

# 진동대 실험을 통한 외부보강형 판넬조립식 물탱크의 내진성능평가

## Seismic Performance Evaluation of Externally Reinforced Panel Water Tank Using Shaking Table Tests

박세준<sup>1)\*</sup> · 원성환<sup>2)</sup> · 최문석<sup>1)</sup> · 김상호<sup>1)</sup> · 정진환<sup>3)</sup>

Park, Se-Jun<sup>1)\*</sup> · Won, Seong-Hwan<sup>2)</sup> · Choi, Moon-Seock<sup>1)</sup> · Kim, Sang-Hyo<sup>1)</sup> · Cheung, Jin-Hwan<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>연세대학교 사회환경시스템공학부, <sup>2)</sup>LS산전, 연세대학교 사회환경시스템공학부, <sup>3)</sup>부산대학교 사회환경시스템공학부

<sup>1)</sup>School of civil and environmental engineering, Yonsei University, <sup>2)</sup>LSIS Co., <sup>3)</sup>Department of civil engineering, Pusan National University

### / A B S T R A C T /

In this study, an externally reinforced structural system for SMC(Sheet Molding Compound) panel water tank, designed according to the Japanese design code, is experimented to evaluate its seismic performance. The test tank is 3m long, 2m wide and 3m high, considering the capacity and size of the shaking table. The measured hydrodynamic pressures are found to be approximately 70% of the Japanese design code values. It may be partially due to the convex shape effect of the unit panels. The analytical results of externally reinforced system based on the measured dynamic water pressures are found in good agreement with the test results. If the design hydrodynamic pressures are estimated properly, the proposed analytical model for the externally reinforced water tank becomes a useful design tool and the Japanese design code is found to provide a safe design for the external frames of SMC panel water tank.

**Key words:** Panel water tank, Externally reinforced structural system, Shaking table test, Seismic performance evaluation

## 1. 서론

국내 내진설계는 초고층빌딩, 장대 교량, 대형 시설물 뿐 아니라 일반 주거 시설물인 아파트와 기숙사에 이르기까지 다양한 구조물로의 적용이 보편화되고 있다. 최근 건물의 대형화와 함께 물탱크의 용량도 증가되고 있으나, 건물의 옥외 또는 지하에 설치되는 물탱크의 경우 내진설계의 도입이 미비되어있다. 지진 발생 시에는 상수도시설의 파괴로 물의 공급도 원활하지 않게 되어 물탱크에 저장된 물은 중요한 용수가 된다. 일본 고베지진 발생 후 상수도시설의 피해로 음용수의 약 75%가 전면 공급 중단됨에 따라 150만명 이상의 거주자들이 용수 없는 생활을 하였다[1]. 이처럼 건물에 설치되는 물탱크의 경우 내진성능을 가져야하며 관련 연구가 필요한 실정이다. 우리나라의 건축구조설계기준에는 건물의 연면적과 층수에 따라 별도의 지진하중 산정식을 마련하고 있지 않으며, 구조물의 연면적, 층수, 행정구역에 따라 중요도계수와 지역계수를 설계지반가속도에 적용하여 최대지반

가속도를 산정한다[2]. 내진등급과 중요도계수에 맞추어 최대지반가속도를 산정할 수는 있으나 외벽, 칸막이벽에 작용하는 변동수압에 관한 구체적인 설계기준이 마련되어 있지 않다. 일본의 경우에는 FRP 수조 구조설계 산법에 물탱크에 대한 설계기준이 따로 마련되어 있으며[3], 물탱크의 내진 설계에서는 Housner의 식에 기초해 내진력을 추정한다[4, 5].

본 연구에서는 일본의 물탱크 설계기준에서 제시하는 지진시 변동수압에 따라 외부보강시스템을 설계하였으며, 지진 진동대 실험을 통하여 외부보강 프레임의 구조적 응답을 측정하고 설계식과 비교·분석하였다. 진동대 실험은 물탱크의 파괴양상을 분석하기보다는 지진하중에 따라 외부보강시스템에 작용하는 구조적 응답을 측정하여 일본의 물탱크 설계기준과 비교·분석하는데 목적을 두었다. 따라서 설계지반가속도 0.4g에서 안전성을 확보하도록 설계하였으며 실험 시에는 0.154g를 인공지진파로 만들어 사용하였다.

## 2. 외부보강형 판넬조립식 물탱크의 내진설계

### 2.1 국내의 설계기준

국내의 경우 KS B 6283의 액체저장탱크에 대한 내진설계기준과 건축

\*Corresponding author: Park, Se-Jun

E-mail: sejoonee@yonsei.ac.kr

(Received 2 January 2013; Accepted 10 April 2013)

구조설계기준으로 지진하중을 산정할 수 있다. 그러나 국내에서는 판넬조립식 물탱크에 대한 내진설계기준이 따로 마련되어 있지 않으며, 물탱크가 설치되는 지역계수와 구조물의 내진등급, 중요도계수를 참고하여 물탱크의 설계가속도를 산정할 수 있다. 하지만 이는 고층건물의 설계가속도 산정에 적합하며, 본 연구의 대상이 되는 판넬조립식 물탱크는 일반적으로 건물의 지하나 지상에 설치되므로 중요도계수가 낮아 설계하중이 저평가 될 수 있다. 또한 국내의 KS B 6283와 건축구조설계기준은 원형 유체저장탱크를 기준으로 설계식을 산정한 것이어서 각종 형상의 외부보강형 판넬조립식 물탱크에 적용하기에는 다소 무리가 따른다.

### 2.2 일본의 설계기준

일본의 FRP 수조 구조설계기준(일본강화플라스틱협회, 1996)의 범위는 지상 및 건물 높이 45m 이하의 건물의 내부 및 옥상에 설치되는 용적 50m<sup>3</sup>, 수심 4m 이내의 원통형, 각종, 구형의 FRP 물탱크로 한다.

본 기준에서는 물탱크의 설계 시 가속도응답과 슬로상응답을 별개로 산정하며 상시 정수압은 장기하중, 지진시 변동수압은 단기하중으로 다룬다. 수평진도  $k_H$ 는 물탱크를 설치하는 지역, 중요도, 건물의 구조와 종류 등에 의해 정해지는 계수이며 일반적으로는 식 (1)로 구할 수 있다.

$$k_H = \beta \cdot k_{FH} \leq 2.0 \tag{1}$$

$$k_{FH} = I \cdot K_1 \cdot Z \cdot k_{OH} \tag{2}$$

여기에서,  $k_H$ 는 건물 n층에서의 수평진도이며 바닥면에서의 수평진도

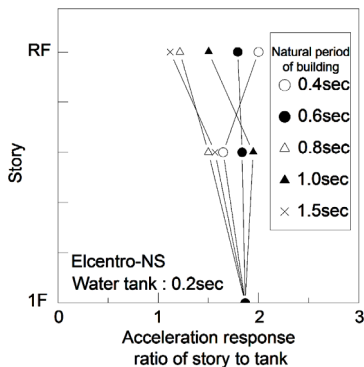


Fig. 1. Scale factor  $\beta$

Table 1. Seismic design standard of water tank

	$I=0.7$	$I=1.0$	$I=1.5$
Rooftop	$k_H = 1.0$ $S_V = 263$	$k_H = 1.5$ $S_V = 375$	$k_H = 2.0$ $S_V = 375$
Middle story	$k_H = 2/3$ $S_V = 135$	$k_H = 1.0$ $S_V = 190$	$k_H = 1.5$ $S_V = 285$
First floor or basement	$k_H = 2/3$ $S_V = 105$	$k_H = 1.0$ $S_V = 150$	$k_H = 1.5$ $S_V = 225$

$k_{FH}$ 에 할증계수  $\beta$ 를 곱하여 구한다. 본 기준에서는 물탱크 본체의 설계용 외력으로써 지진가속도에 비례하는 변동수압을 고려하는데, 이의 계산식은 Housner의 이론에 근거하고 있으나 그것은 물탱크 본체를 강체로 가정한 것이다. 그러나 실제 물탱크는 탄성체이며 이러한 설계식을 실구조물에 적용하기 위해서는 유체와 구조물의 상호작용을 고려해야 한다. 따라서 지금까지의 판넬조립식 물탱크의 진동 실험에서 측정된 변동수압을 다양하게 평가하고, 물탱크의 설치높이(층)를 고려하여 Housner의 이론값을  $\beta$ 로 할증하도록 하였다. 할증계수  $\beta$ 는 건물의 층수별로 층과 물탱크의 가속도 응답비를 실험적으로 구한 값으로써, 지하층 및 지상에서는 2.0, 옥상층에서는 1.5를 사용하며 중간층은 직선보간으로 한다(Fig. 1).

그리고  $I$ 는 중요도계수,  $K_1$ 는 물탱크의 설치위치계수,  $Z$ 는 지역계수이며  $k_{OH}$ 는 바닥면에 작용하는 수평진도이다. 중요도계수는 내진성능이 특히 고려되는 건물 또는 물탱크의 경우  $I=1.5$ , 내진성능이 중시되는 건물 또는 물탱크의 경우  $I=1.0$ , 그 이외의 경우는  $I=0.7$ 을 사용한다. 설치위치 계수  $K_1$ 는 물탱크가 설치되는 건물의 위치에 따라 지진응답계수가 다른 것을 고려하기 위한 계수이며, 지하 또는 지상일 경우  $K_1 = 1.0$ 이며, 옥상의 경우  $K_1 = 2.5$  이다. 본 기준에서 제안하는 바닥면 수평진도( $k_{OH}$ )는 0.4이며 수평진도계수로 사용한다. 따라서 판넬 조립식 물탱크 설계용 표준수평진도는 물탱크와 건물의 동적 특성 등 위에서 언급된 항목들을 고려하여 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

Table 1의 설계용 속도응답스펙트럼의 값  $S_V$ 는 식(3)으로 산출하여 나타낼 수 있다.

$$S_V = I \cdot K_1 \cdot Z \cdot S_{VO} \tag{3}$$

식(3)에서  $I \cdot K_1 \leq 2.5$ 로 하며,  $I$ 는 중요도계수,  $K_1$ 는 물탱크의 설치위치 계수,  $Z$ 는 지역계수,  $S_{VO}$ 는 기준속도응답스펙트럼(cm/sec)의 값이다(Fig. 2).

설계용 수평지진하중은 식 (4)로 계산할 수 있으며 단기하중으로 다룬다. 식 (4)에서  $F_H$ 는 설계용 수평지진하중,  $k_H$ 는 수평진도,  $W$ 는 물탱크의 유효중량이다. 물탱크의 유효중량은 식(5)와 같이 구하며, 물의 유효중량비  $\alpha_T$ 는 물탱크의 형상에 따라 달라지며 식(6), (7)과 같다.

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

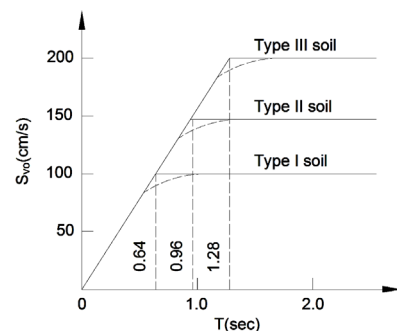


Fig. 2. Velocity response spectrum

$$W = \alpha_T \cdot W_0 \quad (5)$$

$$h/2l \leq 0.75 \text{ 인 경우, } \alpha_T = \frac{\tanh\left(\frac{0.866 \cdot 2l}{h}\right)}{\frac{0.866 \cdot 2l}{h}} \quad (6)$$

$$h/2l > 0.75 \text{ 인 경우, } \alpha_T = 1 - \frac{0.218}{\frac{h}{2l}} \quad (7)$$

설계용 수평지진하중과 물탱크의 형상비를 통해 물탱크에 작용하는 변동수압을 계산할 수 있다. 변동수압은 벽체의 모양과 형상에 따라 그 식이 다르며, 칸막이가 존재할 경우 칸막이의 개수와 간격에 따라 변동수압의 분포가 달라진다. 수평지진하중에 따른 변동수압의 작용은 Fig. 3과 같으며 변동수압의 계산은 Table 2에 나타내었다.

Fig. 3과 Table 2에서  $p_w$ 는 물탱크 측벽에 작용하는 변동수압,  $p_b$ 는 물탱크 벽체 바닥에 작용하는 변동수압,  $\gamma$ 는 물의 비중량,  $k_H$ 는 물탱크의 저면에 작용하는 수평진도,  $h$ 는 물탱크 내부의 수위,  $y$ 는 수면으로부터의 깊이,  $l$ 은 수평진도 방향의 물탱크 길이의 1/2,  $x$ 는 물탱크 중심에서부터 수평방향의 거리,  $P'_{wsn}$ 는 칸막이벽에 작용하는 기준변동수압,  $P_{ws}$ 는 칸막이벽에 작용하는 설계용변동수압,  $l_n$ 은 물탱크의 벽체와 칸막이 또는 칸막이와 칸막이 사이의 길이의 1/2이다.  $D_s$ 는 구조특성계수이며 칸막이 또는 천장부의 과다설계를 방지하기 위하여 허용응력설계 시 외력을  $D_s$ 로 저감하도록 한다. 안전율의 역수로 나타내고 일반적으로 0.5를 사용하도록 제시하고 있다.

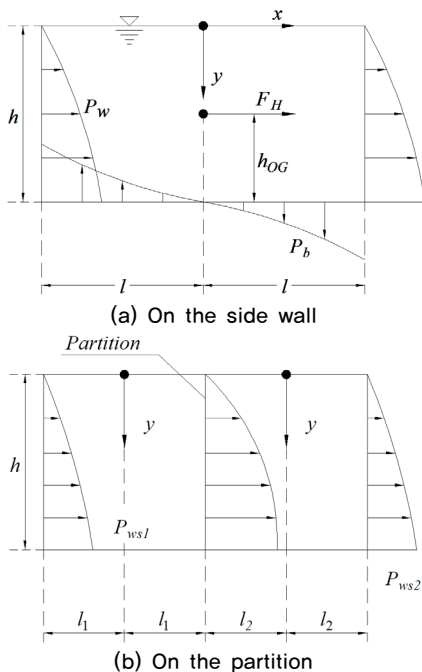


Fig. 3. Distribution of the hydrodynamic pressure of water tank

### 2.3 일본의 설계기준에 따른 작용하중 산정

지진 발생 시 기초를 통하여 외부보강프레임에 전달되는 지진하중을 산정하기 위하여 2.2절에서 언급된 설계식을 사용하였다. 일본 기준에서 제시하는 설계지반가속도 0.4g에서 안전성을 확보할 수 있도록 설계하였으며, 설계 시에 지진하중에 따라 발생할 수 있는 다양한 수압을 Table 3에 나타내었다. 그 중 가장 큰 수압을 사용하여 물탱크의 외부보강시스템을 설계

Table 2. Calculation of the hydrodynamic pressure

Pressure on the side wall	For $h \leq 1.5l$	$p_w = \sqrt{3} \gamma k_H h \left\{ \frac{y}{h} - \frac{1}{3} \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right\} \times \tanh \left( \sqrt{3} \frac{l}{h} \right)$
	For $h > 1.5l$ $y$ is part of $0 \leq y \leq 1.5l$ , $h = 1.5l$ on the above, $y$ is part of $1.5l \leq y \leq h$ , $p_w = \gamma k_H l$	
Pressure on the floor	$p_b = \frac{\sqrt{3}}{2} \gamma k_H h \frac{\sinh \left( \sqrt{3} \frac{x}{h} \right)}{\cosh \left( \sqrt{3} \frac{l}{h} \right)}$ where, in case of $1.5l < h$ , $h = 1.5l$	
Pressure on the partition	For $h \leq 1.5l_n$ ,	$P'_{wsn} = \sqrt{3} \gamma k_H h \left\{ \frac{y}{h} - \frac{1}{3} \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right\} \times \tanh \left( \sqrt{3} \frac{l_n}{h} \right)$ $P_{wsn} = P'_{wsn} \times D_s$
	For $h > 1.5l_n$ , $y$ is part of $0 \leq y \leq 1.5l_n$ , $h = 1.5l_n$ on the above, part of $1.5l_n \leq y \leq h$ , $P'_{wsn} = \gamma k_H l_n$ , $P_{wsn} = P'_{wsn} \times D_s$ . If using both storage parts by the partition, $P_{ws} = P_{wsn} + P_{ws(n+1)}$ .	

Table 3. Combinations of hydraulic pressure

Pressure on the sidewall	(a) 'hydrostatic+hydrodynamic' on acc. response
	(b) 'hydrodynamic' on sloshing response
Pressure on the partition	(a) 'hydrostatic+hydrodynamic' on acc. response*
	(b) 'hydrodynamic+hydrodynamic' on acc. response
	(c) 'hydrostatic+hydrodynamic' on sloshing response*
	(d) 'hydrodynamic+hydrodynamic' on sloshing response

\*for only one side of the tank separated by the partition

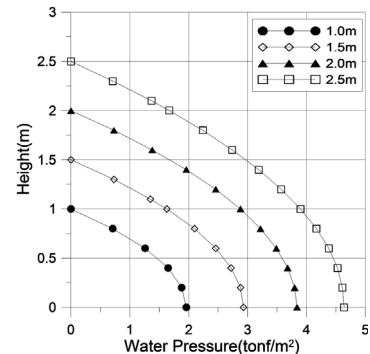


Fig. 4. Design hydraulic pressure

하였다. 수위 1m, 1.5m, 2m, 2.5m의 응답을 고려하여 측벽에 작용하는 설 계변동수압을 Fig. 4에 나타내었다.

### 3. 진동대를 이용한 물탱크의 동적거동 실험

#### 3.1 실험체 형상

SMC(Sheet Molding Compound)판넬을 이용하여 진동대의 용량과 크 기에 따라 길이 3m, 폭 2m, 높이 3m를 갖는 제한적 실물모형 실험체를 제 작하였다. SMC 판넬의 제원은 Fig. 5와 같으며, 본 연구에서 제안하는 외 부보강시스템을 Fig. 6에 나타내었다.

외부보강프레임은 T형 단면을 가지며 측면 SMC판넬 사이에 끼워지는 방식으로 설치된다. 외부보강프레임의 하단에 설치된 하부 수직보강재는 수압에 의해 외부보강프레임에 발생하는 응력을 원활하게 기초로 전달해 주는 역할을 하며 지지판에 의해 지지되어있다. 내부에 설치되는 칸막이는 양쪽방향에서 모두 수압을 받으므로 보강프레임은 I형 단면으로 설계하였 으며 외부보강프레임과 마찬가지로 칸막이용 판넬 사이에 위치한다. 칸막 이용 I형 외부보강프레임의 내진 거동을 함께 평가하기 위하여 가진방향에 위치한 벽체 중 하나를 칸막이용 I형 외부보강프레임으로 바꾸어 실험을 수 행하였다. I형 프레임에 설치되는 하부 수직보강재는 T형 외부보강프레임 에 설치되는 하부 수직보강재와 다른 형상을 가지고 있으며, 외부보강프레 임에 발생하는 응력을 원활하게 기초로 전달한다. 외부보강프레임은 SM490 고강도 강재를 사용하였으며 Fig. 7과 8에 실험체의 형상과 진동대 실험 모습을 각각 나타내었다.

#### 3.2 진동대 실험

##### 3.2.1 실험계획

실험은 부산대학교 양산캠퍼스 지진실험센터의 3자유도를 가진 진동 대를 이용하여 수행하였다. 4개의 액츄에이터와 4개의 압력베어링으로 구 성되어 최대 30톤 구조물의 가진 실험이 가능하다. 진동대의 크기는 5m×5m이며, 최대가속도는 0.85g, 진동수 범위는 0.1Hz~60Hz이다. 본 실험에서의 지진 하중은 건축구조설계기준에서 제시하는 특등급구조물의 최대설계가속도값인 2,400년 재현주기 지진가속도 0.22g의 2/3값인 0.147g과 도로교설계기준에서 제시하는 최대값인 0.154g 중 큰 값인 0.154g를 인공지진파로 만들어 사용하였다(Fig. 9)[2, 6]. 각 실험체는 수 위 0~2.5m까지 다양한 수위로 실험을 계획하였으며 Table 4에 실험단계 를 나타내었다.

##### 3.2.2 측정장비 및 측정위치

물탱크 외부보강프레임의 내진성능을 평가하기 위하여 가속도계 (Accelerometer), 변형률계(Strain gauge) 및 수압계(Pressure gauge) 등 을 사용하여 다양한 구조적 응답을 검토하였다. 지진하중에 따른 물탱크의 각 높이의 응답을 측정하기 위해 1m, 2m, 3m 높이에 가진 방향으로 가속도

계를 설치하였고, 외부보강프레임과 강봉의 변형률을 측정하기 위해 변형 률계를 설치하였다. 또한 물탱크 벽체에 작용하는 수압을 측정하기 위하여

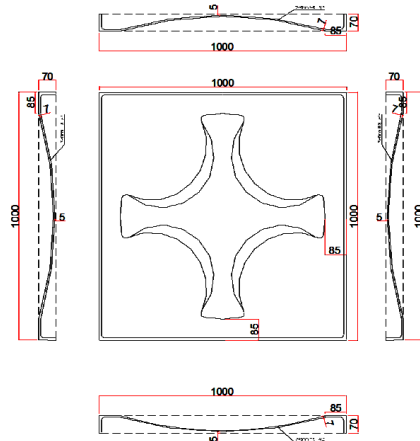


Fig. 5. Panel dimensions(mm)

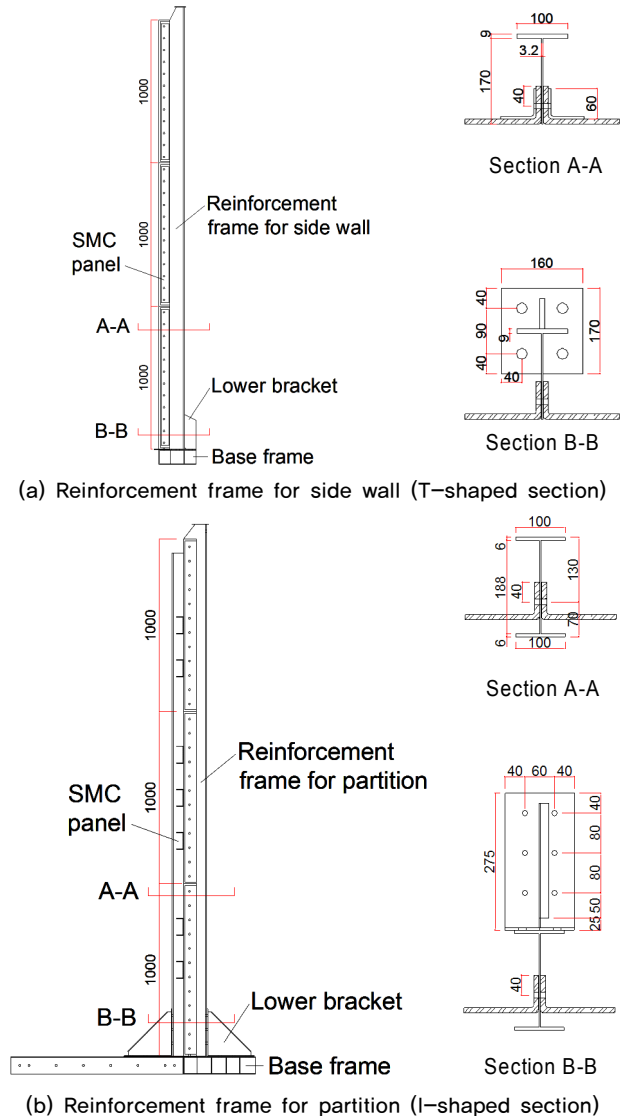


Fig. 6. External reinforcement system (mm)

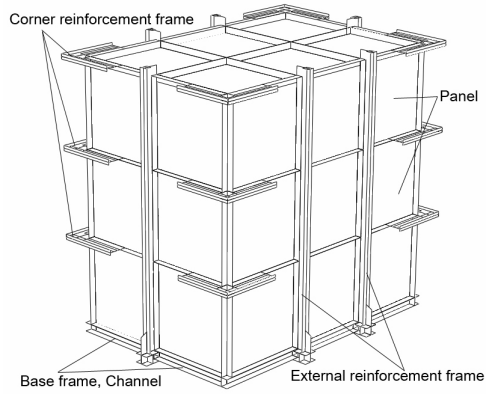


Fig. 7. Schematic drawing of test specimen



Fig. 8. Test arrangement

Table 4. Test cases

Case	Water level(m)	Excitation(g)	
1	0.0	0.154	100%
2	1.5		100%
3	2.0		100%
4	2.5		100%
5	2.5		150%
6	2.5		200%

가진방향에 위치한 벽체에 높이별로 수압계를 설치하였다. Fig. 10에 계측기들의 부착위치를 나타내었다.

### 3.3 진동대 실험결과

#### 3.3.1 수위별 수압 분포

Fig. 11에 진동대가진가속도에 따른 수위별 수압 분포와 설계식에 따른 수압분포를 나타내었다. 수압 분포는 최대저수위 2.5m에서 최대수압이 측정된 시간을 기준으로 도시하였다. 전체적인 수압분포는 정수압분포와 유사하며 가진력에 따라 수압분포가 미소한 차이를 보였다. 또한 진동대실험

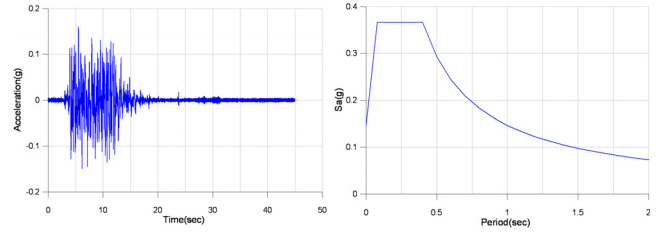
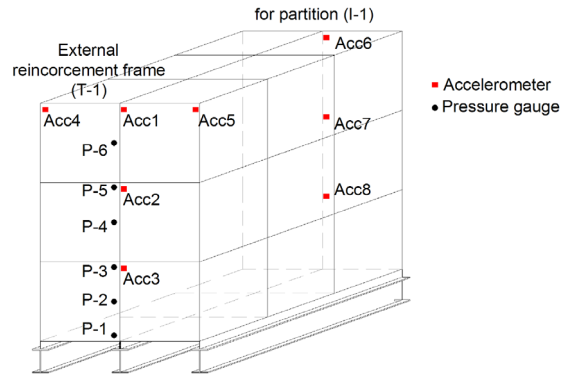
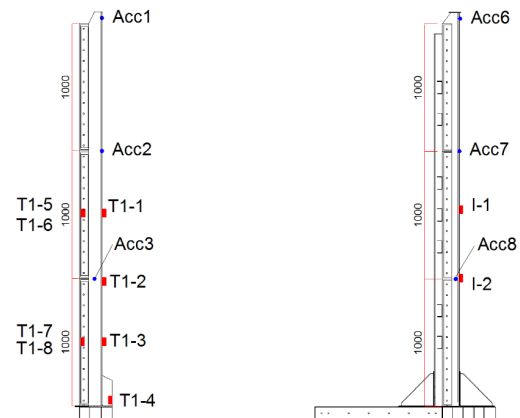


Fig. 9. Artificial seismic excitation



(a) Accelerometers and pressure gauges



(b) Frame for sidewall (T-1) (c) Frame for partition (I-1)

Fig. 10. Measurement locations

에서 측정된 수압분포는 설계식에 따른 수압분포 내로 분석되었으며, 설계값의 약 70% 수준으로 나타났다. 이는 설계기준이 안전율을 고려하고 있기 때문으로 판단된다.

또한 Fig. 12는 지진가속도에 따른 설계기준 진동대실험 변동수압 비를 나타낸 것이다. 가진가속도가 점점 증가함에 따라 계측수압에 대한 설계수압의 비는 점점 증가하는 경향을 보였다. 이는 설계기준으로부터 산정된 변동수압이 수평진동에 비례하여 증가하는 반면, 실제 실험에서는 그 부분의 응답이 반영되지 않은 것으로 판단된다. 따라서 설계기준에서 제시하는 변동수압은 지진하중의 증가에 따라 보수적인 결과를 나타내는 것으로 보인다.

#### 3.3.2 외부보강프레임에 발생한 응력

지진하중에 따른 외부보강프레임의 구조적 안전성을 판단하기 위하여



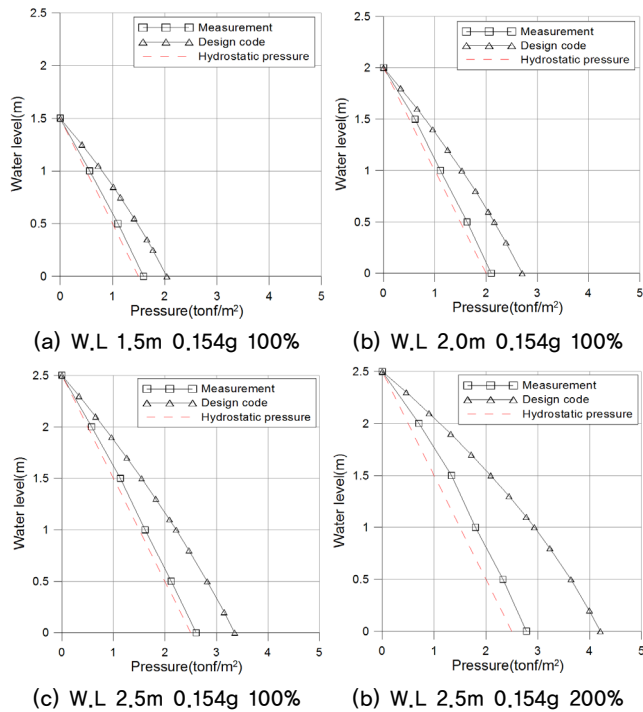


Fig. 11. Hydraulic pressure according to the excitation

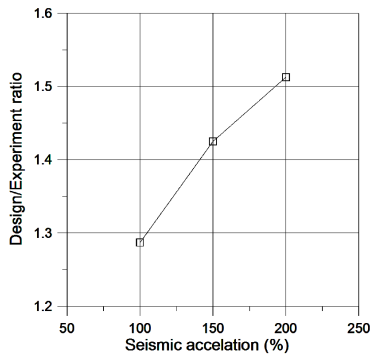


Fig. 12. Ratio of design to experiment pressure

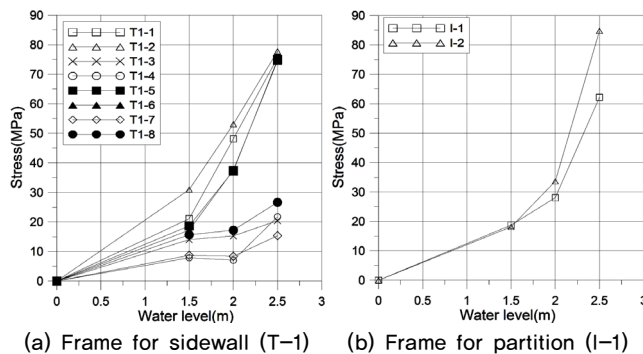


Fig. 13. Relationship of stress and water level

응력을 측정하였다. 측벽에 설치되는 T형 외부보강프레임과 내부 칸막이에 설치되는 I형 보강프레임의 비교를 위하여 T-1과 I-1 위치에서 계측을 하였다. 지진하중 0.154g 100%에 따른 외부보강프레임에서 발생하는 수위별 최대응력을 Fig. 13에 나타내었다.

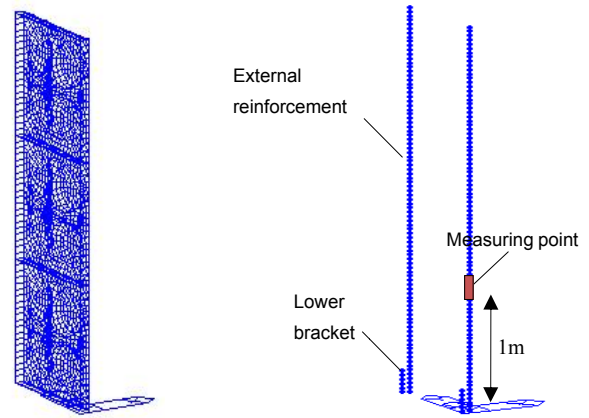


Fig. 14. Modeling for structural analysis

SMC 판넬조립식 물탱크의 수위별 응력 결과를 보면 모든 계측 위치에서 발생응력이 허용응력(SM490강재, 190MPa)의 범위 내로 분석되었다. SMC 판넬 물탱크의 외부보강프레임에 발생한 응력은 일본설계기준식의 90% 수준으로 안전측의 결과를 나타내었다.

#### 4. 외부보강형 판넬조립식 물탱크의 해석적 연구

본 장에서는 일본의 물탱크 설계기준에서 제시하는 변동수압을 이용하여 구조해석을 수행하고 본 연구에서 제시하는 외부보강프레임의 구조적 응답을 분석하였다. 이를 위해 상용 구조해석 프로그램인 MIDAS를 이용하였고, 외부보강프레임에 발생하는 응력값을 도출하여 실험결과와 비교하였다.

##### 4.1 구조해석모형

물탱크 내부에 작용하는 수압은 모든 벽면에서 수위별로 동일하므로 측벽의 한 부분(1m)을 대상으로 외부보강프레임의 발생 응력을 검토하였으며, 해석모형은 Fig. 14와 같다. 각 판넬은 4-node Plate 요소, 외부보강프레임 및 하부수직보강재는 2-node Beam 요소를 사용하여 모형화하였으며, 외부보강프레임은 판넬 단부로부터 각 단면 도심까지의 거리에 요소를 배치하고 판넬과 프레임의 절점을 rigid link를 사용하여 결합하였다. 벽면의 상부는 강봉에 의해 지지되므로 양단에 설치되는 강봉의 스프링계수를 적용하였으며, 하부는 기초프레임에 의해 고정되어 있다고 가정하였다. 그리고 벽면의 측부는 양쪽 모두 인접한 벽면과 대칭적인 거동을 하므로 변위는 허용하고 회전은 구속하였다.

##### 4.2 실험-해석결과 비교

일본물탱크설계기준에서 제시하는 설계변동수압으로 해석한 결과와 실험으로부터 얻은 변동수압으로 해석한 결과, 그리고 실험에서 측정된 응력값을 Fig. 15에 비교하였다. 실험결과에서 분석된 외부보강프레임의 최대발생응력은 68MPa(0.154g, 100%)이며, 설계수압으로 해석한 외부보강프레임의 응력이 85MPa로 진동대실험결과보다 25% 크게 분석되었다.

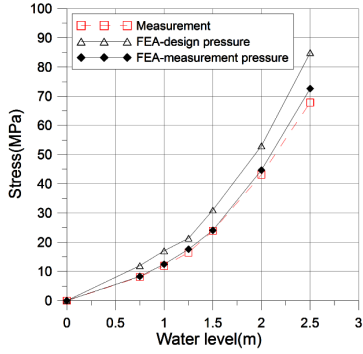
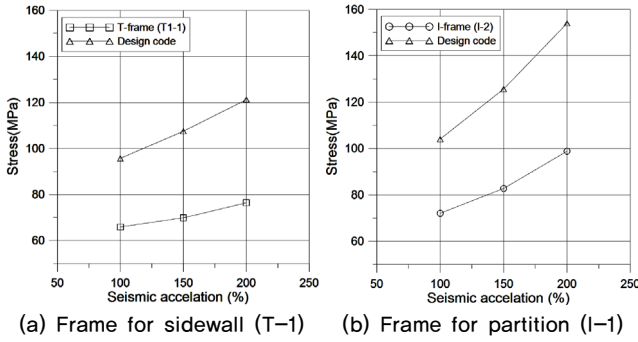


Fig. 15. Comparison with FEA result



(a) Frame for sidewall (T-1) (b) Frame for partition (I-1)

Fig. 16. Relationship of stress and seismic acceleration

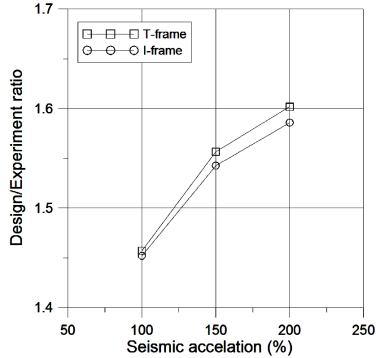


Fig. 17. Ratio of design to experiment stress

실험계측수압으로 해석한 최대응력은 73MPa로 나타났으며 실험결과가 다소 보수적인 응답을 보였다. 설계변동수압으로 해석한 외부보강프레임의 발생응력은 설계값 산정시 안전계수가 포함되어 가장 큰 응답을 나타낸 것으로 보이며, 해석값에 비하여 실험에서 계측된 값이 다소 보수적인 응답을 나타내어 해석이 적절하게 수행된 것으로 판단된다.

### 4.3 지진가속도에 따른 응력 결과

Fig. 16은 2.5m 수위에서 지진가속도의 증가에 따라 설계변동수압으로 해석한 결과와 실험에서 계측된 응력을 비교한 것이며, Fig. 17은 실험에서 계측된 응력에 대한 설계기준의 응력비를 나타낸 것이다. 설계가속도가 100%와 150% 그리고 200%로 증가됨에 따라 외부보강프레임에서 계

측된 응력에 대한 설계수압에 따른 응력의 비는 점점 증가하는 경향을 보였다. 이는 지진가속도의 증가에 따라 설계기준으로 산정된 변동수압의 증가비가 실험에서 계측된 변동수압의 증가비보다 큰 결과로, 외부보강프레임의 발생응력이 변동수압과 비례하여 증가하는 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 일본의 물탱크 설계기준에서 제시하는 지진시 변동수압에 따라 외부보강시스템과 내부칸막이보강시스템을 설계하였으며, 진동대 실험을 통하여 외부보강프레임의 구조적 응답을 측정하고 설계식과 비교·분석하였다.

실험결과, 진동대 가속도에 따른 수위별 변동수압은 일본설계기준식에 따라 산정된 설계값 내로 분석되었으며, 변동수압 계측값이 설계값의 약 70% 수준으로 나타나 일본설계기준에 의한 설계가 매우 안전한 수준으로 평가된다.

실험으로부터 얻은 변동수압 분포를 사용하여 구조해석을 수행한 결과, 외부보강프레임의 구조적 응답은 실험결과와 유사한 결과를 나타내었으며 설계수압이 적절하게 산정된다면 지진시 외부보강프레임에 발생하는 구조적 응답을 적절히 분석할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 지진하중에 따른 물탱크의 전체적인 거동은 뒤틀림이 발생하거나 외부보강프레임에 국부적인 과다 변형 등의 문제는 발생하지 않았으며 전체적으로 안전한 거동을 보였다. 이는 본 연구에서 제안한 외부보강시스템이 지진시 충분한 효율성과 안정성을 입증하는 것이라 판단된다. 보다 경제적인 설계를 위하여 국내에서 사용되는 SMC판넬의 형상에 따른 변동수압 산정에 대한 보완적인 연구와 실험이 필요할 것으로 보인다.

## / 감사의 글 /

본 논문은 한국건설기술평가원의 저장식수의 부식오염방지과 내진성능향상을 위한 고수위 SMC 물탱크용 외부보강재 개발 과제에 지원으로 이루어진 것이며, (주)엔아이씨와 공동으로 수행된 것으로 이에 깊이 감사드립니다.

## / REFERENCES /

1. Park DS, Ha IS, Lim JY, Jung WS, Earthquake case report of water facilities, Korea Water Resources Corporation, c2006, p. 21-23
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korean building code-structural, Architectural Institute of Korea, c2009.
3. Japan Reinforced Plastics Society, Structural design calculations of FRP water tank, c1996.
4. Housner GW, Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers, Bulletin of the Seismological Society of America, 1957;47(1): 15-35.
5. Housner GW, The Dynamic Behavior of Water Tanks, Bulletin of the Seismological Society of America, 1963;53(2):381-387.
6. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Design standard of highway bridge, Korea Road & Transportation Association, c2010.