

# 반밀폐공간에서 발생하는 차량용 수소연료탱크 폭발 실험

박진옥\*<sup>†</sup> · 유용호\*\* · 김휘성\*\*\*

## An Experimental Study on the Explosion of Hydrogen Tank for Fuel-Cell Electric Vehicle in Semi-Closed Space

Jinouk Park\*<sup>†</sup>, Yongho Yoo\*\*, Hwiseong Kim\*\*\*

*Key Words:* Semi-Closed Space(반밀폐공간), Fuel-Cell Electric Vehicle(수소연료전지차), Hydrogen Tank(수소연료 탱크), Explosion(폭발), Blast wave(폭풍파)

### ABSTRACT

Recently, Korea has established a plan for the supply of hydrogen vehicles and is promoting the expansion of the supply. Risk factors for hydrogen vehicles are hydrogen leakage, jet fire, and explosion. Therefore Safety measures are necessary for this hazard. In addition, risks in semi-closed spaces such as tunnels, underground roads, and underground parking lots should be analyzed. In this study, an explosion experiment was conducted on a hydrogen tank used in a hydrogen vehicle to analyze the risk of a hydrogen vehicle explosion accident that may occur in a semi-closed space. As results, the effect on the structure and the human body was analyzed using the overpressure and impulse values for each distance generated during the explosion.

### 1. 서론

산업의 발달로 인해 날이 깊어지고 있는 환경 문제의 해결책으로 여러 환경 규제가 강화되고 있으며, 국내 외적으로 친환경 에너지원의 사용이 촉진되고 있다. 이러한 시대적 요구에 부응하여 대표적 친환경 에너지원인 수소 산업이 대두되고 있으며, 국내에서도 관련 정책을 바탕으로 활성화를 도모하고 있다.<sup>(1)</sup> 특히, 수소차 및 관련 인프라 보급에 대한 단계적 계획을 수립하고, 보급 확대를 추진하고 있는 실정이다. 이에 따라, 수소차량은 2018년을 기점으로 해마다 급격히 늘어나고 있는 추세이다. 그러나 아직은 수소산업의 보급 초기단계로, 기본적으로 수소가 갖는 위험성에 대한 안전기술 확보가 아직도 부족한 상황이다. 이런 위험은 수소차에도 해당되며, 기본적인 위험요인으로 분류되는 수소 누출, 화재, 폭발 등에 대비한 안전 대책 마련이 시급할 것으로 판단된다. 더 나아가 수소차와 관련된 각종 인프라(일반도로, 수소충전소, 터널, 지하도로, 지하주차장 등)에 대한 영향도 연구해야 될 것으로 사료된다. 특히, 제·배연 및 소방대 투입, 재실자 피난의 어려움이 있는 반밀폐 구조의 특성을 가지는 터널(지하도로)이나 지하주차장에서 수소 누출, 제트화염, 화재, 폭발 사고는 재실자 및 차량, 구조물에 대한 더 큰 피해를 초래한다. 이와 같은 위험이 내재된 반밀폐공간에서의 수소차 사고는 충돌이나 추돌 등으로부터 이어지는 수소가스의 누출, 누출에 의한 수소 가스운 폭발, TPRD (Thermally-activated Pressure Relief Device) 작동으로 인한 제트화염 발생, 단순화재, 단순화재시 TPRD 미작동에 의한 용기 폭발을 등으로 구분될 수 있다.<sup>(2)</sup>

\* 한국건설기술연구원 화재안전연구소, 전임연구원  
 \*\* 한국건설기술연구원 화재안전연구소, 연구위원  
 \*\*\* 한국건설기술연구원 화재안전연구소, 주임지원직  
<sup>†</sup>교신저자, E-mail: jopark@kict.re.kr

본 연구에서는 터널이나 주차장과 같은 반밀폐공간에서 발생할 수 있는 수소차 폭발 사고의 위험성 분석을 위해 수소차량에 사용되고 있는 수소 용기에 대한 폭발 실험 (bonfire test)을 밀폐공간에서 수행하였다. 차량용 수소연료탱크 폭발에 대한 특성 분석을 위하여 폭발시 용기내부 압력, 가열원 온도, 거리별 입사압(Incident pressure) 및 구조물 특정 위치에서의 반사압(Reflected pressure) 등을 측정하였으며, 승용차와 방호벽을 배치하여 구조물에 대한 영향을 파악하였다.

## 2. 반밀폐공간내 차량용 수소연료탱크 폭발 실험

### 2.1. 실험방법

본 실험에서는 터널이나 지하주차장과 같은 반밀폐공간에서의 수소차 사고중 위험이 가장 클 것으로 예상되는 폭발사고시 폭발특성을 분석하기 위한 예비 실험으로 수소 용기 폭발 실험을 수행하였다. 실험은 Fig. 1과 같이 직경 20m, 높이 15m의 원통형의 폭발실험동에서 수행되었으며, Global technical regulation No.13(GTR 2013)에서 규정하고 있는 차량용 수소연료탱크를 감싸는 화재 시험(Engulfing fire test) 기준을 준용하였다.<sup>(3)</sup>

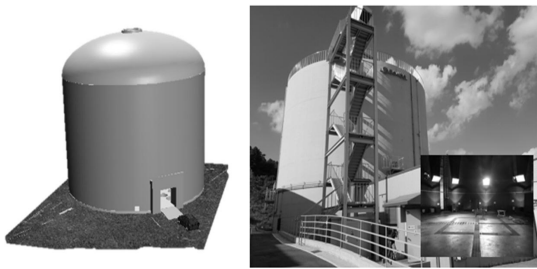


Fig. 1 차량용 수소연료탱크 폭발실험 수행 장소

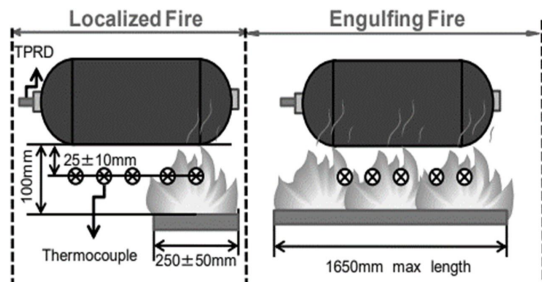


Fig. 2 Location of heating source, thermocouple and tank specified in the GTR No.13<sup>(3)</sup>

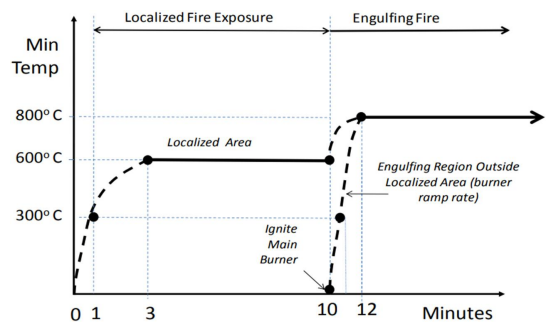


Fig. 3 Temperature profile of fire test (GTR No.13)<sup>(3)</sup>

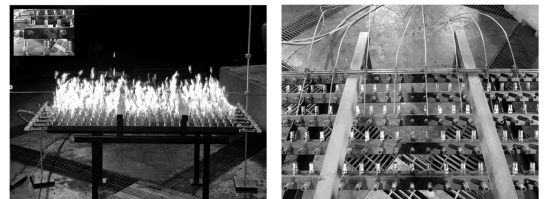
차량용 수소연료탱크를 감싸는 화재시험에 대해 설명하자면, Fig. 2에서 도시한 바와 같이 가열원은 최대길이 1,650mm에 넓이는 용기를 전부 감쌀 수 있도록 하고, 가열부로부터 상부로 100mm가 이격되게 차량용 수소연료탱크를 설치한 후 Fig. 3의 선도에서 제시된 온도 조건 (800~1,100°C)으로 시간 제한없이 폭발이 발생할 때까지 가열하였다. 가열온도는 최하단에서 25mm 이격된 지점에 3개 이상의 열전대를 설치하여 측정하고, 그 중 두 지점의 온도 평균을 구하여 가열조건외 타당성을 판단한다.

전술한 수소용기 폭발 조건 외에 폭발시 폭발압력이나 충격량이 인접차량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 폭발연료탱크의 측면에 차량을 배치하였으며, 이에 더해 용기와 일정거리를 이격된 지점에 콘크리트 방호벽을 세워 구조물에 미치는 영향도 분석하였다.

현상 분석을 위해 폭발시 용기내부 압력, 가열원온도, 거리별 입사압(Incident pressure) 및 구조물 특정 위치에서의 반사압(Reflected pressure) 등을 측정하였다.

### 2.2. 실험 세부사항

본 절에서는 실험시 구성된 상세사항에 대해 설명하려



(a) Bunsen type burner (b) Nozzle tip and thermocouples

Fig. 4 Heating source and thermocouple used in the experiment

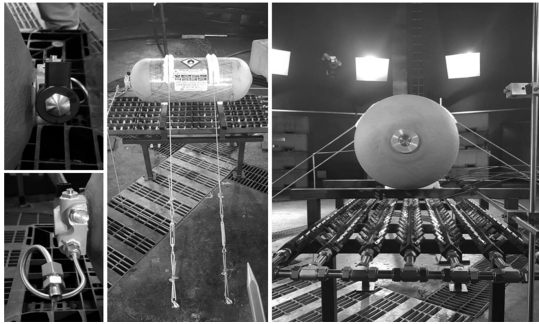


Fig. 5 Hydrogen tank (typeIV)

한다. 실험에 사용된 가열원은 Fig. 4와 같이 온도조절 및 안정화에 유리한 분첸타입의 버너로 제작하였으며, 연료는 LPG를 사용하였다. 또한, 폭발용 차량용 수소연료탱크는 내압 및 내열 시험을 통과한 I사의 TypeIV(870mm(L) × 363mm(D))를 사용하였으며, 가열원 위에 와이어를 통해 고정된 후 일반 수소차 완충 조건과 동일한 70MPa로 충전하였다. 폭발을 위해 기존에 설치되어 있던 TPRD를 제거하고, 엔드플러그로 마감하였다. 이와 같이 설치한 가열원 및 차량용 수소연료탱크를 Fig. 5에 나타냈다.

입사압의 측정은 참고문헌<sup>(5,6,7)</sup>과 같이 차량용 수소연료탱크를 중심으로 각 수평거리 1.9m, 4.2m, 6.5m에 펜슬(pencil gauge)타입의 정압측정 센서(지면으로 부터의 높이 1.2m)를 동(East), 서(West), 북(North) 세 방향으로 총 9곳에 설치하였다. 반사압은 차량용 수소연료탱크 중심으로부터 남쪽(South)으로 2m 이격된 지점에 2,000cc 승용차의 위치시킨 후 앞 쪽문 정중앙에 1곳, 북동쪽 6.9m 지점 콘크리트 방호벽에 1곳, 북서쪽 7.2m 지점 콘크리트 방호벽에 1곳 등 총 3곳의 위치에서 측정하였다. 이 때, 콘크리트 방호벽 위치는 실험동 내 여러 구조물들을 고려하여 벽면에 최대한 인접할 수 있는 곳으로 배치하였으며, 승용차는 안전을 고려하여 유리창, 배터리, 타이어 공기압, 연료(휘발유) 등을 제거한 후 설치하였다. Fig. 6에 설치된 압력센서 및 방호벽, 승용차 등을 나타냈다.

가열조건을 보기 위해 차량용 수소연료탱크 중심선에서 최하단에 시스형 열전대(Sheathed thermocouple)를 100mm 간격으로 총 3곳에 설치하였으며, 동시에 차량용 수소연료탱크 내부에 압력계를 달아 가열에 따른 내부 압력 변화를 관찰하였다.

추가적으로 폭발을 가시화하기 위해 실험동 내부에 일반 CCTV를 통해 영상을 촬영하였다(실제 실험에서는 좀 더 상세한 폭발 메커니즘 관찰을 위해 초고속카메라로 영



(a) Incident pressure sensor



(b) Reflect pressure sensor

Fig. 6 Sensors installed for experiment

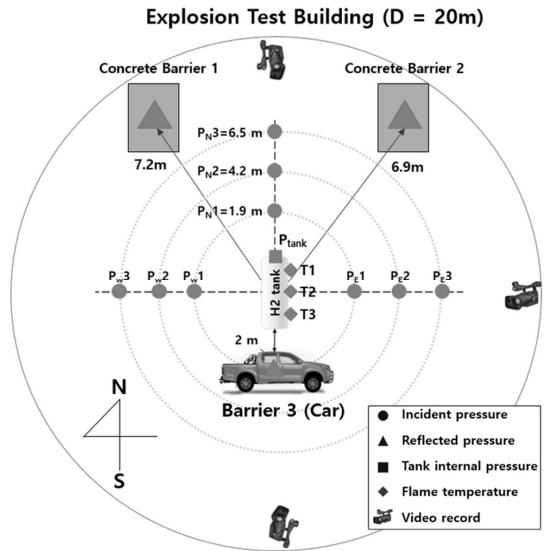


Fig. 7 Schematic of experimental setup

상을 촬영하였으나, 발생된 폭발의 영향으로 인해 촬영된 초고속 영상 데이터가 소실되었음).

본 절에서 전술한 실험 조건의 상세사항 및 배치를 Fig. 7에 나타냈다.

### 3. 실험 결과 분석

#### 3.1. 반밀폐공간내 차량용 수소연료탱크 폭발 실험 분석

반밀폐공간내 수소차 폭발에 대한 영향을 분석하기 위해 bonfire의 가열에 의한 수소용기 폭발 실험을 수행하였다. Fig. 8에서 나타낸 바와 같이 가열을 시작 후 25초만에 가열온도 측정을 위한 모든 열전대의 온도가 약 900°C에 도달하여 가열조건에 만족하고 있으며, Fig. 9와 같이 735초가 경과된 시점에 차량용 수소연료탱크가 폭발하였다. 폭발시 내부 압력은 80MPa였으며, 초기압력보다 Δ9.3MPa이 증가되었다. 다만, 용기의 파손을 유발한 폭발의 주요 요인이 내부 압력증가인지, 화재로 인한 용기의 소손인지는 추가 검토를 통해 면밀한 원인 규명이 필요할 것으로 판단된다.

폭발 후 수소 용기의 파손상태를 분석한 Fig. 10에서와 같이 TPRD가 설치되는 방향의 반대쪽의 용기 마감에 위해 만들어지는 곡선 부위가 균열되어 용기가 크게 두 개의

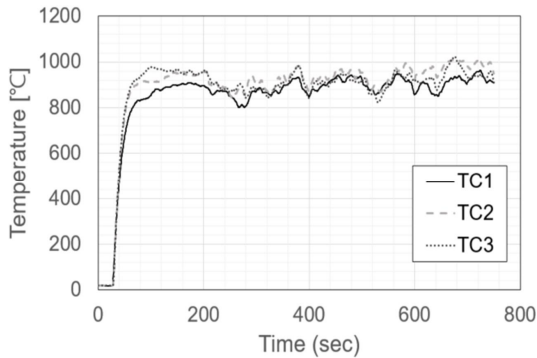


Fig. 8 Temperature of heating source during experiment

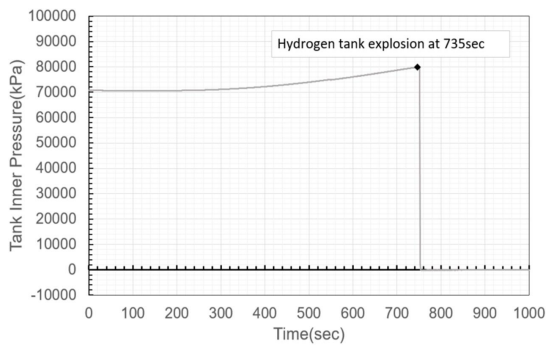


Fig. 9 Internal pressure of hydrogen tank by heating

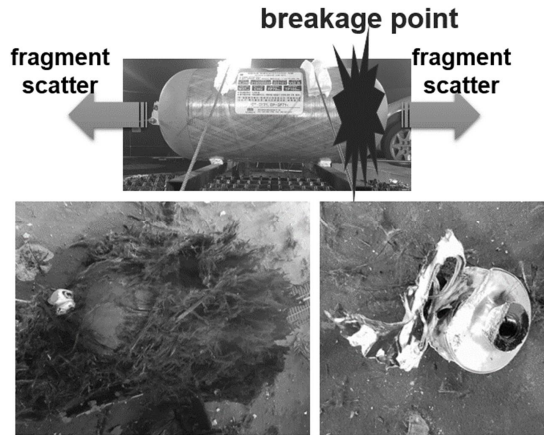


Fig. 10 The shape of an exploded hydrogen tank



Fig. 11 Vehicle damage due to explosion of hydrogen tank

파편으로 분리된 것을 확인할 수 있다. 상대적으로 큰 파편(TPRD 설치부)과 작은 파편 등 두 개로 나뉘져 각각 향하는 방향으로 비산되었으며, 큰 파편은 북동쪽(이격거리 6.9m)에 위치한 방호벽을 가격하였고, 작은 파편은 바로 옆에 위치한 승용차의 앞 문을 가격하였다. 이로 인해 방호벽은 약 5cm 비틀렸으며, 승용차는 약 30cm 정도 밀려나고, Fig. 11과 같이 측면부 전면에 대한 손상이 상당히 크게 나타났다. 다만, 이러한 차량의 전면적인 파손은 비단 파편 비산만의 결과가 아니라 상당한 강도의 충격 파의 영향이 크게 반영된 것으로 사료된다.

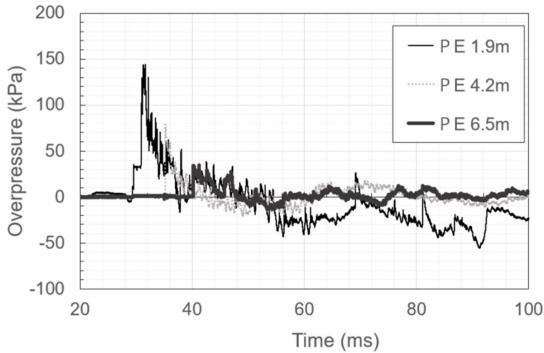
#### 3.2. 반밀폐공간내 차량용 수소연료탱크 폭발에 따른 입사압(Incident pressure)

Fig. 12에는 차량용 수소연료탱크 폭발에 의해 유도된 입사압력 선도를 나타냈다. 수소 용기를 중심으로 동쪽으로 설치한 압력계에 의해 측정된 방향별 최대 입사압은 거리별 센서  $P_E$  1.9m,  $P_E$  4.2m,  $P_E$  6.5m의 순서대로 144 kPa, 81 kPa, 34 kPa로 기록되었다. 또한, 북쪽 방향에서 측정된 최대 입사압은 거리별 센서  $P_N$  1.9m,  $P_N$  4.2m,  $P_N$

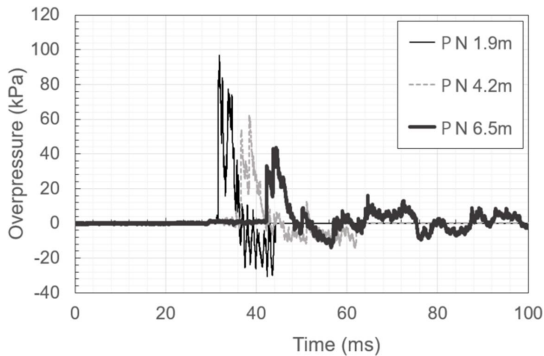
반밀폐공간에서 발생하는 차량용 수소연료탱크 폭발 실험

6.5m의 순서대로 97kPa, 62kPa, 44kPa로 나타났고, 서쪽 방향의 최대 입사압은 거리별 센서 P<sub>W</sub> 1.9m, P<sub>W</sub> 4.2m, P<sub>W</sub> 6.5m의 순서대로 267kPa, 111kPa, 73kPa로 측정되었다. 여기서, 전체 최대 입사압은 P<sub>W</sub> 1.9m에서 발생되었으며, 서쪽 방향의 측정값에서 전체적으로 높게 나타나고 있다. 이러한 결과는 전술한 폭발 메카니즘과 같이 차량용

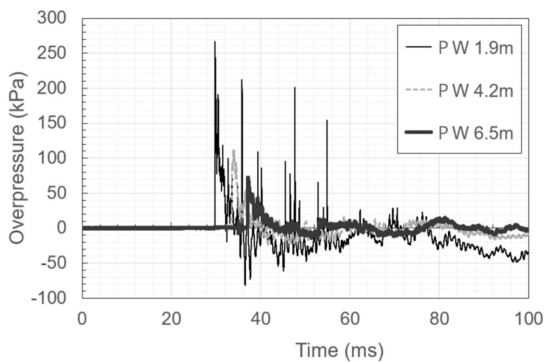
수소연료탱크가 북쪽과 남쪽, 양 쪽으로 찢어지면서 서쪽 방향으로 상대적 강도가 높은 충격파가 전파된 것으로 해석된다. 이러한 해석을 반증하듯이 가장 큰 파원이 비산된 북쪽 방향의 압력 측정값이 가장 낮게 형성되고 있음을 그래프를 통해 알 수 있다.



(a) Diagram of incident pressure at east direction



(b) Diagram of incident pressure at north direction



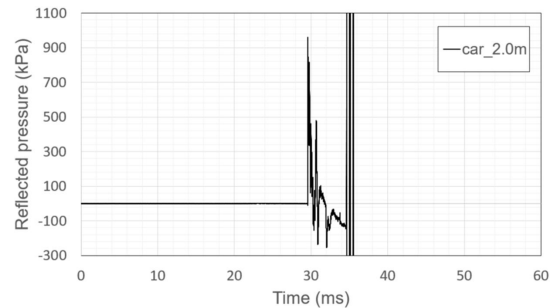
(c) Diagram of incident pressure at west direction

Fig. 12 Diagram of Incident pressure induced by hydrogen tank explosion

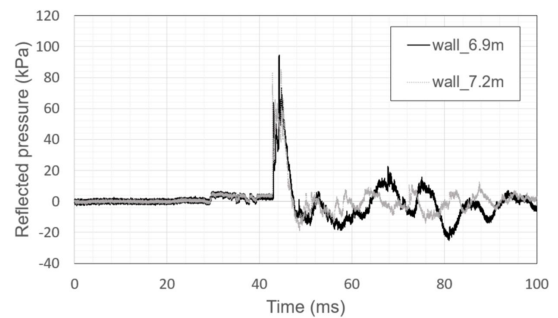
3.3. 반밀폐공간내 차량용 수소연료탱크 폭발에 따른 반사압(Reflected pressure)

반사압의 영향은 승용차와 방호벽을 구분해서 검토하려 한다.

차량용 수소연료탱크로부터 남쪽 방향으로 2m 이격시켜 배치한 승용차의 앞 문에서 측정된 반사압을 Fig. 13(a)에 도시하였다. 폭발 후 발생한 충격파에 의해 압력이 최대 960kPa까지 급격히 상승하였으며, 이후 감소하여 대기압 이하의 음압으로 이어진다. 여기까지는 폭발에 의한 충격파 전파의 일반적인 물리현상으로 분석되나 음압 이후 다시 급격한 상승이 발생되어, 앞서 측정된 최대 과압보다도 더 높게 올라가다가 데이터가 끊기는 이상 현상이



(a) Diagram of reflected pressure at passenger car



(b) Diagram of reflected pressure at concrete barrier

Fig. 13 Diagram of reflected pressure induced by hydrogen tank explosion

발생되었다. 이러한 현상은 폭발로 인해 유도된 작은 파면이 비산되어 설치된 반사압 센서를 가격하여 파손시키는 과정에 그 충격이 일부 기록된 것으로 판단된다.

Fig. 13(b)에는 구조물의 영향을 분석하기 위해 설치한 방호벽의 반사압계에 측정된 압력 결과이다. 순서대로 북동쪽 6.9m 지점 및 북서쪽 7.2m 지점 방호벽에서 최대 94kPa, 85kPa의 반사압이 발생되었으며, 비교적 가까운 거리에서 측정된 입사압( $P_E, P_N, P_W$  6.5m)보다 높은 수준으로 나타난다. 이러한 결과는 반사압은 동압이 0이되는 지점의 정체압(동압(dynamic pressure)=0, 따라서, 전압(total pressure)=정압(static pressure))을 측정하기 때문에 나타난 결과라 판단된다.

### 3.4. 폭발 과압(Overpressure) 및 입사압 충격량(Impulse)에 의한 피해정도 분석

본 절에서는 차량용 수소연료탱크 폭발에 의해 발생하는 입사압을 이용하여 반밀폐 구조물 및 내부 재실자가 받는 영향을 선행 연구<sup>(8,9,10,11,12)</sup>를 통해 정립되어 결과와 비교 분석하였다.

Table 1은 입사압의 규모에 따라 네 개의 등급으로 구분하여 손상 정도<sup>(8)</sup>를 나타내고 있으며, 손상 정도를 포괄적으로 표현하고 있어 실험을 통해 측정된 입사압을 단순 대입하여 검토하였다. 표에 따르면, 수소 용기를 중심으로 동, 북, 서쪽 방향 6.5m 지점까지 모든 위치에서 구조물에 심각한 손상(Severe damage)을 일으킬 수 있는 규모의 과압이 발생되고 있으며, 국부적으로 완전파괴(Total destruction) 수준까지 나타나고 있다. 이러한 결과는 Table

Table 1 Damage levels by incident overpressure<sup>(8)</sup>

Zone	Damage level	$\Delta P$ [kPa]
A	Total destruction	> 83
B	Severe damage	> 35
C	Moderate damage	> 17
D	Light damage	> 3.5

2를 통해 좀 더 상세히 검토할 수 있는데, 이격거리 6.5m에서는 나무전신주가 부서지고, 4.2m 이내에서는 열차나 자동차가 파손되고, 1.9m 이내에서는 건물에 치명적인 결함을 일으켜 건물 붕괴까지 야기할 수 있는 수준으로 검토되었다. 또한, Table 3에서 나타낸 바와 같이 얻어진 압력-시간 선도를 이용하여 충격량(Impulse)를 구한 후 각 지점에서의 최대 과압( $Overpressure_{max}$ )과 최대 충격량( $Impulse_{max}$ ) 값을 이용하여 선행 연구결과와 비교하여 Fig. 14에 나타냈다. 앞 선 검토와 유사하게 대부분의 지

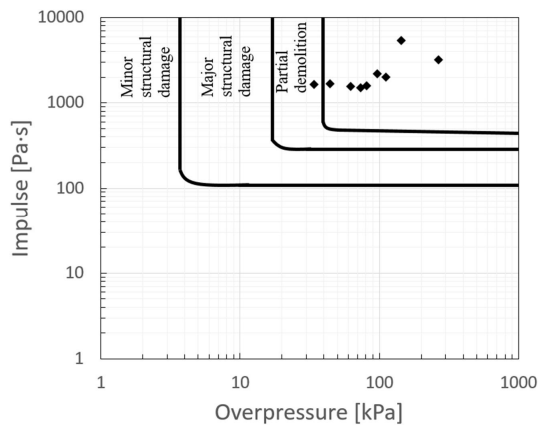


Fig. 14 Comparison for Overpressure-impulse thresholds of damage for buildings<sup>(10,11)</sup>

Table 2 Damage from blast wave<sup>(8,9)</sup>

Description of damage	$\Delta P$ [kPa]
Wooden utility poles snapped; tall hydraulic press in building slightly damaged	35
Nearly complete destruction of houses	35-50
Loaded tank cars overturned	50
Unreinforced brick panels, 25-35 cm thick, fail by shearing or flexure	50-55
Loaded train boxcars completely demolished	60
Probable total destruction of buildings; heavy machine tools moved and badly damaged	70

Table 3 Maximum overpressure and impulse at each point

Distance (m)	East		West		North	
	$Overpressure_{max}$ [kPa]	$Impulse_{max}$ [Pa·s]	$Overpressure_{max}$ [kPa]	$Impulse_{max}$ [Pa·s]	$Overpressure_{max}$ [kPa]	$Impulse_{max}$ [Pa·s]
1.9m	144	5366.592	267	3214.082	97	2187.842
4.2m	81	1594.457	111	2019.31	62	1565.239
6.5m	34	1640.278	73	1510.218	44	1676.127

점에서 가장 심한 정도인 부분 파괴(Partial demolition)가 발생하는 수준으로 분석되었다.

차량용 수소연료탱크 폭발시 충격파에 의해 사람이 받는 피해 정도를 Table 4에 나타냈다. 여러 선행 연구의 결과들이 혼재되어 있으나, 약 50kPa 이상부터 폐, 고막, 머리 등 심각한 부상을 야기시키는 것으로 파악된다. 본 실험

Table 4 Effects on people from blast waves<sup>(9,11,12)</sup>

Effects on people	$\Delta P$ [kPa]
1% fatality probability	25-35
Eardrum rupture	34.47
50% eardrum rupture probability	34.5-48.3
15% fatality probability	35
50% eardrum rupture probability	43.5
Internal injuries threshold	48.3
50% fatality probability	50-100
Lethal head injury	55.16
Standing people are thrown by distance	55.2-110.3
90% eardrum rupture probability	68.9-103.4
Severe lung damage	68.95
Lethal injury to the body	75.84
Lung haemorrhage threshold	82.7-103.4
90% eardrum rupture probability	84
1% fatality probability (lung haemorrhage)	100
50% eardrum rupture probability	110
99% fatality probability (lung haemorrhage)	200
Instant fatalities	482.6-1379

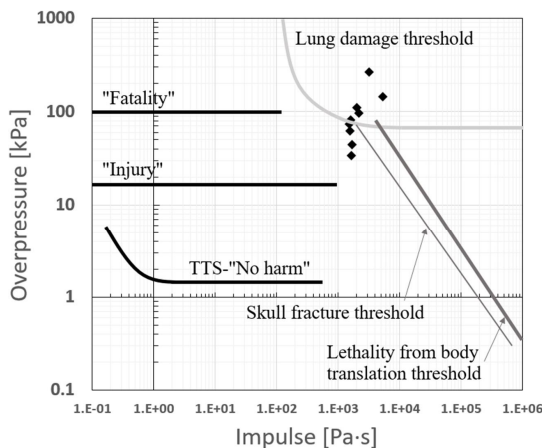


Fig. 15 Comparison for Overpressure-impulse thresholds of harm criteria for humans<sup>(9,11)</sup>

험의 결과와 비교해보면, 이격거리 4.2m 지점부터 60kPa 이상의 압력이 측정되어 인체의 심각한 부상을 입히는 것으로 나타나며, 서쪽 1.9m 지점에서는 심각한 출혈로 인해 사망 확률 99%로 분석되고 있다.

이 결과를 최대과압-충격량 선도에 대입하여 추가적인 피해 검토를 하였으며, Fig. 15에 도시하였다. 대부분의 결과값이 폐 손상(Lung damage)과 부상(Injury) 구간에 포함되고 있어 수소 용기 폭발시 주위 6.5m 이내에서는 모든 구간에서 재실자에게 치명적인 피해를 입히는 것으로 분석된다. 이러한 결과는 수소 용기 폭발에 의해 발생하는 충격파에 의한 피해만을 고려한 것으로 파편 비산의 충격으로 발생하는 2차 피해, 유도되는 폭풍에 의해 전도 및 충돌되어 발생하는 3차 피해까지 같이 고려한다면, 실제 피해는 급격히 확대될 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 터널이나 주차장과 같은 반밀폐공간에서 발생할 수 있는 수소차 폭발 사고의 위험성 분석을 위해 수소차량에 사용되고 있는 수소 용기에 대한 폭발 실험(bonfire test)을 밀폐공간에서 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수소 용기(TypeIV)를 전체적으로 감싸는 화염을 통해 일정 온도(800~1,100°C)로 가열하는 경우, 735초가 경과되는 시점에 폭발이 발생되었으며, 폭발시 용기내부압력은 80.0MPa로 초기압력(70.7MPa)보다 약 9.3MPa가 상승하였다.
- 2) 폭발시 용기과열은 타원형 수소 용기의 한 쪽 끝(곡선부)에서 발생하여 파편이 양쪽으로 비산되었으며, 이로 인해 방호벽과 승용차에 큰 타격을 입혔다.
- 3) 입사압은 폭발로 인해 차량용 수소연료탱크가 분리된 면의 수직 방향(서쪽)으로 가장 크게 발생되었으며, 차량용 수소연료탱크에 가장 인접한 압력계에서 최대 압력  $P_w=267kPa$ 이 발생되었다. 이해 비해 가장 큰 파편이 비산된 방향인 북쪽으로 낮은 과압이 형성되었다.
- 4) 반사압은 차량용 수소연료탱크에 가장 인접해 있는 승용차에서 최대 967kPa까지 측정되었으며, 약 7m 가량 떨어진 방호벽에서는 94kPa과 85kPa의 압력이 나타났다.
- 5) 폭발과압-충격량을 이용하여 피해정도를 분석한 결과, 차량용 수소연료탱크 주위 6.5m 이내의 모든

구간에서 구조물의 부분 파괴(Partial demolition)와 인체의 폐 손상(Lung damage) 및 심한 부상(Injury)을 야기하는 것으로 분석되었다.

### 후 기

본 논문은 소방청의 ESS·수소시설 화재 안전기술 연구 개발사업(20011645)의 지원을 받아 작성함.

### 참고문헌

- (1) Park, W. R., 2020, "A Study on the Optimization of Carbon Fiber Composite Pattern and Fatigue Life of Type III High Pressure Hydrogen Storage Vessel for Fuel Cell Vehicles", Thesis submitted for the degree of Master of Department in Safety Engineering, Pukyong National University.
- (2) Ryu, J. O. and 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. 46~60.
- (3) United Nations, 2013, "Global technical regulation No. 13:Global technical regulation on hydrogen and fuel cell vehicles".
- (4) GTR No.13 TF #4, 2019, "Localized fire test for improve reproducibility-Selection of standardized burner".
- (5) Southwest Research Institute, 2006, "Vehicle bonfire to induce catastrophic failure of a 5,000-psig hydrogen cylinder installed on a typical SUV", Final report.
- (6) Robert, Z. and Nathan, W., 2005, "Hydrogen Fuel Tank Fire Exposure Burst Test", SAE Paper Number 2005-01-1886.
- (7) Shentsov, V., Kim, W., Makarov, D. and Molkov, V., 2016, "Numerical Simulations of Experimental Fireball and Blast Wave from a High-Pressure Tank Rupture in a Fire", Proc. of the Eighth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH8).
- (8) Center for Chemical Process Safety, 1994, "Probit function analysis of blast effects on human beings", American Institute of Chemical Engineers.
- (9) Jeroen, D., 2016, "Probit function analysis of blast effects on human beings", Thesis submitted for the degree of Master of Science in Safety Engineering, KU Leuven.
- (10) Sergii, K., Zhiyong, L. and Vladimir, M., 2020, "Blast wave from a hydrogen tank rupture in a fire in the open: Hazard distance nomograms", International journal of hydrogen energy, Vol. 45, pp. 2429~2446.
- (11) Park, B. J., Kim, Y. K. and Hwang, I. J., 2021, "An Experimental Study on the Explosion Hazards in the Fuel Cell Room of Residential House", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 36, No. 4, pp. 71~79.
- (12) Southwest Research Institute, 2005, "Analysis of induced catastrophic failure of a 5000psig type IV hydrogen cylinder", Final report.625-630.