◎ 논 문
◎ Original Paper

DOI: https://doi.org/10.5293/kfma.2023.26.5.111
ISSN (Print): 2287-9706

지하 수소시설에서 수소 누출시 수소 확산특성 및 환기성능에 관한 수치적 연구

서현석* · 황인주*†

Numerical Study on the Diffusion Characteristics and Ventilation under Hydrogen Leakage in the Underground Hydrogen Facilities

Hyeonseok Seo*, Inju Hwang*†

Key Words : Underground hydrogen facility(수소 지하 저장시설), Hydrogen Leakage(수소누출), CFD(전산유체역학), Diffusion(확산)

ABSTRACT

Hydrogen storage and supply system such as a hydrogen charging station needs to sufficient safety distance which are constructed on the ground space, but considering the use of domestic land space in Korea, it is already difficult to secure ground space due to high density development including the urban planning. Various studies are being conducted on the undergroundization of the hydrogen system to solve this problem, but the risk of explosion and fire should be considered when the gaseous hydrogen leaks including the concentration of hydrogen reaches more than 4% (Limit Flammability Level, LFL). Preventing these problems, the concentration of leakage hydrogen should be diluted using the proper ventilation methods in underground space. According to the NFPA, ventilation performance need to allow dilution below 25% of the LFL (1% hydrogen concentration). In this study, we investigated the diffusion phenomena of leakage hydrogen and ventilation performance when gaseous hydrogen leaks from underground facilities numerically, and suggested to reduce the hydrogen volume fraction in it. The flow rate at exhaust port, the number of exhaust port and inlet port were considered the design parameters in this study. The flow characteristics of leaking gaseous hydrogen was set based on the volume average concentration, the ventilation performance according to the variables was quantitatively checked, and the ventilation performance was analyzed through the stagnation region and residual hydrogen volume fraction in underground space.

1. 서 론

전세계적으로 2015년 파리기후협정 이후 2021년 1월부터 신기후 체제에 돌입하며 국가별 온실가스 감축 목표를 세우고 목표를 달성하기 위해 에너지 전환에 대한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 우리나라 역시 2030년 배출 전망치 대비 37%를 2050년까지 감축하기를 목표로 설정하였다.[(1)] 이를 추진하기 위해 정부는 탄소중립 로드맵을 발표하였고 여기에 각 산업 분야별 온실가스 감축 계획에 대해 계획이 수립되어 있으며 그중 탄소중립 에너지 전환의 핵심인 수소 경제활성화 로드맵을 2019년에 발표함으로써 국내 수소분야 산업 활성화를 위한 다양한 사업이 진행되고 있다. 특히 수소 이송・저장 및 활용(충전) 등 인프라 기술과 발전용 연료전지 분야에도 지속적으로 투자하여 수소 생태계 전반의 경쟁력 강화가 진행되고 있다.

한편 수소 인프라 구축을 위해 도시 유휴공간과 기존 가스 충전소 활용에 있어서 입지여건이나 규모, 기준 등으로 인하여 증설에 여러 가지 어려움이 있을 것으로 예상된다. 수소 인프라의 경우 설치시 충분한 안전거리가 필요하나 국내 국토공간 및 도시계획 여건상 고밀화 개발로 인해 지상공간을

* 한국건설기술연구원 환경연구본부/수소인프라클러스터(Department of Environmental Research/Hydrogen-infrastructure Research Cluster, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
† 교신저자, E-mail : ijhwang@kict.re.kr

2023 한국유체기계학회 하계학술대회 발표 논문, 2023년 7월 5일~7월 7일, 평창 알펜시아
The KSFM Journal of Fluid Machinery: Vol. 26, No. 5, October 2023, pp.111~117(Received 14 Jul. 2023; revised 15 Aug. 2023, 20 Aug. 2023; accepted for publication 27 Aug. 2023)
한국유체기계학회 논문집: 제26권, 제5호, pp.111~117, 2023(논문접수일자: 2023.07.14, 논문수정일자: 2023.08.15, 2023.08.20, 심사완료일자: 2023.08.27)

확보하는 것에 상당한 어려움이 있다. 반면 지하공간을 활용할 경우 입체공간의 확보가 가능하고 그 자체로서 방호기능을 가지며, 안전성을 획기적으로 개선가능한 장점이 있기 때문에 독일 및 미국 등 수소인프라 선진국가에서는 주요 수소설비 지하화에 대한 연구개발, 시범적용 및 국제기준 개발 등을 선도적으로 추진 중이다. 이러한 주요 수소 설비를 지하화 할 경우 각 설비 및 배관에서 누출될 수 있는 수소를 효과적으로 배기 및 제어될 수 있어야 한다. 수소의 경우 전통적인 탄소에너지원과는 달리 낮은 최소 점화 에너지(0.019 mJ)와 넓은 가연한계(Flammability Limit)을 갖고 있다. 수소의 가연하한계(Lower Flammability Limit, LFL)은 4 vol%, 가연상한계는 75 vol%로 알려져 있다.[2~4] 또한 기체수소는 매우 낮은 밀도와 부력을 가지고 있기 때문에 누출되는 공간 내 상단부에 축적되는 경향이 있다.[5] 이러한 이유로 인해 수소설비가 보관된 공간의 경우 배기 및 환기구는 이러한 특성을 고려한 위치에 설치되어야 한다.

누출수소의 확산 및 유동특성을 분석하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학)기법을 활용하여 수소 누출시 공간 내 수소의 확산 특성과 배기 성능을 검토하는 연구가 활발히 진행되고 있다.[6~8] Lee 등[9]은 수소연료전지가 설치된 공간에서 수소누출시 확산 특성 및 자연대류, 강제대류를 고려한 배기성능에 관하여 CFD 기법을 활용한 수치해석을 수행하여 그 특성을 분석하였고, 실험을 통해 공간 내 누출된 수소의 확산특성에 대해 고찰하였다. 이를 통해 배기구가 상단부에 위치할 경우 가장 효과적인 배기 성능을 확보할 수 있음을 확인하였다. Matsuura 등[10–12]은 소형공간 내 환기구의 크기, 위치 누출량 및 유량 변화에 따라 자연대류 및 강제대류를 통한 배기성능에 관한 연구를 통해 다양한 상관관계를 고찰하였다.

본 연구에서는 상용 CFD 프로그램인 ANSYS FLUENT를 이용하여 수소저장탱크, 열교환기 등 주요 수소설비의 형상 및 치수를 고려한 지하공간 내부 공간(16.5 m × 13 m × 5 m)에서 기체 수소 누출시 누출 수소에 대한 확산 및 유동특성에 대한 3차원 수치 해석을 진행하고, 지하공간 내부로 유입되는 기체 수소의 유량 변화, 지하공간 천장 영역에 형성되어 있는 배기구 위치 및 면적 변화, 그리고 공기 유입구 변화에 따른 누출수소의 공간 내 확산현상 및 배기성능을 파악하였다. 이를 위해 지하공간 내 누출 수소의 속도분포를 기반으로 정체영역을 정의하고, 정체영역 면적, 배기구를 통해 빠져나가는 누출 수소 유량 및 수소 농도분포와 같은 유동특성을 파악하여 지하공간 내 누출수소의 배기특성을 분석하는 것을 목표로 한다.

2. 수치해석

Fig. 1은 본 연구에서 수행한 수치 해석의 3차원 계산 영역에 대한 개략도와 3차원 모델링 형상, 그리고 격자계를 나타낸 것이다. 지하공간의 레이아웃은 지하공간에 배치되는 기체식 수소저장탱크, 압축기 및 배관 등의 주요설비 레이아웃을 고려하여 선정하였다. 일반적으로 사용되는 기체수소 운송 및 저장용 탱크의 경우 길이 12.5 m, 폭 2.5 m 수준의 치수를 보유하고 있으며, 압축기 및 기타 설비와 배관 등을 포함한 전체 공간의 크기를 16.5 m × 10 m × 5 m로 선정하였다. 수소 누출구는 지하공간 바닥면 정중앙에 위치하여 지하공간 내부로 수소가 누출될 수 있도록 하였으며, 상단부에는 외부 공기의 유입구 및 누출수소의 배기를 위한 배기구를 모델링하여 설계변수에 따른 유동해석을 수행하였다. 본 연구에서는 지하공간 내 주요 설비의 형상은 배제하고 단순 공간의 형상만을 고려하여 수치해석을 수행하였는데, 이는 지하공간에서의 주요설비의 형상 및 누출 위치 등에 대한 변수를 제거하고, 배기구 위치 및 면적에 따른 배기성능을 판단

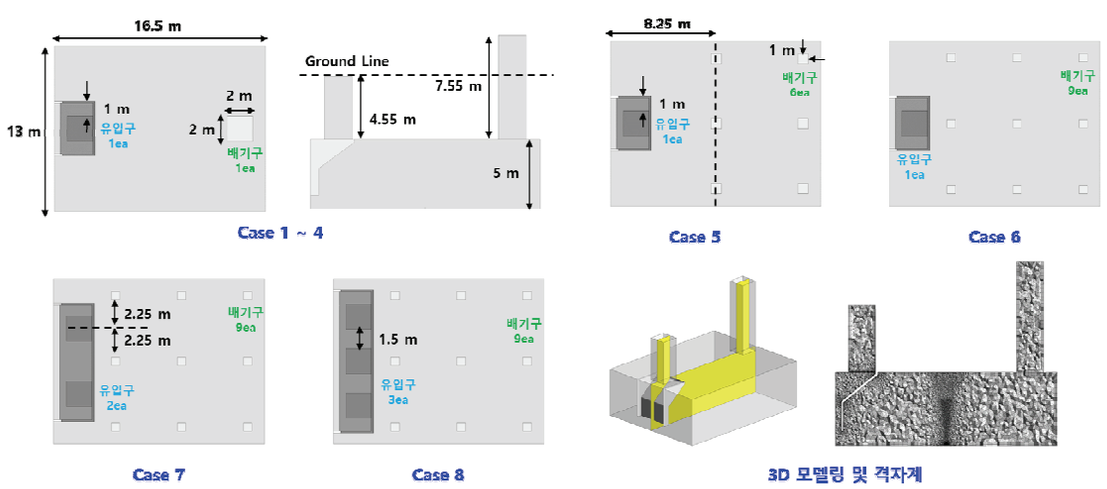

Fig. 1 Schematic of analysis model and grid systems in this study

Table 1 Number of grids in this study

	Case 1~4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
No. of Grids	1,860K	1,910K	1,960K	2,510K	2,750K

하기 위한 것이다. 관 벽면에서 발달하는 경계층에 대한 정확한 해석을 위해 벽 근처의 격자를 조밀하게 생성하였고, 계산영역 내 급격한 형상비 변화 및 계산의 수렴성을 높이기 위해 비정렬 격자를 적용하였다. 격자수는 Table 1에 나타난 바와 같이 180만~275만개 수준으로 생성하였으며, 각 해석 케이스에 따라 유입구 및 배기구 위치 및 면적 변화로 인한 형상비 차이로 인하여 격자수 차이가 발생하게 된다. 본 연구에서 적용된 186만개 이상의 격자수의 경우 Lee 등[9]의 연구에서 선행된 격자의존성 결과에서 보는바와 같이 150만개 이상의 격자수에서는 해석결과 차이가 미미한 것으로 확인할 수 있기 때문에, 본 연구의 유동해석 결과를 도출하기에 적절한 격자수라고 판단할 수 있다.

지하공간 내 혼합기체의 유동현상을 모사하기 위해 ANSYS FLUENT의 Species Transport Equation 모델을 사용하였고, 비정상상태 비압축성 유동을 가정하였다. 시간에 따른 유동의 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \vec{v}) = S_m \tag{1}$$

여기서 S_m은 반응에 의한 질량 source 항을 나타내며, ρ, $\vec{v}$는 계산 영역 셀 내부의 밀도, 속도를 나타낸다. 계산 영역 내 작동유체의 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{2}$$

여기서 $\bar{\tau}$는 점성응력텐서(viscosity stress tensor), $\vec{g}$, $\vec{F}$는 중력 및 body force를 나타낸다. 화학종의 확산을 모사하기 위한 species transport equation의 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J_i} + R_i + S_i \tag{3}$$

여기서 Y_j는 i 화학종의 질량분율, $\vec{J_i}$는 화학종의 확산 플럭스 항, R_i와 S_i는 각각 반응 및 생성 항(Source term)이다. 본 연구에서는 화학 반응(R_i)이나 질량 생성(S_i)을 가정하지 않고, 확산 플럭스 항은 아래와 같이 표현된다.

$$\vec{J_i} = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\nabla Y_i - D_{T,i}\frac{\nabla T}{T} \tag{4}$$

여기서 $D_{i,m}$은 확산계수, μ_t는 난류점성계수, Sc_t는 슈미트(Schmidt) 수, $D_{T,i}$는 열확산계수이다. 본 연구에서는 누출만을 고려하기 때문에 열확산을 계산에서 제외하였고, 확산계수는 문헌을 통해 공기 중 수소의 확산계수 값인 6.11×10^{-5} m^2/s을 적용하였다[13].

해석 조건의 경우 계산 영역 전체에 대해서 중력이 작용하도록 하였고, 벽면에서 점착 조건(no-slip condition) 및 단열 조건을 가정하였다. 입구는 mass flow inlet으로 설정하였고 출구는 pressure outlet, 대기압 조건으로 설정하여 출구에 대한 영향이 없도록 하였다. 초기 조건과 대기 조건(pressure-outlet)은 몰분율로 Air 100%, H_2 0%, 누출구의 유입 조건은 H_2 100%로 설정하였다. 입구조건의 경우 KGS GC101 2018 규격을 기반으로 3/8inch 직경에 3 kPa의 압력을 가했을 경우 환산되는 값을 사용하였으며, 아래와 같은 식을 통해 도출하였다.

$$W_g = C_d S p \sqrt{\frac{M}{ZR_u T}\frac{2\gamma}{\gamma-1}\left[1-\left(\frac{p_a}{p}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}\left(\frac{p_a}{p}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \tag{5}$$

여기서 W_g는 누출유량, C_d는 유출계수, S는 누출구 단면적, p는 인가압력, p_a는 대기압, M은 몰질량(Molar mass), Z, R_u, γ는 각각 압축계수, 기체상수 및 폴리트로픽 지수이다. 본 방정식에서 보는 바와 같이 입구 단면적 및 인가압력에 의해 계산 공간으로 누출되는 수소의 유량을 선정할 수 있다.

난류 모델은 SST k-ω 난류 모델을 사용하였고, 수치 해석 알고리즘으로 PISO를 사용하였으며 압력에 대해 PRESTO, 운동량에 대해 Second-Order MUSCL, 각 상에 대한 부피비에 대해 Geo-Reconstruct 이산화기법을 사용하여 계산하였다. 3차원 비정상상태 수치해석을 위한 상세 적용 조건을 Table 2에 정리하였다.

본 연구에서는 Table 3에 나타난 바와 같이 배기구 유량, 유입구 개수, 배기구 개수 등의 설계변수를 고려하여 총 8가지의 해석 Case를 선정하였다. 국내외 기준인 KGS FU 551[14]과 NFPA 2[15]에 따르면 환기 유량은 바닥면적 1 m^2 당

Table 2 Analysis conditions

Analysis S/W	Ansys Fluent 2021
Modeling & Grids	Ansys 2021 DM, Meshing
Working Fluid	Air-Hydrogen Mixture (N2, O2, H2)
Turbulent Model	SST k-w
Analysis time	Unsteady, 0~180 min
Time step	1st step: 0.01s, to 100s 2nd step: 1s, to 100s, and then to 180 minutes

Table 3 Analysis cases with various design parameters in this study

Case No.	Analysis Conditions			Flow rate of VENT. (m^3/min)	Ventilation(VENT.) Conditions				
					No. of inlet port	Total inlet area (m^2)	No. of exhaust port	Total exhaust area (m^2)	VENT. area (m^2)
1	Various values of flow rates on exhaust			66	1	4	1	4	8
2				132	1	4	1	4	8
3				198	1	4	1	4	8
4		Various number of exhaust ports		264	1	4	1	4	8
5				264	1	4	6	4	8
6			Various number of inlet ports	264	1	4	9	4	8
7				264	2	8	9	4	12
8				264	3	12	9	4	16

0.3 m^3/min 이상을 권장하고 있다. 해당 지하 시설의 바닥 면적과 상용 옥내용 환기팬 유량을 고려하였을 때, 최소 환기량을 66 m^3/min으로 선정하였으며, 이를 Case 1로 지정하였다. Case 2부터 4는 환기팬 유량 변화에 따른 유동특성을 고려하였고, Cases 5와 6은 동일한 배기구 전체 면적을 기반으로 배기구를 각각 6, 9개로 분할하여 배기구 개수 변화에 따른 해석을 수행하였다. Cases 7과 8은 유입구 개수 변화에 따른 지하공간 내 유동특성을 분석하기 위해 선정하였다. 총 8개의 해석 case가 존재하지만 크게 보면 환기유량 변화에 따른 해석, 배기구 개수 변화에 따른 해석 및 유입구 개수 변화에 따른 해석, 이렇게 3가지로 구분할 수 있다.

3. 수치해석 결과

Table 2에 나타난 바와 같이 총 8 케이스의 설계변수에 따른 수치해석을 진행하였으며 지하공간 내 누출수소의 유동특성을 잔류수소로 인한 정체영역과 공간내 수소농도분포를 통해 분석하였다. Fig. 2는 수치해석을 통해 계산된 누출수소의 속도분포를 기반으로 정체영역을 정의하여 각 케이스별로 정체영역을 비교한 것이다. 계산영역 내 누출수소의 유동속도가 0.3 m/s 이하로 분포할 경우 정체영역이라 정의하였다. 정체영역이 많을수록 공간 내 누출수소의 잔류량이 높을 것이라 판단할 수 있으며, 이 경우 누출수소가 외부로 배출되는 배기성능은 저하될 것으로 판단된다. Case 1~Case 4의 해석결과에서 보는 바와 같이 동일한 배기환경에서 환기량이 증가할 공간 내 수소 정체영역이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 동일 환기량에서 배기구 수가 증가하는 Case 4~Case 6의 경우 공간 내 정체영역 측면에서는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 반면 유입구 수가 기존대비 증가하게 되는 Case 6~Case 8의 해석결과에서는 유입구 수가 증가할수록 정체영역이 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 환기유량이 고정된 상태에서 유입구 수가 증가하게 되어 유입되는 공기의 속도가 낮아지게 되어 오히려 공간 내 수소농도가 증가하는 결과를 초래하는 것으로 판단된다. 또한 계산영역 내부에 정체영역이 많을수록 배기가 지연되어 내부에 잔류하는 수소농도가 증가될 것으로 예상할 수 있다.

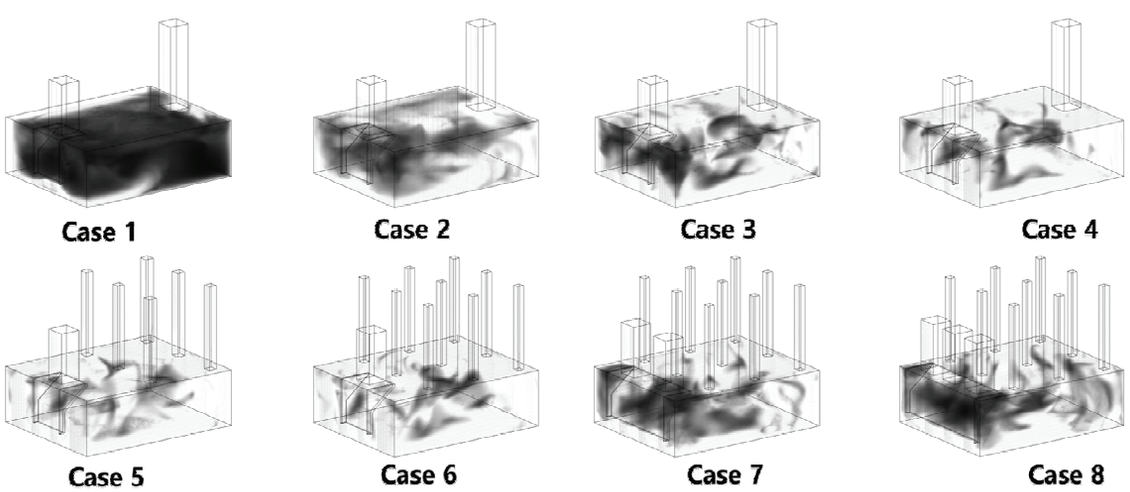

Fig. 2 Analysis results of stagnation region by leakage hydrogen in the underground space

Fig. 3은 계산 최종시간인 180분이 경과된 후 계산 영역 내 존재하는 누출수소 농도를 도시한 결과로 수소농도 20% 이하로 존재하는 영역을 가시화한 결과이다. 수소농도 분포는 Fig. 2에서 도시된 지하공간 내 수소 정체영역 분포 결과와 유사한 결과를 보여주고 있으며, 정체영역의 증가는 계산 공간 내 수소농도의 증가와 밀접한 영향이 있음을 확인할 수 있다. 계산 공간 내 누출수소의 농도분포는 Fig. 2.의 결과와 마찬가지로 환기유량이 증가할수록 계산 공간 내 수소농도분포가 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 모든 케이스에서 누출된 수소가 계산 공간 상단부에 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 Lee 등[9]과 Matsuura[10]이 수행한 수치해석적 연구결과와 일치하는 경향을 나타내고 있으며, 본 연구의 해석기법이 계산공간 내 누출수소의 유동특성을 분석하기 위해 적합하다는 것을 확인할 수 있는 근거이다. 반면 Fig. 2에서 비교한 Case 4~Case 6의 경우 동일 배기량 조건에서 배기구 면적이 증가할 경우 누출수소에 의한 정체영역 분포에 대한 차이는 미미하였지만, 수소농도분포의 경우 Case 6의 경우 가장 적은 수소 농도분포를 나타내고 있다. 또한 정체영역 결과 측면에서 Cases 4~5가 Cases 7~8보다 작은 정체영역 분포를 보여주고 있지만 계산공간 내 수소농도는 Cases 7~8이 더 낮은 결과를 나타내고 있다. 이는 배기면적의 증가가 누출 수소의 배기성능을 향상시키는 주요 인자중 하나가 될 수 있는 근거로 판단할 수 있으며, 이 부분에 대한 정량적 결과분석은 Figs. 5~6을 통해 다시한번 기술되었다.

Fig. 4는 시간변화에 따른 계산 공간 내 수소농도분포 결과를 나타낸 것으로, 시간이 지날수록 계산 공간으로 누출된 수소가 배기구를 통해 빠져나가고 있는 것을 확인할 수 있으며, 본 연구에서 진행된 Case의 특성에 따라(배기량 변화, 배기구 변화 및 유입구 변화) 계산공간 내 수소농도 분포량의 차이가 있음을 확인할 수 있다. 일정시간이 지난 이후에는 계산 공간 내 수소농도 분포 변화가 미미한 것을 알 수 있다. 이는 모든 해석 case에서 동일하게 나타나고 있으며, 현재 구성된 계산 공간 대비 배기량이 충분하지 않아 누출된 수소를 완전히 제거하기에는 부족한 것으로 판단할 수 있다.

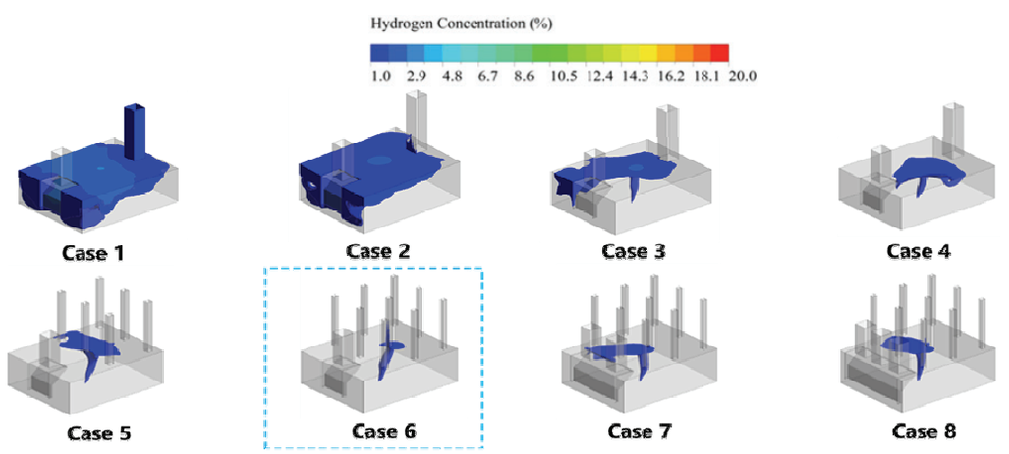

Fig. 3 Analysis results of hydrogen concentration by leakage hydrogen in the underground space at 180 mn

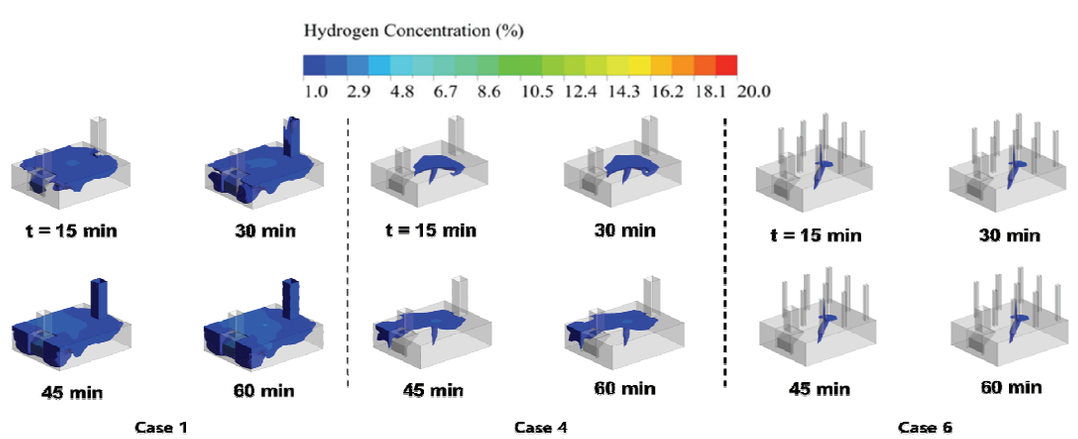

Fig. 4 Analysis results of hydrogen concentration by leakage hydrogen in the underground space with various time at Case 1, 4, 6

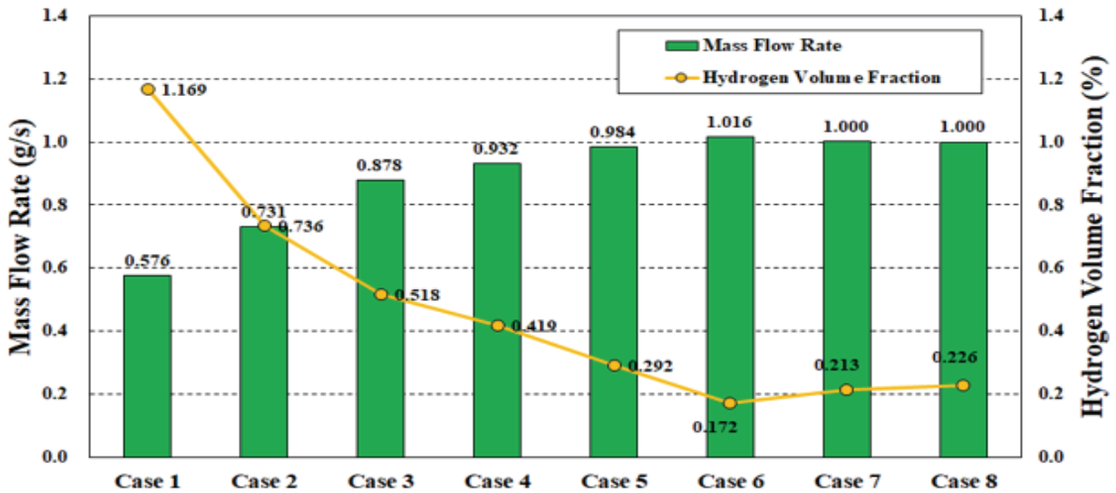

Fig. 5 Mass flow rate of hydrogen ventilation and remained hydrogen volume fraction at 180 min

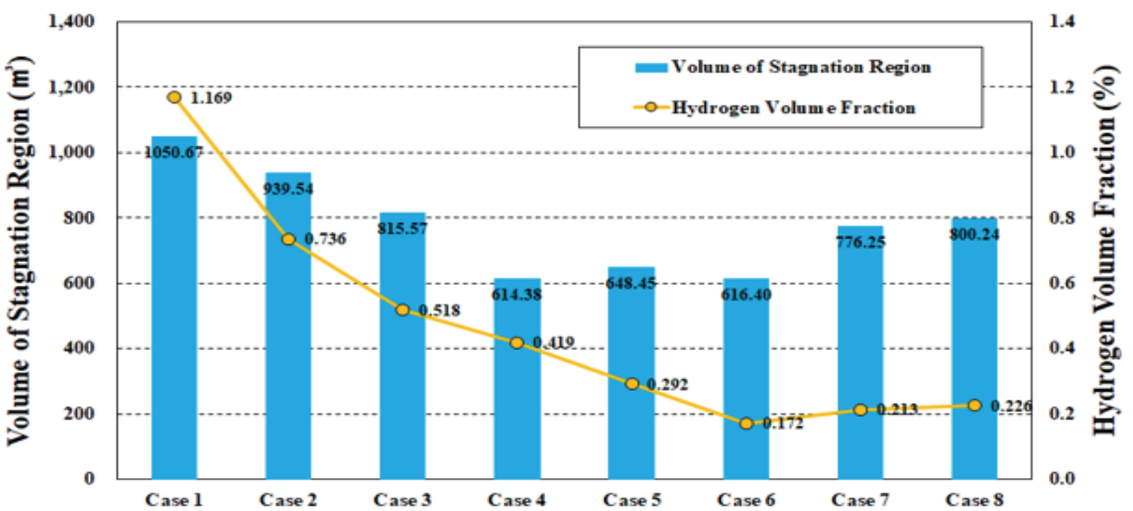

Fig. 6 Volume of stagnation region by leakage hydrogen and remained hydrogen volume fraction at 180 min

Figs. 5~6은 최종 계산시간에서 각 case 별 수소 체적분율과 계산 공간에서 누출수소가 외부로 배기되는 유량 및 정체영역 체적 간의 관계를 나타낸 결과이다. Case 1의 경우를 제외한(Case 1 = 1.2% 수준) 모든 Case에서 LFL (Limit Flammability Level) 25% 수준인 수소농도 1% 이하로 유지되고 있으며, 배기 유량이 증가함에 따라 계산 공간 내 수소농도분포는 점점 감소하고 있음을 확인 할 수 있다. 반면 유입구 수가 증가하게 되는 Case 6~8의 경우 배기유량은 일정하게 유지되고 있지만 내부 수소농도분포는 증가하고 있는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 유입구 수의 증가로 인해 내부 유동 속도가 감소하게 되어 정체영역 및 수소 농도분포가 증가하기 때문이다. 이러한 경향은 Fig. 6의 결과를 통해서도 확인할 수 있는데, 배기량 및 배기구 면적이 증가함에 따라 내부에 분포하는 누출수소의 농도 및 정체영역은 감소하게 되지만 유입구 수의 영향으로 인해 Case 6~8의 결과에서 보는 바와 같이 계산 영역 내부에 정체영역 및 수소농도를 증가시키게 된다. 이러한 결과를 기반으로 유입구 전체 면적을 유지하면서 유입구 형상비를 변경하는 방법을 적용할 경우 유입속도 증가를 통해 누출 수소에 대한 배기 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 상기 도출된 결과들을 기반으로, 계산 공간 내 정체영역이 가장 적고 평균 수소농도가 가장 낮은 Case 6의 설계가 지하공간 내 배기성능 확보를 위한 최적설계안으로 제안될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 수치적 방법을 통해 수소스테이션 내 주요 설비를 고려한 지하 공간에서 기체수소가 누될 경우 공간 내 누출수소의 유동특성을 분석하여 확산 및 배기성능을 파악

하였다. 특히 계산 공간 내 수소누출 시 배기구 위치 및 배기량에 따른 성능특성을 고찰하였으며, 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 계산 공간 내 수소 누출시 환기유량이 증가할 경우 공간 내 누출수소로 인한 정체영역 및 평균 수소농도가 감소하게 되며, 이는 배기구를 통해 누출된 수소가 효과적으로 배출되는 것으로 판단할 수 있다.

(2) 계산 공간 내 배기구 개수 증가로 인한 배기면적 증가는 공간 내 누출수소로 인한 수소농도를 감소시키고, 배기구를 통한 배출량 또한 효과적으로 증가시키는 것을 확인하였다. 누출된 수소의 배기성능을 확보하기 위해서는 지하 공간 상단부에 효과적인 배기구 설계가 반드시 필요하다.

(3) 계산 공간 내 유입구 개수가 증가할 경우 외부 공기의 유입속도가 저하되어 공간 내에 누출수소로 인한 정체영역이 증가하게 되고, 이는 시간이 지나도 수소농도가 증가되는 원인이 되는 것을 확인하였다. 유입구 면적이 고정되어 있다면, 유입구의 형상비 변화를 통해 유입속도를 변화시켜 배기성능을 향상시킬 수 있는 설계를 고려해야 한다.

(4) 본 연구에서 활용된 설계변수(유입구 개수//배기구 개수/배기유량)를 고려하여 지하공간 내 수소가 누출되었을 경우 설계변수 조합을 통해 효과적인 배기성능 확보가 가능할 것으로 판단되며, 향후 지하공간 내 주요 수소설비 및 배관 등을 배치한 후 수소누출 위치 및 배기환경 설계변수에 따른 배기성능 연구를 수치해석을 통해 진행할 예정이다. 또한 지하공간을 모사할 수 있는 실험체를 제작하여 공간 내 수소확산특성 및 배기성능 실험 및 데이터 분석을 통해 본 연구에서 진행된 수치해석기법을 검증할 예정이다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다 (과제번호 20230104-001, 수소도시 기반시설의 안전 및 수용성 확보 기술 개발).

References

(1) Ministry of Economy and Finance, 2020, “2050 carbon neutral strategy of the republic of Korea”, Future Vision and Strategy Bureau.

(2) Hansen, O. R., 2020, “Hydrogen infrastructure—Efficient risk assessment and design optimization approach to ensure safe and practical solutions”, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 143, pp. 164–176.

(3) Astbury, G. R., 2008, “A review of the properties and hazards of some alternative fuels”, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 86, pp. 397-414.

(4) Schröder, V. and Molnarne, M., 2005, “Flammability of gas mixtures: Part 1: fire potential”, Journal of Hazardous Materials, Vol. 121, pp. 37–44.

(5) Kim, E., Park, J., Cho, J. H., and Moon, I., 2013, “Simulation of hydrogen leak and explosion for the safety design of hydrogen fueling station in Korea”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, pp. 1737–1743.

(6) Venetsanos A. G., Papanikilaou E., Delichatsios M., Garcia J., Hansen O. R., and Heitsch M., 2009, “An inter-comparison excercise on the capabilities of CFD models to predict the short and long term distribution and mixing of hydrogen in a garage”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 5912-5923.

(7) Wilkening H. and Baraldi D., 2007, “CFD modelling of accidental hydrogen release from pipelines”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, pp. 2206-2215.

(8) Makarov D., Verbecke F., Molkov V., Kotchourko A., Leltakin A., and YAnez J., 2010, “An intercomparison of CFD models to predict lean and non-uniform hydrogen mixture explosions”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, pp. 5754-5762.

(9) Lee J., Cho S., Cho H., Lee I., Moon I., and Kim J., 2022, “CFD modeling on natural and forced ventilation during hydrogen leaks in a pressure regulator process of a residential area”, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 161. pp. 436-446.

(10) Matsuura K., 2009, “Effects of the geometrical configuration of a ventilation system on leaking hydrogen dispersion and accumulation”,. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 9869–9878.

(11) Matsuura K., Nakano M., and Ishimoto J., 2010, “Forced ventilation for sensing-based risk mitigation of leaking hydrogen in a partially open space”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, pp. 4776–4786.

(12) Matsuura K., Nakano M., and Ishimoto J., 2012b, “Acceleration of hydrogen forced ventilation after leakage ceases in a partially open space”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37, pp. 7940–7949.

(13) Turns, S. R., 1996, “Introduction to combustion”, New York, NY, USA: McGraw-Hill Companies.

(14) Korea Gas Safety (KGS), 2018. Facility, technical, inspection code for urban gas using facilities.

(15) National Fire Protection Association (NFPA), 2012. NFPA 2 Hydrogen Technologies Code.