

연료전지차량용 고압수소저장시스템의 화재 안전성 평가

최영민[†], 장규진^{*}, 김상현^{*}, 황기호^{*}, 황인철^{*}, 안병기^{*}, 임태원^{*}

^{*}현대기아자동차 연구개발본부

Fire Safety evaluation of High Pressure Hydrogen System for FCEV

YOUNGMIN CHOI[†], GYUJIN JANG^{*}, SANGHYUN KIM^{*}, KIHU HANG^{*},
INCHEOL HANG^{*}, BYUNGKI AHN^{*}, TAEWON LIM^{*}

^{*}Research & Development Division, Hyundai Motor Company
Mabuk-dong Giheung-gu, Youngin-Si, Gyeonggi-do, 440-746, Korea

ABSTRACT

Fuel cell vehicles are equipped with Pressure Relief Devices(PRDs) installed in pressure tank cylinder to prevent the explosion of the tank during a fire. PRDs are safety devices that perceive a fire and release gas in the pressure tank cylinder before it is exploded. But if the PRD does not actuate, because either the PRD fails or can't be surrounded by the flame of a fire, the tank will rupture and produce a blast wave and hydrogen fire ball. In this paper, we observed the fire behavior of actual fuel cell vehicle, comparing with that of gasoline vehicle.

KEY WORDS : Pressure relief devices(안전밸브), Bonfire test(화염폭로시험), Heat flux(열유속)

Nomenclature

A : heat flux, kW/m²

Subscripts

EV : electric vehicle

PHEV : plug in hybrid electric vehicle

FCEV : fuel cell electric vehicle

1. 서 론

환경오염과 화석에너지 고갈에 대한 우려로 최근 들어 친환경차량 개발에 대한 관심이 높아져가고 있다. 세계 각국에서는 전기차(EV), 플러그인 하이브리드(PHEV), 연료전지자동차(FCEV) 등의 환경차를 조기에 양산 개발하고자 노력하고 있다. 하지만 아직은 항속거리 및 충전시간이 기존의 내연기관의 차량 대비 열세여서 양산화하기까지는 조금 더 시간이 걸릴 듯하다. 현재 상기의 개발 차종 중에 항속거리가 가장 길고, 충전시간이 가장 짧은 것은 연료전지자동차이다. 따라서 연료전지

[†]Corresponding author : hsmile@hyundai.com

차량은 환경 차 최후의 승자로 인식되고 있다. 현대자동차는 연료전지 스택, 고압수소저장시스템 등 중요 요소기술 개발에 대한 독자기술력을 확보하고 있고, 또한 현대자동차가 개발한 연료전지자동차는 국내외의 실증사업에 성공적으로 참여하고 있다. 이러한 실증 사업 추진으로 연료전지차량이 국내외의 실도로 상에서 주행하는 경우가 빈번해졌다. 연료전지차량은 압축한 수소를 연료로, 공기 중의 산소와 반응시켜 전기를 발생시켜 그 에너지를 이용하여 주행하는 것이다. 수소는 가연범위가 넓고 연소화염 전파속도가 매우 빠른 가연성 가스이고, 이를 연료전지차량에 고압 용기 형태로 탑재하여 연료를 공급하기 위해서는 고압수소저장시스템에 대한 각별한 안전 대책이 필요하다. 즉 연료전지자동차용 고압수소저장시스템에 대하여 차량의 운행기간 동안에 충분한 내구 수명을 갖고 있어, 수소 누출 및 파손 없이 제 성능을 만족해야 함은 물론 연료전지차량의 화재 시¹⁾와 같은 특별한 경우에서의 안전성에 대한 검토도 필요한 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 이전까지의 연료전지차량용 고압수소저장시스템의 진동내구/충돌 성능등과 같은 내구평가에 대한 결과 보고²⁾에 이어서, 차량 운행시 화재와 같은 특별한 경우의 안전성에 대하여 이미 실용화된 가솔린자동차와의 비교 평가를 통하여 화재 안전성에 대하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치 및 실험방법

수소탱크를 장착한 연료전지차의 화재안전성을 고찰해보기 위해 차량에 화재를 일으켜 여러 가지 특성을 관찰해 보았다. 이 때 상용차량과의 비교를 위해 동종의 가솔린 차량도 함께 실험하였다. 실험은 차 내부 중앙의 캡슐더 부위에 착화하여 시간에 따른 차량내부와 연료탱크 주변의 온도변화, PRD의 동작여부, 동작시 PRD 주위온도 및 탱크 내부 압력, 화재로부터 방출되는 복사열유속 등의 관찰하였으며, 이때 사용한 측정 방법은 문헌을 참조하



Fig. 1 Test set-up.

였다³⁻⁷⁾.

2.1.1 방호벽 및 차량거치대

차량 및 연료탱크의 연소를 위한 공간은 폭발 등 만약의 경우를 대비해 시험체 주위에 방호벽을 설치하였다. 방호벽은 두께 1m, 높이 2m의 콘크리트 재질로 된 대형 조립식 벽돌로 제작하였으며 한 변의 길이가 10m이고, 시험체 거치 및 화재 실험 시 낙하물 등의 뒤처리를 위해 대형 팬을 설치하였다.

2.1.2 데이터 수집장치

1) 온도 및 압력측정

화재실험시 연료탱크 및 차량내부의 온도측정을 위해 K형 열전대를 설치하고, 탱크내부의 압력 변화는 탱크에 설치된 압력센서의 전압신호를 받아 각각 A/D보드를 거쳐 휴대용 PC에서 실시간으로 계측 및 저장하였다. 차량화재실험에서 온도 측정은 내부 실내온도 두 곳(천장 및 바닥)과 탱크 주변 12곳(탱크 당 4곳) 외에 연료주입구(가솔린차)의 온도도 측정하였다.

2) 소음측정

차량화재 실험 시 탱크에서 가스가 분출할 때의 소음과 폭발하는 경우의 폭발음을 측정하기 위해 소음계(데시벨미터) 두 대를 소음원에서 4m 떨어진 곳에 설치하여 최대 소음을 계측하였다.

3) 복사열유속

차량화재나 폭발시 발생하는 고온의 화염에 의



Fig. 2 Ignition location.



Fig. 3 Bonfire test.

한 화재위험성을 알아보기 위하여 그림과 같이 차량 옆면으로부터 1.5m 지점에 복사열유속 센서를 설치하여 고열의 화염으로부터 방출되는 복사열의 세기를 측정하였다. 실험에 사용한 센서는 MED-THERM사에서 제조한 수냉방식의 64-100-20모델이며, 최대 측정 열유속은 $1000\text{kW}/\text{m}^2$ 이다. 무향 풍동인 HAWT 및 DAWT에서의 유속은 $V=30.6\text{m}/\text{s}$ 로 동일하다.

4) 비디오 및 폐쇄회로 카메라 촬영

화재실험장면의 녹화를 위해 차량 좌측과 후방에 캠코더를 설치하여 촬영하였다. 또한 사방에서의 정확한 영상정보를 취득하기 위해 방호벽 위에 전후 좌우로 폐쇄회로 카메라 4대를 설치하였다.

2.1.3 실험 샘플

실험에 이용된 샘플은 현대자동차 연료전지차량에 사용된 차체에 고압수소용기를 장착(74L×1개

+39L×2)하여 탱크 장착 차량과 가솔린차량과의 화재 비교를 행하였다 점화 위치는 Fig. 2와 같이 재떨이 위에 설치한 탈지면을 알콜계 연료로 적신 후 가스점화기를 사용 직접 착화하였다. 화재시 차량의 운전석 및 조수석의 창을 열어 놓아 실제 화재 상황을 모사하였다. 시험시간을 단축하기 위하여 연료전지차량의 경우에는 PRD 작동 후, 시험차량에 장착되어있는 용기에 가스가 모두 방출되었음을 압력 모니터로 확인한 후, 대기하고 있는 소방관들에 의해서 소화시키는 것으로 진행하였다.

또한 고압용기 단품에 대한 화염폭로시험(bonfire test)이 차량 화재 시에 있어서도 안전성을 보증할 수 있는 시험인지, 비교 검토하기 위하여 Fig. 3과 같이 현재 양산차에 장착되고 있는 CNG 탱크와 연료전지차량에 장착되고 있는 수소탱크를 범규시험인 화염폭로시험 방법에 의하여 시험하였다. PRD 벤트관이 화염 밖에 설치되어 분출가스가 화염 밖에서 배기되도록하는 기존의 방법과는 달리, 본시험에서는 벤트관을 화염속에 넣어 벤트시 화염이 생기도록 하였다.

2.2 시험결과

2.2.1 화재현황 및 탱크 주변 온도 변화

가솔린차 및 연료전지차의 화재실험은 차량내부에서 발화된 화염이 자유연소를 한 뒤 점차 확대되어 전소할 때까지 실험을 진행하였으며, 이 과정에서 연료탱크에 불이 옮겨 붙어 폭발하거나 또는 안전장치가 동작하여 화염이 분출되는 현상을 면밀히 관찰하였다. 이 화재 상황을 Fig. 4과 Fig. 5에 나타내었다. 가솔린차량과 연료전지차량을 비교하면, 최대 화염 폭과 높이는 수소 쪽이 높았으나, 불의 세기(火勢期)의 지속 시간은 가솔린차 쪽이 더 오래 지속되었다. 이와 같은 결과는 일본 등에서 발표한 내용과 일치함을 알 수 있었다⁸⁾. 실험이 끝난후 차체의 소손정도를 비교하고자 하였으나, 가솔린차량의 경우는 강판 차체이고, 연료전지차량의 경우는 AI 차체 적용이라 단순 비교가 어려웠다.

Fig. 6에서의 가솔린차는 실험을 시작한지 약

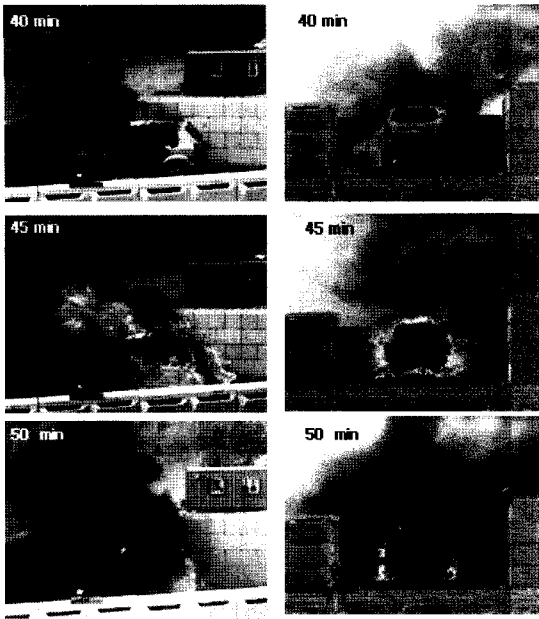


Fig. 4 Fire status of the gasoline vehicle.

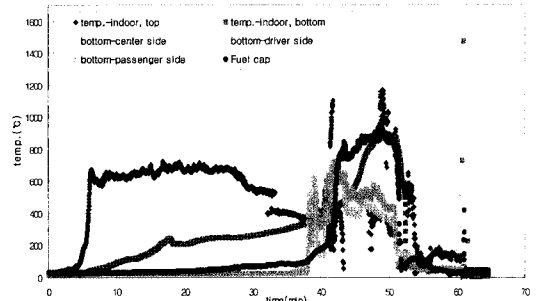


Fig. 6 Fuel tank vicinity temp. of the gasoline vehicle.

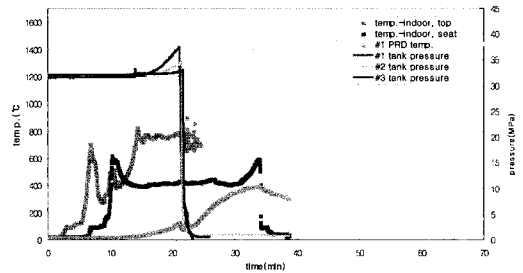


Fig. 7 Type3 tank cylinder vicinity temp. of the fuel cell vehicle.

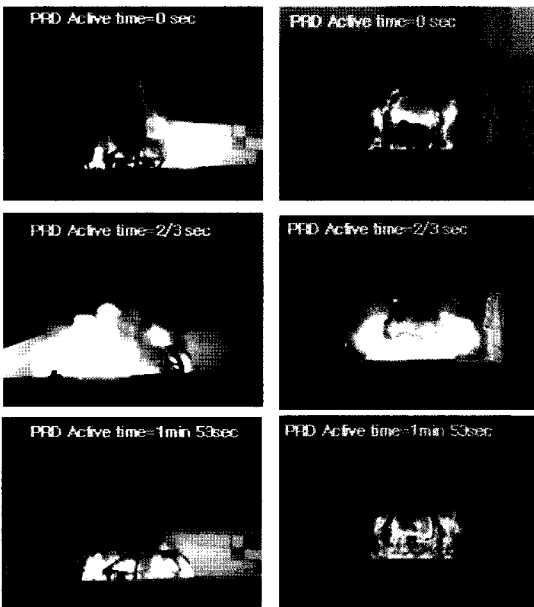


Fig. 5 Fire status of the fuel cell vehicle.

40분경에 연료탱크가 폭발하며 주위온도가 급격히 상승하였고 Fuel cap 주변의 온도는 최대 1000°C

정도 였다. Fig. 7의 연료전차는 실험시작 한지 21분 30초에 PRD밸브 작동으로 인하여 가스가 배출되어 압력이 급격하게 감소하였고 화염이 분출되었다.

2.2.2 복사열유속 및 소음특성

화재실험 동안 고온의 화염으로부터 다량의 복사열이 방출되었으며 차량에서 1.5m 떨어진 곳에서 측정된 복사열유속의 변화를 Fig. 8에 나타냈다. 가솔린차량의 경우, 장시간에 걸쳐서 연료(가솔린)를 동반하는 화염이 연속되고 있는 것을 보여준다. 연료전지차량의 경우, PRD 작동 직후 피크가 나타나며 빠른 수소 방출로 인해 화염지속시간이 짧았다. 따라서 연료전지차량의 불 세기의 크기와 지속시간이 가솔린차량 대비 다소 적어 안전 신뢰성 측면에서 유리하다고 판단된다. 또한 비교 차량 별로 화재시험 중에 소음원에서 4m 떨어진

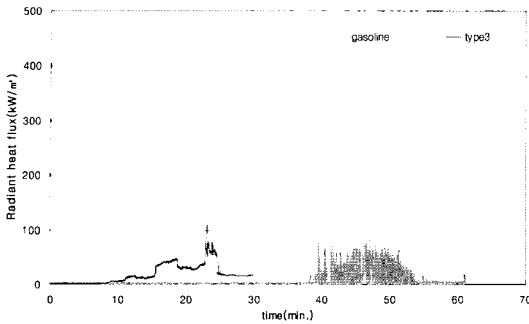


Fig. 8 Evaluation of the heat flux for gasoline vehicle and fuel cell vehicle.

Table 1 Sound pressure level

구분	Gas. vehicle	Fuel cell vehicle
Max.(dB)	127	131

Table 2 The status of high pressure tanks

구분)	충전압 (MPa)	PRD 동작시간	PRD동작 주위온도 (°C)	동작시 탱크압력 (MPa)
1 CNG 탱크	15.2	60초	220	15.2
2 Type3 탱크	33.7	100초	450 ~500	36.6
3 Type3 탑재차량	32.0	21분30초	121	37.5

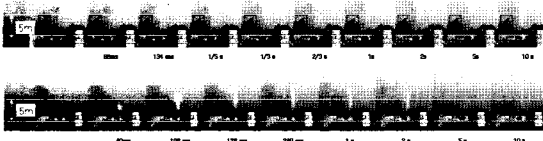


Fig. 9 Height of gas flame for CNG tank and hydrogen type3 tank.

곳에서의 최대 음압 레벨을 측정하여 소음 크기를 비교하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 가솔린 차량의 음압 레벨은 127dB 정도였고, 연료전지차량은 이보다 다소 큰 131dB 이었다.

2.2.3 고압용기 단품에 대한 화염폭로 특성 비교

각 연료탱크에 대한 가열실험에서 탱크 및 PRD 주변의 온도와 PRD 동작시간, 동작시 탱크 압력 등을 관찰하였다. Table 2에 시험 결과를 요약하였다. 실험에서 감열부가 상대적으로 많이 노출되어 있는 CNG 탱크의 안전장치가 가장 빨리 동작하였으며 이 때의 주위온도는 약 220~230°C 였고, 수소탱크는 밸브 바디 내에 PRD가 장착되어 있어 상대적으로 동작 시간도 길었으며 더 높은 주위 온도에서 동작하였다. 한편 고압용기 탑재차량의 경우에는 PRD 동작시 시간은 매우 길었으나 주위 온도가 단품 상태의 화염 노출 시험에 비교하여 매우 낮은 온도를 나타낸다. 이것은 화염이 PRD에 직접 닿는 단품 화염 폭로 시험과는 달리, 실제의 차량 화재 시에는 PRD 근처로 화염이 닿지 않는 경우가 발생하여 온도는 높지 않으면서 가열시간을 길게 하여 PRD 작동하게 하는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 연료에 따른 화염 분출시 특성을 보여준다. 수소화염이 CNG에 비해 화염의 길이와 폭이 작게 나타났다. 15.2 MPa의 CNG 탱크 약 8m로 나타났다. 이것은 수소가 연소 속도가 월등히 빨라서 나타나는 현상으로 생각된다.

3. 결 론

고압용기가 탑재된 차량에 화재가 발생하였을 때 PRD 작동 거동 및 화재 상황을 관찰하여, 이미 실용화 되고 있는 가솔린 자동차와의 비교평가를 통하여 PRD와 용기를 조합해 완성한 용기의 건전성을 확인하고자 하였다. 그 결과를 아래와 같이 요약하였다.

- 1) 화재 발생시 화력이 특히 커지는 때는 가솔린 차량의 경우 연료탱크에 불이 붙었을 때이고, 연료전지차량의 경우에는 PRD가 작동하여 수소가스가 배출될 때였다. 이것은 각각 가솔린차량이 40분 후, 연료전지차량이 21분 30초 후에

일어났다.

- 2) 차량근처에서 사람이 존재할 경우의 화상에 대하여 검토하기 위하여 1.5 m 떨어진 곳에서의 최대 복사열유속을 측정하였는데 약 100kW/m²의 결과를 얻을 수 있었고, 이는 가솔린 차량과 동등 수준이었음을 알 수 있었다.
- 3) 화염의 규모와 지속 시간은 가솔린차량 대비 연료전지차량이 작았다. 특히 화염 지속시간은 가솔린 차량이 월등하게 길어 연료전지차량의 화재 안전성의 척도는 동등 이상 수준이라고 생각된다.
- 4) 고압용기 단품에 대한 화염폭로시험(Bonfire test)이 차량 화재 시에 있어서도 안전성을 보증할 수 있는 시험인지, 비교 검토하기 위하여 고압 단품 용기에 대하여 시험한 결과, PRD 작동시 근처의 온도가 단품과 차량이 다소 상이하여 고압용기 단품에 대한 화염폭로시험에 대한 시험방법의 재고가 필요하다고 생각된다.

후 기

본 연구 내용으로 연료전지차량의 화재 발생 시 화재 거동을 이해하는데 큰 도움이 되었으며, 이러한 과정은 연료전지차의 상용화를 앞당기기 위해 무척 유용하고 소중한 밑거름이 될 것으로 판단된다. 아울러 본 연구는 지식경제부 신재생에너지개발사업의 프로젝트개발사업내, “연료전지차량용 고압수소저장시스템 개발 및 실증”과제의 일환으로 수행한 결과로서, 이 같은 성과를 낼 수 있도록 지원을 하여주신 지식경제부, 에너지관리공단 관계자 분들에게 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 오규형, 이성은, 김태훈, “수소의 화재 및 폭발 특성에 관한 연구”, 한국화재소방학회 추계 학술대회지, 2004: pp. 50-53.
- 2) 장규진, 최영민, 안병기, 임태원, “연료전지 자동차의 고압수소저장시스템 신뢰성 평가”, 한국수소 및 신에너지학회논문집, Vol. 19, No. 9, pp. 266-275.
- 3) Zalosh, R. and N. Weyandt, “Hydrogen Fuel Tank Fire Exposure Burst Test.” SAE paper No. 2005-01-1886, 2005.
- 4) Weyandt, N., “Intentional Failure of a 5000 psig Hydrogen Cylinder Installed in an SUV Without Standard Required Safety Devices” SAE paper No. 2007-01-0431, 2007.
- 5) Houf, W. and R. Schefer, Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, 2007. 32(1): pp. 136-151.
- 6) Weyandt, N., Vehicle Bonfire to Induce Catastrophic Failure of a 5000 psig Hydrogen Cylinder Installed on a Typical SUV. 2006, Southwest Research Institute Report for the Motor Vehicle Fire Research Institute.
- 7) Odegard Jr, B. and G. Thomas. “Testing of High Pressure Hydrogen Composite Tanks”, Proceedings of the DOE hydrogen Program Review NREL/CP-570-30535, 2001.
- 8) 日本自動車研究所, “自動車用固体高分子燃料電池の普及基盤整備: 燃料電池自動車の安全性試験法に関する調査”, NEDO 0400970-0-3, 2004.