

# 수치해석을 통한 반밀폐공간 내 수소가스 누출 시 농도변화에 관한 연구

백두산<sup>1\*</sup> · 김효규<sup>2</sup> · 박진욱<sup>3</sup> · 유용호<sup>4</sup>

<sup>1</sup>정회원, (주)주성지앤비 연구원

<sup>2</sup>정회원, (주)주성지앤비 대표이사

<sup>3</sup>정회원, 한국건설기술연구원 전임 연구원

<sup>4</sup>정회원, 한국건설기술연구원 연구위원

## Numerical analysis study on the concentration change at hydrogen gas release in semi-closed space

Doo-San Baek<sup>1\*</sup> · Hyo-Gyu Kim<sup>2</sup> · Jin-Yuk Park<sup>3</sup> · Yong-Ho Yoo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Researcher, Jusung G&B Inc.

<sup>2</sup>CEO, Jusung G&B Inc.

<sup>3</sup>Research Fellow, Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>4</sup>Research Specialist, Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

\*Corresponding Author : Doo-San Baek, dsbaek@gnbeng.com

### Abstract

Hydrogen in hydrogen-electric vehicles has a wide range of combustion and explosion ranges, and is a combustible gas with a very fast flame propagation speed, so it has the risk of leakage, diffusion, ignition, and explosion. The fuel tank has a Thermally active Pressure Relief Device (TPRD) to reduce the risk of explosion and other explosions, and in the event of an accident, hydrogen inside the tank is released outside before an explosion or fire occurs. However, if an accident occurs in a semi-closed space such as an underground parking lot, the flow of air flow is smaller than the open space, which can cause the concentration of hydrogen gas emitted from the TPRD to accumulate above the explosion limit. Therefore, in this study, the leakage rate and concentration of hydrogen over time were analyzed according to the diameter of the nozzle of the TPRD. The diameter of the nozzle was considered to be 1 mm, 2.5 mm and 5 mm, and according to the diameter of the nozzle, the concentration of hydrogen in the underground parking lot increases in a faster time with the diameter of the nozzle, and the maximum value is also analyzed to be larger with the diameter of the nozzle. In underground parking lots where air currents are stagnant, hydrogen concentrations above LFL (Lower Flammability Limit) were analyzed to be distributed around the nozzle, and it was analyzed that they did not exceed UFL (Upper Flammability Limit).

**Keywords:** Semi-closed space, Hydrogen, Leakage, TPRD

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association  
23(1)25-36(2021)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2021.23.1.025>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received December 20, 2020

Revised January 7, 2021

Accepted January 7, 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

온실가스 배출량을 줄이기 위해 내연기관 자동차에 대한 제한을 두고, 친환경자동차 보급 확대 정책을 내놓고 있다. 수소 전기자동차의 수소는 가연 범위 및 폭발 범위가 넓고, 폭발화염 전파속도가 매우 빠른 가연성 가스이기 때문에, 제조, 수송, 저장 시 누출, 확산, 점화 및 폭발 등의 위험성을 가지고 있다. 수소전기자동차의 연료탱크에는 폭발 등 위험성을 감소시키기 위해 온도감응식 압력방출장치(Thermally activate Pressure Relief Device, TPRD)가 있어, 사고가 발생했을 경우 폭발, 화재 등이 발생하기 전에 탱크 내부의 수소를 밖으로 방출한다. 그러나 지하주차장이나 터널과 같은 반밀폐공간에서 사고가 발생할 경우 공간 내 기류의 유동이 개방된 공간보다 미미하기 때문에 TPRD로부터 방출된 수소가스의 농도가 폭발하한계 이상으로 누적될 수 있는 등 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 TPRD의 노즐의 직경에 따라 시간에 따른 수소의 누출 유량을 분석하고, 반밀폐공간에서 수소가 누출될 경우 수소 농도변화를 수치해석으로 검토하였다. 노즐의 직경은 1 mm, 2.5 mm, 5 mm로 검토를 하였으며, 노즐 직경에 따라 지하주차장 내의 수소농도는 노즐의 직경이 클수록 빠른 시간에 농도가 높아지며, 최대값 또한 노즐 직경이 클수록 큰 것으로 분석되었다. 기류가 정체된 지하주차장에서는 노즐 주변에서 폭발하한계 이상의 수소 농도가 분포하는 것으로 분석되었으며, 폭발상한계를 넘지는 않는 것으로 분석되었다.

**주요어:** 반밀폐공간, 수소, 누출, 온도감응식 압력방출장치

## 1. 서론

지구온난화에 따른 사막화, 산불, 이상기후 문제가 전 세계적으로 대두되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 2015년 12월 파리에서 열린 제21차 유엔 기후변화협약은 산업화 이전 수준 대비 지구 평균온도를 2°C 이상 상승하지 않도록 온실가스 배출량을 단계적으로 감축하기로 195개 회원국들이 합의하였다(Ministry of Foreign Affairs, 2021). 이에 따라 국내에서도 기후협약에 따라 온실가스 배출량을 줄이기 위해 내연기관 자동차에 대한 제한을 두고, 친환경자동차 보급 확대 정책을 내놓고 있다. 국내 전기자동차(BEV)와 수소전기자동차(FCEV)의 총 등록대수는 2019년 기준 95,001대로 2018년 56,649대보다 38,352대 증가하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021). 친환경자동차의 차량등록대수가 증가함에 따라 화재 시 위험성도 대두되고 있다. 수소전기자동차의 경우 연료인 수소를 탱크에 압축 저장하기 때문에 단순 저장방식의 기존 내연기관 차량과 특성이 다르다. 또한 수소는 가연 범위 및 폭발 범위가 넓고, 제조, 수송, 저장 시 위험성으로 누출, 확산, 점화 및 폭발이 있다(Choi et al., 2012). 수소전기자동차의 연료탱크에는 폭발 등 위험성을 감소시키기 위해 온도감응식 압력방출장치(Thermally activate Pressure Relief Device, TPRD)가 있어, 사고가 발생했을 경우 폭발, 화재 등이 발생하기 전에 탱크 내부의 수소를 밖으로 방출한다. 그러나 지하주차장이나 터널과 같은 반밀폐공간에서 사고가 발생할 경우 공간 내 기류의 유동이 개방된 공간보다 미미하기 때문에 TPRD로부터 방출된 수소가스의 농도가 폭발하한계 이상으로 누적될 수 있는 등 문제가 발생할 수 있다.

수소전기자동차의 개발 및 보급에 따라 수소전기자동차의 연료탱크에서 수소가 유출되는 경우에 관한 연구도

활발하게 진행되고 있다. Choi et al. (2012)은 반밀폐공간 중 하나인 터널에서 수소가 누출되는 경우 수소의 거동을 확인하기 위하여 수치해석을 하였고, 수소의 가연농도가 존재하는 체적을 비율로 표현하여 환기조건에 따른 위험성을 분석하였다. Kim et al. (2012)은 밀폐된 공간에서 수소전기자동차의 수소 연료가 누출될 때 수소센서 위치에 따른 수소농도측정 실험을 하였다. Ahn et al. (2010)은 밀폐공간과 반밀폐공간에서 노즐의 크기와 누설 유량에 따라 수소가 누출되었을 때 가연농도의 변화를 수치해석으로 연구를 하였다. 하지만 기존의 연구들은 탱크로부터 누출되는 수소의 유량이 시간에 따라 변하지 않고 고정값으로 적용하였으며, TPRD 노즐 직경이 6 mm로 현재 범용적으로 사용되는 TPRD 노즐 직경 1~3 mm 크기보다 큰 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 TPRD의 노즐의 직경에 따라 시간에 따른 수소의 누출 유량을 분석하고, 반밀폐공간에서 수소가 누출될 경우 수소 농도변화를 수치해석으로 검토하였다.

## 2. 해석대상

본 연구의 모델이 되는 반밀폐공간 지하주차장은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 5면이 밀폐되어 있고, 나머지 1면 또한 해당 면의 면적 중 38%만 차량의 출입구로 개방되어 있다. 주차장법 시행규칙에 따라 주차장면의 크기는 너비 16 m, 깊이 12.5 m, 높이 2.3 m로 하였으며, 중앙 통로의 폭은 6 m로 하였다. 주차장 내 주차 중인 차량의 대수는 8대이며, 차량의 크기는 도로터널설계편람 터널편 소형차 크기를 참조하여 너비 4.5 m, 깊이 4.5 m, 높이 1.67 m로 하였고, 바퀴에 의한 차량 하부 공간을 표현하고자, 차량 하부에 0.3 m 높이의 빈 공간을 두었다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2011).

수소차량은 Fig. 1에 붉은색으로 표시하였으며, 제원은 수소전기자동차 제원을 참조하여 수소탱크의 용량은 0.1566 m<sup>3</sup>, 탱크 내부 압력은 70 MPa로 가정하였다(Hyundai Motor Company, 2021). 수소탱크의 TPRD 노즐은 차량 하부에 바닥 방향으로 위치하고 있으며, 노즐의 직경은 해석 종류에 따라 1 mm, 2.5 mm, 5 mm로 하였다.

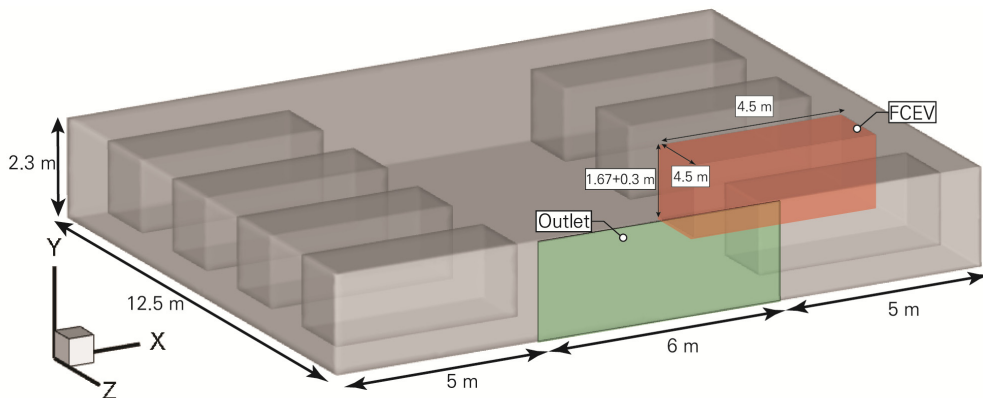


Fig. 1. Schematic diagram

### 3. 경계조건 및 해석방법

노즐 직경에 따른 수소 방출량은 HyTunnel-CS (2019)이 연구한 ‘Adiabatic and isothermal model of blowdown of storage tank dynamics’ 방법을 적용하였다. 위의 방법을 적용하여 0.1566 m<sup>3</sup> 크기의 수소탱크에 70 MPa의 압력으로 충전된 수소가 노즐 직경 1 mm, 2.5 mm, 5 mm에 따라 방출되는 수소의 질량 유량을 Fig. 2와 같이 계산하여 적용하였다. 이때, 노즐을 통해 분출되는 수소가스의 질량분율은 1.0으로 설정하였다.

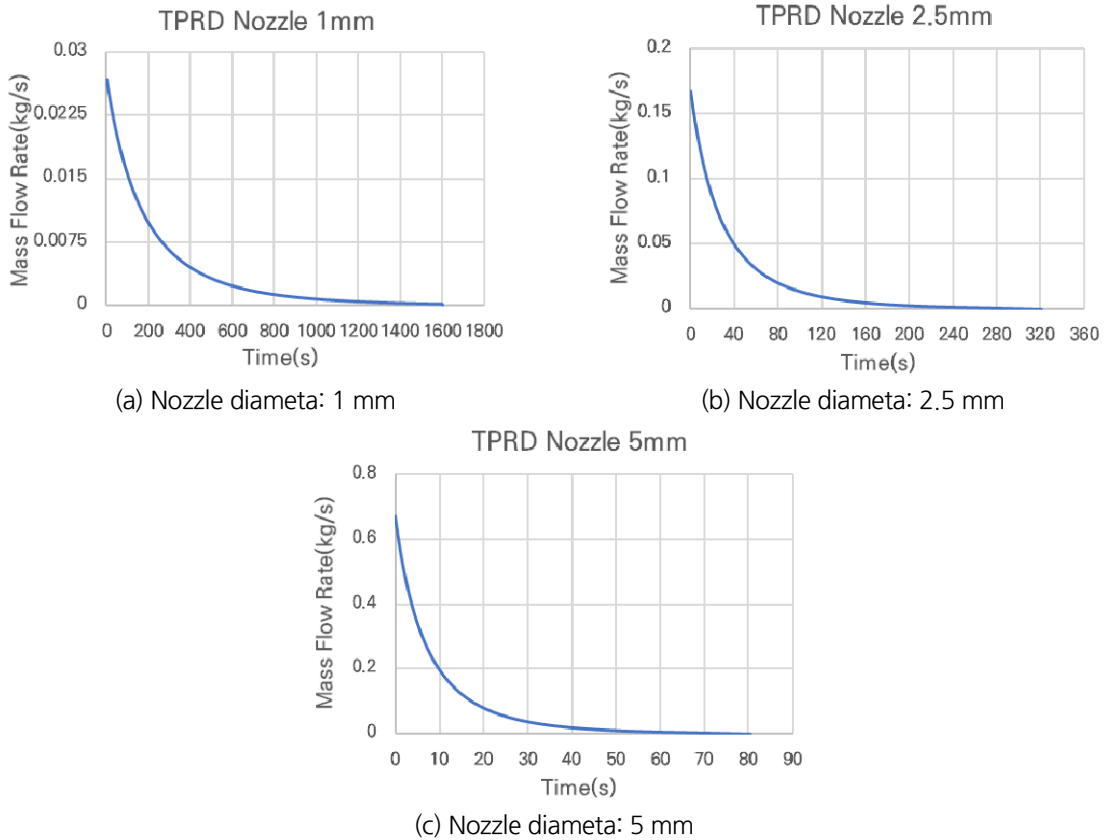


Fig. 2. Mass flow rate according to TPRD nozzle diameter

지하주차장의 입출구부는 Fig. 1에서 초록색으로 표시한 지점으로 대기압조건을 적용하였으며, 나머지 경계면은 모두 비점착조건과 단열조건을 사용하였다. 또한 지하주차장 내부의 공기 유동은 정체되어있는 것으로 가정하고, 온도는 20°C, 기압은 1 atm으로 가정하였다.

비정상 상태의 비압축성 유동에 대한 연속방정식과 운동방정식 그리고 에너지방정식과 수송방정식은 아래의 식(1)~(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

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

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

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

위 식에서,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\vec{u}$ 는 유체의 속도,  $k_{eff}$ 는 유효 열전도율을 나타낸다.  $Y_q$ 는 각 성분에 대한 질량분율을,  $\vec{J}_q$ 는 확산 플럭스를 나타낸다. 난류의 유동을 해석하기 위해 Realizable  $k-\epsilon$  난류모델을 적용하였으며, 속도와 압력을 해석하기 위한 압력-속도장은 SIMPLE 알고리즘을 적용하였다.

해석에 사용한 격자의 수는 해석 종류에 따라 약 150만~200만 개를 사용하였다. 격자의 크기는 Fig. 3에 붉은색 원으로 나타낸 바와 같이 노즐 주변부의 경우 0.0001~0.0003 m로 하였으며, 그 외에는 위치에 따라 약 0.05~0.1 m 간격으로 격자를 형성하였다. 해석프로그램은 OpenFOAM6 기반의 코드를 사용하였다.

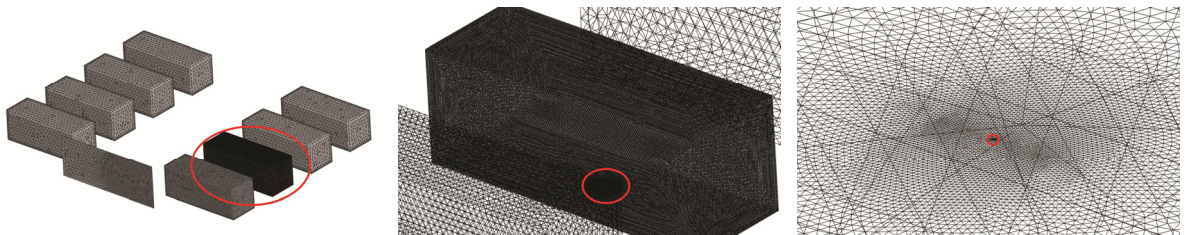


Fig. 3. Mesh generated for numerical analysis

#### 4. 해석 결과

수소의 폭발한계는 하한계 4%, 상한계 74%이다. Choi et al. (2016)은 수소의 폭발 하한계 값을 2%로 설정하여 가연 영역 가시화 연구를 하였는데, 이것은 미국 산업안전규정에서 수소와 성질이 유사한 천연가스의 폭발하한계값을 2.5%로 규정하고 있고, 이러한 방법론을 Zheng et al. (2012)와 Moonis et al. (2010)의 연구에서 수소가스에 적용한 사례를 참고하여 적용하였다. 따라서 본 연구에서도 Choi et al. (2016)의 선행연구를 참고하여 폭발 하한계 값을 2%로 설정하였다.

Fig. 4는 TPRD 노즐 직경 1 mm일 때 시간에 따른 지하주차장 내 평균 수소 농도를 나타내었으며, Fig. 5는 같은 해석 Case에서 지하주차장 중간 높이( $y = 1.15$  m)의 수소농도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 4의 결과에서 볼 수 있듯이 노즐 개방 이후 수소가 방출되어, 지하주차장 내 평균 수소 농도는 37초 후 폭발 하한계값인 2%를 초과하고, 172초 후 최댓값인 3.75%가 된다. 이후 농도는 서서히 감소하며, 611초에 폭발 하한계값 미만으로 수소 농도가 감소하는 것으로 나타나고 있다.

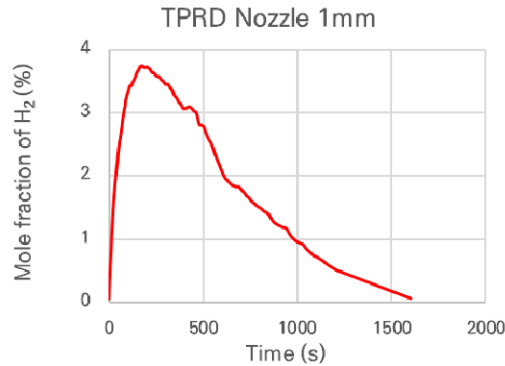


Fig. 4. Mole fraction of H<sub>2</sub> of nozzle size 1 mm

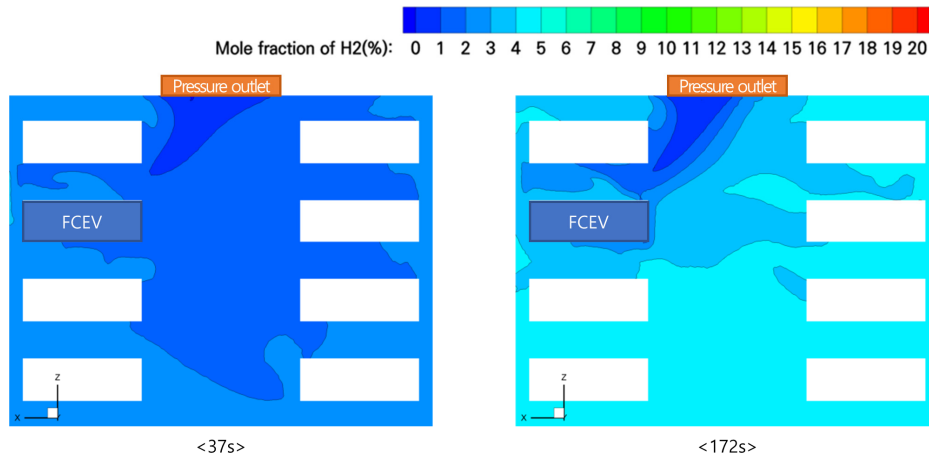


Fig. 5. Hydrogen concentration distribution of cross-section ( $y = 1.15$  m)

이러한 농도분포는 Fig. 5에서도 볼 수 있다. 수소탱크로부터 방출되는 수소가스는 37초 후 지하주차장 전체로 확산하여 2~3%의 농도로 분포하고, 172초 후에는 2~4%의 농도로 분포하는 것으로 분석되었다. 지하주차장 출입구 경계면 주변은 0~1%의 농도분포를 띄어 출입구를 통해 수소가스가 지하주차장 외부로 방출되는 것으로 분석된다. 그러나 방출되는 수소가스보다 지하주차장 내부에 누적되는 수소가스의 양이 많아 농도상승이 발생하는

것으로 분석된다.

수소탱크 노즐 주변의 수소 농도는 Fig. 6과 같다. 노즐 주변 수소의 농도는 37초일 때 차량 하부에서 4% 이상의 농도 분포를 보이며, 172초에서는 차량 하부에서 5% 이상이고 인접 차량에서도 4% 이상의 농도 분포를 나타내고 있다.

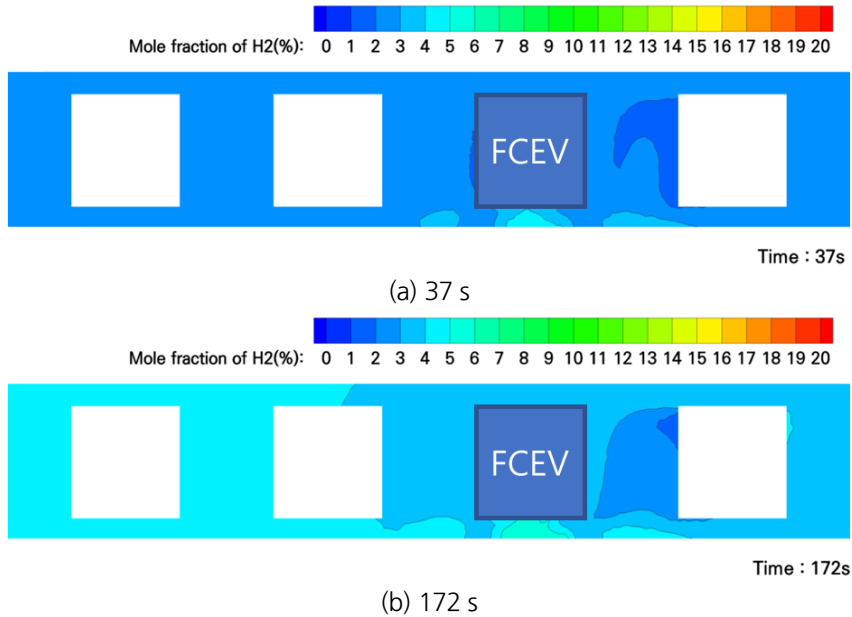


Fig. 6. Hydrogen concentration distribution around nozzles ( $d = 1 \text{ mm}$ )

Fig. 7은 TPRD 노즐 직경 2.5 mm일 때 시간에 따른 지하주차장 내 평균 수소 농도를 나타내었으며, Fig. 8은 같은 해석 Case에서 지하주차장 중간 높이( $y = 1.15 \text{ m}$ )의 수소농도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 7의 결과에서 볼 수 있듯이 노즐 개방 이후 급격하게 수소가 방출되어, 지하주차장 내 평균 수소 농도는 5.1초 후 폭발 하한계값인 2%를 초과하고, 96초 후 최댓값인 6.7%가 된다. 해석 종료 시점인 탱크 내부와 외부의 압력차가  $1 \times 10^{-5}$  이하가 되는 시간인 321.2초까지 평균 수소 농도는 폭발하한계 미만으로 감소하지 않는 것으로 분석되었다. 이러한 농도 분포는 Fig. 8에서도 볼 수 있다. 수소탱크로부터 방출되는 수소가스는 5.1초 후 지하주차장 전체로 확산하여 2~3%의 농도로 분포하고, 96초 후에는 10~12%의 농도로 분포하는 것으로 분석되었다. 수소가스는 벽면을 타고 확산하는으로 분석되며, 출입구의 영향으로 중간지점보다 수소차량 반대편 주차구역의 농도가 높게 분포하는 것으로 분석되었다.

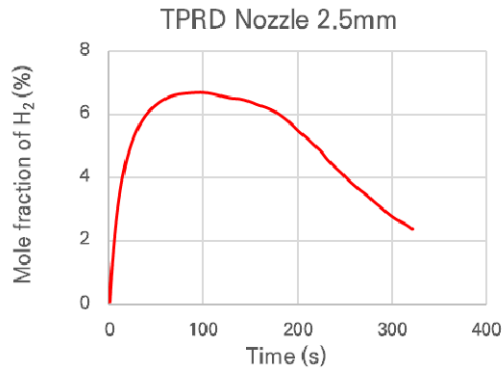


Fig. 7. Mole fraction of H<sub>2</sub> of nozzle size 2.5 mm

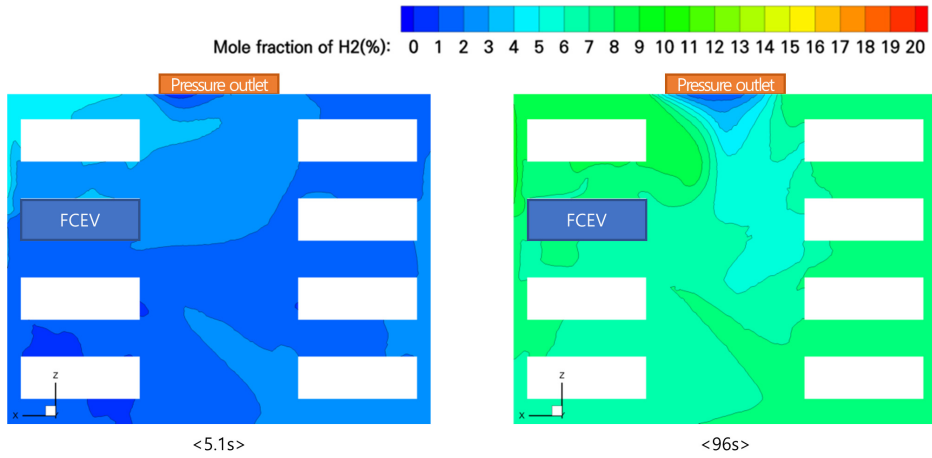


Fig. 8. Hydrogen concentration distribution of cross-section ( $y = 1.15$  m)

노즐 주변 수소의 농도는 Fig. 9에 나타낸바와 같이 5.2초일 때 차량 하부에서 4% 이상의 농도 분포를 보이고 있으며, 96초에서는 차량 하부에서 10% 이상, 인접 차량에서도 6% 이상의 농도 분포를 나타나고 있다.

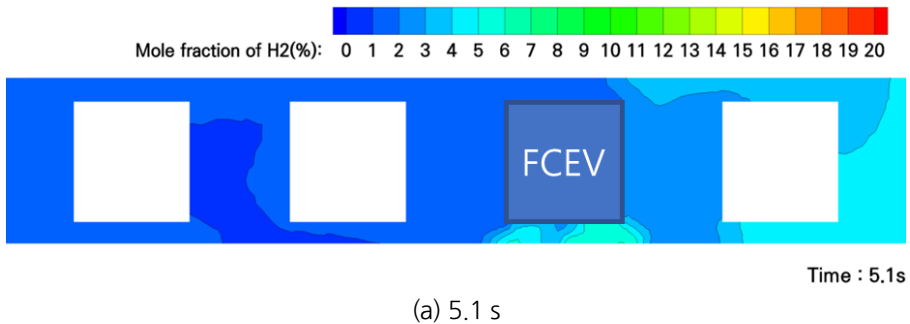


Fig. 9. Hydrogen concentration distribution around nozzles ( $d = 2.5$  mm)



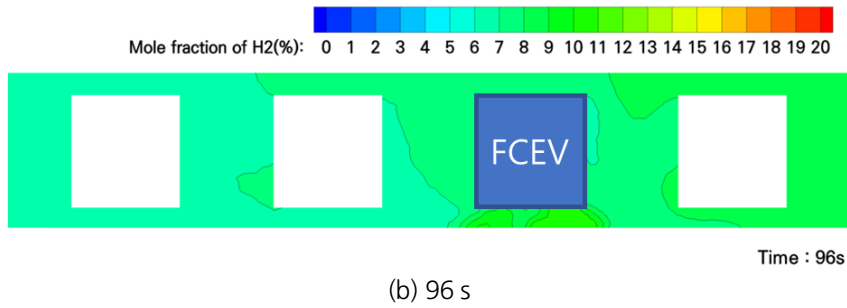


Fig. 9. Hydrogen concentration distribution around nozzles (d = 2.5 mm) (continued)

Fig. 10은 TPRD 노즐 직경 2.5 mm일 때 시간에 따른 지하주차장 내 평균 수소 농도를 나타내었으며, Fig. 11은 같은 해석 Case에서 지하주차장 중간 높이( $y = 1.15$  m)의 수소농도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 10의 결과에서 볼 수 있듯이 노즐 개방 이후 급격하게 수소가 방출되어, 지하주차장 내 평균 수소 농도는 1.1초 후 폭발 하한계값인 2%를 초과하고, 35.3초 후 최댓값인 9.8%가 된다. 해석 종료 시점인 탱크 내부와 외부의 압력차가  $1 \times 10^{-5}$  이하가 되는 시간인 80.3초까지 폭발하한계 미만으로 감소하지 않는 것으로 분석되었다. 이러한 농도분포는 Fig. 11에서도 볼 수 있다. 수소탱크로부터 방출되는 수소가스는 1.1초 후 지하주차장 전체로 확산하여 2~3%의 농도로 분포하고, 96초 후에는 10~12%의 농도로 분포하는 것으로 분석되었다. 수소가스는 벽면을 타고 확산하는 것으로 분석되며, 출입구의 영향으로 중간지점보다 수소차량 반대편 주차구역의 농도가 높게 분포하는 것으로 분석되었다.

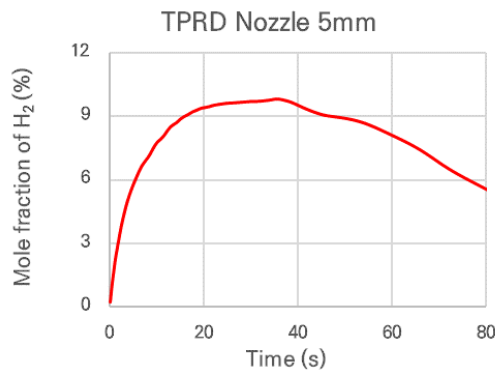


Fig. 10. Mole fraction of H<sub>2</sub> of nozzle size 5 mm

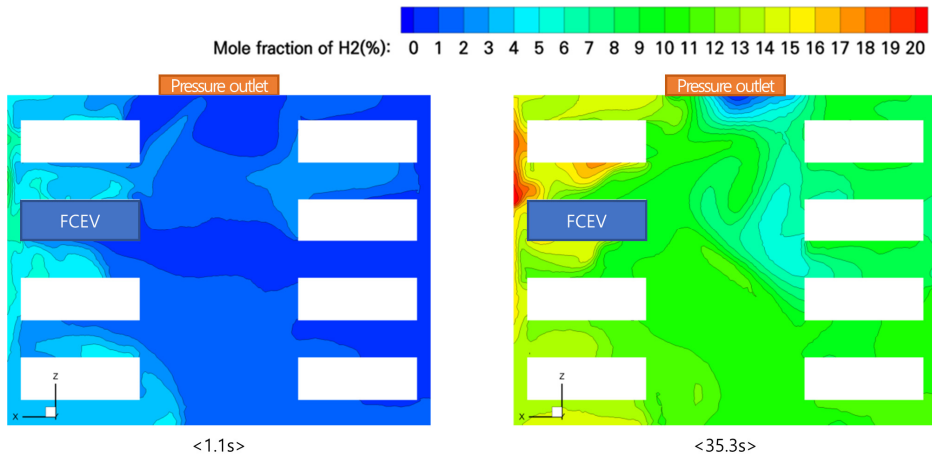


Fig. 11. Hydrogen concentration distribution of cross-section ( $y = 1.15 \text{ m}$ )

노즐 주변 수소의 농도는 Fig. 12에 나타낸바와 같이 1.1초일 때 차량 하부에서 4% 이상의 농도 분포를 보이고 있으며, 96초에서는 차량 하부에서 10% 이상, 인접 차량에서도 6% 이상의 농도 분포를 나타나고 있다.

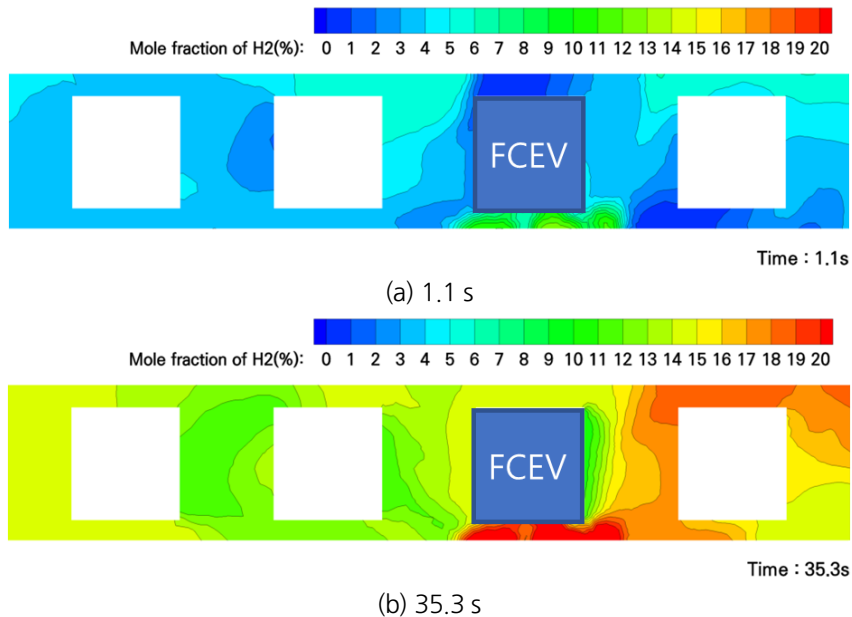


Fig. 12. Hydrogen concentration distribution around nozzles ( $d = 5 \text{ mm}$ )

해석 결과 지하주차장 내의 수소 농도는 노즐의 직경이 클수록 더 빠른 시간 내에 농도가 높아지며, 최댓값 또한 노즐 직경이 클수록 높은 것으로 분석된다. 또한 노즐 주변에서 폭발 하한계(2%) 이상의 수소 농도가 분포하

는 것으로 분석되었으며, 폭발 상한계는 넘지는 않는 것으로 분석되었다. 따라서, 노즐 주변에서는 폭발 하한계 이상의 수소 농도가 분포하는 것으로 분석되었기 때문에, 수소전기자동차의 인접 차량 화재 시 온도 상승에 따른 수소가스의 발화에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 분석된다.

## 5. 결론

수소는 부력이 큰 기체이기 때문에 개방된 공간에서는 대기 중으로 확산이 급속하게 이루어져 농도가 낮아지기 때문에 화재나 폭발의 위험성이 작은 것으로 알려져있다. 지하주차장과 같은 반밀폐공간은 밀폐된 공간과 유사한 공간적 특성을 가지고 있기 때문에 수소가 누출될 경우 가연성 구름이 형성되고 폭연 또는 폭발이 발생할 수 있다. 따라서 3차원 수치해석을 통해 지하주차장 내 수소가스 누출 시 수소농도를 분석하였고, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. TPRD 노즐 직경이 1 mm, 2.5 mm, 5 mm인 경우에 대하여 수소가스 누출 해석을 수행하였으며, 노즐 직경에 따라 지하주차장 내의 수소농도는 노즐의 직경이 클수록 빠른 시간에 농도가 높아지며, 최대값 또한 노즐 직경이 클수록 큰 것으로 분석되었다.
2. 기류가 정체된 지하주차장에서는 노즐 주변에서 폭발하한계(2%) 이상의 수소 농도가 분포하는 것으로 분석되었으며, 폭발상한계를 넘지 않는 것으로 분석되었다.
3. 노즐의 크기와 관계없이 노즐 주변에서는 폭발하한계 이상의 수소 농도가 분포하는 것으로 분석되었기 때문에, 인접차량 화재 시 온도 상승에 따른 수소가스의 발화에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 분석된다.

## 감사의 글

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

## 저자 기여도

백두산은 원고작성 및 데이터 해석을 하였으며, 김효규는 데이터 수집 및 분석을 하였고, 박진욱은 원고 검토를 하였고, 유용호는 연구 개념 및 설계를 하였다.

## References

1. Ahn, H.J., Jung, J.H., Hur, N.K., Lee, M.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. 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.
3. Choi, J.W., Lee, 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.
4. HyTunnel-CS (2019), Deliverable 1.2 Report on hydrogen hazards and risks in tunnels and similar confined spaces, pp. 24-26.
5. Hyundai Motor Company, <https://www.hyundai.com/kr/ko/e/vehicles/nexo/spec> (January 27, 2021).
6. Kim, H.K., Choi, Y.M., Kim, S.H., Shim, J.H., Hwang, I.C. (2012), “The evaluation of hydrogen leakage safety for the high pressure hydrogen system of fuel cell vehicle”, Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 23, No. 4, pp. 316-322.
7. Ministry of Foreign Affairs, [http://www.mofa.go.kr/www/wpge/m\\_20150/contents.do](http://www.mofa.go.kr/www/wpge/m_20150/contents.do) (January 4, 2021).
8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2011), Road design manual (617. ventilation), pp. 617-14.
9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, <http://stat.molit.go.kr/portal/cate/statView.do?hRsId=58> (January 4, 2021).
10. Moonis, M., Wilday, A.J., Wardman, M.J. (2010), “Semi-quantitative risk assessment of commercial scale supply chain of hydrogen fuel and implications for industry and society”, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 88, No. 2, pp. 97-108.
11. Zheng, J., Bie, H.Y., Xu, P., Liu, P., Zhao, Y.Z., Chen, H.G., Liu, X., Zhao, L. (2012), “Numerical simulation of high-pressure hydrogen jet flames during bonfire test”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37, No. 1, pp. 783-790.