

건축물에 설치된 물탱크의 지진응답해석을 통한 설계하중 평가

Evaluation of Seismic Design Force by Earthquake Response Analysis of Water Tanks Installed in RC Buildings

백은림¹⁾ · 오지현²⁾ · 최형석³⁾ · 이상호^{4)*}

Baek, Eun Rim¹⁾ · Oh, Ji Hyeon²⁾ · Choi, Hyoung Suk³⁾ · Lee, Sang Ho^{4)*}

¹⁾국토교통연구인프라운영원 책임연구원, ²⁾부산대학교 건설융합학부 석사과정, ³⁾국토교통연구인프라운영원 수석연구원, ⁴⁾부산대학교 건설융합학부 교수

¹⁾Senior Researcher, Korea Construction and Transport Engineering Development Collaboratory Management Institute, ²⁾Master's Student, School of Urban, Architecture and Civil Engineering, Pusan National University, ³⁾Principal Researcher, Korea Construction and Transport Engineering Development Collaboratory Management Institute, ⁴⁾Professor, School of Urban, Architecture and Civil Engineering, Pusan National University

/ A B S T R A C T /

Several water tanks installed in the building were damaged during the Gyeongju earthquake (2016) and the Pohang earthquake (2017). Since a water tank for fire protection is very important component, seismic safety should be ensured. In this study, an interaction between a water tank and a building was studied by the dynamic analysis of the RC building with the water tank. In case the water tank was installed on the roof of the RC building, it was confirmed that it did not significantly affect the response of the building. Based on the result, dynamic response characteristics of the water tank in the building were studied using two SDOF models represented dynamic behavior of the water tanks under earthquake. An earthquake time-history analysis was carried out with variables of aspect ratio of the tank, story of the building, and installed location in the building using three kinds of earthquakes.

Key words: Water tank, Seismic design, Earthquake response analysis

1. 서론

2016년 경주지진과 2017년 포항지진이 발생하여 건축물 내 비구조요소의 다양한 피해사례가 보고되었다[1]. 건축물 내 설치되는 물탱크의 경우에도, 옥상층에 설치된 물탱크의 벽체가 파손되거나 물탱크 지지구조가 좌굴되는 등의 피해가 발생하였다. 국내 건축물용 물탱크는 생활용수 뿐 아니라 소화용수를 함께 공급하기 때문에, 지진으로 인한 화재나 누수 등의 2차 피해를 방지하기 위해서 충분한 내진능력이 확보되어야 한다. 이와 관련하여 2016년 소방시설의 내진설계 기준[2]이 고시되면서, 소화용수의 수원에 해당하는 건축물 내 물탱크도 내진설계의 대상이 되었다. 하지만 동기준에서 물탱크의 상세 내진설계방법은 제시되지 않았다. 건축구조기준[3]에 따르면 건축물에 설치되는 물탱크는 비구조요소에 해당하여 등가정적하중을 지진하중으로 고려하여 건축물과의 정착부 등을 설계할 수 있지만, 물탱

크는 내부의 액체가 유동성을 가지므로 일반적인 등가정적하중에 대한 안전성 및 합리성이 검토될 필요가 있다.

국외의 경우 ASCE 7-16[4]에서는 건축물에 지지되지 않는 탱크나 저장용기를 건물외구조물(non building structure)로 분류하며, 내부 유체의 동적거동 특성을 고려한 설계지진하중 산정방법을 제시하고 있다. 또한 물탱크의 재료에 따라 콘크리트 물탱크의 경우 ACI 350.3[5], 강재 물탱크의 경우 AWWA D100[6] 등의 상세 설계기준을 참조하도록 하고 있다. 하지만 물탱크가 건축물 내 설치될 경우(건축물에 지지되는 경우)에는 비구조요소의 내진설계방법을 적용하도록 하며 유체의 동적거동을 고려하지 않고 있다. 한편, 일본에서는 건축설비내진설계 및 시공지침[7]에서 높이 60 m 이하 건축물에 설치되는 건축설비의 내진지지에 관한 사항을 제시하고 있으며, 특별히 수조의 경우 기타 설비기기와는 별도로 내부 유체의 유효중량 및 무게중심 높기와 수평진도를 제시하고 있다. 이러한 국외 기준들은 각 국가별 수조 및 액체저장탱크의 실정을 고려하고 있으나 설계방법론은 차이가 있다.

따라서 본 연구에서는 국내 건축물 내 설치되는 물탱크의 내진설계기준

*Corresponding author: Lee, Sang Ho

E-mail: sangho@pusan.ac.kr

(Received December 11, 2018; Revised June 10, 2019; Accepted June 13, 2019)

을 마련하기 위한 기초 연구로, 상기 기준별 설계지진하중 및 산정방법을 비교·검토하고, 건축물 내 물탱크가 설치되는 것을 가정하여 물탱크의 형상비, 건축물 높이 및 물탱크 설치 위치를 변수로 한 지진응답해석을 수행하여 각 변수별 물탱크의 지진하중을 평가하고자 한다.

2. 국내외 물탱크 설계기준 분석

2.1 ASCE 7-16(미국)

건축물에 지지되지 않고 지반에 설치되는 탱크나 저장용기의 경우 건물 외구조물(non building structure)로 분류하고, 건축물 구조의 지진하중 산정방법과 동일하게 지반의 설계스펙트럼에서 고유주기에 따른 스펙트럼가속도를 취하여 지진하중을 산정토록 한다. 이때, 탱크의 유효중량 및 동특성을 Housner의 연구[8]에 따라 충격성분과 대류(슬로싱)성분으로 분리하여 각 성분의 설계하중을 산정한다(여기서, 충격성분은 탱크 벽체, 천장 및 벽체와 함께 거동하는 내부 유체 성분으로 탱크 하부에 위치하는 고주파 증폭 응답성분이며, 대류성분은 탱크 상부에 위치하며 구조체와 관계없이 유체의 슬로싱을 발생시키는 저주파 증폭 응답 성분을 의미한다). 각 성분의 설계지진하중은 설계스펙트럼가속도, 유효중량, 반응수정계수 및 중요도 계수를 고려하여 식(1)~식(3)과 같이 산정한다. 참고로, 이와 같은 설계 방법은 하나의 구조물에 대해 2가지 모드특성 및 참여질량을 고려하여 모드별 하중을 조합하여 지진하중으로 산정하므로 일종의 응답스펙트럼 해석과 같은 개념으로 볼 수 있다.

$$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2} \tag{1}$$

$$V_i = \frac{S_{ai} W_i}{(R/I_e)} \tag{2}$$

$$V_c = \frac{S_{ac} I_e}{1.5} W_c \tag{3}$$

여기서, V 는 총 밀면전단력, V_i 는 충격성분에 의한 밀면전단력, V_c 는 대류성분에 의한 밀면전단력, R 은 반응수정계수, I_e 는 중요도 계수, W_i 는 충격성분의 유효중량, W_c 는 대류성분의 유효중량, S_{ai} 및 S_{ac} 는 충격성분과 대류성분의 고유주기에 대한 각각 스펙트럼 가속도이다. 충격성분과 대류성분에 대한 감쇠비는 각각 5%와 0.5%를 적용한다.

상기 지진하중은 지반에 설치되는 탱크의 경우로 지반의 설계스펙트럼을 기반으로 지진하중을 산정하므로 건축물 내 설치되는 물탱크에는 적용할 수 없다. 물탱크가 건축물에 지지되고 전체 건축물에 대한 중량비가 25% 미만인 경우에는 비구조요소로 분류하여 등가정적하중으로 지진하중을 산정하고 이에 대해 설계하여야 한다. 비구조요소의 등가정적하중은 국내 건축구조기준과 동일하므로 2.3 절에서 상세히 서술한다.

2.2 FRP 수조 구조설계계산법(일본)

일본에서는 국내외 유사하게 SMC(Sheet Molding Compound), FRP(Fiber Resin Polymer), STS(Steel Type Stainless) 패널 조립식 물탱크가 건축물용 물탱크로 주로 사용되고 있으며, 과거 지진에 의한 물탱크 피해 경험을 바탕으로 물탱크에 대한 내진설계기준이 1980년대부터 마련되었다. 건축설비내진설계 및 시공지침에서는 건축물의 시간이력응답해석을 수행하는 경우와 그렇지 않은 경우로 구분하여 수평하중을 산정하는 방법을 제시하고 있으며, FRP 수조 구조설계계산법[9]에서는 물탱크 설치 위치에 따른 건축물의 응답증폭 및 물탱크의 응답증폭계수를 보다 상세히 제시하고 있다. 동 기준에서 설계 수평지진하중(F_H)은 식(6)과 같이 수평진도(k_H)와 물탱크의 유효중량(W)의 곱으로 산정하며, 수평진도(k_H)는 건축물에서 n 층 바닥의 수평진도로 수조를 설치하는 지역, 중요도, 건물내 수조의 설치 층수 등에 따라 정해지는 계수로 식(4)~식(6)에 따라 산정한다.

$$F_H = k_H \cdot W \tag{4}$$

$$k_H = \beta \cdot k_{FH} \leq 2.0 \tag{5}$$

$$k_{FH} = I \cdot K_1 \cdot Z \cdot k_{OH} \tag{6}$$

여기서, β 는 물탱크의 가속도응답배율로 물탱크가 강체가 아닌 경우를 고려하여 입력가속도를 할증하기 위한 계수로, 견고한 기초에 설치된 것을 가정하여 지하층, 1층 및 지상에서는 2.0을, 옥상층에서는 1.5를 적용한다. 이는 ASCE 7과 KBC 2016에서 비구조요소 등가정적하중 산정시 응답증폭 계수를 설치 층에 관계없이 일정한 값을 적용하는 것과 차이가 있다. K_1 은 물탱크의 설치 층에 따른 건축물의 응답증폭계수로 물탱크의 설치 층이 1층 또는 지하인 경우 1.0, 옥상층인 경우 2.5를 적용한다. I 는 수조의 용도에 따른 중요도 계수, Z 는 지역계수, k_{OH} 는 1층 바닥에 작용하는 수평진도이다. 또한 지진하중을 산정하기 위한 유효중량(W)은 물탱크 내부 유체 중 충격성분의 유효중량으로 산정하며, 대류성분에 의한 슬로싱(sloshing)은 벽체의 상부 및 천장 구조의 안전성 검토시에 슬로싱 하중을 이용하도록 한다.

2.3 비구조요소 등가정적하중(KBC 2016)

국내에는 KS 규격에서 ASCE 7의 동적해석법과 유사하게 액체저장탱크의 내진설계기준을 제시하고 있지만, 건축물용 물탱크의 내진설계기준이나 방법은 제시되어 있지 않다. 건축구조기준(KBC 2016)에 따르면 건축물 내 설치되는 물탱크는 지지구조물(건물)에 대한 중량비가 25%를 초과하는 경우 건물외구조물로 분류하고, 중량비가 25%이하인 경우 비구조요소로 분류하여 각각 별도의 설계방법을 적용한다. 일반적으로 물탱크의 중량비는 건물에 비해 매우 작기 때문에 비구조요소로 분류할 수 있고, 비구조요소의 등가정적하중은 식(7)과 같이 산정하며 F_p 는 다음 식(8)을 만족하여야 한다.

$$F_p = \frac{0.4a_p S_{DS} W_p}{\left(\frac{R_p}{I_p}\right)} \left(1 + 2\frac{z}{h}\right) \quad (7)$$

$$0.3S_{DS}I_p W_p \leq F_p \leq 1.6S_{DS}I_p W_p \quad (8)$$

여기서, F_p 는 비구조요소 질량 중심에 작용하는 설계지진력, a_p 는 1.0~2.5 사이의 값을 갖는 증폭계수, S_{DS} 는 단주기 설계스펙트럼가속도, W_p 는 비구조요소의 기동중량, R_p 는 비구조요소의 반응수정계수로서 1.0~3.5 사이의 값, I_p 는 비구조요소의 중요도 계수로서 1.0 또는 1.5, h 는 구조물의 밑면으로부터 지붕층까지의 평균높이, z 는 구조물의 밑면으로부터 비구조요소가 부착된 높이($z=0$: 구조물의 밑면 이하에 비구조요소가 부착된 경우, $z=h$: 구조물의 지붕층 이상에 비구조요소가 부착된 경우)이다.

식(7)에 따라 비구조요소의 등가정적하중으로 물탱크의 설계하중을 산정하는 경우 물탱크의 총 중량과 설치위치 및 단주기 스펙트럼 가속도가 영향을 미치는 것을 알 수 있고, 증폭계수 및 반응수정계수의 경우 물탱크에 대한 적용 값을 제시하고 있지 않아 설계하중을 산정하는데 어려움이 있다.

2.4 지반에 설치된 물탱크의 설계지진하중 비교

지반이나 건축물의 1층에 물탱크가 설치된 경우에 대한 설계지진하중 계수(V/W, 전체 중량에 대한 설계밀면전단력 비)를 산정하여 Fig. 1에 비교하여 나타낸다. ASCE 7(이하 ASCE 기준)에서는 건물외구조물에 해당하는 탱크 및 저장용기로 가정하여 동적해석법을 이용하여 지진하중을 산정하였으며, 건축구조기준(KBC 2016)에 의한 등가정적하중(F_p), 일본의 FRP 수조 구조설계계산법(이하 FRP 기준)에 의한 하중을 비교하였다. ASCE와 FRP 기준은 물탱크의 형상에 따라 변화하는 유효중량을 고려하기 때문에 물탱크의 형상비를 변수로 설계하중을 산정하였다. ASCE의 경우 물탱크의 형상비(L/HL, L은 하중작용방향 길이, HL은 내용수의 높이)가 클수록, 즉 탱크가 길이방향으로 길어질수록 설계하중이 감소하는 경향을 나타내었으며, FRP 기준에서도 내부 유체의 유효중량을 고려하기 때문에 유사한 경향을 나타내었다. FRP 기준에 의한 하중은 물탱크의 응답증폭계수를 지반에서 2.0으로 적용하기 때문에 ASCE 하중에 비해 약 2배정도 큰 값을 나타내었다.

ASCE 기준의 동적하중은 물탱크의 충격성분과 대류성분에 의한 지진하중을 모두 고려하는데, 그 중에서 충격성분은 물탱크의 강성에 직접적인 영향을 받는다. 이를 고려하기 위해 본 절에서 고려한 강제 탱크 벽체 두께(t)를 5, 10, 20, 40 mm 로 가정하여 각각 해석하였으며, 벽체 두께가 40 mm 인 경우는 최대가속도가 적용되는 것으로 충격성분에 대해 가장 보수적인 결과를 적용하는 것으로 가정할 수 있다.

등가정적하중은 물탱크의 형상에 따른 유효중량 및 설계응답가속도를 고려하지 않기 때문에 형상비에 관계없이 일정한 값을 나타내었다. 설계지진하중계수는 응답증폭계수(1.0 또는 2.5)에 따라 0.13, 0.32로 산정되었다. 응답증폭계수가 1.0인 경우에는 최소 수평지진하중 기준 $F_p(\min) = 0.3S_{DS}I_p$ 에 미치지 못하였으며, 형상비가 2.5 이하일 때 ASCE (t=40) 하중과 모든 형상비에서 FRP 기준 하중에 비해 부족하였다. 반면 최소하중기준

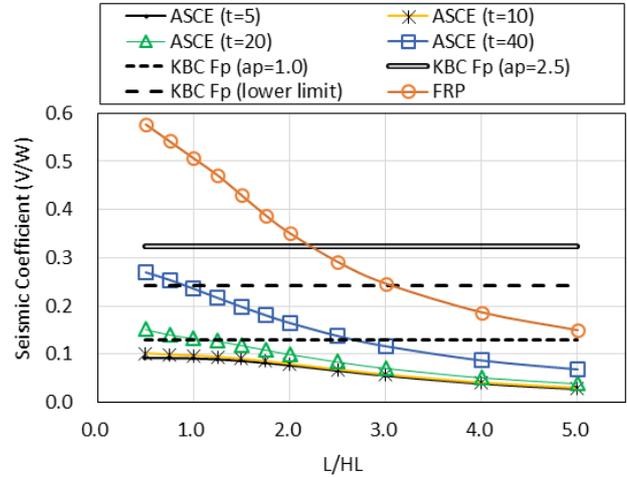


Fig. 1. Seismic design forces by standards

은 형상비 1.0 이상 즉, 수조 내 수위보다 길이가 긴 수조의 경우 ASCE 기준에 의한 동적하중 이상이였다.

건축물 상부에 설치되는 경우 설계하중을 ASCE 기준에서 제시한 동적해석법으로 결정하기 위해서는 건축물의 층응답가속도스펙트럼 산정이 요구되므로 등가정적하중(F_p) 및 FRP 기준의 하중과 직접 비교하기는 어렵다. 따라서 3장에서 건축물에 대한 지진응답해석을 수행하고 층응답가속도를 결정한 후 지진하중을 산정하여 각 기준과 비교한다.

3. 물탱크를 고려한 건축물의 지진응답해석

본 연구에서는 건축물 상부 층에 물탱크가 설치되는 것을 고려하기 위해 대상 건축물의 지진응답해석을 수행하고 각 층의 응답가속도를 물탱크 지진응답해석 시 입력지진가속도로 사용하고자 한다. 비구조요소는 건물의 설계 시 중량만 고려해도 무방하지만, 물탱크의 경우에는 내부 액체가 슬로싱 거동에 의해 액체동조감쇠기(TLD)와 같은 역할을 하여 건물의 응답에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 3장에서는 대상 RC(Reinforced Concrete) 건축물에 물탱크의 해석모델을 고려하였을 때 건축물의 동특성 및 지진응답가속도 특성 변화를 검토하고자 한다.

3.1 해석 대상

3.1.1 대상 건축물

대상 건축물은 5층, 10층, 15층, 20층의 RC모멘트골조로 사무용 건축물로 가정한다. 층고는 3.5 m, 경간은 6 m이고, 5층 건축물의 평면도 및 입면도는 Fig. 2와 같고, 10층, 15층, 20층 건축물의 평면도 동일하게 한다. Table 1과 같은 설계 조건에 대해 KBC 2016에 의거하여 설계하고, 대상 건축물의 구조설계는 MIDAS Gen 구조설계 프로그램[10]을 이용하여 수행한다.

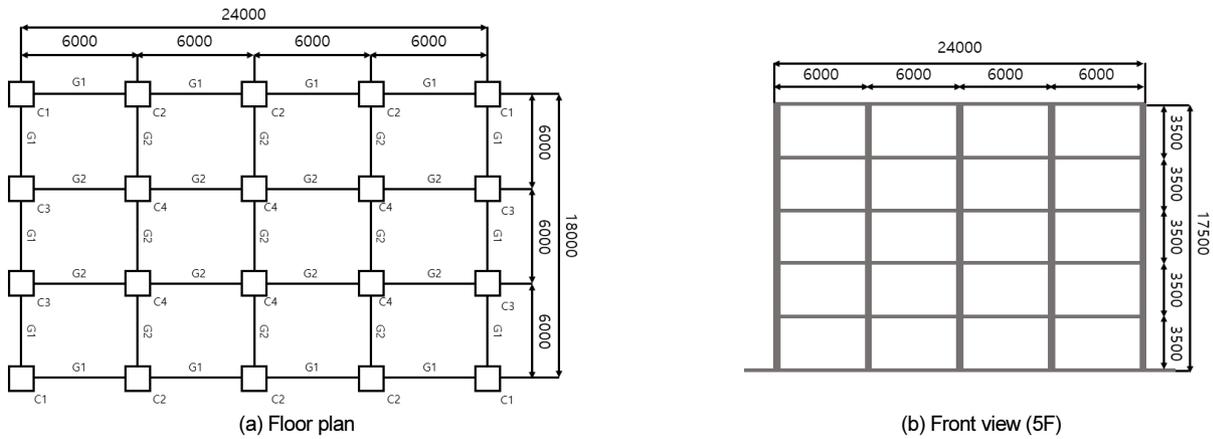
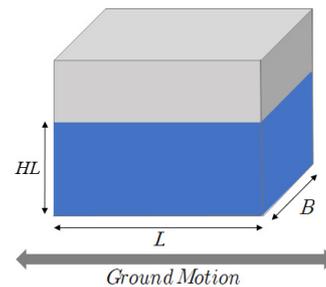


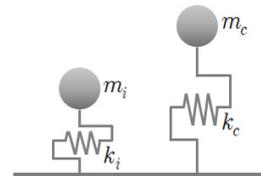
Fig. 2. Information of the RC structure (unit : mm)

Table 1. Design conditions

| | | Conditions | |
|------------------------------|-----------|-----------------|-----------------------|
| Type | | Office | |
| Total stories | | 5, 10, 15, 20 | |
| Area | | 24 m X 18 m | |
| Materials | Concrete | $f_{ck}=24$ MPa | |
| | Steel | $f_y=400$ MPa | |
| Design loads | Dead load | Office | 4.5 kN/m ² |
| | | Roof | 5.5 kN/m ² |
| | Live load | Office | 4.0 kN/m ² |
| | | Roof | 1.0 kN/m ² |
| Seismic zone (S) | | I (0.22) | |
| Ground | | S_D | |
| Importance factor | | 1.0 | |
| Response modification factor | | 5.0 | |



(a) Rectangular water tank



(b) spring-mass model of water tank

Fig. 3. Analysis model of the water tank

3.1.2 대상 물탱크

대상 물탱크는 직사각형의 강재 탱크로, 벽체 두께가 20 mm인 것으로 가정한다. 탱크 용량은 소화수조 및 저수조의 화재안전기준[11]에 따른 최소 소화수조 저수량 기준을 고려하여 5층, 10층, 15층, 20층 RC 건축물에 대해 각 건축물의 총중량의 약 2%인 30, 60, 90, 120 m³으로 가정한다. 2장에서 분석한 바와 같이 물탱크의 동적거동은 탱크의 수위에 대한 진동방향의 길이 비(L/HL, 이하 형상비)에 지배되는 것을 고려하여 물탱크의 형상비를 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0로 설정한다.

3.2 해석 모델

대상 RC 건축물의 모델링과 지진응답해석은 비선형 동적해석프로그램 CANNY[12]를 이용한다. RC 건축물은 비선형 축, 전단, 휨 거동을 나타내는 스프링을 가지는 선형요소로 가정하고, 스프링의 비선형 거동 특성은 기존 연구[13]에서 RC 골조에 주로 사용된 모델 및 특성값을 적용한다.

물탱크의 동적해석모델은 Housner의 연구에 따라 Fig. 3과 같이 충격

성분과 대류성분으로 분리하여 각 성분의 유효 질량과 탄성 수평강성을 가지는 일반화된 1 질점계 spring-mass 모델로 가정한다. 각 성분의 유효질량 및 고유주기는 식 (9) ~ 식 (12)와 같이 산정하며, 충격 및 대류성분의 감쇠비는 각각 5%와 0.5%로 적용한다. 각 성분을 나타내는 SDOF 모델은 기존 연구 [14] 및 ASCE 7, Eurocode 8[15]에서 채택된 바와 같이 각각 독립적으로 해석하여 결과를 조합한다.

$$m_i = \frac{\tanh(0.866(L/HL))}{0.866(L/HL)}m \tag{9}$$

$$m_c = (0.264(L/HL)\tanh(3.16(HL/L)))m \tag{10}$$

$$T_i = 2\pi\sqrt{(m/k)} \tag{11}$$

$$T_c = \frac{2\pi\sqrt{L}}{\sqrt{3.16g\tanh(3.16(HL/L))}} \tag{12}$$

여기서, m_i , m_c 는 각각 충격성분 및 대류성분의 유효 질량, m 은 전 유체질

Table 2. Effective mass and natural period of the tanks

| Aspect ratio (L/HL) | m_i/m | m_c/m | Ti (sec) | Tc (sec) |
|---------------------|---------|---------|----------|----------|
| 0.5 | 0.94 | 0.13 | 0.93 | 1.38 |
| 1.0 | 0.81 | 0.26 | 0.97 | 1.96 |
| 1.5 | 0.66 | 0.38 | 0.95 | 2.43 |
| 2.0 | 0.54 | 0.49 | 0.97 | 2.88 |
| 3.0 | 0.38 | 0.62 | 0.98 | 3.83 |

량이며, L 은 물탱크의 진동방향으로의 길이, HL 은 물탱크 내 유체의 높이이다. T_i , T_c 는 각각 충격성분 및 대류성분의 고유주기이고, k 는 단위 길이 벽체의 강성, m 은 단위길이 벽체에 작용하는 충격성분 질량을 나타낸다. 해석모델에서 충격성분의 스프링 강성은 ACI 350.3에서 제시하고 있는 바와 같이 물탱크 벽체를 하단부가 고정된 캔틸레버 벽체로 가정하여 단위길이 벽체에 대한 강성으로 산정하고, 대류성분의 스프링 강성은 주기 산정식에서 역산한다. 물탱크의 형상비 변수에 따른 충격성분과 대류성분의 질량비와 고유주기는 Table 2와 같다.

3.3 해석 범위 및 방법

본 장에서는 대상건축물에 물탱크를 고려하지 않은 경우(N), 중량만 고려한 경우(M), 동적해석모델을 고려한 경우(SM)에 대해 건축물의 지진응답특성을 검토하고자 한다. 동적해석모델을 고려하는 경우에는 대상 건축물의 옥상층에 물탱크가 설치된 것으로 가정하고, 건축물 해석 모델의 최상부 보 부재의 중앙부에 3.1절과 3.2절에서 전술한 형상비(0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0) 및 해석모델을 이용하여 물탱크의 충격성분과 대류성분을 나타내는 spring-mass 모델을 각각 건축물에 직렬로 연결하여 해석모델을 작성한다. 입력지진파는 El Centro NS(1940년, PGA=0.357 g)가속도 기록을 이용하며, 국내 S_D 지반 스펙트럼의 지반가속도 크기(0.4 S_{DS})를 고려하여 0.22 g의 최대가속도를 가지도록 scale 조절하여 사용한다.

3.4 해석결과

물탱크를 고려하지 않은 기준 모델(N)의 탄성 고유주기는 층수에 따라 5층 0.7초, 10층 1.24초, 15층 1.63초, 20층 2.04초로 분석되었다. 이는 물탱크의 충격 및 대류 성분 고유주기와 동조되지는 않았으며, 일부 모델(10층 건물, L/HL=0.5탱크 등)에서 건물과 물탱크의 주기 차가 약 10% 수준으로 유사하지만, 건물의 응답 감쇠에 영향을 미치는 대류성분의 질량비(m_c/m_{tot})가 20% 이하로 분석됨에 따라 건물에 설치된 물탱크가 건물의 응답에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 볼 수 있다.

이는 옥상층에 물탱크 해석모델을 고려한 대상 건축물의 지진응답해석 결과를 통해서도 확인할 수 있다. Fig. 4에 물탱크 고려 변수에 따른 대상 건축물의 지진응답해석결과로 고유주기, 수평지진하중계수(V/W, 전체 중량에 대한 밀면전단력 비)를 비교하여 나타낸다. 물탱크를 고려한 물탱크의 중량 및 동적해석모델을 고려한 모델(M, SM)의 고유주기는 기준 모델(N)에 비하여 2%~3% 정도로 미미하게 증가하였다. 수평지진하중계수 역시 기준 모델에 비하여 5% 이내로 감소함을 보임에 따라 물탱크의 지진하중

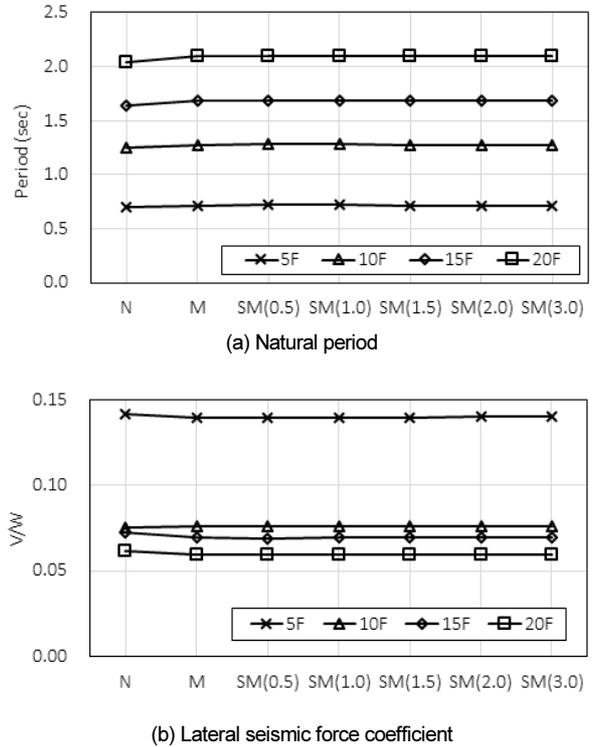


Fig. 4. Analysis results

Table 3. Analysis variables

| Variables | Values |
|------------------------------|--|
| Aspect ratio (L/HL) | 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 |
| Building story (F) | 5, 10, 15, 20 |
| Installation location (z/h*) | ground (0.0), middle (0.5), top (1.0) |
| Earthquake wave | El Centro NS, Hachinohe EW, Artificial (S_D) |

* z = Height of water tank, h = Average building/structure roof height relative to the base elevation.

을 결정하기 위한 설계스펙트럼 가속도에 영향을 미치는 정도는 아닌 것으로 판단된다. 따라서 건축물 내 상부 층에 설치된 물탱크의 지진응답해석 시 입력지진파로 물탱크를 고려하지 않은 건축물의 지진응답해석에서 도출한 층응답가속도를 적용하여도 무방할 것으로 판단된다.

4. 건축물에 설치된 물탱크의 지진응답해석

4.1 해석 변수

본 장에서는 건축물 내 상부 층에 설치된 물탱크의 지진응답해석을 수행하여 물탱크의 형상비, 대상 건축물의 높이, 물탱크의 설치위치, 지진파의 종류에 따른 물탱크의 지진하중을 평가하고자 한다. 물탱크의 해석 변수는 Table 3과 같다. 3장에서 사전 해석한 것과 동일한 건축물과 물탱크 형상비를 고려하고, 물탱크의 설치 위치는 건축물의 지층, 중간층과 최상층으로 고려하였다. 또한 지진파의 주기 특성에 따른 물탱크의 충격성분 또는 대류성분의 응답종류 여부를 검토하기 위하여 El Centro NS(1940년, PGA=0.357 g)와 Hachinohe EW(1968년, PGA=0.21 g)와 국내 S_D 지반

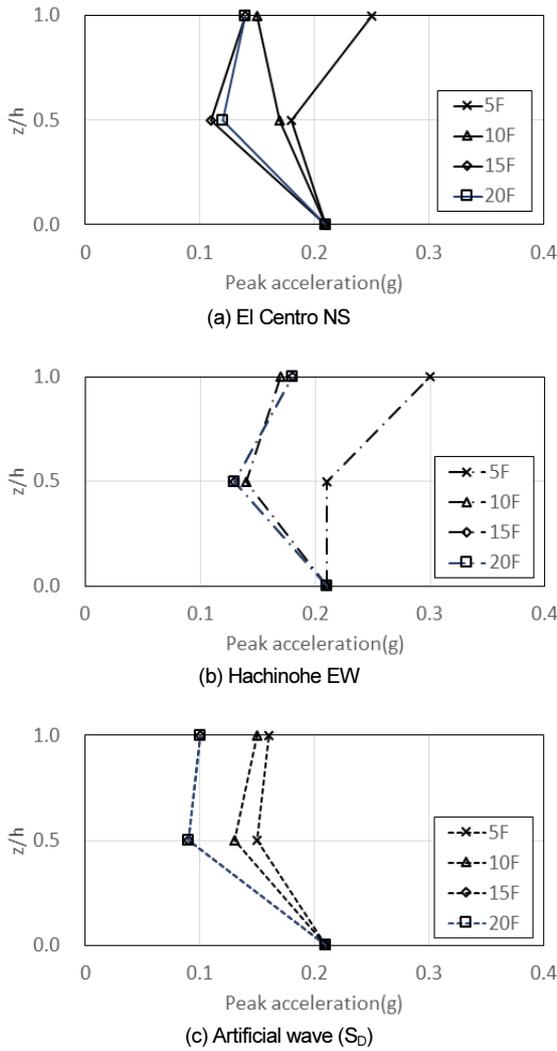


Fig. 5. Distribution of response acceleration

설계스펙트럼에 부합하는 인공지진파 1종에 대해 해석을 수행하고자 한다. 해석에 사용된 세 지진파 중 EI Centro NS파는 다른 지진파와 최대가속도가 유사한 수준을 가지도록 scale(0.6) 조절하여 사용한다.

4.2 해석 모델 및 방법

건축물과 물탱크의 해석모델은 3장에서 전술한 것과 동일하다. 먼저, 3 종류의 지진파에 대해 대상 건축물을 해석하고, 층수별 건축물의 중간층과 최상층 응답가속도 시간이력을 물탱크 해석모델의 입력지진파로 사용한다. 이 때, 건축물 지층에 설치된 물탱크는 건축물의 응답에 영향을 받지 않는 것으로 가정하고, 원 지진파를 입력지진파로 사용한다.

4.3 대상 건축물의 층응답가속도

3종의 입력지진파에 대한 대상 건축물의 지반($z/h=0$), 중간층($z/h=0.5$), 최상층($z/h=1$)의 최대응답가속도는 Fig. 5와 같다. 대상 건축물의 층응답가속도는 입력지진파에 비해 전반적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 5층 건축물의 경우 EI Centro NS파와 Hachinohe EW파 적용 시 최상층 응

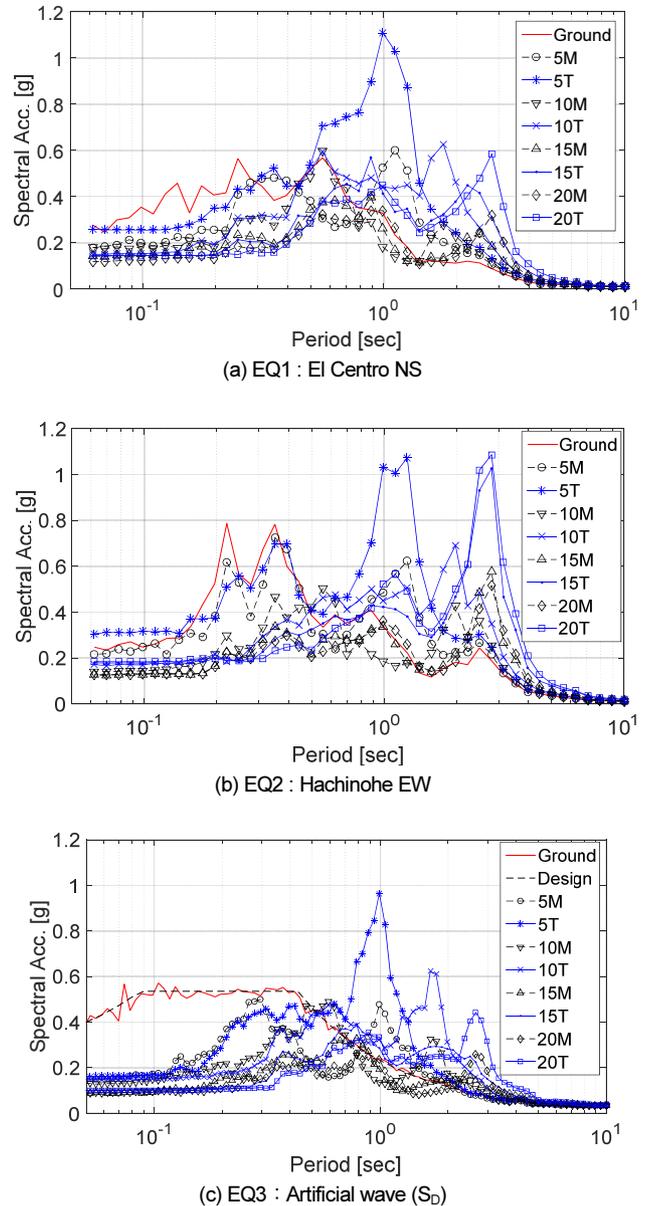


Fig. 6. Floor response spectrum

답가속도가 지반 가속도에 비해 증가하였지만, 그 외 해석모델에서는 층응답가속도가 지반가속도에 비해 저감되었다. 층응답가속도의 주기특성은 Fig. 6과 같고, 범례에서 숫자는 건축물의 총 높이를 의미하며, M은 중간층, T는 최상층 응답을 의미한다.

4.4 물탱크의 지진하중응답 특성

물탱크의 형상비(L/HL), 건축물 내 설치 위치($z/h=0, 0.5, 1.0$) 및 지진파에 따라 물탱크에 작용하는 지진하중을 Table 4에 요약하였다. 지진하중은 물탱크 중량으로 기준화하여 지진하중계수(V/W)로 평가하였으며, 충격성분과 대류성분에 의한 지진응답하중을 SRSS(Square Root Square Sum) 방법으로 조합한 결과이다. Fig. 7에서 형상비(L/HL) 0.5, 1.0 2.0 3.0에 대하여 지진파별 지진하중을 건축물 설치 층에 따라 나타내고 KBC 2016에 제시된 등가정적하중(F_p)과 일본의 FRP 기준의 설계하중과 비교

Table 4. Analysis result – seismic force(V/W) of water tanks

| | L/HL | 0.5 | | | 1.0 | | | 1.5 | | | 2.0 | | | 3 | | |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | z/h | 0 | 0.5 | 1 | 0 | 0.5 | 1 | 0 | 0.5 | 1 | 0 | 0.5 | 1 | 0 | 0.5 |
| EQ1 | 5F | 0.25 | 0.38 | 0.83 | 0.18 | 0.29 | 0.64 | 0.14 | 0.21 | 0.44 | 0.12 | 0.17 | 0.34 | 0.06 | 0.09 | 0.19 |
| | 10F | 0.25 | 0.17 | 0.36 | 0.18 | 0.15 | 0.34 | 0.14 | 0.13 | 0.24 | 0.12 | 0.11 | 0.19 | 0.06 | 0.05 | 0.09 |
| | 15F | 0.25 | 0.27 | 0.39 | 0.18 | 0.17 | 0.28 | 0.14 | 0.19 | 0.31 | 0.12 | 0.17 | 0.25 | 0.06 | 0.07 | 0.11 |
| | 20F | 0.25 | 0.28 | 0.36 | 0.18 | 0.21 | 0.29 | 0.14 | 0.19 | 0.32 | 0.12 | 0.32 | 0.57 | 0.06 | 0.08 | 0.12 |
| EQ2 | 5F | 0.31 | 0.4 | 0.69 | 0.24 | 0.32 | 0.58 | 0.22 | 0.27 | 0.43 | 0.17 | 0.21 | 0.34 | 0.09 | 0.11 | 0.19 |
| | 10F | 0.31 | 0.18 | 0.43 | 0.24 | 0.29 | 0.54 | 0.22 | 0.24 | 0.38 | 0.17 | 0.19 | 0.29 | 0.09 | 0.07 | 0.13 |
| | 15F | 0.31 | 0.28 | 0.38 | 0.24 | 0.22 | 0.35 | 0.22 | 0.3 | 0.56 | 0.17 | 0.46 | 0.8 | 0.09 | 0.11 | 0.18 |
| | 20F | 0.31 | 0.29 | 0.38 | 0.24 | 0.22 | 0.36 | 0.22 | 0.25 | 0.58 | 0.17 | 0.56 | 1.11 | 0.09 | 0.12 | 0.2 |
| EQ3 | 5F | 0.16 | 0.31 | 0.67 | 0.12 | 0.23 | 0.48 | 0.09 | 0.16 | 0.34 | 0.08 | 0.12 | 0.25 | 0.06 | 0.08 | 0.14 |
| | 10F | 0.16 | 0.14 | 0.27 | 0.12 | 0.13 | 0.23 | 0.09 | 0.11 | 0.17 | 0.08 | 0.1 | 0.14 | 0.06 | 0.07 | 0.09 |
| | 15F | 0.16 | 0.17 | 0.25 | 0.12 | 0.12 | 0.19 | 0.09 | 0.13 | 0.2 | 0.08 | 0.11 | 0.16 | 0.06 | 0.07 | 0.09 |
| | 20F | 0.16 | 0.19 | 0.28 | 0.12 | 0.14 | 0.2 | 0.09 | 0.16 | 0.27 | 0.08 | 0.2 | 0.33 | 0.06 | 0.09 | 0.12 |

* EQ1: El Centro NS, EQ2 : Hachinohe EW, EQ3 : Artificial Wave(SD)

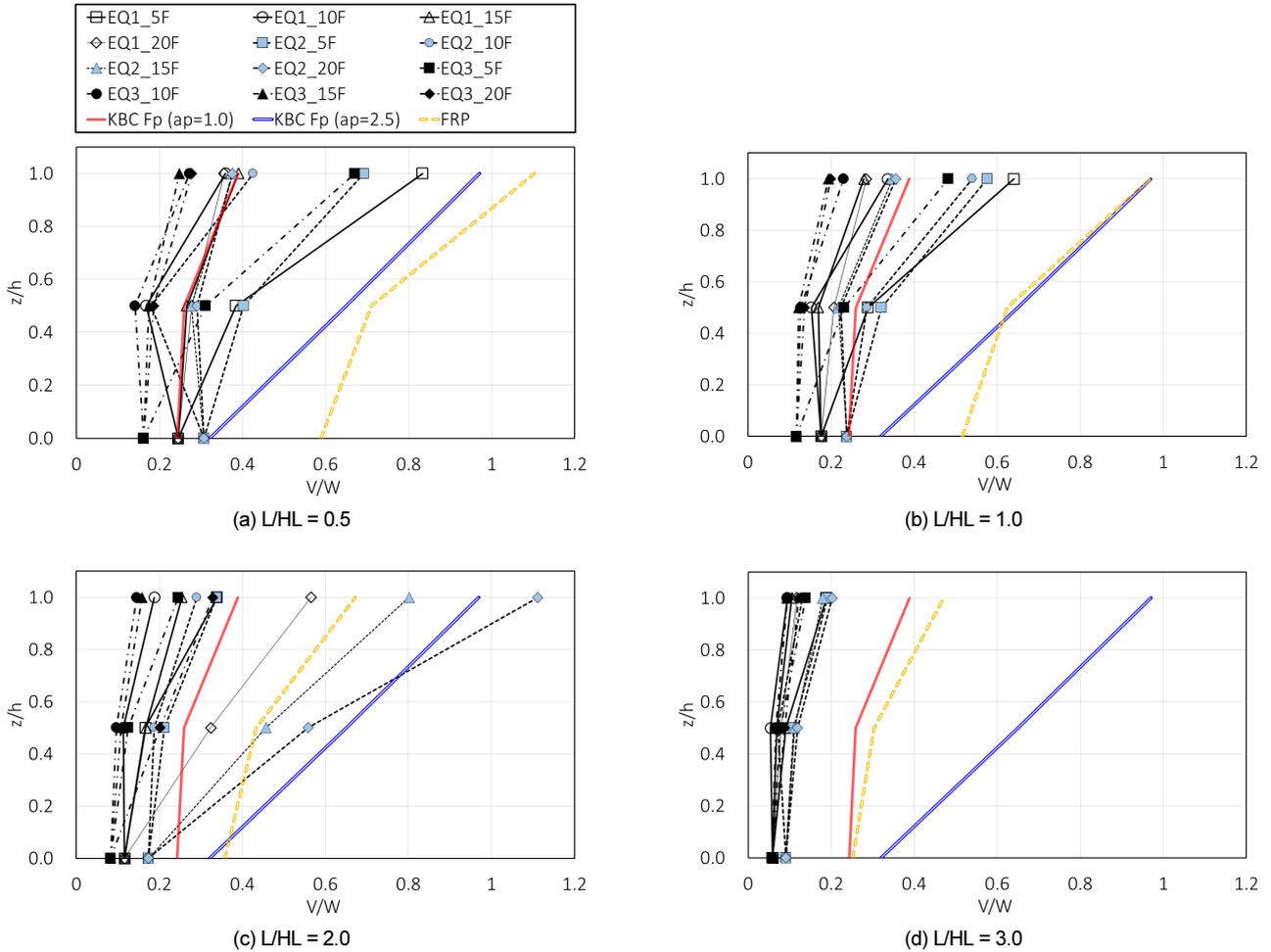


Fig. 7. Response amplification ratio

하였다. KBC 2016에 따른 비구조요소 등가정적하중(Fp)의 산정 시, 반응 수정계수(R_p)는 2.5, 중요도계수(I_p)는 1.5, 증폭계수(a_p)는 1.0과 2.5를 각각 적용하였다. 지반 위치($z/h=0$)에서는 설계하중(F_p)이 하한 기준 이하로 계산되어 하한 값인 0.24를 적용하였다. FRP 기준에서는 국내 설계하중

조건과 유사하도록, 중요도계수(I)는 1.5, 지역계수(Z)는 1.0, 표준진도 (k_{OH}) 0.22를 적용하고, 각 기준의 설계하중 산정 시 물탱크의 중량 및 설치 위치는 변수해석과 동일하게 적용하였다.

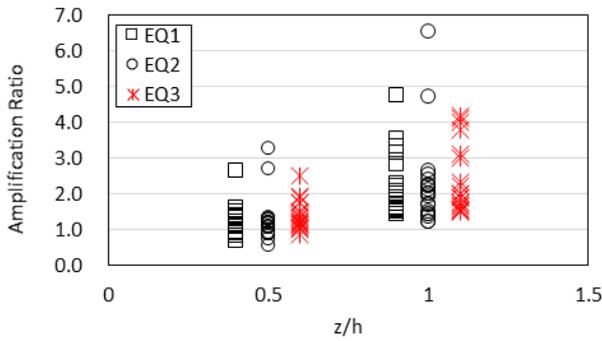


Fig. 8. Response amplification ratio by installation location of the water tank in the building

4.4.1 건물 내 설치위치에 따른 지진하중응답 분포

본 연구에서 건물의 비선형 지진응답해석을 통해 산정한 층응답가속도가 물탱크의 입력지진파로 사용되었는데, 층응답가속도가 지반 가속도에 비해 대부분 저감되었음에도 불구하고 물탱크의 지진하중응답은 Fig. 7과 같이 물탱크가 상부층에 설치될수록 증가하는 경향을 나타내었다. 건물 내 설치 높이(z/h)에 따라 바닥층에 설치된 물탱크를 기준으로 상부층에 설치된 물탱크의 지진하중응답의 증폭비를 지진파별로 Fig. 8에 나타낸다. 중간층(z/h=0.5)에 설치된 경우에는 지진파별(EQ1, EQ2, EQ3)로 각각 평균 1.27, 1.29, 1.41, 최대 2.67, 3.29, 2.50으로, 최상층에 설치된 경우에는 평균 2.27, 2.26, 2.38, 최대 4.75, 6.53, 4.19로 분석되었다. 여기서 증폭비는 지반에 작용하는 입력지진에 대한 건물의 응답비와 층응답가속도에 대한 물탱크의 응답비가 모두 반영된 것으로, KBC 2016의 비구조요소 등 가정적하중에서 고려하고 있는 비구조요소의 설치 높이에 따른 응답 증폭비의 최대값 $([1+2 \times z/h] \times \alpha_p)$, 중간층일 때 5, 최상층일 때 7.5) 이하인 것으로 나타났다. 다만, 설계식에서는 건물의 응답은 바닥에서 최상층에서 1~3배까지 선형 증가하는 것으로 반영하고, 비구조요소의 응답증폭계수는 강성에 따라 1 또는 2.5를 적용하는데, 본 해석에서 건물의 응답이 비탄성 거동에 의해 저감된 것을 고려하면 물탱크 자체의 응답증폭비는 설계식에서 제시하고 있는 2.5보다는 크게 발생되었을 가능성이 있다.

Fig. 7에서 물탱크의 지진하중응답은 탱크의 형상비, 탱크와 층응답가속도의 응답주기 특성에 따라 큰 차이를 보이는 반면 비구조요소 등 가정적하중은 물탱크의 형상비와 관계없이 일정한 값을 가진다. 등가정적하중 산정 시 응답증폭계수를 1.0으로 적용한 경우에는 물탱크 형상비가 2.0 이하일 때 지진하중응답이 설계하중을 초과하는 경우가 발생하였고, 형상비가 3.0인 경우에는 설계하중이 지진하중을 상회하였다. 반면 응답증폭계수를 2.5로 적용한 경우에는 대부분의 지진하중응답이 설계하중 이하로 나타났다. 한편 일본 FRP 기준의 설계하중은 형상비에 따라 지진하중이 감소하였으며, 대부분의 지진하중 응답 해석결과를 상회하는 것으로 나타났다.

4.4.2 물탱크의 형상비에 따른 지진하중응답 특성

Fig. 7에서 물탱크의 형상비가 증가할수록 대체로 지진하중응답은 감소하는 경향을 나타내었다. 형상비가 증가함에 따라 가속도에 민감하지 않은 대류성분의 유효질량이 증가하기 때문으로, 이와 같은 결과는 Fig. 1

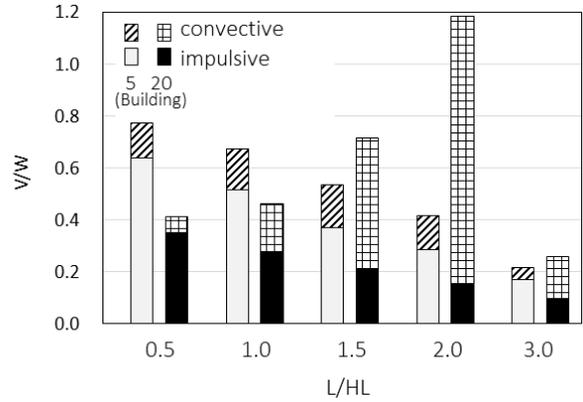


Fig. 9. Seismic force response by aspect ratio(L/HL) of water tank (Hachinohe EW, top)

에서 ASCE 기준의 하중을 통해서도 유추할 수 있었다. 한편 형상비 2.0인 물탱크 중 15층과 20층 건물의 최상층에 설치된 경우에는 Hachinohe EW(EQ2) 지진파를 적용했을 때 지진하중이 크게 증폭되었는데, 이는 동지진파에 의한 층응답가속도의 공진주기 성분이 물탱크의 대류성분 주기와 거의 일치함에 따라 밀면전단력이 크게 증폭되었기 때문이다. 각 건물의 탄성주기는 1.64초, 2.04초로 대류성분 주기 2.88초와 동조되지 않았지만, 비선형 거동에 따라 층응답가속도 성분이 장주기화 되면서 대류성분 주기와 유사하게 되었다. 특히 물탱크의 형상비가 2.0 일 때 대류성분의 질량비가 전체 수량의 약 50%에 해당하기 때문에 밀면전단력이 증가한 것이다.

이는 5층과 20층 건축물 최상층에 설치된 물탱크 모델의 각 성분별 지진응답하중을 비교하여 나타낸 Fig. 9에서도 확인할 수 있다. 5층 건물에서는 물탱크의 형상비가 증가할수록 충격성분에 의한 지진하중을 포함한 전체 지진하중이 전반적으로 감소한 반면 20층 건물의 경우 형상비가 증가할수록 대류성분에 의한 지진하중이 크게 증가하였다. 이러한 원인으로 Fig. 7에서 20층 상부에 설치된 형상비 2.0의 물탱크는 비구조요소 설계하중을 초과하는 지진하중이 발생한 것으로 판단된다.

5. 결론

2016년 경주지진 및 2017년 포항지진으로 인해 건축물 내 설치되는 물탱크의 벽체 파손 및 지지구조 좌굴 등의 피해가 발생함에 따라 물탱크의 내진설계가 요구되고 있다. 본 연구에서는 물탱크의 국내외 내진설계 기준별 설계하중을 비교하고, 건축물 내 설치되는 물탱크에 대한 변수별 지진응답 해석을 수행하여 주요 변수의 영향을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 지반에 설치된 다양한 형상비를 가지는 물탱크에 대하여, KBC 2016 비구조요소의 등가정적하중, 미국의 ASCE 7 중 액체저장용기 설계기준 및 일본의 FRP 수조 구조설계계산법에 따라 설계지진하중을 산정한 결과, ASCE 7과 FRP 수조 구조설계계산법의 설계하중은 물탱크의 형상비가 증가함에 따라 설계하중이 감소하였다. 이는 두 기준 모두 물탱크의 형상비에 따라 달라지는 유효중량을 고려하기 때문이다. 반면 비구조요소 등가정적하중은 물탱크의 형상비에 관계없이 일정함을 보였다. 설계

하중 산정 시 응답증폭계수를 최소값($\alpha_p = 1.0$)으로 적용할 경우 형상비 및 물탱크 강성에 따라 ASCE 7의 동적하중보다 부족한 경우가 발생하였지만, 하한기준을 적용할 경우 대체로 동적하중을 상회하였다.

- 2) 건축물 총중량의 약 2%에 해당하는 물탱크를 설치하는 경우 물탱크가 건축물의 응답에 미치는 영향을 분석한 결과, 대상 건축물의 고유주기 및 수평지진하중계수(V/W)는 물탱크가 설치되지 않은 기준모델에 비해 약 2~3% 정도 증가하였다. 이에 따라 연구대상 물탱크는 건축물의 응답특성에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.
- 3) 건축물에 설치되는 물탱크의 응답특성을 평가하기 위하여 건물의 지진 응답해석을 통한 층응답가속도를 산정하고, 물탱크의 형상비, 지진파 종류, 건물 층수를 변수로 물탱크의 동적해석모델에 대한 지진응답해석을 수행하였다. 물탱크의 형상비가 증가할수록 지진하중은 전반적으로 감소하는 경향을 나타내었지만, 형상비가 크더라도 층응답가속도와 물탱크의 대류성분의 주기가 일치하고 유효중량이 큰 경우에 지진하중응답이 크게 증가함에 따라 물탱크의 형상비 및 건물 주기에 따라 설계 시 슬로싱 응답 거동 특성을 고려할 필요가 있다.
- 4) 지진파 및 건물 층수에 따른 지진응답하중을 각 기준에 따른 물탱크의 설계하중과 비교하면, KBC 2016의 등가정적하중은 응답증폭계수를 1.0을 적용할 경우 물탱크의 형상비가 3.0인 경우를 제외하고 지진하중이 설계하중을 초과하는 경우가 다수 발생했으며, 응답증폭계수 2.5를 적용할 경우 설계하중은 대부분의 요구지진응답하중을 상회하였다.

본 논문에서는 국내 S_D 지반의 가속도를 고려하여 최대가속도를 조정 한 관측파 및 인공지진파를 이용하여 특정한 조건에 대해 물탱크의 지진하중응답 특성 및 결과를 분석한 것으로, 추후 연구를 통해 다양한 지반 종류, 지진파 특성 및 건물 구조 형식에 따른 층응답 특성을 고려하여 건물에 설치되는 물탱크의 내진설계 방법을 정립하고 관련 설계계수를 제시할 필요가 있다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 국토교통부 도시건축연구개발사업의 연구비지원(18AUDP-C146352-01)에 의해 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. Architectural Institute of Korea, Site Inspection and Damage Investigation of Buildings by Earthquakes in Gyeongju and Pohang. Seoul: c2018, 347 p.
2. Ministry of Public Safety and Security, Seismic Design Standard and Commentary for Fire Protection Facilities. Seoul: c2016, 68 p.
3. Architectural Institute of Korea, Korean Building Code and Commentary 2016. Seoul: c2016, 1221 p.
4. American Society of Civil Engineers, ACE/SEI 7-16, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. Reston, VA: c2017, 822 p.
5. American Concrete Institute, Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary (ACI350,3-06). Farmington Hills, MI: c2006, 61 p.
6. American Water Works Association, ANSI/AWWA D100-11 Welded Carbon Steel Tanks for Water Storage. Denver, CO: c2011, 204 p.
7. Japan Architecture Center, Recommendation for Seismic Design and Construction of Building Equipment. Tokyo: c2014, 336 p.
8. Housner GW, Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers. Bulletin of the SSA, 1957;47(1):15-35.
9. Fiber Reinforced Plastic Association of Japan, Calculation Method of Structural Design of FRP Tank. Tokyo: c1996, 98 p.
10. MIDAS Information Technology, MIDAS Gen Analysis and design. Seoul: c2010.
11. National Fire Agency, Fire Safety Standards for Fire Protection Water Tank (NFSC402). c2019.
12. Li KN, CANNY Manual. c2009.
13. Baek ER, Evaluation of Seismic Performance for the Low-Rise Reinforced Concrete Building Considering Vertical and Horizontal Irregularity. PhD Thesis, Pusan National University, 2015 Feb, 209 p.
14. Malhotra PK, Wenk T, Wieland M, Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks. SEI, 2000;10(3):197-201.
15. Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance Part 4: Silos, tanks and pipelines. Brussels: 2006 Jul, 81 p.