

수소산업 전주기 인프라시설 안전성 분석

박우일 · 최슬기 · 이인우 · 강승규[†]

한국가스안전공사

Hydrogen Industry Cycle Infrastructure Safety Analysis

WOOIL PARK, SEULKI CHOI, INWOO LEE, SEUNGKYU KANG[†]

Korea Gas Safety Corporation, 1390 Wonjung-ro, Maengdong-myeon, Eumseong-gun 27738, Korea

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

Received 2 December, 2022
Revised 12 December, 2022
Accepted 21 December, 2022

Abstract >> Korea is showing its appearance as a leading country in the hydrogen economy by establishing policies for revitalizing the hydrogen economy and enacting the 「Hydrogen Economy Promotion and Hydrogen Safety Management Act」 for the first time in the world. In addition, domestic hydrogen facilities are using hydrogen energy safely through world-class safety management compared to overseas advanced countries. However, in order to enhance the safety of the rapidly diversifying hydrogen industry and rapid technology development, such as the introduction of liquefied hydrogen, some institutional improvements are needed. In this regard, this paper intends to analyze the results of safety inspections on 13 representative facilities and prepare safety improvement plans to establish preemptive safety measures.

Key words : Hydrogen system(수소시스템), Hydrogen refueling station(수소충전소), Risk assessment program(위험성 평가 프로그램), Hydrogen consequence model(수소피해영향모델), Hydrogen safety standards(수소안전기준)

1. 서론

우리 정부는 수소경제 활성화 로드맵('19.01) 및 수소경제이행기본계획('21.11) 발표 등을 통해 세계 최고 수준 수소경제 선도국가 도약 전략을 제시하였다. 관련 내용으로는 청정수소 생산 자급률은 2030년 34%에서 2050년 60%, 수소충전소 보급은 2030년 660기에서 2050년 2,000기, 수소자동차는 2030년 88만 대에서 2050년 526만 대, 청정수소 공급률은 2030년

75%에서 2050년 100%로 제시하였다¹⁾.

하지만 이 같은 전 세계적인 수소경제 활성화는 빠른 기술력 성장과 보급률 증대라는 성과를 보였으나, 강릉 R&D시설 폭발사고('19.05), 노르웨이 산드비카 충전소 폭발사고('19.06) 등의 수소가스 누출·화재 사고 발생을 초래하였다. 또한, 국내 OO충전소 내 튜브 트레일러(tube trailer, T/T) 지반침하('21.07)에 따라 수소산업 전반에 대한 안전성 검토 필요성이 제기되었다.

이에, 한국가스안전공사는 수소 안전관리 전담기관으로서 수소산업 전주기 인프라시설에 대해 안전성 분석을 추진하고 안전 강화 방안 마련을 통해 수소산업 제도 개선 및 기술 개발에 기여하고자 한다.

2. 현황 분석

2.1 국내 수소시설 안전관리 현황

미국, 일본, 유럽 등 글로벌 기준과 국내 수소시설 안전관리 현황을 비교하였을 시, 우리나라는 기술검토, 인허가, 완성검사, 정기검사, 안전관리규정 이행실태 확인 등 세계 최고 수준의 안전기준을 마련·적용하여 안전관리 중이다. 또한, 우리나라는 수소시설 안전성 제고 및 사업자 자율안전관리 능력 향상과 부담 완화를 위해 3중 안전관리체계 구축하여 운영 중이며 수소충전소 운영 미숙, 수소 누출로 인한 운영중단 사태 방지 등을 위한 수소시설 상설안전점검, Table 1과 같이 충전소 이상신호 발생 시 사업자와 가스안전공사가 확인 가능한 위험신호 실시간 모니터링 시스템 운영, Table 2의 점검장비 4종 무상임대 사업이다. 또한, 분기별 1회 수소품질검사를 통해 연료전지용 수소의 안전성을 확보하고 있다²⁾.

2.2 국내 · 외 안전관리체계

수소산업 주요 선진국의 수소 및 가스 안전관리 법령, 운영 체계, 관리 주체를 파악하였다. 가스 안전관리체계는 국가에 따라 다양한 형태로 운영 중이며, 대부분 국가는 수소를 별도의 영역으로 나누어 안전

관리를 하지 않는다.

한국은 정부(산업통상자원부·가스안전공사·지방자치단체) 주도의 안전관리 체계로 가스 3법 및 2020년 세계 최초로 제정된 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」(이하 수소법)과 각 법령의 시행령, 시행규칙, 상세기준을 통해 시설과 용품 전주기에 대해 엄격한 안전관리를 실시 중이다. 일본은 우리와 같이 가스 3법 기반으로 정부와 민간(고압가스보안협회 등)의 유기적인 연계를 통해 안전관리 중이며, 가스안전 법령을 기반으로 하여 각 관련 협회가 자체기준을 제정해 운영 중이다. 미국은 가스시설의 형태, 용도 및 설치장소에 따라 정부와 민간이 분산 관리를 하며, 국가단위 인프라는 정부, 설비와 용품은 민간 전문검사기관이 담당한다. 독일은 정부와 민간이 상호보완적 체계에 따른 사업자 자율 안전관리에 중점을 두었는데, 연방정부가 기준을 제정하고 민간

Table 2. Inspection equipment





Hydrogen leak detector	Earth resistance tester
	
Thermal imager	Standard gas injection device
	

Table 1. Real time monitoring system factor

Signal	Safety device			Refueling facility					
	Hydrogen gas detector	Hydrogen flame detector	Emergency shut-off device	Compressor		Pressure vessel	Dispenser		
	Occurrence	Occurrence	Occurrence	P	T	T	P	T	Flux
Warning				○	○	○	○	○	○
Danger	○	○	○	○	○	○	○	○	○

협회가 세부사항을 보완하여 관리 중이며, 민간의 전문검사기관이 검사 및 인증 활동을 담당한다.

2.3 수소시설 유형별 특성

국내 수소시설은 2022년 7월 말 기준 Table 3과 같으며, 유형에 따라 생산, 충전, 저장·사용시설로 구분할 수 있다. 안전관리 시설은 「고압가스안전관리법」(이하 고법)에 따라, 수소추출설비와 수전해설비의 경우 수소법을 적용하여 관리 중이다. 수소는 생산 방법에 따라 석유화학 및 철강제조 공정 중에 부산적으로 나오는 부생수소, LPG, 도시가스 등을 원료로 수소추출설비를 통해 생산한 추출수소, 순수한 물을 전기분해를 통해 산소와 수소로 분리하여 생산한 수전해수소로 구분된다.

수소충전시설은 Fig. 1과 같은 약 100 MPa의 고압 수소를 저장·압축·충전하는 수소자동차 충전소와 약 20 MPa의 고압수소를 T/T에 충전하여 수소충전소 등의 수소 사용처에 공급하는 수소출하시설 등이 있다.

수소 저장·사용시설은 연료전지 사용시설, 반도체 공장, 시험·연구시설 등이 있으며 사업소 내 고압가스 시설을 갖추고 소비한다.

3. 현장 안전점검

3.1 안전점검 대상 선정

전체 수소시설 중 사고 위험도 및 운영 빈도가 높은 핵심시설 위주로 제조(부생, 추출, 수전해) 또는

수소 출하시설 5개소, 수소자동차 충전(T/T 공급식, 배관 공급식, 패키지형, 이동식) 시설 8개소를 점검하였으며, 이 외의 저장·판매·사용시설의 경우 공사 정기검사를 통해 안전성을 확인하였다.

현장 안전점검의 주요 사항은 안전관리 체계, 안전장치·공정·전기계장 운영 관리실태, 장치 안전성 확보 적정성이며, 수소자동차 충전소는 추가로 개정된 고법 시행규칙 별표 5에 의거, 2022년 12월 3일 시행 예정인 안전영향평가를 실시하였다³⁾.

3.2 현장 점검 결과

국내 수소시설은 세계 최고 수준의 안전기준을 마련·적용하여 정부·공사·사업자 간 협력을 통한 체계적인 안전관리를 실시 중이다. 또한 안전관리 체계 및 시설관리 상태는 양호하나, 수소 신기술 및 신산업 개발에 따른 환경 변화를 고려하여 일부 제도개선 및 규제 합리화 등의 필요성이 확인되었다.

3.3 제도개선 필요사항

안전 점검 간 수소 안전관리 사각지대 해소를 위해 일부 제도개선 필요사항이 확인되었다. 수소 T/T 설비 관련하여 현재 가연성 또는 독성가스 저장탱크 및 탱크로리에는 시설·제품검사 기준에 따라 긴급차단장치를 의무 설치 중인데 T/T는 해당되지 않아 차량 화재 등 이상상황 발생 시 신속한 수소가스 누출 차단이 어려워 대형 화재·폭발 등의 사고 유발 가능성이 상존한다. 또한, 일부 T/T 안전밸브 방출관 설

Table 3. Number of hydrogen facilities in KOREA

Licensing	Specified manufacturing	General manufacturing	General filling	General storage	General business place	Use of specified high pressure
Number of facilities	375	90	278	574	929	575

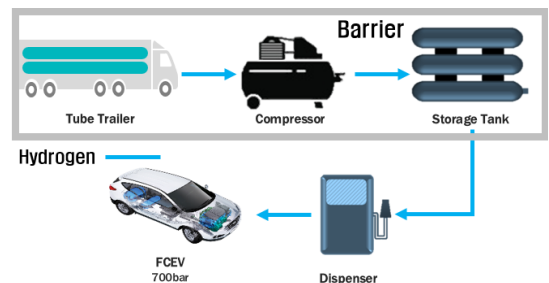


Fig. 1. Hydrogen refueling station schematic diagram

치 기준 부재에 따라 수직 상부가 아닌 수평방향 등으로 설치되어 안전밸브 작동 시 인근 차량으로 2차 사고 발생 및 피해 확산이 우려되고 있다. 더불어, 충전소 T/T 이·충전 작업 중 호스 손상이 잇따라 발생함에 따라 이·충전 호스의 안전성 강화가 필요하다.

수소 T/T 시설 관련하여 2021년 7월 OO충전소 지반침하와 같은 사고 방지를 위해 현재 검사 중인 지반조사 및 기초설치 대상을 T/T 주정차구역도 포함할 필요성이 있다. 또한, 현재 제조시설의 경우 독성 및 공기보다 무거운 가연성 가스에 한하여 가스누출검지 경보장치가 의무화 되어있는데 수소출하시설과 같은 수소제조시설 T/T 이·충전장소 내에는 수소충전소 저장설비설과 동일하게 가스누출검지 경보장치, 화염검지기 설치가 필요한 것으로 사료된다.

3.4 안전관리 수범 사례

일부 수소시설의 경우 Table 4와 같이 T/T 주정차장소 지정 및 철판·콘크리트 보강, 주기적 지반침하 측정을 통해 앞서 언급한 지반침하 사고를 방지하고 있다. 또한, 이·충전 호스 파손 및 사고방지를 위해 방폭토크렌치 자체 제작 사용과 커넥터 재질·두께

개선, 이·충전 호스 탈부착 시 요동방지장치 설치와 같은 법적사항 외에 사업자 자율 안전관리를 통해 유사 시설보다 우수한 안전관리가 이루어지고 있다.

4. 안전영향평가






4.1 안전영향평가 방법

안전영향평가는 현장 조사와 상용 소프트웨어를 사용한 정량적 위험성평가를 통해 수행되며, 수소충전소 전용 위험성 평가 프로그램인 HyKoRAM과 범용 위험성 평가 프로그램인 SAFETI를 이용하여 실시하였다. 평가 절차는 Fig. 2와 같으며 시설의 위험도 판단은 「고압가스제조사업의 양도·양수 및 지위승계 관련 기준 적용에 관한 특례고시」내 Fig. 3-4의 위험도 판단 기준을 적용한다. 현장 조사 및 평가 결과에 따라 안전강화조치 방안 등을 마련·적용한다⁴⁾.

4.2 평가 대상 선정

평가 대상은 수소충전소 공급 방식, 용·복합 여부

Table 4. Best practices for safety management

Concrete reinforcement	Steel plate reinforcement	Explosion proof torque tool
		
Connector material, thickness improvement	Anti-vibration device	
		

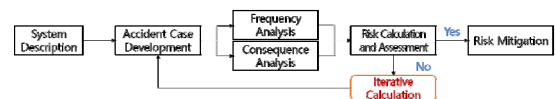


Fig. 2. Quantitative risk assessment procedure

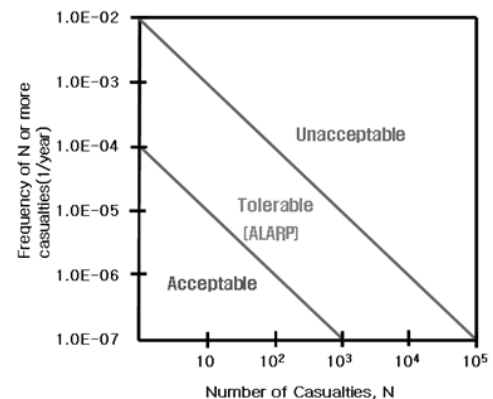


Fig. 3. Societal risk criteria

등을 고려하여 제조식 T/T+수소자동차 충전소, 배관 공급식 충전소, LPG-수소 복합충전소로 총 3개소에

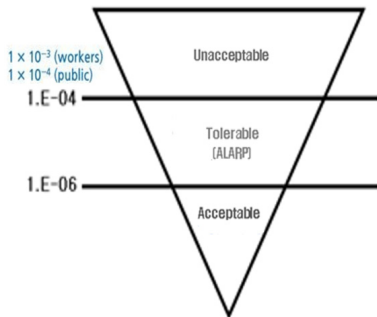


Fig. 4. Individual risk criteria.

Table 5. Specifications of HRS

Station	Components	Inventory			Unit
		P (MPa)	T (°C)	Mass (kg)	
T/T + FCEV	T/T	20	35	320	1
	Comp_H	100	35	27.3	2
	Dispenser	87.5	-40	5	2
	Storage_L	50	35	35.7	2
	Storage_M	70	35	30.8	2
	Storage_H	103.4	35	27.3	2
	Reformer	0.99	35	1.6	1
	Comp_L	20	35	24.2	1
	Storage_T/T	20	35	320	2
	Buffer tank	0.97	35	1.6	1
Piping supply	Storage_LL	27.6	35	24.2	6
	Buffer tank	2.5	35	12.5	1
	Comp	99	35	27.3	2
	Dispenser	87.5	-40	5	2
	Storage_L	50	35	35.7	2
	Storage_M	70	35	30.8	2
LPG + HRS	Storage_H	103.4	35	27.3	2
	T/T	20	35	320	1
	Comp	90	35	17	1
	Dispenser	87.5	-40	5	2
	Storage_L	50	35	35.7	2
	Storage_M	103.4	35	27.3	3
	Storage_H	103.4	35	17	2

대해 진행하였다. 각 충전소의 주요 설비 사양은 Table 5와 같다.

4.3 사고 시나리오 구성

인구밀도는 현장조사 결과를 반영하였으며, 대기 조건은 한국산업안전보건공단의 “최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침”에 따라 Table 6과 같이 선정하였다. 평가는 설비누출 및 파열에 대해 진행하며 세부 입력값은 Table 7과 같다. T/T·압축기·압축가스설비·충전기는 Sandia 연구소의 “Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards”, 개질기·버퍼탱크는 AIST 연구소의 “Risk Assessment of Hydrogen Fueling Stations and Their Surroundings”, 더불어 파열 사고는 HSE의 “Failure frequencies for major failures of high pressure storage vessels at COMAH sites” 데이터를 적용하였다⁵⁻⁸⁾.

4.4 평가 결과

안전영향평가 결과는 Fig. 5-10과 같다. 사회적·개인적 위험도 모두 시설의 구축은 가능하나, 안전성 증대를 위해 개선사항을 수행해야 하는 조건부 허용 영역에 속하는 것으로 판단된다. 하지만 충전소에 설치된 방호벽과 가스누출 경보장치, 화염검지기 등의 사고예방설비 효과를 고려할 시 위험관리와 위험을 낮추기 위한 개선사항을 일부 수행하였다고 판단할 수 있다. 추가적인 안전 강화를 위해 충전소 T/T 주정차구역 지반 강화와 수소 공급 배관의 주기적인 건전성 확인, LPG+수소충전소는 부지가 협소한

Table 6. Atmospheric conditions

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

경우가 많아 T/T 교체 간 가스설비 충돌 방지를 위한 안전관리자의 특별관리 등을 권고한다.

두 프로그램 간 평가 결과가 약간의 차이를 보이는 이유로는 DNV가 수십 년간 축적한 데이터 사용 및 실제 기후 영향 등을 고려하는 SAFETI와 달리, 비교적 단기간 축적된 수소 데이터만 사용하고 실제 기후 영향 등을 고려하지 않는 HyKoRAM의 결과에 대한 안전성을 높이고자 보다 보수적인 결과를 도출

한다는 점을 들 수 있다.



(a) Individual risk result by HyKoRAM

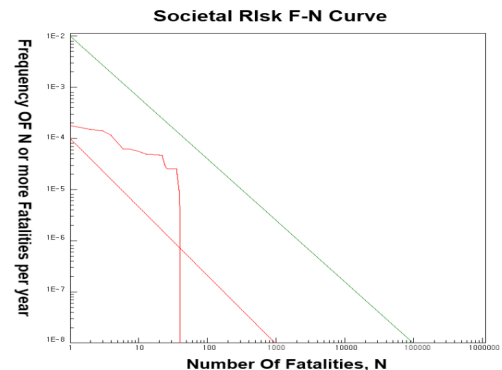


(b) Individual risk result by SAFETI

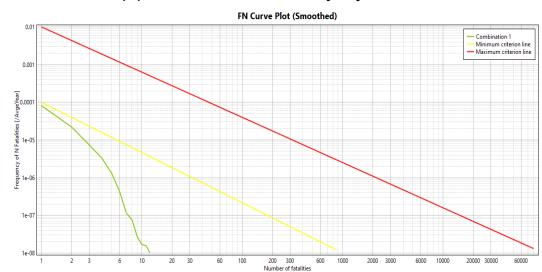
Fig. 5. TT + FCEV station individual risk result

Table 7. Risk assessment data

Compon-	Scenario	Leak size (mm)	Leak fre- (/year)	Ignition probability	
				Im-	De-
T/T	1% A Leak	1.27	4.14E-04	0.008	0.004
	10% A Leak	4.02	3.21E-04	0.008	0.004
	100% A Leak	12.70	1.80E-04	0.053	0.027
Comp_H	1% A Leak	0.72	9.92E-04	0.008	0.004
	10% A Leak	2.26	2.62E-05	0.008	0.004
	100% A Leak	7.16	4.24E-06	0.053	0.027
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
Storage_L, LL	1% A Leak	0.79	2.38E-04	0.008	0.004
	10% A Leak	2.50	1.83E-04	0.008	0.004
	100% A Leak	7.92	9.78E-05	0.053	0.027
Storage_M, H	Cat. Rupture	-	5.00E-07	0.230	0.120
	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
Comp_L	Cat. Rupture	-	5.00E-07	0.230	0.120
	1% A Leak	0.79	9.92E-04	0.008	0.004
	10% A Leak	2.50	2.62E-05	0.008	0.004
Buffer tank	100% A Leak	7.92	4.24E-06	0.053	0.027
	1% A Leak	5.25	5.67E-07	0.008	0.004
	10% A Leak	16.57	3.20E-07	0.008	0.004
Reformer	100% A Leak	52.5	1.70E-07	0.053	0.027
	Cat. Rupture	-	5.00E-07	0.230	0.120
	1% A Leak	5.25	4.20E-03	0.008	0.004
	10% A Leak	16.57	1.90E-03	0.008	0.004
	100% A Leak	52.5	1.40E-03	0.053	0.027



(a) Societal risk result by HyKoRAM

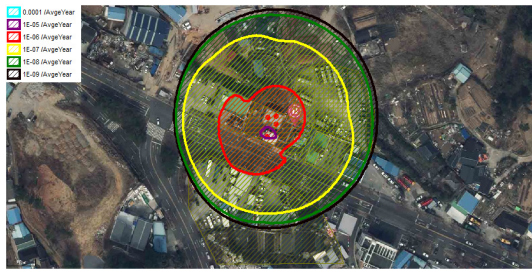


(b) Societal risk result by SAFETI

Fig. 6. TT + FCEV station societal risk result



(a) Individual risk result by HyKoRAM

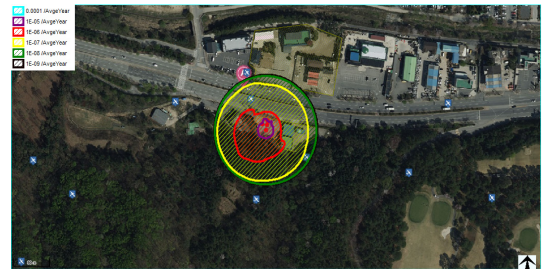


(b) Individual risk result by SAFETI

Fig. 7. Piping supply station individual risk result

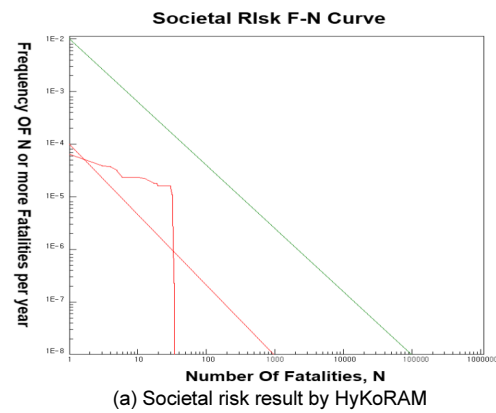


(a) Individual risk result by HyKoRAM

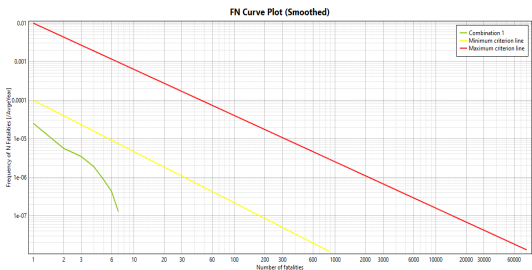


(b) Individual risk result by SAFETI

Fig. 9. LPG+HRS station individual risk result

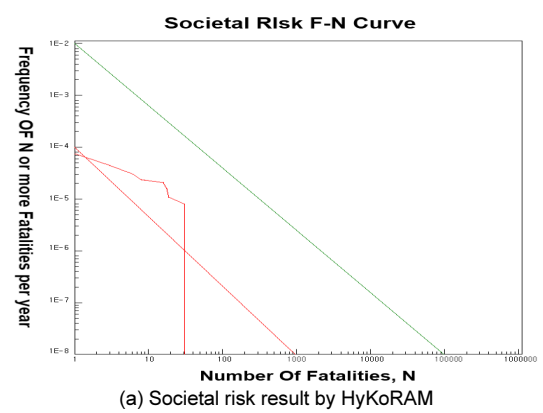


(a) Societal risk result by HyKoRAM

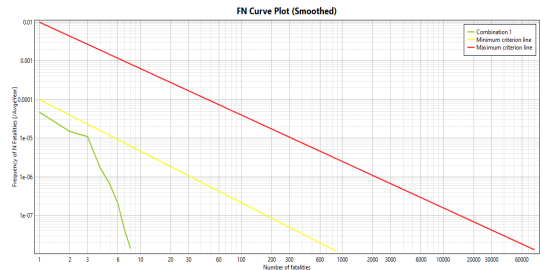


(b) Societal risk result by SAFETI

Fig. 8. Piping supply station societal risk result



(a) Societal risk result by HyKoRAM



(b) Societal risk result by SAFETI

Fig. 10. LPG+HRS station societal risk result

5. 결 론

이번 수소시설 안전점검을 통해 도출된 제도 개선 필요사항은 전문가 의견 및 정부·공사·사업자 현장 의견수렴을 통해 합리적인 안전기준 개정이 이루어져야 하며, 안전관리 수범사례는 관련 사업자들에게 홍보·전파를 추진해 사업자 자율 안전관리 능력향상을 도모하여야 한다.

이와 같은 공사의 수소시설 안전성 강화 방안 마련 활동을 통해 수소 안전에 대한 대국민 신뢰성·수용성 제고를 끌어내 산업에서 가정까지 안전한 수소 에너지 사용이 이루어지길 바란다.

후 기

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

References

1. Ministry of Trade, Industry and Energy, “The 1st basic plan for implementing the hydrogen economy”, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2021. Retrieved from http://www.motie.go.kr/motie/ms/nt/announce2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=67130&bbs_cd_n=6.
2. J. W. Lee, J. H. Park, D. H. Kim, S. S. Tak, and B. J. Yang, “Status of the real-time safety monitoring system of hydrogen refueling station according to the operation”, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 25, No. 6, 2021, pp. 92-97, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2021.25.6.92>.
3. Republic of Korea, “High-pressure gas safety control act”, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2022. Retrieved from <https://www.law.go.kr/법령/고압가스안전관리법>.
4. Republic of Korea, “Announcement on special cases regarding the application of criteria related to transfer, acquisition and succession of high pressure gas manufacturing”, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2018. Retrieved from [https://www.law.go.kr/행정규칙/고압가스제조사업의양도·양수및지위승계관련기준적용에관한특례고시/\(2018-226,20181213\)](https://www.law.go.kr/행정규칙/고압가스제조사업의양도·양수및지위승계관련기준적용에관한특례고시/(2018-226,20181213)).
5. Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), “Technical guide on accident scenarios of worst and alternative (KOSHA Guide P-107-2020)”, KOSHA, 2020. Retrieved from <https://www.kosha.or.kr/kosha/data/guidanceDetail.do>.
6. J. LaChance, W. Houf, B. Middleton, and L. Fluer, “Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards (SAND2009-0874)”, Sandia National Laboratories, 2009. Retrieved from <https://energy.sandia.gov/wp-content/uploads/2018/05/SAND2009-0874-Analyses-to-Support-Development-of-Risk-Informed-Separation-Distances-for-Hydrogen-Codes-and-Standards.pdf>.
7. The Research Institute of Science for Safety and Sustainability (RISS) and National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), “Risk assessment of hydrogen fueling stations and their surroundings”, AIST, 2019. Retrieved from https://riss.aist.go.jp/en/wp-content/uploads/sites/8/2021/08/RiskAssessment_of_HydrogenFuelingStations_Jan2019.pdf.
8. C. Nussey, “Failure frequencies for major failures of high pressure storage vessels at COMAH sites: a comparison of data used by HSE and the Netherlands”, hse.gov.uk, 2006, pp. 25-31. Retrieved from <https://www.yumpu.com/en/document/view/22334788/failure-frequencies-for-major-failures-of-high-pressure-storage-hse>.