

지하주차장 내 수소연료차의 수소 방출시 가연체적에 관한 수치해석적 연구

이호형^{1*} · 김효규² · 유지오³ · 김두영⁴

¹정회원, (주)주성지앤비 과장

²정회원, (주)주성지앤비 대표이사

³정회원, 신한대학교 교수

⁴정회원, 한국건설기술연구원 박사후 연구원

A numerical analysis study on the flammable volume by leakage of hydrogen fuel vehicles in parking lot

Ho-Hyung Lee^{1*} · Hyo-Gyu Kim² · Ji-Oh Yoo³ · Doo-Young Kim⁴

¹Researcher, JS G&B Inc.

²CEO, JS G&B Inc.

³Professor, Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Shin-Han University

⁴Post Doc, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*Corresponding Author : Ho-Hyung Lee, hhlee@gnbeng.com

Abstract

The recent reduction in greenhouse gases, interest in environmental pollution such as low-carbon emission policies is increasing. Accordingly, the penetration rate of eco-friendly vehicles, including hydrogen battery vehicles capable of reducing carbon emission, is increasing, and thus it is required for disaster prevention and safety-related measures. In this study, the degree of risk for the concentration distribution of hydrogen when leaking hydrogen fuel vehicles according to ventilation conditions was analyzed through numerical analysis, limited to places in parking lots. As a result, when only one hydrogen tank was released, the combustible volume ratio of hydrogen in the underground parking lot was up to 8.6%, and as ventilation continued, the volume ratio of combustible hydrogen decreased to less than 1% after 150 seconds, indicating that mechanical ventilation is essential. In the case of simultaneous release or stage release of three hydrogen tanks, the final combustible volume ratio of hydrogen is similar, but the increase in the combustible volume ratio of hydrogen in the early stage of release is low, and further research is expected.

Keywords: Hydrogen fuel cell electric vehicle, Parking lot, Semi-closed space, Hydrogen leakage, Flammability level

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
23(6)439-449(2021)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2021.23.6.439>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received September 29, 2021

Revised October 26, 2021

Accepted October 26, 2021



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2021, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

최근 온실가스 저감과 더불어 저탄소배출 정책 등 환경오염에 관심이 증대되고 있다. 이에 따라 탄소배출을 저감할 수 있는 수소전기자동차를 비롯한 친환경 자동차의 보급률이 증가하고 있어 이에 대한 방재 및 안전관련 대책에 요구되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 지하주차장의 장소에 국한하여 환기조건에 따라 수소연료자동차의 방출 시 수소의 농도 분포에 대한 위험정도를 수치해석을 통해 분석하였다. 그 결과, 수소탱크가 1개만 방출 될 경우 지하주차장 내 수소의 가연체적비는 최대 8.6%로 나타났으며, 환기가 지속적으로 이루어짐에 따라 연소가능한 수소의 체적비율은 150초 이후 1% 미만으로 감소되는 것으로 분석되어 기계적인 환기가 필수적인 것으로 분석되었다. 수소탱크 3개가 동시방출 또는 단계 방출의 경우 최종적인 수소의 가연체적비율은 유사하지만 단계적으로 지연 방출함에 따라 방출 초기 수소의 가연체적비율의 증가폭이 낮은 것으로 나타났으며, 이에 따른 수소탱크 방출 시나리오의 추가적인 연구가 필요한 것으로 예상된다.

주요어: 수소연료전지차, 지하주차장, 반밀폐공간, 수소누출, 연소한계

1. 서론

전 세계는 산업화에 따른 환경문제와 지구온난화를 해소하기 위하여 파리 기후변화 협약을 통해 온실가스 배출량 감축 등 다양한 환경문제 극복을 위한 노력을 기울이고 있다(Ministry of Foreign Affairs, 2021). 이에 따라 우리나라 역시 저탄소배출을 기반으로 친환경 경제성장을 목적으로 다양한 제도와 정책이 시행 중이며, 온실가스 감축과 더불어 최근 대기오염에 따른 환경문제 역시 중론화 됨에 따라 대기오염물질 배출 저감을 위한 조치를 시행 중이다. 대기오염물질 중 차량에 의해 발생하는 도로이동오염원은 CO와 NO_x의 총 발생량을 기준으로 2005년 각각 82.4%, 47.1%에서 2016년에는 각각 53.2%, 53.9%의 비율을 차지하고 있을 만큼 차량에서 배출되는 오염물질에 대한 저감이 필요한 실정이다(Ministry of Environment, 2020). 이에 따라 정부차원에서 친환경 자동차의 보급확대와 경유 차량의 조기폐차 지원 등의 대책을 마련하여 시행 중이다. 이러한 대책에 따라 친환경 자동차의 보급율은 2013년 0.54% (105,044대)에서 2020년 6월 기준 2.87% (689,495대)로 약 6.6배 증가하였으며, 이 중 수소연료전지차(FCEV)은 2018년 893대에서 2020년 6월 기준 7,682대로 약 1년 6개월 만에 8.6배가 증가되어 보급율이 대폭 증가하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021).

반면, 수소연료전지차(FCEV)의 보급 확대와 함께 유사시 방재·안전적인 측면에서의 대책 마련이 필요하다. 수소연료전지차(FCEV)는 수소를 충전하여 동력원으로 사용함에 따라 차량 내부에 수소저장탱크가 존재하며, 주변 온도가 일정 온도 이상으로 상승하게 되면 수소저장탱크 내에 충전된 수소가스를 방출시키는 TPRD (Thermal Pressure Relief Device)라는 안전장치를 구축하고 있다. 하지만, 수소저장탱크에서 TPRD가 개방되어 수소가 방출될 경우 주변 상황에 따라 발화, 폭발, 화재 등의 사고로 이어질 수 있는 만큼 이에 대한 안전대책마련이 강구되고 있는 실정이다. 더욱이 터널, 지하주차장 등과 같은 반밀폐공간에서 수소연료전지차의 TPRD가 개방될 경우 주변 차량 및 구조체에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

이에 따라 Ahn et al. (2010)은 수소연료자동차(승용차)의 도로터널 내에서 수소 방출에 따른 확산을 수치해석을 통해 가연영역을 분석하였으며, Choi et al. (2012)은 수소를 연료로 운행하는 버스의 방출에 따른 정도를 수소의 가연영역을 통해 분석하였다. 또한 Baek et al. (2021)은 지하주차장에서 수소연료자동차(승용차)의 방출에 따른 영향을 분석하였으며, Choi et al. (2016)은 지하주차장의 수소연료의 방출에 따른 가연영역을 수치해석을 통해 분석하였다.

한편, 지하주차장 등과 같은 건축물 내부에 위치한 반밀폐공간은 관련 법령에 따라 환기기준에 따라 환기를 의무화하고 있으나, 수소의 누출에 따른 위험정도를 분석하여 제시되지는 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지하주차장의 장소에 국한하여 관련 법령의 환기조건에 따라 수소연료자동차의 방출 시 수소의 농도 분포에 대한 위험정도를 수치해석을 통해 분석하였다.

2. 해석대상

Fig. 1에는 본 연구의 수치해석 대상인 지하주차장의 개요도를 도식하였다. 해석대상은 승용차량만이 이용할 수 있는 지하주차장을 선택하였으며, 그림에서 보는 것과 같이 가로 42 m × 세로 42 m × 높이 2.3 m의 크기로 선정하였다. 주차장법 시행규칙의 법적 규제에 주차공간 외적에 통로를 확보하였고, 모든 지하주차장은 만차 상태로 가정하였다. 또한 차량의 크기는 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침 에서 제시된 소형승용차를 적용하였으며, 차량 타이어에 따른 0.2 m의 높이 공간을 확보하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2020).

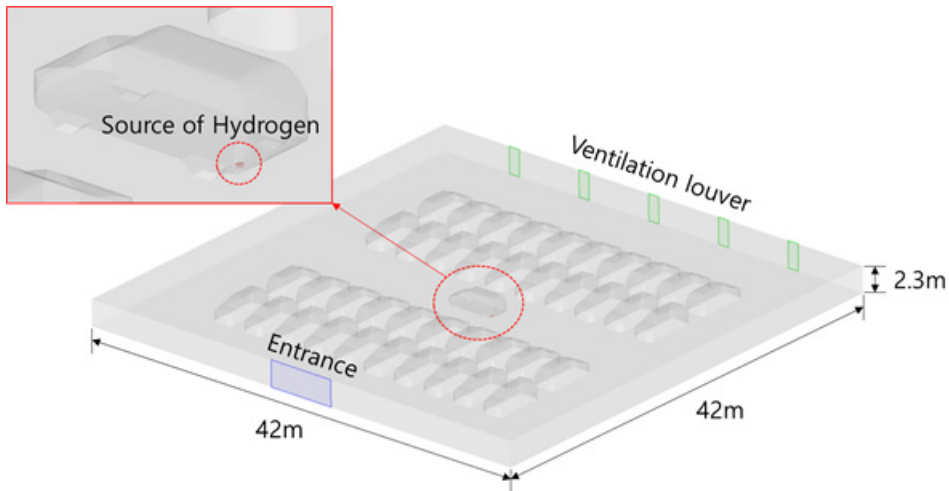


Fig. 1. Schematic diagram

수소차량은 동일한 지하주차장 중앙에 위치한 것으로 가정하였으며, 수소차량 하부에 수소가 방출 되도록 모델링을 하였다. 수소탱크의 용량은 H사의 N차량을 기반으로 하여 52 liter 용량의 수소탱크가 3개 존재하며, 70

Mpa의 내부 압력을 가정하였다(Hyundai Motor Company, 2021). 한편, 노즐의 크기는 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 의 면적에서 TPRD 개방에 따른 수소가 방출되도록 설정하였다.

3. 해석종류 및 해석방법

3.1 해석종류

본 연구에서는 지하주차장의 수소방출에 따른 수소농도 분포를 분석하여 위험정도를 파악하고자 함에 따라 수소방출에 대한 시나리오를 Table 1과 같이 설정하였다. 대상 수소차량은 52 liter의 수소탱크가 3개 존재함(Hyundai Motor Company, 2021)에 따라 3가지 시나리오를 선정하였으며, 시나리오 1은 1개의 수소탱크만 방출되는 경우, 시나리오 2는 3개의 수소탱크가 모두 방출되는 경우, 시나리오 3은 3개의 수소탱크가 10초 간격으로 방출되는 경우를 의미하며, 각 시나리오에 따른 시간경과 별 수소의 방출량은 Fig. 2와 같으며, 수소의 방출량은 HyTunnel-CS (2019)가 연구한 “Adiabatic and isothermal model of blowdown of storage tank dynamics”방법을 적용하여 시간에 따른 방출량을 산정하였다.

Table 1. Hydrogen tank leakage scenario

	The number of hydrogen tank	Tank capacity (liter)	Note
Scenario 1	1	52	-
Scenario 2	3	156	-
Scenario 3	3	156	Interval 10 s

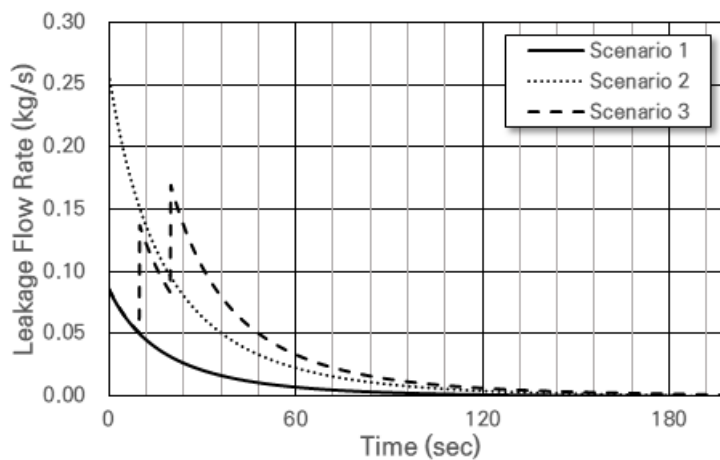


Fig. 2. Hydrogen leakage rate for scenario

Table 2에는 본 연구에서 수행한 해석의 종류를 Table 1에 제시된 시나리오에 따라 지하주차장의 환기 여부 및 용량에 따라 해석종류를 선정하였다. 이 때 출입구는 대기압조건을 부여하였고 환기용량은 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙에 따라 시간당 3회의 환기횟수(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021)를 기준으로 추가적인 환기용량 증대를 위한 시간당 환기 횟수를 5회로 증가 시켜 적용하여 출입구 반대편에 위치한 환기 루버를 통해 해당 풍량을 적용하였다. 그 결과, 시간당 환기횟수가 3회인 경우 전체 지하주차장의 총 환기용량은 약 12,000 m³/hr이며, 시간당 환기횟수가 5회인 경우에는 약 20,000 m³/hr의 환기용량을 갖는다.

Table 2. Simulation case

	Ventilation condition	Ventilation flow rate (m ³ /hr)	Note
Case 1-1	Natural ventilation	-	Scenario 1 (S1)
Case 1-2	Natural ventilation	-	Scenario 2 (S2)
Case 1-3	Natural ventilation	-	Scenario 3 (S3)
Case 2-1	3 times per 1 hour (Q1)	12,172	Scenario 1 (S1)
Case 2-2	3 times per 1 hour (Q1)	12,172	Scenario 2 (S2)
Case 2-3	3 times per 1 hour (Q1)	12,172	Scenario 3 (S3)
Case 3-1	5 times per 1 hour (Q2)	20,286	Scenario 1 (S1)
Case 3-2	5 times per 1 hour (Q2)	20,286	Scenario 2 (S2)
Case 3-3	5 times per 1 hour (Q2)	20,286	Scenario 3 (S3)

3.2 해석방법

수소탱크에서의 누출량은 약 18초 이내에 전체 용량의 약 50%가 누출되기 때문에 비정상상태의 비압축성 유동으로 수치해석을 진행하였으며, 이와 함께 사용된 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지방식 및 수송방정식은 아래 식(1)~(4)에 나타내었다.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu_{eff} \nabla^2 \vec{u} + \vec{g} \tag{2}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\vec{u} \left(E + \frac{p}{\rho} \right) \right) = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (Y_q) + \nabla \cdot (\vec{u} Y_q) = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \vec{J}_q \tag{4}$$

위 식에서 ρ 는 유체의 밀도, \vec{u} 는 유체의 속도, k_{eff} 는 유효 열전도율을 의미하며, Y_q 는 각 성분에 대한 질량분률, \vec{J}_q 는 확산 플럭스를 의미한다. 해석 대상 내의 난류의 유동은 Standard k- ϵ 난류모델을 적용하였으며, 속도와 압력을 해석하기 위한 압력-속도장은 SIMPLE 알고리즘을 적용하였다.

해석에 적용된 격자의 총 수는 약 3,500,000개로 생성된 격자의 크기는 수소가 방출되는 주변부는 0.02 m로 설정하였으며, 그 외 주변부는 0.1 m 간격으로 격자를 생성하여 Fig. 3에 생성된 격자를 나타내었다. 본 연구에 설정한 해석종류 및 지배방정식은 상용 프로그램인 Open-FOAM6 기반의 코드를 사용하여 수치해석을 진행하였다.

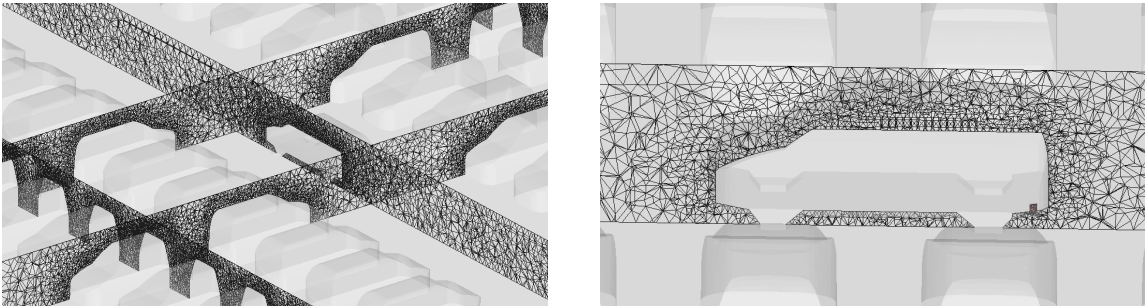


Fig. 3. Mesh generated for numerical analysis

4. 해석결과

공기 중에 방출된 수소가스는 차지하는 비율에 따라 연소가 가능한 가연한계를 갖으며, 그 최소값을 연소하한계(Lower Flammability Level, L.F.L)라 하며 4%Vol로 보고 있으며, 그 최대값을 연소상한계(Upper Flammability Level, U.F.L)라 하며 75%Vol로 보고 있다(Kim et al., 2013). 즉, 공기 중 수소의 체적 농도가 이 연소하한계와 연소상한계 사이에 존재할 경우 수소는 연소가 가능한 것으로 예상되며, 실제 방출시 연소된 수소는 물질적 특징에 의해 단순 연소가 아닌 폭발까지도 이어질 수 있을 것이라 예상된다. 이에 따라 본 연구에서는 Choi et al. (2012)이 제시한 가연체적비(전체 체적에 대한 수소가연영역의 비율(η))를 적용하여 수소의 방출시나리오와 환기조건에 따른 지하주차장 내 수소가스의 가연체적비를 수소의 연소하한계인 4%Vol 이상의 값을 정량화하여 분석하였으며, 본 연구에 적용된 가연체적비의 정의는 식 (5)와 같다.

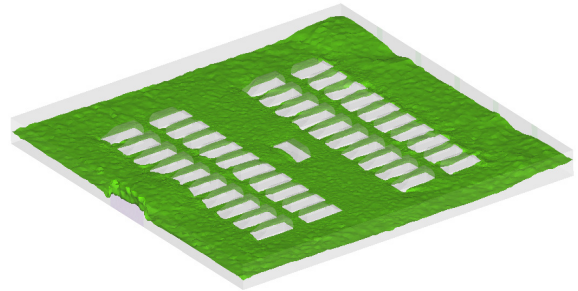
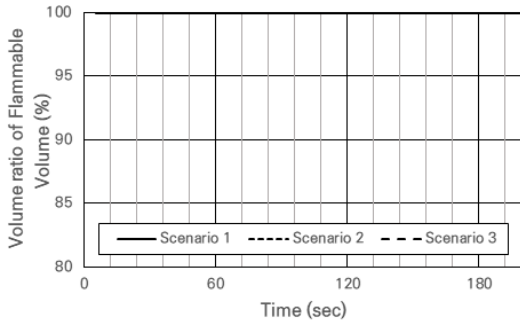
$$\eta(\%) = \frac{V_{F.L}}{V_t} \times 100 \quad (5)$$

여기서, V_t 는 지하주차장 전체 체적(m^3)을 의미하며, $V_{F.L}$ 은 수소의 연소하한계값인 4%Vol 이상의 체적(m^3)을 의미한다.

4.1 수소 방출 시나리오에 따른 지하주차장 내 수소 가연체적비율

4.1.1 자연환기시 수소의 가연체적비율

Fig. 4에는 수소 방출 시나리오(S1~S3)에 따른 자연환기시 시간경과에 따른 지하주차장 내 수소의 가연체적비를 나타내었다. 자연환기시에는 방출시나리오 및 시간에 따른 수소의 농도의 변화가 거의 없는 것으로 나타났으며, 모든 시간대에 수소의 가연체적비율이 99% 이상으로 분석되어 지하주차장 내 수소가 가득 찬 것으로 분석되었다. 이는 수소의 방출량이 상대적으로 급속도로 방출되는 것도 있겠지만, 수소의 물질적인 특성 상 밀도가 매우 작아 공기 중 확산이 매우 빠르기 때문에 유추되며, 더욱이 강제적인 환기가 발생되지 않는 자연환기의 경우 온전히 온도 차이에 의한 기류가 형성되기 때문에 수소의 가연체적비율이 높게 나타난 것으로 분석된다. 특히 지하주차장과 같은 반밀폐공간에서 확산된 수소는 출입구를 제외하고 확산 될 공간이 부족하여 지속적으로 축적되어 연소 뿐 아니라 폭발 등의 사고가 발생할 수 있을 것으로 예상된다.



(a) Volume ratio of V_{FL}

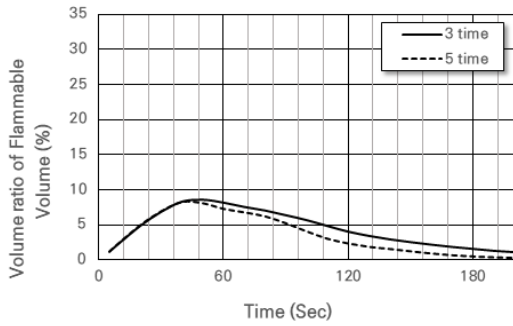
(b) Iso-surfaces at volume ratio of V_{FL}

Fig. 4. Volume ratio of V_{FL} at natural ventilation

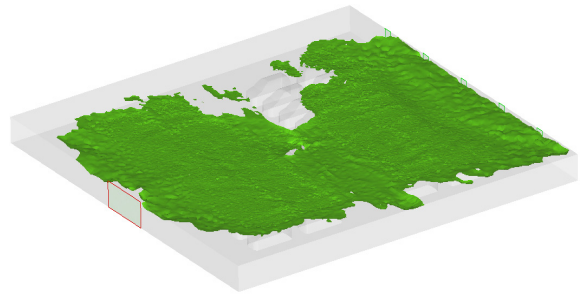
4.1.2 방출 시나리오에 따른 지하주차장에 수소 가연체적 비율

Fig. 5(a)에는 수소 방출 시나리오 1에 따른 환기량 별 수소의 가연체적비를 나타내었다. 환기를 수행함에 따라 지하주차장 내 수소의 가연체적비율이 감소하는 것으로 나타났으며, 환기량에 따른 지하주차장 내 수소의 가연체적비는 Q1 (시간당 3회 환기횟수)인 경우 전체 체적 대비 평균 4.4%로 나타났으며, Q2 (시간당 5회 환기횟수)인 경우에는 전체 체적 대비 3.5%로 나타나 환기량이 증가될수록 방출된 수소가스를 배출하는 것이 상대적으로 용이한 것으로 분석되지만 유의미한 차이는 없는 것으로 분석되었다. 한편, 지하주차장 내 연소가 가능한 수소의 농도가 분포한다는 것은 화재가 발생할 수 있다는 것을 의미함에 따라 분석한 환기량 보다 큰 용량의 환기량이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 5(b)에는 Q1에 따른 가연체적비 중 최대값인 8.6%의 값을 나타내는 시간인 50초에서의 Iso-surfaces를 나타내었다. 이 시간대 이후 지하주차장 내 가연체적비는 지속적으로 감소되며, 수소 방출량의 감소와 지속적인 환기로 인하여 Q1과 Q2 모두 방출 150초 이후에는 1% 미만의 가연체적비를 나타내었다.



(a) Volume ratio of $V_{F,L}$

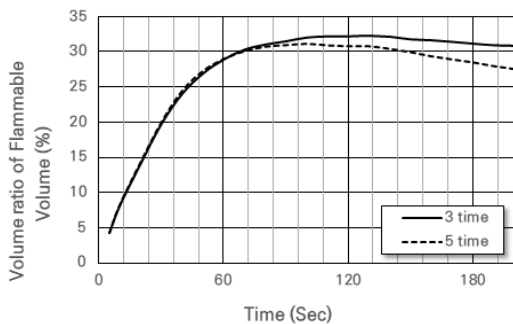


(b) Iso-surfaces of η at 50 sec (condition: Q1)

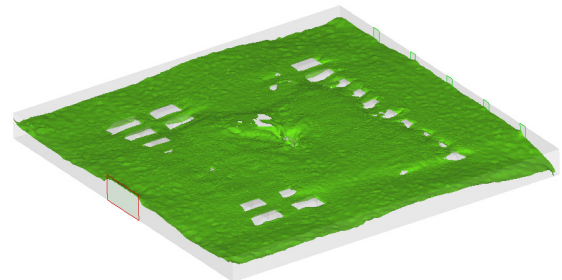
Fig. 5. Volume ratio of $V_{F,L}$ at Scenario 1

Fig. 6(a)와 Fig. 7(a)에는 수소 방출 시나리오 2와 3에 따른 환기량별 가연체적비를 나타내었다. 수소 방출 시나리오 1과 대비하여 누출량이 3배로 증가한 만큼 동일 시간대비 지하주차장 내 분포하는 수소의 가연체적비가 증가하였으며, Q1의 경우 S2과 S3에서 수소의 가연체적비는 각각 평균 27.0%, 25.5%로 나타났고, Q2의 경우 S2와 S3의 방출 시나리오에 따른 수소의 가연체적비는 각각 평균 25.9%, 24.1%로 나타났다. 반면, 수소 방출 시나리오(S1)과 마찬가지로 환기량에 따른 평균 수소 가연체적비의 차이는 존재하지만 유의미한 차이는 없는 것으로 나타났으며, 누출량이 증가된 만큼 실제 누출시 화재 또는 폭발의 위험이 존재할 것으로 분석된다.

Fig. 6(b)와 Fig. 7(b)에는 각 환기량에 따른 가연체적비 중 최대값인 32%의 값을 나타내는 시간인 120초에서의 Iso-surfaces를 나타내었다. 방출 시나리오 1과 비교하여 수소의 방출량이 3배 높아 수소의 가연체적비율이 지속적으로 누적되어 수소의 방출이 모두 종료된 200초 이후에도 환기량의 부족으로 지하주차장 내부에 약 27.5%의 연소가 가능한 수소가 잔존하는 것으로 분석되었다. 만약 수소탱크가 3개 모두 방출된다면 보다 많은 환기량이 확보되어야 할 것을 암시하고 있으며, 이에 대한 대책이 필요한 것으로 분석된다.

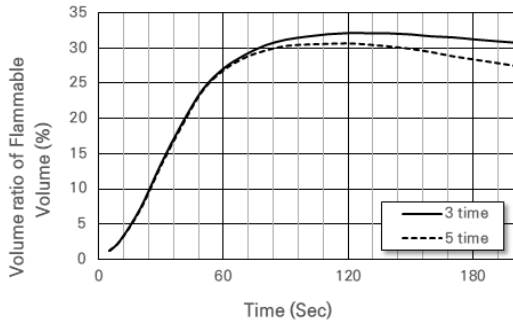


(a) Volume ratio of $V_{F,L}$

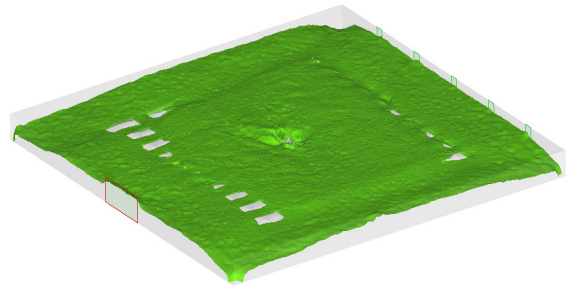


(b) Iso-surfaces of η at 120 sec (condition: Q1)

Fig. 6. Volume ratio of $V_{F,L}$ at Scenario 2



(a) Volume ratio of $V_{F,L}$



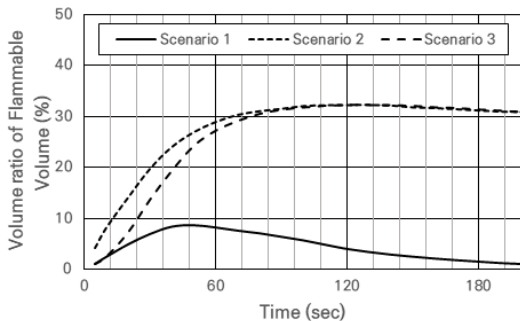
(b) Iso-surfaces of η at 120 sec (condition: Q1)

Fig. 7. Volume ratio of $V_{F,L}$ at Scenario 3

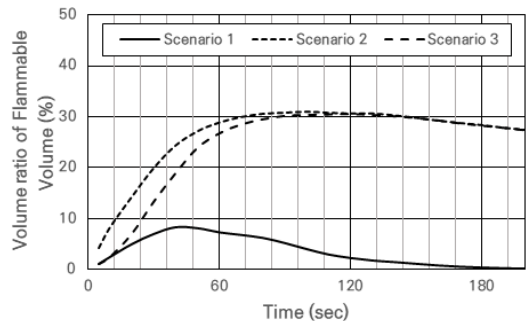
4.2 환기량에 따른 지하주차장 내 수소 가연체적비율

Fig. 8에는 환기량(Q1, Q2)에 따른 지하주차장 내 수소의 가연체적비율을 나타내었다. 시나리오 1 (S1)은 수소 탱크 1개소만 방출되는 상황을 가정한 것이고, 시나리오 2 (S2)와 시나리오 3 (S3)은 수소탱크 3개소가 동시 방출 되지만 동시 방출과 10초간의 간격을 두고 단계적으로 방출되는 상황을 가정하였다. 방출량이 증가된 만큼 S1보다 S2, S3의 수소 가연체적비율이 높은 것으로 나타났다.

S2와 S3의 경우 수소 방출이 단계적으로 이루어지는 약 20초까지 수소의 가연체적비의 확산이 지연되는 것으로 나타나 향후 수소차 수소 방출시 시나리오에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.



(a) Volume ratio of $V_{F,L}$ at Q1



(b) Volume ratio of $V_{F,L}$ at Q2

Fig. 8. Volume ratio of $V_{F,L}$ at Q1 and Q2

5. 결론

본 연구에서는 지하주차장의 수소차량 내 수소 방출시 환기량(시간당 3회의 환기량, 시간당 5회의 환기량)과 방출시나리오(수소탱크 1개 방출, 수소탱크 3개 동시 방출 및 단계방출)에 따른 수소의 가연체적비를 수치해석

으로 분석하여 그 위험정도를 분석하였으며, 이상의 연구를 정리하면 다음과 같다.

1. 수소탱크에서 수소가 방출될 경우 환기가 이루어지지 않는다면 수소의 방출시나리오와 무관하게 모든 영역에 연소가 가능한 수준의 수소가스가 확산되는 것으로 분석되었다.
2. 수소탱크가 1개만 방출 될 경우 지하주차장 내 수소의 가연체적비는 최대 8.6%로 나타났으며, 환기가 지속적으로 이루어짐에 따라 연소가 가능한 수소의 체적비율은 150초 이후 1% 미만으로 감소되는 것으로 분석되어 체계적인 환기가 필수적인 것으로 분석된다.
3. 수소탱크 3개 방출시 동시방출 또는 단계방출의 경우 최종적인 수소의 가연체적비율은 유사하지만 단계적으로 지연 방출함에 따라 방출 초기 수소의 가연체적비율의 증가폭이 낮은 것으로 나타났으며, 이에 따른 수소탱크 방출 시나리오의 추가적인 연구가 필요한 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 소방청의 ESS·수소시설 화재 안전기술 연구개발사업(20011645)의 지원을 받아 작성함.

저자 기여도

이호형은 연구개념 및 원고 작성을 하였고, 김효규는 데이터 해석 및 분석을 하였고, 유지오는 원고검토를 하였고, 김두영은 데이터 수집을 하였다.

References

1. Ahn, H.J., Jung, J.H., Hur, N.K., Lee, H.K., Yong, G.J. (2010), "The numerical simulation of hydrogen diffusion for the hydrogen leakage in tunnel", *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 47-54.
2. Baek, D.S., Kim, H.G., Park, J.Y., Yoo, Y.H. (2021), "Numerical analysis study on the concentration change at hydrogen gas release in semi-closed space", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 23, No. 1, pp. 25-36.
3. Choi, J.R., Hur, N.K., Lee, M.K., Chang, H.J., Lee, K.B., Yong, G.J. (2012), "A numerical analysis of hydrogen diffusion for hydrogen leakage from a fuel cell vehicle in a long road tunnel", *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 23, No. 6, pp. 588-597.
4. Choi, J.W., Li, L.N., Park, C.W., Lee, S.H., Kim, D.J. (2016), "Dispersion characteristics of hydrogen gas by the effect of leakage hole size in enclosure space", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 17, No. 5, pp. 26-35.
5. HyTunnel-CS (2019), Deliverable 1.2 Report on hydrogen hazards and risks in tunnels and similar confined

spaces, pp. 24-26.

6. Hyundai Motor Company, <https://www.hyundai.com/kr/ko/e/vehicles/nexo/spec> (January 27, 2021).
7. Kim, E., Park, J., Cho, J.H., 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, No. 3, pp. 1737-1743.
8. Ministry of Environment (2020), National air pollutant emission trends, National Institute of Environmental Research, pp. 25-47.
9. Ministry of Foreign Affairs, http://www.mofa.go.kr/www/wpge/m_20150/contents.do (January 4, 2021).
10. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2020), Guidelines for fire prevention equipments installation and management in road tunnels, pp. 74-75.
11. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2021), Rules on facility standards, etc. of buildings, Ministry of Land, Infrastructure and Transport Ordinance No. 219.