

수소 배관 위험도(IR/SR) 평가 및 분석

이동민¹ · 이광원¹ · 신단비¹ · 김현기¹ · 김태훈² · 홍성철² · 서두현^{3†}

¹호서대학교 안전공학과, ²호서대학교 산업안전공학과, ³피에스피

Assessment and Analysis of Individual and Societal Risks (IR/SR) for Hydrogen Pipelines

DONGMIN LEE¹, KWANGWON RHIE¹, DANBEE SHIN¹, HYEONKI KIM¹, TAEHUN KIM²,
SUNGCHUL HONG², DOOHYOUN SEO^{3†}

¹Department of Safety Engineering, Hoseo University, 20 Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan 31499, Korea

²Department of Industrial Safety Engineering, Hoseo University, 12 Hoseodae-gil, Dongnam-gu, Cheonan 31066, Korea

³PSP, 120-16 Wolbong 4-ro, Seobuk-gu, Cheonan 31171, Korea

[†]Corresponding author :
sdhyoun02@naver.com

Received 28 April, 2025

Revised 8 June, 2025

Accepted 12 June, 2025

Abstract >> this study conducted a quantitative risk assessment of pipeline safety using the Hy-KoRAM program. The analysis focused on six districts in Seoul Gangbuk area as a case study, comprehensively evaluating both individual risk and societal risk for jet fire and vapor cloud explosion (VCE) scenarios. The results showed that while jet fires had a limited impact range (maximum 15 m) with low frequency, vapor cloud explosions demonstrated a significantly larger impact range (up to 100 m) frequency, indicating higher risk potential. Particularly in densely populated district 4, VCE scenarios predicted up to 390 potential fatalities, requiring additional safety measures under the as low as reasonably practicable principle.

Key words : Hydrogen pipe(수소 배관), Qualitative risk assessment(정성적 위험성 평가), Individual risk(개인적 위험도), Societal risk(사회적 위험도), FN curve(F-N 곡선)

1. 서 론

수소는 온실가스를 배출하지 않는 청정 에너지원으로 풍부한 자원량과 높은 활용성, 에너지 저장 매개체로서의 장점을 가지고 있어 미래 에너지원으로 주목받고 있다. 특히 기존 인프라를 활용할 수 있다는 점과 다양한 에너지 생산, 저장 방식과의 연계 가

능성은 수소의 활용 가치를 높이고 있다. 그러나 수소는 넓은 연소 범위와 낮은 점화 에너지 특성으로 인하여 누출 및 폭발 위험이 크며 이로 인한 인적, 물적 피해 가능성도 높다. 이에 따라 수소의 생산, 저장, 운송, 활용 과정 전반에서 체계적인 안전 관리와 위험성 평가가 필수적이다¹⁾.

수소 에너지의 확대 보급에 따라 배관 안전성 평

가의 중요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 안전성을 향상시키고 수소 배관의 피해 범위와 영향을 분석하기 위해 국내에서 개발한 정량적 위험성 평가 프로그램인 Hy-KoRAM (Korea Gas Safety Corporation, Eumseong, Korea)을 활용하였다. Hy-KoRAM은 수소 배관 사고 발생 시 개인적 위험도와 주변 주민, 환경을 고려한 사회적 위험도를 산출할 수 있는 도구이다²⁾. Hy-KoRAM 프로그램은 수소 누출 및 제트 화염 실증 시험을 바탕으로 피해 영향 모델을 적용하며 고장률 데이터를 통계적으로 처리하여 failure frequency를 보정한다. 또한 Hy-KoRAM은 HyRAM과 유사한 누출 제트 및 제트 화염 모델식을 사용한다. 본 연구에서는 가스 누출에 대한 빈도 분석과 결과 분석을 통해 개인적 위험도와 사회적 위험도를 산출하고 수소 배관의 위험성에 대하여 고찰하였다. 그리고 수소 배관 주변의 인구 분포를 분석하여 거주 지역, 비거주 지역, 상업 지역 등으로 분류하였다. 특정 구역에 수소 배관이 설치되어 있음을 가정하고 Hy-KoRAM을 사용하여 해당 구역에서의 피해 범위와 F-N 커브(frequency number curve)를 평가하였고 이를 바탕으로 수소 배관의 안전 대책을 마련하고자 한다.

2. 수소 배관 위험도 평가

수소는 높은 확산성, 넓은 연소 범위, 낮은 점화 에너지 특성으로 인하여 누출 시 화재 및 폭발 사고로 이어질 가능성이 크다. 특히 수소 배관은 장거리 이송 및 분배 과정에서 상시 고압 상태를 유지하기 때문에 사고 발생 시 인명 및 재산 피해가 광범위하게 확산될 위험이 존재한다. 이에 따라 수소 배관의 사고 가능성과 사고가 주변 지역 사회에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 필요성이 있다^{3,4)}.

개인적 위험도(individual risk, IR) 평가는 특정 지점에 위치한 개인이 사고로 인한 피해를 입을 확률을 분석하는 데 활용되며 사회적 위험도(societal risk, SR) 평가는 사고로 인한 다수 인명 피해 가능성을 고려할 수 있다. 이를 통해 수소 배관 설치 및 운영의 안전성을 검증해 보고자 한다^{5,6)}.

2.1 위험도 평가 방법

위험도(risk)는 유해 및 위험 요인이 부상 또는 질병으로 이어질 수 있는 가능성(사고 빈도)과 그 사고로 인한 피해 영향의 결합으로 표현된다. 즉 위험도(risk)는 빈도(frequency)와 심각성(severity)의 곱으로 표현할 수 있다⁷⁾.

$$Risk = Frequency \times Severity \quad (1)$$

빈도는 작업자의 부상 질병 발생의 확률을 의미하며 작업의 빈도 시간, 사고의 발생 확률, 피할 수 있는지에 대한 가능성 등을 고려하여야 한다. 심각성은 부상 및 질병이 발생하였을 때 미치는 영향의 정도를 의미하며 부상 또는 건강 장애의 정도, 치료 기간, 후유 장애 유무, 피해의 범위(1인, 복수)를 고려하여야 한다. 위험도 평가는 수소의 특성을 고려하여 제트 화재(jet fire) 및 증기운 폭발(vapor cloud explosion)을 도출하여 결과 분석을 진행하였다.

정량화된 위험도는 시나리오 및 설비별 위험도 순위, IR, SR로 표현된다. 특히 위험도 순위는 평가 대상의 안전 조치 우선순위를 결정하는 중요한 자료가 되어 설비의 안전성을 높이는 데 효율적인 투자를 가능하게 한다. IR은 분석 대상 주변의 위험도를 지도상에 등고선(risk contour)으로 도식화한 결과를 확인할 수 있다. SR은 시설 주변의 인구수를 분석하여 F-N 커브에 결과를 도출하여 해당 설비의 설치 허용 여부를 분석할 수 있다.

이러한 위험을 분석하기 위해서는 먼저 사고의 시나리오를 만들고 시나리오에 대해 각각 발생 가능성과 피해 영향의 강도 또는 범위를 평가한다. 피해 영향 거리는 일반적으로 사망이나 부상이 예상되는 거리로 정의된다.

2.1.1 개인적 위험도(individual risk)

IR은 특정 위치에 존재하는 한 개인이 수소 배관 사고로 인하여 사망하거나 심각한 부상을 입을 확률을 나타낸다.

이 값은 단위 시간(주로 연간)을 기준으로 평가되며 개인의 이동과 존재에 대한 가정을 수반하여 수치화한 위험도 평가 기법으로 다음의 식 및 Fig. 1로 표현할 수 있다.

$$IR = \sum_i (P_i \times F_i) \quad (2)$$

P_i : 사고 시나리오 i 의 발생 확률

F_i : 사고 시나리오 i 로 인한 개인의 피해 확률

2.1.2 사회적 위험도(societal risk)

SR은 특정 사고가 일정 집단에 속한 사람들에게 미칠 수 있는 위험성을 의미하며 사고로 인한 예상 피해 인구와 그 피해가 발생할 확률을 결합하여 빈도로 나타낸 것이다. 즉 SR은 특정 지점에서 일정 규모의 인명 피해가 발생할 수 있는 가능성을 평가하는데 예를 들어 특정 위치(x, y)에서 10명의 인명 피해가 나타날 확률을 평가하는 방식으로 표현할 수 있다. SR 산정 시에는 IR 평가에서 사용하였던 사고 발생 가능성과 피해의 크기에 대한 정보를 동일하게 활용한다. 또한 인근 지역의 인구 규모와 분포 형태, 인구가 머무르는 장소의 특성(일반 주거지, 학교, 의료 시설 등), 체류 시간과 같은 다양한 요소들이 반영되어야 정확한 SR 평가가 이루어진다.

SR은 주로 F-N 커브 형태로 표현되며 사고로 인한 사망자 수와 그 빈도의 관계를 다음의 수식과 Fig. 2로 표현할 수 있다.

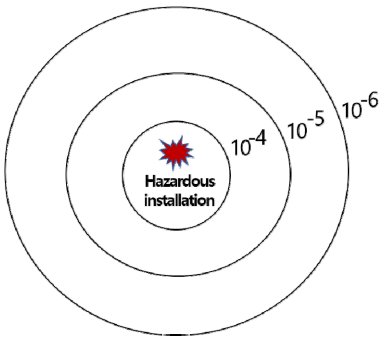


Fig. 1. Individual risk contour

$$SR = \sum_j (P_j \times N_j) \quad (3)$$

P_j : 사고 시나리오 j 의 발생 확률

N_j : 사고로 인한 피해자 수

2.2 위험성 평가 프로그램(Hy-KoRAM)

Hy-KoRAM은 가스 누출 시 피해 범위 및 사고 발생 빈도를 분석하기 위하여 개발된 위험성 평가 프로그램이다. 이 프로그램은 미국 에너지부(Department of Energy, DOE)가 개발한 HyRAM의 정성적, 정량적 평가 모듈을 보완하여 만들어졌으며 오픈 라이선스로 정성적 평가에서 정량적 평가까지 수행할 수 있도록 설계되었다. Hy-KoRAM은 수소 누출 사고가 발생하였을 때 피해 예상 반경을 기준으로 IR과 SR 모두 산출할 수 있다. 특히 IR 평가는 지도상에 등고선 형태로 위험 구역을 나타내므로 수소충전소 주변에서 지점별, 거리별 위험의 정도를 직관적으로 파악하여 효과적인 안전 대책을 마련할 수 있게 도와준다. 또한 SR 평가는 주변 인구의 분포 특성을 고려하여 F-N 커브를 산출함으로써 수소충전소 설치의 허용 여부 판단에 활용할 수 있다. 더불어 프로그램에는 수소 누출 및 제트 화염에 대한 실증 시험 결과를 반영한 피해 영향 모델이 적용되었고 수소 설비의 특성을 반영하여 통계적으로 보정된 고장 빈도(failure frequency)를 제공하도록 설계되었다.

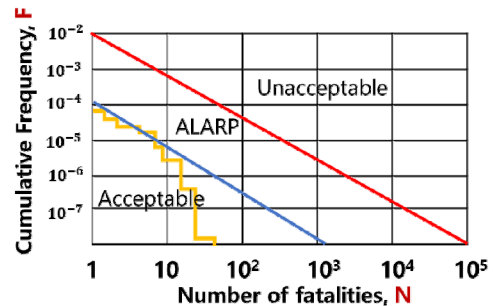


Fig. 2. Societal risk F-N curve

2.3 사고 시나리오 설정

Hy-KoRAM 프로그램에서 quantitative risk assessment (QRA)를 사용하기 위해서는 설비 운전 정보와 누출 정보가 필요하다. 설비 운전에는 운전 온도, 운전 압력, 저장 질량에 대한 데이터, 누출 정보에서는 누출공 직경, 누출 지속 시간, 누출 빈도, 점화 확률에 대한 데이터가 필요하며 설비에 대한 지역을 가정하고 인구수 추정값이 필요하다⁸⁾.

2.3.1 점화 확률

인근 기업과 공장 시설의 점화 확률은 Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer 및 Sandia National Laboratory에서 발간한 Purple book, Sandia Report를 기준으로 Table 1과 같이 누출량을 고려하여 즉시 점화 확률 0.053, 지연 점화 확률 0.027을 선정하였다.

2.3.2 인구 분포

수소 배관은 서울 강북 지역에 있다고 가정하였으며 이 중 유동 인구가 많은 주요 역 및 주거 지역이 밀집된 구역으로 1구역부터 6구역까지 총 6개 구역으로 설정하였다.

인구수를 추정하기 위해서 건물 유형을 거주 지역 인구, 상업 지역 인구, 비거주 지역 인구 3가지로 나누고 인구를 종속변수로, 각 건물을 독립변수로 설정하여 회귀분석을 수행하였다. 회귀식은 다음과 같다.

$$\text{인구} = a \times \text{거주지역 인구} + b \times \text{상업지역 인구} + c \times \text{비거주지역 인구} \quad (4)$$

Table 1. Ignition probability based on release rate

Hydrogen release rate (kg/s)	Immediate ignition probability	Delayed ignition probability
<0.125	0.008	0.004
0.125-6.250	0.053	0.027
>6.250	0.230	0.120

회귀분석의 결과 a부터 c에 해당하는 독립변수의 가중치가 계산된다. 계산된 가중치를 위의 식에 적용하면 대상 지역의 인구가 추정된다. 이 방법은 인구를 추정하는 획기적인 기법으로 평가된다. 그러나 상업 지역이나 농업 지역과 같이 인구에 큰 영향을 미치지 않는 변수까지 고려함으로써 회귀분석 과정에서 인구 가중치가 정확하게 계산되지 않을 수 있다는 단점이 있다.

a부터 c의 가중치를 설정하기 위하여 6개 구역에 거주 지역, 상업 지역, 비거주 지역에 해당하는 각각의 건물 수를 조사하였다. 주거 지역은 아파트, 상업 지역은 일반 상업 건물, 학교, 병원으로, 비거주 지역은 기타로 두고 아파트는 세대 수 × 3명, 일반 상업 건물은 1채당 × 100명, 학교는 학생 수와 교사 수의 합, 병원은 대형 병원을 기준으로 1채당 × 100명, 비거주 지역은 상시 거주자가 없어 0명으로 가중치를 설정하였다.

Table 2는 6개 구역의 건물 수 및 가중치를 설정한 인구수를 주거 지역, 상업 지역으로 구분하여 나타낸 표이다.

2.3.3 사고 시나리오 선정

Table 3은 KOSHA guide P-107-2020 “최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술 지침”으로 설비 운전에 대한 데이터를 정의하기 위한 내용을 표로 정리하였다.

물질에 대한 input data는 누출 지속 시간은 600초, 누출공의 크기는 물질이 누출될 수 있는 가장 큰 연

Table 2. Population survey by area

Site	Residential area	Commercial area
Area 1	0	2,600
Area 2	864	5,400
Area 3	2,820	4,900
Area 4	5,433	2,900
Area 5	0	4,472
Area 6	1,176	1,009
Total	31,574	

Table 3. Selection of accident scenarios

	Worst-case accident scenario	Alternative accident scenario
End point	1) Explosion endpoint: the location where flammable gases or liquids experience an overpressure of 0.07 kgf/m ² 2) Fire endpoint: the location where flammable gases or liquids are exposed to radiant heat of 5 kW/m ² for 40 seconds	
Wind speed and atmospheric stability	1.5 m/s, stability class F	Actual local weather conditions, or 3m/s, stability class D
Ambient temperature and humidity	Ambient temperature, 40°C, ambient humidity, 50%	Annual average temperature and humidity of the region for the past year, or ambient temperature is 25°C, ambient humidity is 50%
Release height	Ground-level release	Actual release height or ground-level release
Surface roughness conditions	Appropriate terrain type among urban or rural areas	
Temperature of released substance	For substances that are gases at ambient temperature and pressure but handled as liquefied gases	Use operating temperature
Release quantity and release duration	Assume that the maximum inventory within a container or pipe is released over a period of 10 minutes	Determined considering reduction by both passive and active mitigation systems, according to methods outlined in KOSHA guide P-92 (guidelines on release source modeling), KOSHA guide P-110 (technical guidelines for minimizing damage in chemical plants), or American API risk-based inspection (API 581)

결구 배관 직경의 20%, 운전 온도 10°C로 설정하였고 현재 수소 도시에서 사용되는 사용 압력 및 저장 질량을 활용하여 운전 압력 350 bar, 저장 질량 10,000 kg을 설정하였다. 또한 Sandia Report (2009- 0874)에서

의 pipe 누출 빈도를 인용하여 누출 빈도 2×10^{-6} 를 산정하였다.

3. 위험도 평가 결과

3.1 제트 화재 및 증기운 폭발 결과

제트 화재의 피해 영향 범위는 6개 구역에서 모두 다른 결과가 산출되지만 10-15 m 사이의 유사한 결과값을 나타낸다.

사고 시나리오를 분석한 제트 화재의 SR은 1-5구역은 사망자 수 1명, 발생 빈도 1E-5로 산출되고 6구역은 사망자 수 0명, 발생 빈도 1E-6으로 산출되며 6구역 모두 허용 가능한 위험(acceptable) 구역으로 산출된다.

Table 4는 6개 구역에 input data를 적용시킨 제트 화재의 피해 영향 범위 및 F-N 커브에 대한 결과를 정리한 표이다. 수소 배관이 매설되어 있지 않는 경우 증기운 폭발의 발생 확률은 현저히 낮지만 증기운 폭발이 발생하는 경우가 있기 때문에 증기운 폭발의 피해 영향 범위와 F-N 커브에 대해서도 분석하였다.

증기운 폭발의 피해 영향 범위는 6개 구역에서 모두 다른 결과가 산출되지만 90-100 m 사이의 유사한 결과값을 나타낸다.

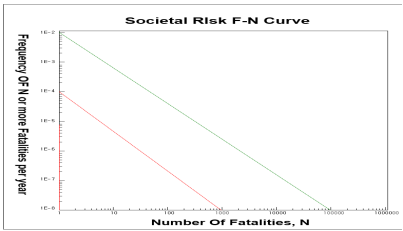
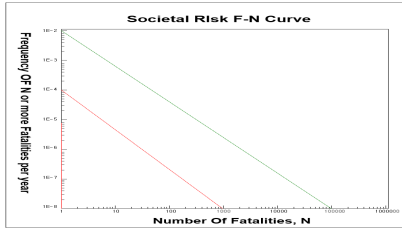
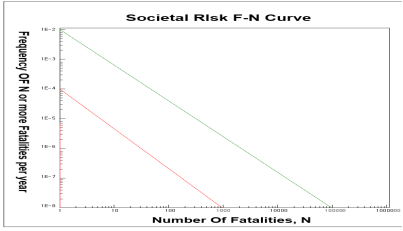
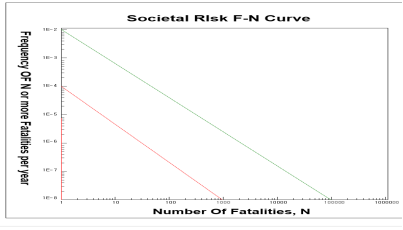
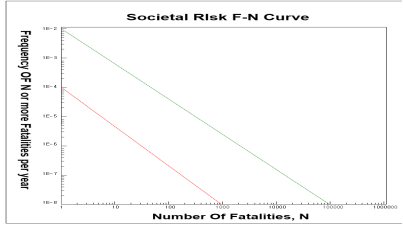
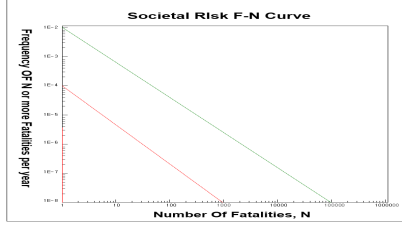
증기운 폭발의 사회적 위험도를 분석하면 1구역 150명, 2구역 270명, 3구역 260명, 4구역 390명, 5구역 200명, 6구역 190명의 사망자가 발생하고 발생 빈도는 1E-5로 유사하게 산출되며 모든 구역이 조건부 허용(as low as reasonably practicable) 범위에 포함된다. 이는 모든 구역에서 사고 위험이 사회적으로 용인 가능한 수준에 있음을 의미한다.

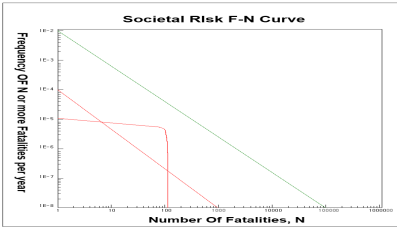
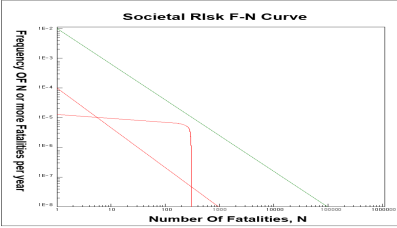
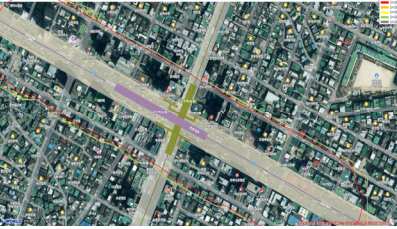
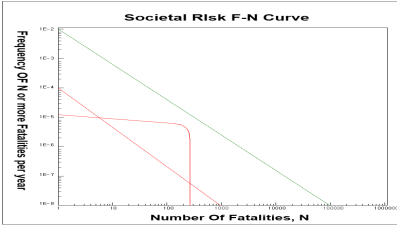
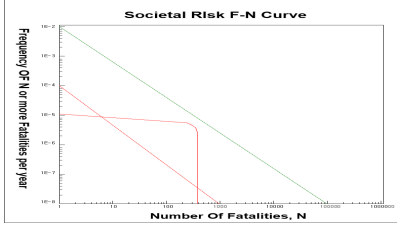
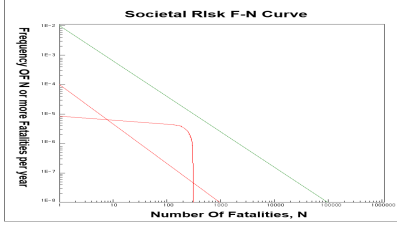
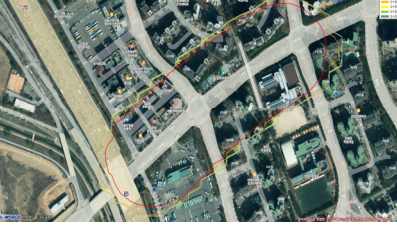
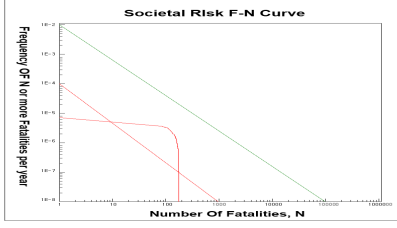
Table 5는 6개 구역에 input data를 적용시킨 증기운 폭발의 피해 영향 범위 및 F-N 커브에 대한 분석 결과를 정리한 표이다.

4. 결론 및 고찰

본 연구는 Hy-KoRAM 프로그램을 활용하여 수소

Table 4. Jet fire scenarios and F-N curve results

	Jet fire accident scenario	F-N curve
Area 1		
Area 2		
Area 3		
Area 4		
Area 5		
Area 6		

	VCE accident scenario	F-N curve
Area 1		
Area 2		
Area 3		
Area 4		
Area 5		
Area 6		

배관의 누출 사고에 대하여 Purple book, Sandia Report 등 신뢰성 높은 데이터를 기반으로 사고 시나리오를 분석하여 정량적 위험성 평가를 수행하고 제트 화재 및 증기운 폭발 시나리오를 대상으로 피해 영향 및 SR을 도출하였다.

분석 결과 제트 화재 사고는 피해 범위가 25 m 이내로 제한되며 F-N 커브에서 허용 가능한 위험 수준에 해당하는 것으로 나타났다. 반면 증기운 폭발 사고는 최대 100 m 이내의 광범위한 피해를 야기할 수 있으며 사망자 수 및 사고 빈도 측면에서 상대적으로 높은 위험성을 보였지만 조건부 허용 구간에 포함되는 결과가 도출되었다.

본 연구에서 도출된 위험성 평가 결과는 수소 인프라 구축 및 수소 도시 조성 시 안전성 향상에 실질적으로 기여할 것으로 기대된다. 그러나 수소 고유의 위험성에 대한 철저한 이해와 체계적 관리가 병행되어야 할 것이다. 향후 다양한 복합 시나리오 및 환경 변수에 대한 추가 연구를 통해 보다 정밀한 위험성 평가 체계 구축이 요구된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 수소충전인프라 안전관리 핵심기술개발(20215810100060, 수소 전주기 통합 위험성평가 프로그램 및 액화수소 안전기준 개발)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. D. Kim, J. S. Lim, and J. Lee, "Current status of standardization for quality control of hydrogen fuel in hydrogen refueling stations for fuel cell electric vehicles", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 33, No. 4, 2022, pp. 284-292, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.4.284>.
2. H. Kim and S. Kang, "Analysis of damage range and impact of on-site hydrogen fueling station using quantitative risk assessment program (Hy-KoRAM)", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 5, 2020, pp. 459-466, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.5.459>.
3. N. Nanninga, A. Slifka, Y. Levy, and C. White, "A review of fatigue crack growth for pipeline steels exposed to hydrogen", *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 115, No. 6, 2010, pp. 437-452, doi: <https://doi.org/10.6028/jres.115.030>.
4. Asia Industrial Gases Association. "Standard for hydrogen piping systems at user location", Asia Industrial Gases Association, 2012, pp. 1-7. Retrieved from https://asiaiga.org/uploaded_docs/AIGA%20087_14_Standard%20for%20Hydrogen%20Piping%20Systems%20at%20User%20Location.pdf.
5. European Industrial Gases Association (EIGA), "Hydrogen Pipeline Systems", EIGA, 2014, pp. 7-12. Retrieved from <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC121.pdf>.
6. Y. D. Jo and J. J. Kim, "A study on mitigating accidents for liquid hydrogen", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 16, No. 6, 2012, pp. 29-33, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2012.16.6.29>.
7. D. H. Seo, T. H. Kim, and K. W. Rhie, "A study on the calculation and application of the risk in the hydrogen stations", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 24, No. 5, 2020, pp. 1-9, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2020.24.5.1>.
8. J. LaChance, W. Houf, B. Middleton, and L. Fluer, "Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards", Sandia National Laboratories, USA, doi: <https://doi.org/10.2172/983689>.