

액화수소 충전소 정량적 위험성 평가 수행 방안 연구

유은결 · 김부승 · 김민아 · 강승규[†]

한국가스안전공사 가스안전연구원 수소연구실

Study on Methods for Conducting Quantitative Risk Assessment of Liquid Hydrogen Fueling Stations

EUNGYEOI YU, BOOSEUNG KIM, MINAH KIM, SEUNGKYU KANG[†]

Hydrogen Laboratory, Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation, 1390 Wonjung-ro, Maengdong-myeon, Eumseong 27738, Korea

[†]Corresponding author :
skkang@kgs.or.kr

Received 14 October, 2024
Revised 19 November, 2024
Accepted 3 December, 2024

Abstract >> In this study, two leakage scenarios for a liquid hydrogen fueling station were constructed using different frequency analysis methods to perform a quantitative risk assessment. The results identified the equipment with the highest risk in both cases, and a comparison was made between the risk levels in the context of individual/societal risk and the societal risk ranking grid for both scenarios. This research proposes effective risk mitigation measures through the analysis of assessment results and provides an understanding of frequency analysis methods, aiming to enhance the safety of liquid hydrogen fueling stations.

Key words : Liquid hydrogen fueling station(액화수소 충전소), Frequency analysis (빈도분석), Quantitative risk assessment(정량적 위험성 평가), Individual/societal risk(개인적/사회적 위험도), Societal risk ranking grid(사회적 위험도 도표)

1. 서론

지구온난화로 인한 기상 이변의 결과로 발생한 폭염, 홍수, 산불 등의 재난이 세계 각국에서 인명 피해 및 재산 손실 등을 입히며 심각한 문제를 낳고 있다. 현재 지구 평균 기온은 파리 기후 변화 협약 중 지정한 마지노선인 산업화 이전 대비 1.5°C 이상 상승한 날이 점차 늘어나는 상황이다¹⁾. 이러한 심각한 환경

문제에 직면하여 대응이 시급한 가운데 수소 산업은 지속 가능하고 친환경적 특성으로 인하여 이에 대한 해결책으로 주목받고 있다. 운송 및 저장 면에서 유리한 액화수소 충전소는 국내에서 연구 단계와 규제 샌드박스를 통한 실증 단계를 거쳐 2024년부터 상업 운영을 시행 중이다.

수소자동차 충전소의 안전한 구축과 운영을 위하여 quantitative risk assessment (QRA)에 해당하는 안

전 영향 평가는 고압가스 안전관리법에 의하여 필수적으로 수행하는 단계이다²⁾. 이에 따라 기존부터 활발히 운영 중인 수소 충전소의 경우 위험성 평가에 관한 여러 연구가 수행되어 왔다³⁻⁷⁾. 하지만 액화수소의 경우 기체 수소와 비교하여 초저온 액화가스이자 한 번에 운송 및 저장되는 질량이 현저히 많다는 특징적 차이가 있음에도 현재까지 안전 영향 평가에 관한 연구 사례와 다양성이 기체 수소 충전소에 비해 미흡한 실정이다. 기존에 진행된 액화수소 충전소 정량적 위험성 평가의 경우⁸⁾ 다양한 충전소 설비 또는 주변 환경에 따른 위험도 결과를 살필 수 있다는 측면에서 성과를 보이지만 동일 충전소에서 사고 시나리오 구성 방식이 위험도 결과에 미치는 영향에 관한 연구 사례는 찾아볼 수 없다.

본 연구에서는 액화수소 충전소의 정량적 위험성 평가를 두 가지 시나리오 입력 방식으로 나누어 수행하고자 한다. 이를 통해 효율적인 위험도 저감 대책을 제안하고 빈도분석 방식에 따른 위험도 결과를 비교하고 평가 방식에 따른 이해를 제공하여 액화수소 충전소의 안전성 확보에 도움이 되고자 한다.

2. 위험성 평가 수행

2.1 액화수소 충전소 구성

평가 대상은 극저온 펌프 압축 방식의 액화수소 충전소로 선정하였다. 해당 충전소는 액화수소 플랜트에서 탱크로리로 액화수소를 운송하고 충전소의 4 ton급 액화수소 저장탱크에 하역하여 액화수소를 공급하는 저장식 충전소이다. 설비는 저장 설비에 해당하는 액화수소 저장탱크, 처리 설비인 부스터 펌프, 고압 펌프, 열교환기 그리고 압축 가스 설비에 해당하는 고압 저장탱크와 충전 설비인 디스펜서까지 총 6개로 구성되었다. 평가 수행 시 최악의 시나리오를 고려한 온도, 압력 등의 설비 조건은 Table 1과 같이 입력하였다.

2.2 기후 조건

대기 온도, 풍속 등 기후 조건의 경우 실제 충전소가 위치한 지역과 가장 인접하고 지형 특성이 유사한 지역의 기상청 평년값(1991-2020년)을 활용하였다. 상세 기후 조건은 Table 2에 제시되었다. 풍향 데이터 또한 인근 지역의 기상청 바람 장미를 Fig. 1과 같이 16방위로 입력하였다. 대기안정도(Pasquill stability)의 경우 한국산업안전보건공단의 최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술 지침에 따라 F (stable) 등급을 사용하였다⁹⁾.

2.3 점화 확률 및 인구 분포

인근 기업과 공장 시설의 점화 확률은 Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer

Table 1. Specifications of LH₂ fueling station

Component	Inventory				Unit
	P (MPa)	T (°C)	Volume (L)	Mass (kg)	
LH ₂ tank	0.45	-250.9	56,483	4,000	1
Booster pump	1.1	-248.4	553	25.76	1
High pressure pump	86.21	-235	553	25.76	1
Heat exchanger	85.86	0.7	64	3.04	1
H ₂ storage tank	89.6	21.1	553	25.76	3
Dispenser	85.86	-41.5	553	25.76	2

Table 2. Atmospheric conditions

Factor	Input data
Atmosphere temperature (°C)	11.8
Relative humidity (%)	66.3
Wind speed (m/s)	2.5
Pasquill stability	F
Solar radiation flux (kW/m ²)	0.5

(VROM)에서 발행한 QRA 지침서인 purple book을 기준으로 선정하였다(Table 3).

부지 조사 결과 주변 공장 시설들의 경우 전기 설비가 밀집되어 있어 면적 점화원 중 가장 높은 값의 점화 확률을 지정하였다¹⁰⁾. 다만 액화수소 충전소의 경우 방폭 설비가 안전기준에 맞게 갖춰져 있으므로 영국의 안전보건청(Health & Safety Executive, HSE)에서 제시된 점화원이 일부 존재하는 대상(“v. few” sources of ignition)의 점화 확률인 0.2로 완화하였다¹¹⁾.

현장 부지 방문을 통해 조사한 시간대별 인구 밀도도 Table 3에 정리하였다. 평가에는 조사 결과 분포가 더 밀집되고 충전소가 운영되는 낮 시간대의 인구 밀도 데이터를 활용하였다.

2.4 사고 시나리오 빈도분석

사고 시나리오는 기존의 압축 수소, liquefied natural gas (LNG) 등의 충전소 사고 사례를 바탕으로 액화수소 충전소에서 발생 확률이 높은 사고를 설계하

였다. 대다수의 사례가 누출 사고였음을 고려하여 수소 흐름 단면적 기준 1%, 10%, 100% 누출로 시나리오를 구성하였다. 이때 시나리오 입력 대상을 설비에 포함된 각각의 부품 또는 하나의 설비로 지정하여 빈도분석 방식에 차이를 두어 해석 방법을 두 가지로 구분하였다.

Case 1은 설비에 포함된 부품 각각의 종류와 직경에 따라 누출 빈도를 입력하여 부품별로 시나리오를 구성하였다. Case 2는 충전소 설비 종류에 따라 부품들의 누출 빈도를 합산하는 빈도분석을 통해 설비별로 시나리오를 구성하였다. 이때 case 2의 경우 설비에 포함된 부품들의 크기가 달라 설비의 대표 직경을 선정하였다. 본 평가에서는 설비 내에서 압력이 가장 높은 토출부 직경을 case 2 설비의 대표 직경으로 설정하였다. Case 1의 시나리오는 Table 4에, case 2의 시나리오는 Table 5에 나타났다.

수소 부품의 누출 직경에 관하여 현재로서는 실제 수소 충전소 누출 데이터 통계가 존재하지 않는다. 따라서 압축 수소의 경우 샌디아 국립 연구소의 SAND 2009-0874¹²⁾에서 제시된 화학, 석유, 압축 가스 및 원자력 산업 등에서 사용된 부품의 누출 데이터를

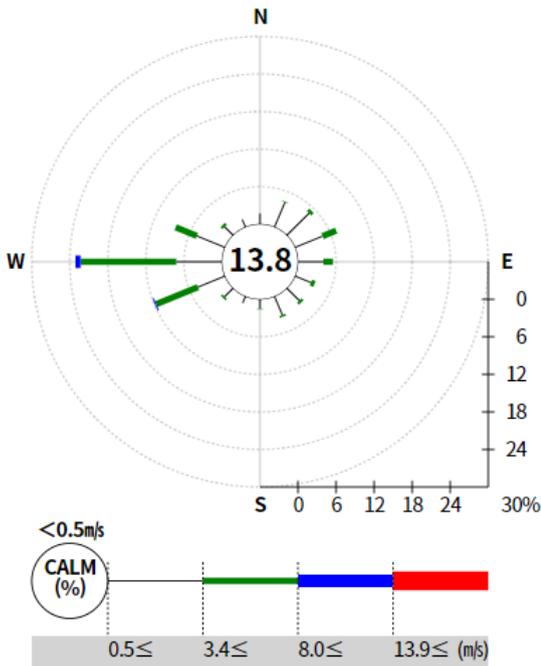


Fig. 1. Wind rose of nearby area (16 directions)

Table 3. Ignition probability and population

Source number	Ignition probability ^{10,11)}	Population	
		Day	Night
1	0.9	55	2
2	0.9	1	0
3	0.9	11	0
4	0.9	5	0
5	0.9	7	0
6	0.9	6	0
7	0.9	80	8
8	0.9	6	0
9	0.9	1	0
10	0.9	2	0
11	0.9	2	2
station	0.2	8	0
Mechanical room	0.2	3	0

Table 4. Facility failure frequency of case 1

Components		Unit	Scenario ¹³⁾	Leak size (mm)	Leak frequency (/year) ^{12,13)}	Ignition probability ¹³⁾	
						Immediate	Delayed
LH ₂ tank	Vessel	1	1% a leak	2.54	2.80E-05	0.008	0.004
			10% a leak	8.03	5.70E-06	0.008	0.004
			100% a leak	25.4	1.20E-06	0.053	0.027
	Valve (0.25")	15	1% a leak	0.64	8.10E-04	0.008	0.004
			10% a leak	2.01	3.75E-04	0.008	0.004
			100% a leak	6.35	7.20E-05	0.008	0.004
	Valve (1")	7	1% a leak	2.54	3.78E-04	0.008	0.004
			10% a leak	8.03	1.75E-04	0.008	0.004
			100% a leak	25.4	3.36E-05	0.053	0.027
	Valve (1.5")	13	1% a leak	3.81	7.02E-04	0.008	0.004
			10% a leak	12.05	3.25E-04	0.053	0.027
			100% a leak	38.1	6.24E-05	0.053	0.027
	Joint (0.25")	12	1% a leak	0.635	9.48E-05	0.008	0.004
			10% a leak	2.01	9.00E-05	0.008	0.004
			100% a leak	6.35	7.68E-05	0.008	0.004
	Joint (1")	9	1% a leak	2.54	7.11E-05	0.008	0.004
			10% a leak	8.03	6.75E-05	0.008	0.004
			100% a leak	25.4	5.76E-05	0.053	0.027
	Joint (1.5")	7	1% a leak	3.81	5.53E-05	0.008	0.004
			10% a leak	12.05	5.25E-05	0.053	0.027
			100% a leak	38.1	4.48E-05	0.053	0.027
Pipe (1")	1	1% a leak	2.54	9.60E-07	0.008	0.004	
		10% a leak	8.03	4.60E-07	0.008	0.004	
		100% a leak	25.4	1.50E-07	0.053	0.027	
Pipe (1.5")	5	1% a leak	3.81	4.80E-06	0.008	0.004	
		10% a leak	12.05	2.30E-06	0.053	0.027	
		100% a leak	38.1	7.50E-07	0.053	0.027	
Booster pump	Valve (0.5")	1	1% a leak	1.27	5.40E-05	0.008	0.004
			10% a leak	4.02	2.50E-05	0.008	0.004
			100% a leak	12.7	4.80E-06	0.053	0.027
	Valve (1")	2	1% a leak	2.54	1.08E-04	0.008	0.004
			10% a leak	8.03	5.00E-05	0.053	0.027
			100% a leak	25.4	9.60E-06	0.053	0.027
	Valve (1.5")	2	1% a leak	3.81	1.08E-04	0.053	0.027
			10% a leak	12.05	5.00E-05	0.053	0.027
			100% a leak	38.1	9.60E-06	0.053	0.027
	Joint (1")	2	1% a leak	2.54	1.58E-05	0.008	0.004
			10% a leak	8.03	1.50E-05	0.053	0.027
			100% a leak	25.4	1.28E-05	0.053	0.027
	Pipe (1")	1	1% a leak	2.54	9.60E-07	0.008	0.004
			10% a leak	8.03	4.60E-07	0.053	0.027
			100% a leak	25.4	1.50E-07	0.053	0.027

Table 4. Continued

Components		Unit	Scenario ¹³⁾	Leak size (mm)	Leak frequency (/year) ^{12,13)}	Ignition probability ¹³⁾		
						Immediate	Delayed	
High pressure pump	Valve (0.56")	1	1% a leak	1.42875	5.40E-05	0.053	0.027	
			10% a leak	4.52	2.50E-05	0.053	0.027	
			100% a leak	14.2875	4.80E-06	0.23	0.12	
	Valve (0.75")	4	1% a leak	1.905	2.16E-04	0.053	0.027	
			10% a leak	6.02	1.00E-04	0.053	0.027	
			100% a leak	19.05	1.92E-05	0.23	0.12	
	Joint (0.25")	3	1% a leak	0.635	2.37E-05	0.008	0.004	
			10% a leak	2.01	2.25E-05	0.053	0.027	
			100% a leak	6.35	1.92E-05	0.053	0.027	
	Joint (0.75")	4	1% a leak	1.905	3.16E-05	0.053	0.027	
			10% a leak	6.02	3.00E-05	0.053	0.027	
			100% a leak	19.05	2.56E-05	0.23	0.12	
	Pipe (0.25")	1	1% a leak	0.635	9.60E-07	0.008	0.004	
			10% a leak	2.01	4.60E-07	0.053	0.027	
			100% a leak	6.35	1.50E-07	0.053	0.027	
	Pipe (0.56")	1	1% a leak	1.42875	9.60E-07	0.053	0.027	
			10% a leak	4.52	4.60E-07	0.053	0.027	
			100% a leak	14.2875	1.50E-07	0.23	0.12	
	Pipe (0.75")	4	1% a leak	1.905	3.84E-06	0.053	0.027	
			10% a leak	6.02	1.84E-06	0.053	0.027	
			100% a leak	19.05	6.00E-07	0.23	0.12	
	Heat exchanger	Vessel	1	1% a leak	1.905	2.80E-05	0.053	0.027
				10% a leak	6.02	5.70E-06	0.053	0.027
				100% a leak	19.05	1.20E-07	0.23	0.12
Joint (0.75")		2	1% a leak	1.905	1.58E-05	0.053	0.027	
			10% a leak	6.02	1.50E-05	0.053	0.027	
			100% a leak	19.05	1.28E-05	0.23	0.12	
Pipe (0.75")		2	1% a leak	1.905	1.92E-06	0.053	0.027	
			10% a leak	6.02	9.20E-07	0.053	0.027	
			100% a leak	19.05	3.00E-07	0.23	0.12	
H ₂ storage tank	Vessel	3	1% a leak	1.42875	2.37E-06	0.008	0.004	
			10% a leak	4.52	1.35E-06	0.053	0.027	
			100% a leak	14.2875	6.90E-07	0.23	0.12	
	Valve (0.56")	9	1% a leak	1.42875	4.86E-04	0.008	0.004	
			10% a leak	4.52	2.25E-04	0.053	0.027	
			100% a leak	14.2875	4.32E-05	0.23	0.12	
	Flange (1.5")	4	1% a leak	3.81	9.60E-04	0.053	0.027	
			10% a leak	12.05	1.08E-04	0.053	0.027	
			100% a leak	38.1	1.16E-05	0.23	0.12	
	Joint (0.56")	12	1% a leak	1.42875	9.48E-05	0.008	0.004	
			10% a leak	4.52	9.00E-05	0.053	0.027	
			100% a leak	14.2875	7.68E-05	0.23	0.12	
	Pipe (0.56")	10	1% a leak	1.42875	9.60E-06	0.008	0.004	
			10% a leak	4.52	4.60E-06	0.053	0.027	
			100% a leak	14.2875	1.50E-06	0.23	0.12	
Dispenser			1% a leak	1.43	1.74E-04	0.008	0.004	
			10% a leak	4.52	8.32E-05	0.053	0.027	
			100% a leak	14.29	3.84E-05	0.053	0.027	

바탕으로 베이지안(Bayesian) 추정값을 사용한다.

액화수소의 경우 이러한 추정값에 LNG 데이터를 적용해 초저온 액화가스 특성을 고려한 부품별 누출 빈도가 SAND 2023-14224¹³⁾로 발표되었다. 기체수소 충전소는 SAND 2009-0874를 통해 모듈별 누출 빈도가 제시되었다. 하지만 액화수소 충전소의 경우 부품별 데이터는 존재하나 설비 또는 모듈별로 제시된 신뢰성 있는 데이터가 발표된 바 없으며 기체 충전소에서 쓰이는 설비와 종류나 설계 형태에 차이가 존재한다. 따라서 SAND 2023-14224의 액체수소 부품별 파라미터를 활용하여 각 case에 맞게 설비별 빈도분석을 진행하였다. 다만 dispenser의 경우 액화 및 기체 충전소 간 차이가 거의 없다고 판단하여 case와 관계없이 SAND 2009-0874에서 제시된 모듈별 누출 빈도를 활용해 동일 시나리오를 입력하였다^{12,13)}.

즉시 점화, 지연 점화 확률의 경우 HyRAM+ (Sandia

National Laboratories, Albuquerque, NM, USA)를 통해 각 설비의 조건에서 시나리오별 누출 유량을 계산한 뒤 SAND 2023-14224에서 제시된 누출 유량에 따른 즉시 점화, 지연 점화 확률을 기준으로 입력하였다. 범위는 <0.125, 0.125-6.250, >6.250 kg/s 총 세 가지로 이에 따른 점화 확률값을 적용하였다¹³⁾.

누출 위치는 지표면으로부터 1 m 상부로 지정하였으며 모든 시나리오의 방출계수는 1로 선정하였다.

2.5 위험성 평가 기준

Safeti 프로그램(DNV, Høvik, Norway)을 활용한 QRA 수행으로 도출된 결과를 개인적 위험도, 사회적 위험도, 사회적 위험도 도표 총 세 가지 risk 표현 방식을 통해 두 가지 시나리오 case별 위험도를 비교하였다.

위험도 기준의 경우 HSE의 위험도 기준과 국내 한국가스안전공사에서 제시하는 수소자동차 충전소 안전영향평가 지침을 따랐다^{2,14)}.

3. 위험성 평가 결과

3.1 개인적 위험도

Case 1의 개인적 위험도 평가 결과는 Fig. 2에, case 2의 개인적 위험도 결과는 Fig. 3에 나타났다. HSE에서 제시하는 조건부 허용 영역(as low as reasonably practicable, ALARP)의 상한은 public에 대해 1×10^{-4} , workers에 대해 1×10^{-3} 이다. 해당 기준에 따라 두 case 모두 $1E-04$ /yr 라인부터 형성되어 ALARP에 해당하는 개인적 위험도를 가졌다^{2,14)}.

또한 두 결과의 $1E-04$ - $1E-07$ /yr 위험도 범위 비교 시 case 1보다 case 2의 라인이 넓은 범위에 형성되어 case 2가 더 높은 위험도를 가짐을 확인하였다.

3.2 사회적 위험도

사회적 위험도를 나타내는 FN curve는 Fig. 4와

Table 5. Facility failure frequency of case 2

Component	Scenario ¹³⁾	Leak size (mm)	Leak frequency (/yr) ^{12,13)}	Ignition probability ¹³⁾	
				Im-	Del-
LH ₂ tank	1% leak	3.81	2.14E-03	0.053	0.027
	10% leak	12.05	1.09E-03	0.053	0.027
	100% leak	38.1	3.49E-04	0.23	0.12
Booster pump	1% leak	2.54	2.87E-04	0.008	0.004
	10% leak	8.03	1.40E-04	0.053	0.027
	100% leak	25.4	3.70E-05	0.23	0.12
High pressure pump	1% leak	1.905	3.31E-04	0.053	0.027
	10% leak	6.02	1.80E-04	0.053	0.027
	100% leak	19.05	6.97E-05	0.23	0.12
Heat exchanger	1% leak	1.905	4.57E-05	0.053	0.027
	10% leak	6.02	2.16E-05	0.053	0.027
	100% leak	19.05	1.43E-05	0.23	0.12
H ₂ storage tank	1% leak	1.43	1.55E-03	0.008	0.004
	10% leak	4.52	4.29E-04	0.053	0.027
	100% leak	14.29	1.34E-04	0.23	0.12
Dispenser	1% leak	1.43	1.74E-04	0.008	0.004
	10% leak	4.52	8.32E-05	0.053	0.027
	100% leak	14.29	3.84E-05	0.053	0.027

Fig. 5로 나타냈다. HSE가 제시하는 사회적 위험도 기준의 상한선은 치사 1 N일 때 빈도 1E-02 (1/yr), 치사 10,000 N일 때 빈도 1E-06 (1/yr)로 그래프에서 그래프의 상단직선에 해당한다.

Case 1의 경우 하단 직선의 밑부분인 허용 영역 내에 curve가 형성되었다. 반면 case 2는 허용 영역 위로 일부 curve가 형성되어 ALARP에 해당하는 값을 보였다^{2,14)}.

두 FN curve의 치사자 수에 따른 빈도를 Table 6에 정리하였다. 이를 보면 N의 최댓값도 case 2가 8로 case 1의 최댓값인 7보다 증가하였다. 결과적으로 사회적 위험도 비교 시 case 2가 더 높은 위험도 결과를 보였다.

다만 개인적/사회적 위험도 평가 시 입력한 누출 빈도는 추후 제정될 액화수소 충전소 KGS code의 바탕이 될 실증 기준 내의 독립 방호 장치를 고려하지 않은 수치를 적용하였다. 충전소 구축 시 필수적으로 설치되는 가스 검지기 및 긴급 차단 밸브 또는 과압 안전밸브/파열판 등을 고려하면 방호계층 분석

(layer of protection analysis)의 독립 방호 장치 적용을 통한 빈도 저감 조치를 시행할 수 있다¹⁵⁾.

3.3 사회적 위험도 도표

사회적 위험도 도표의 주요 지수인 위험도는 해당 사고 시나리오로 인한 잠재적 치사자 수를 평균 연

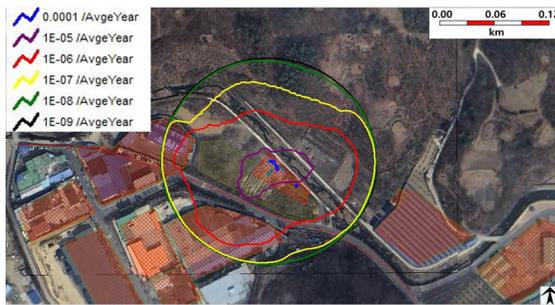


Fig. 2. Individual risk contours of case 1



Fig. 3. Individual risk contours of case 2

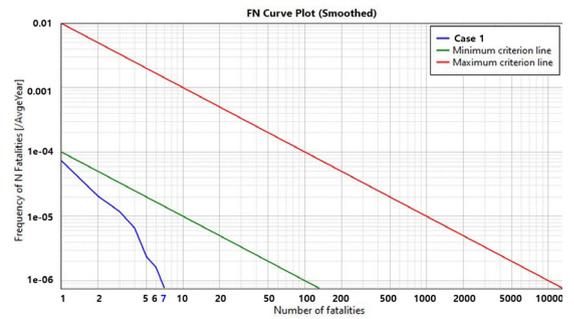


Fig. 4. Societal risk result (FN curve) of case 1

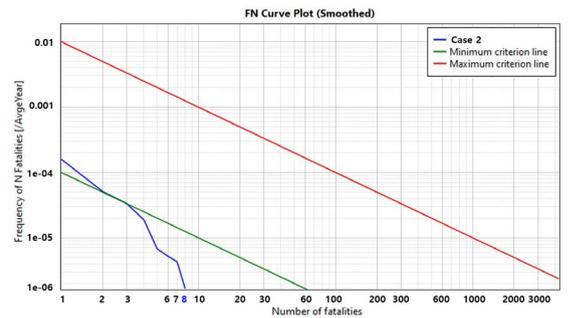


Fig. 5. Societal risk result (FN curve) of case 2

Table 6. Frequency values of FN curve by number

Case 1		Case 2	
Number of fatalities	Frequency (/AvgeYear)	Number of fatalities	Frequency (/AvgeYear)
1	7.33E-5	1	1.60E-4
2	2.06E-5	2	5.13E-5
3	1.19E-5	3	3.34E-5
4	6.56E-6	4	1.89E-5
5	2.36E-6	5	6.79E-6
6	1.60E-6	6	5.20E-6
7	7.74E-7	7	4.29E-6
-	-	8	1.66E-6

도에 따라 나타낸 값이다. 또한 전체 시나리오 중 해당 시나리오가 차지하는 위험도의 백분율 값을 위험 기여도로 나타냈다.

도표 도출 후 case별로 충전소 설비에 따라 위험도 지수들을 Table 7로 정리하였다. 두 case의 액화수소 저장탱크의 위험 기여도가 각각 79.80%, 92.99%로 산출되어 위험성 대부분을 차지하였다. 이는 액화수소 저장탱크의 누출 직경, 누출 빈도와 수소 저장량이 다른 설비에 비해 상당히 높은 값을 가졌기 때문이다. 따라서 해당 충전소에서 효율적인 안전성 확보를 위해서는 액화수소 저장탱크에 가스 검지기 및 화염 검지기와 연동한 긴급 차단 시스템을 마련하고 과압 안전밸브를 설치하는 등 액화수소 저장탱크 중심의 개선 조치를 시행하면 효과적으로 위험도를 낮출 수 있다.

Case 간의 차이를 보면 개인적/사회적 위험도와 마찬가지로 case 1의 위험도 총합이 1.17E-04로 case 2의 2.81E-04보다 낮게 측정되었다.

이는 case별 시나리오 입력 시 설정한 누출 직경의 영향으로 보인다. 두 case의 가장 큰 차이는 입력 시 설정하는 누출 직경이었다. 누출 빈도의 경우 합하거나 개별로 입력하는 방식은 다르지만 결과적으로 지도의 각 누출 지점에서 입력된 빈도의 총합이 같을 시 위험도 결과에는 사실상 영향을 미치지 않았다. 반면 총합이 같은 누출 빈도라도 누출 직경이 변화

할 시 결과에 차이를 보였다.

Case 1은 실제 충전소의 정확한 누출 직경을 입력한 경우이고 case 2는 설비 부품들이 가지는 여러 직경 값을 무시하고 한 가지 누출공 값이 이를 대표한 경우이다. 이러한 과정에서 case 2 설비의 대표 직경을 실제 직경보다 평균적으로 크게 설정하였을 시 위험도가 증가하였고 실제보다 작게 설정하였을 시 위험도가 상대적으로 축소되었다.

Table 7의 설비별 위험도를 비교한 결과를 보면 액화수소 저장탱크, 고압 펌프의 경우에는 대표 직경이 다소 크게 설정되었고 열교환기는 비슷하게, 부스터 펌프 및 고압 저장탱크는 작게 설정되었음을 알 수 있었다. 디스펜서는 Tables 4, 5에서 확인할 수 있듯이 동일한 시나리오를 입력하여 case 간 위험도에 차이가 없었다.

또한 총 위험도 값을 기반으로 비교하면 결과적으로 case 2의 설비별 대표 누출 직경이 case 1의 부품별 누출 직경 평균보다 전반적으로 컸기 때문에 개인적/사회적 위험도 및 위험도 도표상에서 case 2가 더 높은 위험도 결과를 나타낸 것으로 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 액화수소 충전소를 대상으로 QRA를 수행하여 액화수소 충전소의 안전성 확보 방안을 검토하고 사고 시나리오의 빈도분석 방법에 따라 도출된 위험도 결과를 비교하여 빈도분석 방식에 대한 이해를 제공한다.

개인적 위험도는 두 가지 방식 모두 조건부 허용 영역에 해당하고 사회적 위험도의 경우 부품별 분석 방식은 허용 영역, 설비별 분석 방식은 조건부 허용 영역의 결과를 도출한다. 개인적/사회적 위험도를 허용 영역까지 완화하기 위해서는 액화수소 실증 기준 또는 추후 제정될 KGS code에 따른 사고 예방 조치가 필요하다.

또한 사회적 위험도 도표에서 액화수소 저장탱크의 위험 기여도가 전체 위험도의 대부분을 차지한다. 따라서 효과적인 위험 저감을 위해서는 액화수소 저

Table 7. Major indices in the risk ranking grid

Component	Case 1		Case 2	
	Risk integral [1/AvgYear]	Risk Pct.	Risk integral [1/AvgYear]	Risk Pct.
LH ₂ tank	9.35E-05	79.80%	2.62E-04	92.99%
Booster pump	1.06E-06	0.90%	8.08E-07	0.29%
High pressure pump	3.49E-06	2.98%	4.20E-06	1.49%
Heat exchanger	1.78E-07	0.15%	1.80E-07	0.06%
GH ₂ tank	1.67E-05	14.25%	1.23E-05	4.37%
Dispenser	2.24E-06	1.91%	2.24E-06	0.79%
Total	1.17E-04	100%	2.81E-04	100%

장탱크 중심의 안전 대책이 필요하다. 이를 위하여 실시간 모니터링 및 긴급 차단 시스템을 적용하고 액화수소 저장탱크의 일일 점검 및 운전원 정기 교육 등을 권장한다.

빈도분석 방법 비교 시 개인적 위험도, 사회적 위험도, 사회적 위험도 도표의 총 세 가지 평가 결과에서 부품별 분석보다 설비별 분석이 높은 위험도를 보인다. 부품별 분석은 시간이 다소 소요되지만 더 세밀하고 정확한 평가 수행이 가능하고 설비별 분석은 평가가 간결한 대신 설비의 대표 직경에 따라 위험도 결과에 차이를 보여 직경 선정 시 합리적 가이드라인이 필요하다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 2022년의 산업기술혁신사업 지원으로 수행되었습니다(No. 20227310100010, 액화수소 충전소 구축 연계 안전성 평가/실증 및 안전기준 개발).

References

1. M. T. McCulloch, A. Winter, C. E. Sherman, and J. A. Trotter, "300 years of sclerosponge thermometry shows global warming has exceeded 1.5°C", *Nature Climate Change*, Vol. 14, 2024, pp. 171-177, doi: <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01919-7>.
2. Korea Gas Safety Corporation (KGS), "Guidelines for safety impact assessment of hydrogen vehicle refueling station", KGS, Korea, 2022.
3. S. Kang, Y. Huh, and J. Moon, "A study on safety improvement for packaged hydrogen refueling station by risk assessment", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 28, No. 6, 2017, pp. 635-641, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.6.635>.
4. S. Kang and D. Lee, "Risk assessment for performance evaluation system of hydrogen refueling station", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 33, No. 3, 2022, pp. 232-239, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.3.232>.
5. B. S. Kim, K. J. Suh, E. Yu, and Y. Choi, "Effects of ignition timing and equivalent ratio on the CFD analysis of explosion risk in machinery room of hydrogen refueling station", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 39, No. 4, 2024, pp. 48-55. Retrieved from <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART003109808>.
6. B. S. Kim, K. J. Han, S. T. Hong, and Y. Choi, "A study on safety impact assessment of a multiple hydrogen refueling station", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 28, No. 1, 2024, pp. 85-99, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2024.28.1.85>.
7. W. Park, S. Choi, I. Lee, and S. Kang, "Hydrogen industry cycle infrastructure safety analysis", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 33, No. 6, 2022, pp. 795-802, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.6.795>.
8. W. I. Park, S. K. Kang, I. W. Lee, Y. Y. Yang, and C. H. Yu, "A study on the safety of liquefied hydrogen refueling station through quantitative risk assessment", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 27, No. 4, 2023, pp. 116-122, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2023.27.4.116>.
9. Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), "Technical guidance on the selection of worst and alternative case scenario (P-107-2020)", KOSHA, 2020. Retrieved from <https://www.kosha.or.kr/kosha/data/guidanceP.do>.
10. P. A. M. Uijt de Haag and B. J. M. Ale, "Guideline for quantitative risk assessment: purple book", Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2005. Retrieved from <https://publicatiereksgevaarlijkestoffen.nl/documents/81474/1664357417-pgs3-1999-v0-1-quantitative-risk-assessment.pdf>.
11. J. H. Daycock and P. J. Rew, "Development of a method for the determination of on-site ignition probabilities (Research Report 226)", Health and Safety Executive, 2004. Retrieved from <https://www.hse.gov.uk/Research/rrhtm/rr226.htm>.
12. J. L. LaChance, W. G. Houf, L. Fluor, and B. Middleton, "Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards", Sandia National Laboratories, 2009, doi: <https://doi.org/10.2172/983689>.
13. B. Ehrhart, E. Hecht, and B. Schroeder, "Hydrogen plus other alternative fuels risk assessment models (HyRAM+) version 5.1 technical reference manual", Sandia National Laboratories, 2023, doi: <https://doi.org/10.2172/2369637>.
14. Center for Chemical Process Safety, "Appendix B: survey of worldwide risk criteria applications", Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria, 2009, doi: <https://doi.org/10.1002/9780470552940.app2>.
15. Ministry of Environmental, "Guidelines for preparing off-site impact assessment report", National Institute of Chemical Safety, 2018. Retrieved from <https://nics.me.go.kr/sub.do?menuId=125>.