A Study on Mitigating Accidents for Liquid Hydrogen," *KIGAS*, **16**(6), 29-33(2012).
12. Seong, D. H., Rhie, K. W., Oh, D. S., Seo, D. H., Kim, Y. H. and Kim, E. J., "Quantitative Safety Assessment for Hydrogen Station," *KOSOS*, **27**(3), 111-116(2012).
13. Lee, D. Y. and Lee, E. J., "Characteristics of Chemical Reaction and Ignition Delay in Hydrogen/Air/Diluent Mixtures," *Journal of the Korean Society of Safety*, **36**(3), 1-6(2021).
14. Jo, Y. D. and Kim, J. J., "A Study on Safety of Hydrogen," *Safety World*, **8**(1), 37-41(2012).
15. Ministry of Employment and Labor Notice, "Regulations for submission, exmination, verification, evaluation of performances status of process safety reports"(2020).
16. KOSHA Publication Guide D-15-2012, "Technical Guidelines for the Selection of Materials for Chemical Equipment," KOSHA, Korea(2012).
17. KGS Publication Code AC111, "Code for Facilities, Technology and Inspection for Manufacturing of High-Pressure Gas Storage Tanks and Pressure Vessels," KGS, Korea(2022).
18. Hwang, S. K., "Hydrogen Charging Characteristics of Austenitic Stainless Steels for the Storage Vessel of Liquid Hydrogen," Ph.D. Dissertation, Dept. of Mechanical Engineering, Dong-eui University, Korea(2017).
19. KOSHA Publication Guide D-42-2012, "Technical Guidelines for Process Design of Hydrogen Stacks and Vent Piping," KOSHA, Korea(2012).
20. Linde Publication MSDS, "MSDS : Nitrogen," Linde Korea, Seoul (2010).
21. Regulations on Occupational Safety and Health Standards, Korea (2021).
22. KOSHA Publication Guide P-102-2021, "Technical Guidelines for Accidental Damage Prediction Technique," KOSHA, Korea(2021).
23. KOSHA Publication Guide P-110-2012, "Technical Guidelines for the Establishment of Damage Minimization Measures in Chemical Factories," KOSHA, Korea(2012).
24. KOSHA Publication Guide D-30-2012, "Technical Guidelines for Safety of Hydrogen Charging Stations," KOSHA, Korea(2012).
25. KOSHA Publication Guide D-8-2017, "Technical Guidelines for Dike Installation," KOSHA, Korea(2017).
26. Li, J., Ma, G., Hao, H. and Huang, Y., "Optimal Blast Wall Layout Design to Mitigate Gas Dispersion and Explosion on a Cylindrical FLNG Platform," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **49**, 481-492(2017).
27. <https://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=101848>.
28. <https://fpn119.co.kr/169163>.
29. Park, B. H., Lee, H. C., Park, D. S. and Son, M. R., "Behavior of Liquid Nitrogen in the Cryogenic Storage Tank," *KIGAS*, **2**(3), 37-48(1998).

Authors

Myoung Sun Wu: Ph. D. Candidate, Department of Safety Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea; mlovef@nate.com

Chang Jun Lee: Ph.D, professor, Department of Safety Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea; changjunlee@pknu.ac.kr