Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 855~865
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.855

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

수소 주택 단지의 수소 화재 및 폭발 사고 위험성 평가

박병직† · 윤웅기 · 김양균 · 황인주

한국건설기술연구원 수소인프라센터

Risk Assessment of Hydrogen Fire and Explosion Accidents in Hydrogen Housing Complexes

BYOUNGJIK PARK†, UNGGI YOON, YANGKYUN KIM, IN JU WHANG

Fire Safety Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Korea

†Corresponding author :
templer83@kict.re.kr

Received 30 September, 2025
Revised 19 December, 2025
Accepted 19 December, 2025

Abstract >> Hydrogen is increasingly adopted as a clean energy carrier for residential applications, yet its wide flammability range and low ignition energy raise safety concerns. This study presents a quantitative risk assessment (QRA) of the Hydrogen House complex at the Samcheok demonstration site. The methodology included hazard identification (HAZID), frequency analysis using Sandia references and UKOPA pipeline statistics, consequence modeling supported by CFD and large-scale explosion tests, and risk evaluation based on individual and societal risk criteria. Results show that small leaks occur more frequently than ruptures, with jet fires as the dominant contributor to overall risk. Individual risk levels were below the international acceptance criterion of 10^{-6}/year, and societal risk was within the ALARP region. All major facilities, including the electrolysis, compressor, and fuel cell rooms, were classified as medium risk, with equipment damage identified as the most credible worst-case consequence. These findings confirm that the Hydrogen House complex satisfies international safety benchmarks, while highlighting the importance of early leak detection, ventilation enhancement, and ignition source control. The study contributes practical insights for the safe design and operation of hydrogen-based residential infrastructures.

Key words : Hydrogen housing(수소주택), Quantitative Risk Assessment, QRA (정량적 위험성 평가), Hazard Identification, HAZID(위험요소 식별), Computational Fluid Dynamics, CFD(전산유체역학 해석), Explosion hazards (폭발 위험성)

1. 서 론

수소는 탄소중립과 에너지 전환을 실현하기 위한 핵심 에너지원으로 전 세계적으로 주목받고 있다. 일본에서는 ENE-FARM 보급을 통해 30만 가구 이상에 수소 연료전지를 설치하였다[1,2]. 스웨덴 Vårgårda에서는 태양광과 수소 저장 시스템을 결합한 에너지 자립형 주택 단지가 조성되어 172세대가 독립적으로 전력과 난방을 공급받고 있다[3]. 국내에서도 정부는 2019년 「수소경제 로드맵」을 발표하고, 「수소 시범도시 인프라 기술개발 사업」을 추진하여 안산, 울산, 전주·완주, 삼척을 시범도시로 지정하고 수소 기반 주거 모델 구축을 본격화하고 있다[4]. 그러나 수소는 작은 분자 크기, 높은 확산성, 낮은 점화에너지, 그리고 넓은 가연범위를 지닌 기체로서 누출 시 폭발과 화재로 이어질 가능성이 크다[5,6]. 이러한 수소에너지를 안전하게 이용하기 위해서 국제적으로는 Sandia Lab. 가이드라인[7], UKOPA (United Kingdom Onshore Pipeline Operators' Association) 데이터[8], HSE (Health and Safety Executive) 기준[9], IEC (International Standards) 분류[10]가 QRA (Quantitative Risk Assessment) 연구에 적용되어 왔으며, 국내에서도 수소충전소[11], 배관[12], 연료전지 시스템[13], 수소주택[14,15]을 대상으로 한 위험성 평가 연구가 보고되었다.

특히 주택 내 연료전지실과 같은 밀폐 혹은 반 밀폐 공간에서 수소가 누출될 경우 폭연 및 폭굉으로 확대될 수 있어 거주민의 안전에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 수소 기반 주거 모델의 안전성을 확보하기 위해서는 정량적 위험성 평가를 포함한 다각적 접근이 필요하다. 본 연구의 선행 연구로 연료전지실(Fuel Cell Room)에서 수소가스가 누출(수소/공기 비율 40%)되어 폭발한 경우에 최대 과압이 46 kPa에 달하며 임펄스는 101 Pa · s로 측정되어 과압에 의한 입주민 피해를 예상하는 실험연구가 수행되었다[14,15]. 본 연구는 수소 주택 단지를 대상으로 HAZID (Hazard Identification), 빈도 분석, 사고 영향 해석, 위험도 산정을 종합적으로 수행하였다. 더 나아가 UKOPA 파이프라인 사고 통계와 실규모의 폭발 실험 자료를 연계하여 분석의 신뢰성을 강화하였다. 이를 통해 Fig. 1과 같이 국내 수소 주택 단지를 대상으로 안전성을 검증하고 향후 설계 및 운영 단계에서 반영할 수 있는 정책적·기술적 시사점을 제시하고자 한다.

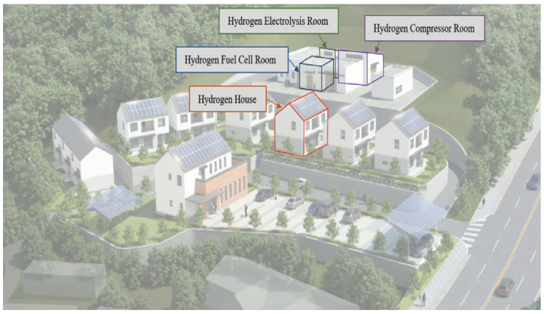

Fig. 1. Bird's-eye view of the Hydrogen House complex[16]

2. 연구 방법

연구는 크게 세 단계로 진행되었다. 첫 번째 단계에서는 HAZID기법을 적용하여 관리동과 주택 내 연료전지실을 포함한 주요 노드에서 발생 가능한 사고 시나리오를 도출하였다. 이 과정에서 보우 타이(Bow-tie) 기법과 ISO 17776 위험도 행렬(Risk Matrix)을 활용하여 원인, 사고, 결과, 그리고 예방 및 저감장치를 체계적으로 식별하였다[17]. 두 번째 단계에서는 사고 발생 빈도 분석을 수행하였다. Sandia Lab.[7] 데이터를 기반으로 배관 직경별 누출 확률을 산정하고, UKOPA의 파이프라인 사고 통계[8]를 참고하여 국내 수소 주택 단지에 적합한 보정 값을 적용하였다. UKOPA 자료에 따르면 전체 사고 빈도는 0.204건/1000 km · yr, 최근 20년간은 0.075건/1000 km · yr로 나타나 장기적으로 위험 수준이 감소하는 추세를 보였다[8]. 그러나 외부 간섭에 따른 소규모 배관 사고가 여전히 주요 원인으로 확인되어 소구경 배관을 활용하는 수소 주택 단지 위험성 평가에 반영하였다. 마지막 단계에서는 개인적 위험성과 사회적 위험성을 산정하였다. 개인적 위험성은 특정 지점에서의 사망 확률을 산출하였으며, 사회적 위험성은 인구 밀도를

고려하여 사고 발생 빈도-사망자 수 곡선(F–N curve, Frequency-Number of fatalities curves)를 작성하였다. 이를 바탕으로 ALARP (As Low As Reasonably Practicable) 기준을 적용하여 허용 가능한 위험 수준인지 평가하였다.

2.1 위험요소 식별(HAZID)

관리동과 수소 주택에서 수소 누출이 가능한 모든 구역의 장비들은 무인 운전이 가능하며, 사고 발생 시 주변 사람이 사고에 노출될 가능성은 낮다고 가정하였다. 즉 인명사고가 발생할 수는 있지만, 이로 인한 사망 등은 위험도 평가(Risk Assessment)의 대상이 되기에는 신뢰할 만한(Credible) 사고는 아니라고 판단하였다. 수전해 설비는 탈이온수(DEMI water)를 공급받아 수소와 산소를 생산한 후, 수소는 버퍼탱크를 거쳐 압축기(Compressor)로 보내고 산소는 배기한다. 수소와 산소 모두 누출이 발생하면 폭발 분위기(Explosive Atmosphere)를 조성하여 증기운 폭발(Vapor Cloud Explosion, VCE)이 발생할 수 있다. 따라서 수소 누출의 위험과 산소 누출의 위험을 별도로 구분하여 분석하였다.

수소는 가연범위(Flammability Range)가 넓으므로 누출을 방지하는 것이 가장 중요하며, 그다음으로 중요한 것은 환기 성능을 높여 수소가스 운(Hydrogen Cloud)이 크게 발달하지 않도록 하고 점화원(Ignition Source)을 제거하는 것이다. 점화를 방지하기 위한 여러 안전장치들을 화재·폭발 장벽표(FBT, Fire and Blast Table)에 기록하였다. 수소 누출이 발생하면 수전해실(Electrolyzer Room) 내부에 폭연(Deflagration)이 발생하여 장비 손상을 초래하는 것을 신뢰할 만한 최악의 결과(Credible Worst Consequence)로 지정하였다. 만약 폭굉(Detonation)이 발생한다면 관리동 전체가 붕괴할 수도 있으나, 수전해실의 부피와 경량구조물 지붕으로 되어 있어 폭압(Blast Pressure)이 낮아질 수 있다는 점을 고려하였다. 한편, 산소가 누출된다면 폭연이나 폭굉보다는 플래시 화재(Flash Fire)가 발생할 가능성이 높다. 플래시 화재는 순간적 현상이며, 만약 인원이 노출된다면 치명상을 입을 수 있지만, 수전해 장비는 무인으로 운전이 되기 때문에 장비의 경미한 손상(Minor Damage) 정도가 예상된다. 다만, 수전해실에 적용된 소화 시스템(Fire Fighting System)에 대한 정보는 가용하지 않았다. 화재감지기(Fire Detector) 설치 여부, 소화 방법(Extinguishing Method)의 수립 여부, 설비의 필요성 등을 추가로 점검할 필요가 있다.

압축기실에는 압축기와 더불어 수소를 저장하는 다수의 금속수소화물 실린더(Metal Hydride Cylinder)가 설치되어 있다. 가장 수소 누출 가능성이 높은 구역으로, 이를 고려하여 개방형 출입구, 갤러리형 환기창(Gallery-Type Vent), 지붕과 벽 사이의 환기 슬릿(Ventilation Slit) 등이 설치되어 있다. 이 구역에서는 폭연과 함께 제트화재(Jet Fire)의 가능성도 존재하며, 폭연으로 인한 장비 손상을 신뢰할 만한 최악결과(Credible Worst Consequence)로 선정하였다.

수소 누출이 발생하면 공간의 부피(Room Volume)와 장비의 복잡한 배치(Complex Layout)를 고려할 때 폭굉의 가능성도 있지만, 환기시설의 성능을 고려하여 폭굉 보다는 폭연을 최악 시나리오로 선정하였다. 이러한 판단은 정량적 분석(Quantitative Analysis)을 통해 보강할 필요가 있다. 또한 비상 차단 장치(Emergency Shutdown Device)의 유무와 개수를 점검하여 발생 가능한 제트화재 지속시간을 추정하고, 제트화재가 사고 확대로 이어질 가능성을 검토하는 것도 중요하다. 압축기는 고압으로 운전되는 장비이며, 기체 수소 저장용 금속수소화물의 물리적 손상 가능성을 배제할 수 없다. 물리적 폭발 또한 위험요소로 고려되며, 장비 손상을 신뢰할 만한 최악 결과로 선정하였다.

수소 주택의 연료전지실에서도 수소 누출이 발생할 수 있으며, 이는 폭연·폭굉·제트화재를 유발할 수 있다. 사고의 원인과 규모는 수전해실과 유사할 것으로 보인다. 다만, 강한 폭발이 발생하여 연료전지실과 제어실 사이의 통로가 손상된다면, 제어실에서의 탈출 경로가 차단될 수 있다. 따라서 탈출로 벽의 강도와 폭발로 인한 손상 가능성을 평가할 필요가 있

다. 수소 주택의 연료전지실에서 수소 누출로 폭발이 발생한다면 거주민의 인명피해가 발생할 수도 있다. 연료전지실은 주거공간과 벽을 공유하지만, 고강도 하중을 견딜 수 있도록 설계되어 있는 것으로 파악된다. 다만 설계하중(Design Load)은 명확히 알려져 있지 않다. 연료전지실 주변은 통제구역이 아니므로, 주변 거주민이 사고에 노출될 가능성도 존재한다. 따라서 폭발뿐 아니라 제트화재 강도도 평가해야 한다. 연료전지실 부피를 고려할 때 폭발이 발생하더라도 주택 구조를 파괴할 정도의 하중은 아닐 것으로 판단되며, 연료전지 손상이 신뢰할 만한 최악결과로 설정되었다.

위험도 평가(Risk Assessment)에 따른 7가지 대표 위험요소는 Table 1과 같다. 평가 결과 모든 요소는 중간(Medium) 수준의 위험도를 보였으며, 자산(Asset) 관점에서의 심각도(Severity)는 2∼4 등급, 발생 빈도(Frequency)는 B 또는 C 등급으로 평가되었다. 수소 주택 각 구역의 수소 누출 시나리오에 대한 권고사항

Table 1. Result of risk ranking

Hazard	Credible-Worst Consequence	Severity rating	Likelihood rating
GH2 leak in Electolysis Room	Damage of eq in Electrolsis Room	3	B
O2 leak in Electolysis Room	Minor Asset Damage	2	C
GH2 leak in Compressor Room	Damage of Equipment in Compressor Room	4	B
Physical Explosion of HP eqipment in Compressor Room	Damage of Equipment within Compressor Room	3	C
GH2 Leak in Fuel Cell Room	Damage of Equipment in Fuel Cell Room	3	B
GH2 Leak in House Fuel Cell Room	Fuel Cell Damage	2	C

Table 2. Recommendations and Relevant Barriers for GH_2 Leak Scenarios

Recommendation	Relevant Event/Barrier
GH2 Leak in Electrolysis Room	Check if fire detection is available
	Develop a fire-fighting philosophy and consider providing necessary fire-fighting system.
	The room has the sides of the roof open for natural ventilation. Its ceiling has the slope that may collect GH2 at the highest position that may improve gas detection function.
GH2 leak in Compressor Room	Check the number and locations of emergency shutdown valves and evaluate the duration of jet fire.
	Evaluate possibility of deflagration to detonation considering the design of the metal hydride GH2 storage system. (Remark) The axes of the metal hydride cylinders are perpendicular to the probable flame development toward the opening.
GH2 leak in Fuel cell Room	Check the integrity of the corridor wall and possibility of damage by explosion in the fuel cell room.
GH2 leak in House Fuel cell Room	Check if a passive fire protection is necessary against jet fire in the House Fuel Cell room.
	Consider installing a visual warning system around the house Fuel Cell room upon flammable environment in it.

은 Table 2와 같다. 수전해실(Electrolysis Room)에서는 화재 감지기 설치와 소화 시스템 도입이 필요하며, 상부에 수소가 체류하지 않도록 환기 및 가스 감지 기능을 강화해야 한다. 압축기실에서는 비상 차단 밸브의 위치 확인과 제트화재 지속 시간 평가가 요구되며, 메탈 하이드라이드 저장 시스템 설계 시 폭연이 폭굉으로 전이될 가능성을 고려해야 한다. 연료전지실은 벽체 건전성 점검과 폭발로 인한 손상 가능성 검토가 필요하다. 마지막으로 주택 연료전지실에서는 제트화재에 대비한 수동적 방호와 시각적 경고 시스템 설치가 권장된다.

2.2 데이터 및 기초모수 설정

빈도 분석은 UKOPA 통계[8]와 TNO 계산식[17]을

Table 3. Geometry Factors of Components

Component	Geometry Factor
Pipes	0.125
Compressors	0.125
Valves	0.080
Cylinders	0.125
Elbow Joints	0.125
Tee Joints	0.080
Unions	0.125
Ball Plugs	0.250
End Caps	0.250
Hoses	0.125
Rupture Disks	0.125
Filters	0.125

활용하여 설비 및 배관의 누출 조건에 따라 수행되었다. 누출은 0.1%, 1%, 10%, 100%의 조건으로 구분하였으며, 100% 누출은 폭발, 나머지는 제트화재로 분류하였다. 수소 누출 빈도는 구성품의 누출 빈도, 형상 계수, 구성품 개수를 종합하여 계산하였다. 분석 대상은 크게 통합관리동과 수소주택으로 구분되었다. 통합관리동은 수전해실(수소정제장치, 수소가스분석기, 수전해장치, 전해조 및 배관), 압축실(버퍼탱크, 수소압축기, 수소 분배 배관, 금속 수소화물 저장시스템 및 배관), 전기실(수소연료전지 및 배관)로 구성되며, 수소주택은 기계실(수소연료전지 및 배관)과 외부 연결 배관을 포함하였다.

누출빈도 식 (1)에서 G_i (Geometry factor, 형상계수)는 동일한 부품이라도 누출 가능 면적·연결부 형상·취약부 개수에 따라 실제 노출도를 가중하기 위한 보정치이다. Table 3과 같이 밸브·티 조인트(Tee joints)는 0.080으로 상대적으로 낮고, 파이프·압축기·엘보(Elbow joints)·실린더 등 일반 배관/연결부는 0.125 수준으로 설정되어 있습니다. 반면 볼 플러그(Ball plugs)와 엔드 캡(End caps)은 0.250로 가장 높아 말단·폐쇄구간의 구조적 취약성을 보수적으로 반영하였다. 본 연구의 빈도 해석에서는 이 계수를 구성품별 표준 누출빈도 f_i에 곱해 설비 수준의 누출빈도를 합산하는 방식으로 아래와 같이

Table 4. Incident Frequency by Equivalent Hole Size Class

Equivalent Hole Size Class	Number of Incidents	Frequency (Incidents per 1000 km · yr)
Full Bore and Above	6	0.006
110 mm – Full Bore	2	0.002
40 – 110 mm	9	0.009
20 – 40 mm	24	0.024
6 – 20 mm	30	0.030
0 – 6 mm	133	0.133
TOTAL	204	0.204

적용하였다.

$$f_n = \sum (f_i \times G_i \times N_i) \tag{1}$$

f_n: 설비에 대한수소누출빈도
f_i: 구성품의 수소누출빈도
G_i: 형상계수
N_i: 설비 내 구성품 개수

Table 4에서는 UKOPA 유형의 사고 통계를 반영하여 배관의 등가 홀 크기 및 클래스별 사고 건수와 노출 보정 빈도(Incidents per 1000 km · yr)를 제시하였다. 전체 빈도 합은 0.204/1000 km · yr이고, 이 중 0∼6 mm 소구경 손상군이 133건·0.133/1000 km · yr로 다수의 사건이 해당되며, 6∼20 mm (0.030), 20∼40 mm (0.024), 40∼110 mm (0.009) 순으로 감소하도록 되어 있다. 일반적으로 작은 누출이 자주 발생하고 큰 파손은 드물게 발생한다는 사실을 재확인하며, 본 연구의 QRA도 소구경·소유량 누출이 빈도가 높다는 것을 위험 기여도의 핵심 요인으로 반영하였다.

Table 5는 노출 기반 모수를 보여주는 표로, 전체 23,587 km 중 천연가스가 92.5%로 대부분을 차지하며, 에틸렌(4.8%), NGL (1.1%), 원유(1.0%)가 뒤따르며, 수소(Hydrogen)는 14 km (0.1%)로 매우 적다. 따라서 과거 파이프라인 통계는 주로 천연가스 시스템의 노출·운용 환경을 반영하고 있음을 의미하며,

Table 5. Distribution of Pipeline Length by Product

Product	Length (km)	% age of Total
Natural Gas (Dry)	21,818	92.5
Ethylene	1,140	4.8
Natural Gas Liquids	251	1.1
Crude Oil (Spiked)	224	1.0
Ethane	38	0.2
Hydrogen	14	0.1
Propylene	36	0.2
Condensate	24	0.1
Propane	21	0.1
Butane	20	0.1
TOTAL	23,587	100.0

Table 6. Ignition Probabilities

H_2 Release Rate (kg/s)	P (Immediate Ignition)	P (Delayed Ignition)
< 0.125	0.008	0.004
0.125 – 6.25	0.053	0.027
> 6.25	0.230	0.120

수소 배관에 직접 적용 시에는 물성 차이(확산성·점화에너지·가연범위)와 운영압력을 고려한 보수적 보정이 필요하다. 본 연구는 이러한 노출 편향을 인지한 상태에서 형상계수·점화확률·홀크기 분포를 함께 사용해 위험도를 보정하는 방법을 사용하였다.

수소 방출량(Hydrogen release rate)에 따라 즉시 점화 확률 P (Immediate ignition)과 지연 점화 확률 P (Delayed ignition)를 구분 제시합니다. Table 6과 같이 방출량이 작을수록 (<0.125 kg/s) 즉시/지연 점화 확률은 각각 0.008/0.004로 낮고, 0.125–6.25 kg/s 구간에서는 0.053/0.027로 증가하며, >6.25 kg/s에서는 0.230/0.120로 가장 크게 된다. 이는 누출 유량이 클수록 가연혼합이 빠르게 형성·확장되어 점화 가능성이 체계적으로 높아짐을 의미한다. 본 연구에서는 즉시점화를 주로 제트화재(Jet fire) 시나리오와, 지연점화를 폭발(Explosion) 시나리오의 점화 모델에 각각 연계하여 사용하였다.

2.3 빈도 산정 및 적용

본 연구에서는 Table 7과 같이 통합관리동 내 배관 시스템을 대상으로 수소 누출에 따른 폭발과 제트 화염 시나리오를 정량적으로 평가하였다. 폭발의 경우 배관 파열(Rupture) 조건을 적용하였으며, 제트 화염은 누출 크기를 소형(Minor), 중형(Medium), 대형(Major)으로 구분하여 분석하였다. 먼저 폭발 시나리오에서, 9.525 mm (3/8 inch) 배관이 파열(9.525 mm) 될 경우 폭발 확률은 약 6.09×10^{-9}로 산정되었다. 반면, 6.35 mm (1/4 inch) 배관의 파열(6.35 mm) 조건에서는 확률이 1.68×10^{-10}으로 도출되어 상대적으로 낮게 나타났다. 이는 동일한 조건에서 배관 직경이 클수록 폭발 확률이 증가한다는 점을 시사한다. 제트 화염의 경우, 9.525 mm (3/8 inch) 배관에서 소형 누출(0.3 mm)은 화재 확률이 2.21×10^{-5}로 가장 높게 나타났으며, 중형 누출(0.95 mm)은 7.92×10^{-6}, 대형 누출(3 mm)은 2.21×10^{-7}로 산정되었다. 6.35 mm (1/4 inch) 배관에서도 유사한 경향을 보였는데, 소형 누출(0.2 mm)은 9.0×10^{-9}, 중형 누출(0.635 mm)은 3.4×10^{-9}, 대형 누출(2 mm)은 1.78×10^{-9}로 나타났다.

주택 외부 1/2인치 배관에서의 수소 누출 시나리오는 폭발과 제트 화염으로 구분하여 Table 8과 같이 평가되었다. 폭발 시나리오의 경우, 파열(Rupture, 12.7 mm) 조건에서 폭발 확률은 8.4×10^{-11}로 산정되어 발생 가능성이 매우 낮음을 확인하였다. 소규모 누출(0.4 mm)에서는 4.5×10^{-9}, 중규모 누출(1.27 mm)에서는 1.7×10^{-9}, 대규모 누출(4.0 mm)에서는 8.9×10^{-10}으로 도출되었다. 이는 누출 크기가 커질수록 사고의 심각성은 증가하지만, 발생 확률은 상대적으로 낮은 경향을 보인다는 점을 시사한다.

한편, 제트 화염 시나리오에서는 배관 길이당 발생 빈도를 고려하여 분석이 수행되었다. 소규모 누출(0.4 mm)의 경우, 연간 발생 빈도는 1.33×10^{-1}/km・yr이며, 점화 확률을 고려한 화재 발생 확률은 1.06×10^{-3}/km・yr로 나타났다. 중규모 누출(0.2 mm)의 경우, 발생 빈도는 3.0×10^{-2}/km・yr이며, 최종 화재 발생 확률은 3.6×10^{-5}/km・yr로 산정되었다.

Table 7. Hydrogen Leak Frequency and Ignition/Fire/Explosion Probabilities

Case 1. Integrated Control Building: 9.525 mm Hydrogen Leak (Explosion)		Leak size : Rupture (9.525 mm)	
Components	Leak Frequency	Ignition probability	Explosion probability
Buffer tank	2.1E-07*0.125*1	0.004*0.3	3.15E-11
Hydrogen header	2.1E-07*0.125*1	0.004*0.3	3.15E-11
Hydrogen compressor	3.4E-05*0.125*1	0.004*0.3	5.1E-09
9.525 mm(3/8 inch) pipe	5.6E-07*0.125*11	0.004*0.3	9.24E-10
Total	6.09E-09		
Case 2. Integrated Control Building: 6.35 mm Hydrogen Leak (Explosion)		Leak size : Rupture (6.35 mm)	
Components	Leak Frequency	Ignition probability	Explosion probability
9.525 mm(3/8 inch) pipe	5.6E-07*0.125*2	0.004*0.3	1.68E-10
Total	1.68E-10		
Case 3. Integrated Control Building: 9.525 mm Hydrogen Leak (Jet fire)		Leak size : Minor (0.3 mm)	
Components	Leak Frequency	Ignition probability	Explosion probability
Buffer tank	9.8E-07*0.125*1	0.008	9.8E-10
Hydrogen header	9.8E-07*0.125*1	0.008	9.8E-10
Hydrogen compressor	2.2E-02*0.125*1	0.008	2.2E-05
9.525 mm(3/8 inch) pipe	4.5E-06*0.125*11	0.008	4.95E-08
Total	2.21E-05		
Case 4. Integrated Control Building: 9.525 mm Hydrogen Leak (Jet fire)		Leak size : Medium (0.95 mm)	
Components	Leak Frequency	Ignition probability	Explosion probability
Buffer tank	6.7E-07*0.125*1	0.008	6.7E-10
Hydrogen header	6.7E-07*0.125*1	0.008	6.7E-10
Hydrogen compressor	7.9E-03*0.125*1	0.008	7.9E-06
9.525 mm(3/8 inch) pipe	1.7E-06*0.125*11	0.008	1.9E-08
Total	7.92E-06		
Case 5. Integrated Control Building: 9.525 mm Hydrogen Leak (Jet fire)		Leak size : Major (3 mm)	
Components	Leak Frequency	Ignition probability	Explosion probability
Buffer tank	3.9E-07*0.125*1	0.008	3.9E-10
Hydrogen header	3.9E-07*0.125*1	0.008	3.9E-10
Hydrogen compressor	2.1E-04*0.125*1	0.008	2.1E-07
9.525 mm(3/8 inch) pipe	8.9E-07*0.125*11	0.008	9.79E-09
Total	2.21E-07		
Case 6. Integrated Control Building: 6.35 mm Hydrogen Leak (Jet fire)		Leak size : Minor (0.2 mm)	
Components	Leak Frequency	Ignition probability	Explosion probability
6.35 mm(1/4 inch) pipe	4.5E-06*0.125*2	0.008	9E-09
Total	9E-09		
Case 7. Integrated Control Building: 6.35 mm Hydrogen Leak (Jet fire)		Leak size : Medium (0.635 mm)	
Components	Leak Frequency	Ignition probability	Explosion probability
6.35 mm(1/4 inch) pipe	1.7E-06*0.125*2	0.008	3.4E-09
Total	3.4E-09		
Case 8. Integrated Control Building: 6.35 mm Hydrogen Leak (Jet fire)		Leak size : Major (2 mm)	
Components	Leak Frequency	Ignition probability	Explosion probability
6.35 mm(1/4 inch) pipe	8.9E-07*0.125*2	0.008	1.78E-09
Total	1.78E-09		

Table 8. Hydrogen Leak Frequencies and Probabilities in Hydrogen House (External, 1/2” Pipeline)

Case 9. Hydorogen house (External) 12.7 mm Hydrogen Leak (Explosion)		Leak size : Rupture (12.7 mm)	
Components	Leak Frequency	Ignition probability	Explosion probability
12.7 mm(1/2 inch) pipe	5.6E-07*0.125*1	0.004*0.3	8.4E-11
Total	8.4E-11		
Case 10. Hydorogen house (External) 12.7 mm Hydrogen Leak (Explosion)		Leak size : Minor (0.4 mm)	
Components	Leak Frequency	Ignition probability	Explosion probability
12.7 mm(1/2 inch) pipe	4.5E-06*0.125*1	0.008	4.5E-09
Total	4.5E-09		
Case 11. Hydorogen house (External) 12.7 mm Hydrogen Leak (Explosion)		Leak size : Medium (1.27 mm)	
Components	Leak Frequency	Ignition probability	Explosion probability
12.7 mm(1/2 inch) pipe	1.7E-06*0.125*1	0.008	1.7E-09
Total	1.7E-09		
Case 12. Hydorogen house (External) 12.7 mm Hydrogen Leak (Explosion)		Leak size : Major (4 mm)	
Components	Leak Frequency	Ignition probability	Explosion probability
12.7 mm(1/2 inch) pipe	8.9E-07*0.125*1	0.008	8.9E-10
Total	8.9E-10		
Case 13. Hydorogen house (External) 12.7 mm Hydrogen Leak (Jet fire)		Leak size : Minor (0.4 mm)	
Components	Leak Frequency	Ignition probability	Explosion probability
12.7 mm(1/2 inch) pipe	1.33E-01/km.yr	0.008	1.06E-03
Total	1.06E-03/km.yr		
Case 14. Hydorogen house (External) 12.7 mm Hydrogen Leak (Jet fire)		Leak size : Medium (1.27 mm)	
Components	Leak Frequency	Ignition probability	Explosion probability
12.7 mm(1/2 inch) pipe	3E-02/km.yr	0.004*0.3	3.6E-05
Total	3.6E-05km/yr		

이러한 결과는 대규모 파열 사고가 발생할 경우 그 결과는 치명적일 수 있으나, 발생 확률은 상대적으로 매우 낮음을 보여준다. 반면, 소규모 누출은 개별 사고의 결과는 제한적일 수 있으나 발생 빈도가 높아 전체 위험 기여도 측면에서 중요한 영향을 미친다. 따라서 수소 설비의 안전성 확보를 위해서는 대규모 파열 방지를 위한 구조적 안전 대책뿐 아니라, 소규모 누출의 조기 탐지 및 관리가 핵심적인 위험저감 전략임을 확인할 수 있다.

3. 위험도 평가(Risk Assessment)

3.1 분석 조건

개인적 위험성은 식 (2)와 같이 특정 개인이 사고 환경에 노출되어 사망이나 중상을 입을 확률로 정의되며, 사건 발생 빈도, 치명률, 기상 조건, 방향성, 인구 분포 및 체류 시간 등을 종합하여 산정하였다. 사회적 위험성은 식 (3)과 같이 특정 사고가 대중 전체에 미치는 위험 정도를 의미하며, 인구 밀도를 고려하여 사고 시나리오 발생 시 예측되는 사망자 수를 기반으로 평가하였다. 이때 F-N curve를 통해 사회

적 위험 정도를 시각화하였다.

$$IR_{i,j,k} = f_{eo,j} \cdot p_{fat,i,j} \cdot p_{weather,j} \cdot p_{direction,i,j} \cdot p_{loc,i,k} \cdot \theta_k \quad (2)$$

$IR_{i,j,k}$: 인구 집단 k에 속하는 가상의 개인에 대한 개인적 위험도

$f_{eo,j}$: 사건 결과 j의 발생 빈도

$p_{fat,i,j}$: 사건 결과 j로 인해 위치 i에서 발생하는 치명적 결과의 확률

$p_{weather,j}$: 사건 결과 j가 발생하기 위해 필요한 기상 조건의 확률

$p_{direction,i,j}$: 사건 결과 j가 위치 i 방향으로 영향을 미칠 확률

$p_{loc,i,k}$: 인구 집단 k에 속한 가상의 개인이 위치 i에 존재할 확률

θ_k: 인구 집단 k에 속한 가상의 개인이 해당 지역에 체류하는 전체 시간의 비율

$$N_i = \sum_{x,y} P_{x,y} \cdot p_{f,i} \quad (3)$$

$IR_{i,j,k}$: 사고결과 사례 i로 인해 발생하는 사망자 수

$P_{x,y}$: 위치 (x,y)에 존재하는 인구 수

$p_{f,i}$: 결과 분석 (consequence model)에서 도출된 사고결과 사례 i가 위치 (x,y)에서 발생할 경우의 치명 확률

수소 주택 단지를 대상으로 정량적 위험성 평가를 수행하였으며, 화재 및 폭발 확률과 해석 시뮬레이션인 RISK CURVES를 활용하여 개인적, 사회적 위험성을 도출하였다. 해당 도시의 풍장(Wind rose), 기온, 습도, 고도 등의 주변 환경 정보를 고려하였으며, 인구 밀도는 주차 면수(24면)를 고려하여 48명으로 가정하였다.

3.2 분석 결과

Fig. 2는 수소주택 단지 주변에서 수소 누출 및 점화 사고 발생 시 개별 위험성(Individual Risk)의 공간적 분포를 나타낸 것이다. 지도에서 등위선(Iso-risk contour)은 연간 사망확률이 일정 수준 이상인 구역을 의미하며, 중심부일수록 위험도가 높게 나타난다. 분석 결과, 위험성은 사고 발생 지점 인근에 국한되어 있으며, 인근 주택 및 시설에 직접적인 영향을 주는 영역은 매우 제한적이었다. 이는 개별 위험성이 국제적으로 허용되는 기준치인 10^{-6}/year 이하 수준임을 보여주며, 수소주택 단지에서의 운영이 인근 거주민 안전에 미치는 위험은 극히 낮음을 시사한다[9),18)].

Fig. 3은 사회적 위험성(Societal Risk)을 나타낸 F–N 곡선으로, 사망자 수(Fatalities)와 누적 빈도(Cumulative frequency)를 관계식으로 제시한 것이다. 검은색 기준선(Guideline curve)은 국제적(영국 Health and Safety Executive))으로 통용되는 허용 기준(기울기 -1의 직선으로 F=10^{-6} @ N=1000 까지 연

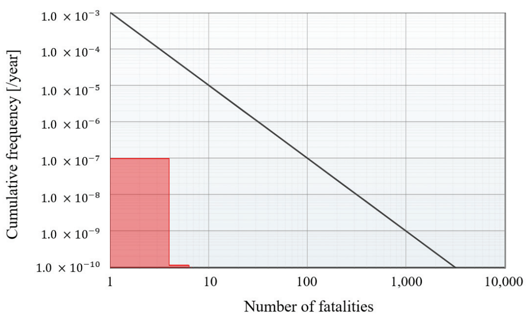

Fig. 2. Societal risk assessment results presented in the F–N curve

Fig. 3. Individual risk distribution map around the Hydrogen House site

결하는 방식)을 나타내며[9], 본 연구에서 산정된 빨간색 계단형 곡선은 해당 기준선보다 충분히 낮은 영역에 위치하였다. 이는 수소주택 단지의 사회적 위험도가 ALARP (As Low As Reasonably Practicable) 기준 내에서 허용 가능한 수준임을 의미한다. 또한 기댓값(Expected value, E = 5.124E-07)과 위험도 비율(R = 0.0015)은 모두 낮게 나타나, 다수의 인명 피해로 이어질 확률이 극히 제한적임을 확인할 수 있었다. 일반적인 사고는 연간 10^{-7} 수준으로 극히 낮은 수준이지만 최악의 사고 시나리오에 대한 최대 사망자 수는 8명으로 계산되었다. 따라서 본 연구의 정량적 위험성 평가 결과, 수소주택 단지는 개별 위험성과 사회적 위험성 모두 국제 안전 기준에 부합하며, 설계 단계에서 적절한 환기 성능 확보, 점화원 관리, 소규모 누출 조기 탐지와 같은 안전 대책이 유지된다면 안전한 운영이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 삼척 수소주택 단지를 대상으로 정량적 위험성 평가(QRA)를 수행하였다. HAZID를 통해 관리동과 주택 내 수전해실, 압축기실, 연료전지실 등 주요 노드에서 발생 가능한 사고 시나리오를 도출하고, UKOPA 장기 통계와 Sandia Reference 데이터를 기반으로 사고 발생 빈도를 산정하였다.

분석 결과, 모든 주요 구역은 중간(Medium) 수준의 위험도로 분류되었으며, 소규모 누출에 따른 제트화재가 주요 기여 요인으로 확인되었다. 대규모 파열로 인한 폭발은 치명적인 결과를 초래할 수 있으나 발생 확률은 극히 낮게 산정되었으며, 반대로 소규모 누출은 발생 가능성은 높지만 결과의 심각성은 제한적이었다. 따라서 수소주택 단지의 안전 확보를 위해서는 구조적 안전성 강화뿐 아니라 소규모 누출의 조기 탐지 및 환기 성능 확보가 핵심적인 위험 저감 전략임이 확인되었다.

위험성 평가는 개별 위험성(Individual Risk)과 사회적 위험성(Societal Risk)으로 구분하여 수행되었다. 개별 위험성은 국제 기준치인 10–6/year 이하 수준으로 평가되었으며, 사회적 위험성은 ALARP (As Low As Reasonably Practicable) 영역 내에 위치하였다. 이는 본 단지가 국제적으로 허용 가능한 안전 수준을 충족하며, 적절한 안전대책이 유지된다면 주민과 시설 모두에 대해 안전한 운영이 가능함을 의미한다.

결론적으로, 본 연구는 수소주택 단지의 위험성을 실험, 수치해석, 장기 통계자료를 결합하여 정량적으로 평가함으로써, 국내 수소 기반 주거 모델의 안전성을 과학적으로 검증하였다. 향후 설계 및 운영 단계에서는 환기 및 점화원 관리, 화재·폭발 감지 및 비상차단장치 점검, 제트화재에 대비한 수동방호(Passive fire protection) 적용 등이 병행되어야 할 것이다. 본 연구의 결과는 향후 수소 시범도시와 수소 기반 주거 단지의 안전 설계 및 정책 수립에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영지원비지원사업(주요사업)으로 수행되었습니다(과제 번호 20250242-001, 수소도시 기반시설의 안전 및 수용성 확보기술 개발).

References

1. European Union-Japan Centre for Industrial Cooperation, “Hydrogen and fuel cells in Japan”, Tokyo, Japan, 2020, Retrieved from https://www.eu-japan.eu/sites/default/files/publications/docs/hydrogen_and_fuel_cells_in_japan.pdf.
2. Challenge Zero, “Residential fuel cell (ENE-FARM) installation exceeds 310,000 units in Japan”, 2020, Retrieved from https://www.challenge-zero.jp/en/casestudy/469.
3. Renewable Energy Magazine, “Swedish housing block powered 100 percent by solar and hydrogen energy storage,” 2018, Retrieved from https://www.renewableenergymagazine.com/pv_solar/swedish-housing-block-powered-100-percent-by-20181221, (Accessed: Sep. 27, 2025).
4. Intralink, “Korean hydrogen economy market intelligence report, London”, UK, 2021, Retrieved from https://www.intralinkgroup.com/Syndication/media/Syndication/Report

s/Korean-hydrogen-economy-market-intelligence-report-January-2021.pdf.
5. G. Cui, Y. Li, D. Wu, H. Li, H. Liu, X. Xing, and J. Liu, "The progress of autoignition of high-pressure hydrogen: ignition energy, flammability limits, and explosion risks", Fire, Vol. 7, No. 8, 2024, pp. 268, doi: https://doi.org/10.3390/fire7080268.
6. M. Calabrese, M. Portarapillo, A. Di Nardo, V. Venezia, M. Turco, G. Luciani, and A. Di Benedetto, "Hydrogen safety challenges: a comprehensive review on production, storage, transport, utilization, and CFD-based consequence and risk assessment", Energies, Vol. 17, No. 6, 2024, pp. 1350, doi: https://doi.org/10.3390/en17061350.
7. Sandia National Laboratories, "Guidelines for quantitative risk assessment of hydrogen systems", SAND2009-0874, Albuquerque, USA, 2009, doi: https://doi.org/10.2172/983689.
8. UKOPA, "Pipeline incident data: 1962-2019 report", UK Onshore Pipeline Operators' Association, London, UK, 2020.
9. Health and Safety Executive (HSE), "Reducing risks, protecting people (R2P2): HSE's decision-making process", London, UK, 2001, Retrieved from https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20230703113731/https://www.hse.gov.uk/enforce/expert/r2p2.htm.
10. International Electrotechnical Commission (IEC), "IEC 60079-10-1: explosive atmospheres – classification of areas – Part 1: gas atmospheres", Geneva, Switzerland, 2015.
11. H. Kim and S. Kang, "Analysis of damage range and impact of on-site hydrogen fueling station using quantitative risk assessment program(Hy-KoRAM)", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 31, No. 15 2020, pp. 459-466, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.5.459.
12. D. Lee, K. Rhie, D. Shin, H. Kim, T. Kim, S. Hong, and D. Seo, "Assessment and analysis of Individual and societal risks (IR/SR) for hydrogen pipelines", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 3, 2025, pp. 334-341, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.3.334.
13. D. Shin, S. Hong, K. Rhie, D. Seo, D. Lee, and T. Kim, "Risk assessment for the integrated system of hydrogen generation system linked to fuel cell," Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2023, pp.728-733, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.728.
14. B. Park, Y. Kim, and I. Hwang, "An experimental study on the explosion hazards in the fuel cell room of residential house", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 36, No. 4, 2021, pp. 71-79, doi: https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2021.36.4.71.
15. B. Park, Y. Kim, and I. J. Hwang, "Risk assessment of explosion accidents in hydrogen fuel-cell rooms using experimental investigations and computational fluid dynamics simulations", Fire, Vol. 6, No. 10, 2023, pp. 390, doi: https://doi.org/10.3390/fire6100390.
16. Chosun Ilbo, "Samcheok, Gangwon Province, emerging as a hydrogen hub city", 2022, Retrieved from https://www.chosun.com/special/special_section/2022/07/28/LAT64ATEUZGHPP7UZJZSI242VY/.
17. International Organization for Standardization (ISO), "ISO 17776: petroleum and natural gas industries – offshore production installations – major accident hazard management during the design of new installations", Geneva, Switzerland, 2016.
18. C. J. H. Van den Bosch and R. A. P. M. Weterings, "Methods for the calculation of physical effects (TNO Yellow Book)", The Hague: TNO, 2017.