

# 수소자동차의 제트화염 발생에 따른 위험성 분석

박병직\* · 김양균\*\* · 임옥근\*\*\*†

## Risk Analysis of Jet Flame Occurred at Hydrogen Fuel Cell Vehicle

Byoungjik Park\* · Yangkyun Kim\*\* · Ohk Kun Lim\*\*\*†

### †Corresponding Author

Ohk Kun Lim

Tel : +82-51-200-8673

E-mail : oklim@dau.ac.kr

Received : November 14, 2022

Revised : November 30, 2022

Accepted : December 1, 2022

Copyright©2022 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Abstract** : Eco-friendly policies proposed by the government of The Republic of Korea have encouraged the use of eco-friendly vehicles. Hydrogen vehicles have exhibited the highest growth rate, although the current number of registered vehicles is low. In hydrogen vehicles, a thermally activated pressure relief device (TPRD) is installed to prevent explosions in the hydrogen gas cylinder. When discharged due to low ignition energy, hydrogen gas readily forms a jet flame. The risks induced by such jet flames were analyzed through a numerical analysis. Jet flames can activate TPRDs installed in nearby hydrogen gas cylinders. As a result, high-voltage cables exposed in the lower area of a vehicle can ignite within seconds. There was a 9.5-kW/m<sup>2</sup> area around the vehicle (which can result in casualties) at a distance of ~5 m from the hydrogen gas cylinder, and a 37.5-kW/m<sup>2</sup> area (which can cause significant damage) in the form of an inverted triangle toward the lower section of the vehicle. We believe that the risk factors analyzed herein should be considered for addressing accidents in hydrogen vehicles.

**Key Words** : fuel cell vehicle, hydrogen jet fire, TPRD(Thermally activated Pressure Relief Device), first responder, risk analysis

## 1. 서론

세계적인 기후위기와 정부의 친환경 정책으로 인해 수소충전소의 설치가 매년 증가하고 있으며, 정부에서도 인허가 관련 행정절차를 간소화하는 등 수소인프라를 빠르게 구축하기 위해 노력하고 있다. 하이브리드, 전기 및 수소자동차와 같은 친환경차의 국내 등록비중이 2014년도에 0.7%에서 2021년 7월에서 4.1%로 증가하여 현재는 등록대수가 100만대를 넘었으며, 이와 함께 친환경 자동차의 화재도 함께 증가하고 있어 소방청에서도 자동차 회사의 전문가를 초빙하여 전기자동차의 화재대응을 위한 특별교육을 실시하는 등 효과적인 대응을 위해 노력하고 있다<sup>1)</sup>. 2018년 5월에 전기자동차 화재가 발생한 이후로 2021년까지 총 17건의 화재가 발생했으며, 해마다 전기자동차 화재 발생건수가 점점 증가하는 추세를 보이고 있다<sup>2)</sup>. 이런 친환경 자동차 중 수소자동차의 현재 등록대수는 작지만 그 증가

율이 가장 높은 것을 볼 때<sup>3)</sup> 향후 수소자동차를 중심으로 한 사고도 점차 발생할 것으로 예상된다.

미국의 에너지부에서 후원하여 만든 H2TOOL에 보고된 수소자동차 사고사례는 2건으로 수소충전소에서 연료를 공급받은 후 충전호스를 분리하지 않은 채 차를 운행하여 자동분리장치가 작동한 것과 연료전지자동차와 내연기관 자동차의 충돌 사고였다<sup>4)</sup>. 국내에서는 연료전지 승용자동차의 사고사례는 보고되지 않았지만 수소충전소에 압축수소를 운반하던 튜브트레일러 차량의 타이어에서 발생한 화재로 인해 수소저장용기에 부착된 온도감응형 압력배출장치 (TPRD, Thermally activated Pressure Relief Device)가 작동하여 상부방향으로 제트화염이 생성된 사고가 지난 2021년 12월에 있었다.

수소자동차의 사고위험요인으로는 고압으로 저장된 수소용기 자체의 위험성, 수소가스를 전기에너지로 변환하는 연료전지시스템의 위험성, 그리고 수소용기에서 연료전지로 수소를 전달하는 배관계통의 위험성이

\*한국건설기술연구원 화재안전연구소 전임연구원 (Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

\*\*한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원 (Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

\*\*\*동아대학교 경찰·소방학과 교수 (Department of Police and Fire Administration, Dong-A University)

있을 수 있다. 그 중 도로에서 운행 중인 수소자동차의 관점에서는 연료전지시스템이나 배관계통 보다는 수소용기의 위험성이 가장 크다<sup>5)</sup>. 수소가스는 연소하한 계가 4% 정도로 낮을 뿐만 아니라 연소범위가 넓어 누출되는 경우 쉽게 점화될 수 있다. 수소저장용기에서 가장 큰 피해를 유발하는 사고는 폭발로, 이는 과압과 비산물로 인한 직접적인 피해와 화구를 형성하거나 인근 건축물이나 가연물에 화재를 유발하여 추가적인 피해를 일으킬 수 있기 때문이다. 이런 사고를 사전에 방지하기 위해 수소저장용기에는 TPRD가 장착되어 화염에 노출되거나 과도한 열에너지를 받는 경우 내부에 저장된 가스를 방출하도록 설계되어 있다<sup>6)</sup>. 수소가스의 점화에너지는 약 0.017 mJ로 메탄이나 가솔린보다 현저히 낮기 때문에<sup>7,8)</sup> 외부로 누출되는 경우 점화되어 제트화염을 형성할 위험성이 매우 높은 편이다.

일반적으로 압축수소를 대량으로 저장하여 운반하는 튜브트레일러에 부착된 TPRD의 압력배출은 상부방향으로 설계되어 있으며, 연료전지를 사용하는 승용자동차의 경우에는 도로하부방향으로 설치되어 있다. 국내에서 가장 많이 판매되고 있는 수소자동차의 긴급대응가이드에는 비상상황 시 수소가스를 지면에 수직방향으로 배출하는 것으로 명시되어 있다<sup>9)</sup>. 대부분의 자동차 제작사에서 제시하는 긴급대응가이드는 위험요소를 명시하고, 수동으로 자동차를 정지시키며, no cut zone에 대해 명시되어 있지만 사고 시 어떻게 대처해야 하는지에 대해서는 명확히 제시되어 있지 않다<sup>10)</sup>.

최근에는 수소제트화염 발생 시 접근하는 초기대응자의 안전성에 대한 것과 수소충전소에서 발생하는 제트화염에 따른 안전거리 설정에 대한 연구, 수소충전소 사고대응에 필요한 사항들에 대한 연구들이 활발히 수행되고 있으나<sup>11-13)</sup> 도로에서 자유롭게 이동하는 수소자동차의 사고에 대한 분석은 아직까지 많지 연구되지 않았다. 본 논문에서는 수소자동차 사고 발생 시 수소저장용기의 폭발을 방지하기 위해 작동하는 TPRD로 인해 제트화염이 생성되는 경우에 이로 인한 추가적으로 발생할 수 있는 위험성을 분석하고 효과적인 대응방안에 대해 고찰하고자 한다.

## 2. 수소자동차 제트화염 모델

### 2.1 수소자동차 모델

국내에서 가장 많이 사용되고 있는 수소자동차는 Fig. 1에서와 같이 차량 하부에 52.2 L 용량의 Type IV 용기 3개를 장착하여 총 156.6 L의 체적을 가지고 있으며, 수소충전량은 약 6.3 kg이다. 승용자동차에 저장

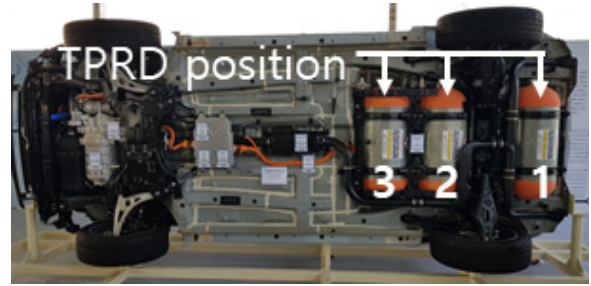


Fig. 1. Underneath of the fuel-cell electric vehicle (FCEV)<sup>15)</sup>.



(a) Hydrogen venting position of FCEV<sup>9)</sup>.



(b) Installed TPRD at the hydrogen tanks

Fig. 2. TPRD and venting position.

되는 압축수소의 정상 시 저장압력 (nominal working pressure, NWP)은 700 bar이며, 수소 및 연료전지자동차의 기술기준에 따르면 수소저장용기는 NWP의 2.25 배의 압력에 견디도록 규정되어 있다<sup>14)</sup>. 수소저장용기는 차량의 뒷부분, 즉 짐칸에서부터 뒷좌석의 하단부에 3개가 나란히 위치하고 있으며, Fig. 1에 표시된 1번과 2번 수소저장용기 사이의 거리는 675 mm 이며, 2번과 3번 사이는 420 mm 이다. 각각의 수소저장용기에는 약 110°C에서 작동하는 TPRD가 Fig. 2(b)에서와 같이 장착되어 있으며 수소가스 방출방향은 Fig. 2(a)에

서와 같이 바닥면으로 설계되어 있다<sup>9)</sup>.

### 2.2 수소 제트화염 모델

본 연구의 수치해석을 위해 유한체적법 기반의 상용 열유동해석 소프트웨어인 ANSYS FLUENT 2021 R2<sup>16)</sup>를 사용하였다. 제트화염 해석을 위해 보존방정식, 운동량 보존방정식, SST  $k-\omega$  난류 모델, Species Transport Equation, Discrete Ordinates (DO) 복사모델을 사용하였다. 수소 연소로 인한 제트화염 모사를 위해 H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>의 4가지 화학종을 고려하였으며, 연소 모델은 수소 반응물이 난류 혼합과정에 의존적이고 매우 빠르다고 가정하는 Eddy-Dissipation 적용하였다. 수소 연소 반응으로 인한 복사열유속을 관찰하기 위해 복사모델로 DO 모델을 사용하였으며, 정확도를 위해 극각과 방위각을 5로, 각각에 대한 화소는 3으로 설정하였다.

고압 수소탱크에서의 누출은 누출구에서 수소 기체가 마하 디스크를 지나며 아음속으로 속도가 줄어드는 복잡한 형태의 충격파가 발생하는 임계 유동이 관찰된다<sup>17)</sup>. 해석의 복잡성을 줄이기 위해 질량 및 운동량 보존에 기반하여 충격파를 단순화하여 pseudo-diameter 접근법을 사용하였으며, pseudo-diameter 접근법은 수소 기체뿐만 아니라 다양한 탄화수소 기체의 고압 누출 및 제트화염 해석에 활용되고 있다<sup>18-20)</sup>.

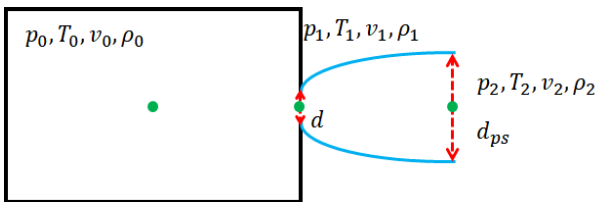


Fig. 3. Diagrammatic representation of a supercritical gas release.

Fig. 3와 같이 누출되는 기체를 이상기체로 가정하고, 탱크 내부 (State 0), 누출구 지점(State 1), 마하 디스크(State 2)를 지난 지점의 3가지 지점에서의 물성치를 통해 누출 속도가 아음속으로 고정된 pseudo-diameter ( $d_{ps}$ )를 구하여 수치해석에 적용할 수 있다. 질량 유량은 State1지점과 동일하고, 온도와 압력은 주변 대기인 State 2와 동일한 것으로 가정하면 아래 (1)과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{d_{ps}^2}{d^2} = \frac{C_d \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2} \quad (1)$$

State 0에서 State 1로의 변화가 등엔트로피 변화이

고, 누출 기체를 이상기체로 가정하면 State1에서의 밀도를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\rho_1 = \frac{P_0 \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} MW_{H_2}}{R_{H_2} T_0} \quad (2)$$

여기서,  $MW_{H_2}$ 는 누출 기체의 물질량,  $R_{H_2}$ 는 수소의 기체상수이다. 그리고 State 1와 State 2에서의 속도( $V_1$ ,  $V_2$ )와 밀도( $\rho_2$ )는 아래와 같다.

$$V_1 = \sqrt{\frac{k R_{H_2} T_0 \frac{2}{k+1}}{MW_{H_2}}} \quad (3)$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{k R_{H_2} T_2}{MW_{H_2}}} \quad (4)$$

$$\rho_2 = \frac{P_2 MW_{H_2}}{R_{H_2} T_2} \quad (5)$$

위 식들을 대입하여 정리하면  $d_{ps}$ 를 구할 수 있다.

$$d_{ps}^2 = C_d \frac{P_0}{P_2} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \sqrt{\frac{T_2}{T_0}} d^2 \quad (6)$$

제트화염 해석을 위한 수소차 형상과 격자를 Fig. 4에 나타내었다. 외부공간으로 누출되는 제트화염의 영향성을 위해 수소자동차에 있는 수소용기의 TPRD를 기준으로 전면부, 운전석 및 조수석 방향으로 20 m, 차량후면부 방향으로 30 m, 차량 바닥으로부터 10 m의 높이를 가지는 직육면체 형상으로 수치해석 공간을 설정하였다. 계산 효율성과 정확도를 위해 차량 주변과 TPRD 노즐 분사구에 조밀한 격자를 생성하였으며, 계산 수렴성을 위해 격자의 최대 skewness는 0.84이고, 평균은 0.16이 되도록 생성하였다. 또한 차량 주변부에 sweep 방법을 사용하여 총 약 213만 개의 격자를 생성하였다.

누출 유량은 계산을 위해 수소 안전성 평가 데이터 toolkit인 HyRAM을 활용하였다<sup>21)</sup>. 수소 저장 용기의 누출 유량을 위해 Table 1과 같이 온도는 20°C, 용기의 압력 70 MPa, 저장 용기 용량 52.2L, TPRD 누출구의 직경 1.8 mm를 가정하여 시간에 따른 수소 누출 유량을 계산하였으며, 그 식은 아래 (7)과 같다.

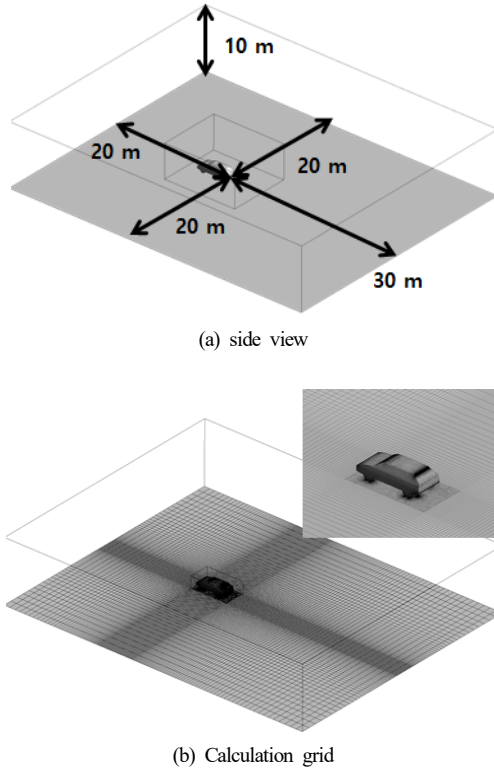


Fig. 4. Schematic diagram of the FCEV.

$$\frac{du}{dt} = \frac{\dot{m}(h-u) + q}{m} \quad (7)$$

여기서,  $u$ 와  $h$ 는 각각 수소 기체의 단위 질량 당 에너지와 엔탈피를 의미하고,  $q$ 는 수소 저장 용기로 유입되는 열전달량,  $m$ 은 저장 용기에 저장된 수소 기체의 질량을 의미한다.

수소자동차에 설치되는 수소 저장용기 성능은 Table 1과 같으며, 수소 저장 용기의 가스는 시간이 흐를수록 따라 운동량이 현저하게 줄어들게 되어 20초 만에 유량이 초기의 50%로 낮아지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 최악의 사고 시나리오(A Worst-case scenario)를 가정하여 가장 유량이 높은 조건인 누출 초기 조건에 유량에 대해 정상 상태(Steady State)로 20,000번의 반복 계산을 수행하였다. Pressure-Velocity Coupling을 위해 Coupled Scheme을 사용하였다. 계산 초기 계산 영역은 유동이 존재하지 않고, 대기 조건과 동일한 산소 및 질소 체적분율을 각각 21%, 79%로 설정하여 계산하였다.

Table 1. Hydrogen tank model parameters

Volume	Pressure	Nozzle size	Flow rate	Length	Diameter
52.2 L	70 MPa	1.8 mm	0.102 kg/s	870 mm	363 mm

### 3. 수소자동차 제트화염 분석

#### 3.1 수소자동차 하부의 제트화염 영향 범위

Fig. 5는 제트화염 생성될 때 차량 하부의 온도분포를 나타낸 것이다. 차량 후면 최외각에 있는 1번 용기의 TPRD가 작동하여 노면방향으로 제트화염이 생성될 때 그 내부에 위치한 2번과 3번 수소저장용기의 TPRD 위치에서 관찰된 온도는 각각 955°C와 1036°C로 계산되었다. Fig. 1에서와 같이 수소차량 하부에는 주행색상의 고전압 케이블이 노출되어 있다. 이 고전압 케이블이 설치된 차량 하부 중심부에서의 열유속은 129 kW/m<sup>2</sup>로 분석되었다.

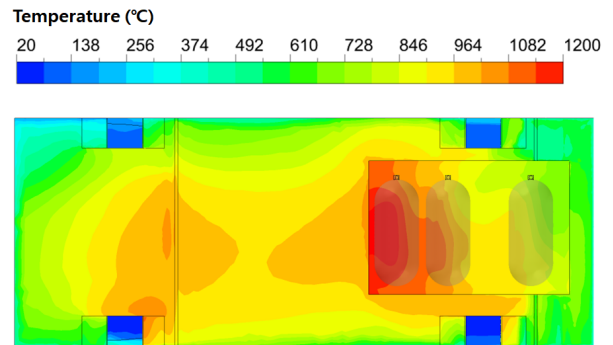


Fig. 5. Temperature profile underneath of the FCEV.

#### 3.2 수소자동차 인근의 제트화염 영향 범위

제트화염이 형성될 때 수소자동차 인근의 열유속 분포를 Fig. 6에 나타냈다. 열유속이 37.5 kW/m<sup>2</sup>이상인 곳은 적색영역으로, 9.5 kW/m<sup>2</sup>이상인 부분은 녹색영역으로 표시했다. 문헌에 따르면 인체는 9.5 kW/m<sup>2</sup>의 열유속에 20초 이상 노출되는 경우 2도 화상이 발생하며, 장비의 경우 37.5 kW/m<sup>2</sup>에 노출되는 경우 충분한 손상이 발생할 수 있다<sup>8,22)</sup>. 방출된 제트화염은 바닥면과 부딪친 후에 차량 하부를 지나 전면부, 운전석, 조수석 및 후면의 모든 방향으로 37.5 kW/m<sup>2</sup> 이상의 열유속 영역을 형성했다. 수소자동차의 가장 뒤쪽에 위치한 수소저장용기에서 TPRD가 작동했을 때, 9.5 kW/m<sup>2</sup>의 열유속이 발생하는 범위는 Fig. 6(a)에서와 같이 차량의 전면에서 1.62 m, 차량 후면에서부터 4.36 m, 바닥에서부터 약 4 m 높이였다. Fig. 6(b)는 차량 뒷면에서 열유속 분포를 나타낸 것으로 TPRD가 설치되어 있는 운전석 부분에 보다 높은 값의 열유속이 형성되었다. 운전석이 있는 차량 좌측면에서는 4.51 m까지, 조수석이 있는 차량 우측 부분은 3.63 m까지 9.5 kW/m<sup>2</sup>의 열유속 영역이 형성되었다. 차량주변에 37.5 kW/m<sup>2</sup>의 복사열이 형성되는 영역은 차량 후면과 운전석 방향으로

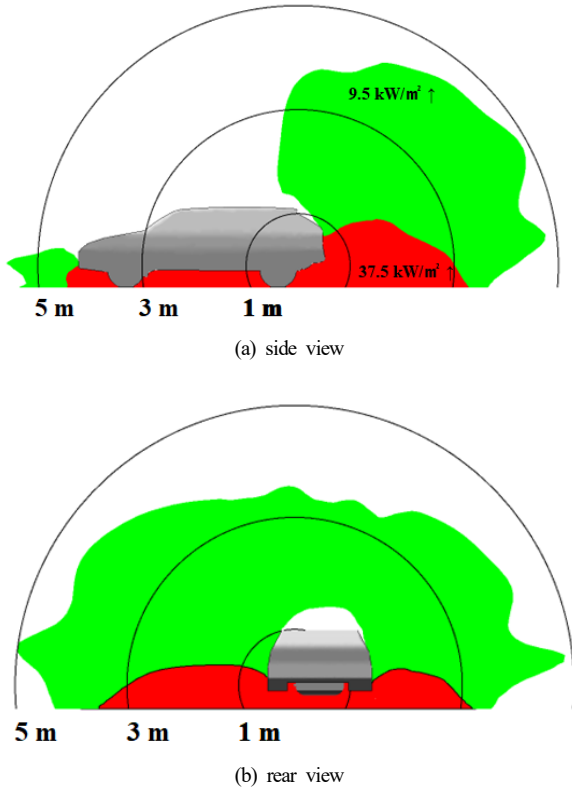


Fig. 6. Radiative heat flux profile around the vehicle.

상대적으로 크게 형성되었으며 범위는 차량면으로부터 각각 3.03 m, 1.93 m였다.

#### 4. 고 찰

##### 4.1 제트화염 발생에 따른 위험성

제트화염 발생 시 인체에 피해가 발생할 수 있는 열 유속이 형성되는 영역은 Fig. 6에서와 같이 차량의 후면과 운전석 방향으로 5 ~ 6 m 정도이다. 바닥에서 상부 방향으로도 약 4 m 정도 형성되었으며, 10초 노출 시 1%가 치명적인 상해를 입는 37.5 kW/m<sup>2</sup> 영역도 차량 좌측면과 후면 방향으로 3 m 정도 형성되었다.

산업통상자원부의 자료에 따르면 한국 남성과 여성의 평균 키는 각각 172.5 cm와 159.6 cm이며, 눈높이까지는 약 1.5 ~ 1.6 m이다<sup>23)</sup>. 일반적으로 옷이나 보호복을 착용하는 경우 복사열을 일부 차단할 수 있지만 얼굴은 노출된 경우가 대부분이므로 눈높이인 1.5 m에서의 열유속을 비교했을 때 Fig. 7에서와 같이 수소자동차에서 제트화염이 생성되는 경우 차량 인근으로 약 5 m까지 피해를 유발할 수 있는 것으로 분석되었다.

수소자동차 하부에 설치된 3개의 수소저장용기 중 하나의 TPRD가 작동하여 제트화염이 생성되는 경우

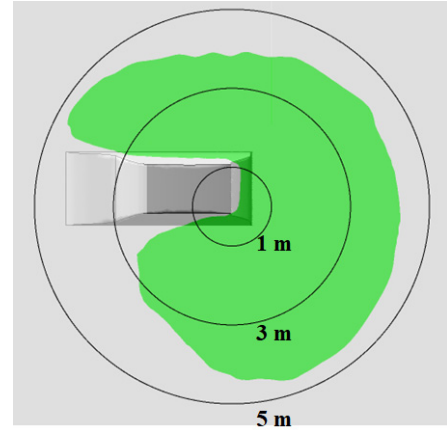


Fig. 7. Heat flux profile at 1.5 m height around the FCEV.

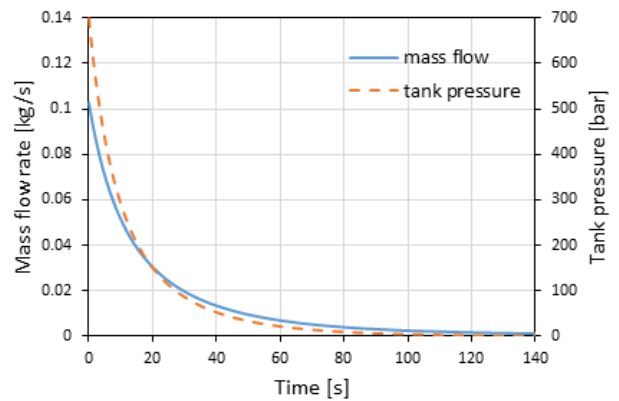


Fig. 8. Mass flow rate and pressure change of the hydrogen tank.

Fig. 5에서와 같이 차량 하부의 온도가 110°C 이상으로 상승하여 인근의 수소저장용기에 설치된 TPRD의 작동 온도 조건을 만족하게 된다. 미국 에너지부 (Department of Energy)의 지원을 받아 개발된 HyRAM<sup>24)</sup>을 이용하여 연료전지자동차의 수소저장용기에서 TPRD가 작동할 때의 유량과 압력 변화를 계산했다. Fig. 8에서와 같이 누출이 시작되고 10초 경과 후 유량이 절반으로 감소하며 20초 후에는 탱크 내부의 압력이 운동량이 현저하게 감소하는 150 bar에 이르렀다. 따라서 수소화염이 발생하는 시간동안 인근의 수소저장용기에 설치된 TPRD는 충분히 작동할 수 있을 것으로 판단된다. 수소자동차에서 제트화염이 발생할 경우에는 나머지 2개의 용기에서도 순차적으로 제트화염이 생성될 것을 고려하여 사고에 대응할 필요가 있다.

##### 4.2 수소저장용기 폭발 위험성

수소자동차에는 가볍고 높은 내압성을 가지는 Type IV 수소저장용기를 사용하고 있으며, 이는 고밀도

폴리에틸렌(High density polyethylene, HDPE)과 같은 폴리머 라이너를 탄소섬유복합재료(Carbon fiber epoxy composite)로 감싸서 제작된 것이다. Blanc-Vannet 등은 19 L와 36 L 용량의 Type IV 용기에 수소, 질소 및 헬륨을 467 bar와 700 bar로 가압한 뒤 모든 부분이 화염에 휩싸인 것을 가정한 bonfire 실험을 통해 고온거동을 분석했다<sup>25)</sup>. 수소와 산소가 혼합된 가스를 사용하여 4개의 연료분사장치를 통해 화염을 발생시켰으며, 평균 약 90 kW/m<sup>2</sup>의 단위면적당 열방출율이 수소저장용기에 가했을 때 160 초에서 311초 사이에서 저장용기가 폭발했다. 36 L 용량의 Type IV 용기를 700 bar로 가압한 경우 약 240초 경과 후에 용기가 파열되었으며, 이 때 가해진 에너지는 21.6 MJ/m<sup>2</sup>이었다.

정상적으로는 수소자동차에 화재가 발생했을 때 TPRD가 작동되면서 내부의 수소가스를 방출해야 하지만 교통사고 혹은 제품결함 등으로 TPRD가 작동하지 않는 경우 수소저장용기의 폭발가능성에 대해 분석했다. 제트화염이 발생되었을 때 차량 하부의 열유속은 129 kW/m<sup>2</sup>였고, 최악의 상황을 가정하여 용기 내부의 가스가 완전히 방출되는 약 100초간 최대열유속이 가해진다고 했을 때 전달되는 에너지는 12.9 MJ/m<sup>2</sup>로 실험에서 확인된 수소저장용기가 파열되는데 필요한 에너지에 미치지 못했다.

### 4.3 고전압 케이블 화재 위험성

Fig. 1에서와 같이 차량 하부에는 고전압 케이블이 설치되어 있다. 제트화염이 생성되는 시간동안 고전압 케이블은 최대 129 kW/m<sup>2</sup>의 열유속에 일정시간 노출된다. 고전압 케이블의 연소위험성을 평가하기 위해 ISO 5660-1에 따른 콘칼로리미터를 사용하여 점화되는데 필요한 에너지를 측정했다<sup>26)</sup>. Fig. 9와 같이 수소자동차에서 제거한 고전압 케이블을 직경 100 mm의 정사각형 트레이에 넣고 알루미늄 호일과 단열재를 바닥과 주변에 배치해 불필요한 열전달이 발생하지 않도록 시편을 준비했다. 시편을 50 kW/m<sup>2</sup>의 열유속에 노출시켰을 때 약 10초간 백색의 연기를 발생하다가 12초 경과했을 때 중심 부분부터 점화되었다. 고전압케이블이 점화하는데 사용한 에너지는 600 kJ/m<sup>2</sup>였으며, 차량 하부에 129 kW/m<sup>2</sup>의 열유속이 일정하게 가해진다고 가정할 때 약 5초 경과 후에는 고전압케이블이 점화되는데 필요한 에너지가 충족된다. 따라서 제트화염이 발생하고 수소저장용기 내부의 수소가스를 모두 배출하여 제트화염이 사라지더라도 이때 가해진 열에너지로 인해 차량 하부의 고전압케이블은 점화되어 2차 화재가 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

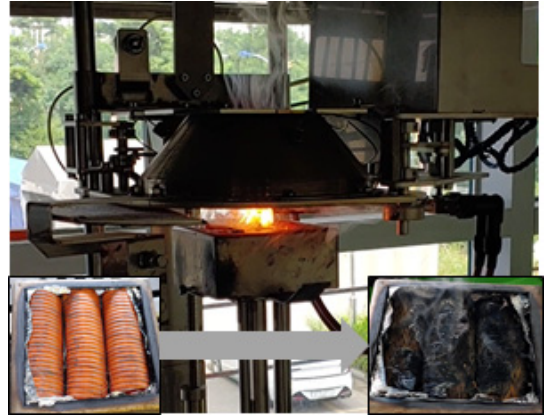


Fig. 9. Cone calorimeter test of high voltage cable.

### 4.4 화재사고 대응 시의 고려사항

Fig. 10은 수소저장용기에서 제트화염이 발생했을 때 주변 바닥에서의 열유속분포를 나타낸 것이다. 제트화염 생성되는 TPRD를 중심으로 삼각형 형태로 높은 열유속이 발생함을 확인할 수 있다. 대부분의 수소자동차는 저장용기를 뒷바퀴 인근에 설치하는 경우가 많아 수소자동차 사고 대응을 위해 차량으로 접근할 때에는 Fig. 10에 나타낸 화살표와 같이 차량 전면부 기준으로 45도 방향으로 접근하는 것이 돌발 제트화염 발생에서도 피해를 최소화할 수 있을 것으로 판단된다. 최근 연구결과에 따르면 방화복을 착용한 상태에서는 수소화염이 생성되는 곳에서 2 m까지는 화상의 위험이 없는 것으로 보고되고 있다<sup>11)</sup>. 차량 내부의 인명에 대한 구조활동에서도 차량 뒷문보다는 앞문을 활용하고 구조대상자의 이동 시에도 차량 전면부 방향으로 움직이는 것이 피해를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

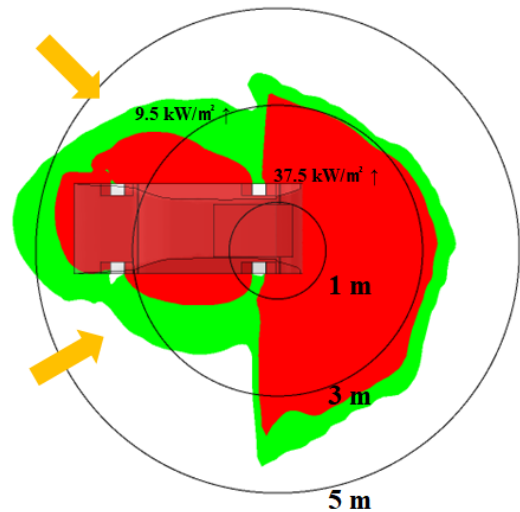


Fig. 10. Heat flux profile at the bottom surface around the FCEV.

## 5. 결론

친환경 자동차의 사용이 꾸준히 증가하고 있으며, 그 중 수소자동차는 등록대수는 가장 작지만 등록비율은 가장 빠르게 증가하고 있다. 수소저장용기의 폭발로 인한 대규모 사고를 예방하기 위해 설치된 TPRD가 작동하는 경우 제트화염이 생성될 수 있어, 본 논문에서는 그로 인한 위험성을 수치해석을 통해 분석했다. 하나의 TPRD가 작동하여 바닥방향으로 제트화염이 생성된 경우 인근에 있는 저장용기의 TPRD가 작동할 위험성이 높으며, 특히 운전석과 차량 뒤편으로 충분한 안전거리를 확보할 필요가 있다. 제트화염 생성으로 인해 인근의 수소저장용기가 폭발할 위험성은 낮지만 차량 하부에 설치된 고전압 케이블이 점화되어 제트화염이 소멸된 이후에도 차량에 화재가 발생할 수 있음을 확인할 수 있었다. 수소자동차 사고 대응 시에는 차량 전면 45도 방향으로 접근하는 것이 갑작스런 수소 제트화염이 생성되더라도 피해를 최소화할 수 있는 것으로 분석되었다. 이런 연구결과는 수소자동차 사고의 안전한 대응을 위해 다양하게 활용될 수 있으며, 향후 운전자 및 사고대응요원들이 보다 안전하게 작전을 수행할 수 있도록 수소자동차의 TPRD 배출방향에 따른 다양한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

**Acknowledgement:** Research for this paper was carried out under the KICT Research Program (project no. 20220232-001, Development of technology to secure safety and acceptability for infrastructure in hydrogen city) funded by the Ministry of Science and ICT.

## References

- 1) National Fire Agency, “[https://www.nfa.go.kr/nfa/news/pressrelease/press/?boardId=bbs\\_000000000000010&mode=view&cntId=1305&category=&pageIdx=&searchCondition=&searchKeyword="](https://www.nfa.go.kr/nfa/news/pressrelease/press/?boardId=bbs_000000000000010&mode=view&cntId=1305&category=&pageIdx=&searchCondition=&searchKeyword=)”, Retrieved on 12.03.2022
- 2) National Fire Research Institute of Korea, “[http://nfire.go.kr/board/boardView.do?menu\\_id=534&board\\_id=480&board\\_type\\_id=BBS\\_0000000209](http://nfire.go.kr/board/boardView.do?menu_id=534&board_id=480&board_type_id=BBS_0000000209)”, Retrieved on 09.15.2022
- 3) Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), “[http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m\\_71/dtl.jsp?lcmsspage=1&id=95086498](http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmsspage=1&id=95086498)”, Retrieved on 01.28.2022
- 4) Hydrogen Tools, “[https://h2tools.org/lessons?search\\_api\\_fulltext="](https://h2tools.org/lessons?search_api_fulltext=)”, Retrieved on 09.25.2022.
- 5) K. Sun and Z. Li, “Development of Emergency Response Strategies for Typical Accidents of Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles”, *Int. J. Hydrog. Energy.*, Vol. 46, Issue 75, pp. 37679-37696, 2021.
- 6) G. J. Yong, K. B. Lee and H. B. Kwon, “Study of KMVSS for Hydrogen Fuel Cell Vehicle”, *J. Auto-veh. Saf. Assoc.*, Vol. 6, No. 2, pp. 72-77, 2014.
- 7) A. Kumamoto, H. Iseki, R. Ono and T. Oda, “Measurement of Minimum Ignition Energy in Hydrogen-oxygen-nitrogen Premixed Gas by Spark Discharge”, *J. Phy.: Conference Series*, Vol. 301, 13th International Conference on Electrostatics, 2011.
- 8) European Industrial Gases Association, “Determination of Safety Distances”, *IGC Doc 75/07/E*, 2007.
- 9) Hyundai, NEXO Emergency Response Guide, “<https://www.nfpa.org/Training-and-Events/By-topic/Alternative-Fuel-Vehicle-Safety-Training/Emergency-Response-Guides/Hyundai>”, Retrieved on 09.25.2022.
- 10) K. Lee, J. Lee and G. Yong, “The Analysis of Emergency Response Guide for Hydrogen Fuel Cell Vehicle”, *Trans. Kor. Hydrog. and New Energy Socy.*, Vol. 23, No. 2, pp. 156-161, 2012.
- 11) K. Lee, M. Kwon, S. Kang, J. Choi, Y. Kim and O. K. Lim, “The Safety of Hydrogen Jet-flame Suppression Training”, *Fire Sci. and Eng.*, Vol. 36, No. 3, pp. 31-36, 2022.
- 12) S. Kang, “A Study of Jet Dispersion and Jet-fire Characteristics for Safety Distance of the Hydrogen Refueling Station”, *J. Kor. Inst. Gas*, Vol. 23, No. 6, pp. 74-80, 2019.
- 13) B. Park, Y. Kim and O. K. Lim, “Training Program Analysis for Incidents in Hydrogen Refueling Stations”, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 21, No. 6, pp. 103-110, 2021.
- 14) United Nations Economic Commission for Europe. Global Technical Regulation No. 13 (Hydrogen and Fuel Cell Vehicles) UN GTR No. 13, “<https://unece.org/transport/standards/transport/vehicle-regulations-wp29/global-technical-regulations-gtrs>”, Retrieved on 10.10.2021
- 15) Chosun Biz, “<https://biz.chosun.com/industry/company/2021/07/11/RUCNHRM645ACHIPKY25V7HKHBI/>”, Retrieved on 12.10.2021
- 16) ANSYS Co., “ANSYS FLUENT Theory Guide Release 2020 R2”, 2020.
- 17) A. D. Birch, D. R. Brown, M. G. Dodson And F. Swaffield, “The Structure and Concentration Decay of High Pressure

- Jets of Natural Gas”, *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 36, No. 5-6, pp. 249-261, 1984.
- 18) X. Li, D. M. Christopher, E. S. Hecht and I. W. Ekoto, “Comparison of Two-layer Model for Hydrogen and Helium Jets with Notional Nozzle Model Predictions and Experimental Data for Pressures Up to 35 MPa”, *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 42 No. 11, pp. 7457-7466, 2017.
- 19) W. Houf and R. Schefer, “Analytical and Experimental Investigation of Small-scale Unintended Releases of Hydrogen”, *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 33, No. 4, pp. 1435-1444, 2008.
- 20) X. Yu, W. Yan, Y. Liu, P. Zhou and B. Li, C. Wang, “The Flame Mitigation Effect of Vertical Barrier Wall in Hydrogen Refueling Stations”, *Fuel*, Vol. 315, 123265, 2022
- 21) U. S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, “<https://www.osti.gov/biblio/1832082>”, Retrieved on 10.12.2022
- 22) J. LaChance, A. Tchouvelev and A. Engebo, “Development of Uniform Harm Criteria for use in Quantitative Risk Analysis of the Hydrogen Infrastructure”, *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 36, Issue 3, pp. 2381-2388, 2011.
- 23) Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), “[https://www.motie.go.kr/motie/nc/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs\\_seq\\_n=165454&bbs\\_cd\\_n=81&currentPage=1&search\\_key\\_n=title\\_v&cate\\_n=&dept\\_v=&search\\_val\\_v=%ED%95%9C%EA%B5%AD%EC%9D%B8%20%ED%8F%89%EA%B7%A0%20%ED%82%A4](https://www.motie.go.kr/motie/nc/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=165454&bbs_cd_n=81&currentPage=1&search_key_n=title_v&cate_n=&dept_v=&search_val_v=%ED%95%9C%EA%B5%AD%EC%9D%B8%20%ED%8F%89%EA%B7%A0%20%ED%82%A4)”, Retrieved on 03.31.2022.
- 24) G. F. Morales, B. D. Ehrhart and A. B. Mura, “HyRAM V2.0 User Guide”, SANDIA Report, SAND219-8940, Sandia National Laboratories, USA, 2019.
- 25) P. Blanc-Vannet, S. Jallais, B. Fuster, F. Fouillen, D. Halm, T. van Eekelen, S. Welch, P. Breuer and S. Hawksworth, “Fire Tests Carried Out in FCH JU Firecomp Project, Recommendations and Application to Safety of Gas Storage Systems”, *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 44, Issue 17, pp. 9100-9109, 2019.
- 26) ISO 5660-1:2015, Reaction-to-fire tests — Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate — Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method) and Smoke Production Rate (Dynamic Measurement), International Standard Organization (ISO), Switzerland, 2015.