기초 형식에 따른 LNG 저장탱크의 지반-구조물 상호작용을 고려한 지진응답 분석

손 일 민¹ · 김 재 민^{2*} · 이 창 호³

¹전남대학교 대학원 건설·환경공학과, ²전남대학교 토목공학과, ³전남대학교 해양토목공학과

Seismic Soil-Structure Interaction Analyses of LNG Storage Tanks Depending on Foundation Type

Il-Min Son¹, Jae-Min Kim^{2*} and Changho Lee³

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

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

³Department of Marine and Civil Engineering, Chonnam Univ., Yeosu, 59626, Korea

Abstract

In this study, the soil-structure interaction (SSI) effect on the seismic response of LNG storage tanks was investigated according to the type of foundation. For this purpose, a typical of LNG storage tank with a diameter of 71m, which is constructed on a 30m thick clay layer over bedrock was selected, and nonlinearity of the soil was taken into account by the equivalent linearization method. Four different types of foundations including shallow foundation, piled raft foundation, and pile foundations (surface and floating types) were considered. In addition, the effect of soil compaction in group piles on seismic response of the tank was investigated. The KIESSI-3D, which is a SSI analysis package in the frequency domain, was used for the SSI analysis. Stresses in the outer tank, and base shear and overturning moment in the inner tank were calculated. From the comparisons, the following conclusions could be made: (1) Conventional fixed base seismic responses of outer tank and inner tank can be much larger than those of considering the SSI effect; (2) The influence of SSI on the dynamic response of the inner tank and the outer tank depends on the foundation types; and (3) Change in the seismic response of the structure by soil compaction in the piled raft foundation is about 10% and its effect is not negligible in the seismic design of the structure.

Keywords : LNG tank, soil-structure interaction, pile foundation, piled raft foundation, seismic analysis

1. 서 론

원통형 탱크는 정수압을 매우 효과적으로 지지할 수 있는 구조형식이므로 유류, 화학물질, LNG와 같은 액체의 저장에 널리 사용되고 있다. 최근 들어 청정에너지로 각광받고 있는 LNG의 대량 저장을 위한 LNG 수출기지 또는 인수기지 건설이 세계적으로 증가하고 있다. 대용량 LNG 저장탱크와 같은 국가 기반 시설물은 지진에 의해 피해가 발생할 경우 사회적 및 경제적 손실이 매우 커질 수 있기 때문에 지진에 대한 안전성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 이에 따라 대용량 LNG 저장

탱크의 내진성능을 향상시키기 위하여 내진설계 기법의 고도화와 함께 면진시스템의 적용도 다수 연구되었다(Malhotra, 1997; Zhang *et al.*, 2011; Seo *et al.*, 2014). 최근에는 지반-구조물 상호작용(soil structure interaction, SSI)을 정밀하게 고려한 동적 해석 방법이 연구되고 있다(Kim *et al.*, 2002; Cho *et al.*, 2004; Sun and Cui, 2015).

LNG 저장탱크의 내진설계 시 유체-구조물 상호작용(fluid structure interaction, FSI) 효과는 필수적으로 고려되어야 한다(API 650, 2013; ASCE / SEI 7-10, 2010; Eurocode 8, 2006). 또한 LNG 저장시설은 해상으로 운반되는 대형

* Corresponding author:

Tel: +82-62-530-1651; E-mail: jm4kim@jnu.ac.kr

Received February 22 2019; Revised April 30 2019;

Accepted April 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.

LNG 선박의 접근성 때문에 해안과 인접한 지역에 건설된다. 일반적으로 해안인접 지반의 강성은 암반보다 연약하므로 이 같은 부지에 건설되는 시설물은 지진응답에서 SSI 효과가 크게 나타난다(Veletsos and Tang, 1990; Kim *et al.*, 2002). 따라서 FSI와 SSI 효과에 대한 고려는 LNG 저장탱크의 지진응답에 대한 연구에서 매우 중요한 연구주제이다.

한편, LNG 저장탱크의 설계 시 지반의 전단파속도가 300m/s 이상이면 얇은 기초가 주로 사용되고, 그 이하의 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). 말뚝기초를 설치할 경우 구조물 하부 지반의 평균강성(즉, 지반과 말뚝의 일체 시스템)이 변화하므로 지반-구조물 상호작용의 영향에 대한 실험적 및 해석적인 연구가 다양하게 진행되어 왔다(Kim *et al.*, 2004; Yoo *et al.*, 2014; Ha *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2017; Kappos and Sextos, 2001; Hokmabadi and Fatahi, 2016).

Yoo 등(2014)은 말뚝기초로 지지된 아파트 구조물에 대하여 동적 원심모형실험을 수행한 결과, 정확한 지진응답 산정을 위해 지반-기초-구조물 전체를 모델링해야 함을 보고하였다. 그리고 Ha 등(2017)과 Park 등(2017)은 얇은 기초와 말뚝기초로 지지된 LNG 저장탱크(내부 유체는 집중질량으로 모델링한 내조탱크)를 이용하여 동적 원심모형실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다: 기초의 형식에 따라 복잡한 동적거동이 발생할 수 있으므로 SSI의 영향을 고려한 내진설계 및 평가가 필요하다. Kappos와 Sextos(2001)는 교량의 하부 구조에 대한 2D 유한요소 모델을 이용하여 비선형 정적해석을 수행

하였고, 기초 강성(말뚝의 수와 배열 조정)을 조절하여 연성 요구량을 감소시킴으로써 강진 시 교량의 전반적인 성능이 향상될 수 있음을 보였다. Hokmabadi와 Fatahi(2016)는 진동대실험으로 검증된 FLAC3D 해석 모델을 이용하여 기초 형식에 따른 지반 증폭, 상부 구조물의 전단력 분포 및 측면 변형을 비교하고, 기초 형식이 지진응답의 주요 인자임을 보였다.

위와 같은 다수의 연구에서 알 수 있듯이 LNG 저장탱크는 SSI를 고려한 3차원 해석적 또는 실험적 분석이 필요하다. 그러나 기존의 연구에서는 내조탱크와 외조로 구성된 LNG 저장탱크의 3차원 해석에 대한 고찰이 부족하였으며, 말뚝기초의 현장 시공 시 발생 가능한 말뚝과 말뚝 사이 토층의 동다짐 효과로 인한 지반 강성의 변화를 고려한 해석이 부족하였다. 따라서 이 연구에서는 기초형식(얇은 기초, 말뚝기초, 말뚝지지 전면기초)에 따른 LNG 저장탱크의 내조탱크와 외조에 대한 지진응답을 비교하였다. 추가적으로 말뚝 시공 과정에서 발생한 동다짐으로 인한 지반밀도 상승과 지반 강성의 증가 효과를 고려한 LNG 저장탱크의 동적거동에 대해서도 분석하였다.

2. 유체-구조물-지반 상호작용(FSSI) 해석 방법

2.1 유체-구조물 상호작용 해석 방법

대형 LNG 저장탱크는 Fig. 1과 같이 내조탱크와 외조로 구성되어 있다. 내조탱크는 지진이 발생하였을 때 벽체에 작용하는 동수압을 고려하여 설계한다. 이러한 동수압을 고려하기 위해 설계기준에서는 충격성분(impulsive component)과 대류 성분(convective component)으로 구분하고 질량-스프링모델(mass spring model, MSM)을 이용하여 지진력을 산정하는

Fig. 1 FSSI analysis method model used in this study

단순 방법이 많이 사용되고 있다(Haroun, 1980; API 650, 2013; Eurocode 8, 2006). 좀 더 복잡한 방법으로 원통형 탱크를 속도포텐셜함수와 쉘(shell) 구조물의 변형 형상에 기반한 유체 부가질량을 보 요소에 부착하고 BSM(beam stick model)을 작성하여 지진력을 산정하는 방법(ASCE 4-16, 2017) 등이 있다. 이 연구에서는 FSI 효과를 고려하기 위하여 BSM 방법을 사용하였다. BSM 방법은 전단면적(shear area)이 고려된 보 요소와 집중 유체 부가질량으로 내조탱크를 모델링하는 방법이다. 이때 보 요소의 전단면적은 원통형 단면의 전단변형뿐만 아니라 쉘의 멤브레인 거동까지 고려할 수 있어야 한다(Jin *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2015). 이 연구에서는 Kim 등(2015)이 제안한 BSM 방법으로 내조탱크의 FSI 모델을 작성하였다. 그리고 유체의 동수압이 직접적으로 작용하지 않는 외조탱크는 3차원 쉘 요소로 모델링하였다.

2.2 지반-구조물 상호작용 해석 방법

지반-구조물 상호작용해석을 통상적인 동적 해석과 구별하는 가장 큰 이유는 지반의 반무한성으로 인한 지반의 동특성이 가진 진동수에 따라 달라지기 때문이다. 이런 이유로 지반-구조물 상호작용 해석은 보편적으로 진동수영역에서 수행되며 시간영역 응답은 진동수영역 응답을 역 Fourier 변환하여 구한다. 또한 진동수영역 동적해석의 경우 선형해석에 국한되므로 지반의 비선형성을 고려하려면 등가선형화기법을 이용하여야 한다(Kramer, 1996). 이 연구에서는 지반-구조물 상호작용해석을 수행하기 위해 진동수영역에서 유한-무한요소법을 적용한 SSI 해석프로그램인 KIESSI-3D(이하 KIESSI)를 사용하였다(Seo and Kim, 2012; Kim *et al.*, 2016). 또한 지반의 비선형성을 고려하기 위해 자유장지반에 대한 등가선형 지진 응답해석을 수행하고 이로부터 얻어진 지반의 등가선형 물성치를 지반-구조물 상호작용해석에 적용하였다.

3. 해석 사례

3.1 예제구조물 및 지진입력

해석 예제는 Fig. 2와 같은 63,000kL 용량의 LNG 저장 탱크로서 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. Fig. 3은 말뚝기초와 말뚝지지 전면기초의 말뚝 배치도로서, 직경이 0.75m인 강관 말뚝이 총 229개가 사용되었다. 이 연구

Fig. 2 LNG tank example(63,000 kL)

Fig. 3 Pile arrangement(total of 229 piles)

Fig. 4 Four different types of LNG tank foundation considered in this study

에서는 기반암 위에 깊이 30m인 균질한 토층을 가정하였으며 Fig. 4와 같은 4가지 기초형식(얕은 기초, 말뚝지지 전면기초, 말뚝기초(지표면 접촉식, 부유식)을 고려하였다. 말뚝기초는 지표면에서부터 암반까지 30m 길이로 설치되었고, 말뚝지지 전면기초는 지표면에서 20m 아래까지 설치되었으며, 부유식 말뚝기초는 바닥 슬래브가 지표면에서 1m 떨어져 있다. 얕은 기초와 말뚝기초의 바닥 슬래브는 반경 35.5m, 두께 1.0m인 RC 구조이다. 구조물 및 기초의 재료 물성치는 Table 1과 같고 콘크리트 구조물(RC 및 PSC)의 감쇠비는 5%, 강구조물의

Table 1 Structural properties of the LNG storage tank

Material	Young's modulus (kPa)	Mass density (ton/m ³)	Poisson's ratio	Damping ratio
RC	2.70×10^7	2.50	0.20	0.05
PSC				
Steel	2.00×10^8	7.85	0.30	0.02
LNG	-	0.48	-	0.005

Table 2 Soil properties of the LNG storage tank

Soil	Depth (m)	Shear wave velocity (m/s)	Mass density (ton/m ³)	Poisson's ratio	Damping ratio
Case 1 (Clay)	30	200	1.8	0.45	0.025
Case 2 (Clay)	30	300	1.8	0.45	0.025
Bed rock	-	760	2.6	-	0.01

감쇠비는 2%를 사용하였다. 일반적으로 구축압 등의 효과로 인하여 깊이별로 전단파속도의 변화가 있으나, 정성적인 비교를 위하여 지반조건은 Table 2와 같이 760m/s의 기반암 위에 전단파속도 200m/s(Case 1), 300m/s(Case 2)의 균질한 점토층이 있는 것으로 가정하였다.

지진입력은 기반암노두에서 정의하였고, 입력지진의 강도는 지진구역 I과 재현주기 500년을 적용(PGA=0.11g)하였으며, 설계응답스펙트럼의 형상은 행정안전부 고시 내진설계기준 공통 적용사항을 적용하였다. Fig. 5(a)는 이 연구에서 사용한 설계 가속도응답스펙트럼이다. 이 설계응답스펙트럼으로부터 인공 지진파를 Fig. 5(b)와 같이 작성하였다.

Fig. 5 Input motion at bedrock outcrop(PGA:0.11g)

3.2 자유장해석

Table 2와 같은 전단파속도 200m/s와 300m/s의 균질한 점토지반에 대한 자유장해석을 수행하였다. 이때 토층의 두께는 1.2m로 세분화하여 해석을 수행하였다. 자유장해석은 SHAKE 프로그램을 이용하여 수행하였으며, 점토에 대한 비선형 특성은 Schnabel 등(1991)의 자료를 이용하였다. 등가선형 자유장 해석을 통해 얻은 두 지반조건에 대한 깊이별 등가선형 지반 특성은 Fig. 6과 같다. 이 연구에서는 위와 같이 1차 비선형 거동이 고려된 등가선형 지반특성을 이용하여 SSI 해석을 수행하였다.

Fig. 6 Equivalent linear soil profile

3.3 유체-구조물-지반 상호작용 해석 모델

Fig. 7은 FSSI 해석을 수행하기 위해 작성된 KIESSI 해석 모델이다. 상부 구조인 외조는 헬 요소로 모델링하였고, 내조 탱크와 유체는 보 요소에 유체부가질량이 추가된 집중질량 보 요소로 모델링하였다. 내조탱크는 바닥 슬래브와 강체 보 요소(rigid beam)로 연결되어 있다. 바닥 슬래브와 말뚝은 헬 요소로 표현되었고, 말뚝은 원 형태를 모사하기 위해 팔각형 단면으로 모델링되었다. 그리고 지반은 8-절점 입체요소(solid element)로 모델링되었다. 마지막으로 Fig. 5의 지진입력을 기반암 노두에 수행방향으로 입력하여 지진응답해석을 수행하였다.

3.4 동다짐 효과를 고려한 해석

다수의 말뚝이 지반에 설치될 경우 지반의 밀도 증가로 지반의 전단강도와 전단강성(즉, 전단탄성계수)의 증가를 기대할 수 있다. 말뚝과 말뚝 사이의 동다짐 효과를 고려하기 위해 이 연구에서는 Fig. 8과 같이 동다짐 영역(파란색 음영)을 설정하고,

Fig. 7 KIESSI finite element models for structure and near-field soil of the LNG tank

Fig. 8 Stiffened area due to dynamic compaction in the pile group

이 영역의 전단탄성계수를 증가시켰다. 동다짐에 의한 깊이별 전단파속도 분포($\{V_s^*\}$)는 식 (1)과 같이 등가선형해석으로부터 계산된 전단파속도 분포($\{\bar{V}_s\}$)에 전단파속도 증가비(C)를 곱한 값으로 정의하였다. 이때 전단파속도의 증가비(C)는 5%, 10%, 20%, 30%인 4가지를 고려하였다. 예제해석에 사용된 토층은 전단파속도 200m/s에 대한 깊이별 등가선형 전단파속도 분포 (Fig. 6 참조)를 이용하였다. 그리고 PGA=0.11g인 지진입력에 대한 지진응답해석을 수행하여 동다짐 효과를 분석하였다.

$$\{V_s^*\} = C\{\bar{V}_s\} \quad (1)$$

4. 해석 결과

4.1 전단파속도에 따른 지진응답

내조탱크와 외조의 지진응답 분석에 앞서 KIESSI 해석 모델의 검증을 위해 Fig. 9와 같이 ANSYS 프로그램으로 LNG 저장탱크 모델을 작성하여 고정기초해석을 수행하고 이를 지반의 전단파속도가 5,000m/s인 KIESSI 해석결과와 Fig. 11 및 Fig. 12와 같이 비교하였다. 이때 지진입력은 Fig. 5(b)를 이용하였다. 고정기초조건에 대해 KIESSI와 ANSYS를 비교한 결과, 얇은 기초에서 외조(Fig. 11)의 벽체

셀 응력과 내조(Fig. 12)의 밀면전단력과 전도모멘트의 차이는 2% 이내로 매우 작게 나타났다. 하지만 부유식 말뚝기초에서 외조 벽체 셀의 응력성분에서 16.5%~27.4%의 차이가 발생하였는데, 이는 ANSYS 모델에서는 탱크 바닥이 지표면과 부착된 반면, KIESSI 모델에서는 지표면과 탱크 바닥 사이에

Fig. 9 ANSYS finite element models for structure of the LNG tank

Fig. 10 Definitions of member forces in outer tank shell

1m의 간격이 있기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 11은 외조 벽체에서 쉘 응력성분(Fig. 10 참조)의 최대값 분포이다. 쉘의 수직응력 S_{11} 은 외조의 하단부에서 제일 크며 쉘의 원환응력 S_{22} 는 외조 벽체 최상단에서 제일 크다. 그리고 $\theta=90^\circ$ 위치에서 쉘의 전단응력 S_{12} 는 외조 하단부에서 가장 크다. 쉘의 응력성분들은 고정기초에서 가장 크며 전단파속도가 작아질수록 응답이 감소하였다. 이 같은 경향의 주요 원인은 Fig. 6에 보인바와 같이 전단파속도가 작아질수록 지반의 비선형성이 크게 나타나 등가선형 재료감쇠비가 커지기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 12는 KIESSI 해석 모델에서 얻어진 내조탱크의 밑면 전단력과 전도모멘트를 ANSYS 고정기초 해석결과에 대한 비율로 표현한 그림이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 내조탱크는 지반의 전단파속도가 작은 200m/s의 지반조건에서 외조와 마찬가지로 지진응답이 크게 감소하였다. 하지만 지반의 전단파속도가 300m/s인 경우, 내조탱크의 지진응답은 모든 기초 형식에서 고정기초(암반 지반)해석과 유사하거나 크게 나타났다. 이는 Fig. 13에 도시한 바와 같이 지반의 고유진동수가 구조물의 고유진동수와 근접했을 때 구조물의 응답이 증폭되는 현상으로 판단된다. Fig. 13에서 전단파속도가 300m/s인 자유장지반에서 기반면에 대한 지표면 응답의 전달함수의 첫 번째

Fig. 11 Maximum member force profiles for outer tank according to soil conditions (S_{11} at $\theta=0^\circ$, S_{22} at $\theta=0^\circ$, S_{12} at $\theta=90^\circ$)

Fig. 12 Base shear and overturning moment of inner tank according to soil conditions

Fig. 13 Transfer functions of response at ground surface of free-field soil

최고점(peak)이 내조탱크의 고유진동수와 유사함을 알 수 있다. 따라서 300m/s 지반에서 내조탱크의 응답은 자유장지반의 입력 운동과 동조되어 증폭될 가능성이 크다. 이처럼 SSI 효과를 고려할 경우, 지반의 감쇠효과(재료감쇠 및 방사감쇠)로 인해 구조물의 운동에너지가 소산되어 상부 구조물의 지진응답을 감소시키기도 하지만, 반대로 구조물의 고유진동수가 자유장지반의 고유진동수에 근접할 경우 구조물의 응답의 증폭이 일어날 수 있다.

4.2 기초 형식에 따른 지진응답

이 절에서는 지반의 전단파속도와 기초형식의 변동에 따른 내조탱크와 외조에서 응력의 변화를 분석하였다. 지반과 기초의

강성이 고려된 SSI 해석결과를 SSI가 무시된 고정기초 지진 응답과 비교하였다. 이때 고정기초해석은 ANSYS를 이용하여 수행하였으며, 지진입력으로 Fig. 5(b)의 가속도 시간이력을 자유장지반의 기반암노두에 입력하여 구한 지표면에서의 응답을 사용하였다. 따라서 Fig. 14와 Fig. 15에서 ANSYS 지진 응답은 SSI 효과가 고려되지 않은 응답이다.

Fig. 14는 SSI가 고려된 외조 벽체 쉘의 수직응력(S_{11}), 원환응력(S_{22}), 전단응력(S_{12})을 비교한 그림이다. 지반의 전단파속도가 300m/s일 때, 구조물의 지진응답은 고정기초 응답에 비해 35.5% ~ 41.7% 작은 값을 보였고, 200m/s일 때, 구조물의 지진응답은 29.9% ~ 33.6% 작은 값을 보였다. 또한 4가지 기초형식들 중 지반의 강성이 큰 300m/s의 경우, 부유식 말뚝기초에서 응력이 다른 기초에서 보다 큰 값을 보였다. 특히 전단응력은 얇은 기초 보다 약 18% 컸다. 지반의 전단파속도가 200m/s인 경우, 수직 및 전단응력은 말뚝지지 전면

Fig. 14 Maximum member force profiles for outer tank depending on types of foundation

Fig. 15 Base shear and overturning moment of inner tank depending on types of foundation

기초에서 제일 컸으며 그 크기는 얇은 기초의 약 1.12배였다. 이러한 결과는 전단파속도 150m/s인 지반에서 기초형식에 따른 빌딩구조물의 지진해석을 수행한 Hokmabadi와 Fatahi (2016)의 경향과 유사하였다.

내조탱크의 밀면전단력과 전도모멘트를 전단파속도별로 나타내고, SSI를 무시한 고정기초 응답(ANSYS)에 대한 비율로 표현하여 Fig. 15에 정리하였다. 이 그림에서 알 수 있듯이 내조탱크의 지진응답은 SSI 효과를 고려할 경우 SSI를 무시한 결과보다 작았다. 지반의 전단파속도가 300m/s 일 때, 구조물의 지진응답은 SSI 효과를 고려하지 않은 경우에 비하여 47%~52% 작았고, 지반의 전단파속도가 200m/s 일 때, 구조물의 지진응답은 43%~49% 작은 값을 나타냈다. 또한 4가지 기초형식들 중 지반의 전단파속도가 300m/s인 경우 밀면전단력과 전도모멘트는 얇은 기초에서 최댓값이 발생하지만 그 차이는 각각 5%와 1% 이내로서 거의 차이가 없었다. 지반의 전단파속도가 200m/s인 경우, 얇은 기초에서 구조물의 지진응답이 제일 작고 부유식 말뚝기초에서 가장 컸지만 그 차이는 5% 이내였다.

이처럼 SSI를 고려한 구조물의 지진응답은 SSI를 무시한 경우 보다 작게 나타났다. 그리고 그 크기와 경향은 기초 형식뿐만 아니라 상부 구조물의 동특성에 따라 다르게 나타났다.

4.3 동다짐 효과에 의한 지진응답

이 절에서는 말뚝기초 LNG 저장탱크에서 말뚝기초의 시공

과정에서 발생한 동다짐이 구조물의 지진응답에 미치는 영향을 분석하였다. 지반조건은 SSI 효과가 더 뚜렷이 나타난 초기지반 전단파속도 200m/s인 경우를 고려하였다. 4가지 전단파속도 증가비에 대해 계산된 지진응답과 동다짐을 고려하지 않은 조건(즉, $C=1.00$)에 대한 결과를 비교하였다. 한편 동다짐 영역의 재료감쇠비는 Fig. 6과 동일한 값을 사용하였다.

Fig. 16은 외조 벽체 쉘의 응력 분포를 비교한 그림이다. 이 그림으로 부터 동다짐 효과를 고려한 경우 외조 벽체 쉘에 발생하는 응력은 동다짐 효과를 무시한 경우에 비해 10% 정도 작게 나타남을 알 수 있었다. 동다짐의 영향은 외조 벽체 쉘의 응력들 중에서 전단응력(S_{12})이 가장 크게 나타났으며, 이 같은 경향은 기초형식에 관계없이 관찰되었다. 그리고 동다짐의 영향은 3가지 기초형식들 중 말뚝지지 전면기초(Fig. 16(a))에서 가장 크게 나타났으며, 부유식 선단지지 말뚝기초(Fig. 16(c))에서 가장 작게 나타났다. 이 같은 경향은 동다짐으로 인한 지반강성의 증가가 기초의 회전운동(rocking)을 억제하고 구조물-기초 시스템의 방사감쇠를 증가시키기 때문일 것으로 사료된다.

Fig. 17은 내조탱크의 밀면전단력과 전도모멘트 최대값을 동다짐 효과를 무시한 결과에 대한 비율로 표현한 그림이다.

Fig. 16 Maximum member force profiles of outer tank considering dynamic compaction of soil within pile group

Fig. 17 Base shear and overturning moment of inner tank considering soil compaction in the pile group

이 그림에서 알 수 있듯이 밀면전단력은 말뚝지지 전면기초에서 뚜렷한 차이를 보였다. 그리고 동다짐 효과가 밀면전단력과 전도모멘트에 미치는 크기는 전단강성에 비례하며 그 값은 각각 최대 13%와 6%였다. 하지만 선단지지 말뚝기초(지표면 접촉식, 부유식)인 경우 구조물의 밀면전단력과 전도모멘트는 전단강성에 따라 뚜렷한 변화가 없었다.

따라서 말뚝지지 전면기초 설계 시 말뚝 항타에 의한 주변지반의 동다짐 효과를 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 SSI 효과를 고려한 LNG 저장탱크의 기초 형식(얕은 기초, 말뚝기초(지표면 접촉식, 부유식), 말뚝지지 전면기초)에 따른 지진응답의 차이를 분석하였다. 이를 위하여 국내에 건설된 대표적인 LNG 저장탱크를 예제로 선택하였다. 지반은 기반암 위에 두께 30m인 토층으로 가정하였으며, 지진 입력은 수직으로 입사하는 수평진동 지진파로 가정되었다. SSI 해석은 등가선형 물성치와 진동수영역 해석법을 사용한 KEISSI-3D 프로그램을 사용하였다. 지진응답해석 결과로 점토층의 전단파속도, 기초 형식별 내조탱크의 밀면전단력과 전도모멘트와 외조 벽체 쉘에서 응력(수직, 원환, 전단)을 비교하였다. 그리고 말뚝기초의 동다짐 효과에 의한 내조탱크의 부재력 및 외조 벽체의 쉘 응력도 비교하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) SSI 효과를 고려할 경우 SSI를 무시한 경우보다 외조의 응력은 최대 42%, 내조의 부재력은 최대 57% 작은

것으로 나타났다. 하지만 자유장 지반의 고유진동수와 구조물의 고정기초에 대한 고유진동수가 근접하게 되면 SSI를 고려할 경우에도 구조물의 응답이 증폭되는 경우가 발생하였다. 따라서 LNG 저장탱크의 경제적이고 안전한 내진설계와 내진성능평가를 위해서는 SSI를 고려한 정밀한 동적해석이 필요할 것으로 판단된다.

- (2) 기초 형식에 따른 내조탱크와 외조의 지진응답을 비교한 결과, 내조탱크의 부재력은 부유식 말뚝기초에서 최대가 발생하였고, 외조탱크의 응력은 말뚝지지 전면기초에서 최대가 발생하였다. 이로 부터 기초의 형식에 따라 SSI 효과가 상부 구조물에 미치는 영향이 다를 수 있음을 알 수 있었다.
- (3) 말뚝의 향타로 인한 주변 지반의 동다짐 효과는 말뚝기초 (지표면 접촉식, 부유식)에서는 무시할 수 있을 정도로 작은 반면, 말뚝지지 전면기초 구조물에서는 10% 이상의 차이를 보여 그 영향을 무시할 수 없을 것으로 판단된다. 하지만 동다짐 효과의 영향에 대한 정량적인 평가를 위해서는 실험적 및 수치적인 추가연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제 번호: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.
- ASCE 4-16 (2017) Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary, ASCE.
- ASCE/SEI 7-10 (2010) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE.
- Cho, K.H., Kim, M.K., Lim, Y.M., Cho, S.Y. (2004) Seismic Response of Base-Isolated Liquid Storage Tanks Considering Fluid-Structure-Soil Interaction in Time Domain, *Soil Dyna. & Earthq. Eng.*, 24(11), pp.839~852.
- 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 Int. Conf. Soil Mech. & Geotech. Eng.*.
- Haroun, M.A. (1980) Dynamic Analysis of Liquid Storage Tanks, California Institute of Technology, Report No. EERL 80-04.
- Hokmabadi A.S., Fatahi, B. (2016) Influence of Foundation Type on Seismic Performance of Buildings Considering Soil-Structure Interaction, *Int. J. Struct. Stab. & Dyna.*, 16(8), 1550043.
- Jin, B.M., Jeon, S.J., Kim, S.W., Kim, Y.J., Chung, C.H. (2004) Earthquake Response Analysis of LNG Storage Tank by Axisymmetric Finite Element Model and Comparison to the Results of the Simple Model, *13th World Conf. Earthq. Eng.*, Paper. No.394.
- Kappos, A.J., Sextos, A.G. (2001) Effect of Foundation Type and Compliance on Seismic Response of RC Bridges, *J. Bridge Eng.*, 6(2), 20245.
- 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, *Comput. Struct. Eng.*, 17(3), pp.295~308.
- 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, 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., Son, I.M., Kang, B.R., Yun, C.B., Chung, M.J. (2015) A Simplified Analysis Model for Seismic Analysis of Pile-Supported Cylindrical Liquid Storage Tank Considering Fluid Structure Soil Interaction, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 15(4), pp.203~214.
- Kim, J.M. et al. (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.
- Kramer, S.L.** (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Mlahotra, P.K.** (1997) New Method for Seismic Isolation of Liquid Storage Tanks, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 26(8), pp.839~847.
- 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(14), pp.2301~2316.
- 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.
- Seo, K.Y., Park, H.J., Kim, N.S., Kim, J.M., Yang, S.Y.** (2014) Seismic Design for Application of LNG Storage Tank Isolation System, *KSNVE*, 24(3), pp.227~235.
- Sun, J., Cui, L.** (2015) Seismic Response for Base Isolation of Storage Tanks with Soil-Structure Interaction, *Phys. & Numer. Simul. Geotech. Eng.*, pp.64~68.
- Veletsos, A.S., Tang, Y.** (1990) Soil-Structure Interaction Effects for Laterally Excited Liquid Storage Tanks, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 19(4), pp.473~496.
- Yoo, M.T., Ha, J.G., Jo, S.B., Kim, D.S.** (2014) Evaluation of Seismic Loading of Pile Foundation Structure Considering Soil-Foundation-Structure Interaction, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 18(3), pp.125~132.
- Zhang, R., Weng, D., Ren, X.** (2011) Seismic Analysis of a LNG Storage Tank Isolated by a Multiple Friction Pendulum System, *Earthq. Eng. & Eng. Vib.*, 10(2), pp.253~262.

요 지

이 연구에서는 기초의 종류에 따라 지반-구조물 상호작용(SSI) 효과가 LNG 저장탱크의 지진응답해석에 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 접촉식, 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 응력과 내조탱크의 밀면전단력 및 전도모멘트를 구하였다. 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다: (1) 고정 기초해석에 의한 외조와 내조탱크의 지진응답이 SSI 효과로 인한 지진응답보다 매우 컸다. (2) SSI의 효과가 내조탱크와 외조탱크의 동적응답에 미치는 영향은 기초의 형식에 따라 다르게 나타난다. (3) 말뚝지지 전면기초에서 동다짐 효과에 의한 구조물 응답의 변화는 약 10%로서 무시할 수 없을 정도로 큰 것으로 나타났다.

핵심용어 : LNG 탱크; 지반-구조물 상호작용; 말뚝기초; 말뚝지지 전면기초; 지진해석