유체-구조물-지반 상호작용을 고려한 직사각형 액체저장탱크의 시간영역 지진응답해석

이진호^{1†} · 조정래² · 한성욱³

¹부경대학교 해양공학과 부교수, ²한국건설기술연구원 지진안전연구센터 연구위원, ³한국건설기술연구원 지진안전연구센터 박사후 연구원

Time-Domain Earthquake Response Analysis of Rectangular Liquid Storage Tank Considering Fluid-Structure-Soil Interaction

Jin Ho Lee^{1†}, Jeong-Rae Cho² and Seong-Wook Han³

¹Associate Professor, Department of Ocean Engineering, Pukyong National Univ., Busan, 48513, Korea

²Research Fellow, Seismic Safety Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

³Post-Doctoral Researcher, Seismic Safety Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

Abstract

Since the dynamic behaviors of liquid storage tanks on flexible soil are significantly influenced by the fluid-structure-soil interaction (FSSI), its effects must be rigorously considered for accurate earthquake analysis and seismic design of the storage system. In this study, dynamic analysis is performed for a rectangular liquid storage tank on flexible soil, and its dynamic characteristics are examined by rigorously considering the effects of FSSI. The hydrodynamic force and the interaction force between the structure and soil are evaluated using the finite-element approach. In the evaluations, mid-point integrated finite elements and viscous dampers are considered for energy radiation into the infinite soil. The effective earthquake force is then obtained from free-field analysis. It is thus demonstrated that the earthquake responses of the rectangular liquid storage tank on flexible soil are significantly influenced by the FSSI.

Keywords : rectangular liquid storage tank, fluid-structure interaction, soil-structure interaction, impulsive mode, convective mode

1. 서론

2016년 9·12 지진(규모 5.8), 2017년 포항지진(규모 5.4) 등 국내에서 규모 5이상의 지진이 발생하면서 지진으로 인한 피해가 현실화되고 있다. 특히, 포항 지진 시에는 양덕·유강·약성 등 3개 정수장, 장량·홍해 등 2개 하수처리장, 청하농공단지 폐수처리장 등의 환경시설물에 피해가 발생하였고 45건의 상수관로 누수 피해가 발생하였다. 정수장, 하수처리장 등의 환경시설물은 관리동과 같은 건축구조물, 저수조 또는 액체저장탱크, 관로, 기타 설비 등의 다양한 형식의 구조물로 구성되어 있다. 그러므로 환경시설물의 지진거동을 평가하기 위해서는 다양한 구조물의 동적 특성을 고려하여 지진응답해석을 수행

하여야 한다. 이중 액체저장탱크는 유체-구조물-지반 상호작용에 의해 그 동적 거동이 많은 영향을 받음이 해석적·실험적 연구를 통해 규명되었고, 이러한 현상이 실제 지진 시 관측되기도 하였다. 그러므로 액체저장탱크의 지진거동을 정확히 예측하고 내진설계를 수행하기 위해서는 동해석 시 반드시 유체-구조물-지반 상호작용을 고려하여야 한다.

진원에서 발생한 지진파는 액체저장탱크가 설치된 부지까지 전파되고, 이 지진파는 기초를 통하여 내부액체에 전달되어 이를 유동시키게 된다. 내부액체의 유동은 역으로 구조물의 진동에 영향을 주게 된다. 이러한 현상을 유체-구조물 상호작용이라고 한다. 구조물의 강성이 클 경우에는 구조물이 실제로 강제로 거동하므로 유체-구조물 상호작용을 고려하

[†]Corresponding author:

Tel: +82-51-629-6591; E-mail: jhlee0218@pknu.ac.kr

Received September 28 2020; Revised October 15 2020;

Accepted October 16 2020

© 2020 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.

지 않으나, 그렇지 않을 경우에는 유체-구조물 상호작용이 구조물의 진동 및 유체의 유동에 미치는 영향을 반드시 고려하여야 한다(Kim *et al.*, 1996; Koh *et al.*, 1998; Park *et al.*, 2000; Lee and Lee, 2020).

한편, 구조물이 놓여 있는 지반의 유연성은 구조물 기초의 동특성을 변화시켜 상부 구조물의 동적 거동에 영향을 주게 된다. 영향을 받은 상부 구조물의 동적 거동은 역으로 지반 진동에 영향을 주게 되어, 기초를 통하여 전달된 지진파에 의한 지반운동의 크기와 주파수특성을 변화시키게 된다. 이와 같이 지반과 구조물의 동적 거동이 서로 영향을 주고 받는 현상을 지반-구조물 상호작용이라고 한다. 액체저장탱크와 같이 중량이 큰 구조물이 유연한 지반에 놓인 경우에는 지반-구조물 상호작용의 효과를 무시할 수 없다(Kim *et al.*, 1998a, 1998b; Lee *et al.*, 2016).

이상과 같이 액체저장탱크의 지진 거동은 유체-구조물-지반 상호작용에 의해 복잡하게 나타나므로, 이 시스템의 지진 응답과 피해를 정확하게 예측하기 위해서는 이와 같은 현상을 엄밀히 고려하여야 한다. 이 연구에서는 유체-구조물-지반 상호작용을 엄밀히 고려하여 직사각형 액체저장탱크의 지진 응답 해석을 수행하고 그 응답 특성을 분석하고자 한다. 지진하중 작용 시 발생하는 유체 동수압을 유한요소 기법을 사용하여 산정하고, 이 동수압을 구조물의 유한요소에 작용시킨다. 지반과 구조물 간의 상호작용력을 유한요소 기법을 사용하여 산정한다. 이때, 반무한 지반의 영향을 고려하기 위해 mid-point integrated finite element와 점성 감쇠기(Lysmer and Kuhlemeyer, 1969)를 사용하여 반무한 영역으로의 에너지 방사를 모사한다(Lee, 2018). 이와 같은 수치 모형을 사용하여 액체저장탱크 시스템의 지진응답의 변화 특성을 구조물이 놓인 지반의 전단파 속도를 변화시켜 가며 조사하고자 한다.

Fig. 1 Rectangular liquid storage tank installed in flexible soil

2. 유한요소 정식화

유연한 지반에 놓인 직사각형 액체저장탱크의 운동방정식을 유도한다. Fig. 1에 보인 바와 같이 고려하는 시스템은 탱크 구조물, 저장 액체 및 액체저장탱크를 지지하는 유연한 지반으로 구성된다. 이 시스템에 지진파가 입사하였을 때, 저장 액체는 구조물에 동수압을 작용하고, 지반과 구조물 간에는 상호작용력이 작용한다. 그러므로 구조계의 운동방정식에 지진 지반운동에 의한 유효 지진력, 저장 액체에 의한 동수압력, 지반과의 상호작용력을 외력으로 가하여 전체 시스템의 지배방정식을 유도한다.

구조물과 지반의 근역은 유한요소로, 지반의 원역은 mid-point integrated finite element와 점성 감쇠기를 이용하여 표현할 때, 지진파가 작용하는 지반-액체저장탱크 상호작용계의 운동방정식은 시간영역에서 식 (1)과 같이 표현된다(Lee, 2018).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ii} & \mathbf{M}_{ib} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{bi} & \mathbf{M}_{bb} + \mathbf{M}_{bb}^f & \mathbf{M}_{be}^f \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{eb}^f & \mathbf{M}_{ee}^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}}_i \\ \ddot{\mathbf{U}}_b \\ \ddot{\mathbf{U}}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ii} & \mathbf{C}_{ib} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{bi} & \mathbf{C}_{bb} + \mathbf{C}_{bb}^f & \mathbf{C}_{be}^f \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{eb}^f & \mathbf{C}_{ee}^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_i \\ \dot{\mathbf{U}}_b \\ \dot{\mathbf{U}}_e \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_i^{int}(\mathbf{U}, \dot{\mathbf{U}}) \\ \mathbf{F}_b^{int}(\mathbf{U}, \dot{\mathbf{U}}) \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{bb}^f & \mathbf{K}_{be}^f \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{eb}^f & \mathbf{K}_{ee}^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_i \\ \mathbf{U}_b \\ \mathbf{U}_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_i^{hyd} \\ \mathbf{F}_b^{hyd} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{M}_{bb}^f \ddot{\mathbf{U}}_b^* \\ \mathbf{M}_{eb}^f \ddot{\mathbf{U}}_e^* \\ \mathbf{C}_{bb}^f \dot{\mathbf{U}}_b^* + \mathbf{C}_{eb}^f \dot{\mathbf{U}}_e^* \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{bb}^f \mathbf{U}_b^* \\ \mathbf{K}_{eb}^f \mathbf{U}_e^* \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{F}_b^* \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{M}$ 과 $\mathbf{C}$ 는 각각 일반적인 유한요소에 의해 표현되는 구조물과 지반 근역의 질량과 감쇠 행렬, $\mathbf{F}^{int}(\mathbf{U}, \dot{\mathbf{U}})$ 는 구조물과 지반 근역의 내력 벡터, $\mathbf{M}^f$, $\mathbf{C}^f$, $\mathbf{K}^f$ 는 mid-point integrated finite element와 점성경계에 의해 표현된 지반 원역의 질량, 감쇠, 강성 행렬; $\mathbf{U}(t)$, $\dot{\mathbf{U}}(t)$, $\ddot{\mathbf{U}}(t)$ 는 각각 전체 변위, 속도, 가속도(total displacement, velocity, acceleration) 벡터; $\mathbf{F}^{hyd}(t)$ 는 저장 액체에 의한 동수압력 벡터, 아래첨자 i, b, e 는 각각 구조물과 지반 근역에만 속하는 절점, 지반 근역과 원역의 경계면에 속하는 절점, 지반 원역에만 속하는 절점, $\ddot{\mathbf{U}}_b^*(t)$, $\dot{\mathbf{U}}_b^*(t)$, $\mathbf{U}_b^*(t)$, $\mathbf{F}_b^*(t)$ 는 입사 지진파에 의한 자유장의 응답이다. 자유장 응답은 3장에 설명된 1차원 파전파 해석을 통해 얻을 수 있다.

직사각형 액체저장탱크 시스템의 구조물에 작용하는 저장 액체에 의한 동수압력 $\mathbf{F}^{hyd}$ 은 유한요소 기법을 사용하여 산정할 수 있다. 비점성 비압축성 이상 유체로 가정한 저장 액체의 의한 동수압은 다음과 같다(Cook *et al.*, 2002; Lee and Lee, 2020).

$$\mathbf{G}_{fs} \ddot{\mathbf{P}} + \mathbf{H} \mathbf{P} = \mathbf{Q} \quad (2a)$$

$$\mathbf{G}_{fs} = \frac{1}{g} \int \mathbf{N}^T \mathbf{N} dS \quad (2b)$$

$$\mathbf{H} = \int \mathbf{B}^T \mathbf{B} dV \quad (2c)$$

$$\mathbf{Q} = -\rho_l \int \mathbf{N}^T \boldsymbol{\nu} \mathbf{N}_s dS \quad \ddot{\mathbf{U}} = -\rho_l \mathbf{S} \ddot{\mathbf{U}} \quad (2d)$$

$$\mathbf{B} = \left[\frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} \quad \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial y} \quad \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial z} \right]^T \quad (2e)$$

여기서, $\mathbf{P}$ 는 저장 액체의 동수압력, ρ_l 은 저장 액체의 밀도, $\mathbf{N}$ 과 $\mathbf{N}_s$ 는 각각 저장 액체와 구조물 유한요소의 형상함수, $\boldsymbol{\nu}$ 는 유체 경계면의 외향 단위 법선 벡터, $\ddot{\mathbf{U}}(t)$ 는 구조물의 전체 가속도 벡터, g 는 중력가속도이다. 식 (2d)에서 $\mathbf{S}$ 는 저장 액체와 구조물의 동적 거동을 연계시켜주는 interface element의 거동을 나타내는 행렬이다. 식 (2)로부터 액체저장탱크 구조물에 작용하는 유체의 동수압력을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\mathbf{F}^{hyd} = \int \mathbf{N}_s^T \boldsymbol{\nu}^T \mathbf{N} dS \quad \mathbf{P} = \mathbf{S}^T \mathbf{P} \quad (3)$$

식 (1)~(3)을 결합하여 유연한 지반에 놓은 액체저장탱크의 운동방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ii} & \mathbf{M}_{ib} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{bi} & \mathbf{M}_{bb} + \mathbf{M}_{bb}^f & \mathbf{M}_{be}^f & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{eb}^f & \mathbf{M}_{ee}^f & \mathbf{0} \\ \rho_l \mathbf{S}_i & \rho_l \mathbf{S}_b & \mathbf{0} & \mathbf{G}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{U}}_i \\ \ddot{\mathbf{U}}_b \\ \ddot{\mathbf{U}}_e \\ \ddot{\mathbf{P}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ii} & \mathbf{C}_{ib} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{bi} & \mathbf{C}_{bb} + \mathbf{C}_{bb}^f & \mathbf{C}_{be}^f & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{eb}^f & \mathbf{C}_{ee}^f & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_i \\ \dot{\mathbf{U}}_b \\ \dot{\mathbf{U}}_e \\ \dot{\mathbf{P}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{ii}^{int}(\mathbf{U}, \dot{\mathbf{U}}) \\ \mathbf{F}_{ib}^{int}(\mathbf{U}, \dot{\mathbf{U}}) \\ \mathbf{F}_{ie}^{int}(\mathbf{U}, \dot{\mathbf{U}}) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{S}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{bb}^f & \mathbf{K}_{be}^f & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{eb}^f & \mathbf{K}_{ee}^f & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_i \\ \mathbf{U}_b \\ \mathbf{U}_e \\ \mathbf{P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{ib}^f \ddot{\mathbf{U}}_b^* \\ \mathbf{M}_{eb}^f \ddot{\mathbf{U}}_e^* \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{ib}^f \dot{\mathbf{U}}_b^* \\ \mathbf{C}_{eb}^f \dot{\mathbf{U}}_e^* \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{ib}^f \mathbf{U}_b^* \\ \mathbf{K}_{eb}^f \mathbf{U}_e^* \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{F}_b^* \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)의 해를 구하여 저장 액체 및 유연한 지반과의 유체-구조물-지반 상호작용을 고려한 직사각형 액체저장탱크의 지진 응답해석을 수행할 수 있다.

3. 자유장 해석

식 (4)에 주어진 액체저장탱크 시스템의 운동방정식의 해를 구하기 위해서는 입사 지진파에 대한 자유장 해석을 수행하여 $\ddot{\mathbf{U}}^*(t)$, $\dot{\mathbf{U}}^*(t)$, $\mathbf{U}^*(t)$, $\mathbf{F}^*(t)$ 를 구해야 한다. 여기서는 이 물리량들을 구하기 위한 3축 지진 지반운동에 대한 자유장 해석기법에 대하여 설명하고자 한다.

x 축과 y 축 방향으로 각각 k_x 와 k_y 의 파수(wavenumber)를 가지는 입사 지진파에 대한 지배방정식은 다음과 같다(Barbosa and Kausel, 2012).

$$\begin{aligned} & [k_x^2 \mathbf{A}_{xx} + k_x k_y (\mathbf{A}_{xy} + \mathbf{A}_{yx}) + k_y^2 \mathbf{A}_{yy} \\ & + ik_x \mathbf{B}_x + ik_y \mathbf{B}_y + \mathbf{G} - \omega^2 \mathbf{M}] \mathbf{U}^* = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 행렬 $\mathbf{A}_{xx}$ 등은 수직방향으로 변위가 선형으로 변화한다고 가정한 부록의 요소 행렬로부터 구할 수 있다.

식 (5)로부터 구한 $\mathbf{U}^*$ 로부터 $\mathbf{F}^*$ 를 얻을 수 있다. $x = \pm L_{g,x}$ 와 $y = \pm L_{g,y}$ 에 지반의 근역과 원역의 경계면이 위치할 때, 이 위치에서의 자유장 운동에 의해 발생하는 하중 $\mathbf{F}_x^*$ 와 $\mathbf{F}_y^*$ 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{F}_x^* = \pm (ik_x \mathbf{A}_{xx} + ik_y \mathbf{A}_{xy} - \mathbf{E}_{xz}) \mathbf{U}^* \quad (6a)$$

$$\mathbf{F}_y^* = \pm (ik_x \mathbf{A}_{yx} + ik_y \mathbf{A}_{yy} - \mathbf{E}_{yz}) \mathbf{U}^* \quad (6b)$$

여기서, 행렬 $\mathbf{E}_{xz}$ 와 $\mathbf{E}_{yz}$ 도 부록의 요소 행렬로부터 구할 수 있다.

식 (5)와 (6)의 결과를 푸리에 역변환하여 구한 $\ddot{\mathbf{U}}^*(t)$, $\dot{\mathbf{U}}^*(t)$, $\mathbf{U}^*(t)$, $\mathbf{F}^*(t)$ 를 사용하여 식 (4)의 해를 구하여, 유체-구조물-지반 상호작용을 고려한 직사각형 액체저장탱크의 지진 응답해석을 수행할 수 있다.

4. 적용

상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 유연한 지반에 놓인 직사각형 액체저장탱크의 지진 응답해석을 수행하였다(ABAQUS, 2019). 식 (2)로 표현되는 저장 액체의 acoustic element와 acoustic interface element는 ABAQUS에 구현되어 있지만, Lee와 Lee(2020)에서 보인 바와 같이 ABAQUS의 acoustic element는 정확하지 않다. 그러므로 이 연구에서는 저장 액체의 유한요소와 이를 탱크 구조물과 결합하기 위한 acoustic interface element를 ABAQUS의 사용자 요소로 구현하였다. 또한, 앞에서 설명한 바와 같이 무한 지반 원역으로의 에너지 방사를 나타내기 위해 mid-point integrated finite element (Lee, 2018)를 ABAQUS의 사용자 요소로 구현하고 이를 점성 감쇠기와 함께 사용하였다.

다음의 콘크리트 직사각형 액체저장탱크 시스템의 지진 응답해석을 수행하였다.

콘크리트 밀도 $\rho_s = 2300 \text{ kg/m}^3$

콘크리트 탄성계수 $E_s = 2.0776 \times 10^{10} \text{ Pa}$

콘크리트 Poisson 계수 $\nu_s = 0.17$

탱크 높이 $H_s = 13.7 \text{ m}$

탱크 벽체 두께 $t_s=1.2\text{m}$

저장 액체 밀도 $\rho_l=1000\text{kg/m}^3$

저장 액체 부피 $L_x \times L_y \times H_l=19.6 \times 58.8 \times 11.2\text{m}^3$

지반 밀도 $\rho_g=2000\text{kg/m}^3$

지반 전단파 속도 $V_{g,s}=200\text{m/s}, 500\text{m/s}, 1000\text{m/s}, 2000\text{m/s}$

지반 Poisson 계수 $\nu_g=0.333$

지반 깊이 $H_g=20.364\text{m}$

상기한 바와 같이 지반의 전단파 속도를 변화시키며 대상 시스템의 지진응답 특성의 변화를 조사하였다. 탱크 구조물의 바닥판은 강체로 가정하였다. 또한, 강체 기반암을 고려하여, $\pm x$ 축 및 $\pm y$ 축 방향으로만 에너지 방사가 발생한다고 가정하였다. 이를 모사하기 위해 각각의 방향으로 10@16m 길이의 mid-point integrated finite element와 점성 감쇠기를 사용하였다(Lee, 2018). 입력지반운동으로는 Fig. 2에 보인 수직으로 입사하는 3축 지진 지반운동을 고려하였다.

우선, 58.8m의 장변을 가지는 벽체의 최상단 중앙에서의 변위의 시간이력과 Fast Fourier transform(FFT)의 크기를 Fig. 3에 도시하였다. 이 그림에 도시한 변위는 구조물 바닥판의 수평이동과 회전을 제외한 상대 변위이다. Fig. 3에 보인 변위 시간이력 FFT의 첨두가 발생하는 진동수로부터 대상 시스템의 충격모드 진동수를 Table 1과 같이 식별할 수 있다. 전단파 속도 $V_{g,s}=200\text{m/s}$ 인 지반에 놓인 액체저장탱크의 충격모드 진동수는 유연한 지반의 효과로 인해 강체 지반에 놓인 구조물의

Fig. 2 Time histories of Input ground motions

충격모드 진동수보다 낮아지는 것을 관찰할 수 있다. 또한, 전단파 속도 $V_{g,s}=500\text{m/s}$ 인 지반의 고유진동수는 $V_{g,s} / 4H_g = 6.138\text{Hz}$ 인데, 이로 인해 대상 시스템에서는 5.933Hz에서 추가적인 첨두가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 또한, 지반-구조물 상호작용의 효과로 인해 전단파 속도 $V_{g,s}=200\text{m/s}$ 인 지반에 놓인 탱크의 응답이 크게 증가한 것을 Fig. 3의 시간이력에서 관찰할 수 있다. 반면에 다른 지반에서는 응답의 증폭이 크게 발생하지도 않고 오히려 응답의 감소가 일어나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3에 도시된 변위 응답의 최대값과 최소값이 Table 2에 주어져 있는데, 지반-구조물 상호작용의 효과로 인해 변위 응답이 최대 477% 증가하기도 하지만 역으로 18.5%

(a) Time histories

(b) FFTs of time histories

Fig. 3 Displacements of the tank structure

Table 1 Frequencies of impulsive and convective modes

	$V_{g,s}$	Impulsive mode(Hz)	Convective mode(Hz)	
			1st	2nd
Flexible tank	200m/s	2.502	0.0855	0.195
	500m/s	3.076(1st) 5.933(2nd)		
	1000m/s	3.076		
	2000m/s	3.076		
	Rigid soil	3.064		
Rigid tank		-	0.0844	0.194

감소하기도 하는 것을 관찰할 수 있다. 유사한 응답 특성을 Fig. 4와 5에 보인 탱크 구조물의 단면 모멘트와 구조물의 장변을 가지는 벽체에 작용하는 동수압의 분포에서도 확인할 수 있다. 강체 지반의 지진응답보다 $V_{g,s}=200\text{m/s}$ 의 지반에 놓인 구조물의 응답은 크게 증가하고 $V_{g,s}=2000\text{m/s}$ 의 지반에 놓인 구조물의 응답은 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 특히, 구조물에 작용하는 동수압은 지반의 유연성에 따라 다양한 분포 형상을 가지는 것을 관찰할 수 있다. 이상에서 살펴본 바와 같이 지반-구조물 상호작용의 효과로 인한 시스템 응답의 변화는 다양하게 나타난다. 그러므로 액체저장탱크와 같이 지반-구조물 상호작용의 효과가 중요한 시스템에서는 이를 반드시 고려하여 동해석 또는 지진응답해석을 수행하여야 할 것이다.

저장 액체의 자유 수면에서 $x=9.8\text{m}$, $y=29.4\text{m}$ 인 위치에서

Table 2 Maximum and minimum values of displacements

$V_{g,s}$	Maximum	Minimum
200m/s	0.2213m	-0.2221m
500m/s	0.0824m	-0.0908m
1000m/s	0.0478m	-0.0572m
2000m/s	0.0378m	-0.0494m
Rigid soil	0.0464m	-0.0527m

의 출렁임 높이의 시간이력과 FFT의 크기 및 지반의 전단파 속도 $V_{g,s}=200\text{m/s}$ 일 때 $t=34.14\text{s}$ 에서의 분포를 Fig. 6에 도시하였다. 출렁임 높이 FFT로부터 대상시스템의 대류모드 진동수 0.0855Hz 와 0.195Hz 를 식별하여 이를 Table 1에 정리하였다. 식별된 진동수는 강체 탱크의 대류모드 진동수(Lee and Lee, 2020)와 잘 일치한다. 유연한 탱크의 대류모드 진동수는 지반-구조물 시스템의 충격모드 진동수와 잘 분리되어 있으므로 Fig. 6에 보인 바와 같이 출렁임 높이에 대한 유연한 지반의 효과는 $V_{g,s}=500\text{m/s}$, 1000m/s , 2000m/s 인 경우에는 크지 않음을 관찰할 수 있다. 그러므로 액체저장탱크의 유체 출렁임의 높이를 산정할 때 강체 구조물과 강체 지반을 가정하여 이를 산정하기도 한다(ASCE, 2017; CEN, 2006; NZSEE, 2009). 하지만, $V_{g,s}=200\text{m/s}$ 인 지반의 경우에는 출렁임 높이의 FFT로부터 구조물의 변형과 관련된 2.466Hz 의 성분도 증폭되는 것을 관찰할 수 있다. 이는 유연한 지반으로 인해 충격모드의 진동수가 대류모드의 진동수에 근접하여, 지반-구조물 상호작용의 효과가 출렁임 응답에도 반영되기 때문이다. 즉, 지반의 유연성이 증가하면 충격모드와 대류모드의 연계성이 증가하기 때문에 유연한 지반의 효과를 고려하여 저장 액체의 출렁임 높이 응답을 산정하여야 함을 의미한다.

Fig. 4 Section moments of the tank structure

Fig. 5 Hydrodynamic pressures on the tank structure

지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 직사각형 액체저장탱크의 지진응답 해석기법은 진동수영역에서 이미 개발되기도 하였다(Kim *et al.*, 1998a). 하지만, 진동수영역 해석기법을 사용하여 저장 액체의 출렁임 높이를 산정하는 것은 과도한 계산량을 요구하게 된다. 유체는 감쇠비 0.5% 이하의 아주 작은 감쇠를 가지기 때문에 지진 지반운동이 종료된 후에 출렁임 높이가 완전히 소산되기 위해서는 장시간 동안의 진동하게 된다. 장시간의 응답은 진동수영역 해석에서 아주 작은 진동수 증분을 요구하게 되고, 이로 인해 기존의 진동수영역 해석기법을

을 사용하여 출렁임 높이를 산정하기 위해서는 과도한 계산량이 필요하게 된다. 하지만, 이 연구에서 개발한 시간영역 해석기법은 출렁임 높이 응답이 완전히 소산될 것을 요구하지 않기 때문에 진동수영역 해석기법보다는 적은 시간단계를 필요로 하게 되어 과도한 계산을 수행하지 않아도 되는 이점이 있다.

5. 결 론

액체저장탱크의 지진 거동은 유체-구조물-지반 상호작용에 의해 복잡하게 나타나므로, 이 시스템의 지진응답과 피해를 정확하게 예측하기 위해서는 이 효과를 엄밀히 고려하여야 한다. 이 연구에서는 유체-구조물-지반 상호작용을 엄밀히 고려하여 유연한 지반에 놓인 직사각형 액체저장탱크의 지진응답 해석을 수행하고 그 응답 특성을 분석하였다. 지진하중 작용 시 발생하는 유체 동수압을 유한요소 기법을 사용하여 산정하였다. 반무한 지반에서의 에너지 방사를 mid-point integrated finite element와 점성 감쇠기에 의해 모사하는 유한요소 기법을 사용하여 지반과 구조물 간의 상호작용력을 산정하였다. 이와 같이 산정된 동수압력과 상호작용력을 유체-구조물-지반 상호작용을 엄밀히 고려하여 탱크의 유한요소 모형과 결합하였다. 입사 지진파로 인해 발생하는 유효 지진력을 자유장 해석을 통해 산정하고, 이로부터 유체-구조물-지반 상호작용을 엄밀히 고려하여 유연한 지반에 놓인 액체저장탱크의 지진응답해석을 수행하였다.

개발된 해석기법을 사용하여 지반의 전단파 속도를 변화시켜 가며 액체저장탱크 시스템의 지진응답의 변화 특성을 조사하였고, 다음과 같은 특성을 파악할 수 있었다.

- 1) 지반-구조물 상호작용의 효과로 인해 시스템의 응답이 증가할 수도 있지만, 일부 경우에는 응답의 감소가 일어나기도 한다. 이는 무한 지반에서의 방사 감쇠로 인해 시스템에 입력된 에너지가 소산되기 때문이다. 이와 같이 지반-구조물 상호작용의 효과로 인한 시스템 응답의 변화는 다양하게 나타나므로, 액체저장탱크와 같이 그 효과가 중요한 시스템에서는 이를 반드시 고려하여 동해석 또는 지진응답해석을 수행하여야 할 것이다.
- 2) 일반적으로 대류모드의 고유진동수는 지반-구조물 시스템의 충격모드 진동수와 잘 분리되어 있어 저장 액체의 출렁임 높이에 대한 유연한 지반의 효과는 그리 크지 않다고 가정한다. 하지만, 지반의 유연성으로 인해 충격모드의 진동수가 대류모드의 진동수에 근접하면, 충격모드와 대류모드의 연계성 증가로 인해 지반-구조물 상호작용의 효과를 고려하여 저장 액체의 출렁임 높이를 산정하여야 할 것이다.

(a) Time histories at $x=9.8\text{m}$, $y=29.4\text{m}$

(b) FFTs of time histories at $x=9.8\text{m}$, $y=29.4\text{m}$

(c) Distribution at $t=34.14\text{s}$ when $V_{g,s}=200\text{m/s}$

Fig. 6 Sloshing heights on the stored liquid

이 연구에서는 유체-구조물-지반 상호작용을 엄밀히 고려하여 유연한 지반에 놓인 액체저장탱크 시스템의 선형 지진 응답해석을 시간영역에서 수행하였다. 이 연구의 해석기법을 확장하여 비선형 지진응답해석도 수행이 가능할 것이다(Lee, 2018). 향후 연구에서는 3축 입력지반운동의 방향성 및 비상관성, 구조물 벽체의 비선형 거동, 지반 매립 깊이, 벽체와 지반 경계면에서의 비선형 거동 등이 액체저장탱크 시스템의 지진 거동에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 정밀한 규명이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경시설 재난재해 대응기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2019002850003).

References

- ABAQUS** (2019) *ABAQUS Documentation*, Dassault Systèmes, Providence, RI, USA.
- ASCE** (2017) *Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures, ASCE/SEI 4-16*, America Society of Civil Engineers, Virginia, USA.
- Barbosa, J.M.O., Kausel, E.** (2012) The Thin-Layer Method in a Cross-Anisotropic 3D Space, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 89, pp.537~560.
- CEN** (2006) *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 4: Silos, Tanks and Pipelines*, European Committee for Standardization.
- Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E., Witt, R.J.** (2002) *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 4th Edition, John Wiley & Sons. Inc..
- Kim, J.K., Koh, H.M., Kwahk, I.J.** (1996) Dynamic Response of Rectangular Flexible Fluid Containers, *J. Eng. Mech.*, 122(9), pp.807~817.
- Kim, J.-K., Park, J.-Y., Jin, B.M.** (1998a) The Soil-Structure Interaction in Three Dimensional Rectangular Liquid Storage Tanks, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 18(I-6), pp.775~787.
- Kim, J.-K., Park, J.-Y., Jin, B.M., Joe, Y.H.** (1998b) The Rocking Response of Three Dimensional Rectangular Liquid Storage Tank, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 2(1), pp.23~34.
- Koh, H.M., Kim, J.K., Park, J.-H.** (1998) Fluid-Structure Interaction Analysis of 3-D Rectangular Tanks by a Variationally Coupled BEM-FEM and Comparison with Test Results, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 27, pp.109~124.
- Lee, J.H.** (2018) Practical Numerical Model for Nonlinear Analyses of Wave Propagation and Soil-Structure Interaction in Infinite Poroelectric Media, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 22(7), pp.379~390.
- Lee, J.H., Kim, J.K., Kim, J.H.** (2016) Nonlinear Earthquake Response Analysis of a Soil-Structure Interaction System Subjected to a Three-Dimensional Ground Motion, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 29(4), pp.317~325.
- Lee, J.H., Lee, S.H.** (2020) Characteristics of Earthquake Responses of Rectangular Liquid Storage Tanks Subjected to Bi-directional Horizontal Ground Motions, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 33(1), pp.45~53.
- Lysmer J., Kuhlemeyer, R.L.** (1969) Finite Dynamic model for Infinite Media, *J. Eng. Mech. Div.*, 95(EM4), pp.859~877.
- NZSEE** (2009) *Seismic Design of Storage Tanks*, New Zealand Society of Earthquake Engineering.
- Park, J.-H., Koh, H.M., Kim, J.K.** (2000) Seismic Isolation of Pool-Type Tanks for the Storage of Nuclear Spent Fuel Assemblies, *Nucl. Eng. & Des.*, 199, pp.143~154.

부록. 자유장 해석을 위한 요소 행렬

식 (5)의 행렬을 구성하는 자유장 지반의 j 번째 요소의 행렬은 변위에 대하여 수직방향으로 선형의 형상함수를 가정하면 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{A}_{xx}^{(j)} = \frac{h_j}{6} \begin{bmatrix} 2\mathbf{D}_{xx}^{(j)} & \mathbf{D}_{xx}^{(j)} \\ \mathbf{D}_{xx}^{(j)} & 2\mathbf{D}_{xx}^{(j)} \end{bmatrix} \quad (\text{A1a})$$

$$\mathbf{A}_{xy}^{(j)} = \frac{h_j}{6} \begin{bmatrix} 2\mathbf{D}_{xy}^{(j)} & \mathbf{D}_{xy}^{(j)} \\ \mathbf{D}_{xy}^{(j)} & 2\mathbf{D}_{xy}^{(j)} \end{bmatrix} \quad (\text{A1b})$$

$$\mathbf{A}_{yx}^{(j)} = \frac{h_j}{6} \begin{bmatrix} 2\mathbf{D}_{yx}^{(j)} & \mathbf{D}_{yx}^{(j)} \\ \mathbf{D}_{yx}^{(j)} & 2\mathbf{D}_{yx}^{(j)} \end{bmatrix} \quad (\text{A1c})$$

$$\mathbf{A}_{yy}^{(j)} = \frac{h_j}{6} \begin{bmatrix} 2\mathbf{D}_{yy}^{(j)} & \mathbf{D}_{yy}^{(j)} \\ \mathbf{D}_{yy}^{(j)} & 2\mathbf{D}_{yy}^{(j)} \end{bmatrix} \quad (\text{A1d})$$

$$\mathbf{B}_x^{(j)} = \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} -\mathbf{D}_{xz}^{(j)} & \mathbf{D}_{xz}^{(j)} \\ -\mathbf{D}_{xz}^{(j)} & \mathbf{D}_{xz}^{(j)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\mathbf{D}_{zx}^{(j)} & -\mathbf{D}_{zx}^{(j)} \\ \mathbf{D}_{zx}^{(j)} & \mathbf{D}_{zx}^{(j)} \end{bmatrix} \right) \quad (\text{A2a})$$

$$\mathbf{B}_y^{(j)} = \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} -\mathbf{D}_{yz}^{(j)} & \mathbf{D}_{yz}^{(j)} \\ -\mathbf{D}_{yz}^{(j)} & \mathbf{D}_{yz}^{(j)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\mathbf{D}_{zy}^{(j)} & -\mathbf{D}_{zy}^{(j)} \\ \mathbf{D}_{zy}^{(j)} & \mathbf{D}_{zy}^{(j)} \end{bmatrix} \right) \quad (\text{A2b})$$

$$\mathbf{G}^{(j)} = \frac{1}{h_j} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{zz}^{(j)} & -\mathbf{D}_{zz}^{(j)} \\ -\mathbf{D}_{zz}^{(j)} & \mathbf{D}_{zz}^{(j)} \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

$$\mathbf{M}^{(j)} = \frac{\rho_{g,j} h_j}{6} \begin{bmatrix} 2\mathbf{I} & \mathbf{I} \\ \mathbf{I} & 2\mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (\text{A4})$$

여기서 $\rho_{g,j}$ 와 h_j 는 각각 j 번째 요소의 밀도와 두께이고, $\mathbf{I}$ 는 3×3 단위행렬이다. 위 식의 부행렬(sub-matrix)은 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{D}_{xx}^{(j)} = \begin{bmatrix} \lambda_{g,j} + 2\mu_{g,j} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{g,j} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{g,j} \end{bmatrix} \quad (\text{A5a})$$

$$\mathbf{D}_{xy}^{(j)} = \begin{bmatrix} 0 & \lambda_{g,j} & 0 \\ \mu_{g,j} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A5b})$$

$$\mathbf{D}_{yx}^{(j)} = \begin{bmatrix} 0 & \mu_{g,j} & 0 \\ \lambda_{g,j} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A5c})$$

$$\mathbf{D}_{yy}^{(j)} = \begin{bmatrix} \mu_{g,j} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{g,j} + 2\mu_{g,j} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{g,j} \end{bmatrix} \quad (\text{A5d})$$

$$\mathbf{D}_{xz}^{(j)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \lambda_{g,j} \\ 0 & 0 & 0 \\ \mu_{g,j} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A6a})$$

$$\mathbf{D}_{zx}^{(j)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \mu_{g,j} \\ 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{g,j} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A6b})$$

$$\mathbf{D}_{yz}^{(j)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{g,j} \\ 0 & \mu_{g,j} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A6c})$$

$$\mathbf{D}_{zy}^{(j)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{g,j} \\ 0 & \lambda_{g,j} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A6d})$$

$$\mathbf{D}_{zz}^{(j)} = \begin{bmatrix} \mu_{g,j} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{g,j} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{g,j} + 2\mu_{g,j} \end{bmatrix} \quad (\text{A7})$$

여기서 $\lambda_{g,j}$ 와 $\mu_{g,j}$ 는 j 번째 요소의 Lamé 상수이다.

식 (6)의 행렬 $\mathbf{E}_{xz}$ 와 $\mathbf{E}_{yz}$ 를 구성하는 자유장 지반의 j 번째 요소의 행렬은 변위에 대하여 수직방향으로 선형의 형상함수를 가정하면 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{E}_{xz}^{(j)} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\mathbf{D}_{xz}^{(j)} & \mathbf{D}_{xz}^{(j)} \\ -\mathbf{D}_{xz}^{(j)} & \mathbf{D}_{xz}^{(j)} \end{bmatrix} \quad (\text{A8a})$$

$$\mathbf{E}_{yz}^{(j)} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\mathbf{D}_{yz}^{(j)} & \mathbf{D}_{yz}^{(j)} \\ -\mathbf{D}_{yz}^{(j)} & \mathbf{D}_{yz}^{(j)} \end{bmatrix} \quad (\text{A8b})$$

요 지

유연한 지반에 놓인 액체저장탱크의 지진 거동은 유체-구조물-지반 상호작용에 의해 복잡하게 나타나므로, 이 시스템의 지진응답과 피해를 정확하게 예측하기 위해서는 이를 엄밀히 고려하여야 한다. 이 연구에서는 유체-구조물-지반 상호작용을 엄밀히 고려하여 유연한 지반에 놓인 직사각형 액체저장탱크의 지진응답 해석을 수행하고 그 응답 특성을 분석하고자 한다. 이를 위해 지진하중 작용시 발생하는 유체의 동수압력 및 지반과 구조물 간의 상호작용력을 유한요소 기법을 사용하여 산정한다. 이때, 반무한 지반에서의 에너지 방사를 고려하기 위해 mid-point integrated finite element와 점성 감쇠기를 사용하여 지반 원역의 거동을 모사한다. 이와 같이 산정된 동수압력과 지반-구조물 상호작용력을 구조물의 유한요소에 작용시킨다. 자유장 해석을 통하여 입사 지진파에 의한 유효 지진력을 산정한다. 유연한 지반에 놓인 직사각형 액체저장탱크의 지진응답 해석을 통하여 지반-구조물 상호작용의 효과로 인해 시스템 응답의 변화가 다양하게 나타남을 확인할 수 있다. 그러므로, 유연한 지반에 놓인 직사각형 액체저장탱크의 내진설계를 수행하거나 내진성능을 검토할 때는 유체-구조물-지반 상호작용을 엄밀히 고려하여야 할 것이다.

핵심용어 : 직사각형 액체저장탱크, 유체-구조물 상호작용, 지반-구조물 상호작용, 충격모드, 대류모드