

지하주차장 수소연료차 수소탱크 폭발 압력 예측을 위한 기초 연구

이호형^{1*} · 김효규² · 유지오³ · 이후영⁴ · 권오승⁵

¹정회원, (주)주성지앤비 과장

²정회원, (주)주성지앤비 대표이사

³정회원, 신한대학교 교수

⁴정회원, 신한대학교 박사과정

⁵비회원, 영설계엔지니어링 연구소장

A basic study for explosion pressure prediction of hydrogen fuel vehicle hydrogen tanks in underground parking lot

Ho-Hyung Lee^{1*} · Hyo-Gyu Kim² · Ji-Oh Yoo³ · Hu-Yeong Lee⁴ · Oh-Seung Kwon⁵

¹Researcher, Ju Sung G&B Inc.

²CEO, Ju Sung G&B Inc.

³Professor, Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Shin-Han University

⁴Graduate Student, Dept. of ICT Mechanical Engineering, Shin-Han University Graduate School

⁵Center Director, YOUNG DESIGN F&C Co., Ltd.

*Corresponding Author : Ho-Hyung Lee, hhlee@gnbeng.com

Abstract

Amid growing global damage due to abnormal weather caused by global warming, the introduction of eco-friendly cars is accelerating to reduce greenhouse gas emissions from internal combustion engines. Accordingly, many studies are being conducted in each country to prepare for the explosion of hydrogen fuel in semi-closed spaces such as tunnels and underground parking lots to ensure the safety of hydrogen-electric vehicles. As a result of predicting the explosion pressure of the hydrogen tank using the equivalent TNT model, it was found to be about 1.12 times and 2.30 times higher at a height of 1.5 meters, respectively, based on the case of 52 liters of hydrogen capacity. A review of the impact on the human body and buildings by converting the predicted maximum explosive pressure into the amount of impact predicted that all predicted values would result in lung damage or severe partial destruction. The predicted degree of damage was applied only by converting the amount of impact caused by the explosion, and considering the additional damage caused by the explosion, it is believed that the actual damage will increase further and safety and disaster prevention measures should be taken.

Keywords: Fuel cell electric vehicle, Parking lot, Semi-closed space, Hydrogen explosion, Explosion pressure

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
23(6)605-612(2021)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2021.23.6.605>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received November 1, 2021

Revised November 12, 2021

Accepted November 12, 2021



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2021, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

지구온난화로 인한 이상기후로 전 세계적 피해가 커지고 있는 가운데, 내연기관의 온실가스 배출을 줄이기 위하여, 친환경 경자동차 도입이 가속화되고 있다. 이에 각국에서는 수소연료자동차의 안전성 확보를 위해 터널이나 지하주차장과 같은 반밀폐공간에서 수소 연료 폭발에 대비한 많은 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 반밀폐공간이라 할 수 있는 지하주차장을 대상으로 수소탱크의 폭발을 등가 TNT 모델을 적용하여 폭발압력을 예측하고 이 값을 폭발압력에 따른 피해범위 및 영향을 분석하였다. 등가 TNT 모델을 적용한 수소탱크 폭발압력 예측 결과 수소용량이 52 Liter인 경우를 기준으로 75 Liter, 156 Liter인 경우 1.5 m 높이에서 각각 약 1.12배, 2.30배 높은 것으로 나타났다. 예측된 최대폭발압력을 충격량으로 환산하여 인체 및 건물에 미치는 영향을 검토한 결과 모든 예측값이 폐 손상 또는 심각한 부분 파괴가 발생할 것으로 예측 되었으며, 예측된 피해정도는 폭발에 따른 충격량만으로 환산 적용한 것이며, 폭발에 따른 부가적인 피해를 고려한다면 실제 피해는 더욱 증가되어 이에 대한 안전 및 방재의 대책이 강구되어야 할 것으로 사료된다.

주요어: 수소연료전지차, 지하주차장, 반밀폐공간, 수소폭발, 폭발압력

1. 서 론

지구온난화로 인한 이상기후로 전 세계적 피해가 커지고 있는 가운데, 내연기관의 온실가스 배출을 줄이기 위하여, 친환경경자동차 도입이 가속화되고 있다. 특히 수소연료자동차는 수소와 산소가 결합하여 발생하는 전기화학반응을 통해 전기 배터리를 충전하고 모터를 구동하는 방식이며, 수소와 산소가 결합할 때 공기 중의 미세먼지 또한 같이 포집하여 공기를 정화시키는 역할까지 하는 대표적인 친환경차량이다. 국내에서도 수소연료자동차의 등록대수가 증가함에 따라 추돌사고나, 화재사고가 발생했을 때 탱크 내부에 저장되어있는 수소의 안전성에 대한 관심도 커지고 있다. 수소연료자동차의 경우 연료인 수소를 탱크에 압축 저장하기 때문에 단순 저장방식의 기존 내연기관 차량과 특성이 다르다. 또한 수소는 가연 범위 및 폭발 범위가 넓고, 제조, 수송, 저장 시 위험성으로 누출, 확산, 점화 및 폭발이 있다(Choi et al., 2012). 이에 각국에서는 수소연료자동차의 안전성 확보를 위해 터널이나 지하주차장과 같은 반밀폐공간에서 수소 연료 폭발에 대비한 많은 연구가 진행되고 있다(HyTunnel-CS, 2019).

수소 폭발시 발생하는 폭발압력(Over Pressure)의 예측을 위한 연구는 주로 실험적인 연구와 해석적인 연구를 통해 진행되고 있다. 실험적인 연구의 경우, 실제 물리현상에서 수행됨에 따라 가장 직관적인 값을 획득 할 수 있다는 장점이 있는 반면, 수소가스 폭발을 위한 수소가스의 충전설비와 용기 그리고 폭발 후 일어날 수 있는 안전사고를 대비한 다양한 설비 등이 요구됨에 따라 비교적 큰 예산과 장소 등이 필수적임에 따라 한계가 있다. 반면 수치해석적인 방법은 크게 수치해석적인 방법과 등가 TNT (Trinitrotoluene, TNT) 모델을 적용하는 방법으로 구분되어진다. 수치해석적인 방법은 수소가스를 대상으로 폭발과 관련된 물리현상을 모델링하여 수행하는 방법이 일반적이며, 등가 TNT 모델은 TNT 폭발 실험의 결과를 바탕으로 도출된 경험식으로 대상 물질의 폭발물을 TNT의 질량으로 환산하여 폭발압력을 예측하는 방법이다. 폭발과 관련된 각 방법들의 대표적인 선행연구를 요약하면 다음과 같다.

Zalosh and Weyandt (2005)는 Type-II 수소탱크(Volume: 72 L, 충전압: 34.3 MPa)의 TPRD를 제거한 후 가열하여 폭발시켜 발생하는 폭발압력을 측정하였고, Park et al. (2021)은 주택 내 수소연료전지 전용실의 폭발 위험성에 대하여 실험적으로 연구를 수행하였다. 국립과학수사연구원(National Forensic Service, 2013)은 등가 TNT 모델을 활용하여 가스 폭발에 대한 평가를 분석하여 기존 폭발사례와 비교·검증하는 등 폭발과 관련된 연구는 다방면으로 진행 중이다. 한편, Kashkarov et al. (2020), Molkov and Kashkarov (2015)은 수소폭발로 발생한 폭발파(Blast Wave)를 계산하여 폭발 조건에 따른 피해 영향 범위 정도를 쉽게 이해할 수 있는 노모그램을 제시하였다.

본 연구에서는 반밀폐공간이라 할 수 있는 지하주차장을 대상으로 수소탱크의 폭발을 등가 TNT 모델을 적용하여 폭발압력을 예측하고 이 값을 폭발압력에 따른 피해범위 및 영향에 대한 연구를 수행하였다.

2. 등가 TNT 모델

앞서 서술한 바와 같이 등가 TNT 모델은 대상 물질의 폭발물을 TNT의 질량으로 환산하고 환산된 TNT 질량을 환산거리에 따른 폭발압력을 경험식 등에 의하여 폭발압력을 예측하는 방식으로 이에 대한 수식은 식 (1)과 (2)와 같다.

$$M_{TNT} = \frac{E}{H_{TNT}} \quad (1)$$

$$Z_e = \frac{R}{\sqrt[3]{R_{TNT}}} \quad (2)$$

여기서, M_{TNT} 는 등가 TNT의 질량(kg)이고, E는 폭발에너지(kcal)이며, H_{TNT} 는 TNT의 연소열로 1,100 kcal/kg 이다. 한편, 폭발에너지(E)는 에너지 변환효율을 고려하여 기계적 에너지와 화학적 에너지로 구성되어지지만, 고압의 수소탱크의 폭발 시 팽창압력에 의한 기계적 에너지가 폭발압력으로 형성되어 방출 후 연소가 발생됨에 따라 본 연구에서는 화학적 에너지가 폭발에너지의 기여도는 미비한 것으로 가정하였다.

본 연구에서는 Molkov and Kashkarov (2015)에서 제시된 식을 이용하여 기계에너지를 산정하고 이를 폭발에너지로 가정하여 등가 TNT 질량을 구하여 폭발압력을 예측하였다.

3. 수소탱크 폭발에 따른 피해범위 및 영향 검토 방법

Kashkarov et al. (2020)과 Debroey (2016)은 수소폭발로 발생한 Blast Wave를 계산하여 폭발 압력에 따른 인체와 건물에 피해 영향 범위 정도를 쉽게 이해할 수 있는 노모그램을 제시하였으며, Fig. 1과 같다. 한편, CCPS

(1994)는 압력-시간 선도를 이용하여 도식된 면적을 통해 충격량(Impulse [Pa·s])을 산출하는 수식을 제시하였다. 선행연구의 결과를 바탕으로 본 연구에서는 등가 TNT 모델을 통해 산출된 폭발압력을 충격량(Impulse)으로 환산하여 기존 제시된 노모그램과 비교하여 수소 탱크 폭발이 인체 및 건물에 가하는 피해 영향을 분석하였다.

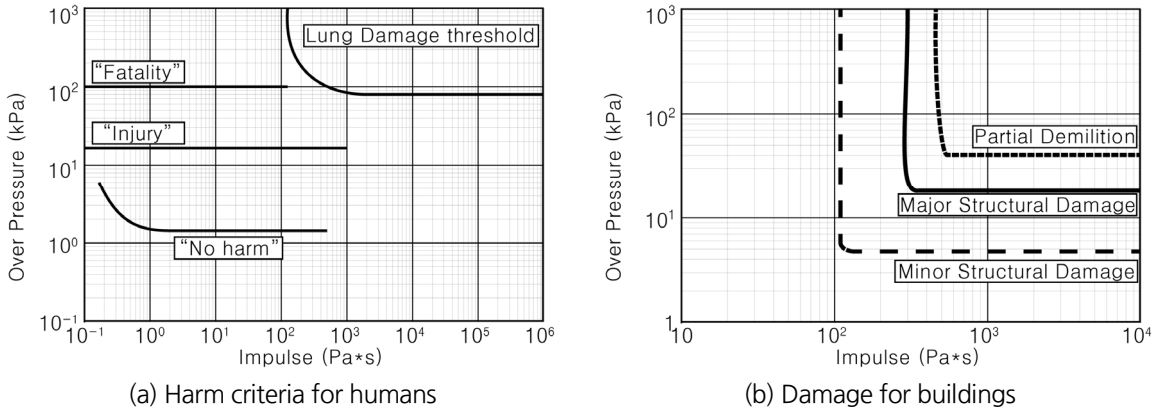


Fig. 1. Monogram of overpressure - impulse

4. 지하주차장 수소차 탱크 폭발압력 수치해석 분석

4.1 해석 대상 및 방법

해석 대상인 지하주차장의 크기는 42 m × 42 m × 3 m (가로 × 세로 × 높이)의 지하주차장으로 설정하였으며, 수소탱크는 지하주차장의 가로방향으로 중앙인 21 m와, 세로방향으로 2/3 지점인 28 m로 설정하였다. 이때 수소탱크의 용량은 52 Liter, 72 Liter, 156 Liter으로 설정하였고, 폭발직전의 수소탱크의 수소는 완충된 상태로 395 K과 70 MPa의 초기 온도 및 압력을 갖는 것으로 가정하였다. 지하주차장의 초기 온도 및 압력은 300 K,

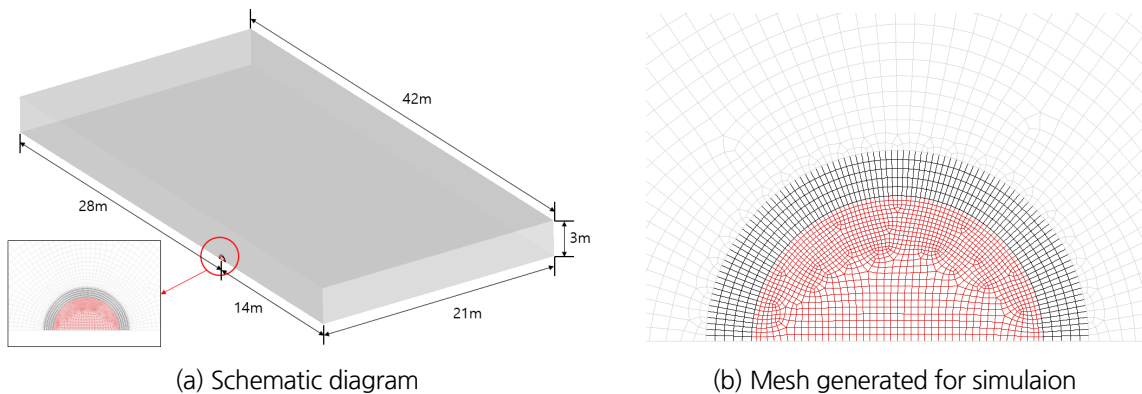


Fig. 2. Schematic diagram and mesh generated for simulation

101,325 Pa 조건으로 설정하였으며 해석모델은 Fig. 2에 표시한 바와 같이 지하주차장의 가로 중심면을 대칭조건으로 처리하여 1/2만 모델링 하여 Fig. 2에 나타내었다. 또한 유체의 유동은 비정상상태로 가정하였으며, Time step의 간격은 2×10^{-5} 로 설정하여 수치해석을 수행하였다.

4.2 수소탱크 폭발시 전파 특성 분석

Fig. 3에는 수소탱크 용량 52 Liter 폭발시 지하주차장 중심면에서 높이별(0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m, 2.5 m)의 5개 지점에서 최대폭발압력을 나타내었다. 폭발압력은 수소탱크에서 이격될수록 감소하며 바닥면에서부터 높이가 증가할수록 최대 폭발압력은 감소하는 것으로 나타나고 있다. 각 높이별 최대 폭발압력의 발생은 각각 624, 323, 225, 173, 88 kPa로 나타났다. 높이에 따른 폭발 압력의 차이는 수소탱크로부터 3 m 지점까지는 평균 81%이며, 3~10 m에서는 58%로 3 m 간격 내에 큰 편차가 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 주차장의 높이가 3 m임에 따라 발생된 폭발압력이 초기에 반구형태로 방사되다가 천장면에 도달 후 반사파가 형성됨에 따라 선행되는 압력파와 혼합되어 복잡한 파장의 형태를 나타내기 때문으로 분석된다.

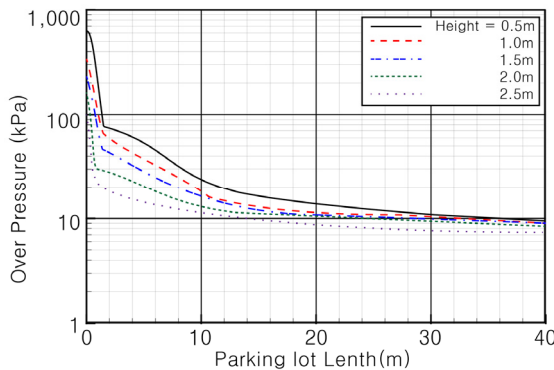


Fig. 3. Explosion pressure by parking lot height

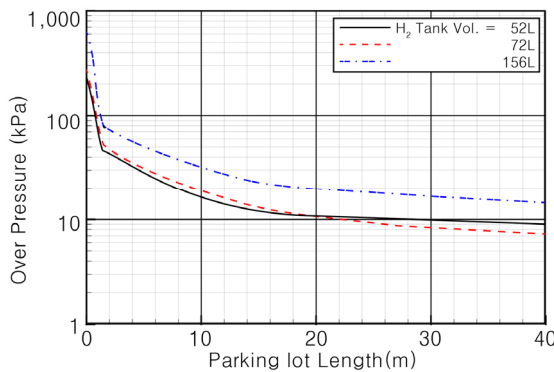


Fig. 4. Explosion pressure for H₂ tank volume

Fig. 4에는 수소탱크 용량별 높이 1.5 m에서의 폭발압력을 나타내었다. 각 용량별 최대 폭발 압력은 52 L는 225 kPa, 72 Liter는 252 kPa, 156 Liter는 517 kPa로 나타나 용량별 최대 발생 압력의 차이는 52 Liter를 기준으로 72 Liter는 약 1.12배, 156 Liter는 약 2.30배 정도 높은 것으로 나타났다. 한편, 탱크 용량이 52 Liter인 경우 3 m 지점까지 급격히 감소하며 이후 완만하게 감소하는 경향을 보였다.

4.3 수소탱크 폭발압력에 따른 인체 및 건물의 영향 검토

Table 1에는 수소탱크의 용량(52 Liter, 72 Liter, 156 Liter)에 따른 폭발시 발생된 최대 폭발압력과 충격량(임펄스)으로 환산한 값을 나타내었으며, 해당 값을 Fig. 1에 도식하여 인체에 미치는 영향과 건물에 미치는 영향을 Fig. 5 나타내었다. Fig. 5(a)에서 보는 것과 같이 모든 결과값이 폐 손상(Lung Damage) 영향을 나타내었으며, Fig. 5(b)에서 보는 것이 심각한 부분 파괴가 발생할 것으로 예측된다. 이는 발생된 폭발압력을 충격량으로 환산한 것으로만 분석하였지만, 폭발에 따른 부수적인 손상 및 야기될 수 있는 상황(연쇄충돌 및 충돌 등에 의한 비산 물질 등)을 고려한다면 실제 피해는 더욱 증가할 것으로 예측된다.

Table 1. Maximum over pressure and impulse (converted value)

	H ₂ tank volume		
	52 liter	75 liter	156 liter
Max. over pressure (kPa)	225	252	517
Max. impulse (Pa · s)	2,979.7	3,129.4	4,078.8

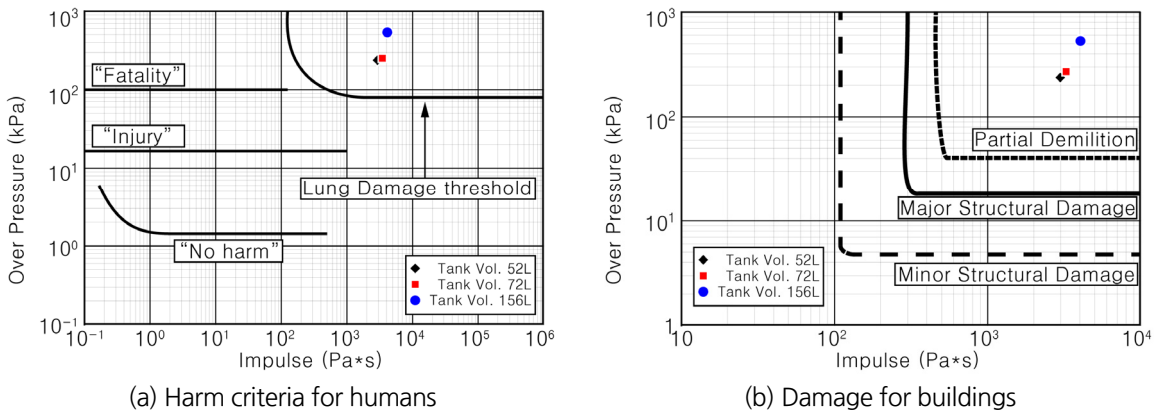


Fig. 5. Comparison for over pressure - impulse

5. 결론

본 연구에서는 등가 TNT 모델을 적용하여 지하주차장 내 수소탱크 폭발시 폭발압력을 수치해석으로 예측하였으며, 이 값을 충격량으로 환산하여 인체 및 건물에 미치는 영향을 분석하였다. 이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 등가 TNT 모델을 적용한 수소탱크 폭발압력 예측 결과 수소용량이 52 Liter인 경우를 기준으로 75 Liter, 156 Liter 인 경우 1.5 m 높이에서 각각 약 1.12배, 2.30배 높은 것으로 나타났다.
2. 예측된 최대폭발압력을 충격량으로 환산하여 인체 및 건물에 미치는 영향을 검토한 결과 모든 예측값이 폐 손상 또는 심각한 부분 파괴가 발생할 것으로 예측 되었다.
3. 예측된 피해정도는 폭발에 따른 충격량만으로 환산 적용한 것이며, 폭발에 따른 부가적인 피해를 고려한다면 실제 피해는 더욱 증가되어 이에 대한 안전 및 방재의 대책이 강구되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 소방청의 ESS·수소시설 화재 안전기술 연구개발사업(20011645)의 지원을 받아 작성함.

저자 기여도

이호형은 연구개념 및 원고 작성을 하였고, 김효규는 데이터 해석 및 분석을 하였고, 유지오는 원고검토 및 데이터 분석을 하였고, 이후영은 데이터 수집 및 데이터 해석을 하였고, 권오승은 데이터 수집을 하였다.

References

1. CCPS (Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers) (1994), "Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVEs", American Institute of Chemical Engineers, pp. 347-357.
2. Choi, J.R., Hur, N.K., Lee, M.K., Chang, H.J., Lee, K.B., Yong, G.J. (2012), "A numerical analysis of hydrogen diffusion for hydrogen leakage from a fuel cell vehicle in a long road tunnel", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 23, No. 6, pp. 588-597.
3. Debroye, J. (2016), Probit function analysis of blast effects on human beings - The Flemish 40 mbar overpressure criterion, Master Thesis, Royal Military Academy, pp. 64-65.
4. HyTunnel-CS (2019), "Deliverable 1.2 Report on hydrogen hazards and risks in tunnels and similar confined spaces, pp. 24-26.
5. Kashkarov, S., Li, Z., Molkov, V. (2020), "Blast wave from a hydrogen tank rupture in a fire in the open:

- hazard distance nomograms”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 3, pp. 2429-2446.
6. Molkov, V., Kashkarov, S. (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*, Vol. 40, No. 36, pp. 12581-12603.
 7. National Forensic Service (2013), A study on evaluation of gas explosion using ANSYS AUTODYN, Ministry of Science, ICT and Future Planning, pp. 48-67.
 8. Park, B.J., Kim, Y.K., 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.
 9. Zalosh, R., Weyandt, N. (2005), Hydrogen fuel tank fire exposure burst test, SAE (Society of Automotive Engineers) International, Vol. 114, pp. 2338-2343.