

지하 수소인프라 폭발에 따른 인접 구조물 영향 분석에 대한 기초 연구

A Basic Study on Effect Analysis of Adjacent Structures due to Explosion of Underground Hydrogen Infrastructure

최현준¹, 김세원², 김영석^{3*}

Hyun-Jun Choi¹, Sewon Kim², YoungSeok Kim^{3*}

¹Non-Member, Researcher, Northern Infrastructure Specialized Team, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

²Member, Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

³Member, Senior Research Fellow, Northern Infrastructure Specialized Team, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

ABSTRACT

For carbon neutrality, interest in R&D and infrastructure construction for hydrogen energy, an eco-friendly energy source, is growing worldwide. In particular, for hydrogen stations installed in downtown areas, underground hydrogen infrastructure are being considered to increase a safety distance from hydrogen tank explosions to adjacent structures. In order to design an appropriate location and depth of the underground hydrogen infrastructure, it is necessary to evaluate the impact of the explosion of the underground hydrogen infrastructure on adjacent structures. In this paper, a numerical model was developed to analyze the effect of the underground hydrogen infrastructure explosion on adjacent structures, and the over pressure of the hydrogen tank was evaluated using the equivalent TNT (Trinitrotoluene) model. In addition, parametric analysis was performed to estimate the stability of adjacent structures according to the construction conditions of the underground hydrogen infrastructure.

요 지

최근 탄소중립을 위하여 친환경 에너지원인 수소 에너지에 대한 연구 개발 및 인프라 구축에 대한 관심이 증가되고 있다. 특히, 도심지에 설치되는 수소충전소의 경우에는 수소저장탱크 폭발에 따른 인접 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 폭발 위험이 있는 수소저장탱크를 지하(지중)에 배치하여 충분한 안전거리를 확보하는 방안이 고려되고 있다. 적절한 지하 수소인프라의 위치 및 심도를 선정하기 위하여 지하 수소인프라 폭발에 따른 인접 구조물의 영향 평가가 필요하다. 본 논문에서는 지하 수소인프라 폭발에 따른 인접 구조물의 영향을 분석하기 위한 수치모델을 구축하였으며, 등가 TNT (Trinitrotoluene) 모델을 활용하여 수소저장탱크의 폭발압을 산정하였다. 또한, 매개변수해석을 수행하여 지하 수소인프라의 시공조건에 따른 인접 구조물의 안정성을 평가하였다.

Keywords : Underground hydrogen infrastructure, Explosion, Over pressure, Safety distance, Parametric study

1. 서 론

수소 에너지는 탄소중립을 위한 대표적인 친환경 에너

지원으로 주목받고 있으며, 주요 선진국을 중심으로 연구 개발 및 인프라 구축이 이루어지고 있다. 특히, EU는 2019년 2월에 ‘수소 로드맵(Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking(FCH JU), 2019)’을 발표함으로써 2050년까지 수소 및 연료전지의 보급을 확대하고자 하였다. ‘수소 로드맵’을 바탕으로 독일, 영국, 이탈리아 등 EU 주요국에

Received 26 Aug. 2022, Revised 31 Aug. 2022, Accepted 1 Sep. 2022

*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0371; Fax: +82-31-910-0561

E-mail address: kimys@kict.re.kr (Y.S. Kim)

서는 수소 에너지에 대한 생산 및 공급 인프라를 확보할 수 있는 연구 프로젝트에 지원을 집중하고 있다. 일본과 호주에서도 ‘수소·연료전지 전략 로드맵’ 및 ‘호주 수소전략(COAG Energy Council, 2019)’과 같은 정책을 발표함으로써 그린수소 생산 및 공급인프라를 구축하여 수소경제를 활성화하고자 하였다. 국내에서도 2040년을 목표로 하는 ‘수소경제 활성화 로드맵(Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019)’이 발표되었으며, 수소경제 선진국으로 도약하기 위하여 수소 에너지 관련 기술 개발 및 인프라 구축에 대한 관심이 증가되고 있다.

국내의 ‘수소경제 활성화 로드맵’에 따르면 수소의 핵심기술을 수소의 생산, 운송, 저장, 활용으로 구분하여 추진되고 있으나, 수소의 생산과 활용에 대한 기술 개발이 주요하게 추진되고 있으며 수소의 저장에 대한 기술 개발은 상대적으로 미흡한 실정이다. 특히, 수소 에너지의 공급이 확대됨에 따라 기존 주유소 혹은 액화석유가스(LPG) 충전소가 수소충전소로의 전환이 기대되는 상황에서 수소 에너지 저장에 대한 기술 개발은 필수적이다. 수소충전소는 고압수소 혹은 액체수소의 형태로 수소를 저장하기 때문에 도심지에 설치될 경우 화재 및 폭발에 따른 인접 구조물의 안정성 검토가 필수적으로 수반되어야 한다(Ryu and Lee, 2021). 하지만, 도심지에 수소충전소가 설치될 경우에 인접 구조물과의 이격거리가 비교적 짧기 때문에 화재 및 폭발의 영향을 억제하는 방호 구조물의 소요두께가 과도하게 증가될 수 있다.

일반적으로 탄약 혹은 수소 등에 의하여 구조물 내부에서 폭발(Explosion)이 발생될 경우 폭발압(Over pressure), 파편(Fragment), 그리고 지반진동(ground vibration)이 주변으로 전파되며 구조물별 안전관리기준에 따라 최소 이격거리를 확보하도록 한다(Park et al., 2020). 이 때, 인접 구조물의 최소 이격거리를 안전거리(Safety distance)로 정의할 수 있다. 수소저장탱크가 지상이 아닌 지하에 설치될 경우에는 주변 지반에 의하여 폭풍압 및 파편에 대한 전파가 억제되기 때문에 방호 구조물의 소요두께를 감소시키거나 최소 안전거리를 증가시킬 수 있다. 특히, 지하 수소저장시설(Underground hydrogen storage)의 심도가 증가되어 양호한 암반에 설치될수록 폭발에 대한 영향을 효과적으로 억제할 수 있다. 독일, 미국 등 해외에서는 암염동(Salt cavern) 혹은 대수층(Aquifer)에 수소가스를 저장하는 지하 수소저장 기술에 대한 개발 및 실용화가 진행되고 있다(Lord et al., 2014; Andersson and Gronkvist,

2019). 이러한 지하 수소저장시설은 약 500m 이상의 심도에 설치되기 때문에 수소 누출 혹은 폭발에 대한 위험이 낮지만 지상구조물과 연결을 위한 설비의 연장이 증가되어 중·대규모 수소저장시설에 적합하며, 국내의 지반 환경에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 도심지에 설치되는 소규모 수소충전소(300kg/day 규모)의 수소저장탱크가 지하에 설치될 경우, 지하 수소탱크 폭발에 따른 인접 구조물의 영향을 평가하기 위한 수치모델을 제안하였다. 지하 구조물 폭발에 따른 폭풍압 및 파편에 대한 영향은 주변 지반에 의하여 억제된다고 가정하였으며, 폭발에 따른 지반진동이 인접 구조물에 미치는 영향을 평가하였다. 지반조건 및 지하 수소인프라 심도별 매개변수해석을 수행하였으며, 각 조건에서 인접 구조물의 진동을 평가하는 방법으로 안정성을 분석하였다.

2. 지하 수소인프라 폭발에 따른 인접 구조물 안정성 평가

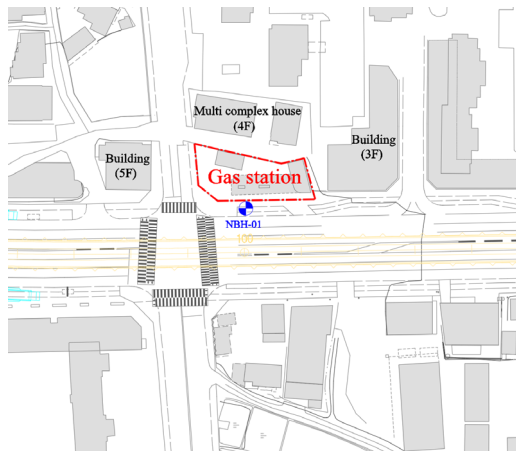
2.1 모델링 및 물성값

본 논문에서는 도심지에 설치된 주유소가 수소충전소로 전환되는 조건을 모사하기 위하여 OO시에 위치한 OO주유소를 대상으로 수치모델을 구축하였다. OO주유소 인근에서 시추조사를 수행한 OO도시철도 2단계 제2공구 실시설계의 지반조사 결과를 활용하여 수치모델의 지층현황 및 지반공학 물성값을 구축하였다.

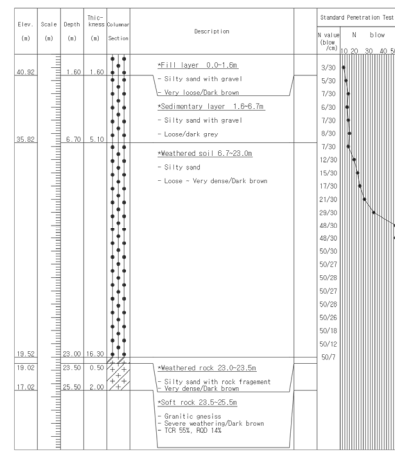
모델링에 활용된 시추공은 OO주유소와 인접한 인도(Sidewalk)에서 수행되었으며, 해당 시추공을 통해 작성된 시추추상도를 Fig. 1에 나타내었다. 지층구성은 지표면부터 성토층, 퇴적층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층으로 분석되었으며, 퇴적층과 풍화토층의 경계인 지표하 7m 심도까지는 SPT N값이 8 이하로 측정됨에 따라 연약한 지반으로 분석되었다. 성토층부터 풍화암층까지는 주로 실트질 모래로 구성되었고 연암층은 화강암질 편마암이 풍화되어 형성된 것으로 조사되었으며, 지표하 25.5m 심도까지 시추조사가 수행되었다.

실내시험 및 현장시험을 통하여 지층별 물성치가 산정되었으며 수치해석에 적용된 지층별 물성값을 Table 1에 정리하였다. 수소가스 폭발에 따른 지반진동의 전파를 모사하기 위하여 지층별 동적 물성값을 고려하였다.

300kg/day 규모의 소규모 수소충전소가 구축되는 것을



(a) Location of gas station and borehole

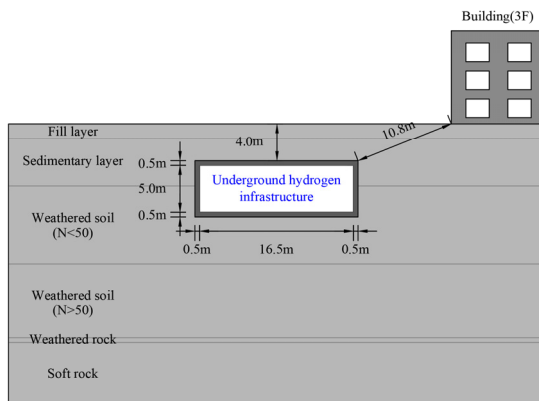


(b) Drill log for borehole

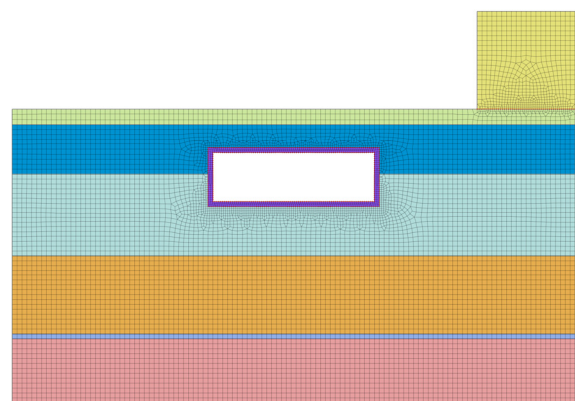
Fig. 1. Boring investigation applied to numerical modeling

Table 1. Summary of material properties by geological stratum

Geological stratum	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (°)	Elastic modulus (MPa)	Hydraulic conductivity (cm/sec)	Dynamic shear modulus (MPa)	Dynamic elastic modulus (MPa)	Dynamic poisson's ratio (-)
Fill layer	18,0	15,0	25,0	6,1	$7,0 \times 10^{-4}$	55	164	0,492
Sedimentary layer	18,0	10,0	25,7	6,9	$1,0 \times 10^{-3}$	80	239	0,491
Weathered soil (N<50)	18,0	15,0	27,0	43,1	$4,0 \times 10^{-4}$	165	491	0,486
Weathered soil (N≥50)	19,0	20,0	30,0	119,0	$4,0 \times 10^{-4}$	281	831	0,476
Weathered rock	20,0	35,0	30,0	216,5	$1,0 \times 10^{-4}$	559	1,625	0,457
Soft rock	25,0	1,000	32,0	1,125	$7,0 \times 10^{-5}$	3,300	9,050	0,369
Hard rock	26,5	2,000	37,0	25,000	$3,0 \times 10^{-5}$	10,400	27,900	0,337



(a) Conceptual diagram of numerical model



(b) Finite element modeling for hydrogen storage

Fig. 2. Geometry of numerical model

모사하기 위하여 수소튜브 트레일러가 지하 수소인프라에 설치되는 것을 가정하였다. 수소튜브 트레일러는 최대 340kg까지 운반이 가능하기 때문에 1대의 수소튜브 트레일러로 소규모 수소충전소의 공급이 가능하다. 수소튜브 트레일러의 크기, 벽체와 수소튜브 트레일러의 이격거리 등을 고려하여 지하 수소인프라의 유효공간을 폭 16.5m, 높이 5m로 구성하였으며, 지하 수소인프라의 벽체는 일반

적인 철근 콘크리트로서 두께 0.5m를 적용하였다. 지하 수소인프라의 심도는 설비의 소요길이 등을 고려하여 지표면으로부터 지하 수소인프라의 기초 바닥면까지 깊이를 10m로 설정하였다(Fig. 2(a)). 즉, 지하 수소인프라의 토피 고를 4m로 고려하였다. 지하 수소인프라 폭발에 따른 주변 구조물의 영향 평가를 위하여 국내 상용 프로그램인 MIDAS IT사의 GTS NX 프로그램을 활용하여 수치모델

링을 수행하였으며, 수치모델은 지반조사 결과를 통해 도출된 지층 현황 및 지층별 물성값을 반영하여 모델링하였다(Fig. 2(b)). 이 때, 수치모델의 도메인 크기는 주변 지반의 영향 및 메쉬(Mesh) 크기 등을 고려하여 가로 50m, 세로 30m로 구성하였다.

2.2 경계조건

본 논문에서는 주요 경계조건으로 외부 경계조건과 하중 경계조건을 고려하였다. 외부 경계조건의 경우에는 지하 수소인프라 폭발에 따른 지반진동을 모사하기 위하여 지반 스프링 경계조건을 적용하였다. 하중 경계조건의 경우에는 동하중 경계조건을 적용하여 지하 수소인프라의 폭발을 모사하였다.

외부 경계조건인 지반 스프링 경계조건으로 미공병단, AFTES에서 사용하는 지반반력계수를 적용하였다. 연직 지반반력계수와 수평지반반력계수는 식 (1)과 식 (2)를 통해 각각 산정할 수 있으며, 지하 수소인프라 폭발에 따른 지반진동 전파는 지진시와 유사한 상황이므로 보링공에서 측정된 변형계수를 8로 적용하여 지진시로 고려하였다.

$$k_v = k_{v0} \left(\frac{B_v}{30} \right)^{-3/4} = \left(\frac{1}{30} \times \alpha \times E_0 \right) \left(\frac{\sqrt{A_v}}{30} \right)^{-3/4} \quad (1)$$

$$k_h = k_{h0} \left(\frac{B_h}{30} \right)^{-3/4} = \left(\frac{1}{30} \times \alpha \times E_0 \right) \left(\frac{\sqrt{A_h}}{30} \right)^{-3/4} \quad (2)$$

여기서, k_v, k_h : 연직 및 수평지반반력계수(kN/m^3)

α : 보링공에서 측정된 변형계수(정상시 : 4, 지진시 : 8)

E_0 : 지반의 탄성계수(MPa)

A_v, A_h : 하부 및 측면 지반의 면적(m^2)

동하중 경계조건의 하중인 수소탱크 폭발압력의 산정은 실내 혹은 현장시험이 제한적이기 때문에 등가 TNT (Trinitrotoluene) 모델을 활용하여 폭발압력을 예측하는 선행연구가 활발하게 수행되었으며, 식 (3)과 (4)와 같이 경험식이 제안되었다(Molkov and Dery, 2015; Lee et al., 2021; Ryu et al., 2021).

$$M_{TNT} = \frac{E}{Q_{TNT}} = \eta M_f \frac{Q_{H_2}}{Q_{TNT}} \quad (3)$$

$$Z_c = \frac{R}{\sqrt[3]{M_{TNT}}} \quad (4)$$

여기서, M_{TNT} : 등가 TNT 질량(kg)

M_f : 저장된 수소의 질량(kg)

E : 폭발에너지(kJ)

Q_{TNT} : TNT의 발열량(4.6 MJ/kg)

Q_{H_2} : 수소의 발열량(119.93 MJ/kg)

η : 가스구름중 폭발에 기여하는 폭발수율(-)

Z_c : 환산거리(m)

등가 TNT 모델은 TNT 폭발실험 결과를 통해 제안된 경험식을 활용하여 TNT 이외의 폭발에 대한 등가 TNT 질량을 산정하고, 산정된 등가 TNT 질량 및 환산거리를 통해 폭발압력을 예측하도록 한다. 이 때, 등가 TNT 질량 산정에 필요한 폭발 에너지는 에너지 변환효율을 고려하여 기계적 에너지와 화학적 에너지로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 수소저장탱크 파손에 따라 고압수소가 누출되는 상황에서 점화원에 의하여 폭발이 발생하는 시나리오를 고려하였으며, 고압수소 폭발의 경우에는 압력팽창에 의한 폭발압 형성 후 연소가 발생되기 때문에 화학적 에너지는 무시할 수 있을 정도로 미비하여 기계적 에너지를 폭발 에너지로 고려할 수 있다(Ryu et al., 2021). Lopes and Melo(2011)는 실내시험을 통해 등가 TNT 모델을 이용한 수소의 폭발압력을 예측하는 경우의 폭발수율(Yield of the VCE)을 0.04로 제안하였다. 본 논문에서는 300kg/day 규모의 수소튜브 트레일러에 대한 폭발압력을 예측하였으며, 최대 폭발압은 약 320MPa로 산정되었다.

2.3 수치해석 결과

유한요소법에 기초한 선형시간이력해석(직접적분법)을 수행함으로써 지하 수소인프라의 폭발에 따른 지반진동을 분석하였으며, 시간에 따른 지반 및 인접 구조물의 입자 속도를 Fig. 3에 나타내었다.

지진 혹은 폭발 등과 같은 동적하중을 받는 구조물의 손상은 동적인 파괴로 인하여 발생된다(Qian and Qi, 2009). 구조물의 동적 거동은 변위 또는 입자 속도로 표현할 수 있으며, 국내외적으로 동적인 하중을 받는 구조물에 대한 피해기준으로 매질의 입자 속도를 정량적 지표로서 사용하고 있다. 본 논문에서는 행정규칙 중 발파작업 표준안전

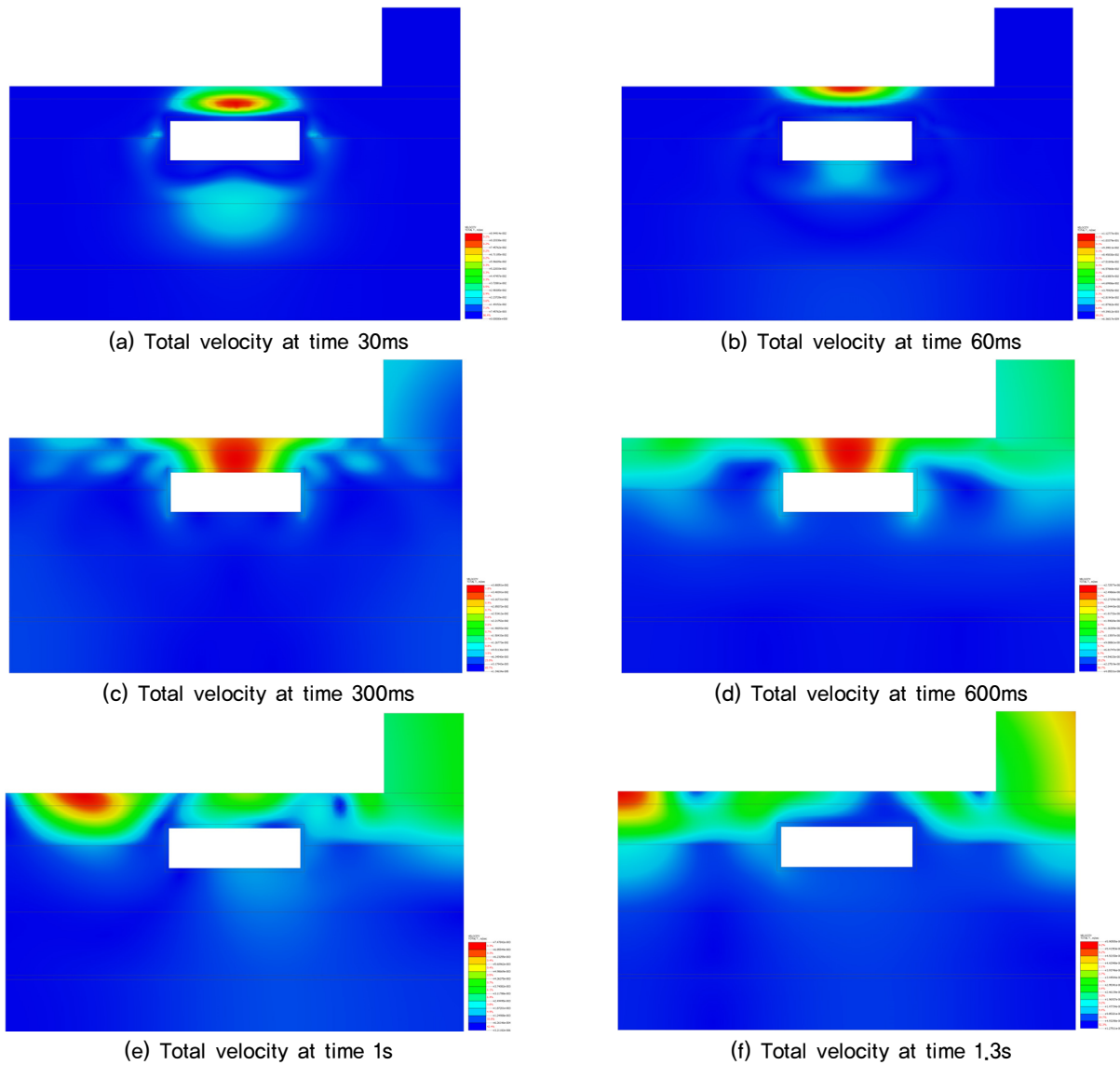


Fig. 3. Particle velocity in ground and adjacent structure over time

Table 2. Allowable limit of vibration suggested by Ministry of Employment and Labor (2020)

Type of structure	Cultural assets	House and apartment	Commercial building (no cracks)	Reinforced concrete building
Allowable vibration values at building foundation (cm/sec)	0,2	0,5	1,0	1,0~4,0

작업지침(Ministry of Employment and Labor, 2020)에 명시된 구조물별 허용 진동치를 활용하여 인접 구조물의 안정성을 평가하였으며, OO주유소 인근의 구조물들은 ‘주택 혹은 아파트’로 분류되기 때문에 건물기초에서의 허용 진동치를 0.5cm/sec로 고려하였다. Table 2에 발파작업 표준안전 작업지침에 명시된 구조물별 허용 진동치를 정리하였다.

수치해석 결과, 지표하 10m 깊이에 설치된 소규모 수소 인프라(300kg/day)가 폭발할 경우에 지상거리 기준 약 10m

에 위치한 구조물의 최대 진동치는 약 0.90cm/sec로 산정되었으며, 이는 발파진동 허용치인 0.5cm/sec 이상이다. 지하 수소인프라의 심도를 변화시키며 수치해석을 수행한 결과, 약 10m 거리에 위치한 인접 구조물이 지하 수소인프라 폭발로부터 안정하기 위해서 지하 수소인프라를 최소 24m 이상 심도(최소 토피 18m 이상)에 설치해야 되는 것으로 분석되었다. 즉, 지하 수소인프라를 24m 심도에 설치할 경우 주택 혹은 아파트에 대한 안전거리는 10m이다.

Table 3. Description of parameters for numerical model

Parameter	Input
Ground condition	Soft rock
Size of hydrogen station	300kg/day
Depth to bottom of underground hydrogen infrastructure	20m
Type of adjacent structure	House
Distance between hydrogen station and adjacent structure	10m

Table 4. Vibration value at adjacent structure according to ground condition

Ground condition	Vibration value at adjacent structure (cm/sec)	Stability evaluation
Weathered soil (N<50)	0.73	No Good
Weathered soil (N≥50)	0.71	No Good
Weathered rock	0.54	No Good
Soft rock	0.45	OK
Hard rock	0.33	OK

3. 매개변수해석을 통한 영향 평가

매개변수해석을 통하여 시공조건에 따른 인접 구조물의 안정성을 분석하고자 하였다. 시공조건에 대한 매개변수로 지반조건 및 지하 수소인프라의 심도를 고려하였으며, 기본 해석조건을 Table 3에 정리하였다. 이 때, 지반조건의 영향을 분석하기 위하여 지반이 한 가지의 지층으로 구성되어 있다고 가정하였다.

3.1 지반조건에 의한 영향

지반조건에 따른 인접 구조물의 안정성을 분석하기 위하여 지반조건을 풍화토(N<50), 풍화토(N≥50), 풍화암, 연암, 경암(총 5 case)으로 변화시키며 수치해석을 수행하였으며, 지하 수소인프라가 폭발하였을 때 지반조건에 따라 인접 구조물에서 발생하는 진동값을 Table 4에 정리하였다. 분석 결과, 연암 이상의 지반조건에서 인접 구조물이 안정한 것으로 평가되었다. 즉, 20m 심도의 지하 수소인프라를 주택 혹은 아파트 인근 10m 거리에 설치하기 위해서는 연암 이상의 지반조건을 확보하여야 한다. 또한, 토사에 비하여 단단한 암반 조건일수록 인접 구조물에서 측정되는 진동값이 감소되었다. 이는 탄성계수가 크고 조밀한 암반일수록 지하 수소인프라의 폭발로 인하여 발생

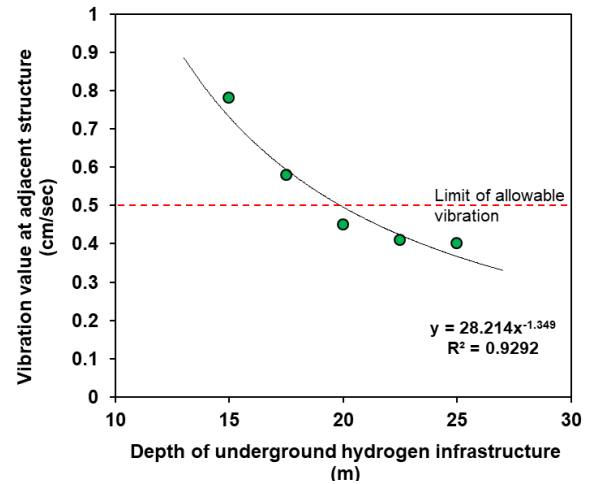


Fig. 4. Vibration value at adjacent structure according to depth of underground hydrogen infrastructure

되는 지반진동 에너지를 보다 많이 흡수하고 주변으로 전파되는 것을 억제하기 때문으로 판단된다.

3.2 심도에 따른 안전거리

지하 수소인프라의 심도에 따른 인접 구조물의 안정성을 분석하기 위하여 심도를 15m, 17.5m, 20m, 22.5m, 25m(총 5 case)로 증가시키며 수치해석을 수행하였으며, 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 심도가 증가될수록 인접 구조물에 미치는 영향이 감소되었으며, 지하 수소인프라의 심도가 20m 이상 되어야 인접 구조물의 안정성이 확보되는 것으로 분석되었다. 심도가 증가됨에 따라 인접 구조물의 진동값이 감소되는 것은 폭발원으로부터의 거리가 증가됨에 따라 진동에너지가 감소되었기 때문으로 판단된다. 다만, 지하 수소인프라의 심도 증가에 따라 감소되는 인접 구조물의 진동값이 선형적인 감소가 아닌 거듭제곱의 감소양상을 나타내었다.

4. 결론

본 논문에서는 지하 수소인프라의 폭발에 따른 인접 구조물의 영향을 분석하기 위하여 수치해석 기본모형을 구축하였다. 주유소 인근에서 수행된 지반조사 결과를 활용하여 도심지의 주유소가 소규모 수소충전소로 전환되는 것을 모사하였다. 수소충전소의 규모(300kg/day)와 설비의 소요길이 등을 고려하여 지하 수소인프라의 크기 및 심도를 가정하였으며, 등가 TNT 모델을 활용하여 지하 수소

인프라의 폭발압력을 산정하였다. 또한, 매개변수해석을 수행함으로써 시공조건에 따른 인접 구조물의 영향을 평가하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

1. 특정 지반조건에 대한 수치해석 결과, 지표하 10m 깊이에 설치된 지하 수소인프라가 폭발할 경우 지상 기준 10m 거리에 위치한 주택의 안정성을 확보하지 못하는 것으로 평가되었다. 해당 지반조건에서 인접한 주택의 안정성을 확보하기 위해서는 지하 수소인프라를 최소 24m 이상의 심도에 설치해야 하는 것으로 분석되었다.
2. 지하 수소인프라의 시공조건에 따른 인접 구조물의 영향을 평가하기 위하여 매개변수해석을 수행하였으며, 매개변수로 지반조건 및 지하 수소인프라의 심도를 고려하였다. 지반조건이 양호할수록 진동에너지를 많이 흡수하고 주변 전파를 억제하는 것으로 분석되었다. 또한, 지하 수소인프라의 심도가 증가할수록 폭발원으로부터의 거리가 증가되기 때문에 심도 증가에 따라 인접 구조물의 진동치가 거듭제곱의 형태로 감소되는 것을 확인하였다.
3. 지상 시설물과의 연결을 위한 설비의 소요길이 등을 고려하여 지하 수소인프라의 최적심도 선정이 필요하며 지반조건이 불리할 경우에는 인접 구조물의 안정성 확보를 위하여 방호 구조물의 적용이 필요하다. 또한, 지하수위를 고려하여 불포화 지반에서 폭발이 발생하였을 경우의 지반진동 전파를 고려한다면 보다 정확한 안정성 분석이 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by a KICT Research Program(project no. 20220232-001, Development of technology to secure safety and acceptability for infrastructure in hydrogen city) funded by the Ministry of Science and ICT.

References

1. Andersson, J. and Gronkvist, S. (2019), "Large-scale storage of hydrogen", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.44, No.23, pp.11901-11919.
2. COAG Energy Council (2019). Australia's National Hydrogen Strategy.
3. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (2019). Hydrogen Roadmap Europe.
4. 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", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol.23, No.6, pp.605-612. (in Korean)
5. Lopes, K. B. and Melo, P. F. (2011), "Analysis of the effects of explosion of a hydrogen cylinder on the transfer of radioactive liquid wastes at nuclear power stations", *Proceedings of the International Nuclear Atlantic Conference (INAC)*, Brazil, pp.1-15.
6. Lord, A. S., Kobos, P. H. and Borns, D. J. (2014), "Geologic storage of hydrogen: scaling up to meet city transportation demands", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.39, No.28, pp.15570-15582.
7. Ministry of Employment and Labor (2020), Standard safety work guidelines for blasting. (in Korean)
8. Ministry of Trade, Industry and Energy (2019). Hydrogen economy roadmap. (in Korean)
9. 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", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.40, No.36, pp.12581-12603.
10. Park, S., Jun, J., Choi, H. and Park, Y. -J. (2020), "Study for reducing safety distance by installing ammunition storage facility in underground", *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.20, No.3, pp.253-260. (in Korean)
11. Qian, Q. and Qi, C. (2009), "Dynamic strength of rocks and physical nature of rock strength", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol.1, No.1, pp.1-10.
12. Ryu, J. -O. and Lee, H. -Y. (2021), "A basic study on the hazard of hydrogen fuel cell vehicles in road tunnels", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 23, No.1, pp.47-60. (in Korean)
13. 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", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol.23, No.6, pp.517-534. (in Korean)