기초형식에 따른 LNG 저장탱크의 지반-구조물 상호작용을 고려한 수직방향 지진응답 분석

손 일 민¹ · 김 재 민^{2*}

¹전남대학교 대학원 건축토목공학과 박사과정, ²전남대학교 토목공학과 교수

Evaluation of Soil-Structure Interaction Responses of LNG Storage Tank Subjected to Vertical Seismic Excitation Depending on Foundation Type

Il-Min Son¹ and Jae-Min Kim^{2*}

¹Graduate Student, Department of Architecture and Civil Engineering, Graduate School, Chonnam Univ., Yeosu, 59626, Korea

²Professor, Department of Civil Engineering, Chonnam Univ., Gwangju 61186, Korea

Abstract

We investigate the effect of soil-structure interaction (SSI) on the response of LNG storage tanks to vertical seismic excitation depending on the type of foundation. An LNG storage tank with a diameter of 71 m on a clay layer with a thickness of 30 m upon bedrock, was selected as an example. The nonlinear behavior of the soil was considered in an equivalent linear method. Four types of foundation were considered, including shallow, piled raft, and pile foundations (surface and floating types). In addition, the effect of soil compaction within the group pile on the seismic response of the tank was investigated. KIESSI-3D, an analysis package in the frequency domain, was used to study the SSI and the stress in the outer tank was calculated. Based on an analysis of the numerical results, we arrived at three main conclusions: (1) for a shallow foundation, the vertical stress in the outer tank is less than the fixed base response due to the SSI effect; (2) for foundations supported by piles, the vertical stress can be greater than the fixed base stress due to the increase in the vertical impedance due to the piles and the decrease in radiation damping; and (3) soil compaction had a miniscule impact on the seismic response of the outer tank.

Keywords : LNG tank; earthquake-resistant design; shallow foundation; pile foundation; piled raft foundation

1. 서 론

원통형 탱크는 유류, 화학물질, LNG와 같은 액체의 저장에 널리 사용되고 있다. 최근 청정에너지로 각광받고 있는 LNG는 호주와 미국의 수출 확대와 중국 및 인도를 비롯한 아시아 신흥 국가들의 수입 확대에 수출 및 인수기지 건설의 증가가 예상된다 (Park, 2019). LNG 저장탱크는 국가기반 시설물로서 지진에 의한 피해가 발생하면, 사회적 및 경제적 손실이 커질 수 있기 때문에 지진에 대한 안전성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 LNG 저장탱크는 내륙에 비해 수출 및 인수에

용이한 해안의 인접한 지역에 위치하게 되고 이러한 부지의 지반조건은 상대적으로 연약하다. 그리고 연약한 부지에 건설되는 시설물은 지진응답에서 지반-구조물 상호작용(soil-structure interaction, SSI) 효과가 크게 나타난다(Veletsos and Tang, 1990; Kim *et al.*, 2002). 따라서 유체-구조물 상호작용(fluid structure interaction, FSI) 효과와 SSI 효과에 대한 고려는 LNG 저장탱크의 지진응답에 대한 연구에서 매우 중요한 연구주제이다(API 650, 2013; Eurocode 8, 2006). 이에 따라 대용량 LNG 저장탱크의 내진성능을 정밀하게 개선하기 위한 동적해석 방법이 연구되고 있다(Kim *et al.*, 2002;

* Corresponding author:

Tel: +82-62-530-1651; E-mail: jm4kim@jnu.ac.kr
Received August 24 2019; Revised August 29 2019;
Accepted August 30 2019

©2019 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Sun and Cui, 2015).

한편, LNG 저장탱크의 내진설계 시 지반의 전단파속도가 300m/s 이상이면 얇은 기초가 주로 사용되고, 300m/s 이하인 경우에는 지지력을 확보하기 위해 말뚝기초를 사용할 수 있다. 국내에서는 말뚝기초 적용 시 선단지지 말뚝기초가 많이 사용되며, 기술적 또는 경제적인 이유로 말뚝지지 전면기초(piled raft foundation)가 사용되기도 한다(Choi *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2013). 말뚝을 사용한 기초를 설치할 경우 구조물 하부 지반의 평균강성(지반과 말뚝의 일체 시스템)이 변화하므로 지반-구조물 상호작용의 영향에 대한 실험적 및 해석적인 연구가 다양하게 진행되어 왔다(Kim *et al.*, 2004; Hokmabadi and Fatahi, 2016; Ha *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2017; Son *et al.*, 2019).

Ha 등(2017)과 Park 등(2017)은 얇은 기초와 말뚝기초로 지지된 LNG 저장탱크(내부 유체는 집중질량으로 모델링한 내조탱크)를 이용하여 동적 원심모형실험을 수행하였다. 기초의 형식에 따라 복잡한 동적거동이 발생할 수 있으므로 SSI의 영향을 고려한 내진설계 및 평가가 필요하다는 결론을 도출하였다. Hokmabadi와 Fatahi(2016)는 진동대실험으로 검증된 FLAC3D 해석 모델을 이용하여 수평방향 지진입력에 대해 기초형식에 따른 지반 증폭, 상부 구조물의 전단력 분포 및 측면변형을 비교하고, 기초형식이 지진응답의 주요 인자임을 보였다. 최근 Son 등(2019)은 수평방향 지진입력에 대한 LNG 저장탱크 네 가지 종류의 기초형식과 말뚝의 동다짐 효과에 따른 3차원 지진해석을 수행하였다. LNG 저장탱크의 수평방향 지진응답이 기초형식에 따라 다르게 나타났고, 말뚝의 동다짐 효과에 의한 영향은 무시할 수 없을 정도로 크며 말뚝지지 전면기초에서 가장 큰 응답을 보였다.

이 연구에서는 Son 등(2019)이 수행한 수평방향 지진응답 분석에 대한 연구의 연장으로 수직방향 지진입력에 대하여 기초형식에 따른 LNG 저장탱크의 지진응답에 대해 분석하였다. 아울러 말뚝기초의 현장 시공 시 발생 가능한 말뚝과 말뚝 사이 토층의 동다짐 효과로 인한 지반 강성의 변화를 고려한 지진응답도 분석하였다. 이를 위해 선행 연구와 동일한 네 가지 기초형식(말뚝기초(말뚝지지 전면기초, 선단지지 말뚝기초(지표면 접촉식, 부유식)), 얇은 기초)과 지반의 전단파속도를 변수로 고려하였다.

2. 해석조건

이 연구에서는 지반-구조물 상호작용 해석을 수행하기 위해 진동수영역에서 유한-무한요소법을 적용한 SSI 해석프로그램인 KIESSI-3D(이하 KIESSI)를 사용하였다(Seo and Kim,

2012; Lee *et al.*, 2013; Lim *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2016). 이 연구에서 사용한 예제구조물은 Fig. 1과 같이 63 ML 용량의 LNG 저장탱크로 LNG 저장고가 19m인 내조탱크와 전체높이가 29.27m인 외조로 구성되어 있다. 내조탱크는 반경 32.5m, 높이 20.0m, 평균 벽두께 0.02m의 강구조물이다. 외조는 반경 34.9m, 높이 29.27m, 평균 벽두께 0.7m인 PSC 구조물이다(Son *et al.*, 2019). Fig. 2는 말뚝기초와 말뚝지지 전면기초에 대한 말뚝의 배치도를 나타낸다. 직경이 0.75m인 강관 말뚝이고, 총 개수는 229개이다. 구조물 및 기초의 재료 물성치는 Table 1과 같고, 콘크리트 구조물(RC 및 PSC)의 감쇠비는 5%, 강구조물의 감쇠비는 2%를 사용하였다. 지반조건은 Table 2와 같이 760m/s의 기반암 위에 전단파속도 200m/s(Case 1), 300m/s(Case 2)의 균질한 점토층이 있는 것으로 가정하였다. 그리고 LNG 저장탱크, 기초형식, 지반조건, 자유장해석 결과 등은 수평방향 지진응답에 대한 Son 등(2019)의 논문과 동일하다.

Fig. 1 LNG tank example(63,000kL)

Fig. 2 Arrangement of piles(229EA)

Table 1 Structural properties of the LNG storage tank

Material	Young's modulus (kPa)	Mass density (Mg/m ³)	Poisson's ratio	Damping ratio
RC	2.70×10^7	23.544	0.20	0.05
PSC				
Steel	2.00×10^8	77.008	0.30	0.02
LNG	-	4.709	-	0.005

Table 2 Soil properties of the LNG storage tank

Soil	Thickness (m)	Shear wave velocity (m/s)	Mass density (Mg/m ³)	Poisson's ratio	Damping ratio
Case 1 (Clay)	30	200	17.658	0.48	0.025
Case 2 (Clay)		300			
Bedrock	∞	760	25.506	0.30	0.01

2.1 상부 구조물 및 유체 모델링

이 연구에서는 내조와 외조로 구성된 LNG 저장탱크의 수직 방향 지진해석을 수행하기 위해 Fig. 3과 같은 유체-구조물-지반 상호작용 모델링 방법을 사용하였다. 이 방법에서 FSI (fluid-structure interaction) 효과는 내조탱크 바닥에 작용하는 유연성분 압력과 강체성분 압력을 나타내는 2-자유도 진자로 근사하였으며, 두 성분에 대한 집중질량 및 스프링 강성을 Luft(1984)의 방법으로 계산하였다. 그리고 외조탱크는 Fig. 4와 같이 3차원 쉘 요소로 모델링하였다. 작성된 해석 모델을 이용하여 고유치해석을 수행한 결과, 주요 진동모드의 모드특성은 Table 3과 같으며 외조 탱크의 수직방향 기본 모드형상은 Fig. 5와 같다.

Fig. 3 FSSI analysis method and model used for seismic analysis in the vertical direction

Fig. 4 Finite element models for outer tank of the LNG tank

Table 3 Modal properties of fixed-base LNG tank model for seismic analysis in the vertical direction

Mode No.	Freq. (Hz)	Mass Participation Ratio	Remarks
		Z-Dir.	
1	3.00	0.93	inner tank
2	3.79	0.06	outer tank

Fig. 5 Second mode shape on the tank roof

2.2 기초 종류 및 지반 조건

이 연구에서는 기초형식에 따른 LNG 저장탱크의 수직방향 지진응답해석을 수행하기 위해 Fig. 6과 같은 네 가지 기초형식을 고려하였다. 말뚝기초는 지표면에서부터 암반까지 30m 길이로 설치되었고, 말뚝지지 전면기초는 지표면에서 20m 아래까지 설치되었으며, 부유식 말뚝기초는 바닥 슬래브가 지표면에서 1m 떨어져 있다. 얇은 기초와 말뚝기초의 바닥 슬래브는 지름 71.0m, 두께 1.0m이다.

이 연구에서는 기반암 위에 깊이 30m인 균질한 토층을 가정하였으며, 일반적으로 구축압 등의 효과로 인하여 깊이별로 전단파속도의 변화가 있으나, 정성적인 비교를 위하여 지반조

Fig. 6 Four different types of LNG tank foundation considered in this study

건은 760m/s의 기반암 위에 전단파속도 200m/s, 300m/s의 균질한 점토층이 있는 것으로 가정하였다.

2.3 입력지진

지진입력은 기반암노두에서 정의하였고, 입력지진의 강도는 지진구역 I과 재현주기 500년을 적용($PGA=0.11g$)하였으며, 설계응답스펙트럼의 형상은 행정안전부 고시 내진설계기준 공통적용사항(KDS, 2018)을 적용하였다. Fig. 7(a)는 이 연구에서 사용한 수평방향 설계가속도응답스펙트럼이다. 이 설계응답스펙트럼으로부터 인공지진파를 Fig. 7(b)와 같이 작성하였다. 이로부터 수직방향 지진입력은 수평방향 지진의 0.77배가 적용되었다.

Fig. 7 Input motion in the horizontal at bedrock outcrop with PGA of 0.11g(Scale factor 0.77 is applied to obtain the vertical seismic input.)

2.4 자유장해석 및 기초와 지반 모델링

이 연구에서는 지반의 1차 비선형 거동을 고려하기 위해 등가 선형 지반특성을 이용하여 두 가지 지반조건에 대한 자유장해석을 수행하였다(Son *et al.*, 2019). 자유장해석은 SHAKE 프로그램을 이용하였으며, 점토에 대한 비선형 특성은 Schnabel 등(1991)의 자료를 이용하였다.

네 가지 기초형식에 따른 LNG 저장탱크의 KIESSI 해석을 위한 유한요소모델을 Fig. 8과 같이 작성하였다. 이 모델의 개발을 위해 바닥 슬래브와 말뚝을 쉘 요소로 표현하였고 말뚝은

원통 형태를 팔각기둥으로 근사하였다. 그리고 지반영역은 8-절점 입체요소(solid element)로 모델링하였다. KIESSI 프로그램에서 근역지반의 유한요소모델의 측면과 바닥면에 동적 무한요소를 부착하여 지반에서 탄성파의 전달특성을 묘사한다.

Fig. 8 KIESSI finite element models for structure and near-field soil of the LNG tank

2.5 동다짐 효과

이 연구에서는 말뚝과 말뚝 사이 지반의 동다짐 효과를 고려하기 위해 바닥 슬래브 직경과 말뚝의 깊이만큼의 동다짐 영역을 설정하고, 이 영역의 전단탄성계수를 증가시켰다(Son *et al.*, 2019). 동다짐에 의한 깊이별 전단파속도 분포($\{V_s^*\}$)는 식 (1)과 같이 등가선형해석으로부터 계산된 전단파속도 분포($\{V_s\}$)에 전단파속도 증가비(C)를 곱한 값으로 정의하였다. 이때 전단파속도의 증가비(C)는 1.05, 1.10, 1.20, 1.30배인 네 가지를 고려하였다. 예제해석에 사용된 토층은 SSI 효과가 더 크게 나타난 전단파속도 200m/s에 대한 깊이별 등가 선형 전단파속도 분포를 이용하였다.

$$\{V_R^*\} = C\{\bar{V}_R\} \quad (1)$$

3. 지진응답

지진응답 분석에 앞서 KIESSI 해석모델의 검증을 위해 ANSYS 프로그램으로 고정기초 해석을 수행하였고, 이를 지반의 전단파속도가 20,000m/s인 KIESSI 모델의 결과와 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 이때 F_{11} 은 외조탱크 벽체 수직응력과 F_{22} 는 원환응력(hoop stress)이다. 서로 다른 두 프로그램에 의한 응력이 잘 일치하여 KIESSI 해석모델이 합리적으로 작성되었음을 확인하였다.

Fig. 9 Seismic response comparison of outer tank using KIESSI-3D and ANSYS

3.1 기초형식에 따른 지진응답

이 연구에서는 지반의 전단파속도와 기초형식의 변동에 따른 외조탱크에서 응력의 변화를 분석하기 위하여 두 가지 지반조건에 대한 SSI 해석을 수행하였다. 그리고 SSI 효과를 무시한 응답과 비교를 위해 ANSYS 프로그램을 이용하여 고정기초 해석을 수행하였고 외조탱크의 응력을 계산하여 Fig. 10에 정리하였다. 이때 고정기초해석은 지진입력으로 Fig. 7(b)에 0.77 배한 가속도 시간이력을 자유장지반의 기반암노두에 입력하여 구한 지표면에서의 자유장응답을 사용하였다. 따라서 Fig. 10에서 ANSYS 지진응답은 SSI 효과가 고려되지 않은 응답이다.

두 종류의 지반 전단파속도와 외조 벽체 셀의 높이에 따른 수직응력(F_{11})과 원환응력(F_{22})의 분포를 각각 Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)에 나타내었다. 외조 벽체 셀의 수직응력은 벽체

최하단에서 최댓값을 갖는다. SSI를 무시한 경우(고정기초 해석, 지표면 자유장 응답을 입력 지진으로 적용)의 수직응력은 벽체 하단으로 갈수록 단조 증가하는 경향을 보였다. 그리고 SSI를 고려할 경우, 대부분은 SSI를 무시한 경우보다 최대 부재력이 감소하였다. 하지만 다음과 같이 기초 형식과 지반조건에 따라 SSI를 고려할 경우 최대 수직응력이 증가하는 경우도 발생하였다: (1) 지반의 전단파속도가 200m/s인 말뚝지지 전면 기초 경우; (2) 지반의 전단파속도가 300m/s인 부유식 말뚝 기초 경우.

Fig. 10 Maximum member force profiles for outer tank depending on types of foundation

외조 벽체 셀의 원환응력은 외조 벽체와 지붕의 경계부인 외조 벽체 최상단에서 최댓값을 갖는다. Fig. 10(b)에 보인 바와 같이 고정기초해석 시 원환응력은 SSI를 고려한 경우보다 크게 나타났다. 그리고 전단파속도 200m/s일 때 얇은 기초의 원환응력은 가장 작게 나타났으나, 300m/s에서는 기초형식에 관계없이 거의 동일한 응답을 보였다.

외조 벽체의 최하단에서 구한 수직응력과 최상단에서 구한 원환응력의 전달함수를 지반의 전단파속도가 200m/s와 300 m/s인 경우에 대하여 각각 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다.

수직응력과 원환응력의 전달함수에서 공통적으로 두 개의 피크(peak)가 발생하였다. 첫 번째 피크(2Hz~3Hz 사이)는 유체-내조의 진동모드이고 두 번째 피크(4Hz 근처)는 외조의 진동모드이다. 따라서 SSI 효과가 무시될 수 있는 암반조건 (전단파속도 20,000m/s, Fig. 11과 Fig. 12에서 회색으로 표시)에서는 유체-내조의 진동모드가 나타나지 않는다. 반면에 SSI 해석결과에서는 유체-내조와 외조가 바닥 슬래브를 통한 상호작용 효과가 뚜렷하게 나타난다. 특히, 지반 전단파속도가 200m/s인 경우, 얇은 기초일 때 유체-내조 모드의 최고진동수 (peak frequency)가 말뚝을 사용한 기초보다 작다. 그 이유는 말뚝이 기초의 수직방향 임피던스를 크게 하고 결과적으로 유체-내조 모드의 최고진동수를 크게 하기 때문이다.

Fig. 11에 보인바와 같이 부유식 말뚝기초에서 유체-내조 모드의 방사감쇠가 다른 기초에 비해서 작게 나타났으며, 얇은 기초에서 외조탱크 모드의 방사감쇠가 다른 기초에 비해 크게

(a) F_{11} at bottom of outer tank wall

(b) F_{22} at top of outer tank wall

Fig. 11 Transfer functions of shell stresses in outer tank wall ($V_s=200\text{m/s}$)

(a) F_{11} at bottom of outer tank wall

(b) F_{22} at top of outer tank wall

Fig. 12 Transfer functions of shell stresses in outer tank wall ($V_s=300\text{m/s}$)

나타났다. 이는 기초 매트와 지반의 접촉을 통해 발생하는 방사 감쇠가 크기 때문이다. 하지만 지반 전단파속도가 300m/s인 경우, 두 모드에 대한 최고진동수와 방사감쇠가 기초형식과 관계없이 매우 유사하게 나타났다. 이로부터 지반의 전단파속도 (강성)가 커짐에 따라 기초의 형식이 구조물의 수직방향 지진 응답에 미치는 영향이 작아진다는 사실을 알 수 있었다.

3.2 동다짐 효과에 의한 지진응답

이 절에서는 말뚝기초로 지지된 LNG 저장탱크가 말뚝의 시공과정에서 발생한 동다짐이 구조물의 지진응답에 미치는 영향을 분석하였다. 네 가지 전단파속도 증가비에 대해 계산된 지진응답과 동다짐을 고려하지 않은 조건 ($C=1.00$)에 대한 외조 벽체 쉘의 응력 분포를 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 외조 벽체 쉘의 수직 및 원환응력 분포는 수평방향 지진해석 시 전단파속도 증가비(C)가 증가함에 따라 응력성분이 증가 또는 감소하였지만(Son *et al.*, 2019), 수직방향 지진해석 시 세 가지 기초형식 모두 변화가 크지 않았다.

Fig. 13 Maximum member force profiles for outer tank depending on types of pile foundation(The stiffness increasing factor C is defined in Eq. (1))

4. 결 론

이 연구에서는 수직방향 지진입력에 대한 LNG 저장탱크의 기초형식(얇은 기초, 말뚝기초(지표면 접촉식, 부유식), 말뚝 지지 전면기초)에 따른 지진응답의 차이를 분석하였다. 이를 위하여 국내에 건설된 대표적인 LNG 저장탱크를 예제로 선택하였다. 지반은 기반암 위에 두께 30m인 토층으로 가정하였다. SSI 해석은 등가선형 물성치와 진동수영역 해석법을 사용한 KEISSI-3D 프로그램을 사용하였다. 지진응답해석 결과로 기초형식별 외조 벽체 셸에서 응력(수직, 원환)을 비교하였다. 그리고 말뚝기초의 동다짐 효과에 의한 외조 벽체의 셸 응력도 비교하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 얇은 기초의 경우 외조 벽체 셸의 수직 및 원환응력 분포가 고정기초 해석(SSl를 무시한 경우)보다 작게 나타났다. 이는 SSI 효과로 인하여 외조탱크 모드의 방사감쇠가 다른 기초에 비해 크게 나타나기 때문이다.

- 2) 말뚝을 이용한 기초(말뚝기초, 말뚝지지 전면기초)의 경우, 지반조건과 기초형식에 따라 외조 벽체 셸의 수직응력이 SSI 효과를 무시한 경우보다 큰 경우가 발생할 수 있다. 이는 말뚝이 기초의 수직방향 동적 강성과 방사감쇠에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문이다.
- 3) 말뚝의 향타로 인한 주변 지반의 동다짐 효과가 수직지진입력에 의한 구조물의 응답에 미치는 영향은 기초형식에 관계없이 매우 작은 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호:13IFIP-C113546-01)으로 수행되었습니다.

References

- ANSYS Inc. (2017) ANSYS 17, User's Reference Manual.
- API 650 (2013) Welded Tanks for Oil Storage, American Petroleum Institute.
- Choi, K.J., Park, D.G., Lee, J.H. (2012) Load Sharing Analysis of Piled Rafts Based on Non-linear Load Settlement Characteristics, *J. Korean Geotech. Soc.*, 28(11), pp.33~40.
- Eurocode 8 (2006) Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 4: Silos, Tanks and Pipelines, European Committee for Standardization, Brussels.
- Ha, J.G., Park, H.J., Lee, M.K., Lee, H.R., Kim, D.S., Kwon, S.Y., Kim, H.U. (2017) Seismic Behavior of LNG Storage Tank Considering Soil Foundation Structure Interaction with Different Foundation Types, *19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Hokmabadi A.S., Fatahi, B. (2016) Influence of Foundation Type on Seismic Performance of Buildings Considering Soil-Structure Interaction, *Int. J. Struct. Stab. & Dyn.*, 16(8), 1550043.
- KDS 17 10 00 (2018) Seismic Design General, Korea Construction Standards Center, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea.
- Kim, J.H., Kim, S.K., Chun, B.S. (2013) A Study on Piled Raft Constructed on Soft Ground through Numerical Analysis, *J. Korean Geo Environ. Soc.*, 14(3), pp.29~34.
- Kim, J.M. (2016) Development of World-Best Fundamental Technologies for Nonlinear Fluid Structure Soil Interaction Analysis by Developing p-version

- Dynamic Infinite Elements and Performing Sloshing Shaking Table Tests, Report No. 14CTAP-C077514-01, Chonnam National University.
- Kim, J.M., Chang, S.H., Yun, C.B.** (2002) Fluid-Structure-Soil Interaction Analysis of Cylindrical Liquid Storage Tanks Subjected to Horizontal Earthquake Loading, *Struct. Eng. & Mech.*, 13(6) pp.615~638.
- Kim, M.K., Rhee, J.W., Lee, P.K., Kim, M.K.** (2004) A Study of Characteristics of Soil-Pile-Structure Interaction Behavior on the Frequency Contents of the Seismic Waves, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 17(3), pp.295~308.
- Lee, E.H., Kim, J.M., Seo, C.G.** (2013) Large-scale 3D SSI Analysis using KIESSI-3D Program, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 26(6), pp.439~445.
- Lim, J.S., Son, I.M., Kim, J.M., Seo, C.G.** (2016) A Speed-up in Computing Time for SSI Analysis by p-version Infinite Elements, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 29(5), pp.471~482.
- Luft, R.U.** (1984) Vertical Acceleration in Prestressed Concrete Tanks, *ASCE*, 110, ST4, pp.706~714.
- Park, H.J., Ha, J.G., Kwon, S.Y., Lee, M.G., Kim, D.S.** (2017) Investigation of the Dynamic Behaviour of a Storage Tank with Different Foundation Types Focusing on the Soil Foundation Structure Interactions using Centrifuge Model Tests, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 46, pp.2301~2316.
- Park, S.Y.** (2019) Global LNG Market Change and Domestic Private Power Market Forecast, www.kisrating.com.
- Schnabel, P.B., Lysmer, J., Seed, H.B.** (1991) SHAKE91, A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontal Layered Sites, EERC(Earthquake Engineering Research Center), College of Engineering, University of California Berkeley, California.
- Seo, C.G., Kim, J.M.** (2012) KIESSI Program for 3-D Soil-Structure Interaction Analysis, *Comput. Struct. Eng.*, 25(3), pp.77~83.
- Son, I.M., Kim, J.M., Lee, C.H.** (2019) Seismic Soil-Structure Interaction Analyses of LNG Storage Tanks Depending on Foundation Type, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 32(3), pp.155~164.
- Sun, J., Cui, L.** (2015) Seismic Response for Base Isolation of Storage Tanks with Soil-Structure Interaction, *Phys. & Numer. Simul. Geotech. Engi.*, pp.64~68.
- Veletsos, A.S., Tang, Y.** (1990) Soil-Structure Interaction Effects for Laterally Excited Liquid Storage Tanks, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 19, pp.473~496.

요 지

이 논문에서는 수직방향 지진입력에 의한 지반-구조물 상호작용 효과가 기초 종류에 따라 LNG 저장탱크의 지진응답에 미치는 효과를 분석하였다. 이를 위하여 직경 71m인 LNG 탱크와 기반암 위 점토지반의 깊이가 30m인 지반조건을 고려하였다. 그리고 기초형식으로 네 가지(얕은 기초, 말뚝지지 전면기초, 말뚝기초(지표면 겹촉식, 부유식)를 고려하였다. 지반의 비선형성은 자유장 지반에 대하여 등가선형화기법으로 고려되었다. 또한, 말뚝기초의 시공과정에서 발생하는 동다짐 효과에 대해서도 분석하였다. SSI 해석을 위하여 진동수영역 해석프로그램인 KIESSI-3D를 이용하였다. 지반-구조물 상호작용 해석을 통해 LNG 저장탱크의 외조 벽체 쉘의 응력을 구하였다. 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다: (1) 얕은 기초에서 외조탱크의 수직응력은 SSI 효과로 인하여 고정기초응답 보다 작았다. (2) 말뚝으로 지지된 기초에서 말뚝으로 인해 기초의 수직강성이 커지고 방사감쇠가 작아질 수 있기 때문에 SSI 응답이 고정기초응답 보다 커질 수 있다. (3) 동다짐 효과는 수직지진에 의한 LNG 저장탱크의 응답에 미치는 영향이 매우 작았다.

핵심용어 : LNG 탱크, 내진설계, 얕은 기초, 말뚝기초, 말뚝지지 전면기초