

고압 수소 용기 폭발 압력이 방호벽 배면 지역에 미치는 영향 분석

김동연 · 이선욱 · 이현우 · 김재경 · 유철희[†]

한국가스안전공사 에너지안전실중연구센터 화재폭발연구부

Analysis of the Impact of High-pressure Hydrogen Vessel Explosion Pressure on Protective Barriers and Rear Areas

DONGYEON KIM, SEONU LEE, HYEONU LEE, JAEGYEONG KIM, CHULHEE YU[†]

Fire Explosion Division, Energy Safety Demonstration Research Center, Korea Gas Safety Corporation, 1467-51 Songhakjucheon-ro, Jucheon-myeon, Yeongwol 26203, Korea

[†]Corresponding author :
gusari@kgs.or.kr

Received 30 September, 2024
Revised 15 October, 2024
Accepted 17 October, 2024

Abstract >> This study aims to evaluate the structural integrity of protective walls at hydrogen refueling stations during an explosion and to test their resistance to actual blast pressure. These protective walls are defined by the Korea Gas Safety Corporation (KGS) and play a crucial role in protecting surrounding areas and minimizing damage in the event of an explosion. The research involves constructing walls made of concrete blocks, steel plates, and reinforced concrete according to KGS specifications and validating their effectiveness through explosion tests. Through this, the study seeks to enhance the safety of hydrogen refueling stations and contribute to the expansion of infrastructure and the promotion of hydrogen vehicles, facilitating the transition to a hydrogen-based society.

Key words : Hydrogen(수소), Protective walls(방호벽), Explosion(폭발), Blast pressure(폭발압), Minimizing damage(피해 저감)

1. 서론

수소에너지는 현재 전 세계적으로 가장 주목받는 에너지원으로 환경오염 문제를 해결하기 위한 핵심 대안으로 부상하고 있다. 그중 자동차 산업에서의 수소차 활성화는 탄소 배출을 획기적으로 줄일 수 있는 중요한 방안으로 평가받고 있다. 수소차는 운행 중 온실가스와 유해 물질을 거의 배출하지 않기 때문에 기존의 내연기관 차량이 초래하는 환경 문제를

효과적으로 해결할 수 있는 대안으로 자리 잡고 있다. 그러나 수소차 판매 현황 자료¹⁾에 의하면 Fig. 1과 같이 수소차 판매량은 갈수록 기대에 미치지 못하고 있으며 오히려 감소하는 추세에 있다. 이러한 상황의 주요 원인 중 하나는 수소충전소의 부족으로 인한 수소차 사용자들의 불편함으로 이는 수소차 보급의 걸림돌이 되고 있다.

수소충전소는 수소 공급량 부족, 고가의 건설 비용 문제²⁾ 등의 이유로 확충이 지연되고 있지만 가장

큰 이유는 지역 주민들의 우려와 반대이다. 주민들은 수소충전소의 안전성에 대한 불확실성 때문에 충전소 건설에 반대하고 있으며 이 문제를 해결하기 위해서는 수소충전소의 안전성을 투명하게 공개하고 안전 규정에 대한 신뢰를 확보하는 것이 필수적이다. 안전성이 입증된 명확한 기준이 마련되어야 주민들의 우려를 불식시키고 수소충전소의 확충을 가속화할 수 있을 것이다.

수소의 폭발 범위는 4-75%이며³⁾ 공기와 혼합될 경우 점화할 수 있는 최소 에너지는 0.017 mJ, 산소와 혼합될 경우 최소 에너지는 0.004 mJ 이하로 매우 작은 에너지에도 민감하게 반응한다⁴⁾. 이러한 수소 특성을 고려하여 화재, 폭발 등의 사고를 예방 및 피해를 저감시키기 위해 안전 기술이 철저히 이루어져야 한다⁵⁾.

현재 한국가스안전공사(Korea Gas Safety Corporation, KGS)는 KGS code FP 216, 217 (수소자동차 충전의 시설 기술, 검사, 기준)을 통해 수소충전소의 시설, 기술, 검사 기준을 규정하고 있으며 이에 따라 수소충전소 방호벽은 콘크리트 블록제, 강판제, 철근 콘크리트제(reinforced concrete, RC)로 분류된다. 그러나 이 지침은 일반 고압가스 제조 시설의 기준을 그대로 도입한 것으로 수소충전소에서 실제 폭발에 대한 검증이 이루어진 적은 없다.

본 연구는 수소충전소에서 발생할 최악의 상황인

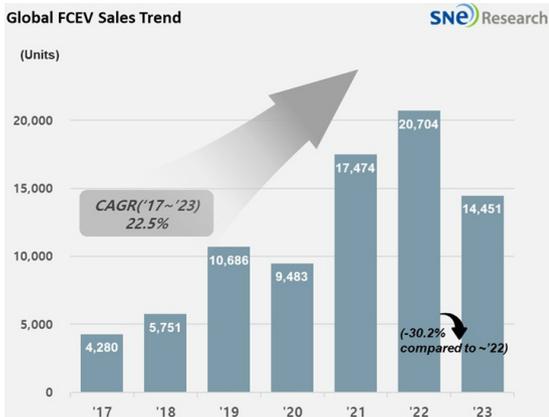


Fig. 1. Trends in the hydrogen vehicle market

폭발을 가정하여 KGS에서 규정한 방호벽들이 실제 폭발 압력에 얼마나 견디는지를 분석하고 배면 지역에 미치는 영향을 분석하여 방호벽의 피해 저감 성능을 검증하는 것을 목표로 한다.

방호벽 제작은 KGS에서 규정한 블록제, 강판제, 그리고 RC 방호벽의 최소 설계 규격을 따랐으며 실제 폭발 시험을 진행 후 폭발 저항 성능을 평가하고 이를 바탕으로 현행 규정에서 개선이 필요한 부분을 도출하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 방호벽의 실제 폭발압 피해 저감 성능을 검증하기 위한 목적으로 수행되었으며 Fig. 2에 연구 절차를 나타내었다.

우선 기존의 관련 규정을 분석하여 방호벽을 설계하고 제작한 후 실제 trinitrotoluene (TNT)을 이용한 기폭 실험을 통해 세 가지 종류의 방호벽에 대한 방호 성능을 평가하였다. 방호벽이 파괴될 경우 파편이

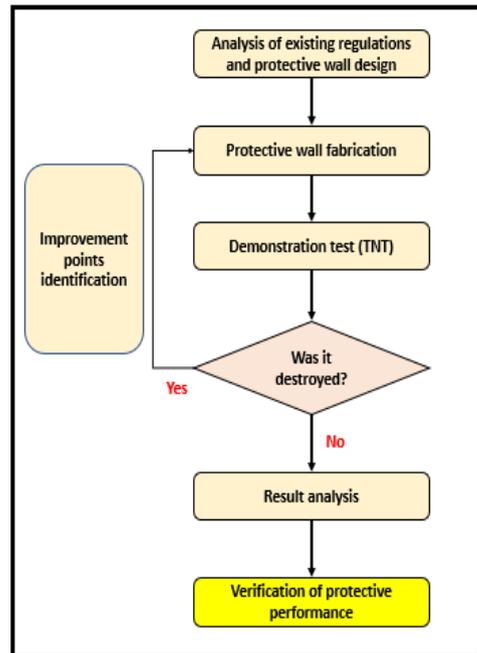


Fig. 2. Research method

비산하여 2차 피해로 이어질 가능성이 있으므로 이는 방호 성능이 부족하다고 판단하여 개선점을 도출하고 재시험을 진행하고자 한다.

만약 파괴되지 않은 방호벽이 있을 경우 해당 방호벽과 그 배면에 미치는 폭압의 영향을 분석하고 이전에 방호벽 없이 실험한 순수 폭발 압력 결과와 비교하여 방호벽의 피해 저감 성능을 분석함으로써 안전성을 검증하고자 한다.

본 연구에서 정확한 시험 결과를 얻기 위해 TNT를 사용하였다. 수소 용기의 폭발은 폭연(deflagration) 현상으로 폭발이 용기 내부에서 어디서 시작되는지 예측할 수 없어 폭원점을 정하기 힘들다. 이는 거리별 압력 측정을 위한 시험에 어려움을 주는 반면 TNT 폭발은 한 점에서 시작되는 폭발(detonation)로 거리 측정에 적합한 특성을 지닌다. 따라서 본 연구에서는 수소를 TNT 당량으로 환산하여 실험을 수행하였다.

3. 방호벽 설계 및 제작

3.1 방호벽 규정

KGS code FP 216에 따르면 Fig. 3과 같이 설비 외면으로부터 방호벽 상단 및 양쪽 끝을 지나가는 직선이 다른 설비와 만나지 않도록 설치하는 것으로 명시되어 있다. 방호벽 제원은 각각 상이하며 이를 Table 1에 나타내었다.

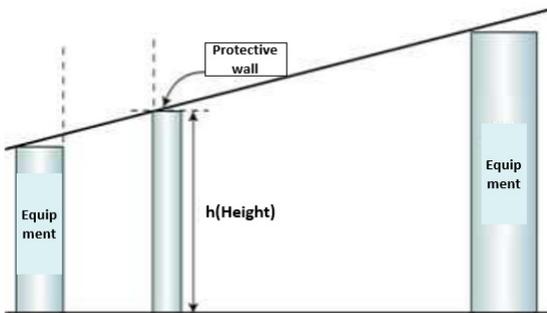


Fig. 3. The regulation on the installation of protective walls

3.2 방호벽 제작

3.1의 방호벽 설계 규정을 준수하여 Table 2와 같이 방호벽을 제작하였다.

블럭제 방호벽의 경우 블럭 이음부에 단배근으로 철근을 결속 후 콘크리트 몰타르 작업을 진행하였으며 RC 방호벽의 경우 철근을 복배근으로 400 mm 간격으로 설치하였다.

4. 실증 시험

4.1 시험 준비

4.1.1 수소-TNT 등가 환산

TNT 등가 환산을 하기 전에 실제 수소충전소 현장 조사를 하였고 초고압 용기인 1,000 bar, 721 L의

Table 1. Specifications of protective walls according to regulations

Category	Thickness	Height
Plate	6 mm	2,000 mm
Block	150 mm	2,000 mm
Reinforced concrete	120 mm	2,000 mm

Table 2. Specifications of protective walls

Specifications of each protective wall		
Plate		Thickness: 6 mm Height: 2,000 mm Width: 5,000 mm
Block		Thickness: 150 mm Height: 2,000 mm Width: 5,000 mm
Reinforced concrete (120 mm)		Thickness: 120 mm Height: 2,000 mm Width: 5,000 mm

고압 수소 용기를 TNT 등가 환산 대상 용기로 지정 하였다.

실제 수소 용기가 폭발할 경우 나타나는 폭압을 TNT로 등가 환산하기 위하여 육군사관학교와 함께 연구를 진행하였고 Molkov와 Dery⁶⁾가 실험적으로 검증한 방법을 바탕으로 식 (1)을 사용하여 TNT 등가량을 계산하였다.

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

E_h =수소 폭발 충격파를 발생시키는 에너지
 $H_{c, TNT}$ =TNT 연소열 (4.686 kJ/kg)

여기서 수소 폭발에너지 E_h 를 화학적 에너지와 기계적 에너지로 구분하고 각 에너지에 대한 폭발 효율계수를 고려하여 식 (2)와 같이 산정된다.

$$E_h = \alpha E_M + \beta E_{CH} \quad (2)$$

α =기계적 폭발에너지에 대한 환산계수
 E_M =기계적 폭발에너지
 E_{ch} =화학적 폭발에너지
 β =화학적 에너지에 대한 효율계수

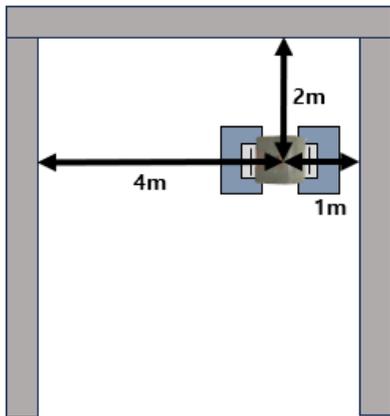


Fig. 4. TNT arrangement method

기존 연구⁷⁾에 의하면 α 는 약 1.8 정도로 평가되었다. 반면 β 의 경우 관련 내용이 부족하여 지난 실험⁸⁾인 용기 폭발 실험 결과를 통해 공동 연구 기관인 육군사관학교 측에서 β 값을 산출하였다. 이에 따라 72L 용량의 1,000 bar 압력으로 저장 중인 수소 용기가 폭발할 경우 나타나는 폭압을 환산한 결과 51.25 kg의 TNT와 동일하게 나타났다.

4.1.2 TNT 및 센서 배치

고압 수소 용기 폭발 시 거리에 따라 방호벽에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 4와 같이 TNT를 방호벽으로부터 각각 1, 2, 4 m 떨어진 곳에 배치하였다.

방호벽에 미치는 폭압을 측정하기 위하여 방호벽 내부에 반사압, 가속도계, 변위계 3가지 센서를 높이 1 m 지점에 나란히 1.25 m 간격으로 Fig. 5와 같이

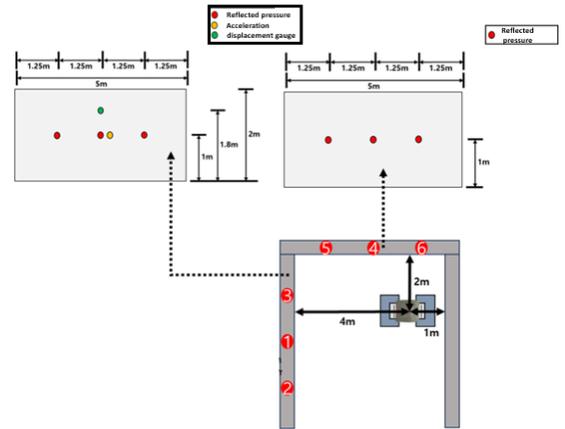


Fig. 5. Installation of sensors inside the protective wall

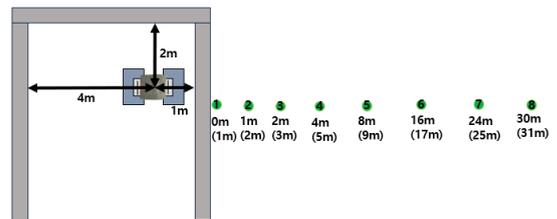


Fig. 6. Sensor installation rod position

설치하였다. 또한 TNT와 4 m 이격된 벽면의 중앙부에 방호벽의 진동을 측정하는 가속도계를 설치하고 상부에 동적 변위계를 설치하여 변위를 측정하였다.

방호벽 외부에는 입사압 센서를 설치하여 방호벽 배면에 미치는 폭압을 거리별로 파악하고자 한다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 센서 설치봉들을 방호벽과의 거리, 폭원점과의 거리를 고려하여 배치하였고 폭원점에서 가장 가까운 1 m 거리의 방호벽 뒷면에서부터 30 m까지 설치하였다. 다양한 높이에서 최대 폭압을 도출하기 위해 Fig. 7과 같이 각 센서봉마다 높이 1 m 간격으로 4개씩 설치하였고 8 m 거리부터 높이에 상관없이 1.5 m 높이에만 센서를 설치하여 입사압을 측정하였다. 반사압 센서로 측정한 방호벽에 미치는 폭압과 입사압 센서로 측정한 방호벽 외부에 미치는 폭압을 비교하여 방호벽이 폭압 피해를 얼마나 저감시키는지 분석하고자 하였다.

4.2 시험 개시

4.2.1 1차시험

폭발 실험 결과 3가지 방호벽은 Table 3과 같이 흔적을 식별할 수 없었을 정도로 파괴되었으며 폭압 데이터 또한 모두 망실로 나타났다.

이는 방호벽이 폭발 압력을 저감시키지 못하고 파괴되었음을 나타낸다. 또한 방호벽이 파편으로 비산하면서 2차 피해를 유발할 수 있을 정도로 방호벽 배

면 지역이 안전하지 않은 것으로 검증되었다.

4.2.2 개선점 도출

앞서 실험한 3가지 방호벽 모두 파괴되었으며 그중 강판제 방호벽과 블럭제 방호벽은 비용 대비 방호 성능이 매우 비효율적이라는 결론을 얻었다. 블럭제 방호벽은 투자한 비용에 비해 실질적인 방호 효과가 제한적이었고 강판제 방호벽은 제작비가 높아 수소충전소 구축 시 비용적 한계가 있을 것으로 판단되었다. 이에 따라 두 가지 방호벽을 제외하고 RC 방호벽을 시험체로 재선정하였으며 precast concrete (PC) 방호벽을 추가하였다. PC 방호벽은 RC 방호벽과 같이 철근과 콘크리트로 구성된다. 하지만 실내에서 제작되어 날씨의 영향을 받지 않아 공사 기간을 단축시키고 분진과 소음이 발생하지 않아 주민들의 불편을 줄일 수 있다는 장점을 갖추고 있어 실용성이 높아 시험에 추가하였다.

4.2.3 2차시험

위의 시험 방법과 같이 TNT와 센서의 배치는 Figs. 4-7과 같이 동일하게 하였으며 시험체는 두께 200 mm의 RC 방호벽과 두께 250 mm의 PC 방호벽 2가지를 제작하여 시험을 진행하였다. 제작된 방호벽의 제원을 Table 4에 정리하였다.

시험 결과 Table 5와 같이 두께 200 mm의 RC 방호벽은 기울어졌으며 두께 250 mm의 PC 방호벽은

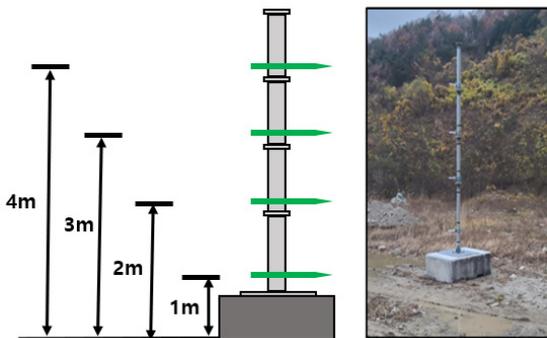


Fig. 7. Installation of pressure sensors. Left, schematic. Right, actual

Table 3. Test results

Category	Before	After
Plate		
Block		
Reinforced concrete 120 mm		

TNT와 가장 근접한 1 m 거리에 있는 방호벽의 한 면만 쓰러졌을 뿐 나머지 면은 모두 보존되었다.

5. 시험 결과

5.1 데이터 분석

5.1.1 RC 방호벽 200 mm

RC 방호벽에 미치는 폭발 압력 분석 결과 Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 폭발점으로부터 가장 멀리 떨어진 2번 센서를 제외한 모든 센서가 손실될 정도로 강한 압력이 확인되었다. 2번 센서는 폭발점에서 가장 멀리 설치된 반사압 센서이며 2,428 kPa의 압력이 측정되었다. 이에 따라 방호벽에 미치는 폭압의 영향은 최소 2,428 kPa 이상으로 사료된다.

RC 방호벽 배면에 미치는 압력은 Fig. 9와 같이 방호벽에서부터 거리별로 설치된 센서들의 높이에 따라 쇠뿔값을 나타내어 정리하였다.

Table 4. Specifications of RC and PC barriers

Specifications of the second test specimen		
RC		Thickness: 200 mm Width: 5,500 mm
PC		Thickness: 250 mm Width: 5,000 mm

Table 5. Test results of RC and PC barriers

Category	Before	After
RC 200 mm		
PC 250 mm		

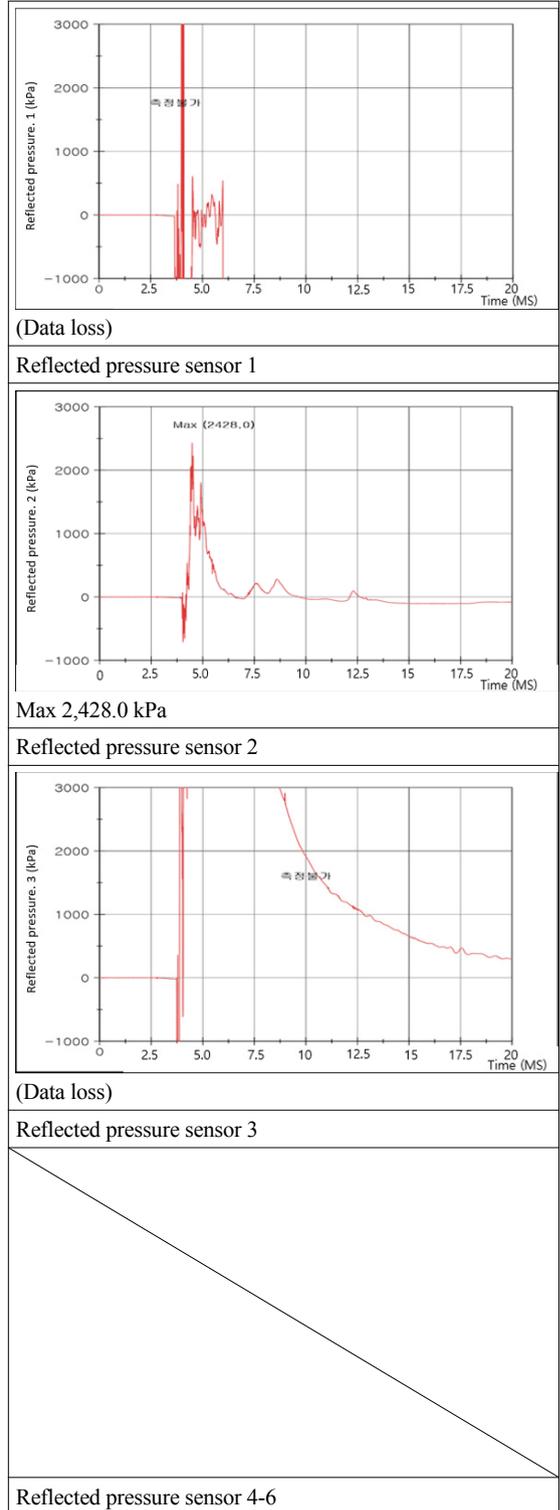
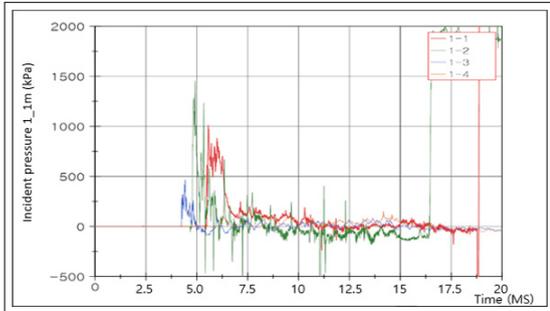
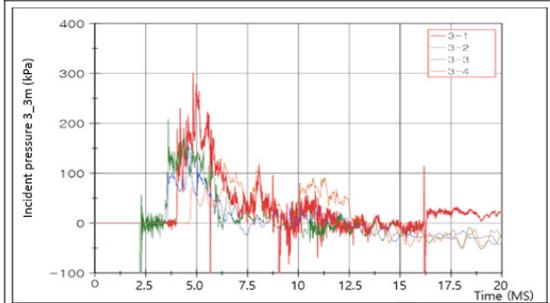


Fig. 8. Reflected pressure



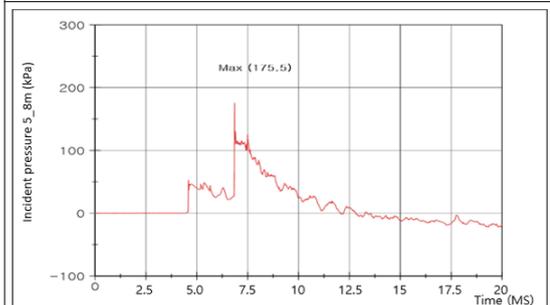
Max 1,455.2 kPa

A. Incident pressure 1 m from the wall at different heights



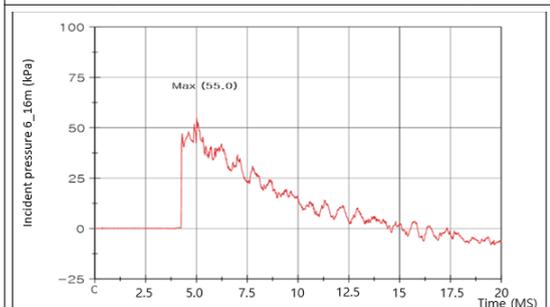
Max 301.0 kPa

B. Incident pressure 3 m from the wall at different heights



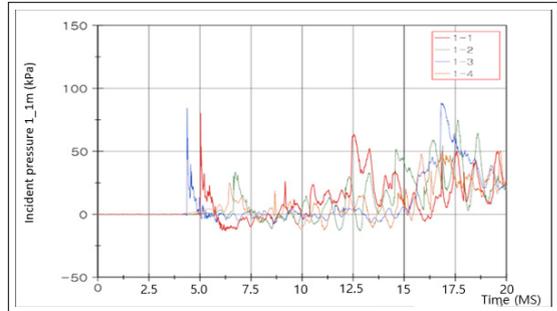
Max 175.5 kPa

C. Incident pressure 8 m from the wall at 1.5 m height



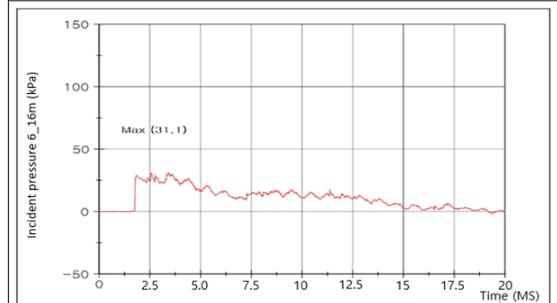
55 kPa

D. Incident pressure 16 m from the wall at 1.5 m height



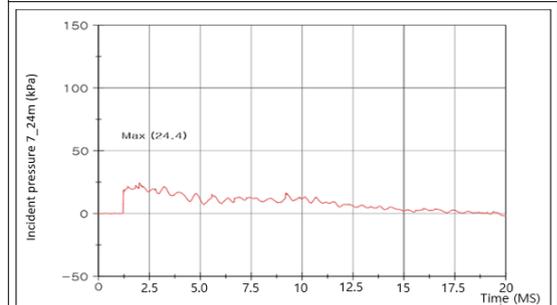
(Max 84.2 kPa)

A. Incident pressure 1 m from the wall at different heights



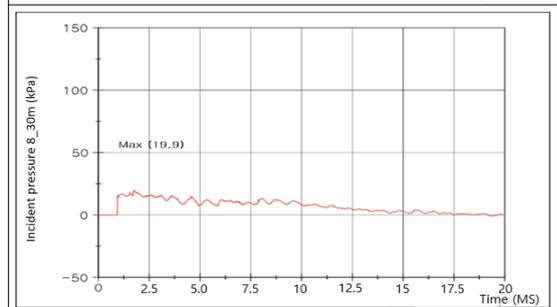
(Max 31.1 kPa)

B. Incident pressure 16 m from the wall at 1.5 m height



(Max 24.4kPa)

C. Incident pressure 24 m from the wall at 1.5 m height



(Max 19.9kPa)

D. Incident pressure 30 m from the wall at 1.5 m height

Fig. 9. Incident pressure on RC protective wall

Fig. 10. Incident pressure on PC protective wall

5.1.2 PC 방호벽 250 mm

방호벽에 미치는 반사압은 순수 TNT의 힘이 전달 되는 것이므로 PC 방호벽에 미치는 영향도 Fig. 8과 동일하다 판단하고 진행하였으며 Fig. 10에 PC 방호벽 배면에 미치는 폭압 영향력을 나타내었다.

5.2 방호 성능 분석

방호벽의 피해 저감 성능을 평가하기 위하여 반사압 센서로 측정된 방호벽에 미치는 순수 폭발 압력 데이터와 방호벽 배면에 미치는 압력을 측정하는 입사압 센서 데이터를 비교하여 피해 저감 효과를 분석하고자 하였다. 그러나 반사압 센서로 측정된 데이터가 큰 폭압으로 인해 망실되어 이전 실험⁹⁾에서 얻은 순수 폭발 압력과 RC, PC 방호벽에 의해 저감된 폭발 압력을 거리별로 아래 Fig. 11에 나타내었다.

그래프에 따르면 RC 방호벽은 초기 폭발압을 약 78.14% 감소시키는 효과를 보였으며 PC 방호벽은 이보다 더 높은 약 90% 이상의 효과가 나타났다. 이는 방호벽이 폭발압을 효과적으로 흡수하고 배면 지역에 미치는 피해를 상당히 저감시킨다는 것을 의미하며 거리별 압력 변화도 주목할 만하다. 방호벽이 없는 경우와 비교하였을 때 약 4 m 지점까지 방호벽이 설치된 상황에서 상당한 압력 저감이 관찰되었다. RC 방호벽은 이 거리에서 약 74%의 저감 효과를 나

타내었고 PC 방호벽은 여전히 높은 수준의 피해 저감 성능을 유지하며 약 90% 이상의 저감 효과를 보였다.

그러나 고가의 수소충전소 건설에서 방호벽 선택은 비용 효율성을 고려하여야 한다.

6. 결론

본 연구는 1차시험과 2차시험을 통해 방호벽의 피해 저감 성능을 검증한 결과를 제시하였다.

1) 1차시험에서는 기존 규정에 따른 방호벽의 성능을 평가한 결과 블록제와 강판제 방호벽은 방호 성능이 부족하였고 RC 방호벽의 방호 성능이 우수하였다.

2) 2차시험에서는 RC 방호벽의 두께를 200 mm로 증대시켜 실험하였으며 추가로 효율적인 PC 방호벽(두께 250 mm)을 제작하여 실험하였다.

3) 시험 결과 RC와 PC 방호벽 모두 폭발 지점에서 1 m 떨어진 벽면이 파괴된 것을 확인할 수 있었고 과거 open field 실험으로 순수 폭발 압력을 측정 한 값과 비교한 결과 RC 방호벽의 경우 초기 폭발 압력을 약 80% 저감시켰으며 PC 방호벽의 경우 초기 폭발 압력을 90% 이상 저감시켰다. 결론적으로 본 실증시험 결과가 향후 안전한 방호벽 설계 규격 마련에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20215810100020).

References

1. SNe Research, "In Q1 2024, global FCEV market with a 3 6.4% YoY degrowth", SNE Research, 2024. Retrieved from https://www.sneresearch.com/en/insight/release_view/270/page/0.
2. B. Kang, T. Kim, and T. Lee, "Analysis of Costs for a Hydrogen

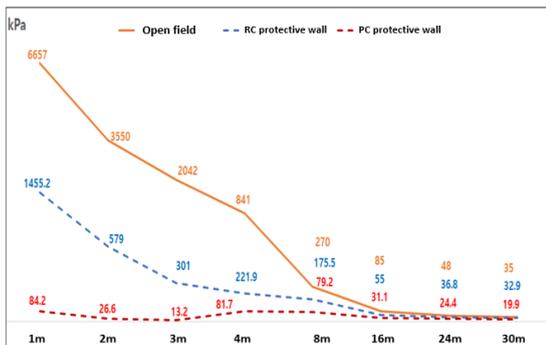


Fig. 11. Blast pressure at different distances from the rear of the protective wall

- Refueling Station in Korea”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 27, No. 3, 2016, pp. 256-263, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2016.27.3.256>.
3. S. H. An, E. H. Kim, S. H. Lee, and B. C. Ma, “Comparative analysis of IEC standard and simulation results for hydrogen hazardous distance”, *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 28, No. 1, 2024, pp. 19-26, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2024.28.1.19>.
 4. A. Kumamoto, H. Iseki, R. Ono, and T. Oda, “Measurement of minimum ignition energy in hydrogen-oxygen-nitrogen premixed gas by spark discharge”, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 301, 2011, pp. 012039, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/301/1/012039>.
 5. M. J. Jeon, D. J. Jang, and M. C. Lee, “A study on the risk assessment and improvement methods based on hydrogen explosion accidents of a power plant and water electrolysis system”, *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 66-74, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.1.66>.
 6. V. Molkov and W. Dery, “The blast wave decay correlation for hydrogen tank rupture in a tunnel fire”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 55, 2020, pp. 31289-31302, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.062>.
 7. J. Shin, “Damage evaluation of adjacent structures for detonation of hydrogen storage facilities”, *Journal of Korean Society of Disaster and Security*, Vol. 16, No. 1, 2023, pp. 61-70, doi: <https://doi.org/10.21729/ksds.2023.16.1.61>.
 8. Y. Y. Yang, J. G. Jo, W. I. Park, and H. B. Na, “TNT explosion demonstration and computational fluid dynamics for safety verification of protection wall in hydrogen refueling station”, *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 27, No. 4, 2023, pp. 102-109, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2023.27.4.102>.
 9. H. Lee, C. Yu, and S. Lee, “Experimental study on the open field explosion test method for TNT equivalent of hydrogen”, *Korean Society for Energy 2024 Spring Annual Conference*, 2024, pp. 79. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11792722>.