

유체-구조물 상호작용을 고려한 직사각형 액체저장탱크의 단순해석법

Simplified Analysis of Rectangular Liquid Storage Tanks Considering Fluid-Structure Interaction

이진호¹⁾ · 조정래^{2)*}

Lee, Jin Ho¹⁾ · Cho, Jeong-Rae^{2)*}

¹⁾부경대학교 해양공학과 부교수, ²⁾한국건설기술연구원 구조연구본부 연구위원

¹⁾Associate Professor, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, ²⁾Research Fellow, Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

/ A B S T R A C T /

A simplified method for earthquake response analysis of a rectangular liquid storage tank is proposed with fluid-structure interaction considered. In order to simplify the complex three-dimensional structural behavior of a rectangular liquid storage tank, it is assumed that structural deformation does not occur in the plane parallel to the direction in which the earthquake ground motion is applied but in the plane perpendicular to the direction. The structural deformation is approximated by combining the natural modes of the simple beam and the cantilever beam. The hydrodynamic pressure, the structure's mass and stiffness, and the hydrodynamic pressure's added mass are derived by applying the Rayleigh-Ritz method. The natural frequency, structural deformation, pressure, effective mode mass, and effective mode height of the rectangular liquid storage tank are obtained. The structural displacement, hydrodynamic pressure, base shear, and overturning moment are calculated. The seismic response analysis of an example rectangular liquid storage tank is performed using the proposed simplified approach, and its accuracy is verified by comparing the results with the reference solution by the finite element method. Existing seismic design codes based on the hydrodynamic pressure in rigid liquid storage tanks are observed to produce results with significant errors that cannot be ignored.

Key words: Rectangular liquid storage tank, Simplified analysis, Fluid-structure interaction, Impulsive mode, Effective modal mass, Effective modal height

1. 서론

2016년 9·12 지진 (규모 5.8), 2017년 11월 15일 포항지진 (규모 5.4) 등 국내에서 규모 5 이상의 지진 발생 빈도가 증가하며 지진으로 인한 피해가 현실화되고 있다. 특히, 포항지진 시에는 정수장, 하수처리장, 청하농공단지폐수처리장 등의 환경시설물에 피해가 발생하였고, 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 위

해서는 다양한 구조물의 동적 특성을 고려하여 지진응답해석을 수행하여야 한다. 과거 액체저장탱크의 유체-구조물 상호작용(fluid-structure interaction, FSI)이 다양한 해석적·실험적 연구를 통해 규명되었고, 이 현상이 실제 지진 시 관측되기도 하였다. 그러므로, 액체저장탱크의 지진거동을 정확히 예측하고 내진설계를 수행하기 위해서는 동해석 시 반드시 유체-구조물 상호작용을 고려하여야 한다. 이를 위해 다양한 지진응답 해석기법이 개발되어 활용되었고[1], 액체저장탱크의 지진거동 특성을 고려한 내진설계 기법이 개발되어 다양한 내진설계기준에서 활용되고 있다[2-4].

환경시설물에 다양하게 활용되는 직사각형 액체저장탱크의 지진응답 해석기법과 그 거동특성에 대해서도 다양한 연구가 이루어졌다[5-11]. 또한, 직사각형 액체저장탱크의 내진설계를 위한 다양한 기준이 개발되어 사용되고 있는데, 현재의 기준들은 강체 탱크에서 발생하는 동수압을 사용하여 구조물 지진해석과 내진설계를 수행하고 있다[2-4], [14]. 하지만, 기존

*Corresponding author: Cho, Jeong-Rae

E-mail: chojr@kict.re.kr

(Received July 12, 2022; Revised August 4, 2022; Accepted August 4, 2022)

의 다양한 연구에서 확인하였듯이, 액체저장탱크의 지진거동은 유체-구조물 상호작용에 의해 상당한 영향을 받는다. 그러므로, 직사각형 액체저장탱크의 내진설계 시 강체 탱크에서 발생하는 동수압을 사용하여 내진설계를 수행하는 것은 유체-구조물 상호작용에 의한 구조 변형 및 동수압의 증폭 등 대상 시스템의 동적 특성을 충분히 반영하지 못한다.

이에 이 연구에서는 유연한 직사각형 액체저장탱크에서 발생하는 동수압을 사용하여 대상 시스템의 단순모델을 제안하고, 이를 토대로 구조해석과 내진설계를 수행하는 단순해석법을 제안하고자 한다. 단, 직사각형 액체저장탱크의 복잡한 3차원 구조 거동을 완전히 고려하지 않고, 지진지반운동이 작용하는 방향에 수직한 면에서만 구조 변형이 발생하고 평행한 면에서의 변형은 발생하지 않는다고 가정하여 대상 시스템에서 발생하는 동수압을 산정할 것이다[5]. 이때, 단순보와 외팔보의 고유모드를 조합하여 구조물의 변형을 나타내는 Rayleigh-Ritz 방법을 사용할 것이다. 이와 같이 단순화된 시스템에서 산정한 동수압을 사용하여 구조물에 추가적으로 작용하는 부가 질량을 유도하고, Rayleigh-Ritz 방법으로부터 얻어진 구조물의 질량과 강성을 사용하여 대상 시스템의 지배방정식을 구성할 것이다. 이로부터, 직사각형 액체저장탱크의 고유진동수, 변형, 동수압, 유효모드 질량, 유효모드높이 등을 유도하고, 제곱합제곱근(square-root of sum of squares, SRSS)법을 사용하여 구조 변위, 바닥전단력, 전도모멘트 등 다양한 지진응답을 산정할 것이다. 제안한 단순해석법을 활용하여 예제 직사각형 액체저장탱크의 지진응답해석을 수행하고, 유한요소법을 사용한 정밀해석법과 비교하여 그 정확성을 검증하고자 한다. 또한, 강체 액체저장탱크에서 발생하는 동수압에 근거한 기존 내진설계기준의 방법을 적용하고, 기존 내진설계기준의 한계를 살펴보고자 한다.

2. 직사각형 액체저장탱크의 단순해석법

이 연구에서는 Fig. 1에 보인 유연한 직사각형 액체저장탱크의 단순해석법을 제안하고자 한다. 대상 탱크 구조물은 x축과 y축 방향으로의 길이가 각각 $2L_x$ 와 $2L_y$, 높이는 H_s , 두께가 t_s 이고, 저장된 액체의 깊이는 H_l 이다. 지반운동 $\ddot{u}_g(t)$ 은 x축 방향으로만 작용하고, 구조물의 거동은 선형으로 가

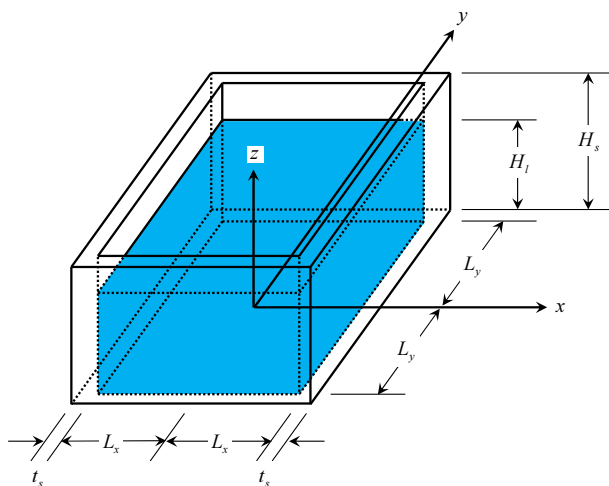


Fig. 1. Rectangular liquid storage tank

정한다. y축 방향으로 작용하는 수평지반운동의 영향은 동일한 방법으로 고려할 수 있고, z축 방향으로 작용하는 수직지반운동은 수평지반운동에 비하여 그 영향이 크지 않으므로[11] 이 연구에서는 무시한다. 일축지반운동이 작용하는 x축에 수직한 면의 지배방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$D\nabla^4 w + t_s \rho_s \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -t_s \rho_s \ddot{u}_g(t) + p(y, z, t) \quad (1)$$

여기서 w 는 x축에 수직한 면의 구조 변형 또는 횡방향 변위, $D = E t_s^3 / 12(1 - \nu^2)$, E 와 ν 는 각각 구조물의 밀도와 포아송비, ρ_s 는 구조물의 밀도, p 는 x축에 수직한 면에 작용하는 저장액체의 동수압, $\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial y^2 \partial z^2} + \frac{\partial^4}{\partial z^4}$ 은 bi-Laplacian 연산자이다. y축에 수직한 면의 지배방정식도 식 (1)과 유사한 형태로 주어진다.

비점성 이상유체로 가정하여 저장액체의 지배방정식을 얻을 수 있는데, 이 방정식은 Laplace 방정식의 형태로 주어진다. 탱크 구조물의 변형 w 를 고려하여 저장액체 지배방정식의 해를 얻을 수 있고, 이로부터 x축에 수직한 면에 작용하는 동수압 p 를 산정할 수 있다[5].

$$p(y, z, t) = -\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{2\rho_l \tanh(\xi_j L_x)}{\xi_j H_l \bar{L}_y} \cos(\eta_i y) \cos(\zeta_j z) \times \left[\frac{4L_y H_l \delta_{i0} (-1)^j}{(2j+1)\pi} \ddot{u}_g(t) + \int_0^{H_l} \int_{-L_y}^{L_y} \ddot{w}(y, z, t) \cos(\eta_i y) \cos(\zeta_j z) dy dz \right] \quad (2a)$$

$$\xi_{ij} = \sqrt{\eta_i^2 + \zeta_j^2} \quad (2b)$$

$$\eta_i = \frac{\pi}{L_y} i \quad (2c)$$

$$\zeta_j = \frac{(2j+1)\pi}{2H_l} \quad (2d)$$

$$\bar{L}_y = (1 + \delta_{i0}) L_y \quad (2e)$$

여기서 ρ_l 은 저장액체의 밀도, δ_{ij} 는 Kronecker delta이다.

식 (2)의 동수압을 사용하여 구조물의 지배방정식 (1)의 해, 즉 구조 변형 w 를 구할 수 있다. 이를 위해 구조 변형을 근사할 수 있는데, 이 연구에서는 Rayleigh-Ritz 방법을 적용하여 근사해를 구할 것이다. 이때, w 는 수평과 수직방향으로 각각 단순보 및 외팔보의 변형과 같은 형태로 발생한다고 가정할 것이다.

$$w(y, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} w_m(y, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \psi_y^m(y) \psi_z(z) \alpha_m(t) \quad (3a)$$

$$w_m(y, z, t) = \psi_y^m(y) \psi_z(z) \alpha_m(t) \quad (3b)$$

$$\psi_y^m(y) = \cos \frac{(2m-1)\pi y}{2L_y} \quad (3c)$$

$$\psi_z(z) = \cosh(\beta z) - \cos(\beta z) - \frac{\cosh(\beta H_s) - \cos(\beta H_s)}{\sinh(\beta H_s) + \sin(\beta H_s)} [\sinh(\beta z) - \sin(\beta z)] \quad (3d)$$

여기서 $\psi_y^m(y)$ 은 단순보의 m 번째 대칭 고유모드, $\psi_z(z)$ 은 $\beta H_s = 1.8751$ 를 만족하는 외팔보의 기본모드[15], $\alpha_m(t)$ 는 결정해야 하는 m 번째 모드의 일반화된 좌표이다. y 축에 수직인 면에서도 식(3)과 유사한 형태의 구조 변형이 발생한다고 가정할 수 있다.

식(3)의 유연 구조물의 모드별 응답을 고려하여 지배방정식(1)에 대해 Rayleigh-Ritz 방법을 적용하면, 식(4)와 같이 모드별 연계된 운동방정식을 얻을 수 있다.

$m = 1, 2, \dots, \infty$ 에 대하여

$$M_{mm} \ddot{\alpha}_m(t) + \sum_{p=1}^{\infty} M_{mp}^A \ddot{\alpha}_p(t) + \sum_{p=1}^{\infty} C_{mp} \dot{\alpha}_p(t) + \sum_{p=1}^{\infty} K_{mp} \alpha_p(t) = -L_m \ddot{u}_g(t) \quad (4a)$$

$$M_{mm} = t_s \rho_s \int_{-L_y}^{L_y} (\psi_y^m)^2 dy \int_0^{H_s} (\psi_z)^2 dz \quad (4b)$$

$$M_{mp}^A = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \left[\frac{2\rho_l \tanh(\xi_j L_x)}{\xi_j H_i L_y} \int_{-L_y}^{L_y} \psi_y^m \cos(\eta_i y) dy \int_{-L_y}^{L_y} \psi_y^p \cos(\eta_j y) dy \left\{ \int_0^{H_s} \psi_z \cos(\zeta_j z) dz \right\}^2 \right] \quad (4c)$$

$$\begin{aligned} K_{mp} = & \delta_{mp} D \left[\int_{-L_y}^{L_y} \frac{d^2 \psi_y^m}{dy^2} \frac{d^2 \psi_y^p}{dy^2} dy \int_0^{H_s} (\psi_z)^2 dz + \int_{-L_y}^{L_y} \psi_y^m \psi_y^p dy \int_0^{H_s} \left(\frac{d^2 \psi_z}{dz^2} \right)^2 dz \right] \\ & + \nu D \left[\int_{-L_y}^{L_y} \frac{d^2 \psi_y^m}{dy^2} \psi_y^p dy \int_0^{H_s} \psi_z \frac{d^2 \psi_z}{dz^2} dz + \int_{-L_y}^{L_y} \psi_y^m \frac{d^2 \psi_y^p}{dy^2} dy \int_0^{H_s} \frac{d^2 \psi_z}{dz^2} \psi_z dz \right] \\ & + 2(1-\nu) D \int_{-L_y}^{L_y} \frac{d\psi_y^m}{dy} \frac{d\psi_y^p}{dy} dy \int_0^{H_s} \left(\frac{d\psi_z}{dz} \right)^2 dz \end{aligned} \quad (4d)$$

$$L_m = t_s \rho_s \int_{-L_y}^{L_y} \psi_y^m dy \int_0^{H_s} \psi_z dz + \sum_{j=0}^{\infty} \frac{4(-1)^j \rho_l \tanh(\zeta_j L_x)}{(2j+1)\pi \zeta_j} \int_{-L_y}^{L_y} \psi_y^m dy \int_0^{H_s} \psi_z \cos(\zeta_j z) dz \quad (4e)$$

여기서, C_{mp} 는 구조물의 감쇠를 고려하기 위한 감쇠계수 행렬이다. 식(4)의 운동방정식을 살펴보면, Rayleigh-Ritz 방법에 사용한 모드 m 과 모드 p 가 연계되어 있음을 알 수 있다. 이 연구에서는 연계항의 효과가 작다고 가정하여 식(5)와 같이 모드별 독립적인 운동방정식의 해를 구할 것이다.

$m = 1, 2, \dots, \infty$ 에 대하여

$$(M_{mm} + M_{mm}^A) \ddot{\alpha}_m(t) + C_{mm} \dot{\alpha}_m(t) + K_{mm} \alpha_m(t) = -L_m \ddot{u}_g(t) \quad (5a)$$

또는

$$\ddot{\alpha}_m(t) + 2\zeta \omega_m \dot{\alpha}_m(t) + \omega_m^2 \alpha_m(t) = -\Gamma_m \ddot{u}_g(t) \quad (5b)$$

여기서 $\omega_m = \sqrt{\frac{K_{mm}}{M_{mm} + M_{mm}^A}}$ 은 모드 m 의 고유진동수, ζ 는 구조물의 감쇠

비, $\Gamma_m = \frac{L_m}{M_{mm} + M_{mm}^A}$ 는 모드참여계수이다.

식(5)로부터 일반화된 좌표 $\alpha_m(t)$ 를 구할 수 있고, 이로부터 탱크 구조물의 변형 응답 w 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$w(y, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} w_m^{st}(y, z) A_m(t) \quad (6a)$$

$$w_m^{st}(y, z) = \frac{\Gamma_m}{\omega_m^2} \psi_y^m(y) \psi_z(z) \quad (6b)$$

여기서 $A_m(t) = \omega_m^2 D_m(t)$, $D_m(t)$ 는 식(7)로부터 얻을 수 있는 고유진동수가 ω_m 인 단자유도 시스템의 변위응답이다.

$$\ddot{D}_m(t) + 2\zeta \omega_m \dot{D}_m(t) + \omega_m^2 D_m(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (7)$$

식(6)의 구조 변형에 의해 액체저장탱크에서 작용하는 동수압 p 는 식(8)과 같다[5].

$$\begin{aligned} p(y, z, t) = & -\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{2\rho_l \tanh(\xi_j L_x)}{\xi_j H_i L_y} \cos(\eta_i y) \cos(\zeta_j z) \\ & \times \left[\frac{4L_y H_i \delta_{i0} (-1)^j}{(2j+1)\pi} \ddot{u}_g(t) + \int_0^{H_i} \int_{-L_y}^{L_y} \ddot{w}(y, z, t) \cos(\eta_i y) \cos(\zeta_j z) dy dz \right] \\ = & p_0^{st}(z) \ddot{u}_g(t) + \sum_{m=1}^{\infty} p_m^{st}(y, z) \ddot{D}_m(t) \end{aligned} \quad (8a)$$

$$p_0^{st}(z) = -\sum_{j=0}^{\infty} \frac{4(-1)^j \rho_l \tanh(\zeta_j L_x)}{(2j+1)\pi \zeta_j} \cos(\zeta_j z) \quad (8b)$$

$$\begin{aligned} p_m^{st}(y, z) = & -\Gamma_m \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{2\rho_l \tanh(\xi_j L_x)}{\xi_j H_i L_y} \cos(\eta_i y) \cos(\zeta_j z) \\ & \times \int_{-L_y}^{L_y} \psi_y^m \cos(\eta_i y) dy \int_0^{H_i} \psi_z \cos(\zeta_j z) dz \end{aligned} \quad (8c)$$

식 (6)의 구조 변형에 의해 발생하는 구조물의 바닥전단력과 전도모멘트는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$V_b(t) = \sum_{m=1}^{\infty} V_{b,m}^{st} A_m(t) \tag{9a}$$

$$V_{b,m}^{st} = 2\Gamma_m L_m = M_m^* \tag{9b}$$

$$M_b(t) = \sum_{m=1}^{\infty} M_{b,m}^{st} A_m(t) \tag{10a}$$

$$M_{b,m}^{st} = 2\Gamma_m I_m^\theta = M_m^* h_m^* \tag{10b}$$

$$I_m^\theta = t_s \rho_s \int_{-L_y}^{L_y} \psi_y^m dy \int_0^{H_s} z \psi_z dz + \sum_{j=0}^m \frac{4\rho_l (-1)^j \tanh(\zeta_j L_x)}{(2j+1)\pi\zeta_j} \int_{-L_x}^{L_x} \psi_x^m dx \int_0^{H_l} z \psi_z \cos(\zeta_j z) dz \tag{10c}$$

여기서 M_m^* 와 $h_m^* = L_m^\theta / L_m$ 는 각각 모드 m의 유효모드질량(effective modal mass)과 유효모드높이(effective modal height)이다. 즉, 모드 m은 질량의 크기는 M_m^* , 고유진동수는 ω_m^* , 그 작용 위치는 h_m^* 인 단자유도 구조물로 치환할 수 있다.

식 (6), (8)~(10)을 사용하여 직사각형 액체저장탱크 응답의 시간이력을 얻을 수 있다. 하지만, 구조물의 설계 시 관심있는 물리량은 시간이력이 아닌 응답의 최고값이다. 그러므로, 응답이력해석법에 의해 응답의 시간이력을 얻는 것보다는 응답스펙트럼해석법에 의해 응답의 최고값을 얻는 것이 실용적으로 더 필요하다. 식 (6), (8)~(10)으로부터 각 응답의 최고값을 SRSS법에 의해 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$w(y, z) = \left[\sum_{m=1}^{\infty} \left(w_m^{st}(y, z) A_m \right)^2 \right]^{1/2} \tag{11a}$$

$$p(y, z, t) = \left[\left(p_0^{st}(z) \ddot{u}_{g0} \right)^2 + \sum_{m=1}^{\infty} \left(p_m^{st}(y, z) \ddot{D}_m \right)^2 \right]^{1/2} \tag{11b}$$

$$V_b = \left[\sum_{m=1}^{\infty} \left(M_m^* A_m \right)^2 \right]^{1/2} \tag{11c}$$

$$M_b = \left[\sum_{m=1}^{\infty} \left(M_m^* h_m^* A_m \right)^2 \right]^{1/2} \tag{11d}$$

여기서 A_m 은 모드 m의 유사가속도 최고값, \ddot{D}_m 은 모드 m의 상대가속도 최고값, \ddot{u}_{g0} 은 입력지반가속도의 최고값이다. 식 (11)로부터 직사각형 액

체저장탱크의 구조 설계에 필요한 최고 변형, 최고 동수압, 최고 바닥전단력 및 최고 전도모멘트를 얻을 수 있다.

식 (11c)와 (11d)는 동수압의 충격성분과 구조물의 관성에 의해 발생하는 바닥전단력과 전도모멘트이다. 동수압의 대류성분과 조합된 전체 바닥전단력 및 전도모멘트 응답을 다음과 같이 얻을 수 있다[12].

$$V_b = \left[\sum_{m=1}^{\infty} \left(M_m^* A_m \right)^2 + \sum_{j=1}^{\infty} \left(m_{c,j} A_{c,j} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{12a}$$

$$M_b = \left[\sum_{m=1}^{\infty} \left(M_m^* h_m^* A_m \right)^2 + \sum_{j=1}^{\infty} \left(m_{c,j} h_{c,j} A_{c,j} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{12b}$$

$$m_{c,j} = m_l \frac{2L_x}{\lambda_j^3 H_l} \tanh \left(\lambda_j \frac{H_l}{L_x} \right) \tag{12c}$$

$$h_{c,j} = \frac{L_x}{\lambda_j} \left[\operatorname{cosech} \left(\lambda_j \frac{H_l}{L_x} \right) - \coth \left(\lambda_j \frac{H_l}{L_x} \right) \right] + H_l \tag{12d}$$

여기서, $m_l = 4\rho_l L_x L_y H_l$ 은 저장된 액체의 총 질량, $A_{c,j}$ 는 대류모드의 고유

$$\text{진동수 } \omega_{c,j} = \sqrt{\frac{g\lambda_j}{L_x} \tanh \left(\lambda_j \frac{H_l}{L_x} \right)} \text{에 대응하는 유사가속도, } \lambda_j = \frac{(2j+1)\pi}{2},$$

g 는 중력가속도이다.

일축 수평지반운동 $\ddot{u}_g(t)$ 이 작용하는 직사각형 액체저장탱크에 작용하는 바닥전단력과 전도모멘트는 식 (12)를 사용하여 산정할 수 있고, 이 결과를 사용하여 대상 시스템의 내진설계를 수행할 수 있다.

3. 적용 예제

제안된 단순해석법을 사용하여 예제 직사각형 액체저장탱크의 지진 응답을 산정하고자 한다. 예제 시스템의 제원과 물성치는 다음과 같다.

$$2L_x = 60 \text{ m}$$

$$2L_y = 20 \text{ m}$$

$$H_l = 10 \text{ m}$$

$$\rho_l = 1,000 \text{ kg/m}^3$$

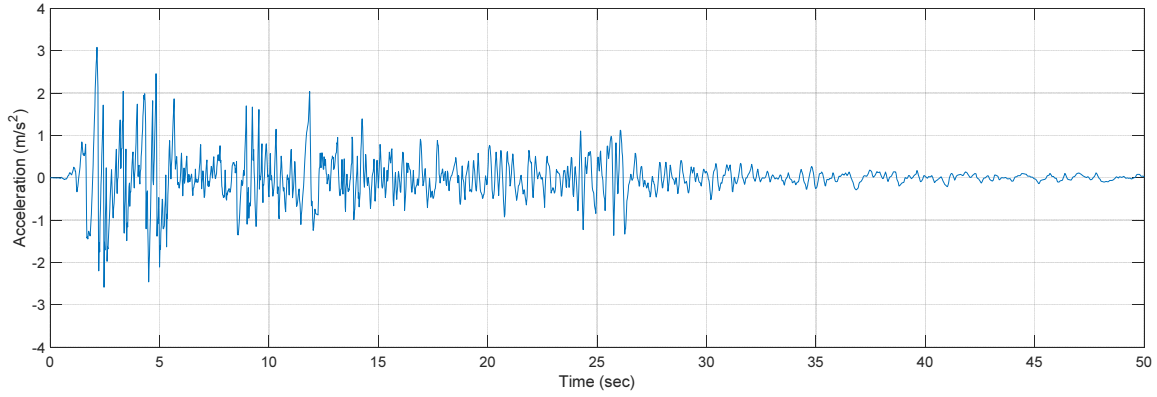
$$H_s = 10 \text{ m}$$

$$t_s = 1 \text{ m}$$

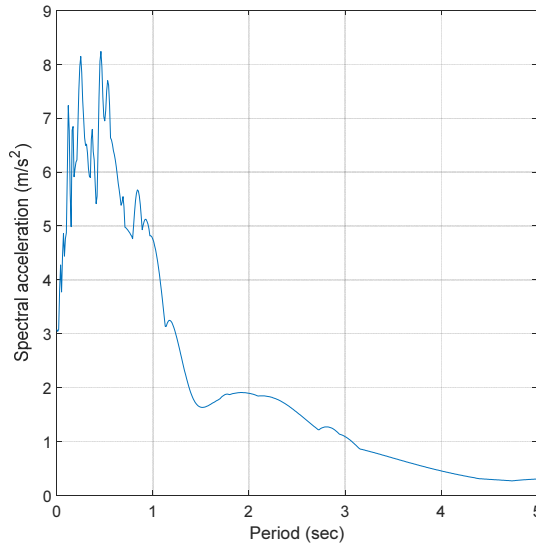
$$E_s = 2.0776 \times 10^{10} \text{ Pa}$$

$$\nu_s = 0.17$$

$$\rho_s = 2,300 \text{ kg/m}^3$$



(a) Time history



(b) Response spectrum

Fig. 2. Input ground motion

Table 1. Natural frequencies, effective modal masses, effective modal heights, and peak pseudo-accelerations for impulsive modes

m	ω_m (rad/s)	M_m^* (kg)	h_m^* (m)	A_m (m/s ²)
1	23.845	2.3088×10^6	6.6865	8.5056
2	38.995	2.7006×10^5	6.6865	7.8692
3	69.771	1.0382×10^5	6.6865	4.7925

탱크 구조물의 감쇠는 5% Rayleigh 감쇠를 사용하여 구성한다. 이때 유효요소법[9, 10]으로 산정된 빈 탱크의 1차 및 2차 고유진동수 5.3345 Hz와 8.2397 Hz를 사용하여 Rayleigh 감쇠행렬을 구성한다. 입력지반운동은 Fig. 2의 1940년 El Centro 지진 지반운동의 남북성분을 사용한다.

예제 직사각형 액체저장탱크에 대해 제안된 단순해석법을 적용하여 지진응답을 산정한다. $m = 1, 2, 3$ 에 대한 고유진동수 ω_m , 유효모드질량 M_m^* , 유효모드높이 h_m^* , 유사가속도 최고값 A_m 은 Table 1과 같다. 대류모드는 $j = 1$ 의 1차모드만 고려한다. 대류모드의 고유진동수 $\omega_{c,1}$, 질량 $m_{c,1}$, 높이 $h_{c,1}$, 유사가속도 최고값 $A_{c,1}$ 는 다음과 같다.

$$\omega_{c,1} = 2.1499 \text{ rad/s}$$

$$m_{c,1} = 1.1465 \times 10^5 \text{ kg}$$

$$h_{c,1} = 7.9157 \text{ m}$$

$$A_{c,1} = 2.3297 \text{ m/s}^2$$

이상의 결과로부터 예제 액체저장탱크의 바닥전단력과 전도모멘트를 Table 2와 같이 계산할 수 있다. 또한, 이 연구에서 제안한 방법으로 계산한 기본진동수 ω_1 , 최고 변위, 최고 동수압, 동수압에 의한 합력과 합모멘트도 Table 2에 제시되어 있고, x축에 수직인 면 중심선에서 최고 변위와 동수압이 발생할 때의 변위와 동수압 분포가 Fig. 3에 도시되어 있다.

제안된 단순해석법의 검증을 위해 예제 액체저장탱크의 지진응답을 유효요소법에 기반한 정밀해석법[9, 10]을 사용하여 계산하고, 이 결과를

Table 2. Earthquake responses and relative errors of the example tank

(1) Earthquake responses

	ω_1 (rad/s)	Displacement (m)	Pressure (kPa)	Pressure resultant force (MN)	Pressure resultant moment (Mn-m)	Base shear (MN)	Overturning moment (Mn-m)	
Finite-element analysis	23.930	0.0399	44.200	28.000	136.80	40.000	216.00	
This study	$m = 1$	24.178	0.0389	47.197	32.311	153.50	40.011	266.73
	$m = 1, 2$		0.0392	48.197	32.383	153.89	40.218	268.11
	$m = 1, 2, 3$		0.0392	48.287	32.386	153.91	40.230	268.19
ACI	-	-	-	56.261	210.98	68.192	270.64	

(2) Relative errors (%)

	ω_1	Displacement	Pressure	Pressure resultant force	Pressure resultant moment	Base shear	Overturning moment	
This study	$m = 1$	1.0	-2.4	6.8	15.4	12.2	0.0	23.5
	$m = 1, 2$		-1.8	9.0	15.7	12.5	0.5	24.1
	$m = 1, 2, 3$		-1.7	9.2	15.7	12.5	0.6	24.2
ACI	-	-	-	100.9	54.2	70.5	25.3	

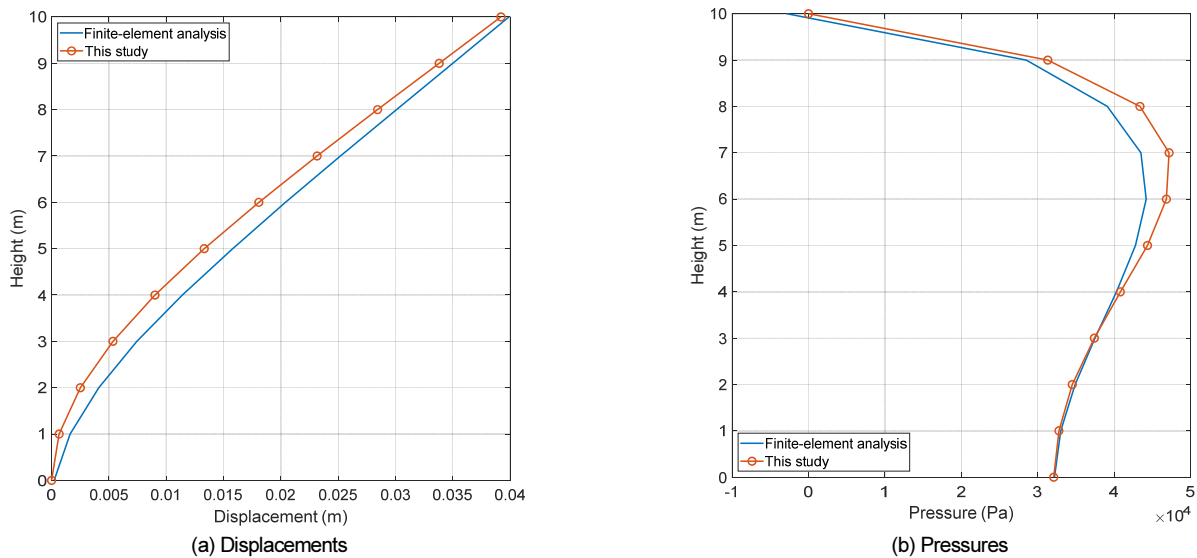


Fig. 3. Displacements and hydrodynamic pressures of the example tank

Table 2와 Fig. 3에 함께 제시하였다. 유한요소 해석의 결과를 기준으로 산정한 단순해석 결과의 상대오차도 Table 2(b)에 수록되어 있다. 유한요소 해석으로부터 얻은 참조해와 비교하여, 이 연구에서 제안한 단순해석법을 사용하여 충분히 정확한 지진응답해석 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 고려하는 모드를 추가함에 따라 일부 결과의 정확성이 향상되지만, 전반적으로 해석 결과가 크게 향상되지는 않는 것을 관찰할 수 있다. 즉, $m = 1$ 인 경우, 기본모드만 사용하더라도 이 연구에서 제안한 단순해석법은 충분히 정확한 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

ACI 350.3-06 표준에서는 직사각형과 원통형 액체저장탱크의 내진설계 과정을 제시하고 있다[2]. 이를 위해 지진하중이 작용할 때 액체저장탱크에서 발생하는 바닥전단력과 전도모멘트를 질량-스프링 모델을 사용하여 산정한다. 즉, 액체저장탱크의 지진응답을 산정하기 위한 충격모드와 대류모드의 질량과 그 작용위치에 대한 간편식을 제안하고 있다. 예제 액체저

장탱크에 대한 충격모드의 질량과 그 작용위치는 다음과 같이 계산된다.

$$m_i = 0.542m_t = 6.5078 \times 10^6 \text{ kg}$$

$$h_i = 0.375H_t = 3.75 \text{ m}$$

ACI 표준에서는 대류모드의 질량과 그 작용위치에 대한 단순식을 제안하고 있지만, 이 예제에서는 식 (12c)와 (12d)를 사용할 것이다.

이 예제에서 다루고 있는 직사각형 액체저장탱크의 지진응답을 ACI 350.3-06 표준에 근거하여 산정하고자 한다. 충격모드의 유사가속도를 결정할 때, 유체-구조물 상호작용의 효과를 고려한 시스템의 고유진동수를 사용하여 결정하도록 ACI 표준은 규정하고 있다. 이러한 방법에 의해 산정한 결과가 Table 2에 수록되어 있는데, 이 방법에 의한 결과는 유한요소 해석

의 결과와 큰 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이는 ACI 표준의 단순 모델은 강제 탱크에서 발생하는 동수압에 근거하고 있기 때문이다.

Eurocode 8과 뉴질랜드에서 사용하고 있는 내진설계기준에서도 직사각형 액체저장탱크의 지진응답을 산정하기 위한 단순해석법을 제안하고 있다[3, 4]. 이 기준들에서도 강제 탱크에서 발생하는 동수압에 근거하여 충격모드 질량과 그 작용위치를 산정하고 있고, 예제 액체저장탱크에 대한 충격모드 질량과 그 작용위치는 각각 $m_i = 0.548m_i$ 와 $h_i = 0.404H_i$ 로 산정된다[13]. 이 값들은 ACI 표준에 근거하여 산정된 값들과 크게 차이가 없으므로, 최종적으로 계산되는 바닥전단력과 전도모멘트도 크게 차이가 없다. 그러므로, 강제 액체저장탱크에서 발생하는 동수압에 근거한 단순모델을 제안하고 있는 현재의 내진설계기준들을 사용하여 직사각형 액체저장탱크의 지진응답을 산정하는 경우에는 특별한 주의가 필요함을 이 예제를 통해 확인할 수 있다.

4. 결론

이 연구에서는 유연한 직사각형 액체저장탱크의 지진응답을 산정하기 위한 단순해석법을 제안하였다. 직사각형 액체저장탱크의 복잡한 3차원 구조 거동을 단순화하여, 지진지반운동이 작용하는 방향에 수직인 면에서만 구조 변형이 발생하고 평행한 면에서의 변형은 발생하지 않는다고 가정한 후 대상 시스템에서 발생하는 동수압을 산정하였다. 이때, 단순보와 외팔보의 고유모드를 조합하여 구조물의 변형을 근사하고, Rayleigh-Ritz 방법을 적용하여 구조물의 질량과 강성 및 동수압에 의해 구조물에 추가적으로 작용하는 부가 질량을 유도하였다. 이와 같이 구성된 근사 모델로부터 직사각형 액체저장탱크의 고유진동수, 구조 변형, 동수압, 유효모드 질량, 유효모드 높이 등을 유도하고, SRSS법을 사용하여 구조 변위, 동수압, 바닥전단력, 전도모멘트 등 다양한 지진응답을 산정하였다.

제안된 단순해석법을 활용하여 예제 직사각형 액체저장탱크의 지진응답 해석을 수행하고, 유한요소법을 사용한 정밀해석법과 비교하여 그 정확성을 검증하였다. 또한, 강제 액체저장탱크에서 발생하는 동수압에 근거한 기존 내진설계기준의 방법은 무시할 수 없는 상당한 오차를 보인다는 것을 확인하였다. 그러므로, 기존 내진설계기준의 방법을 적용할 때에는 이러한 점에 주의하여야 할 것이다.

이 연구에서는 직사각형 액체저장탱크의 면 중에서 지진지반운동과 평행한 면에서의 변형은 발생하지 않고, 수직인 면에서만 구조 변형이 발생한다고 가정하였다. 향후 연구에서는 평행한 면에서의 변형도 고려하여 동수압을 산정해야 할 것이다. 또한, 지반-구조물 상호작용은 액체저장탱크의 동적 거동에 상당한 영향을 끼치므로, 구조물 바닥면의 rocking 거동 등에 의한 영향을 고려할 수 있는 단순해석법의 개발이 필요할 것이다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 환경부 재원으로 환경시설 재난재해 대응기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다. 이에 감사드립니다(2022002850001).

/ REFERENCES /

1. Kim SE, Choi DH, Lee DW. State of the Art Review on Behavior of Liquid Storage Tanks Subjected to Earthquake Load. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. 2000;20(4A):607-619.
2. American Concrete Institute. *Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary (ACI 350.3-06)*. USA, c2006.
3. European Committee for Standardization. *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 4: Silos, tanks and pipelines*. c2006.
4. New Zealand Society for Earthquake Engineering. *Seismic Design of Storage Tanks*. c2009.
5. Kim JK, Koh HM, Kwahk IJ. Dynamic Response of Rectangular Flexible Fluid Containers. *Journal of Engineering Mechanics*. 1996; 122(9):807-817.
6. Koh HM, Kim JW, Park JH. Fluid-Structure Interaction Analysis of 3-D Rectangular Tanks by a Variationally Coupled BEM-FEM and Comparison with Test Results. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1998;27:109-124.
7. Kim JK, Park JY, Jin BM, Joe YH. The Rocking Response of Three Dimensional Rectangular Liquid Storage Tank. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*. 1998;2(1):23-34.
8. Kim JK, Park JY, Jin BM. The Soil-Structure Interaction in Three Dimensional Rectangular Liquid Storage Tanks. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. 1998;18(1-6):775-787.
9. Lee JH, Lee SH. Characteristics of Earthquake Responses of a Rectangular Liquid Storage Tanks Subjected to Bi-directional Horizontal Ground Motions. *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*. 2020;33(1):45-53.
10. Lee JH, Cho JR, Han SW. Time-Domain Earthquake Response Analysis of Rectangular Liquid Storage Tank Considering Fluid-Structure-Soil Interaction. *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*. 2020;33(6):383-390.
11. Lee CB, Lee JH. Nonlinear Dynamic Response of a Concrete Rectangular Liquid Storage Tank on Rigid Soil Subjected to Three-Directional Ground Motion. *Applied Sciences*. 2021;11:4688.
12. Hashemi S, Saadatpour MM, Kianoush MR. Dynamic analysis of flexible rectangular fluid containers subjected to horizontal ground motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2013;42: 1637-1656.
13. Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines of the ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering. *Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems*. American Society of Civil Engineers. c1984.
14. Housner GW. *Dynamic Pressure on Fluid Containers*. Technical Information (TID) Document 7024, Chapter 6 and Appendix F. U.S. Atomic Energy Commission. c1963.
15. Chopra AK. *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Pearson Education Inc. c2017.