



정량적 위험성평가를 통한 액화수소충전소 안전성 고찰

박우일 · 강승규 · 이인우 · 양윤영 · †유철희

한국가스안전공사

(2023년 10월 13일 접수, 2023년 12월 25일 수정, 2023년 12월 26일 채택)

A Study on the Safety of Liquefied Hydrogen Refueling Station through Quantitative Risk Assessment

Woo-Il Park · Seung-Kyu Kang · In-Woo Lee · Yun-Young Yang · †Chul-Hee Yu

Korea Gas Safety Corporation, Chungcheongbuk-do 27738, Korea

(Received October 13, 2023; Revised December 25, 2023; Accepted December 26, 2023)

요약

본 연구는 탄소중립 사회 실현을 위해 추진 중인 국제사회(한국, 미국, 유럽, 일본 등)의 수소경제 동향 분석과 더불어, 국민과 밀접한 핵심 수소 사용시설인 기존 구축·운영 중인 기체수소충전소와 향후 구축 예정인 액화수소충전소의 유형별 차이점을 비교·분석하였다. 또한, 정량적 위험성평가 프로그램인 SAFETI를 활용하여 액화수소충전소의 안전성을 분석하고, 조건부 허용영역인 개인적·사회적 위험도와 설비별 위험도 순위를 고려하여 설비 배치 등의 안전성 제고 방안에 대해 제안하였다.

Abstract - In addition to analyzing the hydrogen economy trends of the international community (Korea, the United States, Europe, Japan, etc.), which is being promoted to realize a carbon-neutral society, this study compared and analyzed the differences between the gaseous hydrogen refueling station, which is a key hydrogen-using facility close to the people, and a liquefied hydrogen refueling station that is scheduled to be built in the future. In addition, SAFETI, a quantitative risk assessment program, was used to analyze the safety of liquefied hydrogen refueling stations and In consideration of the individual and societal risks and the ranking of risks by facility, which are conditional allowable areas, a plan to improve safety such as facility layout was proposed

Key words : hydrogen system, hydrogen refueling station, risk assessment program, hydrogen consequence model, hydrogen safety standards

I. 서론

최근 전 세계의 기후 문제는 지구온난화를 넘어 지구열대화로 심화되고 있다. 기후변화의 가장 주된 원인으로는 화석연료 사용 및 산림파괴 등으로 인한 인위적인 온실가스 배출이 지목된다. 이로 인해 해수면 상승, 가뭄, 태풍, 폭설, 한파 등의 이상기후가 발생함에 따라 국제사회는 탄소중립 사회로의 전환을 위한 움직임이 본격화되고 있다. 탄소중립

실현을 위해선 상당량의 온실가스 감축 노력이 필요하며 그 방안으로 수소가 주목받고 있다. 수소는 열과 전기를 생산하면서 온실가스와 미세먼지 등 유해물질 배출이 없는 친환경 에너지로써 탄소중립의 핵심 수단이 된다. 특히, 재생에너지(태양열, 풍력 등)를 활용하여 수소를 생산하게 되면 탄소중립 발전 실현이 가능한 장점이 있다.[1]

본 연구에서는 수소경제 고도화에 따른 국제적 수소경제 동향을 분석하고 국민과 가장 밀접한 수소 시설물인 수소충전소가 고압 기체수소가 아닌 액화수소를 활용해 구축·운영될 예정에 따라 정량적 위험성평가 프로그램을 이용해 액화수소 사용

†Corresponding author:wipark@kgs.or.kr

Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

간 안전성 제고 방안에 대해 제안하고자 한다.

II. 연구 배경

2.1. 국내 수소경제 동향

한국의 수소 산업 육성 정책은 세계 최고 수준 수소 활용 분야 경제 선도를 위해 연료전지, 수소전기차, 수소충전소 보급계획 등의 수소 활용 방안을 담은 ‘수소경제 활성화 로드맵’(19년)을 시작으로 수소법 제정을 근거로 수소 분야 법정계획인 ‘제1차 수소경제 이행 기본계획’(21년), 청정수소 생태계 조성 계획 및 산업 육성을 위한 규제혁신 내용이 담긴 ‘수소 안전관리 로드맵 2.0’(23년) 등의 정책을 지속적으로 수립·추진 중이다.[1, 2, 3]

국내 수소 산업은 초기 연료전지, 수소전기차(승용) 활용처 개발 추진으로 2023년 9월 말 기준 Table 1, 2와 같이 보급하는 성과를 거뒀다. 현재는 액화수소, 수소 및 암모니아 혼합·혼소 발전 등의 수소 신기술 개발과 활용처는 수소버스·트럭 등 상용차로 다양화 및 대형화되었다. 또한, 정부 보조금 중심의 시장에서 세계지원 정책, 수소발전 입찰시장 도입 등을 통해 민간 주도 경쟁 시장친화적 기반이 마련되고 있다.[4, 5]

2.2. 국외 수소경제 동향

미국은 ‘Hydrogen program plan’ 국가 전략(20년)을 통해 2050년 수소 수요 4,100만톤까지 확대 및 총 에너지의 수요 14%를 담당하는 계획을 수립하였는

데 최종 목표로는 탄소 배출량과 흡수량이 동일한 실질적 배출량 0 달성하고자 한다. 더불어, 수소 및 암모니아 산업 육성을 위해 ‘일자리 투자 및 일자리 법(IJA)’(21년), ‘인플레이션 감축법(IRA)’(22년) 등의 관련 법령 제정과 Table 3과 같이 청정수소 생산 등의 계획을 담은 ‘미국 청정수소 전략 및 로드맵’을 추진 중이다. 미국의 수소 산업 동향은 자국의 수소 산업 보호와 기술력 개발, 에너지 안보 확보 추진을 위해 ‘인플레이션 감축법’과 연계하여 청정수소 생산 시 발생하는 CO₂ 양에 따라 \$ 0.6/kg ~ \$ 3.0/kg 세액공제 및 수소생산기업 직접 지원 등 적극적인 산업 육성 중이다.[6]

유럽은 유럽기후법 제정에 따라 상향 조정된 2030년 온실가스 감축목표 55%를 달성하기 위한 ‘Fit-For-55’(21년), 러시아 화석연료에 대한 의존에서 신속하게 벗어나고 친환경 전환을 가속화하기 위한 ‘REPowerEU’(22년), 재생에너지 지침인 RED-III(23년) 등 점진적으로 재생에너지(청정수소 등) 비중 목표치를 상향하는 제도과 정책을 추진 중이다. 유럽의 수소산업은 Table 4와 같이 ‘탄소국경조정제도(CBMA)’ 입법 간 수소가 항목에 추가됨으로써 청정수소 생산의 중요성이 증대되었다. 더불어 2030년까지 수소 생산량을 560만 톤에서 2,000만 톤으로 증대하는 기술개발과 수소 밸리 조성 2배 확장을 위해 2억 유로가 추가로 투자될 예정이다.[7]

일본은 2050년까지 수소사회 구현을 위해 2017년 세계 최초로 수립한 ‘수소기본전략’을 발표하고, 이후 ‘수소·연료전지전략 로드맵’(19년), ‘그린성장전

Table 1. Status of HRS by type

Division	Compressed hydrogen delivery	On-site hydrogen production	Other (converged, mobile)
Place (unit)	T/T - 168 pipe - 9	reforming - 2 water electrolysis - 1	converged - 7 mobile - 7

Table 2. Status of FCEV by type

Division (unit)	Commercial	non Commercial	Total (unit)
Sum	1,227	32,274	33,501
Car	769	32,252	33,021
Van	449	22	471
Truck	9	-	9

Table 3. U.S.A clean hydrogen production plan

Division	2030	2040	2050
Clean hydrogen production (MMT)	1,000	2,000	5,000

Table 4. CBMA schedule of implementation and items

Plan		Implementation contents	Target items
Transition period enforcement	2023. 10. ~ 2025. 12.	Mandatory reporting of carbon emissions	cement, electricity, fertilizer, steel, aluminum, hydrogen
	2026. 1. ~	Imposition of carbon border tax	

Table 5. Japanese hydrogen supply road-map

Division	Period	Short-term (2025)	Mid-term (2030)	Long-term (2050)
Target amount		about 2 million tons	~ 3 million tons	about 20 million tons
Existing source of supply		Existion by-product hydrogen, etc. maximize supply utilization	Purification of supply source (use of CCUS, etc.)	
Imported hydrogen		Accumulate information, reduce costs	Commercial based building a hydrogen supply chain	Large scale international carriers scale up through
New domestic source		Accumulate information, reduce costs	Surplus renewable energy, etc. expansion of electronic hydrogen utilization	Expanding the scale of green hydrogen and development of new manufacturing technology

략’(20년), ‘제6차 에너지기본계획’(21년) 등의 정책을 추진하고 있다. 더불어 최근 국제 정서와 그 간의 정책 추진 결과를 반영하여 수소 및 암모니아 산업·안전 전략 수립을 통해 ‘수소기본전략’ 개정 등 탄소 제로 달성을 위한 정책을 정교화하고 있다. 일본의 수소 산업은 보유자원이 한정적인 점을 고려하여 대규모 수소 사회 구현을 위해 비용 경쟁력이 있는 해외 수소를 지속 활용할 예정이며, 부생수소 등 기존의 수소 공급원을 최대한 활용하는 수소 공급망을 구축할 것을 Table 5와 같이 계획하고 있다.[8] 또한, 국제수소 공급망 확대 등에 의한 수소 공급 비용의 절감, 수소 가스터빈 발전(혼소, 전소) 기술 구축을 통한 액화수소 활용 해상 수소설비 및 발전 분야의 경쟁력을 강화하기 위해 노력하고 있다.

2.2. 수소충전소 현황 및 특징

수소충전소는 수소전기차와 더불어 우리가 일상 생활에서 가장 쉽게 접할 수 있는 수소 사용처이다. 우리나라에는 앞서 언급했던 것과 같이 192개소의 수소충전소가 운영 중이나 전부 고압 기체 수소를 활용한 수소충전소이다. 하지만, 버스트릭 등 대형 모빌리티용 수소 공급을 위해 기체에서 액화 방식으로 구축이 필요하다. 정부와 한국가스안전공사는 액화수소충전소 도입을 위해 ‘액화수소 실증 추가 안전기준안’ 27종 제정, 신기술 확산을 위한 규제특례 지원 등의 방안을 추진하고 있으며, 민간에서는 연간 4만 톤 규모의 수소를 액화할 수 있는 플랜트를 인천(SK E&S), 울산(효성-린데), 창원(창원산업진흥원-두산에너지빌리티)에 구축하고 있다. 이에 따른 국내 수소상용차 및 액화수소충전소 보급계획은 Table 6과 같다. [9]

액화수소충전소는 현재 국내에 구축 중이며 독일, 일본 등 해외에는 액화수소충전소가 운영 중이

Table 6. Domestic FCEV and LHRS supply plan

Division	2022	2025	2030
Hydrogen commercial vehicle (unit)	211	5,000	30,000
Liquefied Hydrogen Refueling Station (unit)	0	40	70

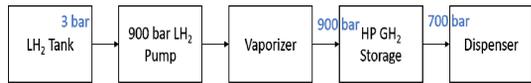


Fig. 1. Flowchart of vaporization method after compression of liquefied hydrogen pump.

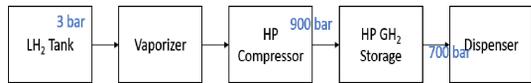


Fig. 2. Flowchart of gas compression method after vaporization of liquefied hydrogen.

다. 액화수소충전소는 기존 고압 기체 수소충전소에 비해 저장용량이 크며 부지면적이 1/3 ~ 1/10 규모로 적게 든다는 장점이 있다. 그 이유로는 액화수소를 기체로 상변화 시 발생하는 기화열을 이용하여 압축기 및 디스펜서용 칠러를 대체하고, 수소전기차 충전이 활발한 곳은 기화된 수소를 압축가스설비에 저장할 필요가 없이 직충전하여 칠러와 압축가스설비가 불필요하게 된다. 하지만, 단점으로는 초기 액화 시 대량의 에너지가 필요하고, 장기보관

시 수소 기화 손실이 발생한다. Fig. 1~2는 대표적인 액화수소충전소 운전 과정이다.

III. 위험성평가

3.1. 평가 대상 및 위험성평가 기법 선정

평가 대상은 Table 7의 사양을 갖춘 교외 지역에 위치한 펌프압축방식의 가상 액화수소충전소로 하며, 시설의 위험성을 분석하기 위해 전문프로그램(SAFETI)을 활용한 정량적 위험성평가 기법 활용 및 Fig. 3과 같은 절차로 위험요인을 분석·평가한다.

3.2. 위험성평가 시나리오 구성

먼저, 정량적 위험성평가 시 필요한 인구밀도는 가상의 충전소가 구축될 임의선정한 교외 지역의 실제 인구조사 결과를 적용하였으며, 대기조건은

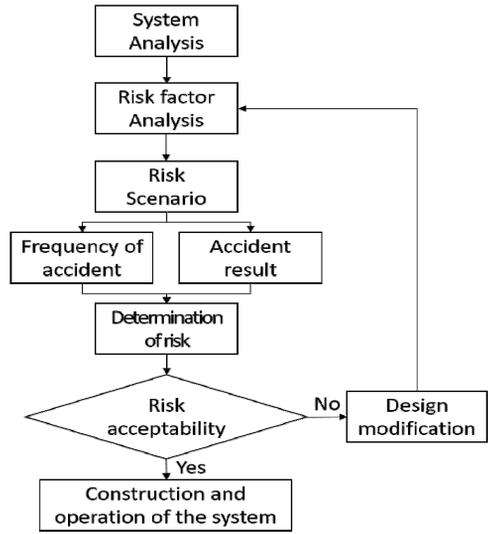


Fig. 3. Procedure of risk assessment.

Table 7. Specifications of LHRS

Component	Inventory			Unit
	P (MPa)	T (°C)	Mass or Volume	
LH ₂ Tank	1.2	-250.9	4,000 kg	1
LH ₂ Pump	89.63	-199.3	2,880 kg/day	1
Vaporizer	100	-248.4	2,880 kg/day	1
H ₂ Storage (High)	103.4	20	553 L	2
Dispenser	95	-40	5kg	2

Table 8. Atmospheric conditions

Factor	Input data
Atmosphere temperature(°C)	40
Relative humidity(%)	50
Wind speed(m/s)	1.5
Pasquill stability	F

Table 9. Component failure frequency

Componet	Leak Size	Median	Componet	Leak Size	Median
Flange	1 %	2.4×10^{-4}	Pipe	1 %	9.6×10^{-7}
	10 %	2.7×10^{-5}		10 %	4.6×10^{-7}
	100 %	2.9×10^{-6}		100 %	1.5×10^{-7}
Hose	1 %	1.6×10^{-4}	Valve	1 %	5.4×10^{-5}
	10 %	1.5×10^{-4}		10 %	2.5×10^{-5}
	100 %	6.2×10^{-5}		100 %	4.8×10^{-6}
Joint	1 %	7.9×10^{-6}	Vessel	1 %	2.8×10^{-5}
	10 %	7.5×10^{-6}		10 %	5.7×10^{-6}
	100 %	6.4×10^{-6}		100 %	1.2×10^{-6}

한국산업안전보건공단의 ‘최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침’을 준용하여 Table 8과 같이 선정하였다.[13]

수소는 빠른 확산속도와 비열 및 착화온도가 높아 폭발보다는 누출 사고가 많다. 이에, SAFETI 프로그램 내 Leak 모델을 사용하고, 사고 사례 등을 고려하여 압축가스설비에 한해 용기파열 사고까지 평가하도록 한다.[10]

수소충전소 설비 고장률의 경우, 고압기체 수소 설비는 미국 Sandia lab 연구자료 SAND 2009-0874 내 정립된 바와 달리 액화수소 설비는 현재까지 국제적으로 정립되어있는 데이터가 없다. 그러므로

Table 10. Default ignition probabilities for Hydrogen

Release Rate (kg/s)	Ignition Probability	
	Immediate	Delayed
< 0.125	0.008	0.004
0.125 ~ 6.25	0.053	0.027
> 6.25	0.23	0.12

Table 11. Facility failure frequency

Component	Scenario	Leak Size (mm)	Leak Frequency (/yr)	Ignition Probability	
				Im-	Del-
LH ₂ Tank	1% A Leak	5.08	3.11E-03	0.008	0.004
	10% A Leak	16.6	1.16E-03	0.053	0.027
	100% A Leak	50.8	2.88E-04	0.23	0.12
LH ₂ Pump	1% A Leak	3.81	2.51E-04	0.053	0.027
	10% A Leak	12.05	1.32E-04	0.23	0.12
	100% A Leak	38.1	4.54E-05	0.23	0.12
Vaporizer	1% A Leak	1.91	5.76E-06	0.053	0.027
	10% A Leak	6.02	2.76E-06	0.053	0.027
	100% A Leak	19.05	9.00E-07	0.23	0.12
H ₂ Storage (High)	1% A Leak	0.72	2.38E-04	0.008	0.004
	10% A Leak	2.26	1.83E-04	0.008	0.004
	100% A Leak	7.16	9.78E-05	0.053	0.027
	Cat. Rupture	-	5.00E-07	0.230	0.120
Dispenser	1% A Leak	0.72	1.74E-04	0.008	0.004
	10% A Leak	2.26	8.32E-05	0.008	0.004
	100% A Leak	7.16	3.84E-05	0.053	0.027

SAND 2022-16425 내 Table 9의 설비 내 부속품 고장률을 활용해 설비의 고장률을 도출하는 Part's Count 후 액화수소 설비의 고장률과 Table 10의 누출공 크기별 누출량에 따른 점화확률을 Table 11과 같이 산출하였다.[11, 12]

IV. 위험성평가 결과

개인적 위험도와 사회적 위험도의 판단기준은 「고압가스제조사업의 양도·양수 및 지위 승계 관련 기준 적용에 관한 특례고시」 내 Table 12와 Fig. 4의 판단기준을 적용한다.[14]

가상의 액화수소충전소 개인적 위험도와 사회적 위험도 평가 결과는 Fig. 5~6이며 시설의 구축은 가능하나, 일부 시설개선 등의 안전성 강화 조치를 수행해야 하는 조건부 허용영역에 해당하는 것으로 판단된다. 추가로 사고시나리오별 위험도 순위 분석 결과 LH₂ Tank 60 %, LH₂ Pump 28 %, H₂ Storage(high) 7 %, Dispenser 4.9 %, Vaporizer 0.1 % 순으로 위험성이 산출되었는데 각 설비에 저장된 액화수소 저장량과 사고확률이 영향을 미친 것으로 판단된다. 더불어 본 평가 결과는 방호벽, 가스누출검지경보장치,

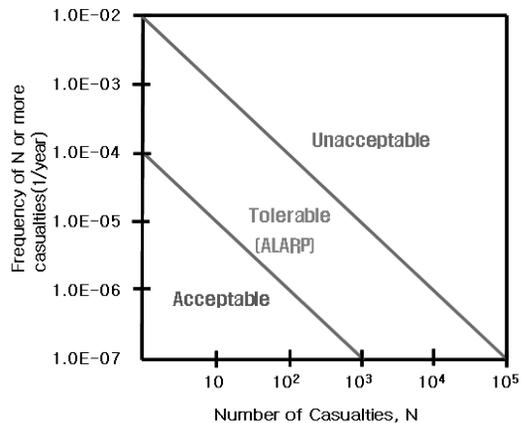


Fig. 4. Societal risk criteria.

Table 12. Individual risk criteria

Criteria	Risk of fatality per year
Maximum tolerable risk for members or the public	> 1×10E-4
ALARP region (public)	1×10E-6 ~ 1×10E-4
Broadly acceptable	< 1×10E-6

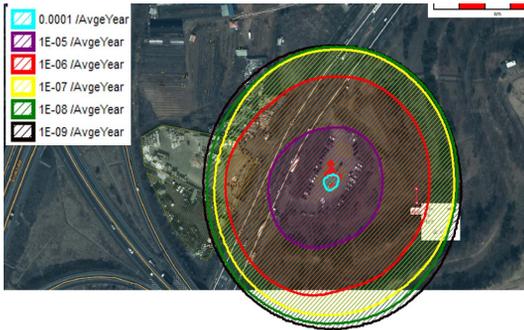


Fig. 5. Individual result by SAFETI.

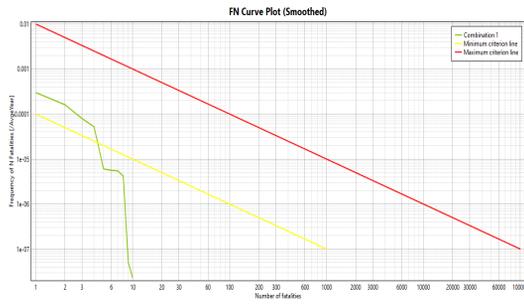


Fig. 6. Societal risk result by SAFETI.

화염검지기 등의 사고예방설비 설치 여부를 고려하지 않았으며, 향후 KGS Code 제정 예정인 액화수소 시설·검사·기술 기준 등에 따라 구축될 예정임을 고려한다면 일부 시설개선 및 안전관리 강화 활동을 한 것으로 판단할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 수소 산업 확대에 따라 국제 동향 분석과 보급 예정인 액화수소충전소의 안전성에 대해 정량적 위험성평가를 실시하였다. 평가 결과 시설의 위험도는 조건부 허용영역으로 판단된다. 그 중 사회적 위험도는 사고 발생에 따른 주변 인구의 영향을 고려한 결과임에 따라 주변 인구 분포량이 가장 중요하다. 현재 대상 지역에서는 조건부 허용영역이나 향후 액화수소충전소가 교외 지역이 아닌 인구가 밀집된 도심지역에 위치하게 된다면 사회적 위험도는 높아질 것으로 예상됨에 따라 도심지역 설치에 보다 많은 연구와 실증 후 설치되어야 할 것으로 생각된다.

또한, 시설 구축 시 part's count 결과에 따른 액화

수소 설비의 고장률과 개인적위험도를 고려하여 액화수소 사용시설 안전성 제고를 위해 주변 환경(사회기반시설 및 교통량이 많은 대로 등)을 반영한 설비 배치 방안, 사고예방설비 위치, 환기 사양, 방호벽 구조 등을 정부와 수소안전전담기관인 한국가스안전공사에서 현재 진행 중인 액화수소 실증사업 결과를 반영하여 KGS Code 제정이 이루어지길 바란다. 더불어 민간과 함께 액화수소, 수소 및 암모니아 혼합·혼소 등의 신기술 안전관리 방안을 면밀하게 검토하고 그에 따른 탄소중립 실현과 수소 산업 발전을 안전하게 이워나갈 수 있도록 안전관리 맞춤형 정책을 수립·추진하길 제안한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 “수소 전주기 통합 위험성평가 프로그램 및 액화수소 설비 안전기준 개발” 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. (No.20215810100060)

REFERENCES

- [1] Korea Ministry of Trade, Industry and Energy., Hydrogen economy revitalization road-map, (2019)
- [2] Korea Ministry of Trade, Industry and Energy, The 1st basic plan for implementing the hydrogen economy, (2021)
- [3] Korea Ministry of Trade, Industry and Energy, Hydrogen safety management road-map 2.0, (2023)
- [4] Korea Gas Safety corporation, Current status of HRS, (2023)
- [5] Korea Ministry of Environment, Domestic FCEV registration status, (2023)
- [6] U.S. Department of Energy., U.S. National Clean Hydrogen Strategy and road-map, (2023)
- [7] European Commission., Renewable Energy Directive, (2023)
- [8] Japan Ministry of Economy, Trade and Industry, The 6st basic plan for energy, (2022)
- [9] Korea Government, A plan for the creation of a clean hydrogen ecosystem, (2022)
- [10] John O'M. Bockris., Hydrogen energy economy and technology, (2005)
- [11] Sandia National Laboratories, SAND2009-0874 Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and stan-

- dards, (2009)
- [12] Sandia National Laboratories, SAND2022-16425 Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+) Version 5.0 Technical Reference Manual, (2022)
- [13] Korea Occupational Safety and Health Agency, Guide P-107-2020 Technical guide on accident scenarios of worst and alternative, (2020)
- [14] Korea Government, “Special notice on application of standards related to transfer, acquisition, and succession of high pressure gas manufacturing business, (2013)