

## 수소저장시설의 폭발에 대한 인접 구조물의 손상도 평가

신진원\*

가톨릭관동대학교 건축공학과 조교수

# Damage Evaluation of Adjacent Structures for Detonation of Hydrogen Storage Facilities

Jinwon Shin\*

Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, Catholic Kwandong University

### 요약

본 연구에서는 수소저장시설의 폭발에 대한 시설물의 안전성 평가를 위하여 수소 폭발에 의한 발생된 충격파의 효과와 그에 따른 구조물의 손상도 평가에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 수소저장시설의 폭발효과에 미치는 주요 설계변수로 수소저장시설의 부피(10~50,000 L), 잔존용량(SOC, 50% 및 100%) 및 초기 압력(50 MPa 및 100 MPa)을 고려하여 폭발 시나리오를 수립하였다. 수소폭발효과를 도출하기 위하여 수소의 기계적 에너지와 화학적 에너지를 고려한 TNT 등가량 산정방법을 활용하였다. 환산된 TNT 등가량에 대하여 기존 UFC 3-340-02의 Kingery-Bulmash 폭발하중 설계차트를 개선한 평가식을 적용하여 수소 폭발 모델을 제안하였다. 수소 폭발 모델은 거리별 압력과 충격량에 대하여 지난 수소 탱크의 폭발실험 결과와 비교하여 검증되었다. 검증된 수소폭발 모델을 활용하여 시나리오에 따른 변수해석을 수행하였으며 폭발 중심으로부터의 이격거리에 따른 압력과 충격량에 대한 설계차트를 제시하였다. 더욱이 이 압력과 충격량 설계차트와 압력-충격량(PI) 다이어그램을 활용하여 압력과 충격량의 수준에 따른 구조물의 미세 손상, 주요부재손상 및 부분 붕괴의 3단계 손상도와 이격거리에 따른 설계차트를 제안하였다.

**핵심용어:** 수소저장시설, 수소 폭발, 구조 손상도, PI 다이어그램, 설계차트

### ABSTRACT

This study presents an analytical study of investigating the effect of shock waves generated by the hydrogen detonation and damage to structures for the safety evaluation of hydrogen storage facilities against detonation. Blast scenarios were established considering the volume of the hydrogen storage facility of 10 L to 50,000 L, states of charge (SOC) of 50% and 100%, and initial pressures of 50 MPa and 100 MPa. The equivalent TNT weight for hydrogen detonation was determined considering the mechanical and chemical energies of hydrogen. A hydrogen detonation model for the converted equivalent TNT weight was made using design equations that improved the Kingery-Bulmash design chart of UFC 3-340-02. The hydrogen detonation model was validated for overpressure and impulse in comparison to the past experimental results associated with the detonation of hydrogen tank. A parametric study based on the blast scenarios was performed using the validated hydrogen detonation model, and design charts for overpressure and impulse according to the standoff distance from the center of charge was provided. Further, design charts of the three-stage structural damage and standoff distance of adjacent structures according to the level of overpressure and impact were proposed using the overpressure and impulse charts and pressure-impulse diagrams.

**Keywords:** Hydrogen storage facility, Hydrogen detonation, Structural damage, PI diagram, Design chart

\*Corresponding author: Jinwon Shin, jshin@cku.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8152-1761>

Received: 22 February, 2023, Revised: 8 March, 2023, Accepted: 9 March, 2023



## 1. 서론

친환경 에너지의 사용에 대한 필요성이 점차 높아지며 수소에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 시대적 요구에 따라 수소 에너지는 현재 수소자동차와 수소충전소, 일반도로, 터널, 지하주차장 등의 수소차 관련 시설에 대한 보급이 단계적으로 확대되고 있다(Park et al., 2021b). 우리나라의 경우 2019년 수소 인프라 및 충전소 구축 방안을 통해 2030년까지 660기, 2040년까지 1200기 구축을 계획하고 있다(Part et al., 2021a). 수소는 용기 내에서는 산소 또는 점화원 없이는 안정된 상태로 존재하나 이나 공기 중에 누출될 경우 폭발성 혼합가스를 형성하여 화재와 폭발을 일으키고 대규모 인명 및 인접 시설물에 대한 피해를 발생시킬 수 있다(Oh and Rhie, 2004; Pyo and Lim, 2019). 이처럼 수소 에너지의 보급은 가속화되고 있으나 누출 시 발생하는 폭발사고에 대한 대책과 기준은 미흡한 실정이다.

수소의 폭발에 따른 인접 시설물의 안전성을 평가하기 위한 연구가 최근 다수 이루어지고 있다. Molkov and Kashkarov (2015)는 고압수소탱크의 수소폭발 실험을 통하여 폭발 압력과 충격량을 산정하기 위한 모델을 제안하고 압력과 충격량의 수준에 따른 인명 피해와 구조물의 손상도 평가 기법을 제안하였다. Baek et al.(2016)은 제한된 공간에서의 수소, LNG, LPG의 폭발특성을 CFD 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 수소, LNG, LPG의 폭발 위험성을 해석을 통해 확인하였으며, 폭발에 의해 발생하는 압력과 전파특성을 분석하였다. Yoon(2018)은 TNT 등가기법을 이용하여 폭발성 물질의 폭발에 따른 압력을 평가하였다. 이 연구를 통해 액체 및 기체 인화물 유출시 발생하는 증기운 폭발에 대한 압력이 인체와 구조물에 미치는 영향 평가 모델이 제시되었다. Molkov and Dery(2020)는 수소를 등가 TNT로 치환하여 터널에서의 수소 화재에 따른 폭발 효과와 탱크의 파괴가 주변에 미칠 수 있는 위험도를 연구하였다. Lee et al.(2020)은 수소의 잔존용량에 따른 수소탱크의 충전시간, 내부 압력 및 온도변화를 수치해석적으로 연구하였고, 잔존용량이 많을수록 충전시간이 단축되며, 잔존용량이 적을수록 탱크의 내부 초기온도가 급격하게 상승하는 것을 확인하였다. Lee et al.(2021)은 지하주차장을 대상으로 수소연료차의 수소탱크 폭발에 의한 압력을 예측하기 위한 연구를 수행하였다. 수소탱크 폭발 시 전파 특성을 분석하고 발생하는 폭발 압력에 따른 인체 및 건물의 영향을 검토하였다. 이러한 수소 폭발 효과를 규명하고 인접 시설물로의 영향을 평가하기 위한 연구는 다양하게 이루어져 왔으나 국내 특정 수소저장시설에 적용하기에는 그 규모와 환경적 조건이 상당히 제한적이다. 따라서 다양한 수소저장시설의 조건을 고려한 폭발효과와 인접 시설물에 미치는 피해에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 수소저장시설의 주요설계변수에 따른 폭발 효과와 그에 따른 인접시설물의 손상도 평가를 위한 연구를 수행하였다. 설계변수로는 수소 시설의 부피, 잔존용량(state of charge, SOC) 및 초기압력을 고려하였다. 국내 수소저장시설의 최소 및 최대 규모를 고려하여 범위를 설정함으로써 수소 폭발 시나리오를 수립하였다. 수소 폭발 모델은 TNT 등가량 산정법과 개선된 UFC 3-340-02(DoD, 2008) 평가식을 활용하여 수립되었으며, 그 폭발 효과를 Molkov and Kashkarov(2015)의 화재에 노출된 고압 수소탱크의 폭발실험 결과를 이용하여 검증하였다. 검증된 수소 폭발 모델을 활용하여 거리에 따른 압력 및 충격량에 대한 수소 시설물의 규모에 따른 설계차트를 제시하였고, 압력 및 충격량의 수준에 따른 인접 구조물의 피해를 미세손상, 주요부재손상 및 부분 붕괴의 3단계로 구분하고 각 피해 수준에 대한 안전 확보를 위한 이격거리를 제안하였다.

## 2. 본론

### 2.1 수소 폭발 시나리오

수소저장시설의 폭발 효과와 그에 따른 인접 시설물의 안전성 평가를 위하여 수소 폭발 시나리오를 Table 1과 같이 수립하였다. 수소 폭발 시나리오를 수립하기 위하여 수소저장용기의 부피  $V$ , 충전상태(SOC(%)) 및 SOC에 따른 초기압력  $P_i$ 를 고려하였다. 수소압력용기는 가능한 최소 및 최대 부피를 고려한 설계차트를 제시하기 위하여 10~50,000 L의 범위로 광범위하게 설정되었다. 수소압력용기의 초기 압력의 경우 Lee et al.(2020)의 연구에 따르면 수소전기차의 최대 충전 압력은 70

MPa이나, Molkov and Kashkarov(2015)는 수소탱크의 압력을 최대 95 MPa로 설정하여 실험적 연구를 수행하였다. 따라서 본 연구에서는 가장 불리한 조건을 고려하여 수소저장용기의 최대 압력을 100 MPa로 설정하였다. 또한 수소저장용기의 실질적인 압력은 충전상태(잔존용량) SOC에 영향을 받는다. 최대압력만을 고려할 경우 발생하는 경제적인 문제를 고려하여 본 연구에서는 100%와 50%의 SOC를 고려하였다. 수소 폭발 시나리오에 따른 폭발 효과와 구조성능평가에 대한 설계차트를 제시하기 위해 Table 1과 같이 총 32개의 시나리오에 대한 폭발해석을 수행하였다.

**Table 1.** Scenarios for evaluating the overpressure and impulse resulting from hydrogen tank detonations

No.	$V$ (L)	$P_{max}$ (MPa)	SOC (%)	$P_i$ (MPa)	No.	$V$ (L)	$P_{max}$ (MPa)	SOC (%)	$P_i$ (MPa)
1	50,000	100	100	100	17	50,000	100	50	50
2	30,000	100	100	100	18	30,000	100	50	50
3	20,000	100	100	100	19	20,000	100	50	50
4	10,000	100	100	100	20	10,000	100	50	50
5	5,000	100	100	100	21	5,000	100	50	50
6	3,000	100	100	100	22	3,000	100	50	50
7	2,000	100	100	100	23	2,000	100	50	50
8	1,000	100	100	100	24	1,000	100	50	50
9	500	100	100	100	25	500	100	50	50
10	300	100	100	100	26	300	100	50	50
11	200	100	100	100	27	200	100	50	50
12	100	100	100	100	28	100	100	50	50
13	50	100	100	100	29	50	100	50	50
14	30	100	100	100	30	30	100	50	50
15	20	100	100	100	31	20	100	50	50
16	10	100	100	100	32	10	100	50	50

## 2.2 수소저장용기의 TNT 등가량 산정

일반적으로 TNT이외의 Composition B, C4, Tetryl 등 폭발물 뿐만 아니라 LNG, LPG 등 가스폭발은 해당 폭발효과를 TNT 등가량으로 산정하여 수행한다. TNT 등가량의 산정 방법은 폭발물의 연소에너지를 비교하는 방법, 동일 압력 또는 충격량이 발생하는 거리를 이용하는 방법 등 다양하다. 수소 폭발의 경우 Molkov and Kashkarov(2015)에서 실험적 검증을 통해 제시한 방법에 따라 수소 폭발에 대한 TNT 등가량을 산정하였다. TNT 등가량  $W_{TNT}$ 는 다음 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$W_{TNT} = \frac{E_h}{H_{c, TNT}} \quad (1)$$

여기서,  $E_h$ 는 수소 폭발 충격파를 발생시키는 총 에너지이고  $H_{c, TNT}$ 는 TNT의 연소열(=4,686 kJ/kg)이다.  $E_h$ 는 수소 폭발 에너지를 화학적 에너지와 기계적 에너지로 구분하고 각 에너지에 대한 폭발 효율계수를 고려하여 식 (2)와 같이 산정할 수 있다.

$$E_h = \alpha E_m + \beta E_{ch} \quad (2)$$

여기서,  $\alpha$ 는 기계적 에너지에 대한 폭발효율계수,  $E_m$ 은 기계적 에너지,  $\beta$ 는 화학적 에너지에 대한 효율계수,  $E_{ch}$ 는 화학적

에너지이다.  $E_m$ 은 식 (3)을 통해 구할 수 있다.

$$E_m = \frac{(P_h - P_0)(V - mb)}{\gamma - 1} \quad (3)$$

여기서,  $P_h$ 는 수소압력용기의 초기압력,  $P_0$ 는 대기압력(=101.3 kPa)  $V$ 는 수소압력용기의 부피,  $b$ 는 용기의 부피상수(=0.00769 m<sup>3</sup>/kg),  $\gamma$ 는 비열비(=1.39),  $m$ 은 저장된 수소의 질량이다.  $m$ 은 수소의 밀도와 부피에 의한  $m = \rho V$ 를 이용하여 구할 수 있다. 여기서  $\rho$ 는 식 (4)를 이용하여 구한다.

$$\rho = \frac{P_h}{P_h b + RT/M} \quad (4)$$

여기서,  $R$ 은 기체상수(=8.314 J/mol-K),  $T$ 는 상온온도(=300 K),  $M$ 는 몰 질량(=0.002016 kg/mol)이다. 화학적 에너지,  $E_{ch}$ 는 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다.

$$E_{ch} = mH_c \quad (5)$$

여기서,  $H_c$ 는 수소의 연소열(=119.93 MJ/kg)이다. 폭발에 의한 인명 및 시설 피해를 발생시키는 주된 요소는 폭발 충격파에 의한 압력이다. 수소폭발에 의한 화학적 에너지의 경우 폭발 충격파에 대한 기여도가 거의 무시될 수 있다는 연구사례(e.g., Molkov and Kashkarov, 2015)가 있다. 따라서 본 연구에서는 화학적 에너지와 기계적 에너지의 수소 폭발 효과에 대한 기여도를 실험결과를 이용하여 분석하였다.

### 2.3 수소 폭발 모델링 및 검증

앞서 기술된 TNT 등가량 산정방법에 따른 수소 폭발 효과의 모델링 및 검증을 위한 연구를 수행하였다. TNT의 폭발효과 의 경우 UFC 3-340-02(DoD, 2008) 의 Kingery-Bulmash(KB) 방폭설계차트를 사용하는 것이 일반적이다. 하지만 본 연구에서는 KB 차트의 근접거리에서의 폭발효과에 대한 문제점을 개선한 Shin et al.(2015)의 평가식을 활용하였다. Shin et al.은 Autodyn에 의한 전산유체역학(CFD) 해석결과를 이용하여 식 (6)을 제안하였다.

$$Y = C_0 + C_1 U + \dots + C_N U^N \quad (6)$$

여기서, 입사압력( $P_s$ ) 및 충격량( $I_s$ ), 반사압력( $P_r$ ) 및 충격량( $I_r$ ), 폭압 도달 및 지속시간 등의 폭발변수들을  $10^Y$ 으로 구할 수 있으며,  $U = K_0 + K_1 \log(Z)$ ,  $Z$ 는 환산거리( $R/W^{1/3}$ ),  $R$ 은 폭발 중심으로부터의 이격거리,  $W$ 는 폭발물의 질량,  $C$ 와  $K$ 는 다항식의 상수이다. 각 폭발 변수들에 대한 상수는 Shin et al.(2015)에서 제공된 값을 사용하였다.

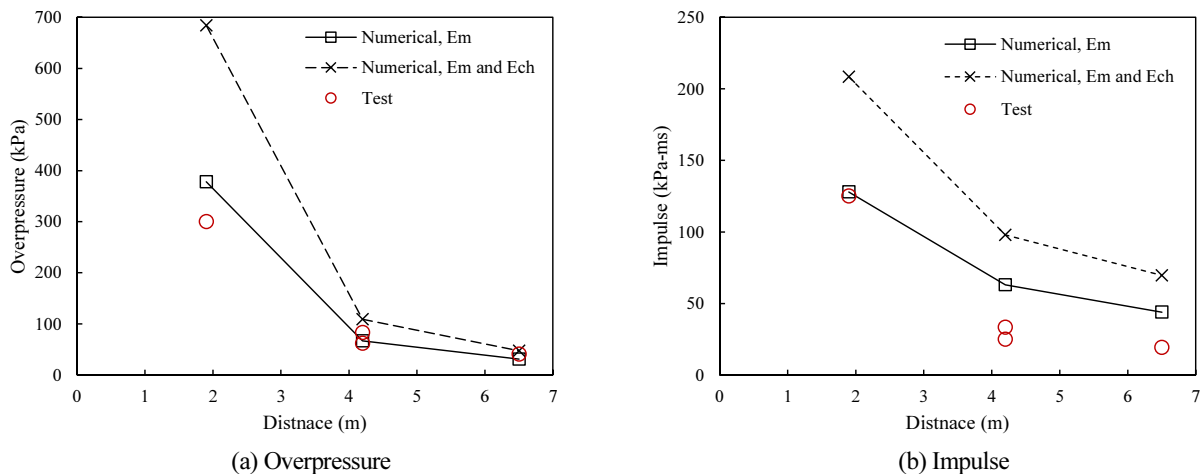
Shin et al.(2015)의 평가식에 의한 TNT 등가량의 수소폭발효과 검증을 위하여 Molkov and Kashkarov(2015)의 수소탱크 폭발에 대한 실험결과를 이용하였다. 실험에 사용된 수소탱크는 72.5 L의 부피와 34.3 MPa의 초기압력을 갖는다. 앞서 수소저장용기의 TNT 등가량 산정방법을 이용하여 Table 2와 같이 수소탱크의 부피와 초기압력에 따른 TNT 등가량을 산정

하였다. 기계적 에너지만을 고려했을 경우 TNT 등가량  $W_{TNT}$ 는 2.01 kg으로 계산되었고, 기계적 및 화학적 에너지를 모두 고려했을 경우 TNT 등가량  $W_{TNT,E}$ 는 4.21 kg으로 산정되었다. 각 TNT 등가량에 대한 폭발효과를 Shin et al.(2015)의 평가식을 이용하여 도출하였다.

**Table 2.** Calculation of equivalent TNT for hydrogen vessel with the volume of 72.4 L and initial pressure of 34.3 MPa for validation of hydrogen detonation model

Parameter	Value	Note
Vessel volume, $V$ (L)	72.4	-
Initial pressure of hydrogen, $P_a$ (MPa)	34.3	-
Heat of combustion of TNT (kJ/kg)	4,686	-
Total energy, $E$ (MJ)	19.7	-
$\alpha E_m$ (MJ)	9.42	-
Mechanical energy coefficient, $\alpha$	1.8	-
Mechanical energy, $E_m$ (MJ)	5.23	-
$\beta E_{ch}$ (MJ)	10.3	-
Chemical energy coefficient, $\beta$	0.052	-
Mechanical energy, $E_{ch}$ (MJ)	198.4	-
Stored hydrogen mass, $m_h$ (kg)	1.654	-
Equivalent TNT weight, $W_{TNT,E}$ (kg)	4.21	Both $E_m$ and $E_{ch}$
Equivalent TNT weight, $W_{TNT}$ (kg)	2.01	$E_m$ only

Fig. 1은 각 TNT 등가량에 대하여 거리에 따른 입사압력과 충격량을 실험데이터와 비교한 결과이다. 폭발 압력은 Fig. 1(a)와 같이 기계적 에너지와 화학적 에너지를 모두 고려했을 시 실험결과를 지나치게 과대평가 하는 것으로 확인되었다. 폭발압력은 거리 1.9 m에서 53.4%, 거리 4.2 m에서 32.4~43.6%, 거리 6.5 m에서 12% 크게 계산되었다. 반면, 화학적 에너지를 무시하고 기계적 에너지만을 고려하였을 때 TNT 등가량의 폭발압력이 상대적으로 실험결과와 유사함을 확인할 수 있다. 거리 1.9 m, 4.2 m 및 6.5 m에 대한 오차는 각각 20.7%, 6.9~19.8% 및 23.9%로 나타났다. 충격량에 대한 결과는 Fig. 1(b)에서 확인할 수 있다. 폭발압력과 마찬가지로 충격량이 기계적 에너지와 화학적 에너지 모두를 고려했을 경우 실험결과를 지나치게 과대평가함을 확인할 수 있다. 오차는 거리 1.9 m, 4.2 m 및 6.5 m에 대하여 각각 66.7%, 46.7~74.5% 및 72.4%로



**Fig. 1.** Validation for modeling of hydrogen detonation



나타났다. 기계적 에너지만을 고려했을 경우 충격량은 실험결과와 비교하여 거리 1.9 m, 4.2 m 및 6.5 m에 대하여 각각 2.3%, 47.0~60.4% 및 56.2%로 크게 나타났다. 여기서 충격량의 오차는 다소 크게 나타났으나 근접 거리에 대해서는 유사하게 예측하였고 폭발현상의 불확실성을 고려하였을 때 허용할만한 수준으로 평가되었다. 본 연구에서 제한한 TNT 등가량의 수소폭발 모델을 이용하여 앞서 수립된 폭발 시나리오에 대한 변수해석을 수행하였다.

### 2.4 수소 폭발 효과

Table 1에서 수립된 32개의 폭발시나리오에 대하여 Shin et al.의 평가식을 이용하여 거리에 따른 압력과 충격량을 도출하였다. 여기서 압력과 충격량은 반사 충격파가 아닌 입사 충격파에 대한 값이다. 다음 장에 기술된 구조물의 안전성 평가가 입사 압력과 충격량을 이용하여 수행되었기 때문에 이 값들이 채택되었다. Fig. 2(a)는 수소저장용기의 최대압력 100 MPa에 대하여 잔존용량(SOC) 100%를 가정하여 거리 0.1~100 m의 범위에 대하여 도출된 결과이다. 압력의 범위는 최대 1,000,000

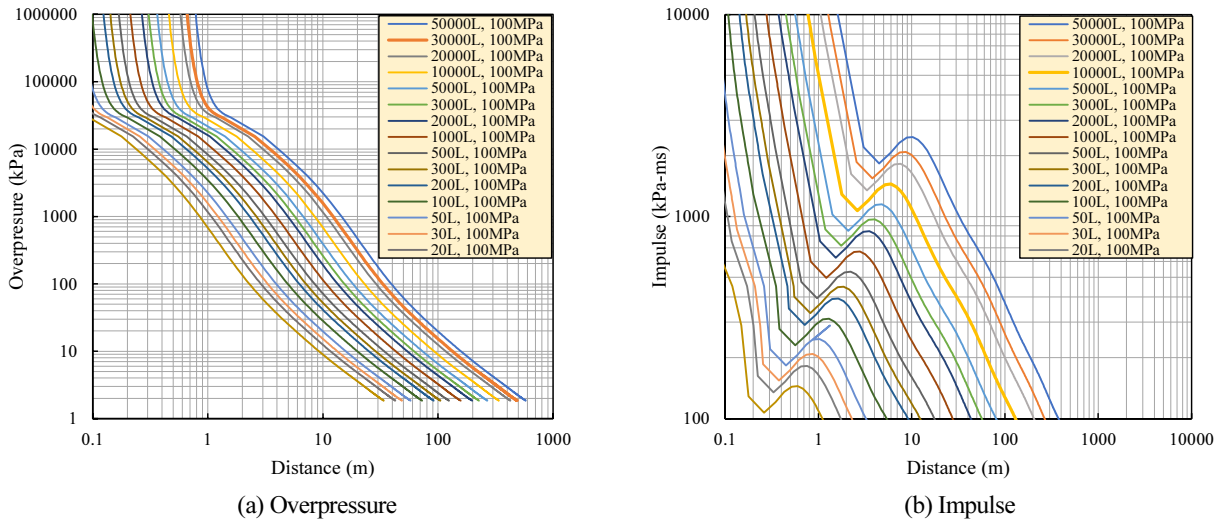


Fig. 2. Overpressure and impulse as a function of distance simulated for detonation of hydrogen with the pressure of 100 MPa (SOC 100%)

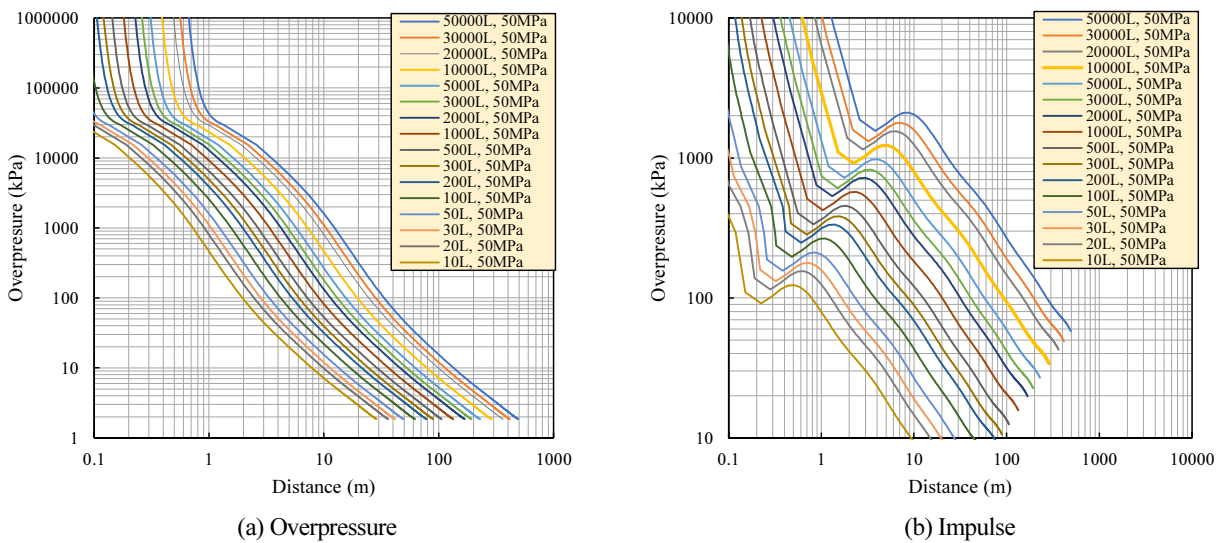


Fig. 3. Overpressure and impulse as a function of distance simulated for detonation of hydrogen with the pressure of 50 MPa (SOC 50%)

kPa까지 고려되었는데, 이는 대기압(101.3 kPa)의 약 10,000배에 달하는 수준이다. 이 최대압력은 구조물이 안전성 평가에 고려된 최대 범위이다. Fig. 2(b)는 마찬가지로 최대압력 100 MPa 및 SOC 100%에 대한 충격량 결과이다. 충격량의 최대 값은 구조성능평가의 범위를 고려하여 10,000 kPa-ms로 설정되었다. Fig. 3(a)와 (b)는 각각 최대압력 100 MPa에 대하여 SOC 50%를 고려한 결과를 보여준다. 이 결과는 수소저장용기의 잔존용량에 따른 폭발 압력과 충격량을 산정하기 위해 제시되었으며, 이외의 잔존용량에 대해서는 직선 보간을 통해 압력과 충격량을 계산할 수 있다. Figs. 2 and 3에 제시된 압력과 충격량에 대한 설계차트를 이용하여 구조물의 안전성 평가를 이어 수행하였다.

### 2.5 구조물의 안전성 평가

수소 폭발에 따른 구조물의 안전성 평가는 Baker et al.(1983)의 구조물의 손상에 따른 압력-충격량(Pressure-Impulse, PI) 다이어그램을 이용하여 수행되었다. Fig. 4는 수소저장용기의 초기압력 100 MPa에 대하여 압력과 충격량에 따른 구조물의

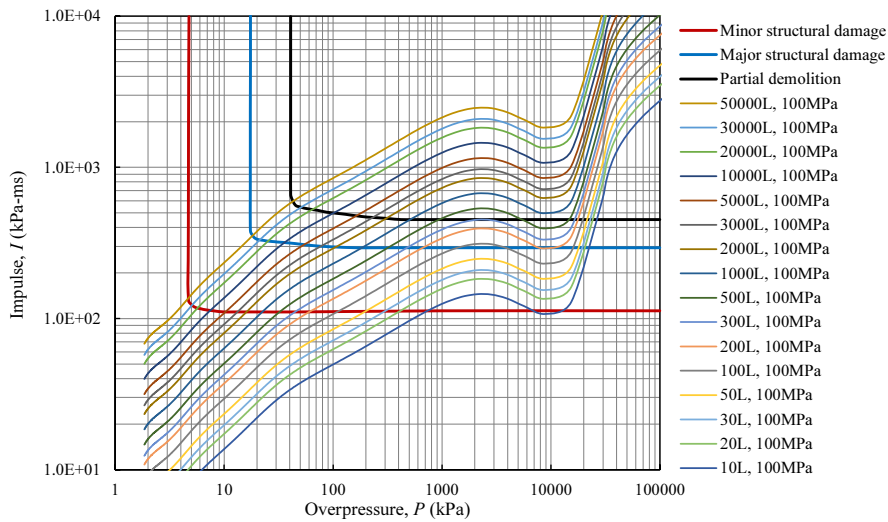


Fig. 4. Evaluation of structural performance using pressure-impulse diagram of Baker et al. (1983) for hydrogen storage vessel with the pressure of 100 MPa

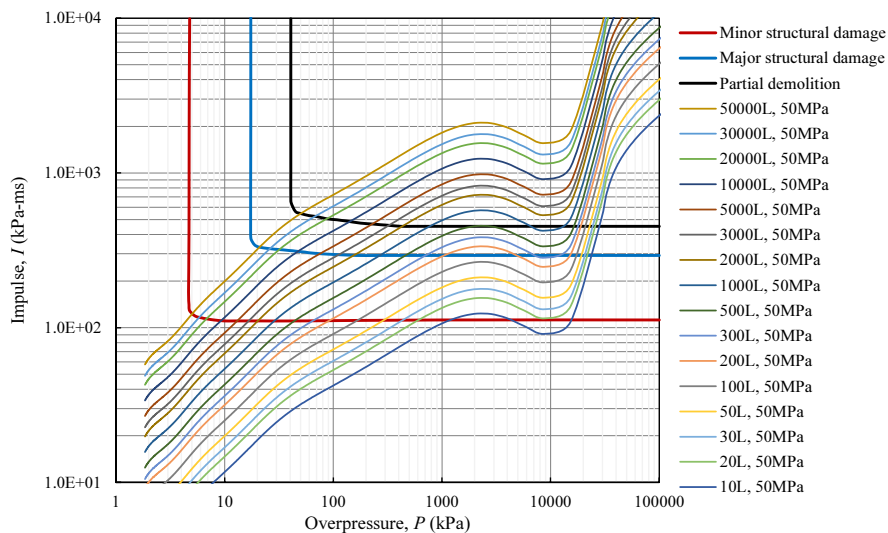


Fig. 5. Evaluation of structural performance using pressure-impulse diagram of Baker et al. (1983) for hydrogen storage vessel with the pressure of 50 MPa

손상도를 평가한 결과이다. 여기서 검은색 굵은 선은 부분 붕괴(partial demolition), 파란색 굵은 선은 구조물의 주요 부재 손상(major structural damage), 그리고 빨간색 굵은 선은 구조물의 미세 손상(minor structural damage)의 한계를 의미한다. 폭발압력은 매우 짧은 시간에 작용하기 때문에 PI 다이어그램에서 폭발압력이 순간적으로 크게 작용하더라도 충격량이 작으면 구조물에 크게 영향을 줄 수 없음을 확인할 수 있다. Fig. 5는 SOC 50% (수소저장용기의 초기압력 50 MPa)에 대하여 압력과 충격량에 따른 구조물의 손상도를 평가한 결과이다. PI 다이어그램의 3개의 구조손상 레벨에 대한 압력과 충격량을 제시된 설계차트로부터 확인할 수 있다. 설계차트에서 제시된 수소저장용기의 부피 이외의 규격에 대한 압력과 충격량은 직선 보간을 통해 구할 수 있다.

Figs. 4 and 5에서 제시된 수소저장용기의 PI 다이어그램 평가결과를 이용하여 구조손상 레벨에 따른 수소저장용기의 부피와 압력을 Tables 3 and 4에 나타내었다. 각 부피와 압력에 따른 이격거리는 Figs. 2 and 3의 거리에 따른 압력과 충격량 곡선을 이용하여 도출되었다.

Baker et al.(1983)의 PI 다이어그램 구조손상도 평가차트에서 최대 압력이 1,000 MPa이기 때문에 그 이상의 압력에 대한 결과는 표에 표시하지 않았으며, 이러한 경우 구조물의 손상은 충격량만을 이용하여 평가되었다. 가령, 초기압력 100 MPa을 가지는 수소저장용기의 부피 100 L와 압력 100 MPa에 대하여 주요부재손상(major structural damage)을 발생시키는 압력은 1,000 MPa를 초과하였기 때문에 일정 압력 이상에서는 충격량이 일정함을 고려하여 부피 200 L와 동일한 충격량(289 kPa-ms)을 사용하였다.

Tables 3 and 4는 수소저장용기의 부피와 압력에 따른 인접 구조물의 안전 이격거리를 산정하기 위해 제공되었다. 수소저장용기 20,000 L, 100 MPa의 경우 인접 구조물의 미세손상 방지거리는 176 m, 주요부재손상 방지거리는 63 m, 그리고 부분 붕괴 방지거리는 36 m로 나타났다. 동일한 탱크의 부피에 대하여 SOC 50%를 고려할 경우 압력은 50 MPa로 구조물의 손상 방지거리는 각각 130 m, 46 m 및 26 m로 나타났다. 이 용기에 대하여 SOC 70%에 대한 구조설계가 필요할 경우 직선 보간하여 구조손상 방지거리를 각각 148 m, 53 m 및 30 m로 산정할 수 있다.

**Table 3.** Overpressure, impulse and standoff distance according to damage levels of building for hydrogen pressure of 100 MPa

Hydrogen storage vessel	Minor structural damage			Major structural damage			Partial demolition		
	$P_s$ (kPa)	$I_s$ (kPa-ms)	$R$ (m)	$P_s$ (kPa)	$I_s$ (kPa-ms)	$R$ (m)	$P_s$ (kPa)	$I_s$ (kPa-ms)	$R$ (m)
50,000 L, 100 MPa	4.7	134	276	18	353	104	43	590	60
30,000 L, 100 MPa	5.0	123	220	21	331	81	51	545	47
20,000 L, 100 MPa	5.6	117	176	25	324	63	65	525	36
10,000 L, 100 MPa	7.4	113	114	35	315	41	102	500	23
5,000 L, 100 MPa	10	110	72	55	309	25	162	475	15
3,000 L, 100 MPa	13	110	51	80	306	17	232	465	11
2,000 L, 100 MPa	16	110	39	106	295	13	310	461	8.1
1,000 L, 100 MPa	22	110	25	172	285	8.3	511	451	5.2
500 L, 100 MPa	32	110	16	324	295	5.0	945	452	3.2
300 L, 100 MPa	45	110	11	446	285	3.7	-	452	0.54
200 L, 100 MPa	60	110	8.0	644	289	2.8	-	452	0.46
100 L, 100 MPa	109	111	4.8	-	289	1.6	-	452	0.35
50 L, 100 MPa	197	111	2.9	-	289	1.3	-	452	0.26
30 L, 100 MPa	295	111	2.1	-	289	0.24	-	452	0.21
20 L, 100 MPa	410	112	1.6	-	289	0.2	-	452	0.17
10 L, 100 MPa	724	112	0.97	-	289	0.15	-	452	0.12



**Table 4.** Overpressure, impulse and standoff distance according to damage levels of building for hydrogen pressure of 50 MPa

Hydrogen storage vessel	Minor structural damage			Major structural damage			Partial demolition		
	$P_s$ (kPa)	$I_s$ (kPa-ms)	$R$ (m)	$P_s$ (kPa)	$I_s$ (kPa-ms)	$R$ (m)	$P_s$ (kPa)	$I_s$ (kPa-ms)	$R$ (m)
50,000 L, 100 MPa	5.0	123	224	21	330	82	50	545	48
30,000 L, 100 MPa	5.8	116	168	26	322	60	68	522	34
20,000 L, 100 MPa	6.8	114	130	32	318	46	88	502	26
10,000 L, 100 MPa	9.2	110	83	48	311	29	143	483	17
5,000 L, 100 MPa	13	110	52	74	298	18	230	467	11
3,000 L, 100 MPa	17	110	37	113	296	12	326	457	7.7
2,000 L, 100 MPa	20	110	29	154	292	9.3	426	451	6.0
1,000 L, 100 MPa	28	110	18	272	294	5.8	765	450	3.8
500 L, 100 MPa	44	110	11	458	291	3.7	-	450	2.0
300 L, 100 MPa	65	111	7.5	704	292	2.6	-	450	0.45
200 L, 100 MPa	91	111	5.5	1,000	292	1.9	-	450	0.38
100 L, 100 MPa	167	111	3.3	-	292	0.32	-	450	0.29
50 L, 100 MPa	292	111	2.1	-	292	0.24	-	450	0.21
30 L, 100 MPa	436	112	1.5	-	292	0.19	-	450	0.16
20 L, 100 MPa	604	112	1.1	-	292	0.16	-	450	0.13
10 L, 100 MPa	-	112	0.67	-	292	0.12	-	450	0.09

### 3. 결론

본 연구에서는 수소 폭발에 대한 구조물의 안전성 평가 연구를 수행하였다. 수소 폭발 효과를 구현하기 위해 수소저장용기의 부피와 초기압력을 변수로 TNT 등가량을 산정하였으며, 기존의 폭발변수 평가식을 통하여 거리에 따른 입사압력과 충격량을 도출 및 검증하였다. 검증된 수소 폭발 모델을 이용하여 최대 압력을 100 MPa로 가정하여 수소저장용기의 부피 10~50,000 L와 잔존용량(SOC) 100% 및 50%에 대한 변수해석을 수행하였다. 본 연구에서 도출된 세부 결론은 다음과 같다.

- (1) 수소저장용기의 TNT 등가량 산정법에 따른 수소 폭발 모델을 제안하였다. 수소 폭발 모델로부터 도출된 압력과 충격량은 기존 실험결과와 비교하여 검증되었다. TNT 등가량 산정 시 기계적 및 화학적 에너지를 모두 고려할 경우 압력과 충격량은 과대평가될 수 있으며, 기계적 에너지만을 고려할 경우 합리적인 결과가 도출될 수 있을 것으로 평가되었다.
- (2) 수소폭발모델을 이용하여 수소저장용기의 최대압력 100 MPa를 기준으로 잔존용량에 따른 압력과 충격량을 도출하기 위한 설계차트를 제안하였다. 설계차트는 용기 부피의 범위로 10~50,000 L에 대한 데이터를 제시하고 있어 다양한 규격을 가진 수소저장시설의 안전성 평가에 널리 활용 가능할 것으로 판단된다.
- (3) 수소 폭발에 대하여 PI 다이어그램을 기반으로 구조물의 손상 수준별 방지거리에 대한 설계차트를 제안하였다. 이 설계차트를 이용할 경우 수소저장용기의 부피, 압력 및 잔존용량을 고려한 수소 관련 시설의 설계가 가능할 것으로 평가된다.

### Acknowledgments

This research was supported by “Regional Innovation Strategy (RIS)” through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (MOE) (2022RIS-005).

## References

- Baek, Ju-Hong, Hyang-Jig Lee, and Chang Bong Jang. (2016). Comparison of H<sub>2</sub>, LNG, and LPG Explosion Characteristics in a Limited Space Using CFD Simulation. *Journal of the Korean Institute of Gas*. 20(3): 12-21.
- Baker, W. E., P. A. Cox, P. S. Westine, J. J. Kulesz, and R. A. Strehlow. (1983). *Explosion Hazards and Evaluation*. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Department of Defense. (2008). *Unified Facilities Criteria (UFC): Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions (UFC 3-340-02)*. Departments of the Army, Navy, and Air Force. Washington, DC: DoD.
- Lee, Ho-Hyung, Hyo-Gyu Kim, Ji-Oh Yoo, Hu-Yeong Lee, and Oh-Seung Kwon. (2021). A Basic Study for Explosion Pressure Prediction of Hydrogen Fuel Vehicle Hydrogen Tanks in Underground Parking Lot. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*. 23(6): 605-612.
- Lee, Hyunwoo, Donghyun Oh, and Youngjin Seo. (2020). Prediction of Changes in Filling Time and Temperature of Hydrogen Tank according to SOC of Hydrogen. *Transactions of Korean Hydrogen and New Energy Society*. 31(4): 345-350.
- Molkov, V. and W. Dery. (2020). The Blast Wave Decay Correlation for Hydrogen Tank Rupture in a Tunnel Fire. *International Journal of Hydrogen Energy*. 45: 31289-31302.
- Molkov, V. and S. Kashkarov. (2015). Blast Wave from a High-Pressure Gas Tank Rupture in a Fire: Stand-Alone and Under-Vehicle Hydrogen Tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*. 40: 12581-12603.
- Oh, Kyu-hyung and Kwang-won Rhie. (2004). A Study on the Explosion Characteristics of Hydrogen. *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*. 15(3): 228-234.
- Park, Byoungjik, Yangkyun Kim, and In Ju Hwang. (2021a). Hydrogen Fire · Explosion Risk Assessment. *Proceedings of the 2021 Spring Conference of the Korean Society of Mechanical Engineers*. 72-73.
- Park, Jinouk, Yongho Yoo, and Hwiseong Kim. (2021b). An Experimental Study on the Explosion of Hydrogen Tank for Fuel-Cell Electric Vehicle in Semi-Closed Space. *Journal of Auto-Vehicle Safety Association*. 13(4): 73-80.
- Pyo, Don-Young and Ock-Taeck Lim. (2019). A Study on Explosive Hazardous Areas in Hydrogen Handling Facility. *Transactions of Korean Hydrogen and New Energy Society*. 30(1): 29-34.
- Shin, J., A. S. Whittaker, and D. Cormie. (2015). Incident and Normally Reflected Overpressure and Impulse for Detonations of Spherical High Explosives in Free Air. *Journal of Structural Engineering*. 141(12): 04015057.
- Yoon, Yong-Kyun. (2018). Evaluation of Blast Pressure Generated by an Explosion of Explosive Material. *Explosives & Blasting (Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering)*. 36(4): 26-34.

### Korean References Translated from the English

- 박병직, 김양균, 황인주 (2021a). 수소 화재 · 폭발 위험도 평가. 2021년도 대한기계학회 플랜트부문 춘계학술강연회 논문집. 72-73.
- 박진욱, 유용호, 김휘성 (2021b). 반밀폐공간에서 발생하는 차량용 수소연료탱크 폭발 실험. 한국자동차안전학회 논문집. 13(4): 73-80.
- 백주홍, 이향직, 장창봉 (2016). CFD 시뮬레이션을 이용한 제한된 공간에서의 수소, LNG, LPG 폭발특성 비교. 한국가스학회 논문집. 20(3): 12-21.
- 오규형, 이광원 (2004). 수소의 폭발 특성에 관한 연구. 한국수소및신에너지학회 논문집. 15(3): 228-234.
- 윤용균 (2018). 폭발성 물질의 폭발에 따른 폭발압력 평가. 화약·발파(대한화약발파공학회지). 36(4): 26-34.
- 이현우, 오동현, 서영진 (2020). 수소 잔존 용량에 따른 수소 탱크 충전 시간 및 온도 변화 예측. 한국수소및신에너지학회 논문집. 31(4): 345-350.
- 이호형, 김효규, 유지오, 이후영, 권오승 (2021). 지하주차장 수소연료차 수소탱크 폭발 압력 예측을 위한 기초 연구. 한국터널지하공간학회 논문집. 23(6): 605-612.
- 표돈영, 임옥택 (2019). 수소 취급설비의 폭발위험장소에 관한 연구. 한국수소및신에너지학회 논문집. 30(1): 29-34.