

## 연료전지자동차의 고압수소저장시스템 국부화재 신뢰성 평가 (I)

김상현<sup>†</sup>, 최영민\*, 황기호\*, 심지현\*, 황인철\*, 임태원\*

\*현대자동차 연구개발총괄본부

## The Evaluation of Fire Reliability for the High Pressure Hydrogen Storage System of Fuel Cell Vehicle (I)

SANGHYUN KIM<sup>†</sup>, YOUNGMIN CHOI\*, KIHONG HANG\*, JIHYUN SHIM\*, INCHEOL HANG\*, TAEWON LIM\*

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

### ABSTRACT

In recent years, it is very important that hydrogen storage system is safe for user in any circumstances in case of crash and fire. Because the hydrogen vehicle usually carry high pressurized cylinders, it is necessary to do safety design for fire. The Global Technical Regulation (GTR) has been enacted for localized and engulfing fire test. High pressure hydrogen storage system of fuel cell electrical vehicles are equipped with Thermal Pressure Relief Device (TPRD) installed in pressured tank cylinder to prevent the explosion of the tank during a fire. TPRDs are safety devices that perceive a fire and release gas in the pressure tank cylinder before it is exploded. In this paper, we observed the localized and engulfing behavior of tank safety, regarding the difference of size and types of the tanks in accordance with GTR.

**KEY WORDS** : High pressure hydrogen storage system(고압수소저장시스템), Fuel cell vehicle(연료전지 자동차), High pressure tank(고압탱크), Fire(화재)

### Nomenclature

A : area, m<sup>2</sup>  
C : sonic velocity, m/s

### Subscripts

TPRD : temperature pressure relief device

GTR : global technical regulation

## 1. 서 론

환경오염에 대한 규제가 강화되고 한정된 석유자원의 고갈로 인하여 전 세계적으로 친환경차량 개발에 대한 관심이 높아지고 있는 추세이다. 친환경차량에는 전기차(EV), 플러그인하이브리드(PHEV), 연료전지자동차(FCEV)로 구분될 수 있다. 이 중 연료전지자동차는 궁극적인 친환경차량이며 미국 일

<sup>†</sup>Corresponding author : sanghyun@hyundai.com  
[ 접수일 : 2011.8.1 수정일 : 2011.8.18 게재확정일 : 2011.8.22 ]

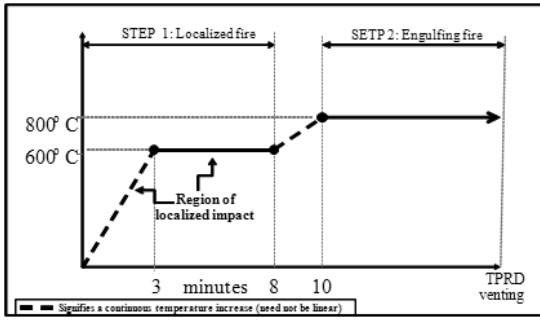


Fig. 1 The test procedure of localized and engulfing fire by GTR (Global Technical Regulation)

본등 차량 개발뿐만 아니라 도로실증을 통한 양산화에 주력하고 있다. 물론 연료전지자동차의 양산화까지는 충전인프라의 구축, 등등의 많은 문제점이 해결되어야 하는 현실이다.

연료전지자동차의 수소저장방식은 고압압축형식이며 알루미늄 라이너에 카본파이버를 감은 TYPE 3와 플라스틱 라이너에 카본파이버를 감은 TYPE 4의 탱크에 35MPa 또는 70MPa의 압력으로 수소를 압축한 형태로 저장된다. 스틸에 몸통부분만 유리섬유를 감은 CNG 탱크보다 보다 더 안전한 탱크이다.

최근 전 세계적으로 연료전지자동차의 수소저장시스템의 내구성<sup>1)</sup> 및 안전성 확보 기술에 대한 관심이 증대되고 있으며, 각 시험 항목별로 국제 안전법규가 제정 중에 있다. 연료전지차량의 고압수소저장시스템은 화재 인가 시<sup>2)</sup> 탱크 내부의 수소를 TPRD의 장치를 통해 외부로 방출되게 설계되어 있으며 고압

수소저장시스템의 안전성 평가 항목 중 화재에 대한 시험방법은 국제법규로 제정되었다. 향후 자동차 형식인증을 위해서는 국제법규에서 제정한 화재시험 조건에 의해 시험을 진행하여야 하는 실정이다.

본 연구에서는 최근 국제법규로 제정된 화재온도 및 화재 인가 시간 조건에 준하는 시험을 수행하고 각 탱크 용량별, 압력별, 탱크타입별 화재인가 후 거동 비교 평가 및 화재 안정성에 대해서 검증하였다.

## 2. 실험 방법 및 장치 구성

### 2.1 실험 방법

국제 법규에서 규정된 시험 방법은 크게 3단계로 구분된다. 1단계로 600°C의 온도로 TPRD에서 가장 먼 부분을 8분간 가열한 후 2단계로 800°C로 전체 화재를 인가하며, 3단계로 TPRD 정상 작동에 의한 수소방출 여부 확인으로 구성되어 있다. 이를 Fig. 1에 온도 조건 및 화재 인가 시간을 표현하였으며, Fig. 2는 각 단계별 시험시 화재거동을 사진으로 표현하였다. 국부화재 화염원의 폭은 250mm± 50mm로 인가하였으며, 화염원에서 시험 대상물이 100mm정도 떨어지게 하였다. 시험 대상물의 표면에서 25mm±10mm 정도 떨어진 위치에서 K-type 열전대로 화염원의 온도를 측정하였다. 국부화재의 화염 온도를 측정하기 위해 최소 2개의 온도센서로 측정하였다. 화염원의 크기, 화재 인가 위치 및 데이터 저장에 관한 모든 절차는 국제 법규에 명시된 바에 충실하게 준수하여 시험을 진행하였다.

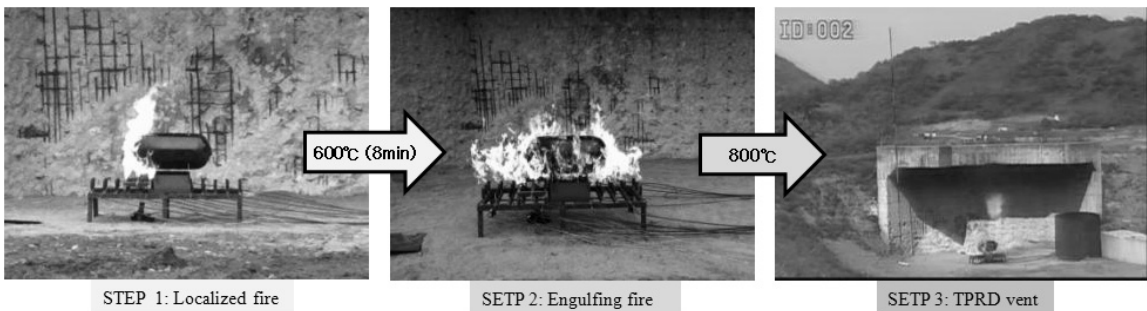


Fig. 2 Fire status of the hydrogen tank

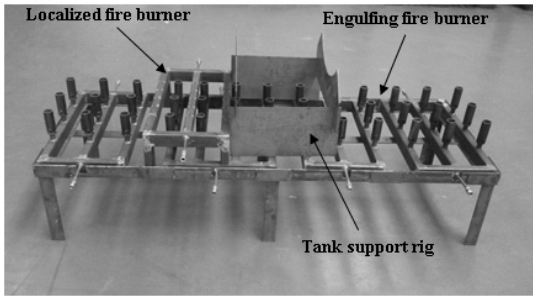


Fig. 3 The experimental apparatus for fire source

## 2.2 화재 인가 장치 구성

실험에 이용된 샘플은 Table 1에 정리된 바와 같이 현대자동차 연료전지차량에 실제 장착된 수소고압탱크를 활용하였다. 수소고압탱크에 초기 국부화재를 인가하기 위하여, Fig. 3과 같은 장치를 고안하였으며, 본 시험 전에 충분한 사전 시험을 통해 화재인가원의 온도를 확인하였다.

화재시험 연료 공급장치는 국부 화재시험용과 전체 화재시험용 2가지로 구분하여 LPG가 공급될 수 있게 하였다. 온도 상승구간과 온도 유지구간별로 공급되는 연료의 양을 조절할 수 있도록 레귤레이터와 솔레노이드 밸브를 사용하여 온도 상승구간에서는 연료가 서서히 공급될 수 있게 하였다. 온도 유지구간에서는 일정한 양의 연료가 공급되어 온도가 균일하게 유지될 수 있게 하였다.

또한 GTR의 화재시험 기준에서 요구하는 시간에 솔레노이드 밸브가 자동으로 개폐될 수 있도록 타이머가 구비된 연료공급 제어장치를 개발하였다. 안전에 대비하여 시험 진행 중 비상시에는 모든 솔레노이드 밸브가 차단될 수 있게 하였다.

Table 1 The sample of high pressure tank

구분	Tank type	Inner volume (L)	Working pressure (MPa)
1	Type 3	154	35
2	Type 3	104	70
3	Type 4	104	70

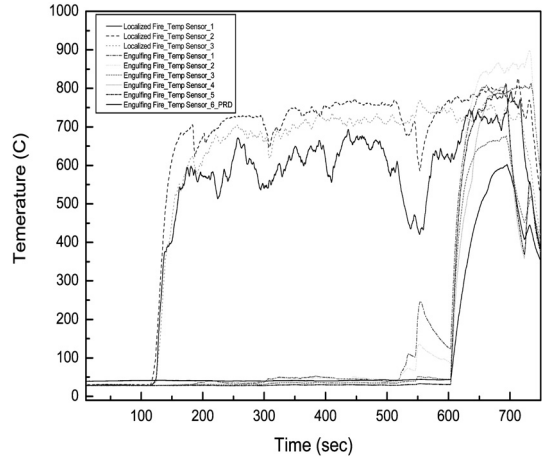


Fig. 4 The graph of external fire temperature

화재인가 장치를 Fig. 3에 나타내었다. 국부화재를 구현하기 위해서 별도의 화염인가 장치를 구성하였다.

## 2.3 데이터 수집 장치

### 2.3.1 온도 및 압력 측정

화재시험 시 화염원의 온도측정을 위해 직경이 3.2mm인 K-type 시스(sheath) 열전대를 사용하였다. 시험에 사용된 K-type 열전대의 온도 측정범위는  $-200^{\circ}\text{C} \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 이다. 탱크 내부 온도 및 압력과 화염원 온도는 data acquisition system(SCXI-1101, NI)를 통해 10Hz의 간격으로 저장하였다.

### 2.3.2 소음 및 풍속 측정

TPRD가 작동하여 수소저장시스템에서 가스가 분출될 때의 소음과 폭발 시의 폭발음을 측정하기 위해 두 대의 소음계(TE5-52A, TES)를 3m와 4m 거리에 각각 설치하였다. 또한 풍속에 따른 바람막이 설치여부를 판단하기 위하여 풍속계(Testo 410-2, Testo)로 시험장 주변의 풍속을 측정하였다.

### 2.3.3 열화상 카메라(복사열)

화재시험 시 화염의 온도와 TPRD가 작동 시 분

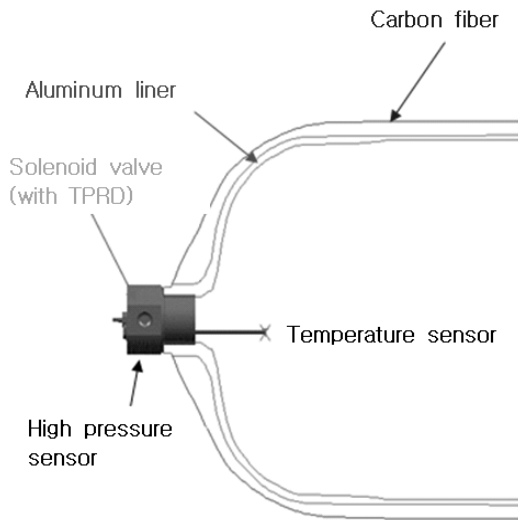


Fig. 5 The schematic diagram of sensor location

출되는 가스에 의한 화염의 크기 및 온도분포 등을 정확히 관찰하기 위하여 시험장으로부터 약 60m 전방에 열화상 카메라(vario CAM high resolution, JENOPTIK)를 설치하였다.

### 2.3.4 비디오 및 CCTV 카메라

화재시험 장면의 녹화 및 시험 감시를 위해 고화질 동영상 촬영용 카메라와 CCTV 카메라를 설치하였다. 캠코더는 시험장 전방 약 60m 거리에 설치하여 촬영하였고, CCTV 카메라는 시험장에서 약 20m 거리의 좌우측 방호벽 위에 각각 1대씩을 설치하였다. 모든 측정 방법은 문헌을 참조하였다<sup>3-7)</sup>.

## 3. 시험 결과

### 3.1 탱크 내부 및 외부 온도

모든 시험 진행 동안 풍속은 0.5m/s이내 이었으며, 바람의 영향을 받지 않았다. 탱크에 인가 되는 화염원의 온도는 GTR 규정상에는 초기 3분간 600°C 승온구간이 있으나, 실제로는 최초 화재 인가시부터 급속하게 600°C에 도달하였기 때문에 승온 시간 3분과 국부화재 인가 시간 5분을 더한 총 8분간

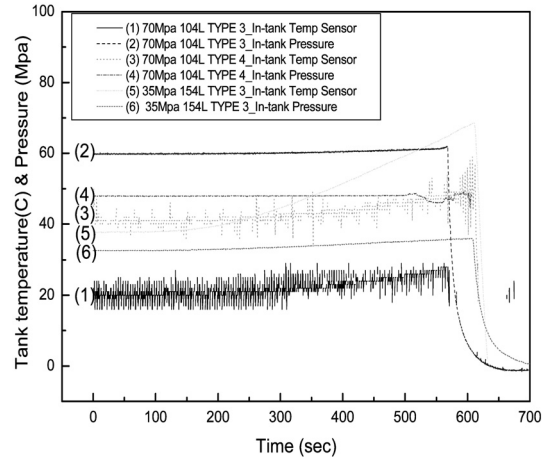


Fig. 6 The graph of internal tank pressure and temperature

국부화재 인가하였다. 8분 후에는 800°C 승온하여 탱크 전체 구간으로 화재를 인가하였으며, 국부화재 시 TPRD에서 가장 먼 부분인 Solenoid valve 에는 화염이 인가되지 않았다. 이는 Fig. 4의 engulfing fire temp sensor의 거동으로도 확인할 수 있다.

탱크 내부의 수소를 공급 차단하는 역할을 하는 솔레노이드 탱크 온도 및 압력을 측정하는 센서를 장착하였으며, Fig. 5는 측정되는 온도 및 압력센서의 위치를 나타낸다. 탱크 온도는 탱크 입구부에서 약 10~15cm의 내부의 온도를 측정하였다. 시험 진행 동안 탱크 내부온도는 최외각 카본파이버층이 상대적으로 두꺼운 70MPa 사용압 104L가 35MPa 사용압 154L 보다 온도가 약 20°C 정도 낮게 증가하였다. 이는 열 전도율이 작은 카본파이버층이 외부 화염을 내부로 전달하지 못하게 탱크를 보호하고 있기 때문이며, 국부화재 안전성을 여부는 탱크 돔 부분의 카본파이버층의 두께가 좌우함을 알 수 있었다. 또한 약 30°C의 내부 온도상승은 탱크의 안전성에 영향을 미치는 정도는 아니다. 내부압력은 35MPa 사용압 154L는 3.4Mpa 증가하였다. 이는 탱크 내부 온도의 증가와 비례함을 확인할 수 있었다. Fig. 6은 각각의 시험에 대한 탱크 내부 온도 및 압력을 나타내었다.



Fig. 7 Fire status of the hydrogen tank for step

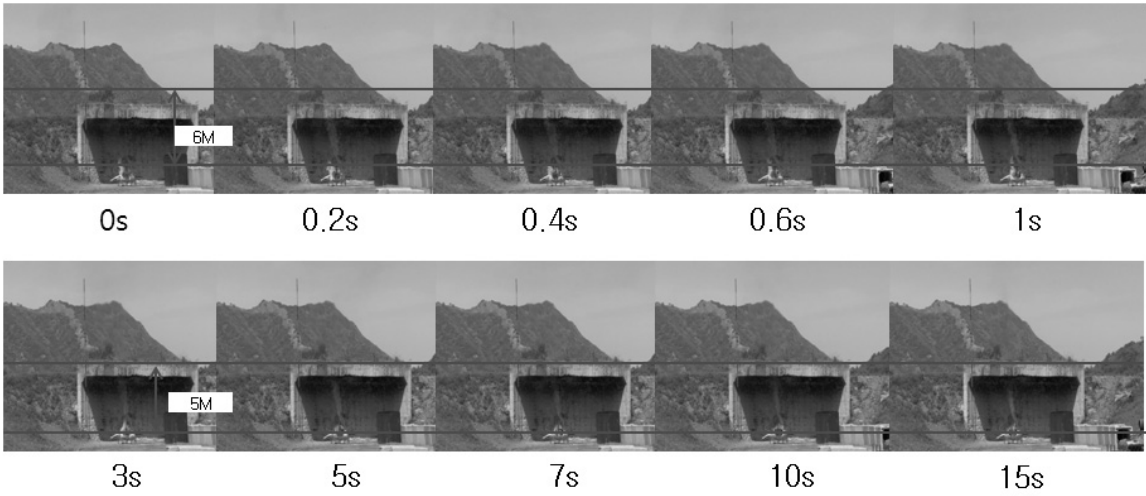


Fig. 8 Vent fire status of the hydrogen (70Mpa, 104L)

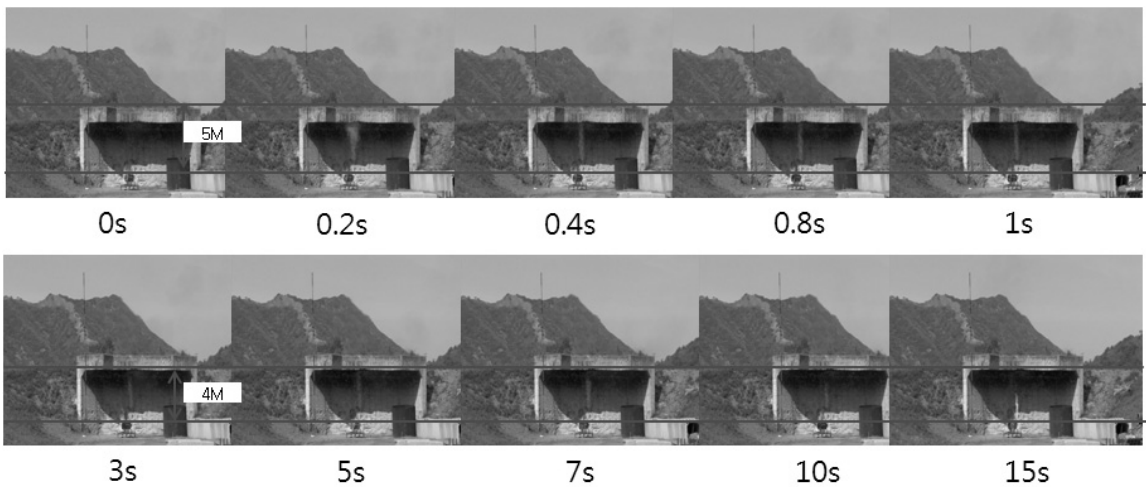


Fig. 9 Vent fire status of the hydrogen (35Mpa, 154L)

### 3.2 TPRD 작동시 수소거동

TPRD 작동시 수소 방출 시간은 65~95초였으며, 최초 TPRD 작동 시점부터 탱크 내부의 수소가 전부 방출 될 때까지 중단 없이 수소는 지속적으로 방출되었다. 70Mpa 압력 분출시 화염의 길이는 약 6m, 35Mpa 압력분출시 화염의 길이는 5m로 관찰되었다. 이때 소음은 126~128dB 정도로 동일하였다. Fig. 7은 화재 단계별 시험 사진이다. 여기서 100~105°C에서 작동하는 TPRD는 전체 화재 인가 후 약 30~60초 후 수소를 방출하였다. Fig. 8와 Fig. 9는 각 압력별로 TPRD 작동 후 수소방출시 화염의 거동을 시간별로 나타내었다. 방출되는 수소의 높이는 1m의 단위로 표시한 봉으로 확인하였다. 화염은 육안으로 관찰되었으며, 열화상 카메라의 확인을 통해 육안으로 관찰되는 화염 이상의 높이는 없음을 확인하였다. 또한 탱크 내부에는 높은 순도의 수소만 존재하며, 내부 압력이 대기압보다 매우 높기 때문에 TPRD 작동시 화염의 역화 현상은 없었다. 0.2초 만에 높이 5~6m, 폭 1m로 수소는 방출됨을 확인할 수 있으며, 3초 이후부터 화염의 높이가 줄어드는 거동

을 보였다. Fig. 10은 열화상 카메라로 측정한 사진을 시간별로 나타낸 것이다. 열화상 카메라로 본 화염의 특성은 1~3초 동안 큰 불꽃형상을 보였으며, 화염의 불꽃 온도는 최대 약 900°C로 측정되었다. 약 10초 후에는 최대 800°C, 약 15초가 경과되는 시점부터 온도는 700°C로 유지되었다. 단, 실제 연료전지차량에서의 화재시에는 차량 하부 방향으로 수소 방출되는 시스템이며, 본 실험에서는 방출시 화염의 크기, 높이, 온도분석을 위해서 임의적으로 상부 방향으로 실험을 진행하였다.

### 4. 결 론

고압수소압축 방식의 연료전지차량용 수소저장시스템에 대한 화재안전성 평가를 국제 법규기준에 준하여 평가를 하였으며, 그 결과를 아래와 같이 요약하였다. 모든 시험의 풍속은 0.5m/s 이내였다.

- 1) 8분간 TPRD에서 가장 먼 부분을 국부화재 인가한 경우 탱크 과열 및 이상거동은 발생하지 않았으며, 전체 화재 인가시 TPRD는 정상 작동하였다.

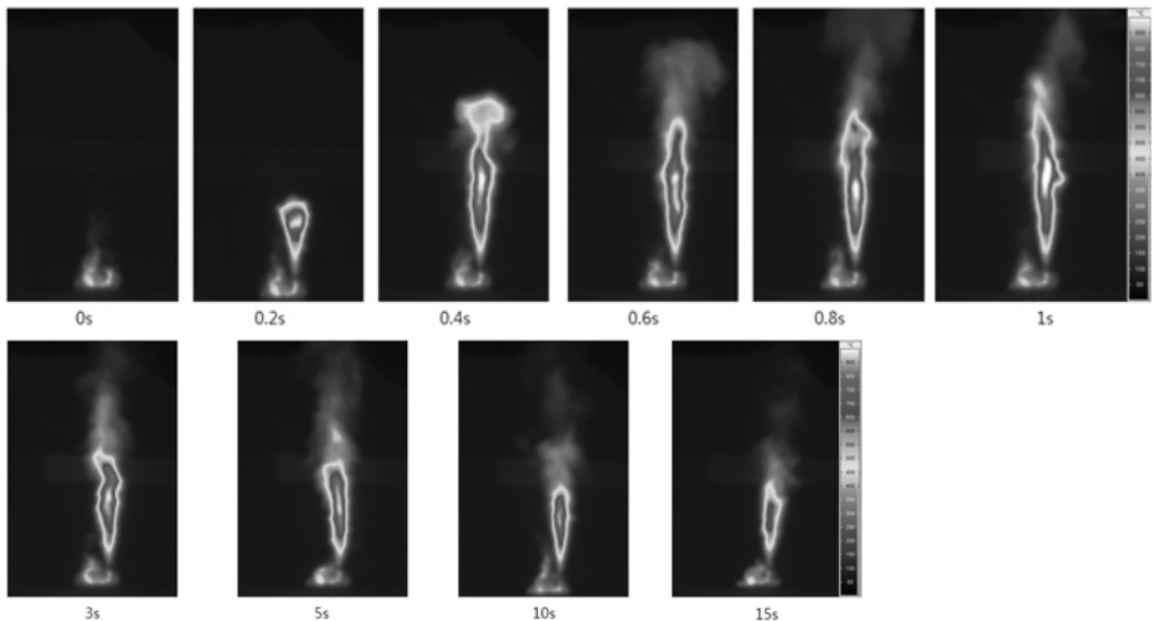


Fig. 10 Fire status of the hydrogen tank

- 2) 화재 인가시 탱크 내부 온도는 8°C 상승하였으며, 상대적으로 최외각층인 카본파이버층이 얇은 35MPa 154L 탱크는 31°C 상승하였다. 하지만 31°C 온도상승은 탱크의 파열에 영향을 주지 않는다. 내부압력은 35MPa 사용압 154L는 3.4Mpa 증가하였다.
- 3) TPRD 작동 후 수소 방출시 65초~95초의 시간 내에 내부 수소가 전부 방출되었다. 수소방출 초기부터 내부 수소가 전부 방출 때까지 중단없이 지속적으로 방출되었다. 방출시 소음은 126~128dB로 측정되었다.
- 4) 70Mpa 압력 분출시 화염의 길이는 약 6m, 35Mpa 압력분출시 화염의 길이는 5m로 관찰되었으며 폭은 1m 이내였다. 열화상카메라로 측정한 방출 화염의 최고온도는 900°C로 관찰되었다.
- 5) 국제 법규로 제정된 시험방법에 준하여 국부화재 및 전체화재 시험을 통해 고압수소탱크의 화재 안전성을 검증하였으며, 향후 차량 상태에서의 추가 검토가 필요하다고 생각한다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부 “FCEV 안전성 평가기술 개발” 과제의 일환으로 수행한 결과로서, 이 같은 성과를 낼 수 있도록 지원을 하여주신 국토해양부, 건설기술평가원, 자동차 성능시험연구소 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, “연료전지자동차의 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.