

# 저심도 지하 수소저장소에서의 가스 폭발 진동에 대한 지반공학적 인자들의 민감도 분석 연구

## Sensitivity Analysis Study of Geotechnical Factors for Gas Explosion Vibration in Shallow-depth Underground Hydrogen Storage Facility

고 규 현 <sup>1</sup>	Go, Gyu-Hyun	우 현 재 <sup>2</sup>	Woo, Hyeon-Jae
카오반호아 <sup>2</sup>	Cao, Van-Hoa	김 희 원 <sup>2</sup>	Kim, Hee-Won
김 영 석 <sup>3</sup>	Kim, YoungSeok	최 현 준 <sup>4</sup>	Choi, Hyun-Jun

### Abstract

While stable mid- to large-scale underground hydrogen storage infrastructures are needed to meet the rapidly increasing demand for hydrogen energy, evaluating the safety of explosion vibrations in adjacent buildings is becoming important because of gas explosions in underground hydrogen storage facilities. In this study, a numerical analysis of vibration safety effects on nearby building structures was performed assuming a hydrogen gas explosion disaster scenario in a low-depth underground hydrogen storage facility. A parametric study using a meta-model was conducted to predict changes in ground dynamic behavior for each combination of ground properties and to analyze sensitivity to geotechnical influencing factors. Directly above the hydrogen storage facility, the unit weight of the ground had the greatest influence on the change in ground vibration due to the explosion, whereas, farther away from the facility, the sensitivity of dynamic properties was found to be high. In addition, in evaluating the vibration stability of ground building structures based on the predicted ground vibration data and blasting vibration tolerance criteria, in the case of large reinforced concrete building structures, the ground vibration safety was guaranteed with a separation distance of about 10-30 m.

### 요 지

최근 급격히 늘어나는 수소 에너지 수요를 감당하기 위해 안정적인 중·대규모의 지하 수소 저장 인프라가 필요한 가운데, 지하수소저장소에서의 가스 폭발에 따른 인접 건축물의 폭발 진동 안전성 평가가 중요해지고 있다. 본 연구에서는 저심도 지하수소저장소의 수소가스 폭발 재난 시나리오를 가정하여 인근 건축구조물에 미치는 진동 안전성에 대한 수치해석을 수행하였다. 메타모델을 활용한 매개변수연구를 수행하여 지반물성 조합 별 지반 동적 거동 변화를 예측하고, 지반공학적 영향인자에 대한 민감도를 분석하였다. 수소 저장소 직상부에서는 지반의 단위중량이 폭발에

1 정희원, 국립금오공과대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Tech.)

2 비회원, 국립금오공과대학교 토목공학과 박사과정 (PhD Student, Dept. of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Tech.)

3 정희원, 한국건설기술연구원 수소인프라클러스터 선임연구원 (Member, Senior Research Fellow, Hydrogen-Infrastructure Research Cluster, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Tel: +82-31-910-0371, kimys@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

4 정희원, 한국건설기술연구원 수소인프라클러스터 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Hydrogen-Infrastructure Research Cluster, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2025년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2024 by the Korean Geotechnical Society

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.

의한 지반 진동치 변화에 가장 큰 영향을 미치는 반면 저장소로부터 멀리 떨어질수록 지반의 동적 물성의 민감도가 높게 나타났다. 또한, 도출된 지반 진동치와 국내 발파진동 허용치 자료를 기반으로 지상 건축구조물들의 진동 안정성을 평가한 결과, 대형 철근 콘크리트 구조물의 경우 약 10-30m 수준의 이격거리 확보 시 지반진동 안전성이 보장되는 것으로 평가되었다.

**Keywords :** Equivalent TNT, Gas explosion, Meta-model, Sensitive analysis, Underground hydrogen storage

## 1. 서론

갈수록 심각해지고 있는 기후변화와 지구온난화 위기를 극복하기 위해 세계 각국은 탄소중립을 도모하며 친환경 수소 경제 활성화 정책들을 시행하고 있다(FCH JU, 2019; CSIRO, 2018; COAG Energy Council, 2019). 국내의 경우, 수소경제 활성화 정책을 추진하는 등 수소 경제로의 전환을 준비하고 있으며, 인구밀도가 높은 도심에서의 수소 연료의 원활한 공급을 위해 중·대규모의 안정적인 지하 수소 저장 방안을 마련하고 있다. 해외에서 가장 널리 이용되는 지하 저장 방식인 암염층(Salt cavern)과 대형 암반공동(Rock Cavern)이 부재한 국내의 지질학적 환경으로 인해 국내에서는 콘크리트 방호구조물을 활용한 저심도 수소 저장(shallow-depth Underground Hydrogen Storage) 방식이 가장 적합한 저장 방식으로 여겨지고 있다(Go et al., 2022).

이에 최근 들어 저심도 지하 수소 저장 방식 및 저장시설 주변의 안정성 평가와 관련된 기초연구들이 수행되었다. Choi et al.(2022)는 지하수소저장소의 가스 폭발에 따른 주변 건축물의 피해 영향을 분석하기 위한 수치해석 연구를 수행하였으며, 매개변수연구를 통해 수소 저장소의 설계 조건에 따른 인접 구조물의 안정성을 평가한 바 있다. Go et al.(2022)는 수리-역학 연계 해석 모델을 이용하여 지중 저장소에서의 고압 수소가스 침투에 따른 지표면 융기 현상에 대해 해석적으로 고찰하였다. 이후 Go et al.(2023)은 수치해석을 통해 저심도 지중 수소저장시설에서의 수소가스 폭발에 따른 지반의 동적 거동을 분석하고 폭발에 따른 인근 지하 구조물의 손상 거동을 평가하였다.

상기 언급된 기초 해석연구들로 인하여 저심도 지하 수소저장소에서 발생할 수 있는 수소가스의 침투 및 폭발에 따른 안전성 평가 연구에 대한 진전이 있었지만 대체로 제한적인 사고 시나리오 및 지반조건을 기반으로 한 연구가 주를 이루고 있고, 검증된 해석모델을 활용하

여 지하수소저장소에서의 수소가스 폭발에 관계된 동적 지반 물성들의 민감도를 분석한 사례는 미진한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 저심도 수소저장소에서의 가스 폭발 사고를 모사하는 해석 시뮬레이터를 개발하고 검증하였으며, 이후 메타모델을 활용한 매개변수연구를 수행하여 다양한 지반물성 조합 별 지반 동적 거동 변화 예측 및 영향인자에 대한 민감도를 분석하였다. 아울러, 각각의 지반물성 조합 별로 도출된 지반 진동치와 국내 구조물 손상기준 발파진동 허용치 자료를 기반으로 폭발 사고 시 인근 구조물의 구조적 안정성을 담보하는 최소 안전거리를 제시하였다.

## 2. 방법론

### 2.1 수치해석

본 연구에서는 저심도 지하수소저장소 내부에서의 가스 폭발과 이에 따른 주변 지반의 폭압 진동 응답거동, 그리고 인근 지상 건축 구조물의 진동 안정성 영향을 평가하고자 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 3차원 동적 해석 모델을 구축하였다. 모델 형상은 ABAQUS/CAE 모듈에서 생성되었으며, 해석모델의 근사해 도출에는 ABAQUS/Explicit Solver가 사용되었다.

#### 2.1.1 구성방정식(Governing equations)

수소가스 폭발과 같이 지반에 대변형을 야기하는 현상을 수치해석적으로 접근함에 있어 중요한 과제는 접촉 및 요소 왜곡 문제를 다루는 것에 있다. 이러한 요소 왜곡은 분석 오류로 이어질 수 있는데, 이를 해결하는 방법 중 하나는 Coupled Eulerian-Lagrangian(CEL) 모델링 기술을 사용하는 것이다(Ko et al., 2015). CEL 모델링 기술은 Noh(1964)가 최초 제안하였으며, Lagrange 및 Euler 기법의 장점을 결합하여 시간에 따른 미소 체적 요소의 움

직임을 설명할 때 요소 왜곡 및 Lagrangian 재료의 흐름과 관련된 문제를 완화할 수 있다(Zaid et al., 2022). CEL 모델링법의 계산에 있어서는 특정 문제에 따라 Euler-mesh와 Lagrange-mesh를 동시에 설정할 수 있으며 인터페이스에서 페널티 함수 결합이 적용된다. 이와 관련된 지배 방정식은 다음과 같이 구성된다.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot v = \frac{\partial \rho}{\partial t} + v \cdot \nabla \rho + \rho \nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \nabla \cdot \sigma + \rho \cdot b \quad (2)$$

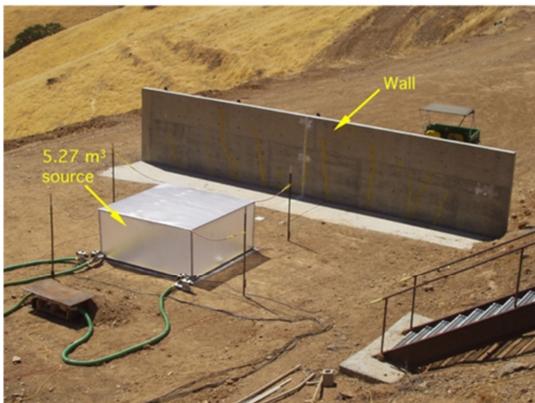
$$\rho \frac{DE}{Dt} = \sigma \cdot \dot{\epsilon} + \rho \dot{Q} \quad (3)$$

여기서,  $\rho$ 는 공기의 밀도,  $v$ 는 공기의 유속 벡터,  $\sigma$ 는 Cauchy stress 텐서,  $b$ 는 unit resultant force 텐서,  $E$ 는 에너지,  $Q$ 는 열전도도를 의미한다.

### 2.1.2 JWL-EOS 기반 등가 TNT 모델

수소가스 폭발 시뮬레이션 관련 대부분 선행연구에서는 Eq. (4)와 같은 등가 TNT(Trinitrotoluene) 모델을 활용하여 폭발압력을 간접적으로 예측하고 있다(Molkov and Dery, 2015; Lee et al., 2021; Ryu et al., 2021).

$$M_{TNT} = \frac{E}{Q_{TNT}} = \eta M_f \frac{Q_{H_2}}{Q_{TNT}} \quad (4)$$



여기서,  $M_{TNT}$ 는 등가 TNT 질량(kg),  $M_f$ 는 저장된 수소의 질량(kg),  $E$ 는 폭발에너지(kJ),  $Q_{TNT}$ 는 TNT 발열량(4.6 MJ/kg),  $Q_{H_2}$ 는 수소의 발열량(119.93MJ/kg)을 나타낸다.  $\eta$ 는 가스구름 중 폭발에 기여하는 폭발수율을 의미한다.

한편, 등가 TNT 폭발물에 대한 폭발압( $p$ )의 크기는 Jones-Wilkins-Lee Equation of State(JWL-EOS) 모델을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다(Zaid et al., 2022).

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{\rho}} \right) e^{-R_1 \bar{\rho}} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{\rho}} \right) e^{-R_2 \bar{\rho}} + \omega \rho e_{int} \quad (5)$$

여기서,  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  및  $\omega$ 는 등가 TNT 재료에 관한 상수이다.  $e_{int}$ 는 대기압에서의 특정 내부 에너지를 의미하고,  $\bar{\rho}$ 는 고체 상태에서의 폭발물 밀도와 현재 밀도의 비율을 나타낸다(Larcher and Casadei, 2010).

본 해석기법에 대한 모델 검증은 선행연구로부터 수행된 바 있다(Go et al., 2023). 모델 검증은 Nozu et al. (2005)가 수행한 수소 폭발실험 데이터와의 비교를 통해 이루어졌다. 실험은 Fig. 1과 같이 공기가 포집된 밀폐된 비닐 텐트 안에 수소가스를 주입하여 수소와 공기의 농도가 각각 30% 및 70%가 되었을 때 전기 spark나 소량의 C4(군용 플라스틱 폭약) 혹은 TNT 등과 같은 점화원에 의한 수소폭발을 일으키도록 설계되었다. 수소가스 폭발 후 인근 철근 콘크리트 벽체의 특정 위치(P2, P4, D2)에서 계측된 압력 및 수평변위에 대한 계측값과 해석모델로부터 도출된 예측치를 서로 비교한 결과, 수치해석을 통해 예측된 압력 및 수평변위 거동이 실험을 통해 계측

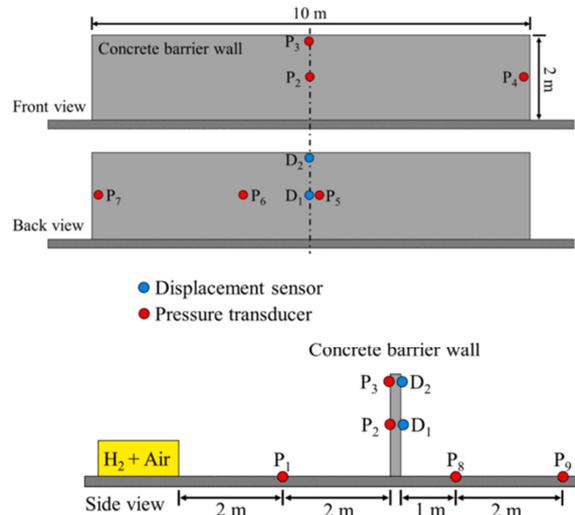
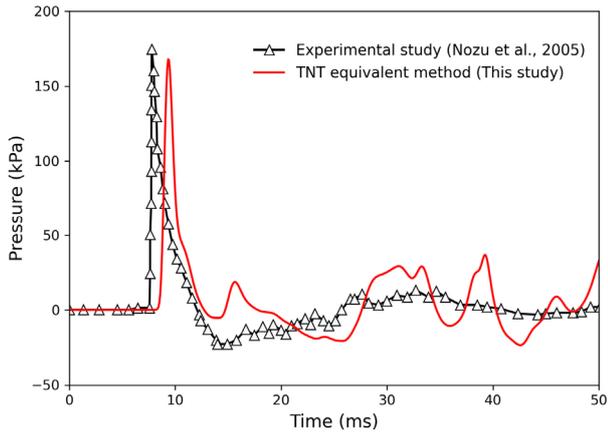
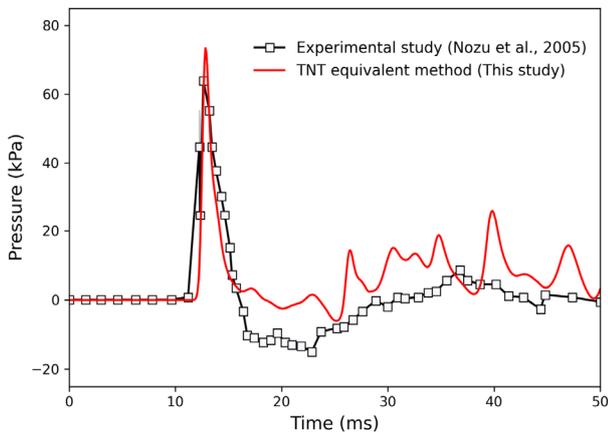


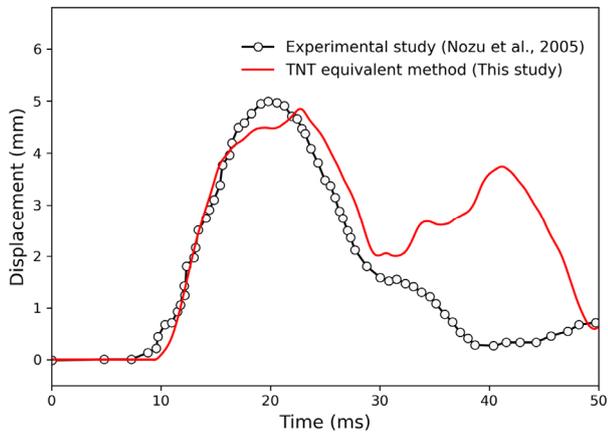
Fig. 1. The hydrogen explosion experiment and the schematic of locations of pressure transducers and displacement sensors (Nozu et al., 2005)



(a) Pressure-time history at P2



(b) Pressure-time history at P4



(c) Displacement-time history at D2

Fig. 2. Validation results of simulation model that uses TNT equivalent method (Go et al., 2023)

된 것과 전반적으로 유사한 거동을 나타내었으며, 이를 통해 JWL-EOS 기반의 등가 TNT 모델이 실제 수소가스의 폭발 현상을 합리적으로 모사함을 확인하였다(Fig. 2).

### 2.1.3 지반재료의 탄소성 모델

본 연구에서는 도심지 저심도 지반(저장소의 토피고는 4m)에 설치된 지하수소저장소에서 수소가스 폭발 사고가 일어나는 특정 시나리오를 가정하여 해석을 수행하였고, 이를 위해 Fig. 3과 같이 3차원 해석모델을 구축하였다. 해석의 효율화를 위해 저장소 중심부를 기준으로 1/4 영역만 해석 도메인으로 고려하였고, 지하수소저장소의 규격 정보를 Fig. 3에 나타내었다. 본 시뮬레이션에서는 구성된 지반재료에 대해서는 Mohr-Coulomb 구성 모델을 사용하여 비선형 탄소성(elasto-plastic model) 거동을 평가하였다.

### 2.1.4 재료물성

지하수소저장소가 설치된 지반 재료의 물성 정보는 Table 1에 제시하였다. 지반은 실트 지반(silty soil)으로 가정하였고 지반 물성에 대한 기준값(reference value)은 선행연구에서 도출한 국내 지반조사 결과를 근거로 적용하였다(Go et al., 2023). 이후, 각 기준값에서 최소 20%에서 최대 80% 범위를 설정하여 해당 범위 안에서 지반 재료 물성들의 데이터셋 조합을 200개로 생성하였다.

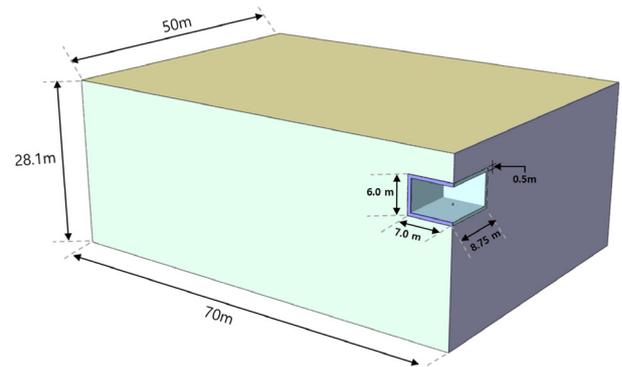


Fig. 3. Three dimensional numerical model (a quarter of the field)

Table 1. Material properties of ground used in the simulation model

Ground property	Reference value	Lower bound	Upper bound	Coefficient of variation (CV)	Unit	Note
Unit weight	18	14.4	21.6	20%	kN/m <sup>3</sup>	Mechanical properties
Cohesion	35	21	49	40%	kPa	
Internal friction angle	20	16	24	20%	°	
Dynamic elastic modulus	50	10	90	80%	MPa	Dynamic properties
Dynamic poisson's ratio	0.38	0.304	0.456	20%	-	

Table 2. Input properties of TNT explosive for JWL-EOS model (Larcher and Casadei, 2010)

Mass (kg)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Detonation wave speed (m/s)	A (GPa)	B (GPa)	$\Omega$	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	Detonation energy density (kJ/kg)
38.30	1630	6930	373.8	3.747	0.35	4.15	0.9	3680

한편, 수소저장소 방호 콘크리트 구조체의 보강으로 사용된 IS-456 강재 철근 재료의 비선형 탄소성 거동 특성을 구현하기 위해 Johnson-Cook 재료 모델을 사용하였다(Johnson and Cook, 1983). 또한, 폭발물 주변의 대기의 폭발 진동 거동을 모사하기 위해 이상 기체에 대한 상태 방정식 모델이 사용되었고, 이 때 고려된 공기의 밀도는 1.25kg/m<sup>3</sup>, 기체 상수는 287J/kg/K이다.

TNT 폭발 충전물에 관한 재료물성은 Table 2에 제시하였으며, 보수적인 관점에서의 안전성을 평가하고자 이론적으로 고려될 수 있는 가장 위험한 수준인 수소농도 40%에 대응되는 수소 중량(38.3kg)을 해석연구에 적용하였다. 점화점의 위치는 Fig. 3과 같이 수소저장소 정중앙으로 설정하였다.

## 2.2 메타모형을 이용한 전산실험설계

실험 및 모델에서 종속변수 변화에 관여하는 영향인자 간의 관계식을 정확하게 구현하는 것이 매우 어렵기 때문에(Booker et al., 1999), 본 연구에서는 메타모형을 이용한 실험설계를 이용하여 매개변수연구의 효율성을 높이고자 하였다. 실제 시스템을 대변하는 메타모형은 입력치와 출력치 사이의 관계를 정의하는 알고리즘이다(Booker

et al., 1999; Hoffman et al., 2003). 본 연구에서는 가장 널리 사용되는 Gaussian Kriging 방식을 메타모형로 선정하였으며, 다음과 같은 식으로 표현된다(Matheron, 1963).

$$y(x) = \sum_{j=0}^L \beta_j B_j(x) + z(x) \quad (6)$$

여기서,  $\beta_j$ 는 미지계수를 나타내며,  $B_j(x)$   $j=1, \dots, L$ 는 데이터 값에 근거한 기준값,  $z(x)$ 는 오차 값을 의미한다. Gaussian 상관함수인  $r(\theta; s, t)$ 는 Eq. (7)을 통해 산정된다.

$$r(\theta; s, t) = \text{Corr}(z(s), z(t)) = \exp\left\{-\sum_{k=1}^n \theta_k |s_k - t_k|^2\right\} \quad (7)$$

여기서,  $\theta_k$ 는 평활 파라미터,  $s_k$ 와  $t_k$ 는 샘플의  $k$ 번째 요소이다.

## 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 설정한 수소가스 폭발 사고 시나리오 기반으로 지반 진동치에 대한 지반물성의 민감도를 평가하였다. 매개변수연구를 수행하기 위해 메타모형 알고리

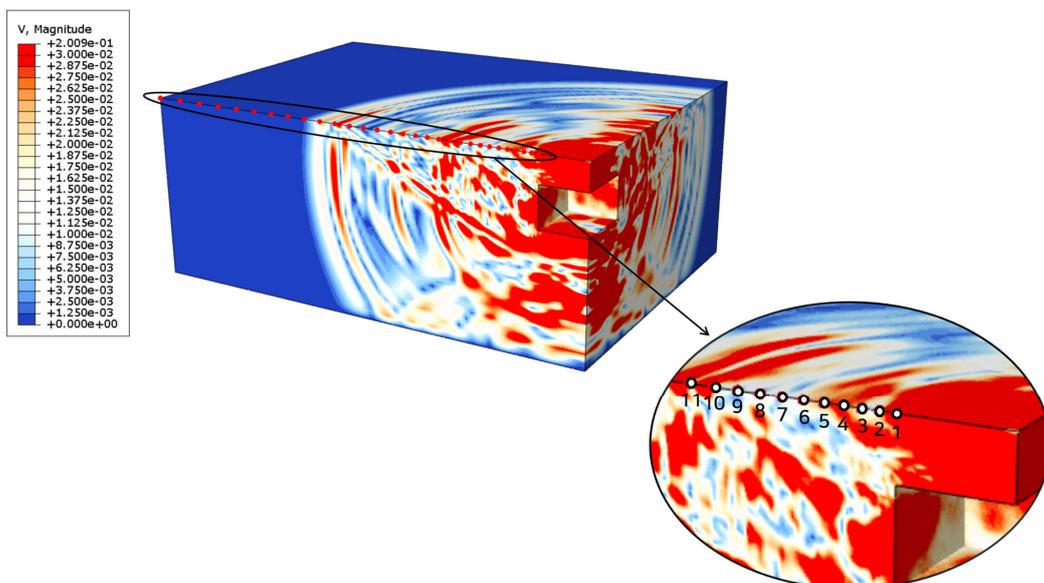


Fig. 4. Measurement points for ground surface vibration in the simulation model

를 이용하여 지반재료 물성들의 데이터셋 조합 200개를 임의 생성하여 각각의 해석 결과를 비교 평가하였다. 지표에서의 지반 진동 속도는 Fig. 4와 같이 총 30개의 관측 포인트를 인근 지표에 설정하여 저장소 직상부로부터 최대 63m 지점까지의 시간대별 지표 진동 속도 변화를 측정하였다.

Fig. 5는 구축된 3차원 해석모델을 활용하여 수소저장소 내부에 수소 농도 40% 조건에서 폭발이 발생하였다는 시나리오 하에 수행된 해석 결과이다. 시간에 따른 진동속도의 크기를 평가한 결과, 가스 폭발의 점화점 위치에 가까울수록 진동속도의 최대진폭이 크게 나타났으

며 폭원으로부터 멀어질수록 진동치의 진폭이 현격히 줄어들었다. 또한, Fig. 6에서와 같이 구형 폭발 직후 매우 짧은 찰나에 방사형 폭발 응력파가 주변지반으로 팽창히 빠르게 전파되었고, 구조적 측면에서 자유면과 가장 가까운 저장시설 상부 지반에 폭발 에너지가 가장 크게 집중된다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7과 Fig. 8은 메타모형 알고리즘을 활용한 매개변수연구를 통해 수소가스의 폭발에 따른 지반 진동치에 대한 지반공학인자들의 민감도를 보여준다. Fig. 7에서 알 수 있듯이, 저장소 직상부 지표에서는 지반의 단위중량(Unit weight) 변화가 진동치 변화에 가장 큰 영향을

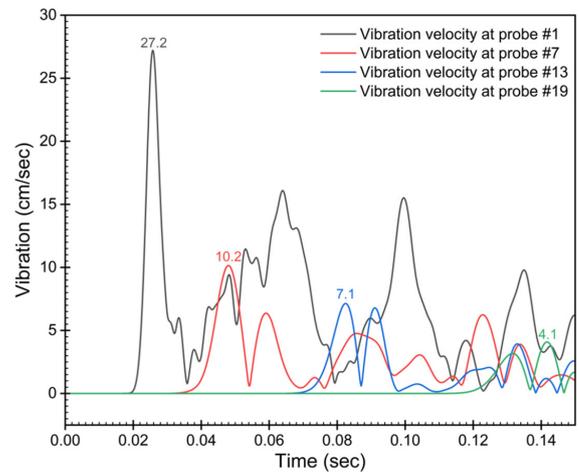
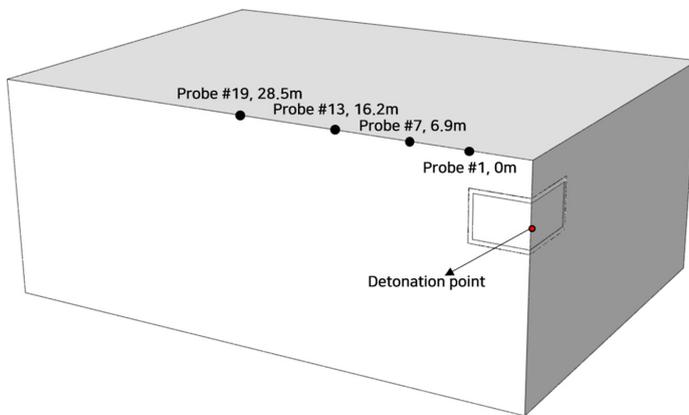


Fig. 5. Ground vibration velocity profile at different measurement probe

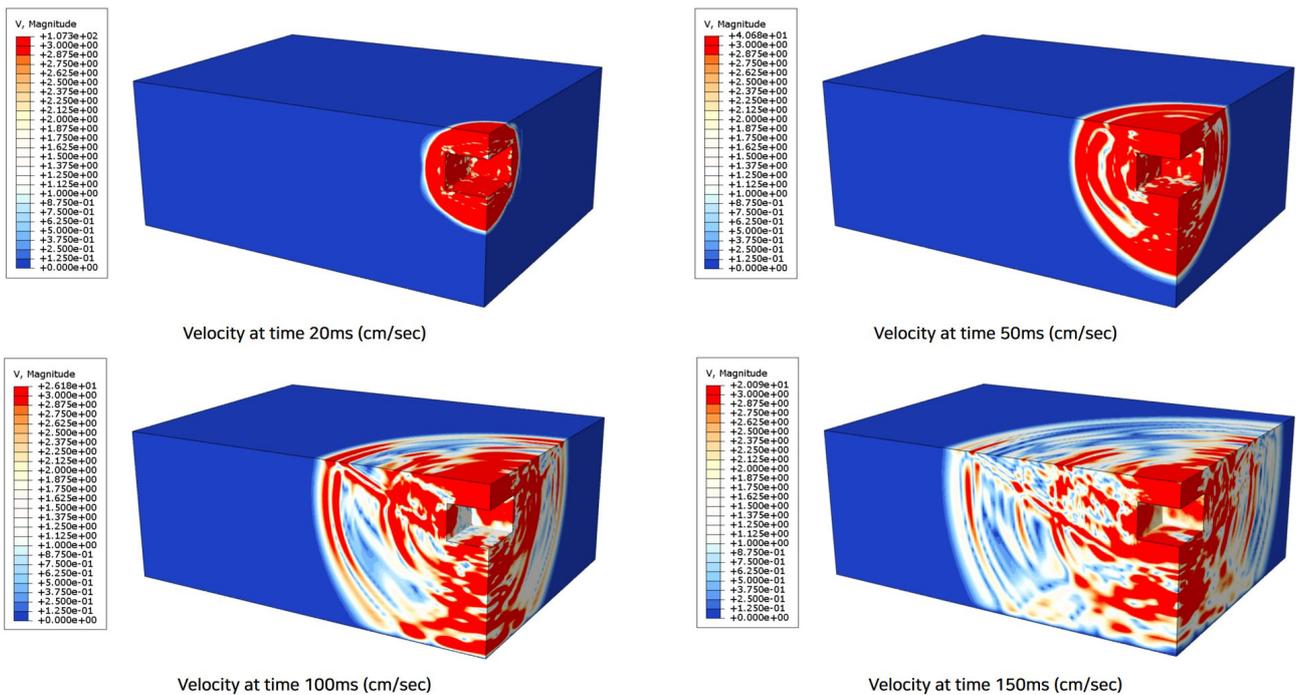


Fig. 6. Ground vibration propagation obtained from simulation model

미치며 나머지 지반물성들은 특별한 경향이 나타나지 않았다. 이는 저장소 직상부에서는 수소폭발에 의해 즉각적인 용기침하를 동반한 진동이 만들어지기에 지반의 중량 변화가 가장 민감하게 영향을 미친 것으로 분석된다. 반

면 저장소로부터 거리가 멀어질수록 지반의 지중 변화의 영향은 미미해지고 동적 물성인 동탄성계수와 프아송비의 변화의 민감도가 높아졌다(Fig. 8). 이러한 결과는 저장소로부터 멀리 떨어진 지반에서는 지반의 동역학적 물

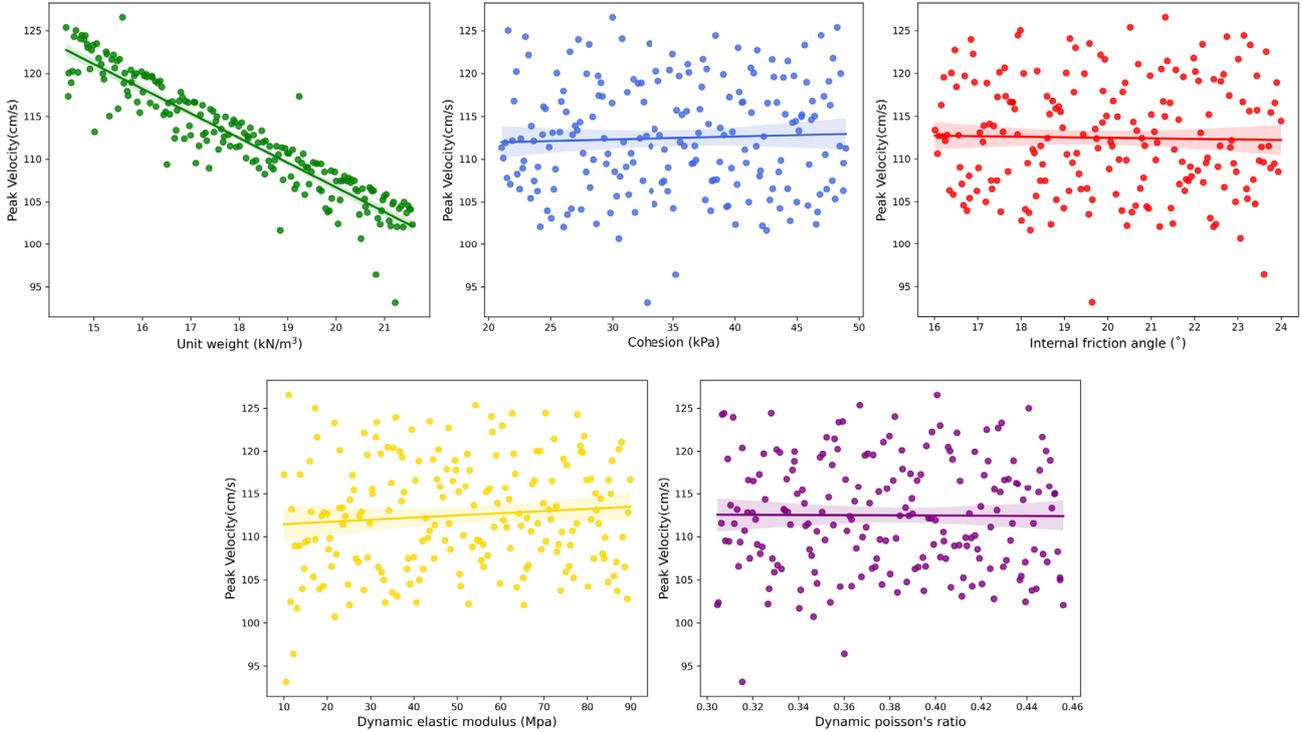


Fig. 7. Peak vibration velocity change depending on ground properties at a surface location directly above the storage facility (probe #1)

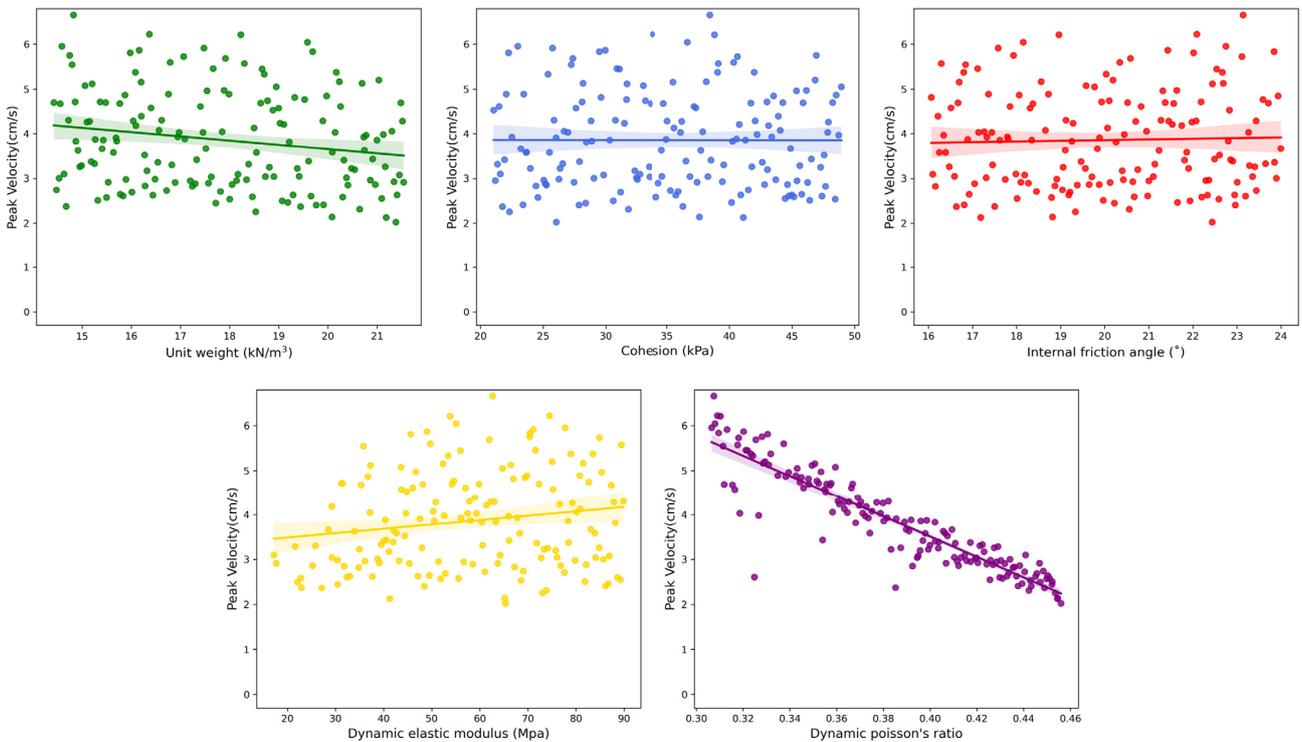


Fig. 8. Peak vibration velocity change depending on ground properties at a surface location approximately 30 m away from the storage facility (probe #24)

Table 3. Allowable limit of vibration suggested by Tunnel standard construction specification (MOLIT, 2015)

Type of structure	Structures with underground foundations and concrete slabs	Small and medium buildings with reinforced concrete frames and slabs	Large buildings with reinforced concrete/steel frames and slabs
Allowable vibration values at building foundation (cm/sec)	2.0	3.0	5.0

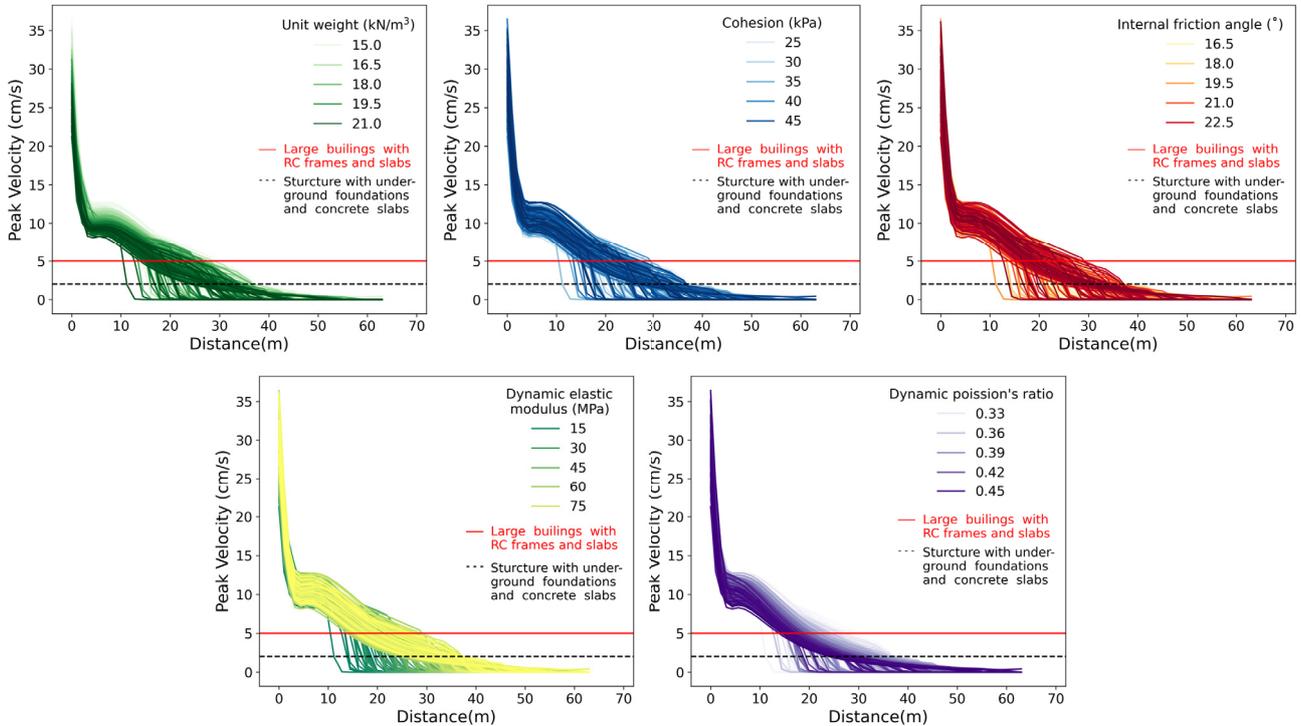


Fig. 9. Peak vibration velocity change with distance

성이 지반진동변화에 가장 크게 영향을 미치므로 저장소 설계 시 이러한 영향을 면밀하게 검토해야 함을 시사한다.

한편, 매개변수연구를 통해 도출된 지반 진동치 결과와 국내 구조물 손상기준 발파진동 허용치 자료(Table 3)를 기반으로 지하 수소저장소에서 발생한 가스 폭발에 의한 지상 건축구조물들의 진동 안정성을 평가하였다. Fig. 9는 지반 물성 변화 별로 도출된 지반 진동치에 국내의 발파진동 허용 기준을 적용한 것을 보여준다. 임계기준치에 의해 도출된 주요 지상 건축구조물의 최소 수평 이격거리를 평가할 수 있으며 지반 물성 변화에 따라 편차를 지니므로 Fig. 10과 같이 상자플롯(box plot)으로 최소 수평 이격거리를 도시하였다. 기초가 동반된 일반 건축물의 경우 최소 이격거리는 약 15-40m 정도 요구되며, 대형 철근콘크리트 건축물의 경우 약 10-30m 범위에서 이격거리가 요구되었다. 즉, 건축물 형태에 관계없이 최소 10m 이상의 이격거리가 확보되면 지하수소저장소에서의 폭발에 의한 진동치 영향은 미미한 것으로 분석되었다. 본 연구에서 가정된 수소농도는 40%로서 매우

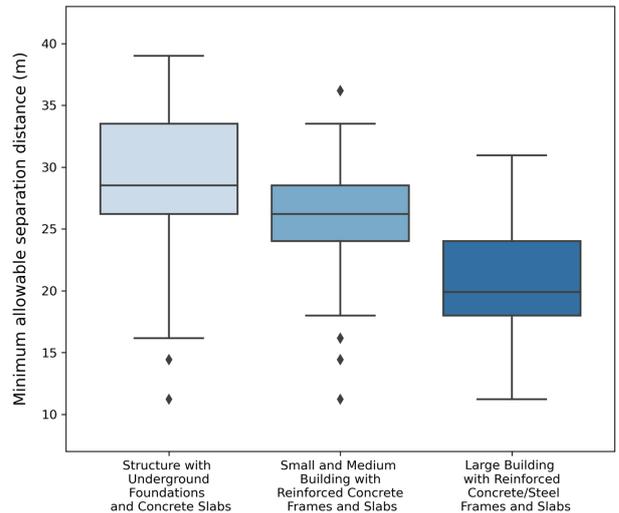


Fig. 10. Minimum separation distance against storage facility for different building types

보수적인 관점에서 폭발 안전성을 평가한 것이기에 현실적인 사고 시나리오를 고려할 경우에는 이보다 더 적은 최소 이격거리가 허용될 것으로 사료된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 저심도 지하수소저장소의 수소가스 폭발 재난 시나리오를 가정하여 지반 및 인근 건축구조물에 미치는 진동 안전성에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석 시뮬레이션에는 구조재료에 대한 동해석 도구로서 널리 활용되는 ABAQUS S/W가 이용되었으며, 수소가스의 폭발 거동 모사를 위해 TNT 등가량 기반의 JWL-EOS 모델을 적용하였다. 이후 메타모델을 활용한 매개변수연구를 수행하여 다양한 지반물성 조합별 지반 동적 거동 변화 예측 및 영향인자에 대한 민감도를 분석하였다. 아울러, 각각의 지반물성 조합별로 도출된 지반 진동치와 국내 구조물 손상기준 발파진동 허용치 자료를 기반으로 폭발 사고 시 인근 건축물의 진동 안전성을 담보하는 최소안전거리를 제시하였다. 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 등가 TNT 해석 기법의 예측 신뢰성 검토를 위해 기존 유사거동 실험사례에 대한 벤치마크 해석과의 비교 분석을 통해 본 해석기법의 예측 수준에 대한 신뢰성을 검증하였으며, 본 해석기법의 응용 연구로의 확장 가능성을 확인하였다. 다만 본 연구는 폭발 특성에 영향을 미칠 수 있는 화학적 반응을 고려하지 않았으며, 고압 탱크에서의 수소 가스 누출로 인한 저장소 내부 압력 변화를 고려하지 않았다. 또한, 수소 폭발을 저장소 중앙으로부터 발생하는 구형 폭발으로 가정하였으며 이는 발화원의 종류와 위치에 따라 달라질 수 있고, 실제 수소 폭발 발생 시 저장소 내부 구조물에 의해 반사파가 발생하여 진동에 영향을 미칠 것으로 예상된다.
- (2) 지하 수소가스 폭발에 의한 지반 진동치에 대한 지반물성의 민감도를 평가하고자 메타모형을 이용한 데이터셋을 임의 생성하였다. 매개변수연구 결과, 저장소 직상부 지표에서는 지반의 단위중량 변화가 폭발에 의한 지반 진동치에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 반면, 저장소로부터 멀리 떨어질수록 지반재료의 자중 변화의 영향은 둔화되고 동적 물성치에 대한 민감도가 높아지는 것으로 확인되었다. 이러한 이격거리 별 지반물성치의 민감도 차이는 향후 저장소 설계 및 폭발 진동 안전성 평가 시 면밀하게 검토해야 사항이라고 판단된다.
- (3) 해석연구를 통해 얻어진 지반 진동치와 국내 구조물

손상기준 발파진동 허용치 자료를 기반으로 지하 수소 가스 폭발에 의한 지상 건축구조물들의 진동 안전성을 평가한 결과, 대형 철근 콘크리트 구조물 기준, 약 10-30m 수준의 이격거리 확보 시 지반진동 안전성이 보장되는 것으로 평가되었다. 다만, 본 연구에서 설정한 수소 농도는 40%로서 가장 위험한 사고 시나리오를 가정한 폭발 안전성 평가이기에 보다 현실적인 사고 시나리오를 고려할 경우에는 이보다 더 적은 최소 이격거리가 허용될 것으로 사료된다.

- (4) 결론적으로 저심도 지하 수소저장소의 폭발 재난 시나리오에 따른 동적 안전성 확보에는 폭발 규모에 대한 고려 뿐 아니라, 지반의 물성 정보에 대한 상세 조사와 이들의 민감도를 고려한 안전거리 평가가 매우 중요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 성과는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업(No. 20240176-001, 수소도시 기반시설의 안전 및 수용성 확보기술 개발) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2022R1C1C1006507)로 이에 감사드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. Booker, A. J., Dennis, J. E., Frank, P. D., Serafini, D. B., Torczon, V., and Trosset, M. W. (1999), "A Rigorous Framework for Optimization of Expensive Functions by Surrogates", *Structural Optimization*, Vol.17, No.1, pp.1-13.
2. Choi, H. J., Kim, S., and Kim, Y.S. (2022), "A Basic Study on Effect Analysis of Adjacent Structures due to Explosion of Underground Hydrogen Infrastructure", *J. Kor. Geosynth. Soci.*, Vol.21, No.3, pp.21-27.
3. COAG Energy Council (2019), Australia's National Hydrogen Strategy.
4. CRIRO (2018), National Hydrogen Roadmap : Pathways to an Economically Sustainable Hydrogen Industry in Australia.
5. FCH JU (2019), Hydrogen Roadmap Europe, pp.4-77.
6. Go, G. H., Cao, V. H., Kim, Y., Choi, H. J., Oh, S. W., and Kim, M. J. (2023), "Evaluation of the Dynamic Stability of Underground Structures Assuming a Hydrogen Gas Explosion Disaster in a Shallow Underground Hydrogen Storage Facility", *Appl. Sci.*, Vol.13, No.22, pp.12317.
7. Go, G.H., Jeon, J.S., Kim, Y.S., Kim, H.W., and Choi, H.J. (2022), "Prediction of Hydrodynamic Behavior of Unsaturated Ground Due to Hydrogen Gas Leakage in a Low-depth Underground Hydrogen Storage Facility", *J. Kor. Geotech. Soc.*, Vol.38, pp.107-118.
8. Hoffman, R.M., Sudjianto, A., Du, X., and Stout, J. (2003), Robust

- Piston Design and Optimization Using Piston Secondary Motion Analysis (No. 2003-01-0148), SAE Technical Paper.
9. Johnson, G.R. and Cook, W.H. (1983), "A Constitutive Model and Data for Materials Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Temperatures", In: *Proceedings of 7th International Symposium on Ballistics*. Hague, Netherlands, pp.541-547.
  10. Ko, J. Y., Jeong, S. S., and Lee, S. Y. (2015), "A Study on the 3D Analysis of Driven Pile Penetration Based on Large Deformation Technique (Coupled Eulerian-Lagrangian)", *J. Kor. Geotech. Soc.*, Vol.31, pp.29-38.
  11. Larcher, M. and Casadei, F. (2010) "Explosions in Complex Geometries—a Comparison of Several Approaches". *Int. J. Prot. Struc.*, Vol.1, pp.169-195.
  12. Lee, H. -H., Kim, H. -G., Yoo, J. -O., Lee, H. -Y., and Kwon, O. -S. (2021), "A Basic Study for Explosion Pressure Prediction of Hydrogen Fuel Vehicle Hydrogen Tanks in Underground Parking Lot", *J. Kor. Tunnelling & Underground Space Assoc.*, Vol.23, No.6, pp.605-612.
  13. Matheron, G. (1963), "Principles of Geostatistics", *Economic Geology*, Vol.58, No.8, pp.1246-1266.
  14. MOLIT (2015), Tunnel Standard Construction Specification.
  15. Molkov, V. and Dery, W. (2015), "Blast Wave from a High-pressure Gas Tank Rupture in a Fire: Stand-alone and Under-vehicle Hydrogen Tanks", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol.40, No.36, pp.12581-12603.
  16. Noh, W. (1964), A Time Dependent, Two Space Dimensional Coupled Eulerian-lagrangian Code. In: B Alder, S Fernbach and M Rotenberg (eds) : *Methods in Computational Physics*, Vol.3, *Fundamental Methods in Hydrodynamics* Academic Press, New York, NY 1964; 117-179.
  17. Nozu, T., Tanaka, R., Ogawa, T., Hibi, K., and Sakai, Y. (2005), Numerical Simulation of Hydrogen Explosion Tests with a Barrier Wall for Blast Mitigation, International Conference on Hydrogen Safety, 08 September 2005.
  18. Ryu, J. -O., Ahn, S. -H., and Lee H. Y. (2021), "A Basic Study on Explosion Pressure of Hydrogen Tank for Hydrogen Fueled Vehicles in Road Tunnels", *J. Kor. Tunnelling & Underground Space Assoc.*, Vol.23, No.6, pp.517-534.
  19. Zaid, M., Sadique, M. R., and Alam, M. M. (2022), "Blast Resistant Analysis of Rock Tunnel Using Abaqus: Effect of Weathering", *Geotech. & Geolo. Eng.*, Vol.40, No.2, pp.809-832.

Received : August 12<sup>th</sup>, 2024

Revised : August 19<sup>th</sup>, 2024

Accepted : August 19<sup>th</sup>, 2024