

반밀폐 공간에서의 수소 취급 시설에 대한 안전관리 방안에 대한 연구

오세현¹ · 백승현¹ · 이선희¹ · 마병철^{1,2†}

¹전남대학교 화학공학부, ²전남대학교 공정혁신 시뮬레이션센터

Study on Safety Management Measures for Hydrogen Handling Facilities in Semi-closed Space

SEHYEON OH¹, SEONGHEON BAEK¹, SEONHEE LEE¹, BYUNGCHOL MA^{1,2†}

¹School of Chemical Engineering, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Korea

²Center for Process Innovation Simulation, Chonnam National University, 11-15 Samdong 3-gil, Yeosu 59631, Korea

†Corresponding author :
anjeon@jnu.ac.kr

Received 6 August, 2024
Revised 11 September, 2024
Accepted 4 October, 2024

Abstract >> Hydrogen is gaining attention as a clean energy alternative to fossil fuels. In Korea, hydrogen refueling stations (HRS) are continuously expanding as hydrogen mobility is commercialized, and it is expected to account for 33% of Korea's total energy consumption by 2050. Hydrogen is easily ignited with low ignition energy, and its wide flammability range and fast combustion rate can lead to fires/explosions after leakage, causing major accidents. In Korea, hydrogen is handled in a semi-enclosed space according to special cases, which is very dangerous due to hydrogen leakage, and explosion safety can be improved by removing the installation of explosion venting and ventilation. For this reason, we would like to study the safety management of packaging HRS, which are semi-enclosed spaces.

Key words : Hydrogen(수소), Semi-closed space(반밀폐 공간), Explosion(폭발), Explosion venting(폭발 방산구), Safety management(안전관리)

1. 서론

최근 수소는 탄소중립을 위한 화석 연료를 대체할 청정에너지로 각광받고 있다. 국내에서도 전 세계적인 흐름에 맞춰 수소경제로의 변화를 추구하고 있다¹⁾. 수소는 모빌리티(수소자동차, 수소충전소), 에너지(연료전지), 수소 생산, 저장, 운반과 관련하여 2050년까지 전 세계 에너지의 18%를 차지할 것으로 예상

되고 국내에서는 수소가 총 에너지 소비의 33%를 담당할 것으로 예상된다²⁾. 특히 국내에서는 수소자동차 상용화에 따라 수소충전소를 지속적으로 확충하고 있으며 현재까지는 고압으로 충전된 수소를 활용하고 있다. 수소는 분자량이 작아 확산성이 뛰어나고 낮은 점화에너지로도 쉽게 점화된다. 또한 넓은 가연성 범위(lower explosive limit/upper explosive limit, LEL/UEL)와 빠른 연소 속도로 인해 누출 이후에 화

재 및 폭발로 이어져 큰 사고를 야기할 수 있다³⁾.

국내에서는 「용·복합, 패키지형 및 이동식 자동차 충전소 시설기준 등에 관한 특례기준」에 따라 패키지형 수소충전소와 같이 수소를 취급하는 반밀폐 공간에서는 주로 40 ft 컨테이너를 활용하고^{4,5)} 이와 유사한 크기 또는 용적에서 수소를 취급하는 다양한 시설이 있음을 알 수 있다⁶⁾. 수소는 개방된 공간에서는 공기와 쉽게 희석되어 비교적 화재 및 폭발로부터 안전하다⁷⁾. 하지만 컨테이너와 같은 밀폐 공간에 수소를 충전하기 위한 설비들을 장착하게 되면 수소 누출에 의한 화재 및 폭발로부터 매우 취약하다. 따라서 폭발로부터 안전성 향상을 위해서는 방폭 기기를 설치하여 점화원을 제거하여 우발적인 폭발을 제한하거나 폭발 방산구(explosion venting) 설치, 환기를 통해 폭발 과압을 크게 줄여 2차 사고를 예방해야 한다. 폭발 방산구는 점화에 의한 폭발로부터 피해 저감을 위한 방법이다. 압력 상승은 밀폐된 공간에서 뜨거운 연소 가스의 팽창이 제한되어 발생하고 이는 폭발 방산구의 크기에 따라 에너지를 빠르게 방출시켜 과압을 해소할 수 있다⁸⁾. 환기는 수소와 공기를 희석함으로써 가연성 범위(LEL/UEL) 이하로 유지하여 사고를 예방할 수 있는 방법이다. 수소와 공기 혼합비에 따라 점화 시에 폭발로부터 형성되는 폭발 과압이 상이하고 수소-공기 혼합물에서 화학양론비에 따라 수소 농도 29%일 때 완전 연소되어 가장 큰 폭발 과압을 형성한다^{9,10)}. 또한 환기 시 수소 농도 감소에 따라 점화에 의한 낮은 폭발 과압 또는 섬광 화재(flash fire)로 과압 발생이 거의 없는 수준임을 알 수 있다^{11,12)}. 따라서 밀폐 공간에서 폭발로부터 안전성 향상을 위해서는 적절한 환기와 폭발 방산구 설치를 통해 안전성 향상을 도모할 수 있다.

밀폐 또는 반밀폐 공간에서의 수소-공기 혼합물 환기 연구에서는 자연 환기와 강제 환기를 비교하였다. 그 결과 자연 환기에서는 환기구 면적이 중요하고 강제 환기에서는 환기 속도가 중요한 것을 알 수 있다^{13,14)}. 반밀폐 공간에서의 수소 누출을 가정하여 폭발 위험 장소 구분에 대한 연구를 통해 공간에서의 환기 횟수(air change per hour, ACH)를 증가시켜

야 더 낮은 등급으로 관리 가능함을 알 수 있다¹⁵⁾. 또한 폭발 방산구의 파열 압력에 따라 내부에 형성되는 최대 폭발 과압이 상이하다¹⁶⁾. 이를 통해 낮은 파열 압력일 때 유리함을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 반밀폐 공간인 패키지형 수소충전소에서의 수소 누출에 의한 위험성을 평가하고 관리 방안을 제시하고자 한다. 환기 조건을 계산하여 환기구 크기를 결정하고 내부에 축적된 수소의 폭발로 인한 폭발 과압을 프로빗 함수를 통해 치명도로 평가한다. 또한 피해 저감을 위한 폭발 방산구 설치함으로써 폭발 과압 해소 효과를 확인한다. 이는 컨테이너 자체 또는 내부 저장 용기 등의 파손에 의한 2차 사고 예방의 목적으로 나아가 수소를 취급하는 반밀폐 공간에서의 안전관리에 목적이 있다.

2. 환기 및 누출 조건 결정

2.1 환기 조건 결정

2.1.1 Geometry

본 연구에서는 40 ft 컨테이너와 비슷한 용적을 가지고 있는 패키지형 수소충전소 연구를 참고하여 9.8×2.4×2.8 m 인 내부 용적 68.2 m³을 기준으로 선정하였다¹⁷⁾. 급기구와 배기구에 대한 정확한 위치 정보가 없어 KGS FU671¹⁸⁾ 기준에 따라 천정으로부터 30 cm 떨어진 위치에 2개소, 하부에 2개소로 설정하였다. 구현한 컨테이너는 Fig. 1과 같다.

2.1.2 환기구 크기 및 환기 속도

수소를 취급하는 시설에서는 환기 기준에 따라 환

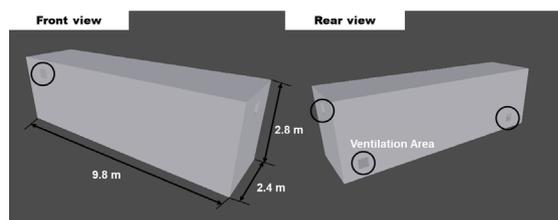


Fig. 1. Packaging HRS model

기구 크기 및 환기 속도를 결정하고 있다. 본 연구에서는 KGS FU671¹⁸⁾ 기준에 따라 식 (1)을 통해 환기구 면적(Q_A)을 결정하고 식 (2)를 통해 최소 환기량(Q_{v,min})을 계산한다. 식 (3)을 통해 공간에서의 환기 속도(Q_V)를 계산할 수 있다.

$$Q_A = \frac{(L \times W)}{m^2} \times 0.03 m^2 \quad (1)$$

$$Q_{v,min} = \frac{(L \times W)}{m^2} \times 0.5 m^3/min \quad (2)$$

$$Q_V = \frac{(L \times W)}{m^2} \times Q_{v,min} \quad (3)$$

여기서 Q_A는 환기 면적(m²), L은 바닥 길이(9.8 m), W는 바닥 폭(2.4 m), Q_{v,min}은 최소 환기량(m³/min), Q_V는 환기 속도, 나머지 상수인 0.03 m²는 통풍 가능한 면적(m²), 0.5 m³/min은 1 m³ 바닥 면적당 환기량으로 KGS FU671¹⁸⁾ 기준이다.

위 식을 통해 계산한 컨테이너의 환기 면적은 약 0.7 m²이고 환기 속도는 0.3 m/s이다. 환기 면적은 컨테이너에 4개소를 가지고 있어 약 0.42×0.42 m인 환기구로 결정하였다. 강제 환기를 위한 2개소의 배기구는 천장 근처에 설치하였고 환기 속도 0.15 m/s로 결정하였으며 하부에 2개소는 급기구로 선정하였다.

2.2 누출 조건

2.2.1 사고 시나리오

본 연구에서는 Sandia National Laboratories 보고

서¹⁶⁾에서 제시한 누출공 크기와 빈도를 사용하였고 누출량(kg/s)이 가장 큰 압축기(82 MPa)를 선정하여 Table 1에 요약하였다.

2.2.2 누출량 산정

고압으로 충전된 수소는 누출 시에 모두 기체 상태로 누출되고 압축기 운전 압력은 82 MPa로 음속으로 누출됨을 가정할 수 있다. 따라서 식 (4)를 통해 누출량(W, kg/s)을 산정할 수 있다¹⁵⁾.

$$W = C_d S p \sqrt{\gamma \frac{M}{ZRT} \left(\frac{2\gamma}{\gamma-1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (4)$$

여기서 C_d는 누출계수, S는 누출공 단면적(m²), p는 저장 압력(Pa), γ는 비열비(1.4), M은 수소의 몰 질량(0.002 kg/mol), Z는 압축인자, R은 이상기체상수(8.314 kJ/kmol·K), T는 수소의 절대온도(K)이다. 누출계수와 압축인자는 보수적으로 선정하기 위해 1로 정하였다. 계산한 결과는 Table 2에 요약하였다.

2.3 FLACS 시뮬레이션

2.3.1 시뮬레이션 설정 조건

본 연구에서는 내부 용적이 68.2 m³이고 유사한 크기인 내부 용적 63.7 m³에서의 실제 실험한 데이터를 활용하여 시뮬레이션 설정 조건을 도출하였고¹⁹⁾ 이는 Fig. 2와 같다. 짧은 시간 안에 높은 압력과 온도가 발생하는 폭발의 경우에는 적절한 격자(grid) 크기와 Courant-Friedrich-Levy (CFL) number base on sound velocity (CFLC), CFL number based on fluid velocity (CFLV)를 설정해야 정확한 결과를 도출할

Table 1. Leak scenario in HRS by compressor

Fuel	Component	Pre. (MPa)	Temp. (°C)	Leak size (mm)	Leak frequency (year)	Delayed ignition probability
H ₂	Compressor	82	15	0.23	1.2E-03	0.004
				0.72	1.74E-04	0.004
				2.26	8.32E-05	0.027
				7.16	3.84E-05	0.027

Table 2. Leakage scenario information

Fuel	Leak size (mm)	Leak area (mm ²)	Leakage (kg/s)
H ₂	0.23	0.0415	0.0021
	0.72	0.4071	0.0206
	2.26	4.0115	0.2031
	7.16	40.2640	2.0393

수 있다. 실제 실험에서는 내부에 형성된 최대 폭발 과압은 0.314 barg이고 격자 크기는 0.05 m, CFLC는 0.5, CFLV는 0.05로 설정하였을 때 계산된 최대 폭발 과압은 0.305 barg로 오차는 2% 정도임을 알 수 있다. Table 3에는 다른 시뮬레이션 조건의 결과도 요약하였다.

2.3.2 시뮬레이션 결과

수소 취급 시설에서는 센서를 통해 수소 누출을 감지하여 가스 공급 및 누출을 차단하고 있다²⁰⁾. 이러한 수소 센서의 감지 시간은 센서의 종류별로 다양하다²¹⁾. 본 연구에서는 수소 누출 이후에 3초와 15초

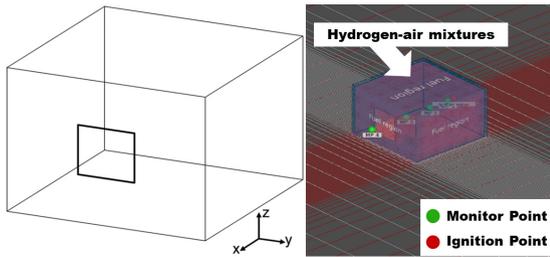


Fig. 2. Model of a real explosion experiment (left), simulation model to compare the experimental results (right)

Table 3. Validate simulations by comparing experiments

Experiments ¹⁸⁾ (barg)	Simulation results (barg)	Grid size (m)	CFLC/ CFLV	Error rate (%)
0.314	0.391	0.1	5/0.5	24.52
	0.324	0.1	0.5/0.05	3.18
	0.305	0.05	0.5/0.05	2.86

Table 4. Risk results by incident scenario

Leak size (mm)	Hydrogen formed in the container (kg)	Hydrogen volume in container (%)	Simulation results of explosion overpressure in the container (barg)	Model frequency (ignition)	Model fatalities (-)	Risk integral (/year)
	3 sec/15 sec	3 sec/15 sec	3 sec/15 sec		3 sec/15 sec	3 sec/15 sec
0.23	0.0057/0.0309	0.10/0.53	/-	4.80E-06	/-	-
0.72	0.0567/0.3063	0.97/5.27	/ <0.001	6.96E-07	/-	-
2.26	0.5382/2.4231	9.25/41.65	0.12/4.94	2.25E-06	-/1	-/2.25E-06
7.16	3.6647/5.8175	63/100	4.94/4.94	1.04E-06	1/1	1.04E-06

사이에 감지 가능함을 가정하고 그 양은 수소가 컨테이너 공간에 체류하는 양(kg)과 완전 혼합됨을 가정하여 전체 공간에 수소 농도로 계산하였다.

실제 수소는 누출되어 내부에 수소가 축적되어 형성하는 농도는 불균일하다. 하지만 피해 영향 평가를 위해 균일한 수소 농도로 계산하여 폭발 시뮬레이션 하였고 Table 4에 요약하였다.

실험을 통해 밀폐된 공간에서 수소-공기 혼합물에 대한 최대 폭발 과압(barg)은 혼합비에 따라 다를 수 있다⁹⁾. 본 연구에서는 환기구가 있는 반밀폐 공간에서의 폭발로 Fig. 3에 밀폐된 공간에서의 최대 폭발 과압과 같이 수소-공기 혼합물에서 수소 농도에 따른 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 위험성(risk) 평가

위험성(risk)은 유해 및 위협으로부터 부상 또는 피해로 이어질 수 있는 빈도와 피해 영향을 곱하여 계산한다. 빈도는 사고가 발생할 수 있는 확률이고 치명도는 피해로부터 대상이 위험한 정도이다. Table 1에서 제시한 누출 빈도와 점화에 의한 폭발이 발생할 확률을 곱하여 빈도를 정한다. 시뮬레이션을 통해 도출한 폭발 과압은 프로빗 함수로 계산하여 폭발 과압에 의해 내부에 설치된 고압 용기 파손 확률을 치명도로 정하고 식 (5)와 (6)을 통해 계산한다²²⁾. 여기서 P_{max} 는 최대 폭발 과압(Pa)을 나타낸다.

$$Y_f = -42.44 + 4.33 \ln(P_{\max}) \quad (5)$$

$$P_f = 50 \left[1 + \frac{Y_f - 5}{|Y_f - 5|} \right] \operatorname{erf} \left(\frac{|Y_f - 5|}{\sqrt{2}} \right) \quad (6)$$

본 연구에서 사용한 프로빗 함수는 화학 공정에서 사용하는 고압 용기에 대한 사고 및 실험적 데이터를 통해 제시한 것으로 수소충전소에서 사용하는 고압 용기는 1,000 bar 이상을 견딜 수 있도록 설계되어 있어 동일한 조건으로 평가하기엔 무리가 있을 수도 있다. 하지만 현재 수소충전소에서의 고압 용기 파손 확률에 대해 명확하게 제시한 프로빗 함수는 없고 설비 간에 연결된 배관 및 용접부, 플랜지부 등은 설계 압력에 따라 설치하나 일반적인 고압 설비와 큰 차이가 없다^{23,24)}. 따라서 식 (5)의 프로빗 함수를 활용하여 계산하고 Table 4에 치명도로 나타내었다.

수소의 가연성 범위(LEL/UEL)가 4-75%일 때 점화가 가능하다. Table 4에서 제시한 누출공 7.16 mm 에서는 단 몇 초 만에 내부에 UEL 이상의 농도가 형성된다. 이는 점화에 의한 폭발이 불가능한 조건이다. 하지만 누출이 끝난 후에 수소와 공기가 희석되면 최대 폭발 과압이 발생하는 양론비인 수소 농도 29%를 포함하고 있어 이를 최대 폭발 과압으로 산정하였고 그 값은 4.94 barg이다.

3.2 Risk-based hazardous control

위험성 평가를 통해 누출공이 2.26 mm일 때 가장

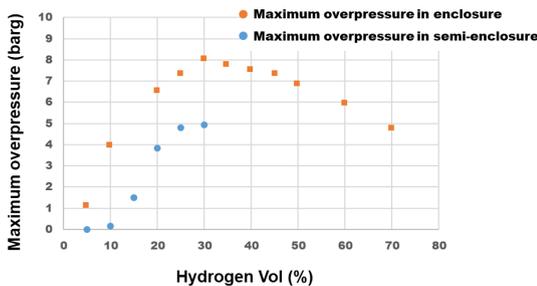


Fig. 3. Compare maximum explosion overpressure of enclosed and semi-enclosed

높은 위험도를 나타내고 있다. 즉 밀폐 또는 반밀폐 공간에서 수소를 취급할 때에는 사고 빈도와 누출량에 의해 위험성이 커짐을 알 수 있다. 이는 내부에 형성된 수소-공기 혼합물에서의 수소 농도에 따라 폭발 과압이 결정되기 때문이다.

위험성 기반 위험 제어 방법은 Fig. 4와 같이 누출량 그래프를 통해 위험을 제어하는 방법으로 제시할 수 있다. 누출량이 작은 경우에는 빠른 수소 감지를 통해 환기량을 증가시키면 가연성 범위 이하로 유지할 수 있다. 수소-공기 혼합물에서 수소 농도 10% 이하에서는 섬광 화재(flash fire)가 발생하여 과압이 매우 낮아 점화에 의한 폭발 과압에 의한 설비 또는 장비 손상으로부터 안전할 수 있음을 시사한다¹¹⁾. 또한 2.26 mm 누출공에서 3초 이내에 누출을 차단할 경우 내부 수소 농도는 10% 이하이고 시뮬레이션 결과를 통해 내부에 형성된 폭발 과압은 0.12 bar로 flash fire 형태임을 예상할 수 있다. 따라서 누출을 감지한 이후에는 내부의 수소 농도를 LEL과 10% 이하로 유지 또는 가연성 범위 이하로 제어하기 위한 환기량 증가가 필요한 구간으로 정할 수 있다. 하지만 누출량이 큰 경우에는 조기 감지와 환기량 증가를 통해 내부 수소 농도를 낮추는 것이 불가능에 가깝다. 이 경우 폭발 과압에 의한 피해를 최소화하기 위해서는 폭발 방산구 설치를 통해 폭발 과압 해소가 필요하다.

3.3 폭발 방산구(explosion venting)

국내에서는 폭발 방산구의 크기를 KFS, KOSHA guide에서 제시하고 있다. 본 연구에서는 KOSHA guide D-49 (가스 폭발 예방을 위한 폭연 방출구 설

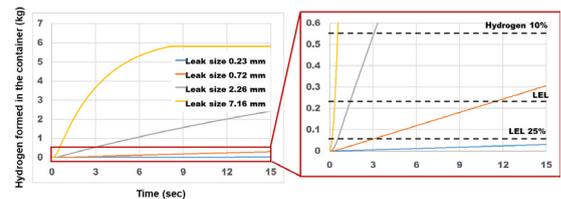


Fig. 4. Amount of hydrogen in a semi-enclosed space by leak rate

치에 관한 기술 지침)를 통해 폭발 방산구 면적을 결정하였다. 수소를 취급하는 시설에서는 고강도 밀폐 공간으로 분류하고 식 (7)을 통해 결정한다.

$$A_v = \left[\{ (0.127) \log_{10}(K_G) - 0.0567 \} P_{red}^{-0.582} \right] V^{2/3} + \{ (0.175) P_{red}^{-0.572} (P_{stat} - 1) \} V^{2/3} \quad (7)$$

여기서 K_G 는 KOSHA guide에서 제시한 수소에 대한 폭연지수(550 bar·m/s)이고 P_{red} 는 밀폐 공간이 견딜 수 있는 설계 응력 또는 설계 압력(1.7 bar)으로 설계 압력은 ISO 컨테이너 규정에 따라 type 0 또는 bulk 컨테이너 기준이다²⁵⁾. V 는 밀폐 공간의 부피(68.2 m³), P_{stat} 은 방출구 개방 압력(0.1 bar)이다. 계산을 통해 방산구 면적을 3.78 m²로 결정하였고 1.94×1.94 m로 천장 중앙에 설치한다. 점화 위치는 컨테이너 중심으로 설정하였다.

폭발 방산구 크기는 천장 9.8×2.4 m를 기준으로 약 16% 면적을 차지하고 있고 방산구 기준 면적보다 2배 큰 3.90×1.94 m와 3배 큰 5.80×1.94 m인 시뮬레이션을 통해 방산구 면적 증가에 따라 폭발 과압 감소 효과를 확인하였다. Fig. 5는 FLACS 시뮬레이션의 relief panel 기능을 활용하여 모델링한 결과이고 Table 5는 폭발 방산구 설치에 따른 폭발 과압 감소

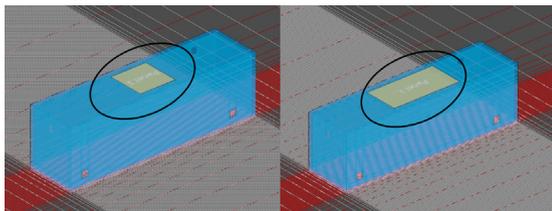


Fig. 5. Installing the relief panel in the container

Table 5. Explosion overpressure effect of explosion venting

	Explosion venting overpressure (barg) / probit equation results (%)		
No explosion venting	1.94×1.94 m	1.94×3.88 m	1.94×5.82 m
	4.94/100	0.679/76.87	0.501/28.03
			0.265/0.04

효과와 고압 용기 파손 확률을 계산하여 요약하였다. 그 결과 폭발 방산구 설치를 통해 폭발 과압이 7.2배, 9.8배, 18.6배 이상 감소하는 효과를 확인하였다. 하지만 폭발 방산구 면적이 천장의 16%, 32%일 때 고압 용기가 파손될 수 있고 47%일 때에는 그 가능성이 거의 없음을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 수소를 취급하는 반밀폐 구조에서는 수소의 누출량에 따라 내부에 형성되는 수소 농도가 결정되고 폭발 방산구 크기가 내부의 과압을 해소하는 데 중요한 요소임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 반밀폐 공간인 패키지형 충전소에서 안전관리를 위해 위험성을 평가하였고 누출량에 따른 안전관리 방안을 제안하였다.

1) 수소 누출 빈도와 지연 점화 확률을 통해 빈도를 계산하였고 프로빗 모델을 이용하여 치명도를 계산하여 위험성 평가를 하였다. 그 결과 수소 누출 빈도가 높고 누출량이 크면 위험성이 커짐을 알 수 있다.

2) 반밀폐 공간에서의 수소 누출 시 누출량에 따라 조기 감지 및 환기량 증가를 통해 사고를 미연에 방지할 수 있음을 확인하였다. 수소 누출량이 큰 경우 폭발 과압 해소를 위한 폭발 방산구를 설치하여 고압 용기 파열에 의한 2차 사고 확률을 낮출 수 있음을 시사하고 있다.

3) 내부 폭발 과압 해소를 위한 폭발 방산구를 설치하여 시뮬레이션하였고 폭발 방산구 면적이 증가함에 따라 내부에 형성되는 폭발 과압이 감소하는 것을 확인하였다. 하지만 고압 용기 파손에 의한 2차 사고 발생 확률이 여전히 존재하는 것을 알 수 있었다. 이는 내부 수소 농도를 낮춰 폭발 과압을 낮춰야 함을 시사한다.

본 연구에서는 반밀폐 구조에서 수소를 취급하는 경우 내부의 고압 용기 파열에 적합한 프로빗 함수는 일반적으로 화학 공정에서 사용하는 고압 용기에서의 프로빗 함수를 활용하였다. 따라서 실제 수소충전소에서 사용하는 고압 용기에 대한 파열 확률로

계산한 것과 다르다는 한계가 있다.

다만 시뮬레이션 결과를 통해 폭발 방산구가 커짐에 따라 폭발 과압의 감소 효과가 있음을 알 수 있고 폭발 방산구 크기를 확보하면 안전성 확보가 가능함을 알 수 있다. 하지만 천장의 47% 정도의 폭발 방산구 크기를 확보하는 데 현실적으로 무리가 있을 것으로 판단된다. 따라서 자연 또는 강제 환기를 통해 내부의 수소 농도를 낮추는 방안 및 수소 누출량을 제어할 수 있는 방안이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구 결과가 패키지형 수소충전소와 같은 반밀폐 구조에서의 안전관리 방안 확보에 도움이 될 것으로 생각한다.

후 기

이 연구는 2024년도 환경부(한국환경보전원)의 지원으로 화학물질 안전관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(B0080524003046).

References

1. A. Downer, E. M. Kim, N. Köhler-Suzuki, P. Lamy, F. Mogherini, R. P. Pardo, M. Reiterer, S. A. Snyder, J. Song, and Y. K. Yoon, "Challenges and opportunities of Korea's foreign policy as a developed country", Korea Institute for International Economic Policy, Korea, 2022.
2. W. I. Park, S. S. Tak, I. W. Lee, and S. P. Hong, "A study on hydrogen energy safety according to the revitalization of the hydrogen economy", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 25, No. 6, 2021, pp. 74-79, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2021.25.6.74>.
3. Y. Li, X. Hou, C. Wang, Q. Wang, W. Qi, J. Li, and X. Zhang, "Modeling and analysis of hydrogen diffusion in an enclosed fuel cell vehicle with obstacles", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 9, 2022, pp. 5745-5756, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.205>.
4. C. M. R. Vendra and J. X. Wen, "Vented hydrogen deflagrations in an ISO container", *Hydrogen Tools*, 2017. Retrieved from <https://h2tools.org/bibliography/vented-hydrogen-deflagrations-iso-container>.
5. T. T. Hao, C. J. Wang, W. J. Yan, W. X. Ren, and K. V. Yuen, "Experimental investigation on the dynamic responses of vented hydrogen explosion in a 40-foot container", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 36, 2021, pp. 19229-19243, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.066>.
6. S. Kwon, B. Jin, C. Lee, S. Eom, and G. Choi, "Ventilation performance study on hydrogen leakage characteristics of container packaged water electrolysis production system", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 3, 2024, pp. 324-335, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.3.324>.
7. D. A. Crowl and Y. D. Jo, "The hazards and risks of hydrogen", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 20, No. 2, 2007, pp. 158-164, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2007.02.002>.
8. E. A. Ural, "A simplified method for predicting the effect of ducts connected to explosion vents", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 6, No. 1, 1993, pp. 3-10, doi: [https://doi.org/10.1016/0950-4230\(93\)80013-C](https://doi.org/10.1016/0950-4230(93)80013-C).
9. B. H. Bang, C. S. Ahn, J. G. Lee, Y. T. Kim, M. H. Lee, B. Horn, D. Malik, K. Thomas, S. C. James, A. L. Yarin, and S. S. Yoon, "Theoretical, numerical, and experimental investigation of pressure rise due to deflagration in confined spaces", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 120, 2017, pp. 469-480, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.05.019>.
10. C. Liu, K. Tang, C. Huang, J. Liu, and L. Liu, "Effect of initial pressure on the critical characteristics and overpressure of hydrogen-air premixed gas combustion and explosion", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 49, Pt. B, 2024, pp. 311-322, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.266>.
11. A. V. Shelke and J. X. Wen, "The burning characteristics and flame evolution of hydrocarbon and hydrogen flash fires", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 38, No. 3, 2021, pp. 4699-4708, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.05.013>.
12. O. R. Hansen, "Hydrogen infrastructure - Efficient risk assessment and design optimization approach to ensure safe and practical solutions", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 143, 2020, pp. 164-176, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.06.028>.
13. D. Hedley, S. J. Hawksorth, W. Rattigan, R. Brentnall, and J. Allen, "Large scale passive ventilation trials of hydrogen", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 35, 2014, pp. 20325-20330, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.120>.
14. K. Matsuura, M. Nakano, and J. Ishimoto, "Acceleration of hydrogen forced ventilation after leakage ceases in a partially open space", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 9, 2012, pp. 7940-7949, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.034>.
15. D. Y. Pyo and O. T. Lim, "A study on explosive hazardous areas in hydrogen handling facility", *Journal of Hydrogen*

- and *New Energy*, Vol. 30, No. 1, 2019, pp. 29-34, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.1.29>.
16. Y. Cao, B. Li, and K. Gao, "Pressure characteristics during vented explosion of ethylene-air mixtures in a square vessel", *Energy*, Vol. 151, 2018, pp. 26-32, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.012>.
 17. S. I. Hwang, S. K. Kang, and Y. S. Huh, "A study on the safety improvement by CFD analysis for packaged type hydrogen refueling system", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 30, No. 3, 2019, pp. 243-250, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.3.243>.
 18. Korea Gas Safety Corporation (KGS), "Facility/Technical/inspection code for use of hydrogen gases (KGS FU671 2021)", KGS, 2021. Retrieved from https://cyber.kgs.or.kr/kgscode.codeSearch.view.ex.do;cyberJSESSIONID=D0Z3B7yu2l5Wl6ZATg8DoAyTolK-ajmFQvtfK2U1brQriNQwfgy6!554986059!NONE?onEngYn=F&pblcRlmCd=05&pblcMdcCd=&pblcCd=FU671_211008&stDayY=2008&stDayM=01&etDayY=2023&etDayM=06.
 19. S. Zhang and Q. Zhang, "Effect of vent size on vented hydrogen-air explosion", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 37, 2018, pp. 17788-17799, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.07.194>.
 20. D. H. Kim, S. M. Lee, C. H. Joe, S. K. Kang, and Y. S. Huh, "A study on the quantitative risk assessment of mobile hydrogen refueling station", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 605-613, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.605>.
 21. T. Hübert, J. Majewski, U. Banach, M. Detjens, and C. Tiebe, "Response time measurement of hydrogen sensors", *Hydrogen Tools*, 2017, pp. 4-6. Retrieved from https://h2tools.org/sites/default/files/2019-08/paper_206.pdf.
 22. V. Cozzani and E. Salzano, "Threshold values for domino effects caused by blast wave interaction with process equipment", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 17, No. 6, 2004, pp. 437-447, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2004.08.003>.
 23. E. Salzano and V. Cozzani, "The analysis of domino accidents triggered by vapor cloud explosions", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 90, No. 2-3, 2005, pp. 271-284, doi: <https://doi.org/10.1016/j.res.2004.11.012>.
 24. E. D. Mukhim, T. Abbasi, S. M. Tauseef, and S. A. Abbasi, "Domino effect in chemical process industries triggered by overpressure - formulation of equipment-specific probits", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 106, 2017, pp. 263-273, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.01.004>.
 25. International Organization for Standardization (ISO), "Series 1 freight containers - specification and testing. Part 1: general cargo containers for general purposes (ISO 1496-1: 2013)", ISO, 2013. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/59672.html>.