Research Paper

수소 제트화염이 터널 구조체에 미치는 영향 분석

박진욱[1*] · 유용호[2] · 김휘성[3]

[1]정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 전임연구원
[2]정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 연구위원
[3]비회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 주임지원직

Analysis of effect of hydrogen jet fire on tunnel structure

Jinouk Park[1*] · Yongho Yoo[2] · Whiseong Kim[3]

[1]Research Specialist, Fire Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology
[2]Research Fellow, Fire Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology
[3]Assistant Technician, Fire Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

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

Abstract

A policy to expand the hydrogen economy has been established in Korea and the supply of FCEV is being expanded to realize a hydrogen society. Therefore, the supply of FCEV is expected to increase rapidly, and a solution to respond to accidents of FCEV is required. In this study, an experimental study was conducted to analyze the effect of the hydrogen jet flame generated by a FCEV on the inner wall of the tunnel and the characteristics of the internal radiant heat. For the experiment, the initial pressure of hydrogen tank was set to 700 bar, and the injection nozzle diameter was set to 1.8 mm in order to make the same as the conditions generated in the FCEV. In addition, a tunnel fire resistance test specimen having the same strength as the compressive strength of concrete applied to general tunnels of 40 MPa was manufactured and used in the experiment. The results were analyzed for the separation distance (2 m and 4 m) between the hydrogen release nozzle and the tunnel fire resistance test concrete. As the result, the maximum internal temperature of the test concrete was measured to 1,349.9°C (2 m separation distance), and the radiant heat around the jet flame was up to 39.16 kW/m^2.

Keywords: Tunnel, Fuel cell electric vehicle (FCEV), Hydrogen jet fire, Tunnel structure

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
23(6)535-547(2021)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2021.23.6.535

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received October 22, 2021
Revised November 18, 2021
Accepted November 19, 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

국내에서는 수소경제 활성화 정책을 수립하고 수소사회 실현을 위해 수소 인프라 및 수소차 보급 확대를 계획 하고 있다. 이에 따라 수소차의 보급이 급속도로 이루어질 것으로 예상되며, 동시에 수소차의 사고에 대응하기 위한 대책의 확립이 요구되고 있다. 본 연구에서는 수소차에 의해서 발생되는 수소 제트화염이 터널 내부 벽체에 미치는 영향과 내부 복사열 특성 분석을 위해 실험적 연구를 수행하였다. 실험은 수소차에서 발생되는 조건과 동일하게 하기 위해 분사압력을 700 bar로 설정하고, 분사노즐 직경은 1.8 mm로 설정하였다. 또한, 일반 터널에 적용되고 있는 콘크리트 압축강도 40 MPa의 터널 내화 시험체를 제작하고 제트화염 분사노즐과 시험체간의 이격거리에 따른 영향을 검토하였다. 분사노즐과 터널 내화시험체의 이격거리를 변수로 하여 2 m와 4 m에 대해 결과를 분석하였다. 그 결과로부터 시험체 내부 최대 온도는 1,349.9°C (이격거리 2 m)가 측정되었고, 제트화염 주위 복사열은 최대 39.16 kW/m^{2}까지 나타났다.

주요어: 터널, 수소자동차, 수소 제트화염, 터널 구조물

1. 서 론

수소는 새로운 친환경에너지의 시대를 여는 신생에너지원으로 각광받고 있으나 탄소연료에 비해 아직 활용도가 낮고, 기본적으로 수소가 가지고 있는 위험성이 내재되어 있어 수소를 기반으로한 산업분야에 대한 안전성 확보가 시급한 실정이다. 국내에서는 「수소경제 활성화 로드맵(2019)」을 수립하고 수소사회 실현을 추진하고 있으며, 대표적으로 수소차 620만대를 2040년까지 보급하는 것을 계획하고 있다. 이에 따라 향후, 수소차의 보급이 급속도로 이루어질 것으로 예상되며, 수소차의 사고에 대응하기 위한 대책의 확립이 요구되고 있다(Ryu and Lee, 2021). 이러한 수소차의 사고에 대한 염려는 터널을 포함한 지하주차장 등 여러가지 건축물 및 생활공간과 연결되며, 이에 대한 안전 확보에 대한 연구가 활발히 수행되어야 한다.

터널과 같은 반밀폐공간에서의 수소차 사고로 인해 수소가 누출 되었을 때에 제대로 환기가 되지 않으면 연소하한 이상으로 농도가 올라가 매우 위험한 상태가 된다(Sohn and Hahn, 1998). 특히 수소는 가연범위가 4~75%로 타 연료에 비해서 넓고, 점화에너지가 매우 작기 때문에 화재나 폭발로 인한 위험이 매우 높을 것으로 예측된다. 이러한 폭발 위험을 없애기 위해 수소차에 적용된 수소용기에는 TPRD (Thermally-activated Pressure Relief Device)가 설치되어 있다. 이 장치는 일정 압력이나 온도에 도달하면 폭발을 방지하기 위해 밸브가 열려 외부로 수소를 고압 방출하게 된다. 이 때, 수소 제트화염이 발생될 수 있으며, 이로 인해 타차량으로의 화재 확대, 구조물 손상, 재실자 및 소방인력에 대한 2차 사고 등을 야기할 수 있는 위험을 내재하고 있다.

본 연구에서는 터널에서 발생될 수 있는 수소 제트화염에 대한 위험성을 분석하기 위해 터널 내화시험체와 제트화염 주위 복사열 측정을 통한 실험적 연구를 수행하였다. 이 결과로부터 수소 제트화염이 터널 내부 벽체에 미치는 영향과 내부에 형성되는 복사열 특성을 규명하였다.

2. 제트 화염 실험방법

본 실험에서는 반밀폐공간 내 수소차 제트화염 모사를 위해 고압수소탱크(용량 600 L)에 일반 수소차 충전조건과 동일한 압력 700 bar로 충진한 후 직경 1.8 mm의 노즐을 통해 일정 간격으로 이격되어 있는 터널 내화시험체를 향해 분사시켰으며, 이 때 분사노즐과 터널 내화시험체 주변에 형성되는 열 분포 및 제트화염 형상 그리고 구조체가 받는 영향 등을 분석하였다. 고압 가스에 의해 유도되는 제트화염에 대한 내화대책에 대해 ISO 22899-1에서 시험법을 규정(ISO 22899-1, 2021)하고 있으나 본 연구에서는 기존 터널의 구조체에 대한 수소제트화염 영향을 분석하기 위한 목적으로 독자적인 실험방법을 수립하여 실험을 진행하였다.

Table 1은 실험조건을 요약해서 나타내며 실험변수를 분사노즐과 터널내화 시험체의 이격거리로하여, 2 m와 4 m의 경우에 대해 현상을 파악하였다. 각 실험은 고압 수소탱크로부터 수소가 분사되기 전 분사노즐 직 후단에 설치되어 있는 점화장치에 화원을 점화한 후 수소 분사시작과 동시에 제트화염이 발생되게 하였으며, 제트화염이 분사되는 동안 열유속계(시험체 주변) 및 열전대(터널 내화 시험체 내부), 일반카메라와 열화상카메라 등을

Table 1. Test conditions for hydrogen jet release

Case	Initial tank pressure (bar)	Diameter of nozzle (mm)	Distance between the nozzle and test concrete (m)
1	700	1.8	2
2	700	1.8	4

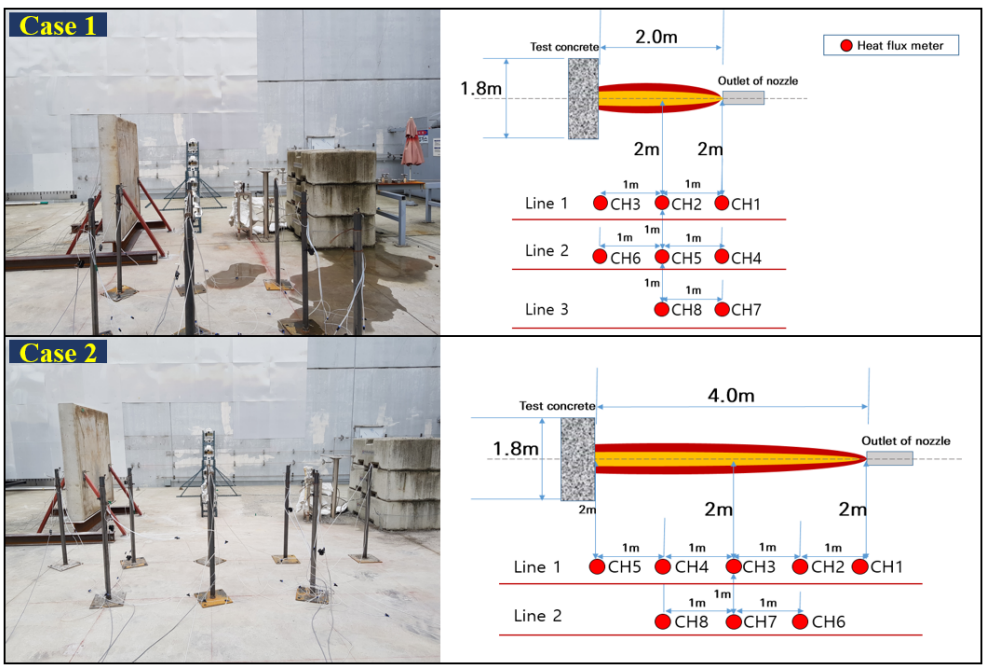
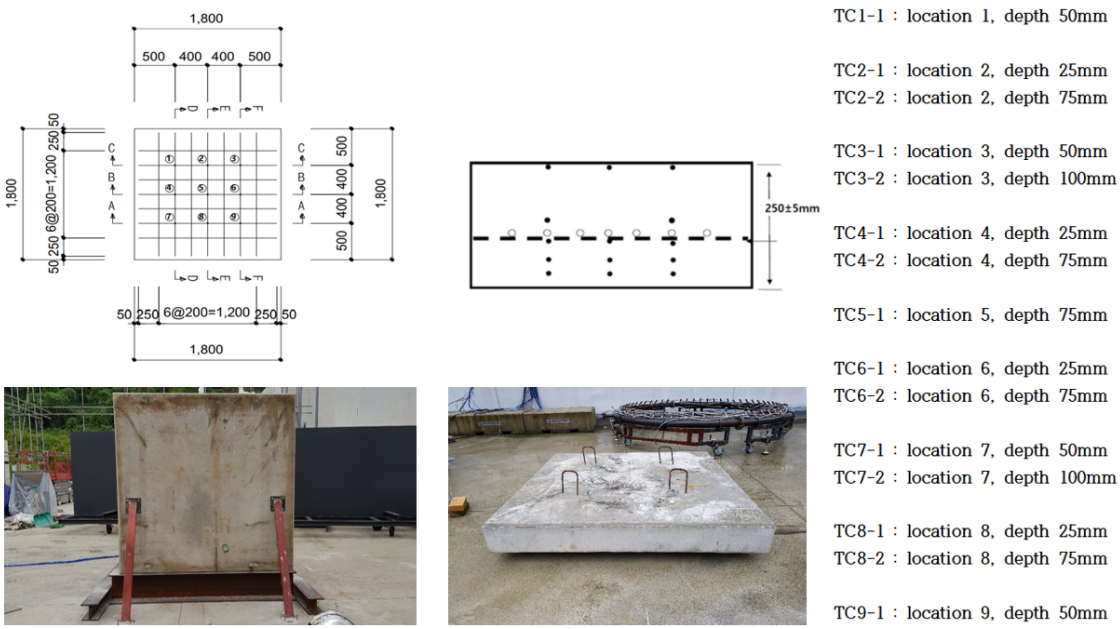


Fig. 1. Experimental set up for each case

이용하여 데이터를 측정하였다.

제트화염 주위의 복사열 영향을 보기 위해 열유속계는 Fig. 1과 같이 총 8곳에 설치하였으며, 보유한 열유속계 수량의 한계로 인해 이격거리가 달라지는 각 Case의 조건에 맞게 위치를 재배열하였다. Case 1의 경우, 노즐 중심선(제트 화염 중심선)으로부터 수직으로 2 m 이격된 곳에 CH1을 위치시킨 후 그 지점을 기준으로 수평, 수직 방향으로 1 m간격 3열 3행(단, 3열은 2행)의 형태로 배치하였다. Case 2는 Case 1과 같은 기준점 및 간격으로 2열 5행(단, 2열은 3행) 형태로 배치하였으며, 두 개의 Case 모두 설치 높이를 지면으로부터 1.2 m (분사 노즐 높이와 동일)로 하였다. 데이터 측정은 G사의 L모델 데이터로거를 사용하였으며, 초당 5개의 데이터를 기록하였다.

실험에 사용한 터널 내화시험체는 「도로터널 내화 지침(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021)」에 명시된 시험체 제작 기준을 준용하여 제작하였다. 다만, 본 실험에서는 내화설계 적용이 되지 않은 일반 터널 콘크리트 벽체의 영향을 분석하기 위해 시험체에 내화처리(뿜칠, 내화재 부착, 자체내화 등 내화공법)는 하지 않았다. Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 시험체의 화염노출면적은 1,800 mm × 1,800 mm이며, 두께는 250 mm이다. 제트화염을 맞는 터널 내화시험체의 내부온도 측정을 위한 열전대는 Fig. 2와 같이 시험체의 중심으로부터 수평/수직 방향으로 400 mm간격으로 총 9개 지점에 총 15개가 매입이 되었다. 매입 깊이 별로 보면, 가열표면으로부터 25 ± 2 mm 위치(2, 4, 6, 8)에 4개, 50 ± 2 mm의 위치(1, 3, 7, 9)에 4개, 철근 밑면 75 ± 2 mm 위치(2, 4, 5, 6, 8)에 5개, 100 ± 2 mm의 위치(3, 7)에 2개의 열전대가 배치되었다. 데이터 측정은 Y사의 M모델 데이터로거를 사용하였으며, 초당 1개의 데이터를 기록하였다.



(a) Floor plan (b) Cross section

Fig. 2. Test concrete for fire resistance on tunnel

터널 내화 시험체는 일반적으로 터널 건축시 사용되는 설계강도 40 MPa (철근 13 mm, 항복강도 400 MPa)로 설계되었으며 Table 2에서 나타낸 바와 같이 실제 제작된 실험체에서의 강도는 38.7 MPa로 측정되었다.

Table 2. Compressive strength of test concrete

Design compressive strength (MPa)	Compressive strength (MPa)			
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	
	39.5	37.5	39.1	
40				Average : 38.7

실험시 발생되는 제트화염의 형상은 일반 카메라와 열화상카메라를 노즐중심부의 수직방향으로 약 15 m 거리에 설치하여 촬영하였다. 선행 연구에 의하면 수소 제트화염은 완전연소 상태이기 때문에 육안으로 관측이 어려운 것으로 보고되고 있으나, 실험체의 손상 정도를 파악하기 위해 본 실험에서는 일반 촬영도 같이 진행하였다. Fig. 3에는 실험시 사용된 영상 및 복사열 측정 장비 일체를 나타내었다.

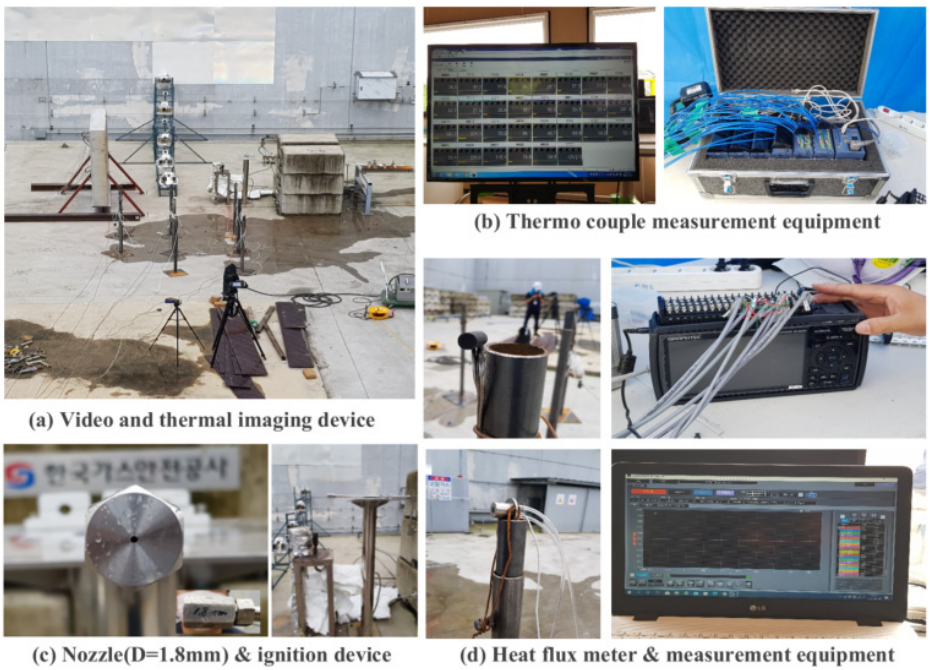


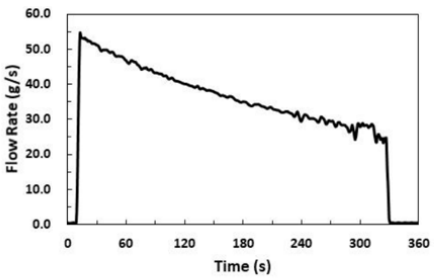
Fig. 3. Imaging and radiant heat measuring equipment for hydrogen jet flame

3. 반밀폐공간 내 제트화염 영향 분석 결과

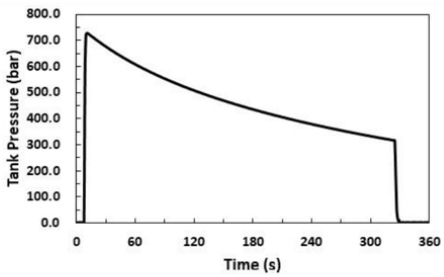
실험은 고압수소용기에 수소를 충진 후 분사를 시작하여 내부 압력이 약 300 bar까지 감압 되는 시점까지 수행하였으며, 각 Case별로 실제 분사된 누적 수소 분출량과 압력을 Fig. 4에 나타냈다.

Case 1은 320초 동안 수소를 분사하였으며, 총 11.735 kg의 수소가 탱크로부터 방출되었다. 이 값과 수소의 발열량(120 MJ/kg)을 이용하여 화재하중을 구하면 1,404 MJ로 산출된다. 분사압력은 초기 729 bar에서 330.15 bar까지 하강한 후 종료되었다.

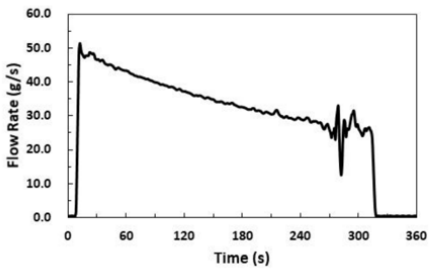
Case 2는 310초 동안 수소를 분사하였으며, 총 분출량 9.735 kg의 수소가 탱크로부터 나갔다. Case 1과 동일한 방법으로 화재하중을 구하면 1,092 MJ로 산출된다. 분사압력은 초기 640.89 bar에서 300.12 bar까지 하강한 후 종료되었다. 실험기관에서 보유한 설비의 성능 한계로 Case 1과 2사이에 초기 압력이 약 80 bar정도의 차이를 보였으며, 이로 인해 터널 내화 시험체에 가해진 화재 하중도 약 300 MJ 정도가 상이하게 나타났다. 또한, 수행된 모든 Case에서 일반적으로 수소차에 탑재되는 수소용기 용량(52.2 L (2.02 kg) × 3개)에 비해 현저히 많은 양의 수소가 방출되었으며, 이로 인해 일반 사고 상황보다 상당히 가혹한 조건임을 고려하여 현상을 해석할 필요가 있다.



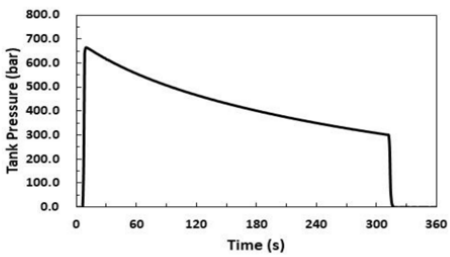
(a) Case 1, flow rate of hydrogen jet release (total weight of hydrogen jet release : 11.735kg, jet release time : 320 sec, fire road : 1,404MJ)



(b) Case 1, pressure of hydrogen tank : 729.17~330.15 bar



(c) Case 2, flow rate of hydrogen jet release (total weight of hydrogen jet release : 9.735kg, jet release time : 310 sec, fire road : 1,092MJ)



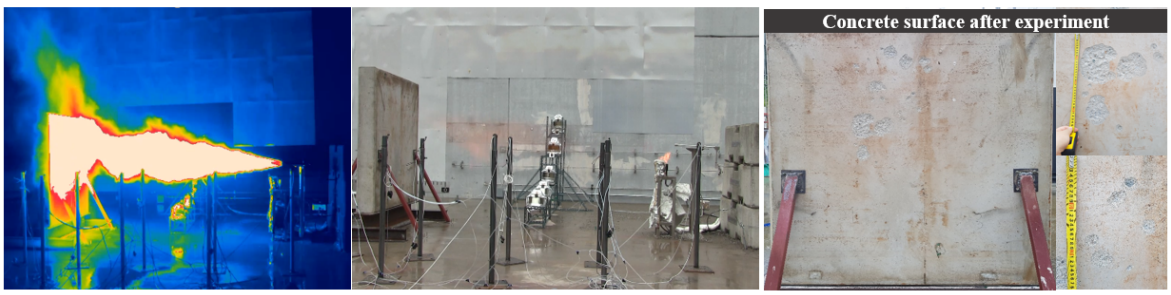
(d) Case 2, pressure of hydrogen tank : 640.89~300.12 bar

Fig. 4. Flow rate and tank pressure for hydrogen jet release

Fig. 5에는 실험시 발생된 제트화염 형상을 Case별로 나타내었다. Case 1은 제트화염이 분사되어 터널 내화 시험체의 정 중앙을 가격하게 되며, 분사된 후 약 10초 후부터 터널 내화 시험체의 손상에 의한 파편의 비산이 노즐 방향으로 발생되기 시작하여 40초가 경과된 시점부터 더욱 격렬해져 실험이 종료되는 320초 시점까지 지속된다. Case 2의 경우에는 제트화염이 분사되면 늘어난 이격거리 때문에 실험체의 중앙부 상단을 가격하게 되며, Case 1과는 달리 분사시작 150초 이 후 부터 상대적으로 미량의 파편이 비산되는 것을 확인할 수 있다.

실험 후 터널 내화 시험체의 손상도를 보면 Case 1은 수소 제트화염을 맞은 전면부 표면의 전반적인 부분에서 심한 손상이 확인되며 최대 깊이 7 cm까지 콘크리트가 박리되어 매립된 철근과 열전대가 부분적으로 노출되었다. 반면에 Case 2의 경우에는 직경 1~15 cm 크기의 원형 손상이 제트 화염이 직접적으로 충돌한 중앙 상단부에서만 국부적으로 나타나고 있으며, 콘크리트의 박리는 전반적으로 깊이 1 cm 미만으로 발생된 것을 확인할 수 있다.

(a) Case 1 (Distance between the nozzle and test concrete : 2 m)



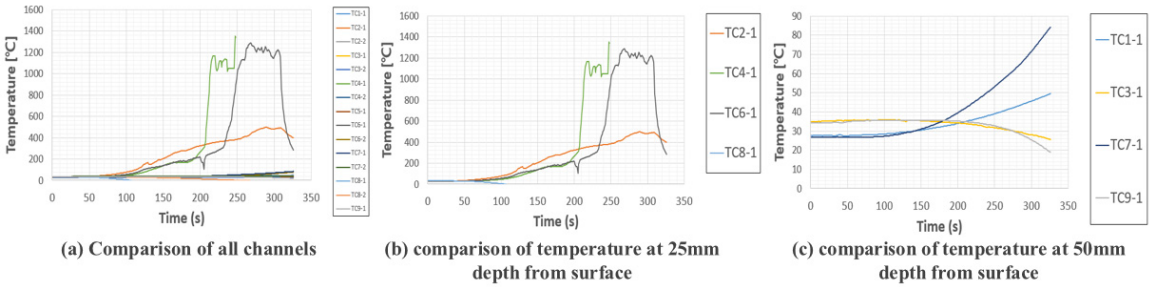
(b) Case 2 (Distance between the nozzle and test concrete : 4 m)

Fig. 5. Jet flame shape for each case and test concrete surface after experiment

3.1 수소 제트화염에 의한 터널 구조물 영향 분석

터널에서 발생될 수 있는 수소제트화염에 의한 구조물 영향 분석을 위해 터널 내화 시험체가 받는 내부 온도 변화를 측정하였다. Fig. 6에 도시한 Case 1의 터널 내화 시험체 내부의 온도변화를 보면 표면으로부터 깊이 25 mm에 설치된 열전대(TC2-1, TC4-1, TC6-1, TC8-1)에서 확연하게 온도가 상승하는 것을 볼 수 있으며, 최대 온도는 좌측 중간에 위치한 TC4-1에서 1,349.9°C가 발생되었다. 반면에 깊이가 50 mm에 설치된 열전대에서는 전반적으로 낮은 온도분포가 나타나고 있으며, 최대 온도 85°C가 발생되었다. 이러한 결과는 콘크리트 부재의 표면

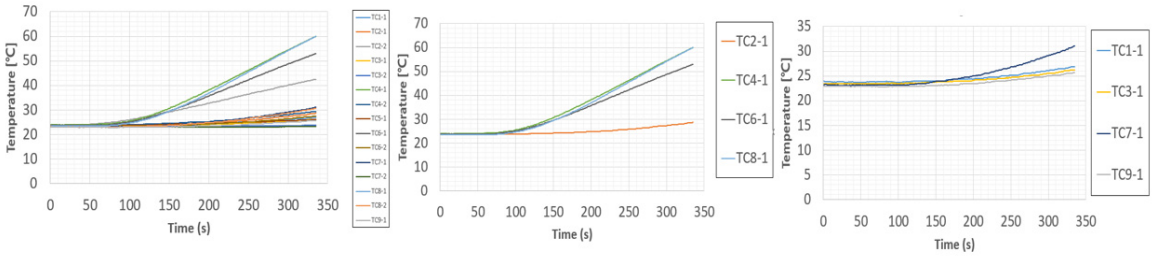
기준으로 한계온도를 380°C 이내로 규정하고 있는 「도로터널 내화 지침(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021)」의 기준을 초과하는 것으로 나타났다.



(a) Comparison of all channels (b) comparison of temperature at 25mm depth from surface (c) comparison of temperature at 50mm depth from surface

Fig. 6. Changes in the internal temperature of the test concrete due to jet flame (Case 1)

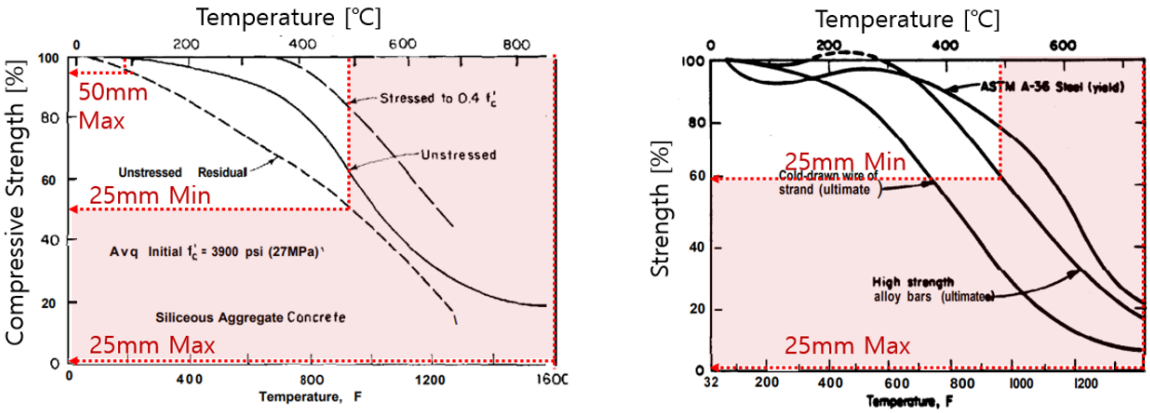
Fig. 7에 나타낸 Case 2의 결과를 보면 Case 1과는 확연한 차이를 보이고 있다. 열전대를 설치한 15곳에 전반적으로 70°C 이하의 낮은 온도를 보이고 있으며, 도로터널 내화지침의 기준 범위를 만족하고 있어 손상이 거의 없는 것으로 판단할 수 있다.



(a) Comparison of all channels (b) comparison of temperature at 25mm depth from surface (c) comparison of temperature at 50mm depth from surface

Fig. 7. Changes in the internal temperature of the test concrete due to jet flame (Case 2)

Fig. 8에는 터널 내화 시험체 내부 온도 상승에 따른 콘크리트 및 강의 강도 잔존율을 확인하였다. ACI 216 (ACI 216, 1998)에서 보고하고 있는 부재 강도 변화 선도를 이용하여 터널 내화 시험체 내부 깊이 25 mm와 50 mm에서의 온도 상승에 따른 감소된 강도 잔존율을 추정해 볼 수 있다(Choi, 2019). Fig. 8(a)의 콘크리트 압축강도 변화 그래프 상에서 Case 1의 25 mm깊이에서 발생되는 온도 범위 498.3~1,349.9°C를 기준으로 보면 콘크리트 강도 잔존율은 약 0~50% 정도로 나타나다. 반면에 Case 1의 깊이 50 mm와 Case 2의 모든 깊이에서 콘크리트 강도 잔존율은 약 95% 이상으로 추정되어 강도에 큰 영향이 없음이 확인 되었다. 이러한 결과는 Fig. 8(b)에서 나타낸 강의 잔존율 그래프에서도 유사한 경향을 확인할 수 있으며, Case 1의 깊이 25 mm의 결과에서만 강의 잔존율이 약 0~60%로 추정된다.



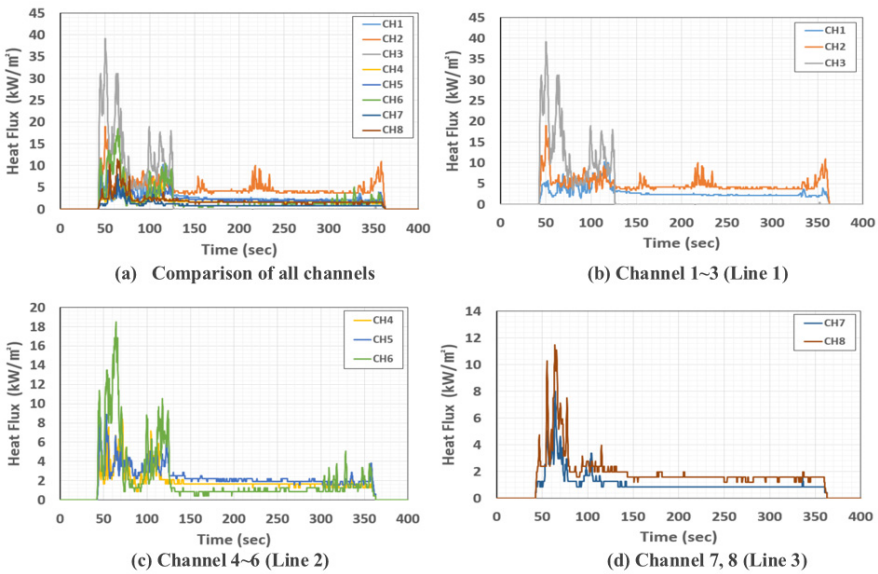
(a) Compressive strength of siliceous aggregate concrete at high temperature and after cooling

(b) Strength of certain steels at high temperatures

Fig. 8. Changes in strength of concrete and steel due to high temperature (ACI 216, 1998)

3.2 수소 제트화염에 의한 터널 내부 복사열 분포

터널 내에서 제트 화염 발생시 유도되는 열 영향을 분석하기 위해 복사열을 측정하였다. Fig. 9는 Case 1에서 발생되는 복사열 분포이다. 열 유속계를 거리별 3열로 배치하였는데, 모든 열에서 터널 내화 시험체에 가까운 위치에서 최대 복사열이 발생되었다. 전체 분포에서는 제트화염의 중심선으로부터 2 m 떨어진 1열 중 시험체에 가장 인접한 위치인 CH3에서 최대값 39.16 kW/m^{2}이 발생되었다. 또한, 1열 중 시험체와의 이격 거리가 늘어남에 따라 CH2에서 18.95 kW/m^2 (CH3 대비 51.6% 감쇠), CH1에서 10.34 kW/m^2 (CH3 대비 73.6% 감쇠)로 급격히



(a) Comparison of all channels

(b) Channel 1~3 (Line 1)

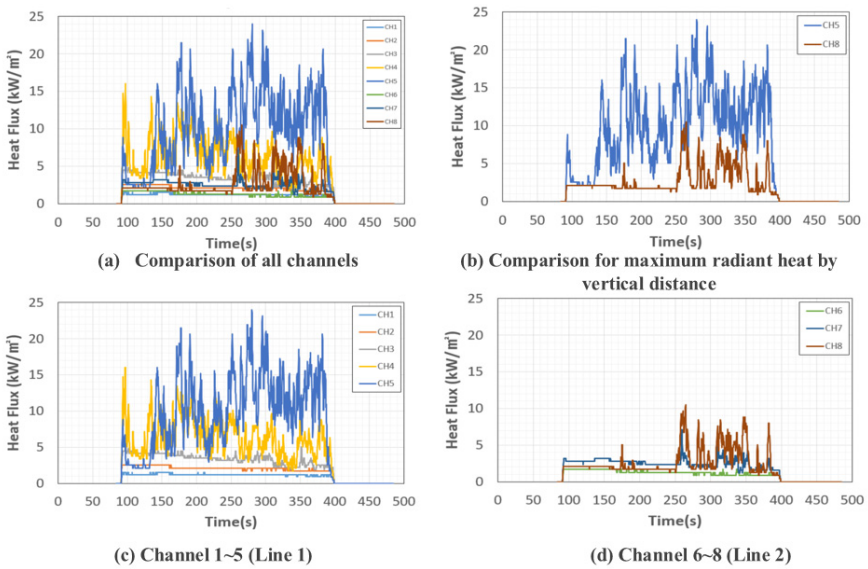
(c) Channel 4~6 (Line 2)

(d) Channel 7, 8 (Line 3)

Fig. 9. Comparison of radiant heat around jet flame (Case 1)

감소하는 것을 볼 수 있으며, 이러한 결과는 2열과 3열에서도 유사한 경향으로 나타나고 있다. 제트 화염의 수직 방향으로의 복사열 분포를 보면, 제트 화염과 가까운 CH3 39.16 kW/m^2, CH2 18.95 kW/m^2, CH1 10.34 kW/m^{2}에서 각 최대값이 발생되고 있다. 다만, Ch8 (11.48 kW/m^2)에서 CH5 (8.88 kW/m^2)보다 약 2.6 kW/m^2 정도 더 높은 복사열이 발생되는데, 이것은 시험체를 타격하고 반사되는 제트화염이 시험체 벽면을 따라 넓게 퍼져 나가는 형태를 띄어서 나타나는 현상이라 판단된다.

Fig. 10은 Case 2에서 발생되는 복사열 분포이다. Case 1과는 달리 노즐과 시험체의 이격거리가 늘어남에 따라 열유속계 배치를 2열 5행으로 변경하였다. 앞 선 결과와 같이 모든 열에서 터널 내화 시험체에 가까운 위치에서 최대 복사열이 발생하였다. 전체 분포에서는 1열 중 시험체에서 가장 가까운 위치인 CH5에서 최대값 24.00 kW/m^{2}이 기록되었다. 같은 열 내에서 복사열을 비교하면 측정위치가 시험체와의 거리가 멀어짐에 따라 CH4에서 16.00 kW/m^2 (CH5 대비 33% 감쇠), CH3에서 6.02 kW/m^2 (CH5 대비 75% 감쇠), CH2에서 2.53 kW/m^2 (CH5 대비 89% 감쇠), CH1에서 1.52 kW/m^2 (CH5 대비 94% 감쇠)로 급격히 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이러한 결과는 2열에서도 유사하게 나타났다.



(a) Comparison of all channels
(b) Comparison for maximum radiant heat by vertical distance
(c) Channel 1~5 (Line 1)
(d) Channel 6~8 (Line 2)

Fig. 10. Comparison of radiant heat around jet flame (Case 2)

Table 3에 나타낸 복사열 강도 따라 사람에 미치는 영향을 토대로 터널 내에 발생되는 열 분포를 분석하여 Fig. 11에 나타냈다. Table 3을 근거로 소방대와 비상탈출 인원이 수 초 이상 견딜 수 있는 기준인 6 kW/m^{2}를 상한으로 고려하였다. 그 결과 Fig. 11에서 볼 수 있는 것과 같이 Case 1의 경우 분사노즐과 터널 내화 시험체 사이의 대부분의 공간(바닥면적 2 m (L) × 8 m (W))에서 위험 지역으로 분류되었다. 반면에 Case 2에서는 노즐과 시험체 사이 공간 중 3분의 2정도가 위험 지역(바닥면적 2.5 m (L) × 6 m (W))으로 분류되었고, 노즐 측 3분의 1정도의 공간은 소방활동이 가능한 안전 지역(바닥면적 1.5 m (L) × 6 m (W))으로 분석되었다.

Table 3. Effects of radiant heat flux on people (Kang and Lee, 2017)

Radiant heat flux intensity (kW/m^2)	Effects on people
1.5~1.6	No harm; safe for the general public and for the stationery personnel
2.5	Intensity tolerable for 5 min; severe pain above this exposure time
3~4	Intensity tolerable for non-frequent emergency situations for 30 min
5	Pain for 20 s exposure, first degree burn. Intensity tolerable for those performing emergency operations
6	Intensity tolerable for escaping emergency personnel
9.5	Second degree burn after 20 seconds
12.5~15	First degree burn after 10 seconds, 1% fatality in 1 min
25	Significant injury in 10 s, 100% fatality in 1 min
35~37.5	1% fatality in 10 s

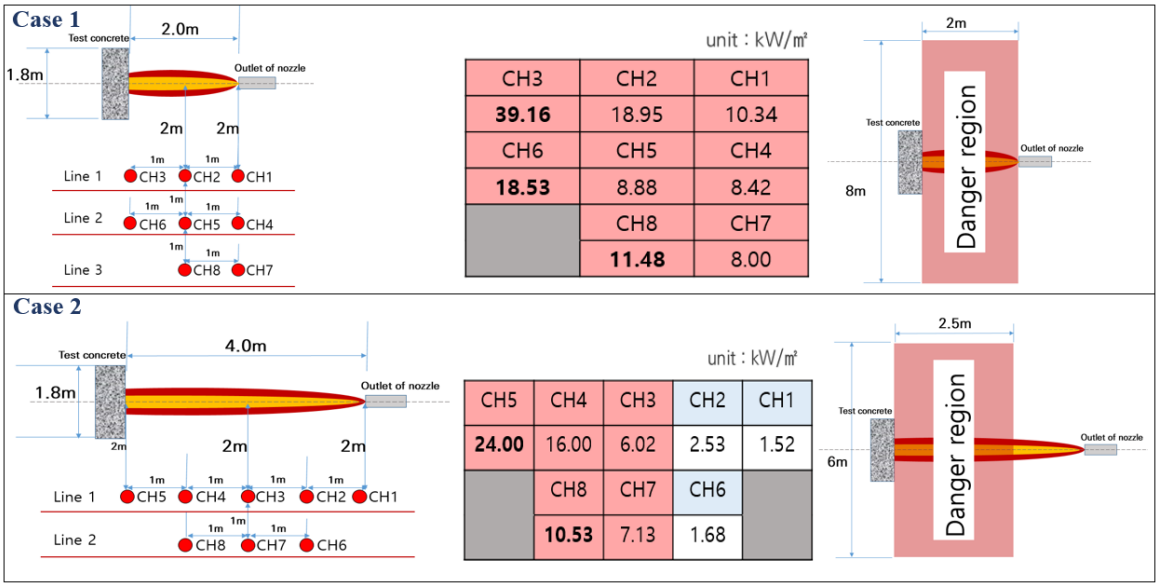


Fig. 11. Comparison of radiant heat around jet flame

4. 결 론

본 연구에서는 수소차의 TPRD개방에 의해서 발생 되는 수소제트화염이 터널 내부 벽체에 미치는 영향과 내부 복사열 특성을 규명하였다. 수소 제트 화염은 일반 수소차에서 발생되는 조건과 동일하게 하기 위해 분사 압력은 700 bar로 설정하고, 분사 노즐 직경은 1.8 mm로 설정하였다. 또한, 터널벽체을 모사하기 위한 내화 시험체는 일반적으로 터널 라이닝의 콘크리트 압축강도 40 MPa를 적용하여 도로터널 내화지침의 규정을 준용하여 제작하였다. 분사노즐과 터널 내화 시험체간의 이격거리에 따른 영향을 검토하기 위해서 이격거리를 2 m와 4 m로

하여 시험을 수행하였다. 이에 따라, 수행된 제트 화염 실험 결과에 의해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 제트화염에 의한 시험체의 손상도는 노즐과 터널벽면의 이격거리에 따라 확연한 차이가 있는 것으로 나타나고 있다. 이격거리가 2 m인 경우, 수소 제트화염에 의해 발생되는 열과 압력으로 인해 제트화염이 닿는 모든 부위에서 표면 파손이 일어나 최대깊이 7 cm까지 패여 매립된 철근까지 노출되고 내부온도가 급격하게 상승하였다. 반면에 이격거리가 4 m로 늘어난 경우 제트 화염에 노출된 부위 중 중심부에서만 국부적인 파손이 발생된다.
2. 터널 내화 시험체의 내부 온도는 이격거리가 2 m인 경우에 깊이 25 mm 지점에서 급격하게 상승하고 있으며, 콘크리트 압축강도 잔존율을 추정한 결과, 0~50%낮게 분석되었다. 다만, 콘크리트 압축강도 잔존율을 통한 위험도 판단은 건축물의 구조적 형태 및 상세사항을 반영해야 하므로, 본 결과를 통해 위험 유무를 판단하는 것은 곤란하며, 추후 상세한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.
3. 제트화염에 의한 복사열은 이격거리에 따라서 차이가 크며, 이격거리 2 m에서 최대 복사열 39.16 kW/m^{2}이 발생됐다. 인체의 영향을 미치는 한계기준을 6 kW/m^{2}으로 고려하는 경우, 제트화염의 중심선에서 4 m, 터널 벽면으로부터 2.5 m까지 한계기준을 초과하는 것으로 측정되었다.
4. 본 연구를 통해 수행된 모든 실험에서 수소차에 탑재되는 수소용기 용량에 비해 현저히 많은 양의 수소가 방출되어, 일반 수소차 사고 상황보다 가혹한 조건의 실험 환경이 조성되었다. 그 결과로 다소 높은 규모의 터널벽면 손상 및 복사열 분포가 나타난 것으로 사료되며, 추 후 실제 수소용기를 이용한 추가실험 결과와의 비교 분석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

저자 기여도

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

References

1. ACI 216 (1998), Guide for determining the fire endurance of concrete elements, pp. 15-18.
2. Choi, D.J. (2019), “A study on the reduction of thermal radiation due to jet fire at safety valve by different capacities of LNG storage tank”, Master of Degree, Dept. of Safety Engineering, Seoul National University

of Science and Technology, pp. 27-48.
3. ISO 22899-1 (2021), Determination of the resistance to jet fires of passive fire protection materials — Part 1: General requirements, pp. 16-35.
4. Kang, B.W., Lee, T.H. (2017), "An investigation of hazard distance in a series of hydrogen jet fire with the hyram tools", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 2, pp. 166-173.
5. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2021), Guideline of fire resistance on road tunnel, pp. 6-21.
6. Ryu, J.O., Lee, H.Y. (2021), "A basic study on the hazard of hydrogen feul cell vehicles in road tunnels", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 23, No. 1, pp. 47-60.
7. Sohn, J.H., Hahn, Y.B. (1998), "Radiation damage by the pool fire of LNG storage tank", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 2, No. 1, pp. 14-22.