



Received: 2025/02/21
Revised: 2025/03/04
Accepted: 2025/03/27
Published: 2025/03/31

***Corresponding Author:**

Yong Beom Pyeon

ROK Navy Command Submarineforce
602-15, Hyundong, Jinhae-gu, Changwon,
Gyungsangnam-do, 51698, Republic of Korea
E-mail: koreasoccer02@naver.com

폭발 시뮬레이션을 활용한 수소 생산기지 방호벽의 폭발 피해 저감효과 분석에 관한 연구

A Study on Analysis of Explosion Damage Reduction Effect on Protective Wall for Hydrogen Production Base via Explosion Simulation

정우승¹, 편용범^{2*}

¹해군 소령/해군대학 해군지휘참모과정 학생장교

²해군 잠수함사 작전참모실 전구대잠전담당 소령

Woo Song Jeong¹, Yong Beom Pyeon^{2*}

¹LCDR, ROK Navy/Student officer of Naval Commander & Step Course,
ROK Naval War College

²LCDR, TASW officer, ROK Command Submarineforce, ROK Navy

Abstract

본 논문에서는 수소 생산기지에서 폭발 발생 시 영향범위와 최적의 철근콘크리트 방호벽 두께를 도출하기 위해 ExDAM 3D 폭발 시뮬레이션을 통해 폭발 영향평가를 실시하였다. 영향평가는 크게 3가지 시나리오로 방호벽이 없는 상태, 기존 방호벽이 설치된 상태, 피해 저감목표 달성을 위한 방호벽 두께 도출로 구성하여 진행하였다. 피해 저감목표 설정은 기지 내 2차 폭발 가능성이 있는 시설물에 대하여 피해율이 30% 미만인 구조적 변형이 없는 표면적인 손상을 뜻하는 Slight 수준(경미한 수준)을 목표로 하였다. 두께 강화 및 반복 시뮬레이션을 통해 방호벽 두께 190 mm 설정 시 기지 내 시설물은 slight 미만의 피해수준을 보였다. 이를 통해 도출된 결과를 바탕으로 군 내에 현재 설치되어 있는 수소 생산기지와 앞으로 설계되어질 수소 생산기지에 대한 함의 및 시사점을 제시하였다.

In this Study, in order to derive the range of impact and the optimal thickness of the reinforced concrete protective wall in the event of an explosion at a hydrogen production base, an explosion impact assessment was conducted via ExDAM 3D explosion simulation. The impact assessment was largely carried out in three scenarios: the absence of a protective wall, the installation of an existing protective wall, and the derivation of a protective wall thickness to achieve the damage reduction goal. Setting the damage reduction goal was to set the slope level (minor level), which means surface damage without structural deformation with a damage rate of less than 30% for facilities with a possibility of secondary explosion in the base. When the thickness of the protective wall is set at 190mm through thickness reinforcement and repeated simulation, the facilities in the base showed a damage level less than Slight. Based on the results derived from this, implications for the hydrogen production base currently installed in the military and the hydrogen production base to be designed in the future are presented.

Keywords

수소 생산기지(Hydrogen Production Base),
폭발(Explosion), 방호벽(Protective Wall),
피해저감(Damage Reduction),
폭발 시뮬레이션(Explosion Simulation)

1. 서론

산업화 이후 지속적인 화석연료 사용으로 온실가스 배출이 증가함에 따라 지구온난화가 가속화되고 있다. 이로 인해 기후변화가 심화되고 있으며 홍수, 폭염, 폭설 등 지구촌 사회가 다양한 기후재난에 직면하고 있다. 이에 대응하여 많은 국가에서 탄소 배출권 거래제, 친환경 에너지 활용 확대 등 온실가스 감축을 위해 노력하고 있으며, 탄소 배출 감소 노력의 일환으로 청정/대체 에너지원으로 수소에너지에 대한 위상과 관심도가 증대되고 있다. 전 세계적으로 정부 주도 아래 관련 산업 육성이 진행 중이며, 우리나라도 2019년 정부의 수소경제 활성화 로드맵 발표 이후 관련 인프라의 뚜렷한 증가세가 보이고 있다[1]. 산업통상자원부에 따르면 2024년 12월 31일 기준 전국 18개소의 수소 생산기지와 386개소의 수소충전소가 운영 중이며, 수소경제 활성화 로드맵에 따르면 2040년까지 25개소의 수소 생산기지와 1,200개소의 수소충전소 운영을 목표로 하고 있다.

수소는 에너지원으로서 많은 장점이 있지만, 연소성이 높은 기체로 폭발범위가 넓고 화염 전파속도가 매우 빠른 가연성 가스가

다. 또한 제조, 운송, 저장 간 누출 및 확산으로 폭발 발생 시에는 막대한 인적, 경제적 손실을 야기할 가능성이 매우 높다[2]. 또한, 현재 진입 초기 단계인 국내 수소 산업에서 수소 충전 산업 및 수소 연료전지 차량에 사용되는 핵심부품 국산화율은 약 40% 정도로 대부분 국외 제품에 의존하고 있는 실정이다[3]. 낮은 핵심부품 국산화율은 해당 설비 또는 자동차의 고장 및 장애 발생 시 신속한 대응이 제한되며, 이는 초기 고장처리 미흡으로 이어져 위험요소가 확대될 가능성이 있다.

이러한 수소 관련 폭발사고는 국내·외에서 지속적으로 발생하고 있다. 에너지원으로 수소를 일찍이 활용하고 있는 국외에서는 2012~2020년 동안 크고 작은 수소 사고가 145건 발생하였으며, 일례로 2019년 노르웨이 오슬로 인근 수소충전소에서 고압 저장용기 플러그 틈새 누설과 점화원의 결합으로 대형 폭발사고가 발생하였다. 국내의 경우 한국산업안전보건공단에서 제작한 ‘수소안전매뉴얼(2022)’에 의하면 최근 10여년 간 국내에서 수소로 인한 누출 및 화재·폭발사고가 총 23건 발생하였으며, 4명의 사망자와 11명의 부상자가 발생하였다. 특히 2019년 강릉 과학단지 수소 저장탱크 폭발사고는 340억 원의 재산피해와 사망자 2명, 부상자 6명이 발생하는 등 막대한 인적·물적 피해로 이어졌다.

국내에서는 수소에너지 관련 폭발사고에 대한 피해 저감 대책으로 방호벽을 설치하고 있으며, 가스기술기준위원회에서 제정한 가스기술기준정보시스템(KGS Code: Korea Gas Standard Code) FP112/FP216/FP217(고압가스 일반제조의 시설·기술·검사·감리·안전성평가 기준, 제조/저장식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사 기준) 등에 관련 기준을 명시하고 있다. 그러나, 상기 기준에 따른 방호벽은 기존 가스 3법(고압가스 안전관리법, 액화석유가스의 안전관리 및 사업법, 도시가스사업법)에서 액화천연가스(LNG, liquefied natural gas)/액화석유가스(LPG, liquefied petroleum gas) 등에 대한 방호벽 기준을 준용한 것으로 수소 폭발 발생 시 방호벽의 피해 저감에 대한 검증은 부재한 상황이다. 수소에너지의 폭발력은 LNG 대비 10배 이상으로 기존 120 mm 철근콘크리트 방호벽의 두께는 폭발 발생 시 취성파괴로 인해 더욱 치명적인 피해를 초래할 수 있으며, 폭발 하중에 대하여 기존 기준을 따른 철근콘크리트 방호

벽이 유의미한 폭압 저감효과를 갖는지 검증이 수행되지 않아 폭발해석을 바탕으로 방호벽의 적절한 두께, 높이 등의 설계가 필요하다[4,5].

본 연구를 진행하기 전 수소 폭발량 산출, 수소 폭발 영향 평가 등 관련 연구 동향을 분석하였다. 수소 폭발량 산출 관련 선행연구 중 한우섭 등[6]은 폭발 압력의 영향을 산정하기 위한 방법으로 TNT 등가 모델이 비교적 간단한 계산방법의 이점으로 재난조사 또는 위험성 평가에 일반적으로 사용되고 있다고 언급하였다. 또한, 전인범[7]은 국내 안전관련 법규와 미 국방부 통합시설기준 3-340-02(2008)에 명시된 폭발사고 시 폭발하중 및 파편피해 산정 방식을 비교하였으며, 폭발압력을 산정에 있어서 공통적으로 TNT 등가량 환산법을 적용한다고 언급하였다. 수소 폭발 영향 평가와 관련된 선행연구의 경우, 김은정 등[8]은 수소충전소에서 발생하는 수소 누출 시나리오를 3D 전산유체역학 도구인 FLACS로 분석하여 수소 폭발에 따른 안전거리를 도출하였으며, 이진호 등[9]은 LS-DYNA 시뮬레이션을 활용한 폭발하중 평가를 통해 구조물 인근에 위치한 수소탱크에서 폭발이 발생했을 때 폭발압력을 받는 구조물의 시간의 흐름에 따른 동적 응답에 관한 해석을 수행하였다.

본 연구의 목적은 ‘수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률’ 제3조 ①항 ‘국가·지방자치단체 및 사업자의 책무에 명시된 수소의 안전관리에 필요한 시책 수립에 관한 항목’에 착안하여 수소 생산기지에서 폭발 발생 시 영향범위와 설치된 방호벽을 기반으로 폭발 시뮬레이션을 통해 최적의 방호벽 두께를 도출하는 것이다. 연구 대상은 우리나라에서 일 최대 규모로 수소에너지를 생산하는 A 수소 생산기지이며, 이 기지에 설치된 방호벽을 기반으로 피해 저감 목표 달성 두께를 선정하여 최적의 철근콘크리트 방호벽 두께를 도출하는 방안으로 연구를 진행하였다. 이를 위해 지리정보시스템(GIS, geographic information system)을 활용한 수치표고모델(DEM, digital elevation model)과 GIS 건물데이터를 결합하여 3D 폭발 시뮬레이션(BREEZE ExDAM) 상으로 수소 생산기지와 동일한 공간적 환경조건을 구현하였다. 더불어 상기 도출된 결과를 바탕으로 군 수소 생산기지에서 폭발 발생에 대비한 재난 및 안전관리계획 수립을 위한 정책적 의사결정의 근거를 제시하고자 하였다.

2. 연구대상 및 범위

연구대상의 공간적 범위는 ○○도 □□시 △△리 일대에 위치한 A 수소 생산기지 및 주변 지역사회이며, Fig. 1은 연구대상의 공간적 범위를 나타낸 것이다. 해당 지역의 지형은 전반적으로 평탄하나 수소 생산기지 우측으로 높이 100여 m 안팎의 완만한 야산이 존재한다.



Fig. 1. Spatial scope of this study(GIS)

데이터는 국토지리정보원의 수치표고모델(5 m 해상도)과 공공데이터포털의 ○○도 □□시 △△리 일대 GIS 건물정보 데이터를 활용하였다.

3. 연구방법

연구방법은 Fig. 2와 같이 3단계로 구성하였으며, 1단계로 연구지역 구성, 2단계로 사고영향평가, 3단계로 최적의 방호벽 두께 도출을 수행하였다.

1단계는 연구지역 구성 단계로 수소 생산기지에서 발생한 폭발사고에 대한 피해 규모를 최대한 실제와 유사하게 구현하기 위해 주변지형 및 건축물 속성정보를 유사하게 반영하였다. Arc GIS 프로그램을 활용하여 국토교통부의 GIS 건물정보 데이터와 국토정보지리원의 5 m 해상도의 수치표고모델로 연구지역을 구성하였다. GIS 건물정보는 건물의 지리적 위치, 높이, 연 면적, 건축재료를 반영하였으며, 수치표고모델은 연구지역 내 야산, 언덕 등 지형정보를 반영하여 폭발 발생 시 각 건축물의 취약성에 미치는 영향을 확인할 수 있다. GIS 건물정보 데이터에서 누락된 건물정보는 현장답사 및 Google Earth 등을 통하여 건축물의 높이, 재질, 구조 등을 반영하였다. 이를 통해 수소 생산기지에서 폭발 발생 시 지형 및 건축물에 의한 상호 간의 영향을 최대한 유사하게 구현할 수 있도록 연구지역을 구성하였다.

2단계는 사고 영향 평가 단계로 시뮬레이션 수행을 위하여 언론매체 및 홍보 브로슈어(brochure), 공공데이터/정보공개포털 등을 통하여 획득한 데이터

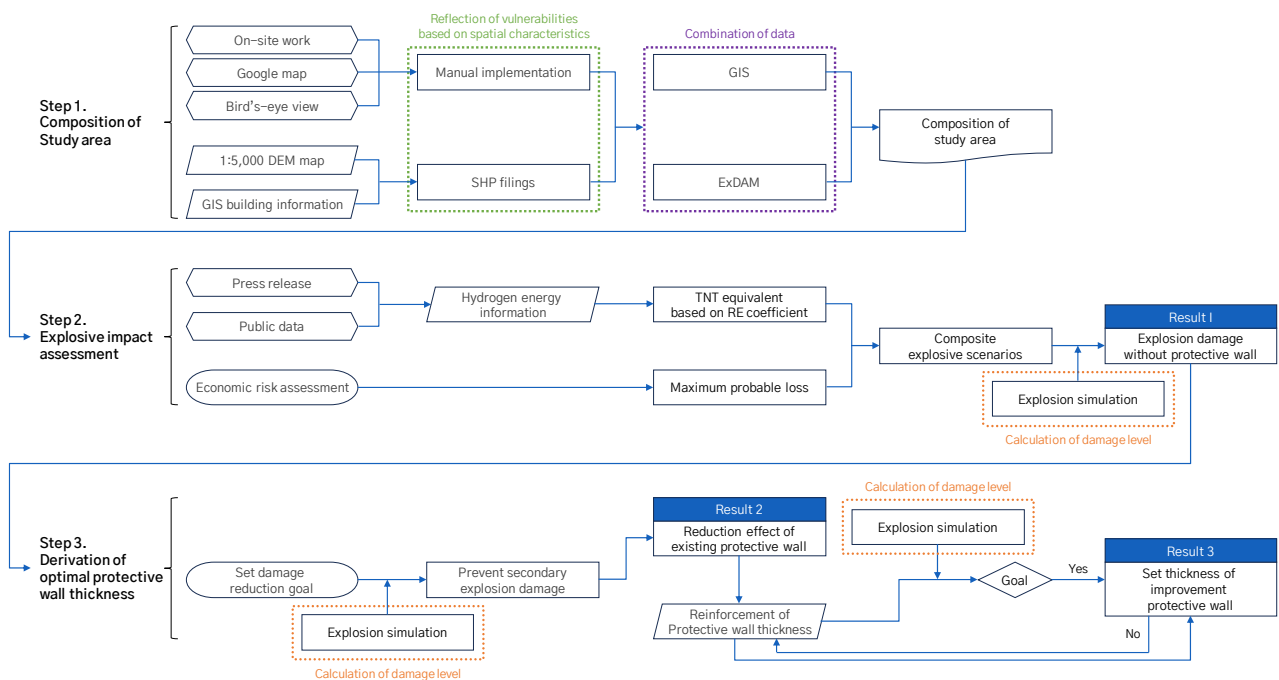


Fig. 2. Research flow chart

를 근거로 일 최대 생산량 기반 폭발 시나리오를 구성하였다. TNT 등가량 환산을 통해 수소 생산기지 내 저장된 수소의 폭발에너지를 도출하였다. 또한 TNT 등가량으로 환산한 수소 생산량에는 경제적 리스크 평가 방법 중 하나인 최대 추정 손해액(MPL, maximum possible loss) 개념을 반영하여 폭발 시나리오를 구성하였다.

3단계는 기존 방호벽을 기반으로 최적의 철근콘크리트 방호벽 두께를 도출하는 단계로 저장탱크 폭발 시 수소압축기, 개질기, 수소 정제기 등 수소 생산기지 설비에 의한 2차 폭발 방지 목표로 개선된 방호벽 규격을 도출하였다. 먼저 수소 생산기지 내 기존 철근콘크리트 방호벽을 설치한 후 폭발 시물레이션을 수행하여 기존 방호벽의 피해 저감 효과를 분석하였으며, 선행연구 및 시물레이션을 통하여 기존 방호벽과 동일한 높이를 기반으로 피해 저감 목표 달성을 위한 최적의 철근콘크리트 방호벽 두께를 도출하였다.

4. 폭발 시나리오 구성

4.1 일 최대 수소에너지 생산량 산출

언론매체 보도자료, 브로슈어 등 공개 데이터에 근거하여 A 수소 생산기지의 일 최대 수소에너지 생산량을 16 ton으로 확인하였다. ExDAM 시물레이션 프로그램은 폭발성 물질의 폭발력을 TNT 등가량 환산법으로 추산하며, 폭발성 물질과 동일한 폭발력을 가진 TNT 질량으로 폭발 영향 결과를 도출한다. 이를 통해 폭발 발생 시 폭압과 피해 영향범위를 도출할 수 있다. 따라서, 수소에너지의 폭발력을 도출하기 위하여 수소에너지 생산량을 TNT 등가량으로 환산하였다. 본 연구에서는 다양한 TNT 등가량 환산 방법 중 식 (1)과 같이 RE계수 기반 TNT 등가량 환산을 수행하였으며, 이때 수소의 RE계수는 0.1을 사용하였다[10].

$$W_{TNT} = W_G \times RE \quad (1)$$

여기서, W_{TNT} : TNT의 질량(kg),

W_G : 화학(폭발성)물질의 질량(kg),

RE : 폭발물의 힘을 측정할 때 이용되는 폭발성 물질의 고유 수치.

일 최대 수소에너지 생산량을 식 (2)와 같이 TNT 등가량으로 환산한 최종 산출값은 1.6 ton이다.

$$W_{TNT} = 16 \text{ ton} \times 0.1 \quad (2)$$

4.2 수소 생산기지 방호벽

현재 수소에너지 관련 시설의 방호벽은 한국가스기술기준위원회의 KGS CODE에 따라 설치되고 있다. 이에 따르면 방호벽의 종류에는 철근콘크리트, 콘크리트 블록, 강판 구조 등 세 가지가 있으며, 다만 수소자동차충전소의 경우 보호시설과 안전거리 미유지 시 반드시 철근콘크리트 방호벽만을 설치해야 한다. 수소충전소 설치 현장 조사자의 의견에 따르면 현재 설치된 대부분의 충전소 방호벽은 철근콘크리트로 되어 있으며, 그 두께는 200 mm 이상인 것으로 확인되었다.

이에 따라 기존 철근콘크리트 방호벽 규격에 기반하여 시물레이션 상에서 반복 구동하여 최적의 방호벽 두께를 도출하였다. A 수소 생산기지의 저장탱크는 Type 1 용기로 ASME SA372 Code를 사용하는 재질이며, 저장탱크 규격은 높이 2.2 m, 길이 6 m, 지름 70 cm이다. 또한, 상기 저장탱크 폭발을 보호하기 위해 KGS FU 212 특수고압가스 사용 시설·기술·검사 기준에 따른 철근콘크리트 방호벽이 설치되어 있다. 상기 기준에서 철근콘크리트 방호벽은 높이 2 m 이상, 두께 12 cm 이상으로 규정되어 있으며, 실제 A 수소 생산기지의 방호벽은 가로 12 m, 세로 7 m, 높이 2.4 m, 두께 12 cm로 설치되어 있다. 본 연구에서는 상기 설치규격을 바탕으로 ExDAM 3D 폭발 시물레이션 상에 동일한 재질과 크기로 철근콘크리트 방호벽을 구현하였다.

4.3 폭발 영향 평가 방법 및 시나리오

폭발 영향 평가는 미리 설정한 폭발 발생 시나리오를 바탕으로 수행하였다. 방법 측면에서 수소 생산지에서 폭발 발생 시 개별 건축물에 대하여 미치는 압력에 따른 피해 수준 연구를 수행하였고, ExDAM 3D 폭발 시물레이션 구동 결과에 따라 산출되는 개별 건축물에 미치는 피해율을 도출하였다.

폭발 영향 평가 시나리오는 3가지로 구분하였으

며, A 수소 생산기지의 일 최대 생산량을 TNT 등가량으로 환산한 폭발량 1.6 ton을 기반으로 연구를 수행하였다. 첫 번째로 방호벽이 없는 상태에서 폭발 시뮬레이션을 진행하여 폭발 발생 시 인근 지역사회에 미치는 피해를 분석하였다. 두 번째로 기존 규격에 따른 방호벽을 설치 후 폭발 시뮬레이션 진행을 통해 기지 내 건축물에 대한 피해를 확인하였다. 이를 통해 현재 설치된 방호벽이 목표 저감 효과 달성 여부를 분석하였다. 마지막으로 현재 방호벽의 가로/세로/높이에 기반하여, 폭발 시뮬레이션 상 두께를 강화한 뒤 반복 수행하여 목표 저감 효과를 달성할 수 있는 방호벽 두께를 도출하였다.

A 수소 생산기지는 그레이 수소 방식으로 도시가스(천연가스)에서 고온 수증기 개질을 통하여 수소를 생산한다. 이에 따라 기지 내 도시가스 압축기, SMR 개질기, 수소 정제기, tail gas buffer drum 등 저장탱크 폭발 시 2차 폭발을 야기할 수 있는 건축물들이 배치되어 있다. 이들 기지 내 건축물로 인한 2차 폭발은 사고 발생 시 피해 영향을 더욱 크게 할 가능성이 농후하며, 수소 생산기지 인근에 위험시설이 밀집한 환경적 특성에 따라 추가 폭발이 발생할 가능성도 배제할 수 없다. 따라서, 이러한 추가 폭발 방지를 위하여 상기 가정을 바탕으로 기지 내 폭발 위험 시설물에 대한 폭발 시뮬레이션을 수행하여 기존 방호벽의 효과 평가 및 두께를 개선한 방호벽의 저감목표를 피해를 30% 미만인 Slight 수준(Table 1 참조)을 목표로 연구를 수행하였다.

5. 연구결과

폭발 영향 평가를 위해 3가지 시나리오(방호벽이 없는 상태, 기존 규격에 따른 방호벽을 설치한 상태, 이후 방호벽이 목표 저감 효과를 달성할 수 있는 상태)를 기반으로 ExDAM 3D 폭발 시뮬레이션을 통해

순차적으로 연구를 진행하였다. 폭발 시뮬레이션 구동 시 개별 건축물에 미치는 피해율과 폭발압력은 시뮬레이션에 입력한 물질의 폭발력(TNT 등가량)을 기반으로 산출되었다. 또한, 지형 및 주변 건축물에 의한 차폐효과, 건축물의 재질 및 구조, 폭발원점으로부터의 이격거리 등의 변수가 반영되었으며, 시뮬레이션 자체적으로 구성된 연산과정에 따라 개별 건축물에 대한 피해율과 폭발압력은 각기 다르게 산출되었다. 폭발 시뮬레이션 상 건축물에 대한 피해율은 Table 1과 같이 도출된다.

5.1 방호벽이 없는 상태에서의 폭발 시뮬레이션 결과

첫 번째 시나리오에서는 연구지역에 방호벽이 없는 상태에서의 폭발 시뮬레이션을 통해 수소 생산지에서 폭발 시 피해 수준을 도출하였다. 폭발 시뮬레이션 결과는 Fig. 3와 같이 수소 생산기지 시설물 및 주변 건축물에 대하여 커다란 피해를 입혔으며, 그 외 지역은 다소 낮은 폭발압력을 받거나 폭발이 거의 발생하지 않았다. 이는 폭발원점으로부터 원거리 이격 및 위험시설에 따른 고강도의 방호시설, 야산 등 지형에 의한 폭발 저감 효과의 결과로 수소 생산기지 외 지역에 대한 피해는 경미함을 확인할 수 있었다. 폭발압력에 의한 619개의 건축물 재질 및 구조에 따라 피해율이 다르게 도출되었으며, Table 2와 같이 수소 생산기지 내 철근콘크리트 구조물인 유틸리티동과 근접지역의 건축물에 대한 영향은 기타 강구조물인 도시가스 관련 시설 건축물과 비교하여 피해율이 경미한 것을 확인할 수 있었다.

5.2 기존 방호벽 설치 상태의 폭발 시뮬레이션 결과

두 번째 시나리오에서는 연구지역에 설치되어 있는 철근콘크리트 방호벽의 규격을 폭발 시뮬레이션

Table 1. Degrees of damage for buildings in explosion simulations

Classification	Degree of damage	Level of damage
Insignificant	Minor damage with little effect	Less than 5 %
Slight	Superficial damage without structural deformation	5 % - 29 %
Moderate	Structural deformation, but repairable damage	30 % - 69 %
Severely	Structural changes resulting in serious non-repairable levels of damage	70 % or more

에 그대로 구축하여 수소 생산기지에서 폭발 시 피해 수준을 도출하였다. 폭발 시뮬레이션 결과는 Fig. 4와 같으며, 건축물의 피해를 방호벽이 없는 상태와 기존 방호벽을 설치한 상태에서의 시뮬레이션 결과에 따른 주요 건축물의 피해율은 Table 3와 같다. 수소 생산기지 인근 건축물의 피해율은 약 7 % - 54 %로 방호벽이 없는 상태에 비해 인근 건축물의 피해율이 현저하게 감소했고, 평균 약 59 %의 피해 저감율을 보였다. 그러나 일부 2차 폭발 위험성이 있는 건축물은

여전히 Moderate 수준(30 % 이상 70 % 미만)의 피해율을 보이는 것으로 확인되었으며, 이를 통해 개선 방호벽의 피해 저감 목표를 30 % 미만인 구조적 변형이 없는 표면적인 손상을 뜻하는 Slight 수준(경미한 수준)으로 설정하였다.

5.3 저감목표 달성을 위한 방호벽 두께 도출 결과

세 번째 시나리오에서는 기존 철근콘크리트 방호



Fig. 3. Simulation results without protective wall

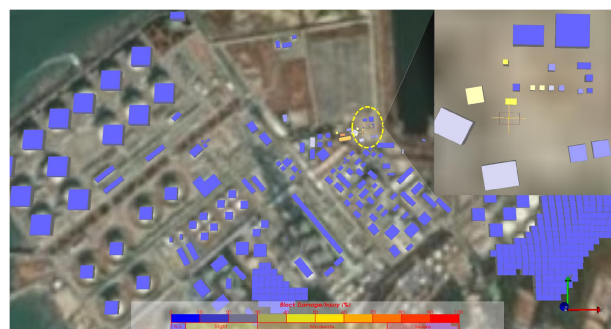


Fig. 4. Simulation results of existing protective wall installation status

Table 2. Damage rate of individual buildings without protective wall

No	Use of building	Material structure	Damage rate of individual buildings (%)	
1	Hazardous material storage and treatment facilities	Reinforced concrete	0	
2	Class 1 nearby living facilities		24.4	
∴	∴		∴	
606	Utility buildings	Reinforced concrete	36.5	
607	Management buildings		31.3	
608	Tail gas buffer drum		92.3	
609	Hydrogen purifier 1		91.2	
610	Hydrogen purifier 2		88.15	
611	Hydrogen purifier 3		85.54	
612	Hydrogen purifier 4		82.21	
613	Nitrogen package 5		Other steel structures	85.5
614	Nitrogen tank			87.5
615	SMR II reformer			88.3
616	City gas compressor	82.15		
617	SMR I reformer	83.5		
618	Gas emission facility	92.5		
619	City gas-related facilities	98.6		

Table 3. Comparison of damage rate of major buildings by installation of existing protective wall

No	Use of building	Material structure	Damage rate of individual buildings (%)	Damage rate for installation of existing protective wall (%)
1	Utility buildings	Reinforced concrete	0	13.4
2	Management buildings		24.4	15.4
3	Tail gas buffer drum		∴	38
4	Hydrogen purifier 1	Other steel structures	36.5	26
5	Hydrogen purifier 2		31.3	21.7
6	Hydrogen purifier 3		92.3	18.7
7	Hydrogen purifier 4		91.2	14.5
8	Nitrogen package 5		88.15	10.3
9	Nitrogen tank		85.54	13
10	SMR II reformer		82.21	8.4
11	City gas compressor		85.5	7.4
12	SMR I reformer		87.5	10.4
13	Gas emission facility		88.3	50.1
14	City gas-related facilities		82.15	54.8

벽 규격(가로·세로·높이)에 기반하여 두께 강화 및 반복적인 시뮬레이션 구동을 통해 자체 설정한 피해 저감 목표를 달성한 철근콘크리트 방호벽 결과를 도출하였다. 폭발 시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 같으며, 기존 두께 120 mm에서 190 mm로 70 mm를 강화했을 때 주요 건축물 피해율은 약 5 % - 26 % (Table 4 참조)로 기존 방호벽 설치 대비 평균 약 48 %의 피해저감 효과가 있음을 확인할 수 있었으며, A 수소 생산기 내 건축물이 Slight 수준(30 % 미만)의 피해를 입

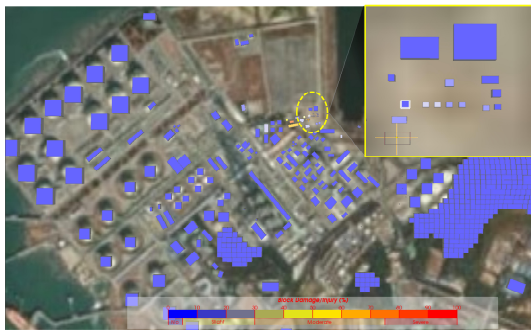


Fig. 5. Simulation results of improved protective wall installation status

Table 4. Comparison of damage rate of major buildings by installation of improved protective wall

No	Use of building	Material structure	Damage rate for installation of existing protective wall (%)	Damage rate for installation of improved protective wall (%)
1	Utility buildings	Reinforced concrete	13.4	10.87
2	Management buildings		15.4	12.56
3	Tail gas buffer drum		38	19
4	Hydrogen purifier 1		26	12.7
5	Hydrogen purifier 2		21.7	11.51
6	Hydrogen purifier 3		18.7	10.61
7	Hydrogen purifier 4		14.5	9.32
8	Nitrogen package 5	Other steel structures	10.3	7.61
9	Nitrogen tank		13	5.7
10	SMR II reformer		8.4	6.22
11	City gas compressor		7.4	5.31
12	SMR I reformer		10.4	6.22
13	Gas emission facility		50.1	21.52
14	City gas-related facilities		54.8	26.13

는 것으로 나타나 설정한 저감목표를 충족하였다.

폭발 시뮬레이션 결과분석을 통하여 기존 철근콘크리트 방호벽 규격에 기반한 피해저감 목표(Slight 수준의 피해: 30 % 미만)를 달성할 수 있는 최적의 철근콘크리트 방호벽 두께를 190 mm로 도출하였다.

6. 결론

본 연구에서는 A 수소 생산기지에서 생산되는 일 최대 수소량을 기준으로 실제와 동일한 폭발 시뮬레이션을 구축하여 폭발 시나리오를 통해 폭발 피해저감 방안을 제시하였다. 수소 에너지는 기후위기 대응, 에너지 안보 확립, 에너지원 확대 등의 차원에서 미래 에너지로 각광받고 있으며, 그 활용성이 확대되고 있다. 군에서도 미래 에너지 전환을 위해 수소 에너지가 도입되었지만, 인화성이 높고 산소와 빠르게 반응해 폭발 반응을 일으키는 특성 때문에 위험성이 문제점으로 항상 대두되고 있다. 따라서, 폭발 피해 발생 시 피해 저감을 위한 예방책을 포함한 안전관리는 매우 중요하다. 군 수소 생산기지와 생산량은 비공개이므로 공개되고 확인된 민간 수소 생산기지에 대한 데이터로 폭발 시뮬레이션 피해 저감 효과 분석에 대한 연구를 진행하였다. 이를 통해 도출된 결과를 바탕으로 군 내에 현재 설치되어 있는 수소 생산기지와 앞으로 설계될 수소 생산기지에 대한 함의 및 시사점을 다음과 같이 크게 3가지로 제시하고자 한다.

첫째, 수소 생산기지 설치장소는 인근에 지형지물, 언덕, 야산 등이 위치한 곳으로 선정해야 한다. A 수소 생산기지 인근 지형지물, 언덕, 야산 뒤편의 건축물은 폭발로 인한 압력의 영향이 미치지 않음을 확인할 수 있었다. 또한, 폭발 시뮬레이션을 통해 초기 폭발압력이 전방위로 균일하게 확산되다가 시간이 흐름에 따라 폭압이 야산 정상부에 근접할수록 지형에 의한 저항이 형성됨을 확인할 수 있었다.

둘째, 수소 생산기지 관련 건축물은 철근콘크리트 구조로 설계되거나 자체 방호벽을 설치해야 한다. A 수소 생산기지에서 철근콘크리트가 아닌 H빔이나 판넬 등 강구조로 지어진 건축물은 피해율이 상대적으로 높았다. 수소 생산기지 폭발로 인한 2차 폭발 가능성이 있는 건축물의 경우 철근콘크리트로 설계되어야 한다. 만약 비용이나 구조적인 측면에서 설계가 제한된다면 자체 방호벽 구축이 필요하다.

셋째, 수소 생산기지 또는 저장탱크, 방호벽을 설계하기 전 폭발 시뮬레이션을 통해 폭발로 인한 건축물 피해를 고려한 최적의 방호벽 두께 산출이 필요하다. 군 내에서 수소 폭발 사고는 엄청난 전투력 손실을 발생시킨다. 따라서 내부적으로 정확한 공간 데이터를 바탕으로 폭발 시뮬레이션을 통해 피해범위, 피해를 등을 고려한 피해 저감방안을 도출한 후에 수소 생산기지 시설이 도입되어야 한다.

본 연구에서의 한계점은 다음과 같다. 본 연구로 도출된 폭발 영향 평가의 결과는 건축물 피해만을 고려하여 실제 폭발사고에서 상대적으로 단편적인 피해만이 도출되었다고 판단되며, 향후 인명 및 차량 피해 등 기타 유형의 피해를 반영한다면 더욱 현실적인 폭발 영향 평가를 할 수 있으리라 판단된다. 두 번째로 본 연구는 철근콘크리트 방호벽의 규격 개선에서 두께라는 한정된 변수만을 반영하였다. 향후 높이 및 방호벽 상단의 굴절, 방호벽의 위치 및 환경적 요인 등의 변수를 종합적으로 반영한 개선 방호벽에 관한 연구, 그리고 두께 변화에 따른 설계 파라미터에 관한 연구가 함께 진행된다면 더욱 효율적이고 효과적인 방호벽 개선안을 도출할 수 있을 것이라 판단된다.

본 연구의 결과가 군 내에서 수소 에너지 관련 시설 구축 시 저감대책의 방안으로 활용되어 재난관리 및 안전계획 수립 시 피해 저감에 작은 기여를 할 수 있기를 기대한다.

참고문헌

- [1] Heo. S. K., A Plan for the Revitalization of the Hydrogen Energy Industry, KIET, Vol.246, 2019, pp. 50-52.
- [2] Moon. J. S., Trends in Safety Technology Development in conjunction with Expansion of Construction of Hydrogen Industry Infrastructure, Collection of Papers at the Korean Institute of Gas, Vol.2020 No.10, 2020, pp. 40-41.
- [3] Park. J. S., Lee. D. H., Study on Supporting local manufacturing development of hydrogen filling station components and hydrogen fuel cell vehicle components, Collection of Papers at the Korean Institute of Gas, Vol.2022 No.5, 2022, p. 212.
- [4] Kim. S. W. et al, Fundamental Study of Explosion Simulation of Hydrogen Gas on Concrete Blast Wall using TNT Equivalent Method, Collection of Papers at the Korean Institute of Gas, Vol.2022 No.5, 2022, p. 113.
- [5] Park. S. B., Kim. J. S., Park. D. J., Investigations of the Installation Situation of Protective Barrier at Domestic Hydrogen Refueling Stations, Collection of Papers at the Korean Institute of Gas, Vol.2022 No.5, 2022, p. 105.
- [6] Han. W. S. et al, A Study on the Prediction and Application of Explosive Accident Damage of Chemical Substances, KOSHA Research report, 2015, pp. 31-37.
- [7] Jeon. I. B., Method for evaluating the safety performance and protection ability of the mobile steel protective wall during the high-explosive ammunition test, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 22 No. 6, 2021, pp. 573-576.
- [8] Kim. E. J. et al, Simulation of hydrogen leak and explosion for the safety design of hydrogen fueling station in Korea, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.38 No. 3, 2013, pp. 1737-1743.
- [9] Lee. K. H. et al, Evaluation on Blast Resistance Performance of Reinforced Concrete Wall Strengthened by FRP Sheet, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol.26 No. 5, 2022, pp. 156-159.
- [10] Lee. Y. S., Impact of Explosive Disaster, KFFA, a disaster prevention seminar, 1992, p. 69.