

도로 터널 내 수소 제트 화염에 대한 CFD 해석 연구

박진욱^{1*} · 유용호² · 김휘성³

¹정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 전임연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 연구위원

³비회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 주임지원직

CFD analysis of the effect of hydrogen jet flame in road tunnel

Jinouk Park^{1*} · Yongho Yoo² · Hwiseong Kim³

¹Research Specialist, Fire Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Research Fellow, Fire Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

³Assistant Technician, Fire Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*Corresponding Author : Jinouk Park, jopark@kict.re.kr

Abstract

Domestic eco-friendly vehicles currently account for 5.8% of the total registered vehicles in Korea. Hydrogen vehicles, one of the representative eco-friendly vehicles, have grown rapidly as they have been expanded to the market based on the government's policy to boost the hydrogen industry. Therefore, it is time to expand the safety review of hydrogen vehicles in various directions according to the increase in supply. In this study, the effect of internal heat damage was analyzed when a jet flame was generated by a hydrogen car in a road tunnel. It was simulated using Fluent, and the amount of jet flame injection was selected in consideration of the hydrogen tank capacity of commercial hydrogen vehicles for road tunnels. In addition, the study was conducted with the direction of the jet flame and the nozzle distance from the tunnel wall as variables. From the results, when the jet flame erupted in the road tunnel, high radiant heat emission of more than 20 kW/m² was generated in most areas within ±5 m in the longitudinal direction based on the vehicle (spray nozzle) and 5 to 7 m in the lateral direction based on the adjacent tunnel wall.

Keywords: Fuel cell electric vehicle (FCEV), Hydrogen jet fire, Road tunnel, Semi-closed space

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
24(6)629-636(2022)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.6.629>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received November 11, 2022

Revised November 21, 2022

Accepted November 24, 2022



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 © 2022, Korean Tunnelling and Underground Space Association

www.kci.go.kr

초 록

국내의 친환경차는 현재 국내 총 등록차량 중 5.8% 비중을 차지하고 있으며, 대표적 친환경 차량 중 하나인 수소차는 정부의 수소 산업 부양 정책을 근간으로 시장에 보급 확대되어 현재 26,719대의 보급량을 기록하며 초년 대비 300배로 성장했다. 따라서, 보급 증가에 따른 수소차에 대한 안전성 검토 및 확보가 다방면에서 확대되어야 하는 시점이다. 본 연구에서는 수소차가 통행하는 반밀폐 공간 중 하나인 도로터널에서 수소차에 의한 제트화염 발생시 내부의 열 피해 영향에 대해 분석하였다. 상용코드인 Fluent를 사용하여 시뮬레이션하였으며, 마제형 터널을 대상으로 상용 수소차의 수소탱크 용량을 고려하여 제트 화염 분사량을 선정하였다. 또한, 제트화염의 방향 및 터널 벽면과의 거리 등을 변수로 하여 연구를 수행하였다. 그 결과로부터 도로 터널 내 제트화염 분출시 방향에 따라 일부 차이가 있으나 차량(분사 노즐) 기준 중 방향으로 ± 5 m, 인접한 터널 벽면 기준 횡방향 5~7 m 이내에서는 대부분의 구역에서 20 kW/m^2 이상의 높은 복사열 방사가 발생되었다.

주요어: 수소차, 수소 제트 화염, 도로 터널, 반밀폐 공간

1. 서론

국내에서의 친환경차 보급은 2014년도 전기차를 시작으로 본격적으로 이뤄졌으며, 현재까지 매년 증가하여 국내 총 등록차량 중 5.8% 비중을 차지하고 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2022). 전기차를 비롯하여 대표적인 친환경 차량 중 하나인 수소차는 2050 탄소 중립 실현을 위한 수소 산업 부양 정책을 기반하여 2016년 87대의 보급량에서 2022년까지 약 300배 증가하여 26,719대로 보급 확대된 상황이다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2022). 정부에서 발표한 ‘제4차 친환경자동차 기본 계획’ 및 ‘국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안’에 따라 2030년까지 수소차 보급은 더욱더 급격하게 늘어날 것으로 예상된다(Republic of Korea Government, 2021a; 2021b).

수소차는 수소를 연료로 사용하여 동력을 얻는 구동 방식으로, 사용 연료인 수소가 가지는 물성으로 인해 화재 및 폭발에 대한 위험이 내재되어 있다(Park et al., 2021). 수소차에 의한 위험은 누출로부터 발생할 수 있는 수소는 폭발(VCE, Vapor Cloud Explosion)과 제트기류 및 제트화염, 비 누출 시 외부 화재나 충격에 의한 수소 탱크 폭발 등으로 구분할 수 있으며, 이러한 위험은 개방 공간에 비해 환경에 따라 수소의 확산을 억제하고 담아둘 수 있는 도로터널이나 지하주차장과 같은 반밀폐공간에서 더욱더 가중된다. 따라서, 개방공간에서의 위험과는 구분하여 반밀폐 공간에서 발생하는 수소차 사고로부터 이어질 수 있는 위험을 사고 유형에 따른 인명 및 구조물에 대한 피해 영향을 분석하고 이에 대한 안전 확보 대책을 마련해야 할 것이다(Ryu and Lee, 2021).

본 연구에서는 수소차가 통행하는 대표적 반밀폐 공간인 도로터널에서 수소차에 의한 제트화염 발생시 내부의 열 피해 영향에 대해 분석하기 위해 수치해석을 통한 시뮬레이션을 수행하였으며, 제트화염의 방향 및 터널 벽면과의 거리 등을 변수로 하여 검토하였다. 일반적인 터널 단면적과 상용 수소차의 수소탱크 용량을 고려하여 제트 화염 분사량을 선정하여 해석을 수행하였다.

2. 수치해석 대상 및 모델링

Table 1과 같은 도로터널에서 수소차에 의해 발생하는 제트화염의 열 피해 영향을 분석하기 위해 세 가지 조건을 선정하였다. 일반적인 도로 터널로 간주 할 수 있는 72 m² 내공 단면적의 마제형 터널 형상을 대상으로 하였으며, 연장은 노즐을 기준으로 전후방 50 m씩 총 100 m 길이로 설계하였다. 시나리오는 내부 충·추돌 사고로 수소 차량이 전복되어 TPRD (Thermally- Activated Pressure Relief Device) 노즐이 벽면을 향할 때(Case 1, 2)와 내부 충·추돌 또는 자체 고장이나 외부 열원으로부터 가열되어 차량이 지면에 정방향으로 있는 상태에서 TPRD 노즐이 아래로 향할 때(Case 3) 발생하는 제트 화염에 의한 차량 주변 및 터널 내부 열 영향을 해석하였다.

Table 1. Analysis conditions based on hydrogen car accident scenarios in road tunnel

Case	Distance between tunnel wall and nozzle (m)	Nozzle direction of TPRD	Note
1	2	Tunnel wall (side direction)	Nozzle height : 1.345 m from ground
2	4	Tunnel wall (side direction)	
3	-	Ground (downward direction)	Distance between tunnel wall and car : 2 m Nozzle height : 0.42 m from ground

제트 화염을 만들어 내는 수소의 분사 조건은 시중에 판매되고 있는 수소차 제원과 동일하게 52 L 용량의 수소 탱크에서 700 bar의 압력으로 1.8 mm 직경의 노즐을 통해 방출하였으며, 입구 조건은 대기압 조건 및 온도 20°C로 설정했다. 또한, 주어진 조건의 고압탱크 및 노즐로부터 분출되는 수소 기체의 유량을 산정하기 위해 미국 Sandia National Laboratory에서 제공하는 오픈소스 소프트웨어인 HyRAM+를 사용하여 시간에 따른 유량 조건 계산하여 Fig. 1에 나타냈으며, 이 결과를 TPRD 노즐 입구의 질량 유량 profiles로 적용하였다. 해석은 상용코드

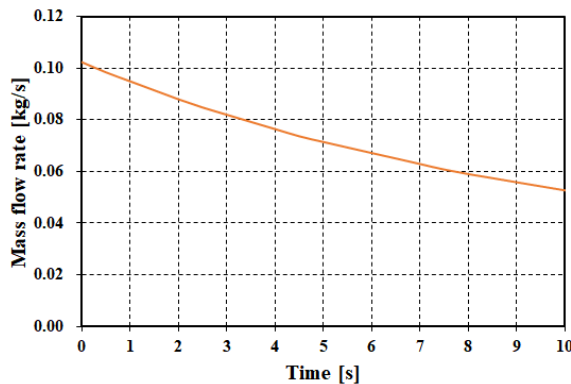


Fig. 1. Mass flow rate of hydrogen released from hydrogen tank during jet flame

인 Fluent ver. 2021 R2를 사용하였으며, SST $k-\omega$ 난류모델, 제트화염 연소 해석을 위한 화학종 계산은 Species Transport Equation을 이용하였다. 제트화염으로 인한 복사열전달을 고려하기 위해 Discrete Ordinates (DO) 모델을 사용하였으며, 시간에 따른 변화를 보기위해 Transient로 수렴성을 고려하여 0.001 s time step으로 10,000 번 해석하여 총 10 s 동안의 해석 결과를 도출하였다.

3. 도로터널 내 제트화염 CFD 해석에 대한 고찰

3.1 터널 내 차량 전복에 의한 벽면을 향한 제트화염

Fig. 2의 Case 1과 2에서는 터널 내 충돌·추돌에 의한 차량 전복시 발생될 수 있는 벽면으로의 제트화염 분출을 모사하였으며, 차량에 장착된 TPRD 노즐과 벽면 사이의 거리를 2 m와 4 m로 달리하여 해석하였다. Fig. 3에는 제트 화염에 의해 형성되는 터널 내부 온도분포로 나타냈다. Case 1의 횡단면 결과를 보면 제트 화염이 발생됨과

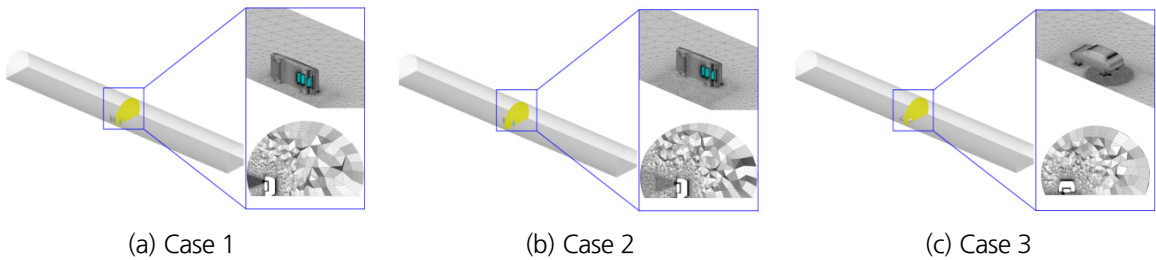


Fig. 2. CFD geometry according to analysis case

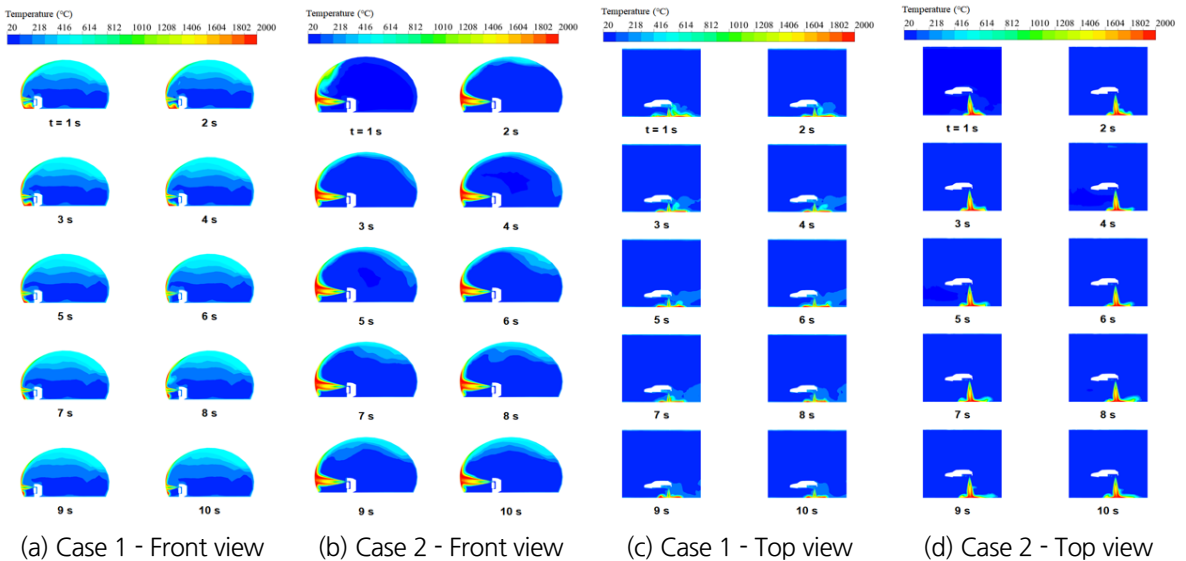


Fig. 3. Temperature distribution by Jet flame from TPRD nozzle of FCEV in road tunnel (Case 1, 2)

동시에 터널 벽면의 굴곡을 타고 전파되어 상단으로는 천장을 타고 반대편 벽면까지 확장되며 온도는 약 400°C 정도로 감소한다. 반면에 Fig. 3(a)의 벽면과 차량사이의 온도 분포를 보면 상단으로 빠져나가지 못한 기류가 전복되어 있는 차량에 막혀 화염이 응집되면서 1,800°C 이상의 높은 온도가 5초가량 유지되다가 양쪽 종방향과 횡방향의 상단으로 분산되어 흘러나간다. 상대적으로 벽면과의 거리가 먼 Case 2의 결과를 보면 제트 화염의 기류가 보다 더 안정적으로 형성되며 더 높은 온도로 연소하게 되나 벽면을 타고 확산되는 고온의 영향은 상대적으로 낮은 범위로 나타났다.

제트 화염 발생시 내부에 위치한 재실자나 사고 수습을 위해 출동한 소방대에 대한 피해 영향을 분석하기 위해 각 지점별로 형성되는 복사열 분포를 검토하였다. 내부 공간에 대한 구별을 위해 Fig. 4와 같이 차량에 설치된 TPRD 노즐을 기준으로 수평 1 m 간격으로 좌표를 분류하였으며, 좌표별 시간에 따른 복사열 변화를 관찰 하였다. Fig. 5(a)에는 전복된 차량의 1 m 앞에서의 복사열 분포를 도시하였다. 두 경우 모두 노즐이 위치한 차량 뒤쪽에 가까울수록 높은 복사열이 형성되고 있으나, Case 2에 비해 Case 1에서 현저히 높은 결과가 발생했다. 그리고 Case 1에서는 제트화염 발생 시점에 최대값이 발생하고 시간에 따라 감소하는 경향이 나타나는 반면, Case 2에서는 발생시점에 최소값이 형성되고 보다 완만한 기울기로 증가하는 양상을 보인다. 이 결과는 이격 거리에 기인한 것으로 Case 1의 경우 제트 화염이 벽면에 부딪힌 후 횡방향 하단으로 흐르는 열 기류가 인접해있는 차량에 막혀 응집되었으나, Case 2에서는 그러한 현상이 없는 것으로 분석 된다.

Fig. 5(b)에는 전복된 차량의 전·후방에서 받는 복사열 영향을 도시하였다. 선도는 전술한 결과와 동일한 경향이 나타나고 있으나, 두 경우의 결과에서 차량 전방에서의 열적 피해 영향이 비교적 낮게 나타나고 있다. 특히, 이격 거리가 2 m로 아주 인접한 경우인 Case 1에서는 차량 뒤에서 받는 복사열이 앞 쪽에 비해 약 5배 이상 발생되는 것으로 분석된다. 이러한 결과는 복사열이 내부에 미치는 최대 범위 분포를 나타낸 Fig. 6에서도 확인할 수 있다. 두 경우 모두 노즐이 위치한 차량 후방으로 높은 복사열 분포가 나타나고 있으며, Case 2에 비해 Case 1에서 넓은 범위의 위험 지역이 형성되는 것으로 분석 되고 있다.

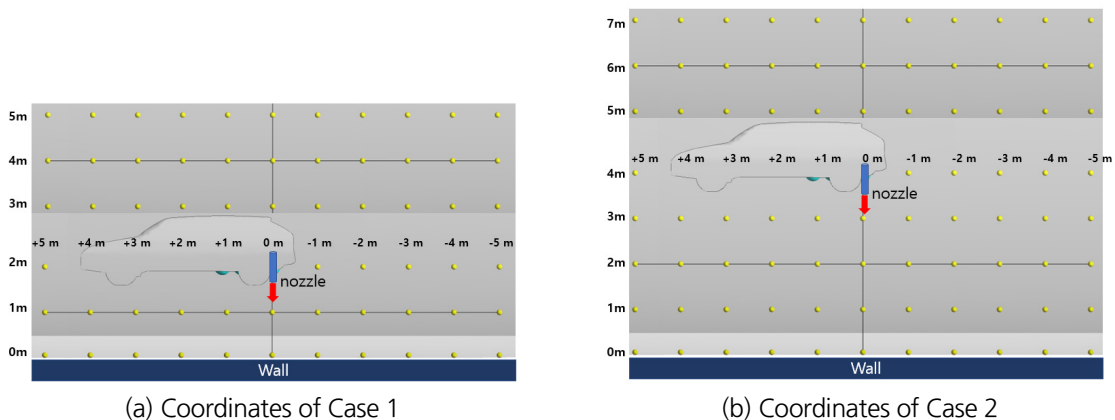


Fig. 4. Coordinates relative to the position of the jet flame

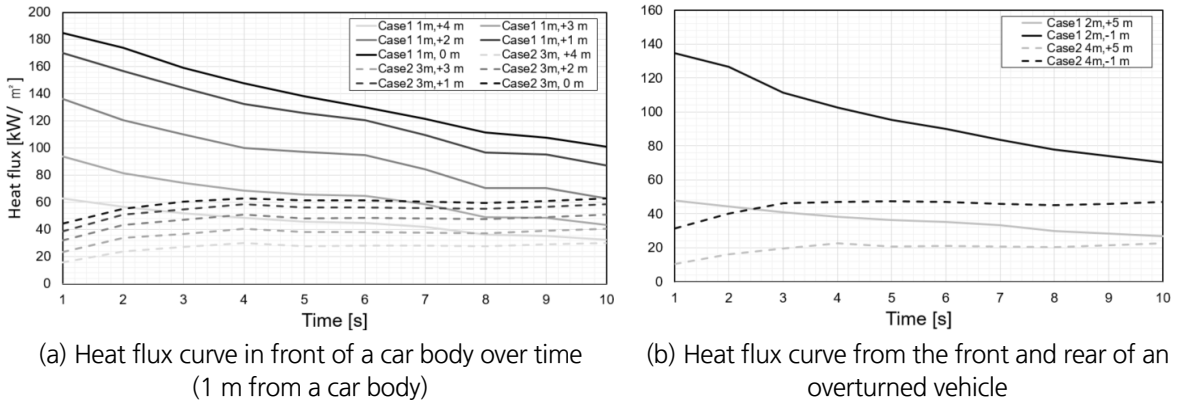


Fig. 5. Comparison of heat flux results at a specific point according to distance between wall and car

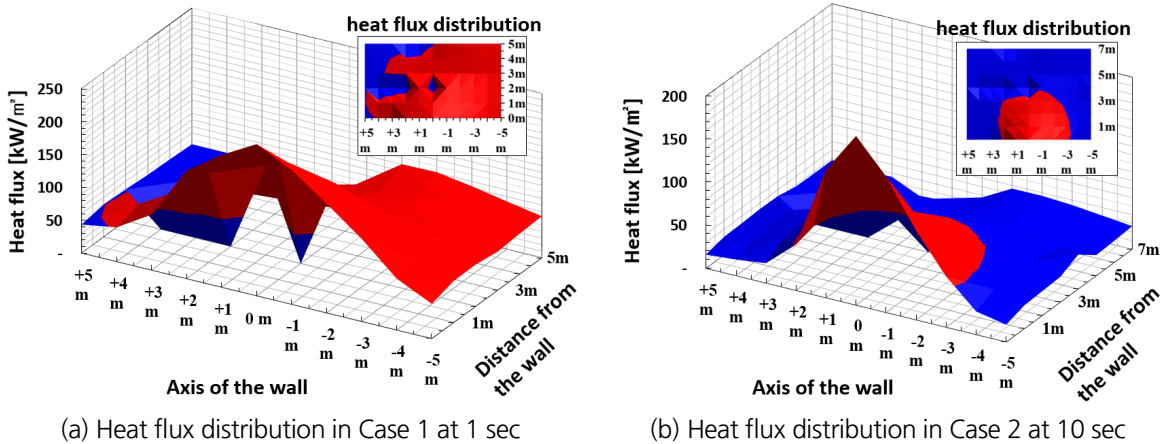


Fig. 6. The maximum influence range of the heat flux generated by the jet flame

3.2 정차 차량에 의한 지면을 향한 제트화염

본 절에는 정차 차량에 의해 발생하는 지면을 향한 제트화염의 영향을 분석하였다. Fig. 7(a)와 7(b)에는 시간에 따라 형성되는 제트화염에 의한 열 기류를 온도 분포로 나타냈다. 횡단면 결과를 보면 제트 화염이 발생되어 차량 하단으로부터 양쪽으로 분산되어 나온 열 기류가 좌측으로는 터널 벽면을 타고 반대편으로 넘어가며, 동시에 우측으로 나온 열 기류는 부력에 의해 상승한 후 좌측에서 넘어온 기류와 만나 천장부를 타고 흐르게 된다. 종 단면 결과를 보면 이 경우에도 차량 뒤 쪽으로 대부분의 열 기류가 형성되고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 7(c)를 보면 차량 상단으로 복사열이 집중되는 것을 볼 수 있는데, 이러한 결과는 차량의 높이가 0.42 m로 지면과 상당히 인접해 있기 때문에 분출된 제트 화염의 기류에 방해물로 작용하는 것으로 관찰되며, 간섭에 의해 기류 속도가 감소하고 열 부력의 영향력이 상대적으로 커져 천장부로 열 기류가 집중되는 것으로 분석 된다.

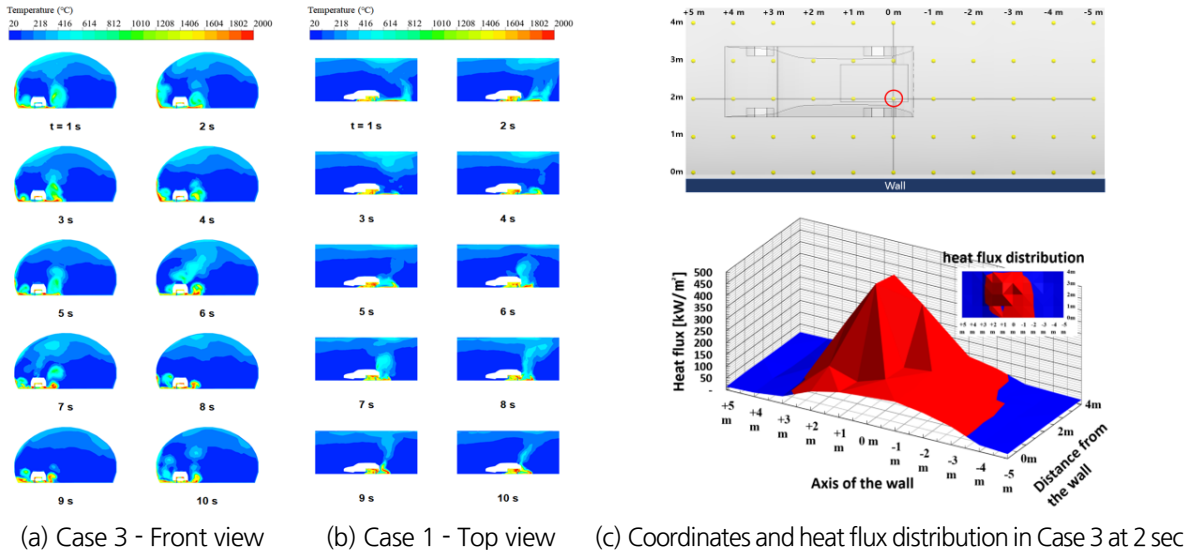


Fig. 7. Temperature and heat flux distribution generated by the jet flame in Case 3

4. 결론

본 연구에서는 도로터널에서 수소차에 의한 제트화염 발생시 내부 영향에 대해 분석하기 위해 700 bar의 52 L 용량의 수소 탱크에 설치된 1.8 mm 직경의 TPRD 노즐에서 시간당 분사되는 수소의 질량 유량을 반영하여 수치 해석을 수행하였으며, 제트화염의 방향 및 터널 벽면과의 거리 등에 대한 영향을 검토하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 벽면이 굴곡진 마제형의 도로터널에서 수소차 전복에 의해 벽면을 향한 수소 제트화염이 발생할 경우 벽면으로부터 차량의 거리가 가까울수록 터널 내부로의 열 기류 확산은 더 빠르고 넓게 발생되었으며, 차량과 벽면 사이의 온도는 급격히 상승했다. 그리고 거리가 1/2배가 되면 복사열은 약 3배로 증가하였다.
2. 또한, 차량 부근의 복사열은 수소 탱크 위치로 인해 차량의 뒷바퀴에 더 집중 되어 복사열 영향이 크게 나타났으며, 차량(노즐)이 벽면에 근접할수록 차량의 전·후방의 복사열 차이는 최대 5배 이상 발생됐다.
3. 도로 터널 내 제트화염 분출시 방향에 따라 일부 차이가 있으나 차량(분사 노즐) 기준 종 방향으로 ±5 m 이내, 인접한 터널 벽면 기준 횡방향으로 5~7 m 이내에서는 대부분의 구역에서 20 kW/m² 이상의 복사열 방사가 형성되었으며, 복사열이 순간적으로 집중되는 차량 상부에서는 최대 450 kW/m²까지 나타났다.

감사의 글

본 논문은 소방청의 ESS수소시설 화재 안전기술 연구개발사업(20011645)의 지원을 받아 작성함.

저자 기여도

박진욱은 CFD 설계 및 수행, 원고 작성을 하였고, 유용호는 연구 개념 수립 및 원고 검토를 하였고, 김휘성은 데이터 분석을 하였다.

References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022), Statistical data on eco-friendly vehicle registration trends, pp. 1-2.
2. Park, J., Yoo, Y., Kim, H. (2021), “Analysis of effect of hydrogen jet fire on tunnel structure”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 23, No. 6, pp. 535-547.
3. Republic of Korea Government (2021a), 2030 national greenhouse gas reduction target (nationally determined contribution) enhanced draft, pp. 8-11.
4. Republic of Korea Government (2021b), The 4th master plan for eco-friendly vehicles, pp. 19-59.
5. Ryu, J.O., Lee, H.Y. (2021), “A basic study on the hazard of hydrogen fuel cell vehicles in road tunnels”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 23, No. 1, pp. 47-60.