

반밀폐형 비닐텐트 내 수소 누출 조건에 따른 상부 감지기 농도 응답 특성

박주원^{1,2} · 박병직^{1,2} · 윤성환^{3,4} · 김양균^{1,2†}

¹한국건설기술연구원 화재안전연구본부, ²한국건설기술연구원 수소인프라센터, ³국립한국해양대학교 기관시스템공학부,
⁴국립한국해양대학교 해양인공지능융합전공

Concentration Responses of Upper Hydrogen Sensor Under Different Release Conditions in Semi-closed Vinyl Tent

JUWON PARK^{1,2}, BYOUNGJIK PARK^{1,2}, SUNGHWAN YOON^{3,4}, YANGKYUN KIM^{1,2†}

¹Department of Fire Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 64 Mado-ro 182 beon-gil, Mado-myeon, Hwaseong 18544, Korea

²Hydrogen Infrastructure Research Cluster, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 64 Mado-ro 182 beon-gil, Mado-myeon, Hwaseong 18544, Korea

³Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea

⁴Interdisciplinary Major of Maritime AI Convergence, Korea Maritime & Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea

†Corresponding author :
yangkyunkim@kict.re.kr

Received 12 June, 2026

Revised 8 July, 2026

Accepted 14 July, 2026

Abstract >> Hydrogen leakage in semi-closed spaces can cause local accumulation near the ceiling due to buoyancy, resulting in sensor responses that depend strongly on release conditions. In this study, hydrogen release experiments were conducted in a 96 m³ semi-closed vinyl tent to analyze upper sensor responses according to release location, direction, and flow rate. Four release nozzles were installed, and five hydrogen sensors were placed near the ceiling. Concentrations of 10,000 ppm, corresponding to 25% of the lower flammable limit (LFL), and 40,000 ppm were used as the detection criterion and LFL threshold. The first-detection and LFL-reaching sensors varied with release location and direction. As the flow rate increased, the representative response shifted from the central sensor to side/end sensors. Area under the curve (AUC) analysis showed that central dominance ratio (CDR) decreased from 36.94% to 19.28%, whereas peripheral accumulation ratio (PAR) increased from 47.40% to 63.46%. These results suggest the need for multi-point upper hydrogen sensor placement in semi-closed spaces.

Key words : Hydrogen(수소), Hydrogen leakage(수소 누출), Semi-closed space (반밀폐공간), Release location(누출 위치), Release direction(누출 방향)

1. 서론

수소는 높은 질량당 에너지밀도와 사용 단계에서의 무탄소 배출 특성으로 인해 재생에너지 연계 저장매체, 연료전지 기반 분산전원, 수송용 연료 및 산업용 에너지 캐리어로 주목받고 있다¹⁻⁴⁾. 특히 건축물의 에너지 자립률 향상과 분산형 에너지 시스템 확대에 따라, 연료전지 및 수소 기반 설비는 기존 수소충전소와 같은 옥외 고압 설비뿐 아니라 기계실, 설비실, 컨테이너형 모듈, 반밀폐형 부속공간 등 다양한 공간에 설치될 가능성이 증가하고 있다⁵⁻⁷⁾. 그러나 수소는 공기보다 매우 낮은 밀도와 높은 확산성을 가지며, 동시에 넓은 가연범위와 낮은 최소점화에너지로 인해 누출 시 공간 형상, 환기 조건, 누출 위치 및 감지기 배치에 따라 화재·폭발 위험이 크게 달라질 수 있다⁸⁻¹⁰⁾. 또한 이러한 수소의 특성은 개방 공간에서는 누출 수소가 빠르게 희석될 수 있다는 장점으로 작용할 수 있으나, 밀폐 또는 반밀폐공간에서는 천장부와 구조물 상부에 수소가 조금만 축적되어도 넓은 가연범위 특성으로 국부적 가연성 혼합기를 형성할 수 있다는 위험요인으로 작용한다^{11,12)}. 특히 수소 누출 사고는 초기에는 비연소 확산 과정으로 시작되지만, 점화원이 존재할 경우 제트화재, 폭연 또는 폭발로 전이될 수 있으므로, 누출 초기 단계에서의 농도 상승과 감지기 응답 특성을 이해하는 것은 수소 안전관리에서 핵심적인 요소이다.

특히 수소 안전설계에서 누출 단계의 농도 제어가 중요한 이유는, 축적된 수소-공기 혼합기가 점화될 경우 구조물 내부 압력 상승과 외부 화염 방출이 급격하게 발생할 수 있기 때문이다. Kim 등¹³⁾은 20.3 m³ 콘크리트 구조물에서 수소 누출 후 천장부 자연환기구 면적에 따른 농도 저감 특성을 실험 및 수치해석으로 분석하였으며, 수소 하한가연한계인 4 vol%와 NFPA 86 기반 안전환기 농도인 1 vol%, 즉 LFL의 25%를 주요 평가 기준으로 사용하였다. 해당 연구에서는 환기구 면적이 바닥면적 대비 12%에서 24%로 증가할 때 기준농도 도달시간이 크게 감소하였으나, 24%에서 36%로 증가할 경우 추가적인 환기성능 개

선은 제한적임을 보고하였다. 이는 수소 설비공간에서 천장부 환기면적 확보가 중요하지만, 단순한 환기면적 증가만으로 모든 누출 조건을 제어하기에는 한계가 있음을 의미한다. 또한 Yoon 등¹⁴⁾은 20.33 m³ 콘크리트 구조물에서 고농도 수소-공기 혼합기의 지붕 방산 폭연 실험을 수행하여, vent coefficient가 증가할수록, 즉 지붕 vent 면적이 감소할수록 내부 및 외부 과압이 증가함을 보였다. 특히 40 vol% 수소 조건에서 vent 면적 차이에 따라 내부 반사압력은 수십 kPa에서 100 kPa 이상까지 증가하였으며, 이는 수소가 가연 또는 폭발 가능한 농도로 축적된 이후에는 방산구 설계가 구조물 피해를 좌우하는 핵심 인자가 됨을 보여준다. 후속 연구에서도 밀폐 및 반밀폐 콘크리트 구조물을 비교한 결과, 최소 vent 면적 확보만으로 내부 폭발압력이 약 14.3배 감소하였고, 밀폐 조건에서는 콘크리트 파편이 약 80 m 범위까지 비산하여 치명적 인명피해 가능성이 나타난 반면, 반밀폐 조건에서는 외부 과압 및 구조물 손상이 크게 완화된 것으로 보고되었다¹⁵⁾. 이러한 결과들은 수소 설비공간에서 폭발 방산 및 환기 설계가 중요함과 동시에, LFL 도달 이전 단계에서의 조기 감지, 공급 차단 및 환기 연동이 선제적 안전관리 측면에서 필수적임을 시사한다.

또한 수소 누출 및 확산 거동은 단순한 분자확산 현상만으로 설명되기 어렵다. 고압 또는 유량이 부여된 누출에서의 누출 초기에는 노즐 출구에서의 제트 운동량이 지배적인 역할을 하며, 이후 주변 공기와의 혼합 및 운동량 감소에 따라 수소의 낮은 밀도에 의한 부력 효과가 상대적으로 우세해진다¹⁶⁻¹⁸⁾. 따라서 누출 방향에 따라 수소 농도 분포와 감지기 응답은 크게 달라질 수 있다.

최근 수소 누출 확산에 관한 연구는 CFD (Computational fluid dynamics) 해석과 실험을 병행하는 방향으로 진행되고 있다¹⁹⁻²²⁾. Malakhov 등¹⁹⁾은 약 67.7 m³ 규모의 반밀폐 컨테이너 공간에서 수소 누출 실험을 수행하고 STAR-CCM+ 해석 결과와 비교하여, 누출 압력, 오리피스 크기 및 환기 조건이 수소 농도분포에 미치는 영향을 분석하였다. 해당 연구에서는 환기

조건에 따라 수소 농도 분포가 달라지며, 무환기 조건에서는 수소가 상부로 상승하고 층상화되는 경향이 관찰되었다. Yang 등²⁰⁾은 28.0 m³ 맞춤형 챔버 내 26개의 수소센서를 이용하여 위치별 실시간 수소농도를 측정하였고, 누출 유량 증가에 따라 100 ppm 도달시간이 감소하고 최대 농도가 증가함을 보고하였다. 또한 상부 센서에서 중간 및 하부 센서보다 높은 농도가 검출되어, 밀폐공간 내 수소 감지기 배치에서 천장부 및 상부 위치의 중요성을 제시하였다. 이러한 선행연구는 수소 누출 위험 평가에서 평균 농도보다 위치별 국부농도와 시간응답이 중요함을 보여준다.

그러나 기존 연구는 상대적으로 정밀한 챔버 또는 컨테이너 기반 실험, 혹은 고해상도 CFD 해석에 집중되어 있으며, 실제 건축물 부속공간이나 임시 설비 공간과 유사한 반밀폐형 대공간에서의 수소 감지기 응답 실험자료는 여전히 제한적이다. 특히 3 m 내외의 실내 높이를 가지는 건물 내 기계실, 설비실, 혹은 상가, 공동주택 부속설비 공간 등에서는 수소가 누출될 경우 전체 공간이 즉시 균일 혼합되기보다는, 누출 위치와 방향에 따라 상부에 국부적으로 축적될 가능성이 있다. 따라서 이러한 조건에서 수소 감지기 배열이 누출 위치, 누출 유량 및 누출 방향 변화에 대해 어떤 응답 특성을 보이는지 검토할 필요가 있다.

본 연구는 건축물 부속 기계실, 설비실 등에서 발생 가능한 제한유량 수소 누출 상황을 대상으로, 반밀폐형 96 m³ 비닐텐트 공간에서 상부 수소 감지기의 농도 응답 특성을 분석하고자 한다. 이를 위해 알루미늄 프로파일 기반 비닐텐트 내부에 4개의 수소 누출 노즐 위치와 5개의 상부 수소 감지기를 배치하였고, 누출 위치, 누출 방향 및 누출 유량을 변수로 채택하여 실험을 진행하였다. 본 연구는 농도측정을 기반으로 한 예비적 실험구 분석이라는 한계가 있으나, 반밀폐형 수소 설비공간에서 감지기 배열 및 안전관리 기준 설정을 위한 기초 실험자료로 활용될 수 있다.

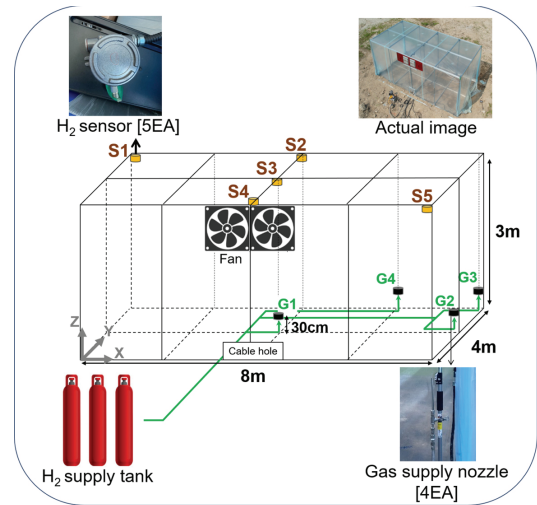


Fig. 1. Schematic of experimental setup for hydrogen leakage tests

2. 실험

Fig. 1은 본 연구에 사용된 비닐 텐트와 수소가스 노즐 및 수소 감지기 위치를 나타낸 개략도이다. 먼저 반밀폐형 수소 누출 조건을 구현하기 위해 알루미늄 프로파일 구조의 비닐텐트를 설치하였다. 실험 공간의 내부 크기는 길이 8 m, 폭 4 m, 높이 3 m이며, 총 내부 체적은 약 96 m³이다. 해당 공간은 일반적인 실내 기계실 또는 소규모 설비공간의 높이와 유사한 3 m 높이를 가지며, 수소 누출 시 상부 축적 및 감지기 응답 특성을 확인하기 위한 실험용 반밀폐 실험공간으로 설정하였다.

비닐텐트는 완전히 밀폐된 상태가 아니라, 실험 중 구조적 틈새와 재질 특성에 의해 일정 수준의 자연 누설이 존재할 수 있는 반밀폐형 공간이다. 이러한 조건은 실제 건축물 부속 설비공간, 임시 수소 설비공간 또는 환기가 제한된 실내공간에서 발생할 수 있는 수소 누출 상황을 단순화하여 모사하기 위한 것이다.

실험공간 내부에는 수소 감지기 5개(S1-S5)가 상부에 설치되어 있으며, 수소 누출 노즐 4개(G1-G4)가 바닥으로부터 30 cm 수직한 위치에 설치되었고,

Table 1. Position of hydrogen sensor

Sensor	X [m]	Y [m]	Z [m]
S1	0	4	3
S2	4	4	3
S3	4	2	3
S4	4	0	3
S5	8	0	3

Table 2. Position of gas nozzle

Gas nozzle	X [m]	Y [m]	Z [m]
G1	4	2	0.3
G2	8	2	0.3
G3	8	4	0.3
G4	6	4	0.3

Table 3. Experimental conditions

Case	Gas release location	Gas release direction	Flow rate [L/min]	Supply pressure [Bar(g)]	Nozzle size [mm]
1	G1	Vertical	250	0.5	2
2	G2				
3	G3				
4	G4				
5	G1	Horizontal-Rear			
6		Horizontal-Left			
7		Horizontal-Front			
8		Downward			
9		Vertical	150	1.3	
10			400	2.8	

수소 감지기와 수소 누출 노즐의 평면상 위치는 각각 Table 1, 2에 표기하였다. 수소감지기의 측정범위는 0–50,000 ppm, 응답 속도는 500 ms, 작동온도 범위는 $-20 \sim +50^{\circ}\text{C}$, 측정 정확도는 $\pm 3 \sim 25\%$ 이다.

또한 실험공간 전면 상부에는 각 실험 전후 내부 잔류 수소를 배출하고 초기 조건을 동일하게 유지하

기 위한 환기 목적으로 가로 0.60 m, 세로 0.65 m 크기의 환기팬 2대를 설치하였다. 환기팬의 최대풍량은 $3,730 \text{ m}^3/\text{h}$, 최대정압은 147 Pa, 회전수는 1,415 rpm이다.

Table 3은 실험에 채택된 조건들을 나타내었다. 실험에 채택된 변수는 서론에서 언급한 것과 같이 가스 공급 위치(Gas release location), 가스 누출 방향(Gas release direction), 가스 유량(Flow rate)을 채택하였다. 가스 공급 위치 및 가스 유량을 채택하여 실험을 진행한 경우, 수소 공급 이후 수소의 하한가연한계(LFL, Lower flammable limit)인 4 vol% (40,000 ppm) 도달 시점을 수소 공급 차단 기준으로 설정하였다. 반면 가스 누출 방향에 대한 실험의 경우, 동일한 중앙 노즐 조건에서 누출 방향만을 변화시켜 초기 제트 운동량 방향과 부력 방향의 상대적 영향을 비교하기 위한 실험으로 구성하였기 때문에 농도 기준으로 공급 종료 조건을 설정할 경우, 누출 방향에 따라 LFL 도달 여부와 도달시간이 달라지므로 각 조건의 공급 지속시간 및 총 누출량이 서로 달라질 수 있다. 이 경우 관찰되는 센서 응답 차이에 순수한 누출 방향 효과뿐만 아니라 공급시간 차이와 총 누출량 차이가 함께 반영된 결과가 되므로, 방향성의 영향을 독립적으로 비교하기 어렵다. 따라서 동일 공급 시간 기준을 적용하여, 누출 방향을 제외한 공급 조건의 차이를 최소화하고자 하였고 공급 기준 시간은 이전 연구를 바탕으로 1분간 공급을 진행하였다²⁰⁾.

수소 누출 유량은 질량 유량 제어기(MKP, TSM-D260)를 이용하여 설정 유량으로 공급하였으며, 건축물 내 수소 연료전지실, 기계실 또는 분산형 수소 설비 공간에서 발생 가능한 제한유량 누출 조건을 고려하여 150, 250 및 400 L/min을 설정하였다. Ji 등²³⁾은 가정용 수소 연료전지실 모사 공간에서 40–880 L/min 범위의 수소 누출량을 적용하였다. 특히 해당 연구에서 낮은 공급압력 조건인 3 kPa와 1/4 inch 누출구 조건에서 260 L/min의 누출량을 적용하였으며, 이는 본 연구의 기준 유량인 250 L/min과 유사한 수준이다. 따라서 본 연구에서는 선행 연료전지실 누출 실험에서 제시된 260 L/min 조건을 참고하여 250 L/min

을 기준 유량으로 설정하였고, 이를 중심으로 상대적으로 낮은 누출 조건인 150 L/min과 증가된 누출 조건인 400 L/min을 추가하여 유량 변화에 따른 감지시간, 최대농도 및 상부 농도분포 변화를 비교하였다.

본 연구에서는 실험 결과의 신뢰성을 검토하기 위해 사용 장비의 사양에 근거한 측정 불확도를 고려하였다. 앞서 제시한 수소 감지기의 측정 정확도와 응답속도를 고려할 때, 10,000 ppm 최초 도달시간, 40,000 ppm 도달 여부 및 최대농도는 감지기의 농도 측정 정확도와 응답속도 범위 내에서 해석될 필요가 있다. 다만 모든 실험 조건에서 동일한 수소 감지기, 동일한 데이터 획득 조건 및 분석 방법을 적용하였으므로, 본 연구에서는 절대농도 자체의 평가보다는 누출 위치, 누출 방향 및 누출 유량 변화에 따른 상부 감지기 간 상대 응답 특성 비교에 중점을 두고 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 누출 위치 변화에 따른 상부 감지기 응답 특성

Fig. 2는 수직 상향 누출 조건에서 수소 공급 노즐 위치별 시간에 따른 모든 수소 감지기의 농도 변화를 나타낸다. 모든 조건에서 수소 농도는 누출 개시

후 일정 지연시간 이후 급격히 증가하였으며, 이후 최댓값에 도달한 뒤 빠르게 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 하부에 위치한 노즐에서 방출된 수소가 초기 제트 운동량과 부력에 의해 상부로 이동한 후 천장부에서 국부적 고농도 영역을 형성하고 이후 공간 내 재분포 및 희석 과정을 거쳤기 때문으로 판단된다.

Case 1은 중앙부에 위치한 G1 노즐에서 수직 상향으로 수소를 방출하였다. 이 경우 중앙에 위치한 S3 감지기가 가장 먼저 LFL의 25%에 해당하는 10,000 ppm에 도달하였고, 최대농도 역시 동일 센서에서 약 47,000 ppm 수준으로 나타났다. 해당 감지기는 G1 노즐의 수직 상부에 가장 가까운 감지기로, 수직 상향 누출 시 초기 제트 중심축과 상부 감지기 위치가 가장 잘 정렬되어 있기 때문에 가장 빠르고 강한 반응을 나타낸 것으로 판단된다. S4와 S5에서도 각각 10,000 ppm 이상의 농도 상승이 관찰되었으나, S3 대비 응답이 지연되거나 최대농도가 낮게 나타났다. 이는 누출 직상부에 형성된 고농도 영역이 천장부를 따라 횡방향으로 확산되는 과정에서 감지기별 도달 시간과 농도 크기가 달라졌기 때문으로 해석된다.

Case 2와 3은 각각 노즐이 텐트 우측과 우측 모서리 방향에 위치하는 조건을 나타낸다. Case 2에서는 S5가 가장 먼저 10,000 ppm에 도달하였고, 최대농도도 S5에서 약 52,000 ppm 수준으로 가장 높게 나타났다. 이는 G2 노즐이 S5와 공간적으로 가까운 위치에 있으며, 수직 상향 누출 후 수소가 인접한 상부 모서리 영역으로 빠르게 축적되었기 때문으로 볼 수 있다. Case 3에서도 S5가 최초 감지 센서로 나타났으며, S5와 함께 S3 및 S4에서 LFL에 근접하거나 이를 초과하는 고농도 응답이 관찰되었다. 특히 Case 3은 노즐이 모서리 영역에 배치된 조건으로, 누출된 수소가 천장 및 측벽 경계면의 영향을 받아 상부 모서리 부근에 머무르거나 경계면을 따라 이동했을 가능성이 있다. 이러한 결과는 수소 누출 위치가 단순히 노즐과 감지기 간 직선거리만이 아니라, 천장부 경계면, 측벽, 모서리 효과와 결합하여 상부 농도분포를 결정함을 보여준다.

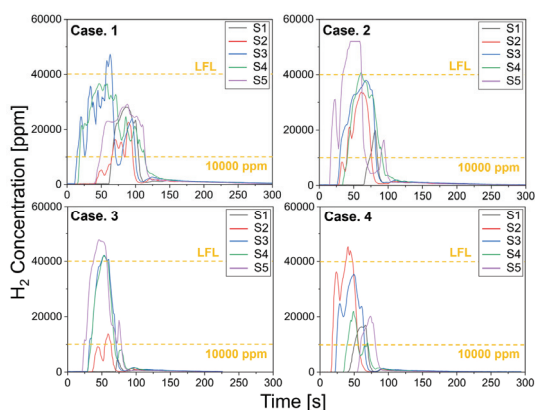


Fig. 2. Temporal hydrogen concentration profiles for different hydrogen release locations (Case. 1-4)

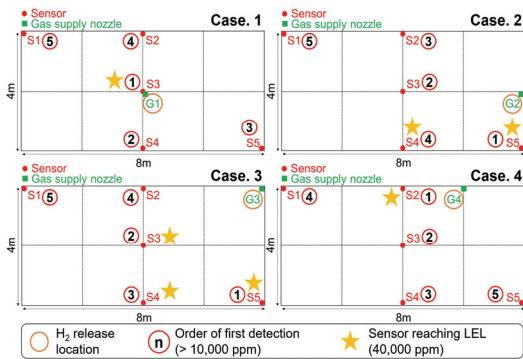


Fig. 3. Detection order and LFL reaching sensors for different hydrogen release locations

Case 4는 G4 노즐에서 수직 상향 누출이 발생한 조건이며, 이 경우 S2가 가장 먼저 10,000 ppm에 도달하고 최대농도도 S2에서 약 45,000 ppm 수준으로 관찰되었다. G4는 S2와 상대적으로 가까운 위치에 있으므로, 수직 상향 제트가 천장부에 도달한 뒤 S2 주변에서 고농도 영역을 형성한 것으로 판단된다. 반면 S5의 응답은 상대적으로 늦고 최대농도도 낮게 나타났다. 이는 동일한 수직 상향 누출 조건이라 하더라도 노즐 위치가 달라지면 상부 농도장의 중심이 이동하고, 이에 따라 최초 감지 센서와 LFL 도달 센서가 달라질 수 있음을 의미한다.

Fig. 3은 각 누출 위치 조건에서 10,000 ppm 이상 최초 감지 순서와 LFL 도달 센서를 평면 배치도상에 나타낸 것이다. 전체적으로 최초 감지 센서는 노즐에 인접하거나 수직 상향 제트가 천장부에 충돌한 후 수소가 우선적으로 축적되는 위치의 감지기와 잘 대응하였다. 그러나 일부 케이스에서는 노즐과의 단순 최단거리만으로 감지 순서가 완전히 설명되지 않았다. 예를 들어 Case 3에서는 S5가 노즐과 가까운 상부 모서리 센서로서 가장 먼저 반응하였으나, S3 및 S4에서도 LFL에 근접하는 응답이 나타났다. 이는 수직 상향 누출 후 천장부에서 형성된 수소층이 측벽 또는 모서리 방향으로 단순 확산되는 것이 아니라, 상부 공간 내 유동 및 경계면 효과에 의해 비균일하게 재분포될 수 있음을 시사한다.

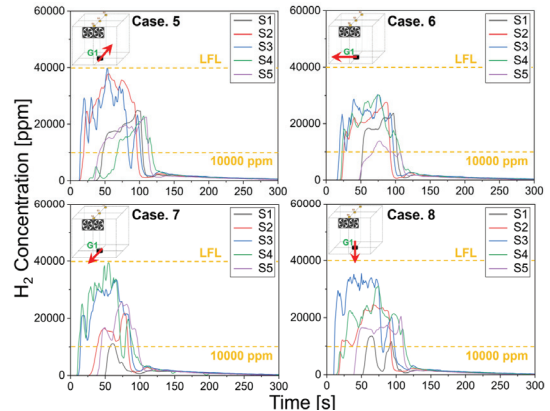


Fig. 4. Temporal hydrogen concentration profiles for different hydrogen release directions from the central nozzle (Case 5-8)

3.2 누출 방향 변화에 따른 제트-부력 상호작용

누출 방향 변화에 대한 실험의 경우, 앞서 서론에서 언급한 것과 같이 수소 누출이 시작되고 60초 후에 수소 누출을 중단하였다. Fig. 4는 중앙 노즐 G1에서 수소 누출 방향을 변화시켰을 때의 센서별 시간에 따른 농도 변화를 나타낸 것이다. 방향성 실험은 동일한 노즐 위치와 동일한 유량 조건에서 수행되었으며, G1 노즐을 기준으로 수평 후방(Case 5), 수평 좌측(Case 6), 수평 전방(Case 7), 수직 하향(Case 8) 조건을 비교하였다. 먼저 모든 조건에서 노즐이 위치한 곳과 상대적으로 가장 가까운 곳에 설치된 S3 감지기의 반응 응답이 강하게 나타났다. 또한 상대적으로 가장 먼 곳에 설치된 S1, S5 감지기의 반응 응답은 약하게 나타나는 것이 관찰되었다. 또한 수평 후방 및 전방 조건인 Case 5, 7에 비해 수평 좌측 조건인 Case 6에서 전반적으로 수소 농도가 낮게 측정되었다. 이는 초기 제트 운동량 방향의 길이가 후방과 전방은 2 m이지만, 좌측은 4 m이기 때문에 부력의 영향이 동일 누출 시간 대비 다소 늦게 발생하여 모든 센서에서 수소 농도가 낮게 측정된 것으로 판단된다.

Fig. 5는 Case 1을 포함한 모든 방향에서의 수소 농도 10,000 ppm 최초 감지 센서 및 감지시간($t_{10,000}$)과 최대 감지 농도(C_{max})를 나타내었다. 모든 조건에

서 10,000 ppm 최초 감지 센서와 최대 감지 농도의 센서는 동일하였으며, Case 1, 5, 6, 7, 8의 최초 감지 시간은 각각 15 s, 15 s, 19 s, 12 s, 12 s로 나타났다. 최초 감지 센서는 Case 7을 제외하면 모두 S3였으며, Case 7에서는 S4가 최초 감지 센서로 나타났다. 최대 검출농도는 수직 상향 조건인 Case 1에서 47,336 ppm으로 가장 높았고, Case 6에서 30,297 ppm으로 가장 낮게 도출되었다.

수평 누출 조건인 Case 5-7은 초기 제트 운동량이 수평 방향으로 작용하지만, 수소의 부력은 수직 상향 방향으로 작용한다. 수평 좌측 방향 조건인 Case 6에서는 초기 제트 운동량만을 고려할 경우, 노즐로부터 좌측 상부 방향에 위치한 S1에서 상대적으로 빠른 농도 상승이 나타날 것으로 예측했으나, S1보다 중앙 상부에 배치된 S2, S3 및 S4에서 더 뚜렷한 농도 응답이 관찰되었으며, 최초 감지 센서 역시 S3로 나타났다. 또한 S1과 S5의 초기 농도 상승 시점이 큰 차이를 보이지 않았다는 점은 수평 좌측으로 부여된 초기 제트 운동량이 실험공간 전체 길이 또는 상부 모서리까지 지배적으로 유지되지 않았음을 시사한다. 추가적으로 수평 전방 조건인 Case 7에서 최초 감지 센서가 S3가 아닌 S4로 나타난 것은 초기 제트 방향이 상부 감지기 배열 중 S4 방향으로 더 강하게 영향을 주었기 때문으로 판단된다.

3.3 누출 유량 변화에 따른 상부 감지기 응답 특성

Fig. 6은 G1 노즐에서 수직 상향으로 수소를 방출할 때 유량을 150, 250 및 400 L/min으로 변화시킨 경우의 센서별 10,000 ppm 도달시간과 최대농도를 나타내었다. 150, 400 L/min은 각각 Case 9, 10에 해당되며, 250 L/min은 Case 1에 해당된다. 유량 변화 실험에서는 수소 공급 위치와 누출 방향을 고정하고 유량만을 변화시켰으므로, 방출률 증가가 상부 감지기 응답시간, 최대농도 및 농도분포에 미치는 영향을 비교하고자 하였다. 먼저 10,000 ppm 도달시간을 보면, 150 L/min 조건에서는 S3가 12 s로 가장 먼저 반응하였고, 이후 S4, S5, S2, S1 순으로 10,000 ppm에

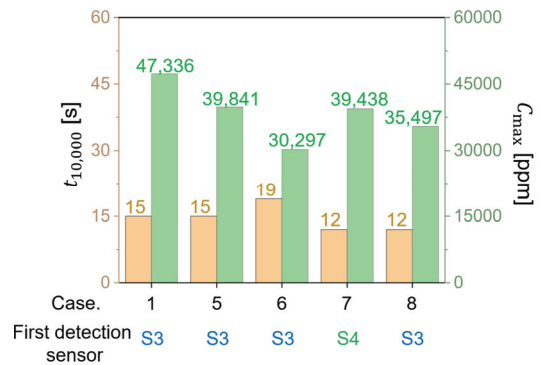


Fig. 5. Comparison of first detection time and maximum hydrogen concentration for different release directions

도달하였다. 250 L/min 조건에서도 S3가 15 s로 가장 빠르게 10,000 ppm에 도달하였으며, S4가 19 s로 뒤따랐다. 즉, 150 및 250 L/min 조건에서는 노즐 직상부 또는 중앙 상부에 해당하는 S3가 초기 감지 응답을 대표하는 센서로 나타났다. 이는 수직 상향 누출 시 초기 제트 운동량과 수소 부력이 모두 상부 방향으로 작용하면서, G1 노즐로부터 상승한 수소가

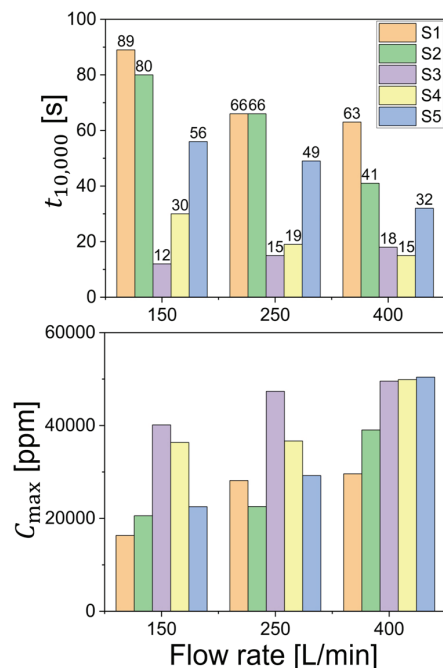


Fig. 6. Effect of flow rate on 10,000 ppm detection time and maximum concentration for each sensor

우선적으로 S3 주변 상부 영역에 도달했기 때문으로 판단된다.

반면 400 L/min 조건에서는 최초 10,000 ppm 도달 센서가 S3가 아닌 S4로 변화하였다. 400 L/min에서 S4는 15 s에 10,000 ppm에 도달하였고, S3는 18 s, S5는 32 s, S2는 41 s, S1은 63 s에 각각 10,000 ppm에 도달하였다. 이는 유량 증가에 따라 수직 상향 제트가 단순히 노즐 직상부에 해당하는 S3 주변에만 집중되지 않고, 천장부에 도달한 후 횡방향으로 재분포되면서 S4 및 S5 방향으로 농도 중심이 이동했음을 시사한다. 따라서 유량 증가는 단순히 모든 센서의 감지시간을 일률적으로 단축시키는 것이 아니라, 상부 고농도 영역의 형성 위치와 이동 경로를 변화시키는 요인으로 작용하였다.

센서별 최대농도 또한 유량 변화에 따라 뚜렷한 차이를 나타냈다. 150 L/min 조건에서는 S3에서 가장 높은 최대농도가 관찰되었으며, 해당 농도는 LFL인 40,000 ppm 수준에 도달하였다. 250 L/min 조건에서도 S3가 가장 높은 최대농도를 보였고, 최대농도는 약 47,000 ppm 수준으로 증가하였다. 이는 150–250 L/min 범위에서는 S3가 초기 감지뿐 아니라 최대농도 형성 위치까지 대표하는 센서로 기능했음을 의미한다. 반면 400 L/min 조건에서는 S3, S4, S5에서 모두 LFL을 초과하거나 이에 근접한 농도가 측정되었으며, 최대농도는 S5에서 가장 크게 나타났다. 이 결과는 고유량 조건에서 수소 플룸(Hydrogen Plume)의 중심이 S3에 고정되지 않고, 천장부 충돌 이후 S4–S5 방향으로 이동하거나 확장되었음을 보여준다. 이러한 결과는 선행 수소 누출 실험에서 보고된 유량 증가에 따른 감지시간 감소 및 최대농도 증가 경향과 일치한다²⁰⁾. 다만 본 연구에서는 고유량 조건에서 최초 감지 센서와 최대농도 발생 센서가 분리되었다는 점에서, 단순 유량 증가 효과뿐 아니라 상부 공간 내 농도 재분포 효과가 함께 작용한 것으로 판단된다.

최대농도와 도달시간은 각각 순간적인 위험 수준과 초기 감지 성능을 평가하는 데 유용하지만, 특정 센서가 실험시간 동안 경험한 전체 수소 누출 정도를

충분히 반영하지는 못한다. 특히 본 연구의 400 L/min 조건과 같이 최초 감지 센서, LFL 도달 센서, 최대농도 발생 센서가 분리되는 경우에는 단일 지표만으로 상부 농도장의 이동 및 분산 특성을 해석하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 유량 변화에 따른 상부 수소 농도분포의 정량적 변화를 평가하기 위해 농도-시간 곡선의 면적(Area under the curve, AUC)을 추가로 산출하였다. AUC 산정 시 각 센서의 최대농도 도달시간까지 적분할 경우, 센서별 적분시간이 서로 달라져 누적 누출량 비교에 시간 길이 효과가 포함될 수 있다. 이에 본 연구에서는 모든 센서 및 유량 조건에 대해 고농도 응답이 종료되는 시점인 150 s를 기준으로 0–150 s 구간에서의 각 센서의 누적 수소 누출량을 아래와 같이 산출하였다.

$$AUC_i = \int_0^{150} C_i(t) dt \quad (1)$$

여기서 $C_i(t)$ 는 i번째 수소 감지기에서 시간 t에 측정된 수소 농도이며, 150 s동안 해당 감지기가 경험한 누적 농도 누출량을 의미한다.

센서별 AUC 기여도(Normalized AUC contribution)는 전체 감지기 AUC 합에 대한 각 센서 AUC의 비율로 정의하였으며, G1 수직 상향 누출 조건에서 노즐 직상부 또는 중앙 상부 감지기로 기능하는 S3의 상대적 지배성을 평가하기 위해 중앙지배비율(Central dominance ratio, CDR)을 아래와 같이 정의하였다.

$$CDR = \frac{AUC_{S3}}{\sum_{i=1}^5 AUC_i} \times 100 \quad (2)$$

CDR은 전체 상부 감지기 누적 누출량 중 S3가 차지하는 비율을 나타낸다. 따라서 CDR이 클수록 수소 농도 응답이 중앙 상부 감지기 S3에 집중되었음을 나타내며, CDR이 감소할수록 수소 누출이 다른 감지기들로 분산되었음을 의미한다. 추가적으로 유량 증가에 따라 수소 누출이 S4 및 S5 방향으로 이동하는 경향을 평가하기 위해 주변부 축적 비율

(Peripheral accumulation ratio, PAR)을 아래와 같이 정의하였다.

$$PAR = \frac{AUC_{S4} + AUC_{S5}}{\sum_{i=1}^5 AUC_i} \times 100 \quad (3)$$

PAR은 전체 누적 누출량 중 S4와 S5가 차지하는 비율로, 본 실험공간의 상부 측면 또는 말단 방향으로 수소 누출이 이동 및 축적되는 정도를 나타내는 지표로 사용하였다.

Fig. 7은 0–150 s 구간에서 계산한 센서별 정규화 AUC 기여도와 CDR 및 PAR 변화를 나타낸 것이다. 150 L/min 조건에서는 S3의 AUC 기여도가 가장 크게 나타났으며, CDR은 36.94%로 산출되었다. 이는 저유량 조건에서 수소 플룸이 주로 노즐 직상부 또는 중앙 상부 영역에 집중되었음을 의미한다. 이때 PAR은 47.40%로 나타났으며, S4와 S5의 누적 누출

기여도도 일정 수준 존재하였다. 이는 150 L/min 조건에서도 수소가 S3에만 국한되지 않고 천장부를 따라 일부 횡방향 확산되었음을 보여준다.

250 L/min 조건에서는 CDR이 27.05%로 감소하였고, PAR은 51.85%로 증가하였다. 이는 유량 증가에 따라 S3 중심의 누적 누출 집중도가 약화되고, S4 및 S5 방향의 누적 누출 기여도가 증가하기 시작했음을 의미한다. Fig. 6에서 250 L/min 조건의 최대농도는 여전히 S3에서 가장 크게 나타났지만, AUC 기준으로 보면 수소 누출량은 이미 S4–S5 방향으로 확장되는 경향을 보였다. 즉, 최대농도 지표만으로는 S3가 대표 센서처럼 보이지만, 시간 누적 응답을 고려하면 상부 농도장의 재분포가 시작된 것으로 해석할 수 있다.

400 L/min 조건에서는 이러한 경향이 더욱 명확해졌다. CDR은 19.28%까지 감소한 반면, PAR은 63.46%까지 증가하였다. 이는 고유량 조건에서 S3 중심의 누적 누출 지배성이 크게 약화되고, S4 및 S5가 전체 누적 누출량의 대부분을 차지하게 되었음을 의미한다. Fig. 6에서도 400 L/min 조건에서는 최초 감지 센서가 S4, 최대농도 발생 센서가 S5로 나타났으며, S3, S4, S5 모두에서 높은 농도 응답이 관찰되었다. 따라서 400 L/min 조건에서는 수직 상향 제트가 천장부에 도달한 후 중앙부에 정체하기보다, 상부면을 따라 S4–S5 방향으로 이동하거나 확산되는 경향이 지배적으로 나타난 것으로 판단된다.

AUC 기반 분석은 유량 증가에 따른 상부 농도분포 변화를 보다 명확하게 보여준다. 최대농도만을 기준으로 할 경우 150 및 250 L/min 조건에서는 S3가 대표 센서로 판단될 수 있으나, 0–150 s 동안의 누적 누출량을 기준으로 보면 유량 증가에 따라 S3의 상대적 기여도는 지속적으로 감소하고, S4 및 S5의 기여도는 증가하였다. 특히 CDR이 36.94%에서 27.05%, 19.28%로 점차 감소하고, PAR이 47.40%에서 51.85%, 63.46%로 점차 증가한 결과는 수소 공급 유량이 증가할수록 상부 고농도 영역의 대표 위치가 S3 중심에서 S4–S5 방향으로 이동함을 정량적으로 보여준다.

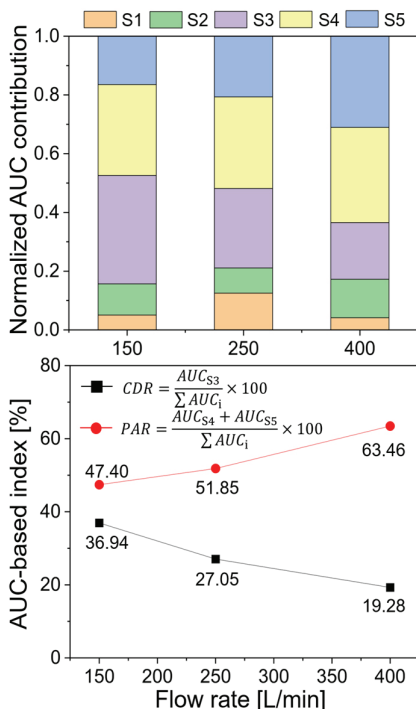


Fig. 7. Normalized AUC contribution and AUC-based index under different hydrogen release flow rates

Table 4. First sensor and time to reach 10,000 ppm under different hydrogen release conditions

Case	First sensor to reach 10,000 ppm	Time to first reach 10,000 ppm [s]
1	S3	15
2	S5	17
3	S5	24
4	S2	18
5	S3	15
6	S3	19
7	S4	12
8	S3	12
9	S3	15
10	S4	15

Table 4는 각 누출 조건에서 센서 위치, 방향 및 유량과 관계없이 가장 먼저 10,000 ppm에 도달한 감지기와 도달시간을 정리한 것이다. 10,000 ppm은 수소 LFL의 25%에 해당하는 NFPA (The National Fire Protection Association) 86 기반 안전환기 농도로, 실제 수소 설비공간에서 조기 감지 및 공급 차단 판단을 위한 주요 기준으로 활용될 수 있다. 따라서 본 표는 누출 위치, 방향 및 유량 변화에 따른 상부 감지기의 최초 응답 특성을 비교하기 위해 제시하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 96 m³ 반밀폐형 비닐텐트 공간에서 수소 누출 위치, 누출 방향 및 누출 유량 변화에 따른 상부 수소 감지기 응답 특성을 분석하였다. 수소 감지기는 모두 상부에 배치하였으며, 10,000 ppm 도달시간, LFL 도달 여부, 최대농도 및 AUC 기반 누적 누출 지표를 이용하여 수소 감지 응답을 평가하였고, 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 수직 상향 누출 조건에서 최초 감지 센서와 LFL 도달 센서는 누출 위치에 따라 달라졌다. G1 조건에서는 S3, G2 및 G3 조건에서는 S5, G4 조건에서는 S2의 응답이 우세하게 나타났으며, 이는 상부 농도분포가 천장 및 벽면 경계

효과의 영향을 받음을 의미한다.

- 2) 누출 방향 변화 실험에서는 수직 상향 조건에서 가장 높은 최대농도(47,336 ppm)가 나타났고, 수평 좌측 조건에서 가장 낮은 최대농도(30,297 ppm)가 나타났다. 이는 초기 제트 운동량 방향과 수소 부력 방향의 상대적 관계가 상부 감지기 응답에 중요한 영향을 미침을 보여준다.
- 3) 유량 변화 실험에서는 150 및 250 L/min 조건에서 S3가 대표 응답 센서로 나타났으나, 400 L/min 조건에서는 최초 감지 센서가 S4, 최대농도 발생 센서가 S5로 변화하였다. 이는 고유량 조건에서 수소 플룸이 천장부 도달 후 S4-S5 방향으로 재분포되었음을 의미한다.
- 4) 0-150 s AUC 기반 분석 결과, CDR은 유량 증가에 따라 36.94%에서 19.28%로 감소하였고, PAR은 47.40%에서 63.46%로 증가하였다. 이는 유량 증가에 따라 상부 누적 누출 중심이 중앙부에서 측면 및 말단 방향으로 이동함을 정량적으로 보여준다.

본 연구는 반밀폐형 수소 설비공간에서 발생할 수 있는 수소 누출 상황에서의 다점 상부 감지기 배열의 필요성을 제시하는 기초 실험 결과를 제공한다. 다만 본 연구 결과는 상부 감지기의 농도 측정에 기반한 것으로, 수소 누출 후 실제 이동 경로, 제트 운동량 감쇠 및 부력 지배 상승 전이 과정을 직접 관찰하지 못한 한계가 있다. 따라서 향후에는 높이별 센서 배치, PIV (Particle image velocimetry) 가시화 또는 고해상도 CFD 해석을 병행하여 반밀폐공간 내 수소 유동장과 농도장 간의 상관관계를 정량적으로 규명할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제이다(No. RS-2025-02311706).

References

1. N. S. Muhammed, A. O. Gbadamosi, E. I. Epelle, A. A. Abdulrasheed, B. Haq, S. Patil, D. Al-Shehri, and M. S. Kamal, "Hydrogen production, transportation, utilization, and storage: recent advances towards sustainable energy", *Journal of Energy Storage*, Vol. 73, 2023, pp. 109207, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109207>.
2. J. A. Okolie, B. R. Patra, A. Mukherjee, S. Nanda, A. K. Dalai, and J. A. Kozinski, "Futuristic applications of hydrogen in energy, biorefining, aerospace, pharmaceuticals and metallurgy", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 13, 2021, pp. 8885-8905, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.014>.
3. G. Aziz, S. Sarwar, R. Waheed, and M. S. Khan, "Significance of hydrogen energy to control the environmental gasses in light of COP26: a case of European countries", *Resources Policy*, Vol. 80, 2023, pp. 103240, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103240>.
4. F. Dawood, M. Anda, and G. M. Shafiullah, "Hydrogen production for energy: an overview", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 7, 2020, pp. 3847-3869, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>.
5. S. H. Lee, S. H. Oh, J. W. Moon, and B. C. Ma, "Numerical study of forced ventilation effects on hydrogen leaks in semi-closed space", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 36, No. 1, 2025, pp. 64-74, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.1.64>.
6. T. Skjold, H. Hiskens, S. Lakshminpathy, G. Atanga, L. Bernard, M. van Wingerden, K. L. Olsen, M. N. Holme, N. M. Tuøy, M. Mykkleby, and K. van Wingerden, "Vented hydrogen deflagrations in containers: effect of congestion for homogeneous and inhomogeneous mixtures", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 17, 2019, pp. 8819-8832, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.010>.
7. S. Kikukawa, H. Mitsuhashi, and A. Miyake, "Risk assessment for liquid hydrogen fueling stations", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No. 2, 2009, pp. 1135-1141, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.093>.
8. B. Lewis and G. von Elbe, "Combustion, flames and explosions of gases", 2nd ed., Academic Press, New York, 1961, doi: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-12402-6>.
9. F. Yang, T. Wang, X. Deng, J. Dang, Z. Huang, S. Hu, Y. Li, and M. Ouyang, "Review on hydrogen safety issues: incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 61, 2021, pp. 31467-31488, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.005>.
10. F. Tabkhi, C. Azzaro-Pantel, L. Pibouleau, and S. Domenech, "A mathematical framework for modelling and evaluating natural gas pipeline networks under hydrogen injection", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 21, 2008, pp. 6222-6231, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.103>.
11. 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>.
12. T. Mogi, D. Kim, H. Shiina, and S. Horiguchi, "Self-Ignition and Explosion during Discharge of High-Pressure Hydrogen", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 21, No. 2, 2008, pp. 199-204, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2007.06.008>.
13. J. Kim, Y. Kim, B. Park, U. Yoon, and C. Kang, "The effect of natural ventilation through roof vents following hydrogen leaks in confined spaces", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 50, 2024, pp. 1395-1405, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.048>.
14. U. G. Yoon, B. Park, W. Kim, and Y. Kim, "Large scale experiment of a roof vented deflagration of high-concentration hydrogen-air mixtures", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 184, 2024, pp. 1411-1423, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.02.049>.
15. U. G. Yoon, J. Kim, B. Park, I. Hwang, W. Kim, and Y. Kim, "Experimental study on the risk of explosion from hydrogen-air mixtures in confined and semi-confined concrete structures", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 97, 2025, pp. 105712, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105712>.
16. X. Li, H. Chen, L. Luo, Z. Ma, P. Qu, and X. Wang, "Study of the effects of different ambient gases and buoyancy on hydrogen jet characteristics", *ACS Omega*, Vol. 9, No. 26, 2024, pp. 28437-28449, doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c02374>.
17. B. Chernyavsky, T. C. Wu, F. Péneau, P. Bénard, P. Oshkai, and N. Djilali, "Numerical and experimental investigation of buoyant gas release: application to hydrogen jets", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 3, 2011, pp. 2645-2655, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.130>.
18. M. F. El-Amin, S. Sun, and A. Salama, "Theoretical analysis and semianalytical solutions for a turbulent buoyant hydrogen-air jet", *Journal of Applied Mathematics*, Vol. 2012, 2012, pp. 1-12, doi: <https://doi.org/10.1155/2012/710172>.
19. A. A. Malakhov, A. V. Avdeenkov, M. H. du Toit, and D. G. Bessarabov, "CFD simulation and experimental study of a hydrogen leak in a semi-closed space with the purpose of risk mitigation", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 15, 2020, pp. 9231-9240, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.035>.

20. Z. Yang, D. Hao, F. Wang, C. Qin, X. Chen, and Y. Tian, "Quantitative analysis of hydrogen leakage and diffusion processes based on real-time concentration measurement at different spatial positions in a customized chamber", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 66, 2024, pp. 231-241, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.051>.
21. Y. Bi, Q. Wu, S. Wang, J. Shi, H. Cong, L. Ye, W. Gao, and M. Bi, "Hydrogen leakage location prediction at hydrogen refueling stations based on deep learning", *Energy*, Vol. 284, 2023, pp. 129361, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129361>.
22. N. Yang, J. Deng, C. Wang, Z. Bai, and J. Qu, "High pressure hydrogen leakage diffusion: research progress", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 50, 2024, pp. 1029-1046, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.221>.
23. H. W. Ji, H. Lee, I. Hwang, and H. Jang, "Safe ventilation methods against leaks in hydrogen fuel cell rooms in homes", *Energies*, Vol. 15, No. 15, 2022, pp. 5434, doi: <https://doi.org/10.3390/en15155434>.