

유연한 벽면을 가진 사각형 물탱크의 설계지진력 산정

Seismic Design Force for Rectangular Water Tank with Flexible Walls

김민우¹⁾ · 유은종^{2)*} · 박지훈³⁾

Kim, Min Woo¹⁾ · Yu, Eunjong^{2)*} · Park, Ji-Hun³⁾

¹⁾한양대학교 건축공학과 석사과정, ²⁾한양대학교 건축공학과 교수, ³⁾인천대학교 도시건축학부 교수

¹⁾Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, ²⁾Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, ³⁾Professor, Division of Architecture and Urban Design, Incheon National University

/ A B S T R A C T /

The equivalent static load for non-structural elements has a limitation in that the sloshing effect and the interaction between the fluid and the water tank cannot be considered. In this study, the equations to evaluate the impulse and convective components in the design codes and previous research were compared with the shaking table test results of a rectangular water tank with flexible wall panels. The conclusions of this study can be summarized as follows: (1) It was observed that the natural periods of the impulsive component according to ACI 350.3 were longer than system identification results. Thus, ACI 350.3 may underestimate the earthquake load in the case of water tanks with flexible walls. (2) In the case of water tanks with flexible walls, the side walls deform due to bending of the front and back walls. When such three-dimensional fluid-structure interaction was included, the natural period of the impulsive component became similar to the experimental results. (3) When a detailed finite element (FE) model of the water tank was unavailable, the assumption $S_{ai} = S_{DS}$ could be used, resulting in a reasonably conservative design earthquake load.

Key words: Rectangular water tank with flexible boundary, Sloshing effect, System identification, Finite element model, Design seismic force

1. 서론

지진시 건축물의 목표성능을 확보하기 위해서는 구조요소 뿐만 아니라 건물 내부에 설치되는 비구조요소도 요구성능을 만족해야 한다. 건물내 설치된 물탱크는 생활용수의 공급을 목적으로 설치되는 경우도 있지만 화재 시 소화용수를 확보하기 위하여 설치하는 경우도 있다. 후자의 경우 지진 발생 후에도 소화용수의 공급이라는 기능을 유지해야 하므로 건축물 내진설계기준[1], 소방시설의 내진설계기준[2]에서 필수 내진 설계대상으로 지정되어 있다.

건축물 내진설계기준에서 물탱크의 설계는 “19.6 탱크 및 저장용기”에 규정되어 있다. 19장 일반사항에 따르면 건물외구조물에서 건물외구조물의 중량이 건물외구조물과 지지구조물의 중량합계의 25%보다 작은 경우 설계지진력은 “18. 비구조요소”에 따라 산정하며 25% 이상이며 강체가 아닐 경우 건물외구조물과 지지구조물을 적절한 강성과 유효중량 분포를 갖

도록 조합하여 모델링하도록 하고 있다. 따라서 생활용수 혹은 소화용수를 저장하는 건물내 물탱크의 경우 전체건물 중량의 25% 미만이므로 비구조요소용 설계지진력을 적용할 수 있다. 하지만 일반 비구조요소와 동일하게 등가정적하중을 적용할 경우 물탱크 내부의 유체의 유동성을 고려되지 않는다. 이를 반영하기 위해서는 동적해석법에 따라 설계지진력을 산정하여야 하며 이때 충격성분의 질량과 주기등 설계 지진력 산정에 필요한 요소들은 19.6 탱크 및 저장용기의 규정 및 공인된 전문기술표준을 적용할 수 있다.

ACI 350.3-20[3]는 유체의 유동성을 반영한 설계지진력 산정 절차 및 관련 수식을 제시하고 있다. 즉, 내부의 유체를 충격성분과 대류성분으로 분리하고 각각을 질량-스프링 시스템으로 이상화하여 산정한 응답을 조합하여 산정한다[4]. 하지만 ACI 350.3-20는 기본적으로 콘크리트 물탱크에 대한 설계기준으로 벽면의 변형을 무시하고 물탱크 및 내부의 유체의 거동을 설명하는 Housner[4]의 연구를 기초로 하고 있다. 따라서 얇은 두께를 가지며 벽면의 변형이 큰 강재나 스테인리스강 물탱크의 거동을 모델링하기에는 부적절하다. 내부유체의 유동시 벽체의 변형이 크게 발생하는 경우 설계지진력을 과소 산정[5]할 수 있으므로 물탱크에 수평방향 지반운동 작용시 유체와 벽체의 상호작용으로 인해 발생하는 벽체의 부가 관성력을 고려하여 설계지진력을 산정해야 할 필요성이 있다. Choi et al.[6]의 진동대

*Corresponding author: Yu, Eunjong

E-mail: eunjongyu@hanyang.ac.kr

(Received September 19, 2023; Revised October 4, 2023; Accepted October 4, 2023)

실험연구에 의하면 박판 물탱크의 경우 대류성분의 거동은 유사하나 충격성분의 주기는 ACI 350.3-20의 예측식과 차이를 보이는 것으로 나타났다.

Eurocode 8-part 4(EC8)[7]에서는 Haroun[5]의 연구를 기초로 유체와 구조물의 상호작용을 고려하여 벽면의 변형을 반영한 설계지진력 산정식을 제시하고 있다. 하지만 설계수식이 원통형 물탱크를 대상으로 하고 있어 사각형 물탱크에 적용할 경우 오차가 커지는 문제가 있다. 유체와 구조물의 상호작용을 고려할 때 원통형 수조와 사각형 수조의 차이점은 지진하중 방향의 직각방향 벽면의 변형이다. Lee and Cho[8]는 직각방향 변형을 무시한 단순해석법을 제안하였으나 물탱크의 재질과 형태에 따라 측면 벽체의 변형이 커질 경우 오차가 증가하는 한계를 가진다. Hashemi et al.[9]은 유연한 벽면을 가지는 사각형 물탱크의 3차원 유체-구조물거동을 고려할 수 있는 해석적 절차를 제시하였다. 본 연구에서는 금속 박판과 같이 유연한 벽면을 가지는 사각형 물탱크를 대상으로 진동대 실험 결과로부터 계측된 충격성분과 대류성분의 주기와 선형 유한요소 해석을 통해 산정한 성분별 주기를 비교하고 이를 근거로 설계지진력을 산정하였다.

2. 기존 연구

2.1 ACI 350.3-20

ACI 350.3-20는 견고한 지반에 정착된 콘크리트 물탱크의 내진설계를 위한 해석 및 설계절차를 수록하고 있다. 설계대상 물탱크의 형상은 사각형, 원통형인 경우 모두를 포함하고 있다. 이 기준은 Housner[4]의 연구에서 제시하는 물탱크 동적해석 모델을 기초로 하고 있다. 즉, Fig. 1과 같이 물탱크 내부의 유체를 충격성분과 대류성분의 2가지 성분으로 분리하여 설계지진력을 산정한다. 충격성분은 전체유체중 물탱크의 벽면과 동일하게 운동하는 성분을 의미하며 대류성분은 물탱크내에서 출렁이는 성분을 의미한다. 충격성분과 대류성분의 1차모드 고유주기가 충분히 분리되어 서로의 응답에 영향을 미치는 정도가 작기 때문에 각 성분의 응답을 산정하고 이를 조합하여 설계지진력을 산정할 수 있다[4, 5].

Fig. 1에서 W_c , W_i 는 각각 충격성분과 대류성분의 질량, h_c , h_i 는 각각 충격성분과 대류성분의 유효높이를 의미한다. ACI 350.3-20에서 충격성분의 등가질량은 내부유체가 벽면에 압력을 발생시키더라도 벽체의 변형은 없다고 가정하고 산정한다. 이는 충분한 두께를 가진 콘크리트벽체의 경

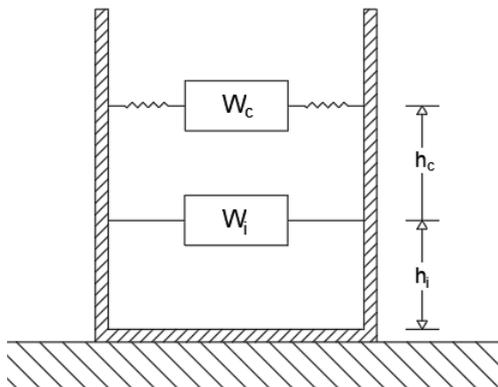


Fig. 1. Dynamic analysis model of ACI 350.3 [3]

우 물탱크 내 유체의 충격성분에 의한 변형은 무시할 수 있을 정도로 작을 것이므로 적절한 가정으로 판단된다. 충격성분의 질량은 식 (1)과 같이 물탱크의 지진방향의 길이와 수위의 비율로부터 산정된다.

$$\frac{W_c}{W_L} = \frac{\tanh\left[0.866\left(\frac{L}{H_i}\right)\right]}{0.866\left(\frac{L}{H_i}\right)} \quad (1)$$

여기서, W_c 는 충격성분의 질량, W_L 는 내부유체의 총 질량, L 는 물탱크의 지진방향 길이, H_i 는 물탱크의 수위를 의미한다.

충격성분의 유효높이는 식 (2)와 같다.

$$h_c = \begin{cases} H_i[0.5 - 0.09375(L/H_i)], & (L/H_i < 1.333) \\ 0.375H_i, & (L/H_i \geq 1.333) \end{cases} \quad (2)$$

ACI 350.3-20에서 제시한 충격성분 1차모드의 고유주기는 식 (3)과 같이 내부유체와 벽체의 질량의 합으로 산정되는 유효질량과 가진방향 벽체의 유효면의방향 휨강성을 통해 산정한다.

$$T_i = 2\pi\sqrt{\frac{M_c}{K_c}} \quad (3)$$

여기서, T_i 는 충격성분의 1차모드의 고유주기, K_c 는 벽체의 강성으로 캔틸레버거동하는 벽체의 면의방향 단위길이당 휨강성, M_c 는 벽체의 질량과 유체의 충격성분질량의 합이다.

ACI 350.3-20의 대류성분의 질량은 물탱크 가진시 내부유체 상부의 출렁임에 의해 발생하는 벽체의 압력에 의한 것으로 충격성분의 질량과 마찬가지로 지진방향의 길이와 수위의 비율을 통해 산정하며 식 (4)와 같다.

$$\frac{W_i}{W_L} = 0.264\left(\frac{L}{H_i}\right)\tanh\left[3.16\left(\frac{H_i}{L}\right)\right] \quad (4)$$

여기서, W_i 는 대류성분의 질량을 의미한다. 대류성분의 유효높이는 식 (5)와 같다.

$$h_i = H_i\left(1 - \frac{\cosh[3.16(H_i/L)] - 1}{3.16(H_i/L)\sinh[3.16(H_i/L)]}\right) \quad (5)$$

대류성분의 1차모드 고유주기는 충격성분의 경우에 비해 비교적 장주기의 성분을 가지며 자유수면에서의 유체의 유동에 의해 발생하는 출렁임의 고유모드로 식 (6)을 통해 산정할 수 있다.

$$T_c = 2\pi\sqrt{\frac{L}{3.16g\tanh\left[3.16\left(\frac{H_i}{L}\right)\right]}} \quad (6)$$

여기서, T_c 는 대류성분의 1차모드 고유주기, g 는 중력가속도를 의미한다.

2.2 Eurocode 8 - Part 4

Eurocode 8-part 4[7]은 견고한 지반에 정착된 원통형 강재탱크에 대한 설계기준으로 Housner[4]의 연구와 Haroun[5]의 연구를 토대로 유체의 동적거동을 물탱크의 내진설계에 반영하였다. Eurocode 8-part 4에서는 Fig. 2와 같이 내부의 유체를 강제성분(m_c), 변형체성분(m_f), 대류성분(m_r)으로 분리하여 설계지진력을 산정한다. 그림에서 h_r , h_f , h_c 는 각각 강제성분, 변형체성분, 대류성분의 유효높이를 의미한다.

대류성분은 자유수면에서의 유체의 유동에 의한 것으로 ACI 350.3-20와 동일한 의미를 가진다. 강제성분과 변형체성분은 ACI 350.3-20의 충격성분에 해당하는 것으로 변형체성분은 유체의 유동에 의해 벽체의 변형이 발생하며 이로 인한 부가 관성력 성분을 의미한다. 강제성분은 충격성분의 질량 중 변형체성분을 제외한 부분으로 물탱크의 가진시 내부의 액체중 지면의 진동과 동일하게 진동하는 성분을 나타낸다.

Fig. 3은 물탱크의 지진방향길이와 수위의 비(L/H_L)를 변화시키면서 ACI 350.3-20과 Eurocode 8-part 4에서 제시된 수식에 의해 각성분별 질량을 비교한 그래프이다. m_L 는 물탱크 내부의 전체수량을 의미한다. ACI(Impulsive)와 ACI(Convector)는 식 (1)~(2)를 통해 산정한 결과이다. Eurocode 8-part 4의 경우 대류성분(m_c), 변형체성분(m_f), 그리고 변형체성분과 강제성분의 합($m_r + m_f$)에 해당하는 3개의 곡선을 산정하였

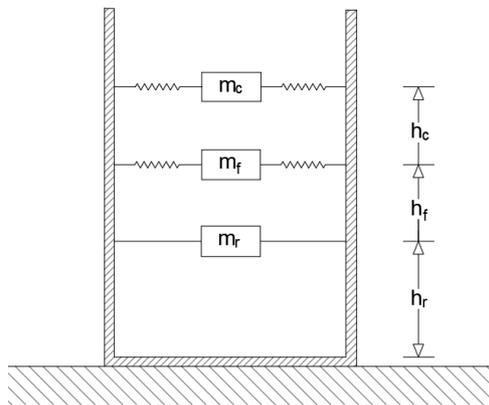


Fig. 2. Dynamic analysis model of EC8 [7]

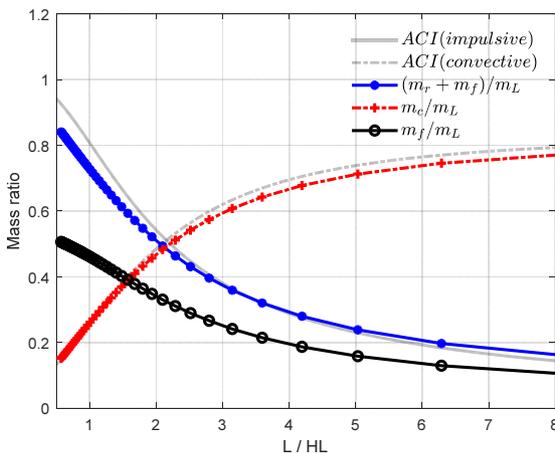


Fig. 3. Comparison of mass ratios between ACI and EC8

다. ACI 350.3-20의 충격성분, Eurocode 8-part 4의 변형체성분과 강제성분을 산정하기 위해서는 물탱크 벽면의 주요모드(1차모드)의 모드형상을 가정해야 한다. Fig. 3의 결과는 물탱크의 벽면이 캔틸레버 거동을 할 경우를 가정한 것으로 이는 천정이 없는 물탱크가 바닥면에 고정된 경우에 해당한다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 ACI 350.3-20과 Eurocode 8-part 4의 대류성분은 거의 동일하며 ACI 350.3-20의 충격성분과 Eurocode 8-part 4의 변형체성분과 강제성분의 합($m_r + m_f$)은 유사한 결과가 산정된다. 물탱크 하부에서 발생하는 지진력은 ACI 350.3-20과 Eurocode 8-part 4 모두 대류성분과 충격성분의 조합으로 산정한다. 다만, ACI 350.3-20의 경우 충격성분의 주기는 벽면의 변위가 무시할 만하다는 가정하에 작용하는 질량과 벽면의 강성으로부터 산정하며, Eurocode 8-part 4의 경우 벽면의 변형에 의한 거동도 설계지진력 산정시 반영한다. Eurocode 8-part 4에서 변형체성분의 1차모드 고유주기는 식 (7)과 같이 물탱크의 벽체에 지진방향으로 충격성분($m_c + m_f$)의 질량이 유체의 유효면적(물탱크의 지지방향 벽체의 길이×수위)에 등분포로 작용하는 경우 충격성분의 유효높이에서 벽체의 면외방향변위를 통해 산정한다.

$$T_f = 2\pi \sqrt{\frac{d_f}{g}} \quad (7)$$

여기서, T_f 는 변형체성분의 1차모드 고유주기, d_f 는 앞에서 언급한 등분포 시킨 충격성분의 질량에 의해 발생하는 벽체의 면외방향 변위를 의미한다.

Eurocode 8-part 4에서 제시한 사각형 물탱크의 대류성분의 1차모드 고유주기 산정식은 식 (8)와 같다.

$$T_c = 2\pi \sqrt{\frac{L}{\pi g \tanh\left[\pi \left(\frac{H_t}{L}\right)\right]}} \quad (8)$$

Eurocode 8-part 4의 경우 기본적으로 원통형 물탱크에 대한 수식만 제공하고 있고 이를 사각형 물탱크에 적용할 경우 어느 정도의 오차가 있음에 주의할 필요가 있다.

2.3 Hashemi et al.[9]

전술한 바와 같이 급속 박판으로 설계된 물탱크에 지진이 발생하게 되면 물탱크 내부에 저장되어 있는 유체가 유동하게 되면서 물탱크 벽면에 큰 변형을 발생시킨다. 이러한 변형을 만들어내는 유체의 압력은 물탱크의 벽체를 강체로 가정하고 산정한 벽체의 압력보다 수 배 이상 증폭될 수 있다[10]. 또한 변형체 질량산정시 인접 벽면의 강성과 지지조건 등 다양한 요인의 영향을 고려해야 한다[11]. 따라서 물탱크의 내진설계를 위한 설계지진력 산정시 이러한 효과를 고려해야 할 필요성이 있다.

유체와 벽체의 상호작용을 고려하기 위해 선형유한요소해석법을 사용할 경우 자유수면의 유체의 유동을 모델링하여 응답을 산정할 수 있으나 유체의 모델링에 많은 시간이 소요되며 절점에 증가로 인해 해석에도 많은 시

간이 소요된다. Hashemi et al.[9]은 4면이 모두 변형가능한 3차원 사각형 액체저장탱크에 수평방향으로 지진력이 작용할 경우 발생하는 동적응답을 산정하는 해석적 방법을 제시하였다. 경계조건을 만족하는 유체의 속도 포텐셜(velocity potential)로부터 변수 분리법과 중첩의 원리를 적용하여 벽면에 작용하는 압력을 산정하였다. 사각형 물탱크의 응답은 적절한 지지조건을 가지는 유연한 벽면으로 이상화된 구조물에 Rayleigh-Ritz method와 모드 조합법을 적용하여 산정하였다. 산정된 벽면의 압력과 슬로싱 높이, 밀면전단력의 시간이력은 Koh et al.[11]의 연구에서 진행한 아크릴 판으로 모델링한 유체저장용기의 진동대 실험 결과와 유체와 벽체의 상호작용을 고려하여 BEM-FEM method을 사용한 해석결과등과 비교하여 연구의 신빙성을 입증하였다.

3. 예제 물탱크의 모델링 및 주기 산정

본 연구에서는 진동대 실험을 통해 동적특성이 규명된 금속박판 재료의 사각형 물탱크를 대상으로 ACI 350.3-20과 Hashemi et al.[9]에 제시된 절차를 적용하여 산정된 각 성분의 주기를 비교하여 이를 근거로 설계지진력을 산정하고 비교하였다. 예제 물탱크는 금속박판 재료의 사각형 물탱크를 대상으로 진행한 진동대실험[12]에서 활용한 실험체와 동일하다. 예제 물탱크의 전체적인 형상은 Fig. 4와 같이 정사각형 평면에 덮개(지붕)를 가지고 있으며 얇은 금속판으로 구성되어 있다. 예제 물탱크의 치수는 3.0×3.0×3.0(m)이며 구체적인 제원 및 진동대 실험결과는 [12]에 나타나 있다.

3.1 ACI 350.3-20

앞서 언급한 바와 같이 ACI 350.3-20은 유체의 거동을 충격성분과 대류성분으로 구분하고 각 성분에 의한 지진응답을 조합하여 설계지진력을 산정한다. 기본적으로 변형량이 작고 캔틸레버 거동을 하는 콘크리트벽체의 강성을 나타내는 수식을 사용하여 충격성분의 주기를 산정하므로 예제 물탱크와 같이 지붕을 가지고 있어 상단부에서 지지점을 가진 경우에 적용할 수 없음은 자명하다. 본 연구에서는 충격성분의 주기를 산정하기 위해 유한요소모델을 활용하였다. 즉, 물탱크의 유한요소모델을 구축한 후 ACI

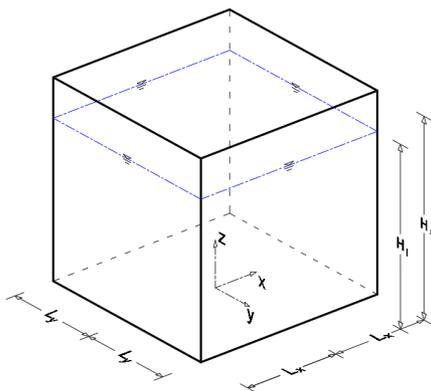


Fig. 4. 3-D view of rectangular tank

350.3-20에서 제시하는 충격성분의 질량과 유효높이에 따라 충격성분 질량을 포함시킨 후 고유치해석을 통해 충격성분의 주기를 산정하였다.

유한요소해석을 위해 상용 구조해석 프로그램인 MIDAS-GEN을 이용하였다. 유한요소 해석모델의 패널 모델은 Plate 요소를 활용하여 모델링하였다. 재료의 물성치도 재료시험결과를 반영하였으며 물탱크 모델 자체의 모델링에 의한 오차를 줄이기 위해 최대한 실제 형상과 유사하도록 모델링하였다. 실제로 내부에 유체없이 물탱크만을 사용한 진동대실험결과로부터 시스템식별기법을 통해 구한 고유주기와 해석결과는 Table 1에서 볼 수 있듯이 거의 동일하여 물탱크 자체의 유한요소해석모델은 실제 구조물의 동특성을 잘 반영하고 있다고 판단할 수 있다.

Table 2는 물탱크 내부에 물을 채운 후 수행한 진동대 실험결과로부터 식별한 충격성분의 주기와 식 (1)과 식 (2)에 따라 충격성분의 질량과 유효 높이를 구한 후 유한요소해석모델에 반영한 후 고유치해석을 수행한 결과이다. ACI 350.3-20의 경우 벽체의 캔틸레버 거동을 가정하므로 벽체의 길이방향으로 동일한 강성(따라서 동일한 변위)을 가지는 것으로 가정하지만 예제 물탱크의 경우는 측면이 구속되어 중앙부와 측면의 변위차이가 매우 크다. 따라서 충격성분의 질량을 모델링 할 때 Table 2에 나타난 바와 같이 지진방향 앞 뒤 두 벽체에서 유효높이에 해당하는 지점에 집중질량으로 모델링할 경우, 동일한 높이에 길이방향으로 등분포시킬 경우, 동일한 높이에 벽면의 변형형상과 유사하게 코사인함수의 형태로 질량을 분포시킨 각 경우에 대해 구한 고유치해석결과이다. Hashemi et al.[9]의 절차에 의한 고유주기는 다음 절인 3.2절에 설명한다.

표에서 볼 수 있듯이 유한요소해석을 사용하더라도 ACI 350.3-20에서 제시하는 충격성분의 수식을 사용할 경우 실제 주기의 1.57~3.09배 정도로 주기를 크게 산정한다. 주기가 길어질수록 스펙트럼 가속도값이 감소하므로 이렇게 산정된 주기를 사용하여 설계지진력을 산정할 경우 과소평가하게 된다.

대류 성분의 경우 ACI 350.3-20에서 제시하는 주기식인 식 (6)을 사용한 결과는 0.509초로 시스템식별로 구한 주기 0.494초와 거의 유사하여 대류성분의 경우 벽체의 강성에 큰 영향을 받지 않음을 확인하였다.

Table 1. Comparison of natural periods of empty tank

Mode	Natural periods (sec)	
	FEA	System ID
1 st Mode (x)	0.076*	0.074 ~ 0.076
2 nd Mode (y)	0.075*	0.068 ~ 0.069
3 rd Mode (x)	0.037*	0.035 ~ 0.036
4 th Mode (y)	0.034*	0.033 ~ 0.035

Table 2. Comparison of natural periods of full tank

System ID	Type	Natural Period (sec)
	ACI 350.3+FEM	Impulsive
Convective		0.494
Hashemi et al.	Concentrated at 2 points	1.031
	Uniformly distributed	0.526
	Cosine function	0.671
Hashemi et al.	Uniformly distributed	0.334

3.2 Hashemi et al.[9]

Hashemi et al.[9]은 벽체에 작용하는 유체의 압력을 등가의 질량으로 치환하고 이를 물탱크의 운동방정식에 연계하여 물탱크의 동적 응답을 산출하고 이를 통해 박판 물탱크에 작용하는 동수압과 유사한 결과를 도출하였다. 본 연구에서는 Hashemi et al.[9]이 제안한 바와 같이 유체의 속도포텐셜함수(velocity potential function)을 예제 구조물에 해당하는 경계조건을 부여하여 풀고 이를 통해 예제구조물의 3차원 유체-구조물 상호작용을 반영하였다.

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 4면의 벽체와 천정면으로 구성된 물탱크의 벽면의 변형을 Fig. 5와 같이 가정하였다. 즉, 물탱크의 지반운동방향(x)의 벽체가 $2L_y$ 에 걸쳐 단순지지보와 같이 변형모드(b 그림에서 보 BC에 해당)를 가지며, 직각방향(y)의 벽체는 L_x 에 걸쳐 단순지지보(b 그림의 보 AB에 해당)와 같은 변형모드를 가진다. 또한 수직방향(z)의 변형모드도 시스템 식별결과로 구한 모드형상을 참고하여 단순지지보와 같이 변형하는 것으로 가정하였다. 실제의 경우 물탱크의 천정면 즉, $z=H_s$ 에서 변위는 0이 아니지만 중앙부의 변위에 비해 충분히 작으므로 계산상의 편의를 위해 단순보와 같다고 가정하였다. 식 (9)~(11)은 이상과 같은 가정에 따른 x, y, z 방향의 진동모드의 형상을 나타내는 수식이다.

$$X_m(x) = \frac{\sin\left(\frac{k_m x}{L_x}\right)}{\sin(k_m)} - \frac{\sinh\left(\frac{k_m x}{L_x}\right)}{\sinh(k_m)} \quad (9)$$

$$Y_m(y) = \frac{\cos\left(\frac{k_m y}{L_y}\right)}{\cos(k_m)} + \frac{\cosh\left(\frac{k_m y}{L_y}\right)}{\cosh(k_m)} \text{ for } L_x = L_y \quad (10)$$

$$Z_n(z) = \frac{\sin\left(\frac{k_n z}{H_l}\right)}{\sin(k_n)} - \frac{\sinh\left(\frac{k_n z}{H_l}\right)}{\sinh(k_n)} \quad (11)$$

여기서, $X_m(x)$ 은 y 방향 벽면에 m 차 진동모드형상, $Y_m(y)$ 은 x 방향 벽면에 m 차 진동모드형상, $Z_n(z)$ 벽면의 z 방향에 따른 n 차 진동 모드형상을 의미한다.

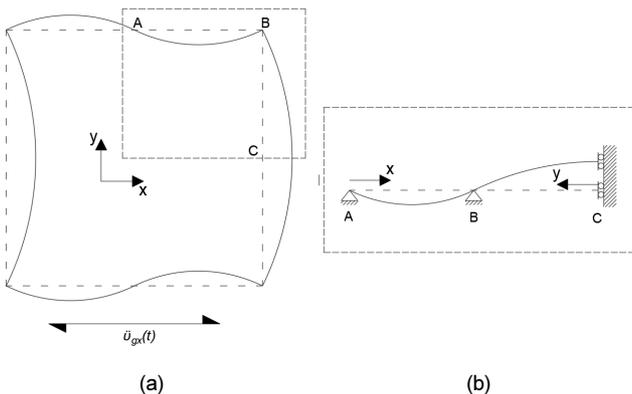


Fig. 5. Deflected shape of idealized tank wall

k_m 은 식 (12)를 통해 산정할 수 있고, 식 (12)은 L_x 와 L_y 과 동일한 경우에만 유효하다. m 과 n 이 동일하다면 k_n 은 k_m 과 같은 값을 가진다.

$$-\cot(k_{m,n}) + \coth(k_{m,n}) - \tan(k_{m,n}) + \tanh(k_{m,n}) = 0 \quad (12)$$

유체와 벽체의 상호작용을 고려한 등가질량은 식 (13)의 Q_k^f 로 구한다. 식 (13)은 k 차 모드까지의 등가질량의 CQC(Complete Quadratic Combination) 조합을 의미한다.

$$Q_k^f = \left[\begin{array}{l} \sum_{j=0}^{\infty} 8\rho_l \frac{\sin(\zeta_j H_l) \tanh(\zeta_j L_x)}{\zeta_j^2 H_l} \\ \times \int_0^{L_y} \int_0^{H_l} \Gamma(L_x, y, z) \cos(\zeta_j z) dz dy \\ + \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (16\rho_l \frac{\sin(\zeta_j H_l) \sin(\beta'_i L_x)}{\xi_{ij}^2 H_l L_x \zeta_j}) \\ \times \int_0^{L_x} \int_0^{H_l} \Gamma(x, L_y, z) \cos(\zeta_j z) \sin(\beta'_i x) dz dx \end{array} \right] \phi_k \beta_k \quad (13)$$

여기서, ρ_l 는 내부 유체의 밀도이며, ζ_j , β'_i , 그리고 ξ_{ij} 는 식 (14)와 (15)로 주어진다.

$$\zeta_j = (2j+1)\pi, \beta'_i = (2i+1)\pi/2L_x \quad (14)$$

$$\xi_{ij}^2 = \beta_i^2 + \zeta_j^2 \quad (15)$$

또한, $\Gamma(x, y, z)$ 는 $K(m \times n)$ 개의 요소를 가지는 3방향(x, y, z)모드형상을 조합하여 만든 행벡터이며, ϕ_k, β_k 는 식 (16)의 고유치해석을 통해 산정된 k 차 모드의 모드벡터, 모드참여계수(Modal participation factor)를 의미한다.

$$(M_s + M_{i_{quid}})\ddot{f} + K_s f = 0 \quad (16)$$

여기서, M_s 는 K 개의 자유도를 가지는 Plate 요소로 모델링한 벽체의 집중 질량행렬, $M_{i_{quid}}$ 은 유체의 유동에 의해 발생하는 부가 질량행렬, K_s 는 K 개의 자유도를 가지는 Plate 요소로 모델링한 벽체의 강성행렬을 의미한다. $M_{i_{quid}}$ 은 식 (17)와 같이 산정할 수 있다.

$$M_{i_{quid}} = \left[\begin{array}{l} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \Gamma^T \frac{4\rho_l \cos(\zeta_j z) \cos(\beta_i y)}{\xi_{ij} H_l L_y} \cdot \frac{\sinh(\xi_{ij} x)}{\cosh(\xi_{ij} L_x)} dA \\ \times \int_0^{L_y} \int_0^{H_l} \Gamma(L_x, y, z, t) \cos(\zeta_j z) \cos(\beta_i y) dz dy \\ + \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \Gamma^T \frac{4\rho_l \sin(\zeta_j z) \sin(\beta_i x)}{\xi_{ij} H_l L_x} \cdot \frac{\cosh(\xi_{ij} y)}{\sinh(\xi_{ij} L_y)} dA \\ \times \int_0^{L_x} \int_0^{H_l} \Gamma(x, L_y, z, t) \cos(\zeta_j z) \sin(\beta_i x) dz dx \end{array} \right] \quad (17)$$

여기서,

$$\beta_i = \pi i / L_y, \xi_{ij}^2 = \beta_i^2 + \zeta_j^2 \quad (18)$$

Table 3. Assumptions for calculation of M_s, K_s, M_{liquid}

Elastic modulus (E)	193,000 Mpa
Poisson's Ratio (ν)	0.29
Wall thickness	2 mm
Wall density	7,930 kg/m ³
Liquid density	1,000 kg/m ³
horizontal vibration modes (m)	5
Vertical vibration modes (n)	15
Number of combined modes (K)	75

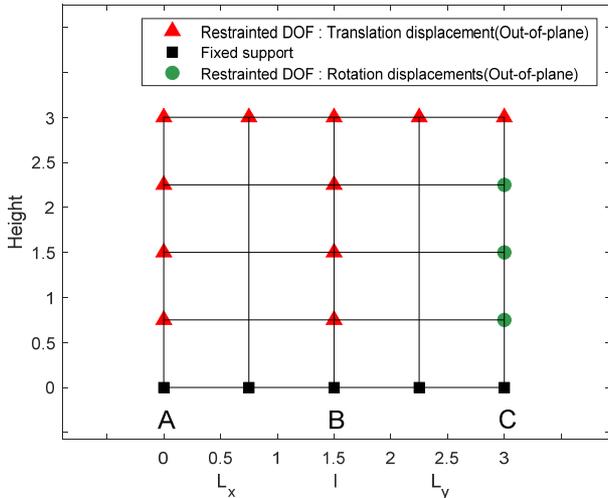


Fig. 6. FE model of idealized tank wall

$$\bar{L}_y = \begin{cases} 2L_y, & i = 0 \\ L_y, & i \neq 0 \end{cases} \quad (19)$$

본 연구에서 M_s, K_s, M_{liquid} 를 산정하기 위해 사용한 가정사항들은 Table 3에 정리하였다. Fig. 6은 M_s, K_s 산정을 위한 유한요소모델을 나타낸 것이다. 지지조건은 Fig. 5(b)와 같이 물탱크의 높이 방향(z)으로 line support 적용하였다. 또한 A지점과 B지점은 면외방향 변위를 일으키는 자유도를 구속하였고, C 지점은 회전변위를 일으키는 자유도만 구속하였다. 벽체의 바닥면은 지표면에 고정지지 하였다. 벽면의 최상단은 면외방향 변위를 일으키는 자유도만 구속하였다.

이상과 같은 절차로 산정한 변형체성분의 등가질량(Q_f)은 10,751 kg으로 실험체 내부의 총 유체의 질량(21,600 kg)의 약 49.8%에 해당하는 수준으로 산정되었다. 또한 이를 활용한 고유주기는 약 0.334초로 시스템식별 결과와 거의 유사한(오차율 2% 미만) 결과를 얻었다.

4. 설계지진력 산정

건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)에서 물탱크의 설계는 “19. 건물외구조물”의 하위조항인 “19.6 탱크 및 저장용기”에 규정되어 있다. 건축물에 설치되는 물탱크는 건축물에 의해 지지되고 이 물탱크가 건축물의 주된 지진력저항시스템의 일부는 아니므로 19.2에 규정된 “다른 구조물에 의해 지지되는 건물외구조물”에 속한다. 건물외구조물의 중량이 건물외구조

물과 지지구조물의 중량합계의 25%보다 작은 경우 설계지진력은 “18. 비구조요소”에 따라 산정한다. 건물외구조물의 중량이 건물외구조물과 지지구조물의 중량합계의 25% 이상인 경우 건물외구조물의 고유주기에 따라 구조해석 방법이 달라지는데, 대부분의 물탱크에서와 같이 고유주기가 0.06초 이상인 경우에는 건물외구조물과 지지구조물을 적절한 강성과 유효중량 분포를 갖도록 조합하여 모델링하여야 한다.

이 연구에서는 물탱크의 중량이 물탱크와 건축물 중량합계의 25%보다 작은 경우에 대하여 국내 내진설계기준과 3절까지의 연구결과를 활용하여 설계지진력을 산정하였다. 국내 내진설계기준에서 비구조요소의 설계지진력은 “18. 비구조요소”에 따라 산정하지만 “18.1 일반사항”에서는 탱크를 포함하는 건물외구조물은 19장(건물외구조물)의 규정에 따라 설계하도록 규정하고 있다.

18장 비구조요소에서 규정하는 등가정적하중을 적용할 경우 수평설계지진력(F_p)은 식 (20)에 의하여 산정한다. 비구조요소의 등가정적하중은 비구조요소의 유효중량, 중요도계수, 증폭계수, 반응수정계수 및 설치위치의 구조물 가속도에 의해 결정된다. 등가정적하중은 식(21)을 초과할 필요는 없으며 식 (22) 이상이어야 한다.

$$F_p = \frac{0.4a_p S_{DS} W_p}{\left(\frac{R_p}{I_p}\right)} \left(1 + 2\frac{z}{h}\right) \quad (20)$$

$$F_p = 1.6 S_{DS} I_p W_p \quad (21)$$

$$F_p = 0.3 S_{DS} I_p W_p \quad (22)$$

여기서,

- F_p = 비구조요소 질량 중심에 작용하는 설계지진력
- a_p = 비구조요소의 증폭계수
- I_p = 비구조요소의 중요도계수
- h = 구조물의 밑면으로부터 지붕층의 평균높이
- R_p = 비구조요소의 반응수정계수
- S_{DS} = 단주기에서의 설계스펙트럼가속도
- W_p = 비구조요소의 작동상태를 고려한 중량
- z = 구조물의 밑면으로부터 비구조요소가 부착된 높이
- $z = 0$: 구조물의 밑면 이하에 비구조요소가 부착된 경우
- $z = h$: 구조물의 지붕층 이상에 비구조요소가 부착된 경우

수직방향 설계지진력은 식(23)으로 산정하며, 다른 수직하중과 동시에 고려한다.

$$\pm 0.2 S_{DS} W_p \quad (23)$$

물탱크의 반응수정계수 R_p 는 “18. 비구조요소” 표 18.4-1에 규정되어 있지 않으므로 “19. 건물외구조물” 표 19.3-2에 규정된 건물과 유사하지 않은 건물외구조물의 설계계수를 적용할 수 있다. 건물 내부에 설치되는 물탱크는 하부가 평평하고, 형강을 통해서 콘크리트 받침에 기계식 앵크로 정

착되는 경우가 일반적이므로 해당 표의 “지면에 지지된 하부가 평평한 탱크 및 저장용기/a. 철골조 또는 섬유보강 플라스틱조/ 기계식 앵커로 고정된 경우”로 판단하여 $R_p=R=3.0$, $\Omega_0=2$, $C_d=2.5$ 를 적용할 수 있다. 물탱크의 증폭계수 a_p 는 “18. 비구조요소” 표 18.4-1에 물탱크가 구체적인 항목으로 포함되어 있지 않다. 같은 표의 각주에서는 유연한 요소의 일반적 수치 $a_p=2.5$ 를 제시하고 있으며, 상세한 동적해석에 의해 증명되는 경우 표에 규정된 값보다 더 낮은 a_p 의 적용을 허용하고 있다(단, $a_p \geq 1.0$). 주지하다시피 식 (20)에 의한 등가정적하중은 물탱크 내부 유체의 출렁임을 고려할 수 없는 한계를 지니고 있다. 따라서 동 기준의 “19.6 탱크 및 저장용기” 및 해외 표준 ACI 350.3-20에 규정된 설계요구사항을 “상세한 동적해석에 의해 증명되는 경우”로 판단하여 설계지진력을 산정할 수 있다. 건축물 내진 설계기준에서 이러한 부분은 불명확한 부분이 많으므로 향후 이를 해결하기 위한 개정이 요구된다.

식 (24)~(26)는 “19.6 탱크 및 저장용기”에서 제시하고 있는 설계지진력 산정식이다.

$$V = \sqrt{(V_i)^2 + (V_c)^2} \tag{24}$$

$$V_i = \frac{S_{ai} W_i}{\left(\frac{R}{I_E}\right)} \tag{25}$$

$$V_c = \frac{S_{ac} I_E}{1.5} W_C \tag{26}$$

여기서, V_i 는 탱크 및 내용물의 충격성분에 의한 밀면전단력, V_c 는 탱크 내용물의 유동에 의해 발생하는 대류성분에 의한 밀면전단력, W_i 는 충격성분에 의한 하중을 유발하는 중량으로 내용물, 지붕, 탱크 외벽 바닥등의 중량을 포함하는 충격성분의 중량, W_c 는 액체의 유동효과를 고려하는 내부 유체 중량의 일부, S_{ai} 는 중력가속도 단위로 나타난 지반운동에 대한 5% 감쇠비의 스펙트럼가속도에서 T_i 에 해당하는 값, S_{ac} 는 T_c 에 해당하는 0.5% 감쇠비의 스펙트럼가속도, R , I_E 는 각각 물탱크의 반응수정계수와 중요도 계수를 의미한다.

Table 4는 예제 물탱크인 3×3 m규격의 물탱크와 함께 5×5 m의 물탱크의 설계지진력을 산정한 결과이다. 참고로 비구조요소용 수평설계 지진력도 같이 나타내었다. 충격성분의 경우 3.1절과 3.2절의 절차에 따라 주기를 산정하고 그 주기를 활용하여 식 (25) 및 식 (24)에 따라 충격성분의 설계지진력을 구하였다. 이때 R 은 건축물내진설계기준의 19장의 ‘건물과 유사하지 않은 건물과 구조물의 설계계수’에서 제시하는 ‘3’을 사용하였다. I_E 는 지진 후에도 인명안전을 위한 기능유지의 필요성이 있는 소화용 물탱크로 가정하여 ‘1.5’를 적용하였다. S_{ai} , S_{ac} 산정을 위한 스펙트럼 가속도 산정을 위해 수도권의 지표면에 설치된 물탱크로 가정하고 유효 지반 가속도(S)는 0.165, 지반조건은 S3인 상황을 가정하였다.

대류성분의 경우 그 주기는 물탱크의 형태 혹은 재질과 상관없이 이론식

Table 4. Comparison of design seismic forces

Type		T_i (Sec)	W_i (kg)	W_c (kg)	S_{ai} (g)	S_{ac} (g)	V (kN)	F_p (kN)
(3×3×3 m)	ACI+FEM	0.671	15,845	7,037	0.268	0.147	23.7	46.4
	Hashemi+FEM	0.333			0.432		35.4	
	$S_{ai} = S_{DS}$	-			0.432		35.4	
(5×5×6 m)	ACI+FEM	0.859	95,413	32,845	0.209	0.127	106.1	256.8
	Hashemi+FEM	0.549			0.328		158.6	
	$S_{ai} = S_{DS}$	-			0.432		206.1	

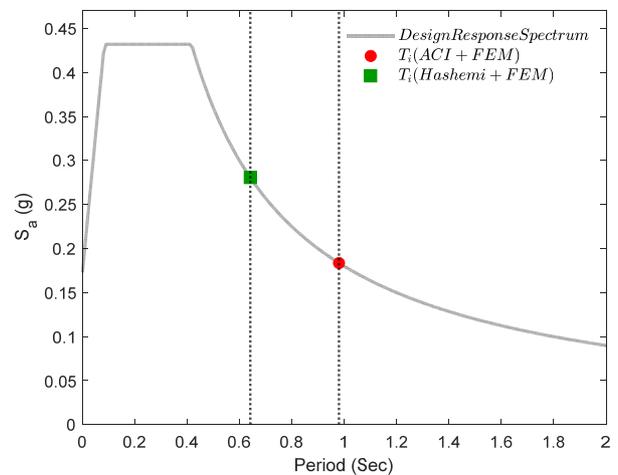
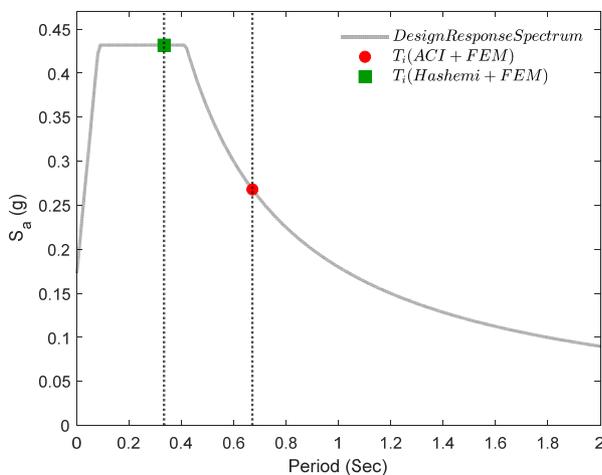


Fig. 7. Spectral acceleration of impulsive component (S_{ai})

으로 충분히 정확히 계산이 가능하므로 각 경우 동일한 값이 산정된다. 하지만 충격성분의 경우 앞서 살펴본 바와 같이 ACI 350.3-20 규정에 따라 충격성분을 산정하고 유한요소모델을 통해 충격성분의 주기를 구할 경우 실제 주기보다 더 큰 값이 구해져 실제 지진하중을 과소평가할 위험이 있다. Hashemi et al. [9]의 절차는 정확한 값을 도출하였으나 매우 복잡한 수치해석적 절차가 요구된다. 충격성분의 주기는 물탱크의 치수와 벽체의 강성에 따라 달라지지만 대류성분보다 작으며 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 가속도 지배영역과 속도지배영역의 경계에 해당한다. 따라서 충격성분의 주기를 산정하지 말고 보수적으로 식 (25)의 S_{ai} 를 S_{DS} 와 같다고 가정하여 설계지진력을 산정할 수 있다. Table 4에서 볼 수 있듯이 이렇게 산정한 설계지진력도 비구조요소용 등가정적하중의 수평설계지진력 F_p 보다 작은 값이다.

5. 결론

건물내에 설치되는 물탱크는 비구조요소에 속한다. 하지만 건축물 내진 설계기준의 비구조요소용 등가정적하중을 적용할 경우 물탱크 내부 유체의 출렁거림과 유체-구조물의 상호작용을 고려할 수 없는 한계가 있다. 본 연구에서는 진동대 실험을 통해 충격성분과 대류성분의 고유주기를 알고 있는 물탱크를 대상으로 유체의 슬로시 및 유체와 구조물의 상호작용을 고려할 경우 각 성분의 주기를 실험결과와 비교하여 그 정확도를 확인하였다. 이 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) ACI 350.3은 물탱크내 유체를 충격성분과 대류성분으로 나누고 각 성분의 질량, 주기, 유효높이의 산정식을 제시하고 있다. 하지만 기본적으로 벽체의 변형이 크지 않은 철근콘크리트조 물탱크를 대상으로 한 설계식으로서 유연한 벽체를 가진 물탱크의 경우 설계식을 적용한 충격성분의 주기는 실험결과보다 큰 값을 도출하여 결과적으로 설계지진력을 과소평가할 위험이 있다.
- 2) 유연한 벽체를 가진 사각형 물탱크의 경우 지진방향 벽체의 휨변형에 의해 측면 벽체의 변형이 발생한다. 이러한 3차원 유체-구조물 상호작용을 고려할 경우 실험결과와 매우 유사한 충격성분의 주기를 얻을 수 있었다.
- 3) 충격성분 주기를 정확히 산정하기 위해서는 정밀한 유한요소모델과 복잡한 산정절차가 필요하다. 충격성분의 주기산정이 힘들 경우 비구조요소용 등가정적하중 대신 충격성분의 설계스펙트럼가속도를 상한값인 단주기설계스펙트럼가속도 S_{DS} 로 가정하여도 충분히 보수적인 설계지진력을 구할 수 있다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호: RS-2021-KA163162)

/ REFERENCES /

1. KDS 41 17 00. Seismic Building Design Code, Korea Construction Standards Center; c2019.
2. Seismic Design Criteria for Fire Protection System, National Fire Agency; c2021.
3. American Concrete Institute, Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary (ACI 350, 3-20). USA; c2020.
4. Housner G.W. The Dynamic Behavior of Water Tanks, Bulletin of the Seismological Society of America, 1963;53(2):381-387.
5. Haroun M.A. Vibration Studies and Tests of Liquid Storage Tanks, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1983;11:179-206.
6. Choi HS, Park DU, Kim SW, Kim JM, Baek ER. Estimation of dynamic properties of steel liquid storage tank by shaking table test, EESK J. Earthquake Eng. 2017 Jan;21(4):153-161.
7. European Committee for Standardization, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 4: Silos, tanks and pipelines; c2006.
8. Lee JH, Cho JR, Simplified Analysis of Rectangular Liquid Storage Tanks Considering Fluid-Structure Interaction, EESK J Earthquake Eng. 2022;26(5):203-209.
9. Hashemi S, Saadatpour MM, Kianoush MR, Dynamic behavior of flexible rectangular fluid containers, Thin-walled structures, 2013 May;66:23-38.
10. Park JH. Dynamic analysis of rectangular liquid storage structures with analytic solution of fluid motion, KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, 2004;24:73-78.
11. 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.
12. Park JH, Yu EJ, Ahn SJ, Kim SW, Hong YS, Kim MW, Kim JH. Verification of seismic performance of stainless steel panel type water tank, Incheon Univ.; c2023.