



수소충전소 방호벽 안전성 검증을 위한 TNT 폭발실험 및 전산유동 해석

양윤영*,** · 조재근** · 박우일** · †나현빈***

*명지대학교 재난안전학과 박사과정, **한국가스안전공사,

***명지대학교 재난안전학과/화학공학과 교수

(2023년 10월 6일 접수, 2023년 12월 25일 수정, 2023년 12월 26일 채택)

TNT Explosion Demonstration and Computational Fluid Dynamics for Safety Verification of Protection Wall in Hydrogen Refueling Station

Yun-Young Yang*,** · Jae-Geun Jo** · Woo-Il Park** · †Hyon Bin Na*,***

*Department of Disaster and Safety, Myongji University, Yongin, Gyeonggi-do 17058, Korea

**Korea Gas Safety Corporation, Eumseong, Chungcheongbuk-do 27738, Korea

***Department of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin, Gyeonggi-do 17058, Korea

(Received October 6, 2023; Revised December 25, 2023; Accepted December 26, 2023)

요약

수소사회 실현에 있어 수요자가 수소를 가장 쉽게 만날 수 있는 시설인 수소충전소의 안전 확보가 중요하다. 수소충전소는 고압의 수소를 저장하는 압축가스설비 등으로 구성되어 있으며, 시설 내 수소 누출로 인한 화재폭발 또는 주변 화재의 영향으로 고압의 압축가스설비가 파열될 위험이 있다. 이에, 한국가스안전공사는 설치단계부터 위험요인을 찾아내 설계에 반영하고 법정 검사를 통한 안전 확보에 만전을 다하고 있다. 본 연구에서는 수소충전소에 설치하는 방호벽의 안전성 효과를 확인하기 위해 방호벽을 이용한 TNT 폭발 실험 시험을 실시하고, CFD 프로그램인 FLACS-CFD를 이용하여 실험결과와 비교·검증하였다. 실험시험 및 CFD 해석 결과 방호벽 후단에서 폭발 과압의 감소 효과가 위치에 따라 50%에서 최대 90%까지 감소하는 것이 확인되나, 일정거리를 벗어나면 그 효과가 떨어지는 것을 확인하였다. 방호벽의 안전성 검증을 위한 실험시험 및 전산해석 결과는 향후 방호벽 기준 최적화를 위한 제안에 활용하고자 한다.

Abstract - In realizing a hydrogen society, it is important to secure the safety of the hydrogen refueling station, which is the facility where consumers can easily meet hydrogen. The hydrogen refueling station consists of compressed gas facilities that store high-pressure hydrogen, and there is a risk that the high-pressure compressed gas facility will rupture due to a fire explosion due to hydrogen leakage in the facility or the influence of surrounding fires. Accordingly, the Korea Gas Safety Corporation is making every effort to find out risk factors from the installation stage, reflect them in the design, and secure safety through legal inspection. In this study, a TNT explosion demonstration test using a protection wall was conducted to confirm the safety effect of the protection wall installed at the hydrogen refueling station, and the empirical test results were compared and verified using FLACS-CFD, a CFD program. As a result of the empirical test and CFD analysis, it was confirmed that the effect of reducing the explosion over-pressure at the rear end of the protection wall decreased from 50% to up to 90% depending on the location, but the effect decreased when it exceeded a certain distance. The results of the empirical test and computer analysis for verifying the safety of the protection wall will be used in proposals for optimizing the protection wall standards in the future.

†Corresponding author:hyonbin@mju.ac.kr

Key words : hydrogen refueling station, risk analysis, explosion demonstration, protection wall, computational fluid dynamics, explosion over-pressure

I. 서 론

오늘날 국제사회는 지구온난화에 따른 이상기후 위기와 탄소중립 실현을 위한 중요한 길목에 서 있다. 탄소중립 실현에 있어 수소는 태양광 등 재생에너지와 함께 중요한 에너지전환 수단이다. 수소에너지 활용에 있어 수소충전소는 일반 시민이 수소를 만날 수 있는 게이트 시설로 안전의 확보가 가장 중요하다. 수소경제 실현에 있어 일반 시민의 동의와 지지 및 참여를 끌어내기 위해서도 수소충전소의 안전 확보가 필수적이라고 할 수 있다.[1] 이에 대한민국 정부는 2019년에 “수소안전관리 종합대책”을 수립하여 추진하였고, 2023년에는 “수소 안전관리 로드맵 2.0”을 발표하였다.

2019년 발표된 “수소경제 활성화 로드맵”에 따라 국내 수소충전소는 2040년까지 1,200개소를 구축할 계획이며, 2018년 14개소에 불과한 것이 2023년 8월 현재 189개소에 충전기는 265기가 설치되어 운영 중이다. 수소충전소 안전을 확보하기 위해 고압가스안전관리법(이하 ‘고법’)에서 정하는 기준에 따라 시설을 설치해야 하며 설계단계부터 안전영향평가를 통해 위험요인을 파악 분석 및 제거토록 하고 있다. 더불어, 운영단계에서는 강화된 정기검사인 최첨단 장비를 활용한 정밀안전진단을 실시하고 있으며 수소충전소 상설안전점검, 실시간 모니터링 시스템 구축, 사업자 자율안전관리 지원을 위한 점검장비 4종(휴대용가스누출검지기, 열화상측정기, 접지저항측정기, 표준가스분사장치) 무상임대 사업 등 3중 안전관리체계 구축을 통해 안전관리에 만전을 다하고 있다. 수소충전소 안전성 향상 방안 중 일환인 방호벽은 가스누출 또는 주변 화재의 영향 등으로 화재나 폭발이 발생했을 때 시설 및 인명피해를 예방 또는 완화하기 위해 설치하도록 한다.[2]

방호벽은 고법에 따른 충전소 설치기준에 따라 보호시설, 사업소 경계 거리 또는 다른 종류의 충전소 등과 이격거리를 유지하지 못할 경우나 충전소 내 압축가스설비 등 설비 간에 위해요소가 전이되는 것을 방지하기 위해 설치토록 하고 있으며, 안전영향평가를 통한 피해거리를 완화하기 위해 방호벽 설치가 필요하다고 판단될 경우 설치되기도 한다.

수소충전소의 방호벽과 관련된 연구로 이수지와 양호성은 각각의 연구에서 수소충전소 내에서 수소

누출 및 폭발에 따른 복사열과 폭발 과압의 범위를 확인하기 위해 전산 유체 역학(computational flow dynamics, CFD)를 실시하여 결과값을 제시하였으며 [3,4], 강승규는 충전소에서 사고 발생빈도 데이터와 점화 확률을 활용해 제트화염과 폭발에 의한 피해영향을 분석하고 사고 발생 시 피해영향 확산방지를 위해 방호벽 설치를 통해 폭발압력 및 복사열의 확산을 방지하여 위험도를 크게 저감할 수 있다고 제안하였다[5]. Robert W. Scheter는 수소 제트화염을 다양한 구조의 방호벽에 인가하여 방호벽 전후단에 미치는 복사열과 폭발의 변화 등을 측정하고 방호벽 주변 지역에서 복사열과 화염의 유속 및 과압의 위험의 영향을 약화하는 효과를 확인하고 방호벽 구성과 배치에 대한 지침을 제공하였다[6]. 김지유는 수소용기 보관실 내 가스폭발에 따른 방호벽 방호성능과 구조안전성을 확인하기 위해 실증시험과 전산 구조해석을 실시하였다[7]. 그러나, 해당 연구들은 대부분 실증시험이 아닌 시뮬레이션에 근거한 결과만을 제시하였고, 일부 실증시험은 실제 수소충전소 환경과 고압수소 사용 여건을 재현하지 못했다는 한계가 있다.

본 연구에서는 수소충전소 내 압축가스설비 또는 저장설비인 튜브트레이러가 이상상황 발생으로 설비 파열이 일어나 압축수소가 물리적·화학적 폭발이 일어날 경우 방호벽에 의한 피해저감 효과를 확인하고자 TNT 당량법에 의한 폭발 실증시험을 실시하였다. 수소 폭발에너지를 환산할 수 있는 TNT(trinitrotoluene)를 이용한 폭발 실증시험 결과를 검증하고 동일 두께에서 방호벽 높이에 따른 피해저감효과의 연관성을 확인하기 위해 가스사고(화재·폭발) 전문해석 프로그램인 FLACS-CFD (GexCon AS, Norway)를 활용해 폭발해석을 실시하였다. 본 연구 결과는 수소충전소 안전성 향상을 위한 방호벽 개선안을 제시하는데 활용하고자 한다.

II. 수소충전소 위험요인 및 국내 방호벽 설치 기준 현황

2.1. 수소충전소 위험요인

현재 국내에 설치되는 충전소는 수소를 고압(85 MPa)으로 압축저장하고 저장된 수소를 수소전기자동차(70 MPa) 등에 차압(cascade) 방식으로 충전

Table 1. Damage impact from explosive overpressure

Over-pres sure(kPa)	Damage impact
0.2	Partially damaged window glass
2	0% damage to the roof and windows of the house
5	Damage to the structure of a house
6.9	Partial damage to the house (irrecoverable)
15.8	The minimum limit of serious structural damage
20	Damage to building steel structures and separation from foundations
40	House almost destroyed

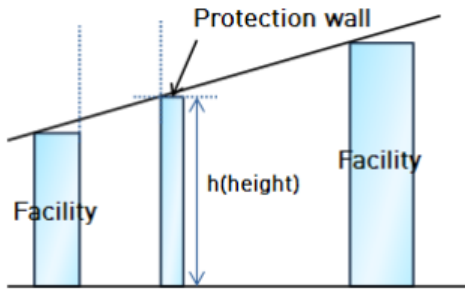


Fig. 1. Schematic diagram of barrier installation

하고 있다. 수소충전소의 위험요인은 다양한 것이 있겠으나 주된 위험요인은 수소배관 피팅체결부 등의 수소가스 누출로 인한 화재폭발 또는 주변 화재의 영향으로 고압의 압축가스설비가 과열되어 주변에 막대한 피해가 전파되는 경우이다. KOSHA GUIDE P-102-2012 및 액화수소 제조 시설추가 안전 기준안에 따른 폭발 과압에 의한 피해 영향 정도를 Table 1에 정리하였다.[8,9]

2.2. 국내 방호벽 설치기준

국내 수소충전소는 앞서 언급하였듯이 고법에 따른 상세기준 KGS Code FP216(제조식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사 기준) 및 FP217(저장식 수소 자동차 충전의 시설·기술·검사 기준) 등에 따라 설치하고 있으며, 주요 안전확보 방안으로 보호시설과 이격거리 유지, 가스누출검지경보장치 설치 및

화염검지기 설치 등을 규정하고 있다. 특히, 방호벽의 경우 보호시설과 이격거리를 유지하지 못할 경우 또는 설비 간 위험이 전파되지 않도록 하는 목적으로 설치하도록 하고 있다.[10]

국내에서 설치하는 방호벽은 철근콘크리트제 방호벽 및 강판제 방호벽 등을 사용하도록 규정하고 있으며, 방호벽은 Fig. 1과 같이 설비 간 거리가 30 m 이내이면 설치 외면으로부터 방호벽 상단 및 양쪽 끝을 지나는 직선이 다른 설비와 만나지 않도록 설치하도록 규정하고 모든 방호벽의 높이(h)는 2 m 이상으로 하도록 하고 있다[10].

III. 방호벽 안전성 검증

3.1. 위험해석 및 시나리오 설정

현재 국내 수소충전소는 최초 설치 또는 저장·처리능력의 증가 및 설비 이동을 하는 경우 충전시설의 입지 및 배치 등에 대해 안전영향평가를 실시하고 있다. 안전영향평가의 목적은 충전시설 내에 존재하는 위험(hazard)을 파악하고 그에 따른 위험성(risk)을 사고빈도(frequency)와 결과(consequence)의 조합 크기로 분석·평가하여 허용가능한 범위를 벗어난 위험에 대해 위험감소대책을 수립하고 개선하기 위한 일련의 활동을 말한다. 보통의 위험감소대책은 위험을 제거하거나 대체 또는 통제의 방법을 통해 이루어진다.

본 연구에서는 현재 실시되고 있는 수소충전소 안전영향평가 사례를 참고하여 사고피해 강도는 매우 크나 발생확률이 낮아 위험성(risk)은 크지 않지만, 사고 발생 시 치명적인 피해를 유발할 수 있는 튜브트레일러 또는 압축가스설비의 사고를 대상으로 하였다.[11, 12] 사고 시나리오 가정조건은 수소취성, 주변 화재 전파 등에 설비가 노출되었으나 안전설비 미작동 등의 원인으로 급격히 폭발했을 때를 감안하여 실증시험 및 전산유동해석을 실시하였다. 방호벽 실증시험은 수소저장용기가 급격히 과열되어 내부 압축수소가 물리적·화학적으로 폭발하는 경우를 TNT 당량법을 통해 모사하여 폭발시험을 실시하였으며, 전산유동해석은 FLACS-CFD 내 blast scenario를 활용하였다. 폭발 현상은 폭발 물질의 종류, 형태, 무게 및 에너지에 따라 압력이 순간적으로 발생하고 이때 폭발 과압은 가까운 거리 및 먼 거리에서 급격한 변화를 보인다. 따라서, 폭발해석 시 구체적인 매개변수, 실험조건 설정 등에 따른 결과 도출이 필요하다. 이에 본 실증시험과 전산유동해석은 동일 조건에서 폭발 과압을 주요 측정항목으로 선정하였다.

3.2. TNT 폭발 실증시험 및 결과

수소충전소 방호벽에 대한 TNT 폭발 실증시험은 Fig. 2와 같이 가상의 충전소에 설치된 압축가스설비를 TNT로 대체하여 실시하였다. TNT 설치장소에서 한 면은 다른 설비를 마주하고 있다는 가정하에 개방공간(open field)로 설정하였으며, 충전소 안전기준에서 보호시설 또는 사업소 내부에 사람을 수용할 수 있는 건축물이 처리설비 및 압축가스설비로부터 30 m 이내에 있는 경우 방호벽을 설치토록 한 규정, 압축가스설비 등이 철도와의 이격거리를 30m이상 유지토록 한 것 및 설비와 설비 사이의 거리가 30m를 초과하는 경우 Fig. 1의 방호벽 설치규정을 따르지 않아도 된다는 점을 참고하여 다른 한 면에는 높이 2 m × 폭 5 m의 일반 규격 방호벽을 설치하였다. 폭발 과압 측정을 위한 센서는 방호벽 후단과 개방공간에 모두 거리별로 배치하였으며, 각 위치에서 높이 1 m에서 4 m까지 1 m간격으로 4 개의 센서가 설치되었다. 측정거리는 실험 여건상 방호벽 후단은 2.88~16m까지 측정하고 개방공간은 2~32 m까지 측정하였다.

TNT 상당질량은 Marshall(1976)에 따른 환산거리와 과압과의 관계를 이용하여 피해영향거리를 산정하는데 사용된다[13]. 실증시험을 위한 TNT 등가량은 용기 폭발이 TNT 폭발과 유사하다는 실험적 증

거로 정리한 기법을 활용하여 용기 내 수소가스가 모두 폭발한다는 가정하에 식 (1)로 상당질량(Q_{TNT})을 산정하였다[14].

$$Q_{TNT} = \frac{\eta M_f H_c}{H_{cTNT}} \quad (1)$$

- M_f = 누출된 가연성물질의 질량(kg)
- η = 실험적 폭발효율(0.03~0.042)
- H_c = 가연성가스 연소열(kJ/kg, 수소: 142 MJ/kg)
- H_{cTNT} = TNT 연소열(4,680 kJ/kg)

수소충전소에 가스를 공급하는 튜브트레이일러의 보통 용기 1개가 저장하는 가스량이 약 32 kg이고 일정 부분 가스를 소진한 상태에서 화재 등으로 용기가 과열한다고 가정하여, 이에 상당하는 TNT 당량으로 8 kg과 20 kg을 선정하였다.

TNT 8 kg 폭발 종합 데이터는 Table 2이며 지면에서의 높이에 따라 방호벽 후면(back) 바로 뒤(거리 2.88 m 지점)에서는 Fig. 3과 같이 약 88~222 kPa의 과압이 측정되었다. 높이별로는 지면 가까운 곳이 가장 낮고 방호벽 보호 범위 (2 m) 위쪽에 있는 3 m 높이에 가장 높게 측정되었으나, 방호벽을 설치하지 않은 쪽(open) 거리 2 m 지점에서는 250~717 kPa의 과압이 측정되었고 높이별로는 폭발 원점에 가까운 높이 1 m 지점이 가장 높게 나타났다. 전체적으로 방호벽 뒤쪽보다 높게 측정된 것으로 보아 방호벽 효과가 확실히 나타난 것으로 판단된다. 거리 4 m 지점의 경우 2 m 거리와 동일하게 방호벽 뒤쪽이 오픈된 곳보다 약 2~6배까지 과압이 낮게 측정되어 방호벽 효과가 나타났으며 높이 1 m와 2 m 지점에서 과압은 큰 차이가 없고 높이 3 m 지점에서 방호벽 효과가 나타났다. 거리 8 m 지점에서는 감소된 방호벽에 의한 과압 감소 현상이 관찰되었으며, 16 m 지점에서는 방호벽 효과가 확연하게 줄어든 것으로 보아 일정 거리를 넘어서면 방호벽에 의한 과압 차단 효과가 감소하는 것으로 확인되었다. 방호벽 후단에서 측정된 과압범위는 22~222 kPa로 측정되어 확률은 매우 낮지만, 만약 용기가 폭발할 경우 Table 2에서 제시한 피해정도에 의하면 모든 지점에서 건물에 심각한 손상을 줄 수 있는 것으로 확인되었다.

TNT 20 kg 폭발의 경우(Table 3) 8 kg 시험 결과와 달리 방호벽 뒤쪽 2.88 m 지점과 open 공간 4 m까지 센서의 측정범위를 벗어났거나 다른 원인으로 인해 과압이 측정되지 않았다. 센서 위치별 과압 측정 결과는 8 kg과 비교 시 전반적으로 압력이 높게 측정되었고, 거리 8 m까지는 방호벽에 의한 확연한 과압 감소 효과가 보여진다.

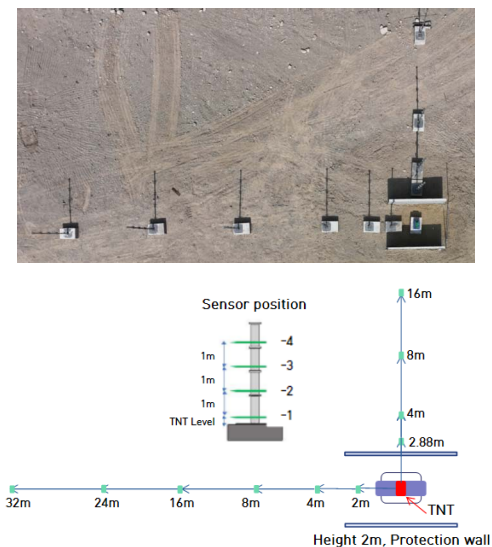


Fig. 2. A photograph of TNT explosion demonstration site (up) and schematic diagram for installation of barrier and sensors (down)

Table 2. Measurement of overpressure by distance and height in 8 kg TNT explosion

Division (kPa)		Height 1 m	Height 2 m	Height 3 m	Height 4 m
Distance 2.88 m back		88	134	222	196
Distance 2 m open		717	546	250	306
Distance 4 m	back	71	65	95	96
	open	197	373	262	195
Distance 8 m	back	59	47	38	39
	open	99	78	87	78
Distance 16 m	back	39	36	24	22
	open	42	41	39	38
Distance 24 m open		22	20	22	22
Distance 32 m open		15	13	14	27

Table 3. Measurement of overpressure by distance and height in 20 kg TNT explosion

Division (kPa)		Height 1 m	Height 2 m	Height 3 m	Height 4 m
Distance 4 m back		89	102	142	157
Distance 8 m	back	112	48	61	65
	open	199	183	148	163
Distance 16 m	back	63	65	61	49
	open	61	53	47	46
Distance 24 m open		31	28	27	28
Distance 32 m open		21	19	20	24

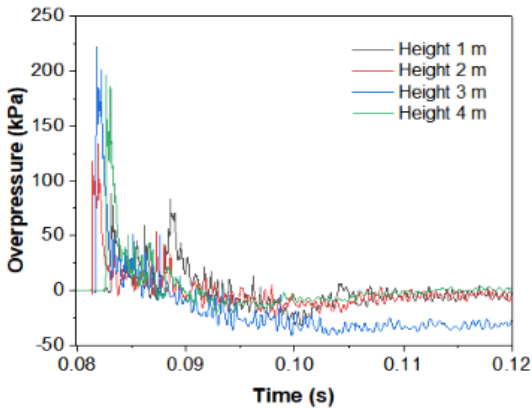


Fig. 3. Measurement results of overpressure at 2.88 m beyond the barrier in 8 kg TNT explosion

또한, 8 kg 폭발의 거리 4 m 지점과 20 kg 폭발의 거리 8 m 지점에서 높이 1 m 과압이 높이 2 m 위치보다 높게 측정된 것은 지면에서의 반사압이 입사압과 중첩되어 나타난 효과로 판단된다.

3.3. 전산유동해석 및 결과

CFD 소프트웨어인 FLACS-CFD는 화재, 폭발 및 대기 확산모델이 제시된 TNO yellow book을 기반으

로 RANS(Reynolds-averaged navier-stokes) solver를 활용하는 유한체적 해석 프로그램으로 유체의 유동과 열 흐름을 지정된 범위에서 편미분 방정식을 통해 수치해석으로 계산하는 방법을 적용하고 있다. 폭발의 경우 실증 대상이 되는 가스에 대해 TNT 등 가량을 환산하고, TNT 폭발을 이용하여 증기운 전체가 폭발하는 것을 가정하여 폭발을 산정하는 방식으로 이루어진다[15].

그중 FLACS-CFD 폭발 시나리오(blast scenario)는 식 (2)의 계산식을 통해 폭발이 산출되고 실증시험과 동일한 형상으로 Fig. 4와 같이 Geometry를 설계하였으며, 과압 측정을 위한 Monitoring point도 동일 위치에서 확인할 수 있도록 구성하였다. 시나리오 조건은 대기압 1 atm, 대기온도 15 °C에서 결과 도출 인자는 과압(P)으로 설정하였다.

$$E_{av} = \frac{P_l \times V_g}{\gamma - 1} \tag{2}$$

$$\bar{R} = r_t \times \left(\frac{P_a}{E_{ex}}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$P_s = \bar{P}_s \times P_a$$

E_{av} = 폭발 유효 에너지(bar·m³)

γ = 실험적 설정값(1.4)

$E_{ex} = 2 \times E_{av} < \text{폭발물과 표적 간 각도 } 15^\circ \leq E_{ex} = E_{av}$

\bar{R} = 무차원거리

P_s = 측면 폭발(bar)

P_a = 주변 대기압(bar)

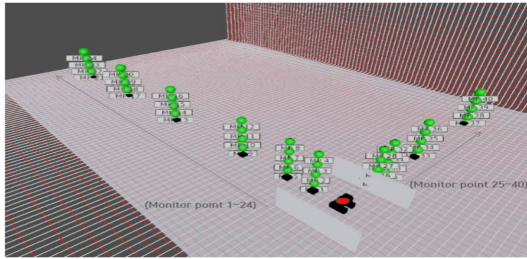


Fig. 4. Structural design and measurement points in FLACS-CFD modeling

Table 4. Simulation results of overpressure by distance and height in 8 kg TNT explosion

Division (kPa)	Height 1 m	Height 2 m	Height 3 m	Height 4 m	
Distance 2.88 m back	41	156	310	210	
Distance 2 m open	830	710	420	225	
Distance 4 m	back	43	59	107	125
	open	341	252	186	135
Distance 8 m	back	48	31	28	30
	open	106	103	98	91
Distance 16 m	back	28	26	24	22
	open	34	34	33	32
Distance 24 m open	18	17	17	16	
Distance 32 m open	12	12	12	12	

TNT 8 kg 폭발 CFD 해석 결과는 Table 4에 정리하였다. 실증시험과 과압 수치의 차이는 있었으나 유사한 양상의 결과값이 나타난 것을 확인하였다. 방호벽 후면(back) 바로 뒤(거리 2.88 m 지점)에서는 약 41~310 kPa의 과압이 측정되었으며 높이별로는 지면 가까운 곳이 가장 낮고 방호벽 보호 범위 위쪽에 있는 지면에서 3m 높이에서 가장 높게 측정되었다. 거리 8 m 지점까지는 방호벽에 의해 과압 감소 효과가 확실히 나타났지만, 16 m 지점에서는 높이별 차이가 거의 없어 방호벽 효과가 급격히 떨어진 것을 확인할 수 있었다. 방호벽을 설치하지

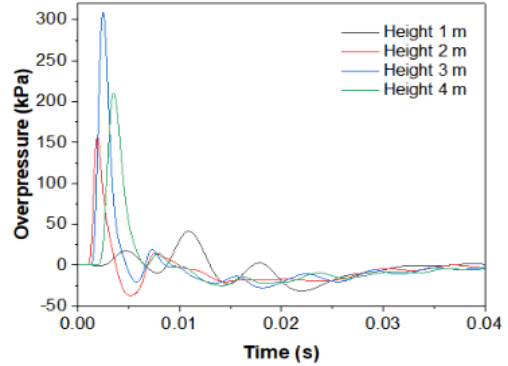


Fig. 5. Simulation results of overpressure at 2.88 m beyond the barrier in 8 kg TNT explosion

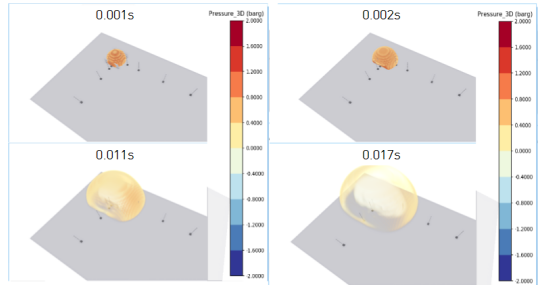


Fig. 6. Simulated overpressure profiles by time in 8 kg TNT explosion

않은 쪽(open)의 측정 과압의 경우에는 실증결과에서는 4 m까지 거리에서는 높이 1 m 지점보다 높이 2m와 3 m 지점이 높게 측정된 것과 달리 높이가 올라갈수록 낮게 해석된 것에 차이가 있으나 8 m 이상의 거리에서는 해석값이 실증값과 거의 유사할 정도로 확인되었다.

Fig. 5와 Fig. 6은 시뮬레이션 결과 해석된 시간에 따른 폭발 과압의 변화 그래프와 3차원 영상이다. TNT 8 kg 폭발의 과압 3차원 영상(Fig. 5)에서는 폭발 초기 방호벽에 의해 과압이 감소되는 것을 확인할 수 있으며, 시간이 경과하면서 방호벽 후면에서도 과압이 점차 증가해 방호벽 후면과 개방 위치의 과압이 유사해지는 것을 확인할 수 있다.

TNT 20 kg의 폭발 CFD 결과는 Table 5에 정리하였다. 위치별 확인된 최대 과압은 방호벽 바로 뒤 2.88 m 지점은 515 kPa, 4 m 지점은 181 kPa, 8 m 지점은 61 kPa, 16 m 지점은 36 kPa이 측정되었으며, 방호벽이 없는 개방된 지역은 2 m 지점이 1,280 kPa, 4 m

Table 5. Simulation results of overpressure by distance and height in 20 kg TNT explosion

Division (kPa)	Height 1 m	Height 2 m	Height 3 m	Height 4 m	
Distance 2.88 m back	62	276	515	328	
Distance 2 m open	1,280	1,040	682	320	
Distance 4 m	back	64	100	172	181
	open	475	332	253	196
Distance 8 m	back	61	52	41	41
	open	160	148	133	125
Distance 16 m	back	36	33	32	29
	open	46	44	42	41
Distance 24 m open	25	24	24	24	
Distance 32 m open	14	14	14	14	

지점은 475 kPa, 8 m 지점은 160 kPa, 16 m 지점은 46 kPa, 24 m 지점은 25 kPa, 32 m 지점은 14 kPa로 확인되었다. 20 kg 폭발해석 결과에서도 실증시험 결과와 과압의 차이는 있으나 유사한 경향성을 확인할 수 있다.

실증시험과 전산유동해석 결과를 비교하면 실증시험에서 측정된 폭발과압과 CFD로 계산된 폭발과압의 수치 차이는 있다. 하지만, Fig. 3과 Fig. 5와 같이 2.88 m에서 결과 그래프를 비교하였을 시 유사한 경향성을 얻을 수 있었다. 또한, 그 외에도 두 경우 모두 폭발원점에서 8 m까지는 방호벽에 의한 과압 감소 효과가 두드러지게 확인되었으며 높이별로는 방호벽 후면에서 지상 2 m까지는 방호벽 효과가 명확히 확인되나 3 m 이상 높이에서는 효과가 감소되는 것을 두 경우에서 모두 확인하였다. 따라서, 폭발과압 수치에서 다소 차이가 있음에도 불구하고 본 연구에서 활용한 FLACS-CFD는 방호벽 효과를 예측·검증하는데 유효하게 활용할 수 있다는 점과 방호벽의 유효성을 확인할 수 있는 결과를 얻을 수 있다.

IV. 결론

수소에너지는 탄소중립의 중요수단으로 그 활용은 점차 증대될 것이며, 이에 따른 수소 저장수단의 보급은 더욱 활성화될 것이다. 이에 본 논문은 수소 충전소 등에서 고압의 수소를 저장하는 압축가스설비에서 가스누출 또는 용기 파열 등에 의한 사고 발생 시 피해저감설비인 방호벽의 안전성에 대해 TNT 폭발시험과 FLACS-CFD를 활용한 전산유동해석을 실시하였다..

실증시험과 전산유동해석 결과 간 폭발 과압 양상의 유사성, 풍향 등에 의해 영향을 받을 수 있는 개방 공간이 아닌 방호벽 뒤에서의 90 % 이상의 폭발 해석 신뢰성, 시험 장소, TNT 양의 제약 등으로 실증시험을 다양하게 할 수 없는 한계점 극복이 가능하다는 점에서 CFD 시뮬레이션은 방호벽의 안전성을 평가하는데 충분하다고 판단된다.

아울러, 2 m 방호벽은 실증시험과 CFD 시뮬레이션 결과 모두 근접거리에서 피해저감효과를 두드러지게 보였으나, 폭발원점 거리 16 m 지점에서 측정된 과압은 건물의 심각한 구조적 손상을 가져오는 한계점인 15.8 kPa을 초과하는 22~46 kPa로 확인되었으므로 방호벽에 의한 감소 효과도 거의 보이지 않는다. 따라서 본 연구 결과를 활용해 현재 방호벽 높이를 최소 2 m 이상으로 규정하고 있는 기준은 설치 방법과 최소 높이 등에 대한 제도개선이 필요하다.

감사의 글

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

REFERENCES

- [1] 산업통상자원부 “수소경제 활성화 로드맵”(2019), “수소안전관리 종합대책”(2019), “수소 안전관리 로드맵 2.0”(2023)
- [2] 한국가스안전공사 통계자료, (2023)
- [3] Lee. S. J., “A Study on the Safety Distance Derivation by Estimating the extent of Damage impact of Liquid Hydrogen refueling Station” Inha Uni, (2017)
- [4] Yang, H. S., “CFD Analysis to Predict Gas Explosion and Flame Behavior of Hydrogen-Refueling Station”, Korea Maritime and Ocean Uni, (2020)

- [5] Kang, S. K., “Analysis on the Explosion Risk Characteristic of Hydrogen blended Natural Gas”, *Journal of Energy Engineering*, 23(4), 223-229, (2014)
- [6] Robert W. Schefer, “Experimental evaluation of barrier walls for risk reduction of unintended hydrogen releases”, *international journal of hydrogen energy*, 34, 1590-1606, (2009)
- [7] Kim J. U., “ A Study on Evaluation of protection Performance in Hydrogen Facility Using Numerical Analysis”, KNUT, (2022)
- [8] 한국산업안전보건공단, KOSHA GUIDE P-102 사고피해예측 기법에 관한 기술지침, (2012)
- [9] 한국가스안전공사 액화수소 제조 시설·기술·검사·감리·안전성평가 추가 안전기준, (2021)
- [10] 고압가스안전관리법에 따른 KGS FP216(제조식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사 기준) 및 KGS FP217(저장식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사 기준)
- [11] Park, W.I., “Risk Assessment of Tube Trailer Leaks at Hydrogen Charging Station”, *The Korean Institute of GAS*, 25(4), 57-62, (2021)
- [12] Park, W.I., “Analysis of Safety by Expansion of Hydrogen Charging Station Facilities”, *The Korean Institute of GAS*, 24(6), 83-90, (2020)
- [13] CCPS, “Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases”, AIChE, New York, USA, (2000)
- [14] Yoon, C.S., “Prediction of Damage Area due to Explosion of LNG-Hydrogen Mixed Gas”, *Explosives & Blasting*, 40(4), 27-37, (2022)
- [15] FLACS v22.2 User’s Manual, Gexcon AS, (2023)