[Research Paper]

수소제트화염 주위의 거리에 따른 열적효과에 관한 실험연구

권오승[†] · 조건호 · 박경환^{*}(주)영설에프엔씨 기업부설연구소 연구원, ^{*}(사)한국안전인증원 연구소 연구소장

Experimental Study on the Thermal Effect according to the Distance around a Hydrogen Jet Flame

Ohseung Kwon[†] · Keonho Cho · Kyung-Hwan Park^{*}

Researcher, R&D Center, Young Design F&C Co., Ltd.,

^{*}Director, R&D Center, Korea Safety Certification Institute

(Received November 5, 2021; Revised November 23, 2021; Accepted November 29, 2021)

요 약

본 연구는 수소차량의 화재 시 수소저장용기의 온도감응식 압력안전장치(TPRD) 작동에 의하여 형성되는 수소가스 제트화염 주위의 온도분포에 따른 안전거리를 분석하기 위한 것이다. 실험은 구경 1.8 mm의 노즐에서 이격거리 2 m와 4 m 위치에 설치된 1.8 m × 1.8 m 내화구조의 벽에 약 70 MPa의 압력으로 수소가스를 방출하는 조건으로 2회 실시하였다. 수소가스 제트화염 주위의 온도를 분석하기 위하여, 한국소방산업기술원(KFI)에서 성능인증을 받은 소방용 방열두건 실험체와 온도센서 5개를 제트화염의 중심으로부터 수평 이격거리 1 m 마다 1개씩 설치하였다. 실험에서는 소방대원의 안전거리를 관찰하기 위해 제트화염 주위의 온도를 측정하였다. 그 결과 소방대원에게 무해한 70 °C 이하의 안전거리는 방열후드를 착용하지 않은 경우 5 m, 방열후드를 착용한 경우 3 m인 것으로 나타났다. 또한 제트화염 방향과 장애물에 의한 차단 등이 소방대원의 소화활동과 구조활동을 위한 안전거리에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

In this study, the safe distance in the case of a hydrogen vehicle fire was analyzed according to the temperature distribution around a hydrogen gas jet flame formed by the thermally activated pressure relief device operation of a hydrogen storage container. The experiment was conducted while 70 MPa hydrogen gas was released from a 1.8-mm-diameter nozzle to a 1.8- × 1.8 m fire-resistant structure wall for distances of 2 and 4 m between the nozzle output and the wall. To analyze the temperature around the hydrogen gas jet flame, five fire-fighting heat-protective hood test samples, certified by the Korea Fire Institute, and temperature sensors were installed every 1 m from the center of the jet flame in the vertical direction to the direction of the flame. In the experiment, the temperature around the jet flame was measured to observe the safe distance for firefighters. The results show that the safe distances at 70°C or less, which is harmless to firefighters, were 5 m without a heat-protective hood and 3 m with a heat-protective hood. In addition, it was confirmed that the direction of the jet flame and blocking by obstacles affect the safe distance during fire-fighting and rescue activities by firefighters.

Keywords: Hydrogen vehicle fire, Hydrogen jet flame, Fire-fighting heat protective hood, Thermally-activated pressure relief device, Safe distance for fire fighting

1. 서 론

국내 수소연료전지차량의 생산과 보급이 증가하면서 시험용 수소충전소에서 폭발사고가 발생하였고, 이 사건을

통해 수소차량에서 발생하는 사고에 대한 관심도 증가하고 있다. 수소연료와 관련된 사고는 수소연료의 생산과 저장 과정, 충전소에서 수소연료를 차량에 주입하는 과정, 수소연료를 대형 트레일러를 통한 운반하는 과정에서 발생하는

[†] Corresponding Author, TEL: +82-31-784-0209, FAX: +82-31-463-1198, E-Mail: ohsdkwon@yfeng.co.kr

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

사고 및 수소연료전지차량 자체에서 발생한다. 특히 수소연료전지차량의 사고시 초기에 출동하여 대응해야 하는 소방대원에게 수소가스의 제트화염은 탄화수소계 가스 또는 액체위험물의 화염과 달리 주간에 육안으로 화염을 볼 수 없어 큰 위험을 초래할 수 있다. 따라서 수소차량의 위험에 대응할 수 있는 기초적인 지식과 대응매뉴얼 등 일반화재와 다른 준비가 필요하다.

이와 관련하여 본 연구에서는 수소연료전지차량의 여러 위험 중 제트화염을 분출하는 화재가 발생할 때 소방대원의 안전한 소방활동을 위하여 사용하는 보호장비 중 안면두건에 미치는 열적 영향을 고찰하였고, 이 실험을 통해서 수소연료전지차량 화재시 제트화염을 고려하여 소방대원이 확보해야 하는 안전거리 범위를 제안하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 수소 특성

수소의 물리화학적 특성은 Table 1과 같다. 수소가스는 점화에너지가 매우 낮기 때문에 고압방출시 발생하는 마찰로 인한 자기발화의 위험성이 높다. 다만 수소가스의 연료계통에서 발생하는 작은 누출은 비중이 매우 작고 부양속도가 크고, 확산이 빠르게 이루어진다는 특징을 가지고 있다⁽¹⁾.

2.2 제트화염 위험성과 안전기준

고압의 저장용기에서 분출되는 수소가스는 운동량이 초음속 이상이 되면서 강한 제트흐름을 생성시킨다. 제트화염의 위험성은 일반적으로 고온에 의한 영향과 복사열에 의한 영향이 있다.

특히 수소연료는 유리탄소가 발생하지 않기 때문에 복사분율은 작지만 고온에 의한 영향으로 복사열도 상당히 발생된다. Kim 등⁽²⁾은 수소차량 TPRD 작동시 최대화염은 7 m, 너비는 1 m 였고 온도는 900 °C로 발표하였으며, Kang과 Lee⁽³⁾는 복사열에 대한 안전수준의 평가기준으로 40 s 동안 5 kW/m²로 설정하였다.

또한 소방대원에 대한 복사열에 대한 안전기준은 Makarov와 Tretyakova⁽⁴⁾의 자료를 참고할 수 있으며, 안전온도 기준은 ISO 19880-1. gaseous hydrogen-fueling stations. Part 1에서 위험거리(hazard distance)의 기준으로 3가지 온도영역을 Table 2와 같이 제시하고 있다⁽⁵⁾.

2.3 소방용 방열두건 기준

수소연료전지차량의 화재발생 시 초기 대응에 참여하는 소방대원을 위한 보호장구류는 안전기준을 만족해야 하며^(6,7), 보호장구류의 기준 중 소방용 방열두건에 부착된 안면렌즈는 Table 3과 같이 3가지 기준을 충족해야 한다.

특히 열통과시험은 온도 (20 ± 2) °C인 실내에서 안면렌즈의 표면에 0.3 cal/cm²·sec의 방사열을 4 min 간 가하였을 때 안면렌즈 이면의 온도상승이 50 °C를 초과하는지를 확인한다.

Table 1. Physicochemical Properties of Hydrogen Gas

Division	Contents
Density	83.764 g/m ³ (0 °C, 1 atm)
Specific weight	0.0695
Diffusion coefficient	0.710
Flammability limits	4.1~74.8% (101.3 kPa)
Auto Ignition temperature	773~850 K (at atmosphere)

Table 2. Hazard Characteristics by Ambient Temperature

Temperature	Hazard characteristics
70 °C	“No harm” limit
115 °C	Pain limit for 5 min exposure
309 °C	Third degree burns for a 20 s exposure (“death” limit)

Table 3. Test Requirements for Facial Lens

Test items	Test requirements
Impact resistance test	There shall be no cracks or breakage
Light transmittance test	It should be suitable for light transmittance test
Radiant heat transmittance test	The temperature rise on the back of the facial lens should not be exceed 50 °C

즉, 국내기준에서는 안면렌즈 이면의 온도가 4 min 이내에 (70 ± 2) °C에 도달하는지 여부를 확인하는 시험으로서 방열두건 내부의 최고온도를 70 °C로 제한하고 있다⁽⁷⁾.

그러므로, 본 연구에서는 소방대원의 안전한 소화 및 구조활동을 위한 화염 주위의 최고온도를 70 °C로 정하여 안전거리를 고찰하였다.

또한, 소방용 안전헬멧의 성능과 관련하여 Hong 등⁽⁸⁾은 KFI 기준 등 국내외 기준을 비교하는 연구를 통해 안전헬멧에 대한 시험기준을 제시하였으며, Table 4는 한국, 미국, 유럽의 주요성능기준을 비교한 것이다^(9,10,11).

3. 수소가스 제트화염실험

3.1 실험 개요

실험은 1차와 2차에 걸쳐 수행되었고, 제트화염 전방 2 m와 4 m 지점에 1.8 m × 1.8 m 내화구조의 벽을 각각 설치하고 실험을 실시하였다⁽¹²⁾. 실험체는 Figure 1과 같이 제트화염의 중심으로부터 수평 직각방향으로 1 m 간격으로 5개를 설치하였고, 제트화염의 중심으로부터 방출되는 복사열이 앞에 설치된 실험체에 의하여 차단되지 않고 각 실험체에 전달될 수 있도록 높이 0.5 m~1.8 m 사이에 실험체를 배치하였다. 제트화염으로부터 방출되는 대류 및 복사 열

Table 4. Comparison of Performance Test Criteria for Safety Helmets

Items	KFI ⁽⁹⁾	NFPA 1971 ⁽¹⁰⁾	EN 443 ⁽¹¹⁾
Burning behavior	Contact a flame for 30 s char length ≤ 25 mm	Contact a flame for 15 s shall not show any visible after flame or glow after a period of 5 s has elapsed after removal of the flame	Shall not show any drip during the whole test and any visible flame or glow after 5 s following removal of the flame
Heat penetration	Exposure at 260 °C for 5 min shall be no separation melting, dripping or deformation

Figure 1. View of test sample and thermocouple installation (Left; 1st test, Right; 2st test), (Outside the facial lens; No. ①③⑤⑦⑨, Inside the facial lens; No. ②④⑥⑧⑩). **Figure 2.** Test sample and radiant heat transducer.

에 의한 주위온도를 거리별로 측정하기 위하여 Figure 2와 같이 실험체의 안면렌즈 외부표면 상부 및 내부표면 중앙에 온도센서를 설치하여 온도를 측정하였다.

온도센서는 NFPA 1971 Section 8.1.6 에서 정하는 소방용 헬멧의 성능검증을 위하여 헬멧이 받는 열노출을 모니터링하기 위해 사용하는 복사열 변환기(radiant heat transducer)의 구조 및 원리를 적용하였다⁽¹⁰⁾. 동판(copper plate)은 NFPA 1971에 따라 50 mm × 50 mm 크기의 동판을 선정하였고, 동판 자체의 축열량을 적게 하기 위해 두께 0.1 mm의 동판을 사용하였다. 열전대(K Type)는 NFPA 1971에 따른 위치 및 방법으로 상기 동판에 무연은납으로 납땜하여 온도를

측정할 수 있도록 하였고, 동판의 복사열 흡수를 용이하게 하기 위하여 동판표면에 흑색 도장마감하였다. 실험체는 소방용 보호장구류 중에서 고온의 열이 발생하는 장소에서 사용하는 소방용 방열두건으로 Figure 2와 같이 소방산업기술원에서 성능인증⁽⁷⁾을 받은 제품을 선정하였다.

방열두건 실험체 내부의 공기체적을 일정하게 유지하기 위하여, 얼굴모형으로 제작된 머리둘레 530 mm, 두상 높이 280 mm의 플라스틱 두상에 흰색 니트원단을 씌운 두상마네킹을 방열두건 실험체 내부에 설치하였으며, 실험 중 실험체 내부 조건을 동일하게 유지하기 위하여 안면렌즈 내부에 온도센서를 부착한 후 실험체 하단을 테이프로 봉입하였다.

실험용 노즐은 구경 1.8 mm의 노즐을 사용하였고, 방출 압력은 Figures 3, 4와 같이 저장용기의 최대충전압력 상태인 약 70 MPa (700 bar)의 압력으로 수소가스를 방출하여 실험을 실시하였다⁽¹²⁾.

실험을 주간에 실시한 관계로 수소가스 제트화염의 방출형태를 확인하기 위해 열화상 카메라를 사용하였으며, Figure 5는 1차와 2차 실험 중의 제트화염 방출형태이다⁽¹²⁾.

3.2 실험 결과

실험을 통해서, 방열두건의 전면부인 안면렌즈의 외부와 내부에 부착한 온도센서의 거리별 온도를 측정하였다. 먼

Figure 3. Pressure and flow rate change with time (1st test).

Figure 4. Pressure and flow rate change with time (2nd test).

저 Figure 6은 1차실험 중 제트화염 중심에서 거리별로 측정된 안면렌즈 외부의 시간에 따른 온도변화이다. Figure 6에서 1번센서(1 m 위치)는 19 s에 283.9 °C를 기록하였지만 고온에 의하여 측정부위가 탈락하였다. 3번센서(2 m 위치)도 13 s에 201.8 °C를 기록하고 측정부위가 탈락하였다. 5번센서(3 m 위치)는 103 s에 최고온도 101.2 °C를, 7번센서(4 m 위치)는 105 s에 최고온도 71.2 °C를 각각 도달하였다. 9번센서(5 m 위치)는 89 s에 53.0 °C에 도달하였다.

Figure 5. Shape of hydrogen jet flame (Left; 1st test, Right; 2nd test).

Figure 6. Temperature distribution of the outer surface of the facial lens by distance (1st test).

Figure 7. Temperature distribution of the inner surface of the facial lens by distance (2nd test).

Figure 7은 1차 실험 중 거리별 안면렌즈 내부의 시간에 따른 온도변화를 보여준다.

2번센서(1 m 위치)는 176.9 °C, 4번센서(2 m 위치)는 116.2 °C를 실험종료 시간에 기록하였다. 6번센서(3 m 위치), 8번센서(4 m 위치), 10번센서(5 m 위치)는 각각 56.3 °C, 45.0 °C 및 40.0 °C에 도달하였으며, 안면렌즈 외부 및 내부의 1차 실험결과를 Table 5에 요약하였다.

Figure 8은 2차실험에서 제트화염 중심에서 거리별로 측정된 안면렌즈 외부의 온도변화이다.

1번센서(1 m 이격)는 73 s에 211.9 °C를 기록하였다. 3번센서(2 m 이격)는 78 s에 최고온도 125.2 °C를 기록하고 측정부위가 탈락하였다. 5번센서(3 m)는 75 s에 최고온도 84.1 °C, 7번센서(4 m)는 83 s에 최고온도 60.3 °C를 도달하였고, 9번센서는 83 s에 45.0 °C에 도달하였다.

Figure 9는 2차실험 중 거리별 안면렌즈 내부의 시간에

Table 5. Facial Lens Temperature Measurement Result by Distance (1st test)

Separation distance (Sensor No.)	External maximum temp. (Time)	Internal maximum temp. (Time)
1m (No1, No2)	283.9 °C (19 s)	176.9 °C (360 s)
2m (No3, No4)	201.8 °C (13 s)	116.2 °C (360 s)
3m (No5, No6)	101.2 °C (103 s)	56.3 °C (360 s)
4m (No7, No8)	71.2 °C (105 s)	45.0 °C (360 s)
5m (No9, No10)	53.0 °C (89 s)	40.0 °C (360 s)

Table 6. Facial Lens Temperature Measurement Result by Distance (2nd test)

Separation distance (Sensor No.)	External maximum temp. (Time)	Internal maximum temp. (Time)
1m (No1, No2)	211.9 °C (73 s)	78.5 °C (360 s)
2m (No3, No4)	125.2 °C (78 s)	48.0 °C (360 s)
3m (No5, No6)	84.1 °C (75 s)	44.5 °C (360 s)
4m (No7, No8)	60.3 °C (83 s)	36.2 °C (360 s)
5m (No9, No10)	45.0 °C (83 s)	32.6 °C (360 s)

Figure 8. Temperature distribution of the outer surface of the facial lens by distance (2nd test). **Figure 9.** Temperature distribution of the inner surface of the facial lens by distance (2nd test).

따른 온도변화를 보여준다. 2번센서(1 m 이격)는 78.5 °C를, 4번센서(2 m 이격)는 48.0 °C를 실험종료 시간에 기록하였다. 6번센서(3 m), 8번센서(4 m), 10번센서(5 m)는 각각 44.5 °C, 36.2 °C 및 32.6 °C에 도달하였고, 안면렌즈 외부 및 내부의 2차실험의 결과를 Table 6에 요약하였다

상기와 같이 1차실험과 2차실험은 측정값에 큰 차이를 보이고 있으며, 이것은 Figure 5에서 알 수 있듯이 내화구조의 벽과 노즐의 이격거리가 2 m 인 1차실험에서는 벽에 충돌한 화염이 온도측정 부위에 영향을 미친 것으로 보인다. 즉 내화구조의 벽과 충돌한 화염이 확산하면서 2 m 이내 거리의 온도센서에 영향을 주었다고 판단된다.

이 결과는 실제로 대부분의 수소연료자동차의 TPRD가

작동하여 수소가스를 방출하는 제트화염이 장애물에 부딪치는 경우와 유사한 상황일 것이다. 따라서 내화구조의 벽과 노즐의 거리가 4 m인 2차실험의 결과는 제트화염의 직각방향의 열적효과라고 한다면, 1차실험은 장애물에 의한 복합효과라고 예상할 수 있다.

4. 결 론

수소연료전지차량의 화재사고로 발생할 수 있는 위험 중 제트화염 주위의 온도에 따른 안전거리를 분석하기 위하여 수소가스의 제트화염 실험을 실시하였다. 제트화염 주위에 실험용 소방용 방열두건 및 온도센서를 설치하여 방열두건 안면렌즈의 외부와 내부온도를 측정하였으며, 화염주위의 이격거리에 따른 온도분포 특성을 검토하여 소방대원의 안전한 소방활동을 위한 안전거리를 고찰하였다.

1) 소방대원의 안전거리를 관찰하기 위해 수소가스 제트화염 주위의 온도분포를 검토한 결과, 소방대원에게 무해한 70 °C 이하의 안전거리는 방열후드를 착용하지 않은 경우에는 5 m, 방열후드를 착용한 경우에는 3 m인 것으로 나타났다.

2) 노즐과 벽 사이의 이격거리 2 m 인 1차실험의 주위온도가 이격거리 4 m 인 2차실험의 주위온도보다 높았던 이유는 벽에 충돌한 화염이 온도센서에 영향을 미쳤기 때문이라고 판단되며, 노즐과 벽과의 이격거리가 가까워질수록 벽에 충돌한 화염에 의하여 주위온도가 급격히 상승할 수 있는 것으로 나타났다

3) 수소연료전지차량에서 발생할 수 있는 수소가스 제트화염의 방출방향과 장애물의 설치 여건이 소방대원의 소화활동 및 구조활동을 위한 안전거리에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

후 기

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

References

1. National Fire Protection Association, "Hydrogen Technologies Code", NFPA 2, pp. 20-25 (2020).
2. S. H. Kim, Y. M. Choi, K. H. Hwang, J. Y. Shim, I. C. Hwang and T. W. Lim, "The Evaluation of Fire Reliability for the High Pressure Hydrogen Storage System do Fuel Cell Vehicle", Transactions of the Korean hydrogen and new energy society, Vol. 22, No. 4, pp. 520-526 (2011). <https://doi.org/10.7316/khnes.2011.22.4.520>
3. B. W. Kang and T. H. Lee, "An Investigation of hazard distance in a Series of Hydrogen Jet Fire with the Hysam Tools", Transactions of the Korean hydrogen and new energy society, Vol. 28, No. 2, pp. 166-173 (2017). <https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.2.166>
4. D. Makarov and T. Tretsiakova, "Hydrogen Fires", HyResponse No 325348 (2006).
5. D. Makarov, V. Shentsov, M. Kuznetsov and V. Molkov, "Hydrogen Tank Rupture in Fire in the Open Atmosphere : Hazard Distance Defined by Fireball", Hydrogen, No. 2, pp. 134-146 (2021). <https://doi.org/10.3390/hydrogen2010008>
6. National Fire Agency, "Reflective Clothing for Specialized Fire-fighting", KFS 0037 (2020).
7. Korea Fire Institute, "Performance Certification and Product Inspection Test Rules for Heat Protective Clothing", KFI Rule (2021).
8. S. T. Hong, J. H. Jeong, S. Y. Kim and C. G. Kwon, "Performance Evaluation Criteria for Safety Helmets of Forest Firefighting Crews", Fire Science and Engineering, Vol. 33, No. 5, pp. 66-77 (2019). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2019.33.5.066>
9. Korea Fire Institute, "KFI Certification for Firefighting Safety Helmet", KFI Certification 81 (2014).
10. National Fire Protection Association, "Standard on Protective Ensembles for Structural Fire Fighting and Proximity Fire Fighting", NFPA 1971, pp. 35-46 (2018).
11. EN, "Helmets for fire fighting in buildings and other structures", EN 443 (2008).
12. J. O. Park and Y. H. Yoo, "Analysis on the Effects of Jet Flame of Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles in Semi-Enclosed Space", Proceeding of 2021 Autumn Annual Conference, Korean Auto - Vehicle Safety Association (2021).