

# 진동대 실험에 의한 강재 액체저장탱크의 동특성 분석

## Estimation of Dynamic Properties of Steel Liquid Storage Tank by Shaking Table Test

최형석<sup>1)</sup> · 박동욱<sup>1)</sup> · 김성완<sup>1)</sup> · 김재민<sup>2)</sup> · 백은림<sup>1)\*</sup>

Choi, Hyoung Suk<sup>1)</sup> · Park, Dong Uk<sup>1)</sup> · Kim, Sung Wan<sup>1)</sup> · Kim, Jae Min<sup>2)</sup> · Baek, Eun Rim<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>부산대학교 지진방재연구소, <sup>2)</sup>전남대학교 해양토목공학과

<sup>1)</sup>Seismic Simulation Test Center, Pusan National University, <sup>2)</sup>Department of Marine and Civil Engineering, Chonnam National University

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

Liquid storage tank is one of the major infrastructures and generally used to store gases, drinking and utilizing water, dangerous fluids, fire water and so on. According to the recent reports and experiences, the tank structures are damaged in many earthquakes due to their low energy dissipating capacity. Therefore, many researchers have been tried to know the dynamic properties of the tanks including liquids. However, vary limited experimental studies are carried out using relatively small tank models. In this study, a series of shaking table tests are performed with maximum 2 m cubic rectangular liquid storage tanks made of steel to measure the natural frequency and estimate damping coefficient of impulsive and convective mode of the tanks. Especially, the damping values under different shapes and excitation methods are estimated by logarithmic decrement method and half power band-pass method and compared with current design code and standards such as ASCE 7, Eurocode 8 and NZS. Test results show that the impulsive mode damping is around 2% which is proposed by general standards and codes but the impulsive mode damping is 0.13% average that is slightly lower than the code recommendation.

**Key words:** Liquid storage tank, Natural frequency, Damping, Shaking table

## 1. 서론

액체저장탱크의 지진에 의한 손상은 탱크의 형상, 사용되는 재료, 보관하는 유체의 종류에 따라 다양하나, 주요한 파괴모드는 벽체 하부의 좌굴과 바닥 지지부 앵커의 손상이 대표적이다. 이러한 파괴모드는 지진력에 의한 하중의 크기와 액체저장탱크의 동특성에 의해 결정되게 되므로 액체저장탱크의 지진 안전성을 평가하기 위하여 고유주파수, 모드형상과 감쇠의 특성을 확인하는 것이 중요하다.

Housner [1]의 연구에 따르면, 지진시 액체저장탱크 벽면에 작용하는 수압은 수평으로 작용하는 지진가속도와 수조 구조물 자체의 관성에 의해 발생하는 압력과 이로부터 유발되어 내부 유체의 운동에 의한 동수압(hydrodynamic pressure)으로 나누어진다. 전자는 충격압력(impulsive pressure)으로 가진되는 가속도에 비례하며, 후자는 대류압력(convective pressure)으로 충격압력의 영향을 받아 발생하게 되며 유체를 저장하는 용

기 형상에 영향을 받는다. 액체저장탱크 내부에 작용하는 이러한 동적 하중의 분포는 각 모드에 따라 탱크의 벽체에 복잡하게 작용하게 된다.

충격압력은 지진가속도와 작용방향의 변화에 의해 벽체에 급격하게 유동하며 작용하게 되며, 규모 6.5에서 7.5의 지진시 약 10초에서 15초 동안 작용하는 것으로 알려져 있다. 반면에 대류압력은 동일한 지진 규모에서 20초에서 최대 40초까지 정현파 형상으로 작용하게 된다. 이러한 수압의 크기는 수조의 형상에 의해 결정되게 되는데, 대류압력의 작용시간이 충격압력의 작용시간 보다 긴 것은 유체와 저장탱크의 감쇠특성이 다르기 때문이다. 즉, 일반적인 강재와 콘크리트의 감쇠가 2.0%에서 5.0%인데 반하여 물은 0.5%에서 1.0% 정도로 작기 때문이다. 전체적인 자유표면의 유동(sloshing)의 크기는 벽체에 작용하는 유체의 압력변화에 따라 증가하거나 감소하나 일반적으로 대류압력이 충격압력에 의한 것보다 작다 [2].

액체저장탱크의 동특성을 확인하기 위하여 많은 연구들이 수행되었으며 [3-6] 액체저장탱크의 동특성은 수조의 형상과 재질, 내부 유체의 종류와 수위 및 가진력 등에 영향을 받는 것으로 보고되었다. 국내외에서도 형상 및 재질별 수조모형의 동적거동에 대한 실험적 연구를 수행하였으나 [7-11], 그 동특성 분석과 관련한 일련의 연구는 대부분 소규모 모형실험 또는 축소모형에 의한 것이 대부분이며 주로 수위계 및 수압계에 의해 측정된

\*Corresponding author: Baek, Eun Rim

E-mail: ufo35@pusan.ac.kr

(Received August 22, 2016; Revised May 17, 2017; Accepted May 30, 2017)

신호 분석을 통해 저 진동수의 대류모드(convective mode)의 고유주파수 및 모드형상의 확인에 초점이 맞추어졌다.

본 연구에서는 1 m와 1.5 m, 2 m 폭과 길이를 갖고 높이가 1.5 m로 일정한 사각 단면 강재 물 저장탱크에 대한 진동대 실험을 수행하였으며, 가진 가속도, 계측된 수위변화 및 수조 벽체의 가속도 신호 등을 이용하여 수조의 형상 및 가진력에 따른 충격모드 및 대류모드의 감쇠 특성을 분석하였다. 또한, 산정된 결과에 대하여 액체저장탱크의 해석 및 설계에 일반적으로 적용되고 있는 기준들과 비교하였다.

## 2. 액체저장탱크 감쇠특성

액체저장탱크의 동적해석 및 설계에 일반적으로 적용되고 있는 기준은 ASCE 7 [12]에 근간하고 있는 IBC 2006 [13], ACI 350.3 [14], AWWA D100 [15], API 650 [16] 등과 NZS [17], Eurocode 8 [18]이 대표적이다. 국내의 가스, 석유 등 액체저장시설에 적용되는 KS B 6283 [19]에서도 ASCE 7을 준용한 설계방법을 따르고 있다. 각 기준별로 설계방법에 다소간의 차이는 있으나 기본적인 개념은 Housner [1]의 모델을 이용한 연구에 기초하고 있으며, 충격압과 대류압 주파수 산정방법 및 적용 감쇠에 대해서도 유사하다.

국제적으로 통용되고 있는 대부분의 기준에서는 액체를 저장하기 위해 사용되는 구조물의 형상 및 유체의 종류에 관계없이 대류모드의 감쇠를 0.5%로 규정하고 있다. 다만, 일본건축학회에서는 실험결과 [20] 및 관측된 결과 [21]를 바탕으로 고정조건 및 액체저장탱크의 형상에 따라 1차 모드 감쇠를 최대 0.1% 이하가 되도록 제시하고 있다. 이는 실제 액체저장탱크의 조사결과와 실험결과에 따르면 고차 모드에서 5% 보다 큰 감쇠를 갖는 것으로 나타났으나 설계에 대한 충분한 여유도를 확보하기 위하여 1차 모드에 낮은 감쇠비를 적용하고 있는 것이다.

충격모드(Impulsive mode)에 대해서는 각 기준에 따라 적용하는 감쇠비에 차이가 있다. 이러한 차이는 액체저장탱크의 형상과 재질, 지반종류 등에 따라 차이가 나는데 ASCE 7에서는 모든 종류의 액체저장탱크에 대하여 5% 감쇠비를 일률적으로 적용하고 있으며, Eurocode 8에서는 콘크리트 구조물의 경우에 5%, 강재인 경우에는 2% 감쇠를 적용하고 있다. NZS에서는 액체저장탱크의 재료, 형상 및 지반의 특성을 모두 고려하여 충격모드의 감쇠를 결정하도록 하고 있으며, 2%에서부터 최대 30%까지 적용할 수 있다.

KS B 6283에서는 충격압력 및 대류압력에 대하여 각각 5%와 0.5%의 감쇠비를 적용하도록 하고 있다. 액체저장탱크 외의 일반적인 유체 해석에 적용하는 감쇠비도 상기 기준과 유사한 값을 적용하고 있다. 이는 유체에서 점성 감쇠비의 산정은 매우 어려운 과정이며, 실험모델을 이용하거나 실제 액체저장탱크의 실험을 통해서만 추정하기 가능하다 [22].

## 3. 진동대 실험 계획

서론에 언급한 것과 같이 충격모드는 액체저장탱크의 벽체, 지붕 등의 질량 및 내부의 유체 중 강재 거동하는 질량의 관성력에 대한 구조물의 강성에 의해서 결정되는 모드이며, 대류모드는 내부 유체의 유동에 의한 모드이

다. 이러한 각 모드들이 분리되어 있지 않은 경우에는 감쇠를 추정하는 것이 복잡하게 될 수 있다. 또한, 기존 연구결과 및 기준들에서 제시하고 있는 것과 같이 액체저장탱크의 감쇠는 수조의 형상과 재질, 수위 및 가진력에 따라 그 특성이 다를 것으로 예상되었다.

본 연구에서는 액체저장탱크의 실험결과로부터 충격모드와 대류모드의 감쇠를 추정하기 위하여 사각형 단면을 갖는 강재 수조 실험체를 제작하였으며, 동일한 실험체에서 가진력을 점증하여 수위변화를 발생시킬 수 있도록 진동대 실험을 구성하였다. 실험에 사용된 수조의 높이를 1.5 m, 자유수면의 높이는 0.8 m로 고정하고, 수조의 길이 및 폭을 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m로 계획하여 수위변화가 크도록 유도하였으며 제작 및 진동대 실험 시 하부 고정이 용이하도록 강재를 사용하였다. 액체저장탱크의 하부는 진동대와 볼트로 연결하여 강체로 고정하도록 계획하였다.

액체저장탱크의 벽체는 수조의 형상에 따른 각 모드의 주파수 확인이 용이하도록 주파수 영역에서 충분히 이격되어 분석될 수 있게 설계하였다. 실험체의 설계방법은 ACI 350.3에 따랐으며, 사각형 액체저장탱크의 충격모드 주기  $T_I$ 는 식 (1)에 의해서 산정하였다.

$$T_I = 2\pi \sqrt{\frac{W_T}{gK}} \tag{1}$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도,  $W_T$ 는 탱크 벽체, 유체의 충격모드에 기여한 질량(impulsive mass)를 고려한 중량이다. 실험계획 시 유체의 거동 확인을 위하여 천정 구조물을 설치하지 않았으나 실험체 상부에 천정이 있다면 천정 구조물의 중량 역시 고려되어야 한다.  $K$ 는 벽체의 강성으로 탱크의 기초가 고정되었다면,  $B/H_W > 2$ 인 경우 식 (2)와 같이 계산된다.

$$K = \frac{E_c}{4 \times 10^6} \left( \frac{t_w}{h} \right)^3 \tag{2}$$

$h$ 는 수조내의 충격압력에 의한 관성력이 작용하는 평균 높이이고  $t_w$ 는 벽체의 두께,  $E_c$ 는 벽체의 탄성계수이다. 대류모드의 주기  $T_c$ 는 다음 식에 따라 결정하였다.

$$T_c = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{L} \tag{3}$$

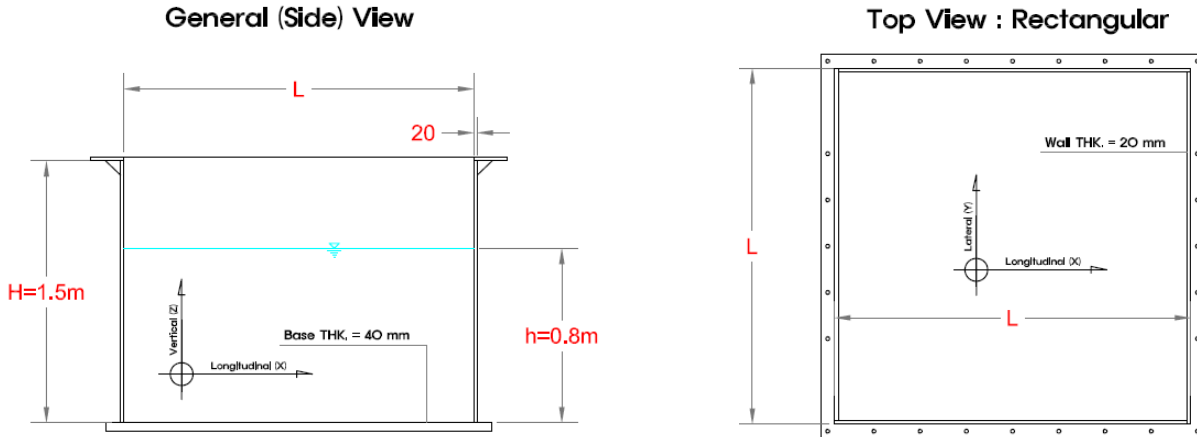
$L$ 은 지진력이 작용하는 방향의 탱크 길이이며,  $2\pi/\lambda$ 는  $L/H_L$ 의 함수로 ACI 350.3에서 제시되는 값을 적용하였다.

본 연구에서 제작한 실험체의 규격 및 수위, 각 모드의 1차 모드 주파수 산정결과를 Table 1에 나타내었으며, 실험체의 형상은 Fig. 1과 같다.

진동대를 활용한 국내외의 액체저장탱크 관련연구 분석결과, 액체저장탱크의 동적 실험에서 중요한 계측항목 및 계측장치는 자유수면에서의 유체의 거동을 확인하기 위한 수위계와 수조 내부의 동수압을 계측하기 위한 수압계 그리고 수조 구조물의 거동을 분석하기 위한 가속도계 및 스트레인 게이지, 수압 변화에 따른 전단력을 확인하기 위한 로드셀의 설치가 요구되었다. 본 연구에서는 Table 2와 같은 계측장치를 활용하여 액체저장탱크의 동적 거동을 계측하였다.

**Table 1.** Test specimen, water tank model specifications

Specimen Name	Shape	Length (m)	Width (L, m)	Height (m)	Wall thickness (mm)	Water level ( $h_w$ , m)	$h_w/L$	Mode frequency	
								Convective	Impulsive
S1	Rectangular	2.0	2.0	1.5	20	0.8	0.40	0.578	12.47
S2		1.5	1.5					0.699	12.23
S2		1.0	1.0					0.881	12.45

**Fig. 1.** Rectangular tank model drawings (side and top views)**Table 2.** Test instrumentation and specifications

Instrumentation	Manufacturer	Model name	Capacity or Specifications	Quantity
Water level meter	Samduk Tech.	None	$\pm 500$ mm	5
Pressure meter (Pore pressure)	ZIS I&C	MPP-2	2 kgf/cm <sup>2</sup>	12
Accelerometer	PCB	356A17	$\pm 30$ g	5
	IMI	603C11/010AC	$\pm 30$ g	5
Strain gage	TML	FRA-5-11-5L	5 mm, limit = 5%	4
Load cell	DACELL	MC63-3A	$\pm 20$ ton	4

일반적으로 대류모드는 유체의 슬로싱으로 나타나며 낮은 주파수 특성을 갖고 있다. 이에 반해 충격모드는 높은 주파수 특성을 갖고 있다[19]. 그러므로 저 주파수의 유체 거동을 접촉방식으로 계측할 수 있는 수위계 및 수압계에 의해 대류성분을 계측하고 가속도계, 변형률계 및 로드셀에 의해 고 주파수의 충격성분을 각각 계측하는 것이 용이할 것으로 판단되었다. 본 논문에서는 대류모드에 대해서는 수위계 계측결과를 활용하였으며, 구조물의 응답특성이 반영되는 충격모드에 대해서는 가속도계 계측결과를 활용하여 감쇠를 측정하도록 계획하였다. 수위계 및 가속도계의 설치 위치 및 방향은 Fig. 2와 같다.

수위계는 와이어 케이블 (24AWG, 4C cable)의 전기저항 변화 계측을 통해 수위를 측정할 수 있도록 제작하였으며, Fig. 2와 같이 구조의 상부에 수위계를 부착할 수 있도록 가이드를 설치하고 5개소에 설치하였다. 수위계 설치를 위한 가이드와 와이어의 길이는 구조의 높이 및 수위를 고려하여 1,250 mm 길이로 제작하였다. 수위계를 지지하는 상부 가이드는 구조와 일체화하여 고정되어 있는 구조이나 와이어의 가이드는 길이가 긴 원형 단면을 갖고 있으므로 수위계 자체의 공진에 의한 노이즈 발생이 예상되었다. 그러나 수위계 가이드 봉의 질량이 크지 않고 원형 단면을 갖고 있으며, 사전해석에 의한 대류모드의 고유주파수가 1 Hz 미만으로 낮을 것으로 예상

되었기 때문에 노이즈 발생에 따른 영향은 크지 않을 것으로 판단하였다.

가속도계는  $\pm 10$  g 용량의 제품으로 Fig. 2와 같이 구조의 길이방향 (Longitudinal) 및 직각방향 (Lateral)의 각 방향으로 5개씩 구조 높이에 따라 균등한 간격으로 설치하였다. 실험 시 계측은 가진 전부터 측정을 시작하여 가진 종료 후 유체의 자유진동 신호를 충분히 획득할 수 있도록 50초에서 100초 이상 계측하였다.

상기에서 언급한 것과 같이 각 모드의 주파수 및 감쇠를 분석하기 위하여 수위 및 가속도 계측신호를 활용하였다. 대류모드 감쇠에 대해서는 가진 종료 후 자유진동하는 수위를 계측하여 로그감쇠법 (logarithmic decrement method)을 적용하여 산정하였다. 충격모드에 기여하는 질량은 구조물의 질량과 유체의 유동하는 질량의 상호관계에 의해 결정되므로 로그감쇠법에 의해 산정하기 어렵다. 이에 가진 시간동안의 진동대 입력 가속도와 실험체 최상단에 부착된 가속도 계측신호의 FRF (Frequency Response Function)를 산정하여 파워반감대역폭 (half-power bandwidth)을 이용하는 방법으로 감쇠를 산정하였다.

기존 연구에 의하면 액체저장탱크의 동적거동은 1차 모드에 유체의 질량이 대부분이 집중되므로 각 1차 모드에 대해서 감쇠측정을 실시하였으며, 2차 이상의 모드를 분리하기 위하여 측정된 신호의 주파수 분석을 선수

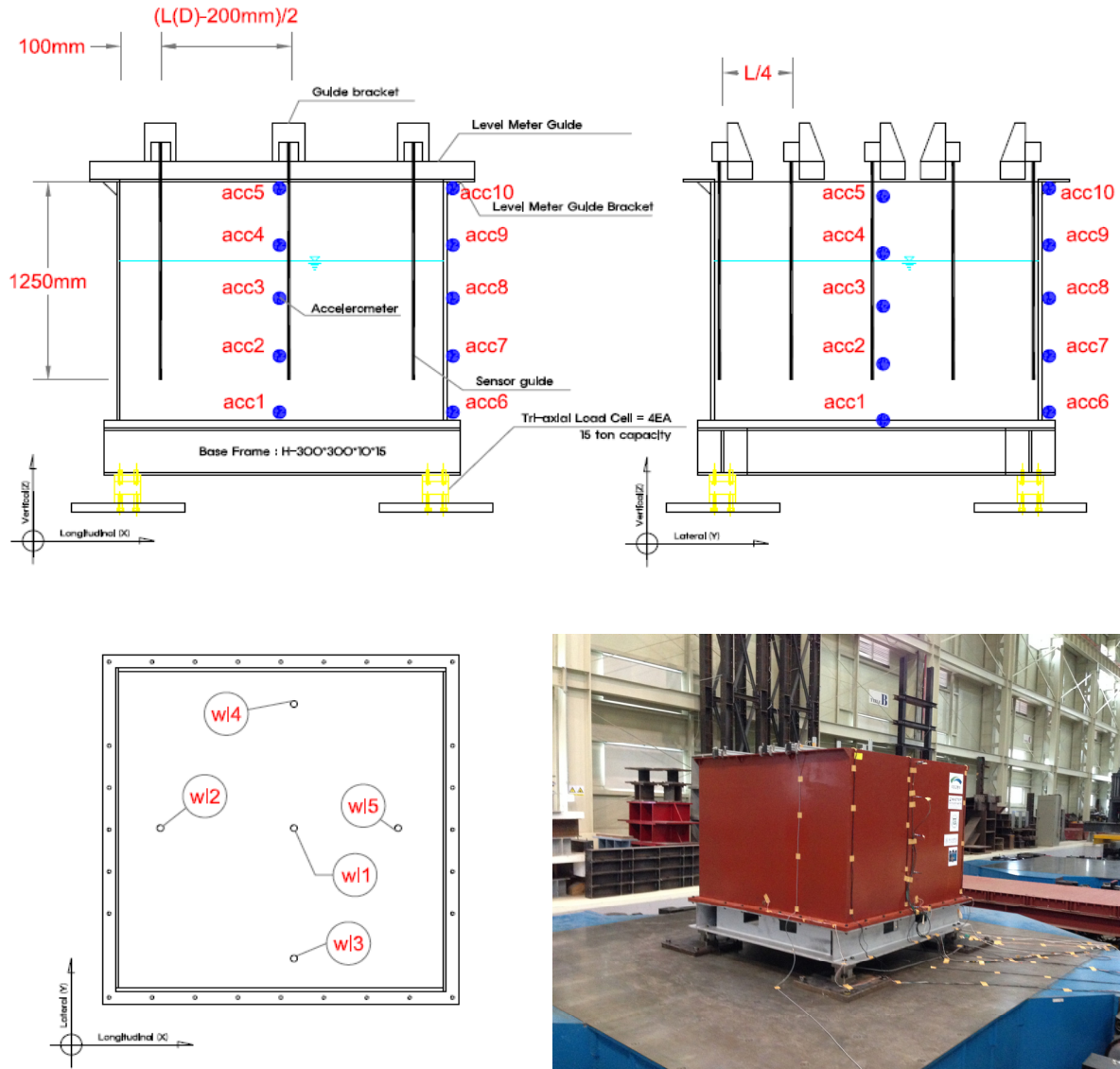


Fig. 2. Locations and directions of water level meters and accelerometers

행하고 1차 모드 주파수 특성을 반영하여 대역전달필터 (band-pass filter) 를 적용한 후 수위 시간이력을 재구성하였다.

대류모드의 감쇠 산정은 다음 식 (4)에 의해 결정하였다.

$$\zeta = \frac{1}{2\pi j} \ln \left( \frac{u_i}{u_{i+j}} \right) \quad (4)$$

여기서,  $u_i, u_{i+j}$ 는 각각 유체의 시간별 변위이다. 파워반감대역폭을 이용하는 방법을 적용한 충격모드 감쇠는 다음의 식 (5)에 의해 결정하였다.

$$\zeta = \frac{f_b - f_a}{2f_n} \quad (5)$$

여기서,  $f_b, f_a$ 는 각각 FRF에서 가속도 파워반감 (half-power) 응답 위치의 주파수이며,  $f_n$ 는 고유주파수이다.

#### 4. 동특성 실험결과

실험체의 가진을 위하여 0.5 Hz 에서 50 Hz 주파수 성분을 포함하는 RMS (Root Mean Square) 0.1 g 랜덤파형 (R)과 El Centro (1940, NS component, PGA=0.31g)지진파형을 PGA를 기준으로 10% (EQ1) 및 30% (EQ2) 수준으로 조정된 파형을 가진하였다. 연구수행 시 실제 가진은 수조의 길이방향 및 직각 방향, 양방향 동시 가진에 대하여 실시하였으나 실험체가 정방형이며, 본 연구의 주요한 목적인 고유주파수 및 감쇠 분석의 정확도를 높이기 위하여 1방향 가진에 대해서만 실험결과를 분석하였다.

사각단면의 강제 액체저장탱크의 형상 변화 및 가진되는 파형의 종류와 가진력의 크기에 따른 실험체의 대류모드 및 충격모드에서의 고유주파수 및 감쇠 특성을 분석한 결과를 Table 3, 4에 정리하였으며, 각 산정 데이터를 Fig. 3 ~ 4에 나타내었다.

Fig. 3은 랜덤파형 가진에 의한 각 실험체에서의 대류모드 감쇠 및 고유

**Table 3.** Convective mode properties for rectangular tank (wI3)

Specimen	Test	Convective mode properties by level meter			
		Water height (mm)	Mode Frequency (Hz)	Damping (%)	Signal duration (sec)
S1	R1	166	0.58	0.10	180
	EQ1	13	0.57	0.08	40
	EQ2	27	0.58	0.11	100
S2	R1	115	0.70	0.13	80
	EQ1	39	0.70	0.09	30
	EQ2	84	0.70	0.09	100
S3	R1	115	0.87	0.17	50
	EQ1	21	0.88	0.10	20
	EQ2	43	0.88	0.11	20

**Table 4.** impulsive mode properties for rectangular tank (acc5, acc10)

Specimen	Test	Impulsive mode properties by accelerometer				
		1st mode (Hz)	Interesting frequency range (Hz)		Damping (%)	Output / Input Max. Acceleration (g)
			start	end		
S1	R1	36.71	20	50	2.27	1.48 / 0.21
	EQ1	37.00	35	40	2.89	0.08 / 0.04
	EQ2	36.91	10	45	4.16	0.12 / 0.07
S2	R1	35.16	33	40	2.39	4.25 / 0.31
	EQ1	33.89	20	40	3.77	0.09 / 0.06
	EQ2	35.25	34	40	2.68	0.17 / 0.08
S3	R1	34.12	30	40	0.67	3.21 / 0.23
	EQ1	34.39	30	40	1.00	0.14 / 0.06
	EQ2	34.49	30	40	1.61	0.16 / 0.08

주파수를 확인하기 위하여 진동대 가진 종료 후 유체의 자유진동 시 수위계 측 시간이력과 동일 신호를 이용한 FFT 분석결과를 나타낸 것이다. 2 m 폭의 S1 실험체에서 가장 높은 수위가 계측되었으며, S2 및 S3에서는 동일한 수위가 계측되었다. 동일한 가진력 상태에서는 수조의 길이에 따라 수위 변화폭이 증가하게 되나 설치된 수위계의 위치가 최대 수위를 측정할 수 있도록 설치되지 않았기 때문에 S2와 S3에서 유사한 결과가 나타난 것으로 판단된다. 지진파 가진 시에도 유사한 결과가 나타났으나 동일 수조실험에서는 지진력이 증가할수록 수위도 증가하는 양상을 나타내었다.

FFT분석에 의한 각 실험체별 대류모드 주파수는 각각 0.58 Hz, 0.70 Hz, 0.88 Hz로 ACI 350.3에서 제시하고 있는 방법으로 계산된 값과 유사한 결과를 나타내었다. 이는 대류모드의 주기가 식 (3)과 같이 수조의 형상에 의해 결정되는데 수조의 크기가 충분히 크고, 비교적 정확한 크기로 제작되었기 때문으로 판단된다.

대류모드의 감쇠는 수조의 형상에 따라 다소간 차이는 있으나 평균 0.13% 정도로 대부분의 기준에서 채용하고 있는 0.5%에 비하여 낮은 것으로 나타났다. 가진력의 증가에 따라서 감쇠가 증가하는 양상을 나타내었으나 유의할 수준은 아닌 것으로 판단된다. 감쇠값의 크기가 각 기준에서 제시된 값과 차이가 발생하는 원인은 기존 기준들은 실제 구조물에서 발생할 수 있는 지반, 기초와의 상호작용 및 설치 조건 등을 고려하여 감쇠를 결정하였기 때문으로 판단된다. 그러나 액체저장탱크가 건물 내부와 같이 콘크리트 구조물에 설치되어 기초와의 상호작용 문제가 발생하지 않는 경우라면 일

본 건축학회에서 제시 [19, 20]하고 있는 것과 같이 대류모드 감쇠를 0.1% 이하로 적용되어야 할 것으로 판단된다.

충격모드 동특성 분석결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 좌측은 진동대 입력 가속도에 대한 각 수조 실험체의 최상부에서 계측된 가속도 신호를 이용하여 전달함수를 나타낸 것이며, 우측은 동일 가속도 신호의 FRF 분석 결과 및 이론적 추정결과 (curve fitting)를 비교한 것이다. 분석 대상은 비교적 명확한 1차 충격모드에만 한정하였다.

충격모드의 고유주파수 측정결과는 모든 가진의 경우에서 33.6Hz에서 37.0 Hz 수준으로 ACI 350.3에서 제시하고 있는 해석방법에 의한 예측결과와 큰 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 제시된 해석방법이 수조의 단위폭당 벽체의 강성 및 질량을 고려하도록 하고 있으나 본 연구에서 계획된 수조 모형이 단위 폭당 강성이 제안된 식과 같이 산정될 정도로 충분한 폭을 확보하지 않고 인접한 벽체의 강성에 영향을 받기 때문에 해석결과와 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

실험결과, 감쇠는 평균 1.98%로 Eurocode 8과 NZS에서 제시하고 있는 강재탱크의 감쇠 제안 값인 2%와 유사한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 가진파형 및 가진력 크기에 따른 고유주파수 및 감쇠의 상관성은 확인하기 어려웠으나 S3 실험체의 경우 0.67%에서 1.61%로 낮은 감쇠가 측정되었다.

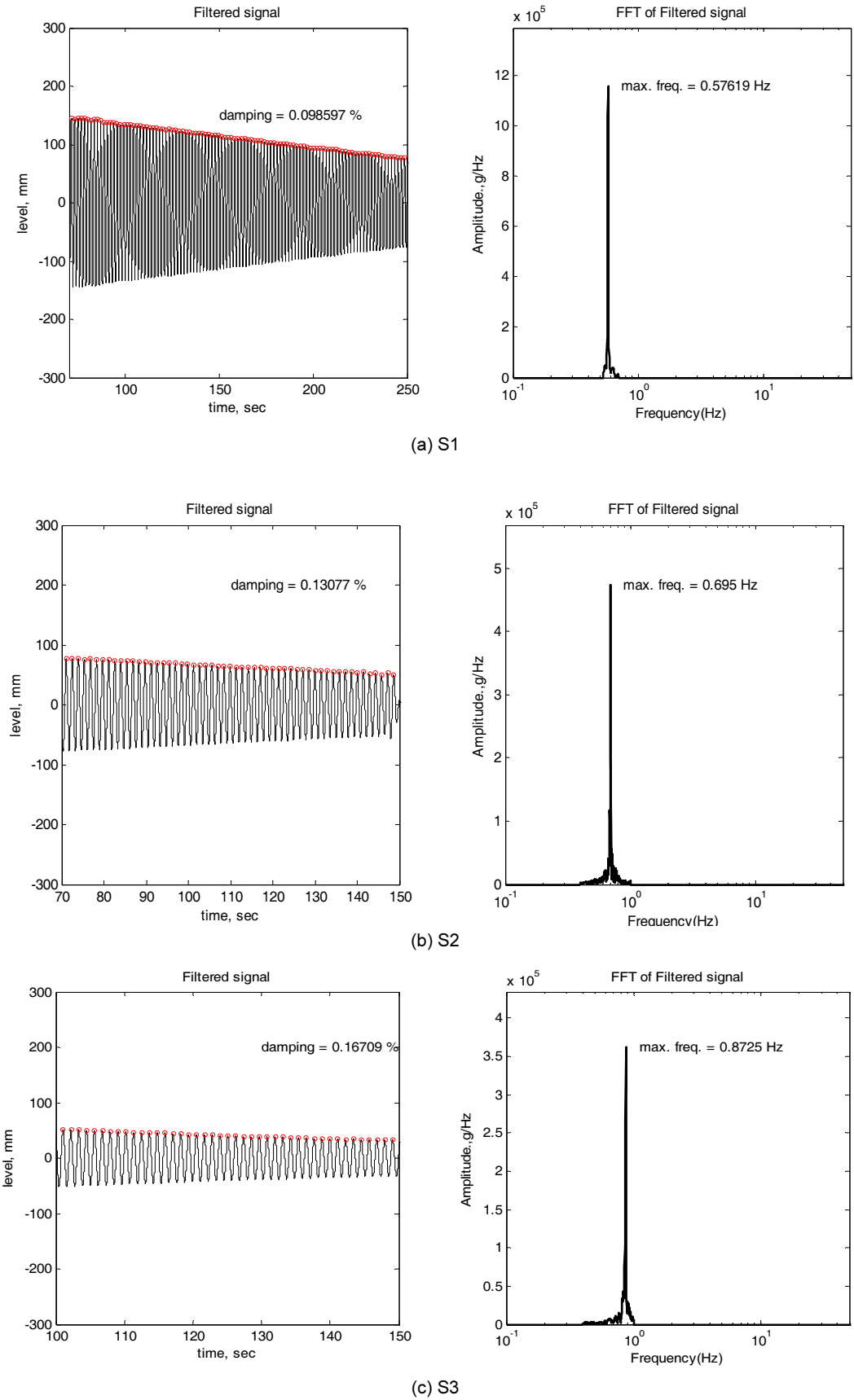
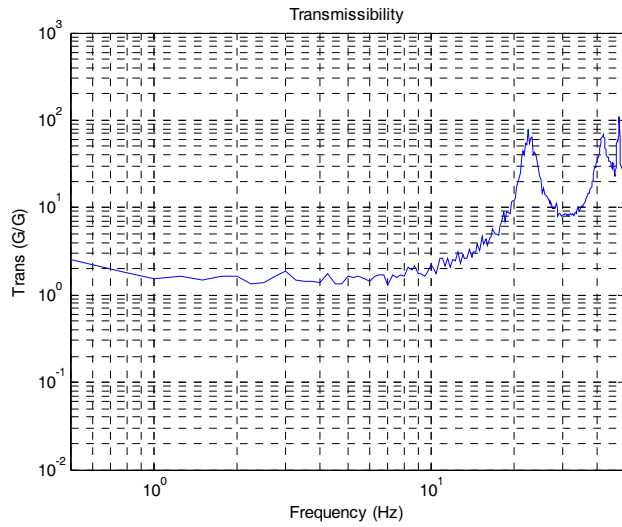
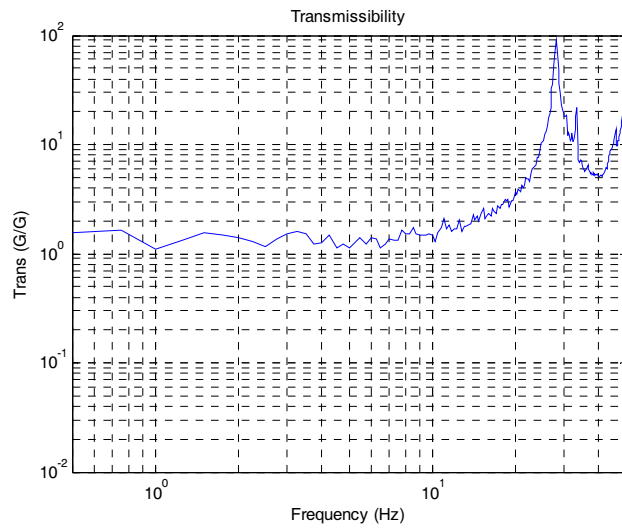
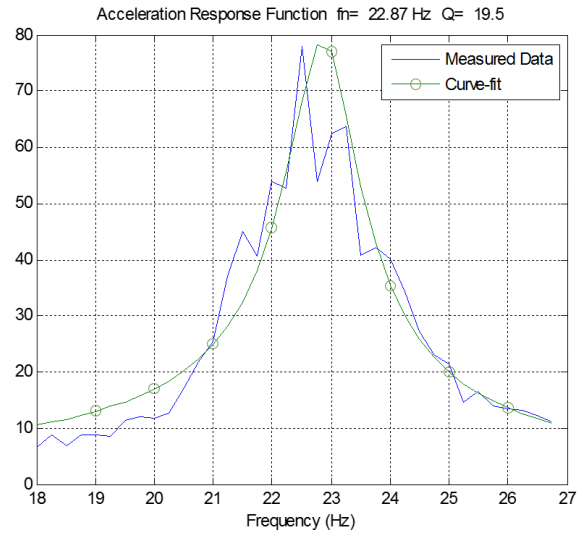


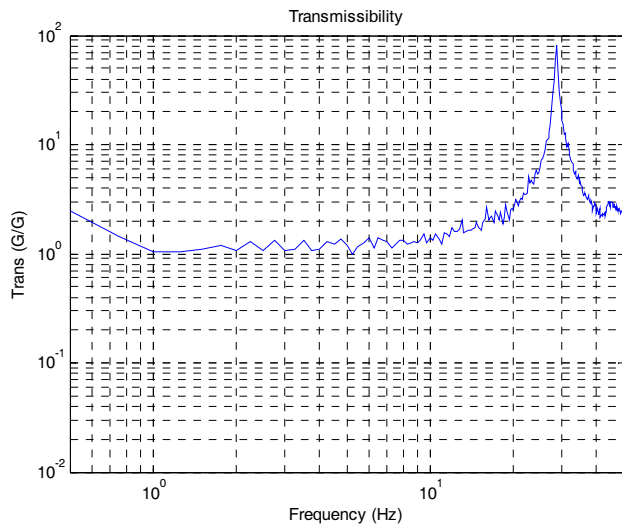
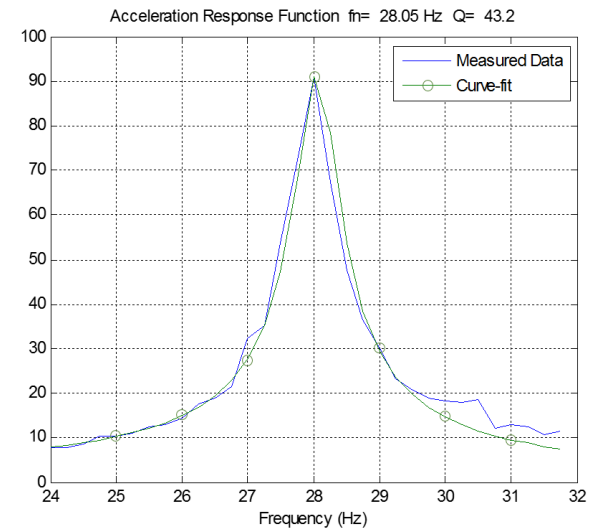
Fig. 3. Logarithmic decrement method and signal FFT for the convective mode properties



(a) S1



(b) S2



(c) S3

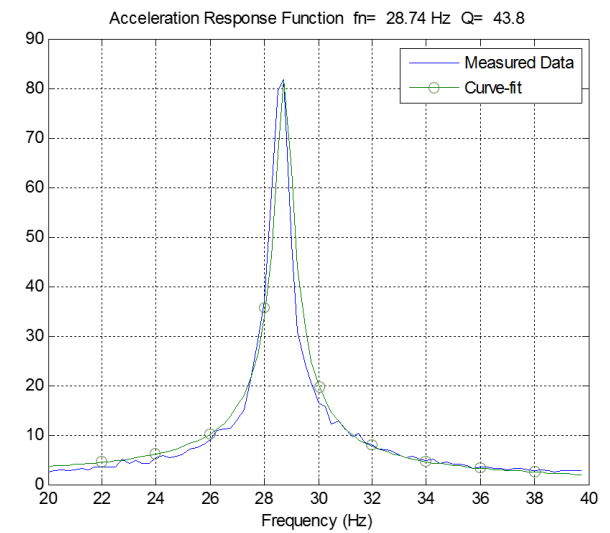


Fig. 4. Damping calculation by Half-power bandwidth curve-fit method

## 5. 결론

본 논문에서는 사각 단면을 갖는 물 저장탱크의 지진시 안전성을 평가하기 위한 동특성 기초 자료 확보를 목적으로, 최대 2 m 폭과 길이를 갖는 강재 수조 모형을 제작하고 고유주파수 및 감쇠 특성을 진동대 실험을 통하여 분석하였다. 수조의 형상 및 가진력을 달리한 실험결과를 분석하고 액체저장탱크의 설계기준들과 비교한 결과는 다음과 같다.

- 1) 진동대 실험에 의해 액체저장탱크의 고유주파수 및 감쇠를 추정하기 위한 방법으로 대류모드에 대해서 가진 종료 후의 수위측정 시간이력(로그 감쇠법 적용)과 충격모드에 대해서 진동대 가진 가속도와 액체저장탱크의 최상부 가속도계 측정값의 FRF를 산정하여 파워반감대역폭을 이용하는 감쇠 추정방법이 유효한 것으로 판단된다.
- 2) 대류모드의 고유주파수는 수조 구조물의 형상에 의해서만 결정되기 때문에 각 기준에서 제안된 방법에 의한 해석결과와 실험결과가 비교적 잘 일치하였으나 충격모드에서는 수조 구조물의 강성과 질량이 정확하게 정의되기 어렵기 때문에 설계식과 잘 일치하지 않았다. 특히, 각 기준들에서 제안하고 있는 방법에 따른 액체저장탱크의 충격모드 거동 평가가 요구되는 경우에는 탱크 구조물의 강성을 정확히 산정할 필요성이 있다.
- 3) 대류모드의 감쇠 측정결과는 수조의 형상에 따라 다소간 차이는 있으나 평균 0.13% 정도로 대부분의 기준에서 채용하고 있는 0.5%와 비교하여 낮으므로 기초의 고정조건 등에 따라 감쇠비 적용에 유의하여야 할 것으로 판단된다.
- 4) 충격모드의 감쇠 측정결과는 평균 1.98%로 관련 기준들에서 제시하고 있는 강재 구조물의 감쇠 제안 값인 2%와 유사한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었으나, 일부 실험체의 경우 기준 이하로 측정되기도 하였으므로 적용 시 주의가 요구된다.

### / 감사의 글 /

본 논문은 국토교통부, 국토교통기술촉진연구사업 (14CTAP-C07751 4-01) 지원에 의해 수행되었음.

### / REFERENCES /

1. Housner GW. Dynamic pressure on fluid containers, technical information (tid) document 7024, Chapter 6 and Appendix F, U.S. Atomic Energy Commission, c1963.
2. American Concrete Institute (ACI). ACI 350: Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary. c2015.
3. Sweedan AMI, El Damatty A.A. Experimental identification of the vibration modes of liquid-filled conical tanks and validation of a numerical model. *Earthquake engineering and structural dynamics*. 2003;32:1407-1430.
4. Amiri M, Sabbagh-Yazdi SR. Influence of roof on dynamic characteristics of dome roof tanks partially filled with liquid. *Thin-Walled Structures*. 2012;50:56-67.

5. Virella JC, Godoy LA, Suárez LE. Fundamental modes of tank-liquid systems under horizontal motions. *Engineering Structures*. 2006;28:1450-1461.
6. Curadelli O, Ambrosini D, Mirasso A, Amani M. Resonant frequencies in an elevated spherical container partially filled with water: FEM and measurement. *Journal of Fluids and Structures*. 2010;26:148-159.
7. Sangsari MK, Hosseinzadeh N. Shake table study of impulsive and convective damping coefficients for steel cylindrical tanks and comparison with API 650. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*. 2014;16(2).
8. Kolukula SS, Sajish SD, Chellapandi P. Experimental investigation of slosh parametric instability in liquid filled vessel under seismic excitations. *Annals of Nuclear Energy*. 2015;76.
9. Park SJ, Won SH, Choi MS, Kim SH, Cheung, JH. Seismic performance evaluation of externally reinforced panel water tank using shaking table tests. *EESK J. Earthquake Eng.* 2013 July;17(4):151-157.
10. Kim JK, Park JY. Shaking table test of a rectangular liquid storage tank. *Proceeding of Earthquake Engineering*. c2000.
11. Bae DG, Park JH, Oh CK. Comparison of design standards for seismic design of steel liquid storage tanks. *J. Korean Society of Steel Construction*. 2016 June;28(3):195-202.
12. American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-10: Minimum design loads for buildings and other structures. c2010.
13. International Code Council (ICC). International Building Code (IBC). c2009.
14. American Concrete Institute (ACI). ACI 350.3: Seismic design of liquid containing concrete structures and commentary. c2006.
15. American Water Works Association (AWWA). AWWA D100: Welded Carbon Steel Tanks for Water Storage. c2011.
16. American Petroleum Institute (API). API 650: Welded tanks for oil storage. c2012.
17. New Zealand Standard (NZS). NZS 3106: Design of concrete structures for the storage of liquids. c2009.
18. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. c2005.
19. Korean Standard (KS). KS B 6283: Design requirements for wind load and seismic load of oil storage tanks. c2006.
20. Nishi H, Yamada M, Zama S, Hatayama K, Sekine K. experimental study on the sloshing behaviour of the floating roof using a real tank. *JHPI*. 2008;46(1).
21. Architectural Institute of Japan. Structural Response and Performance for Long Period Seismic Ground Motions. c2007.
22. Whittaker D, Jury D. Seismic design loads for storage tanks. 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, p. 2000-2376.
23. International Code Council. International Building Code. c2003.
24. ACI Committee 371. Guide for the analysis, design, and construction of concrete-pedestal water towers (ACI 371R-98) (Reapproved 2003), American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, c1998.
25. American Society of Civil Engineers (ASCE). Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems, Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines of the Technical Council on Lifeline



- Earthquake Engineering, Section 7, c1981.
26. American Society of Civil Engineering (ASCE). Fluid/structure interaction during seismic excitation, Report by Committee on Seismic Analysis. c1984.
  27. American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum design loads for buildings and other structures. ASCE 7-05, Reston, Va. c2005.
  28. ANSI/AWWA, AWWA standard for wire- and strand-wound, circular, prestressed concrete water tanks, ANSI/AWWA D110-95. c1995.
  29. Priestley MJN, Davidson BJ, Honey GD, Hopkins DC, Martin RJ, Ramsey G, Vessey JV, Wood JH. Ed; Seismic Design of Storage Tanks, Recommendations of a Study Group of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Wellington, New Zealand. c1986.
  31. Korean Standards Association, KS B 6233, Design requirements for wind load and seismic load of oil storage tanks. c2006.