

# 수직 지진파 성분을 고려한 강재 물탱크의 유체 압력 응답 거동

강태원<sup>1</sup> · 윤장혁<sup>1</sup> · 양현익<sup>2</sup> · 전종수<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>박사과정, 한양대학교, 기계설계공학과, <sup>2</sup>교수, 한양대학교, 기계설계공학과, <sup>3</sup>조교수, 한양대학교, 건설환경공학과

## Fluid Pressure Response of Steel Water Tanks Accounting for the Effect of Vertical Ground Motion

Kang, Tae-Won<sup>1</sup>, Yun, Jang-Hyeok<sup>1</sup>, Yang, Hyun-Ik<sup>2</sup>, Jeon, Jong-Su<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Course Student, Dept. of Mechanical Design Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Mechanical Design Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

<sup>3</sup>Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

**Abstract** - This research analyzes the fluid pressure response acting on the inner wall of steel water tanks subjected to seismic actions including horizontal and vertical ground motion components using computational fluid dynamics. To achieve this aim, this research proposes a computational hydrodynamic modeling technique by validating the simulated results with shaking table test results available in the literature. Additionally, to examine the effect of vertical ground motion component on sloshing-induced fluid pressure of tanks, a real steel water tank is selected, modeled, and simulated. Hydrodynamic pressure responses of the tank are examined for two loading scenarios: under the combined action of horizontal and vertical components and under only horizontal components. Comparison results reveal that the inclusion of vertical ground motion component causes the maximum pressure, distribution of maximum pressure over the tank height, and location where the maximum pressure is produced.

**Keywords** - Computation fluid dynamics, Vertical ground motion, Steel water tank, Nonlinear sloshing, Hydrodynamic pressure

### 1. 서론

지상에 설치된 액체 저장 탱크는 지진에 의해 심각한 피해를 입어왔다. 특히 액체가 부분적으로 채워진 탱크의 경우, 지진으로 인해 내부 액체가 격렬하게 움직이는 슬로싱(sloshing) 현상으로 인해 구조물에 영향을 미친다. 이는 탱크의 국부 항복, 좌굴 및 보수가 불가능한 파손 등을 초래할 수 있다. 과거의 지진에서 볼 수 있듯이(1964년 Alaska, 1964년 Nigata, 1979년 Imperial Valley, 1989년 Loma Prieta, 1994년 Northridge 지진), 탱크의 파손과 이로 인해 발생한 탱크 내부 액체 유출은 지진 발생 지역에 경제적 및 환경적

문제를 야기할 수도 있다. 따라서 액체 저장 탱크를 설계할 때, 지진에 의해 발생할 수 있는 슬로싱 하중을 정량적으로 예측하는 것은 매우 중요하다<sup>[1],[2]</sup>.

Housner<sup>[3]</sup>는 지진으로 발생한 액체 저장 탱크의 슬로싱 하중을 평가하였다. 슬로싱 하중은 저주파 범위에서 액체의 슬로싱으로 인한 대류 성분과 고주파 범위에서 탱크의 횡방향 운동에 의한 충격 성분으로 구성된다고 가정한다. 그러나 이 방법은 탱크가 선형적으로 거동할 때 적용할 수 있는 제약을 동반하고 있지만 탱크의 구조적 응답을 보수적으로 평가할 수도 있다. Chen *et al.*<sup>[4]</sup>은 조화가진 하에서 진폭이 큰 슬로싱 운동을 분석하기 위하여 유한 차분 접근법을 개발하였다. 연구에서는 비선형 슬로싱 현상으로 인하여 진폭이 선형성을 초과하기 때문에, 탱크의 내진 설계에서 비선형 슬로싱 효과가 설명되어야 한다고 결론지었다.

수평 지반 운동을 받는 액체 저장 탱크의 지진 응답은 여러 연구자들에 의해 평가되었다<sup>[5]-[9]</sup>. 하지만 수평 지반 운동과 수직 지반 운동을 동시에 고려하여 발생한 운동에 대한 지진 취약성 평가 연구는 여전히 부족한 실정이다. Haroun

Note.-Discussion open until December 31, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 28, 2020; revised April 18, 2020; approved on May 14, 2020.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-2-2220-0324 Fax. +82-2-2220-0399

E-mail. jongsujeon@hanyang.ac.kr

and Tayel<sup>[10]</sup>가 언급한 바와 같이, 액체 저장 탱크의 수직 가진은 수평 동적 하중으로 전달될 수 있으며, 이에 따라 탱크의 벽은 축 방향이나 방사형으로 변형될 수 있다고 분석하였다. 그리고 수직 및 수평 운동을 동시에 고려하여 응답을 계산하였으며, 액체 저장 탱크의 전체 응답 중에서 수직 성분의 상대적 중요성을 평가하였다. Kianoush and Chen<sup>[11]</sup>은 수직 지진파 성분이 탱크의 전반적인 응답에 미치는 영향을 평가하기 위해, 수평 및 수직 지반 가속도를 동시에 재하하여 콘크리트 직사각형 액체 저장 탱크의 동적 반응을 조사하였다. 분석결과 수직 가진은 탱크 벽면 응답에 상당한 영향을 미친다고 결론지었다. 그러나 상기 연구에서 활용된 분석 모델은 수직 가진으로 인한 슬로싱 현상을 명시적으로 설명하지 못한 한계를 포함하고 있다. Yamada *et al.*<sup>[12]</sup>는 수평 및 수직 지반 운동을 하는 원통형 탱크의 슬로싱 현상에서 액체 표면 비선형 경계조건에 대한 영향을 연구하였다. 전술한 모든 연구들은 주로 수직 지반 운동을 하는 액체 저장 탱크의 구조적 반응에 초점을 맞추었고, 부분적인 비선형 슬로싱 현상만을 설명했기 때문에 탱크 내 액체 흐름으로 인한 비선형적인 슬로싱 효과를 완전히 설명하지 못하고 있다.

현재 많은 연구자들이 외부 가진에 의해 발생하는 액체 저장 탱크의 비선형 슬로싱 거동을 현실적으로 모사하기 위해 전산 유체 역학(computational fluid dynamics, CFD) 기법을 활용하고 있다. Vakilaadsarabi *et al.*<sup>[13]</sup>는 전산 유체 역학 해석방법을 사용하여, 단방향의 장시간 지진 운동으로 인한 액체 저장 탱크의 슬로싱 효과를 조사하였다. 연구에서는 슬로싱 강도와 그에 따른 동적 압력 하중이 탱크 구조, 액체 깊이 및 탱크 운동의 진폭과 특성에 의존하고 있음을 밝혔다. Godderidge *et al.*<sup>[14]</sup>의 연구에서는 전산 유체 역학 시뮬레이션에서 비균질 모델과 균질 모델을 사용하여 단방향으로 진동하는 직사각형 컨테이너의 슬로싱 효과를 조사하였다. Frandsen<sup>[15]</sup>은 비점성 유동 방정식에 기초한 수치예제를 해결하기 위해 비선형 유한 차분 모델을 개발하였고, 2차원 탱크 모델에 수평 및 수직 방향의 조화 가진을 적용하여 슬로싱 분석을 수행하였다. 그러나 부여된 조화 가진 운동은 지진 발생으로 인한 운동으로 보기엔 비현실적이다. 요약하면, 슬로싱 연구에 전산 유체 역학 분석을 이용한 위의 연구 사례들은 실제 지면 운동 이력, 특히 수직 지면 운동을 사용하지 않았고, 전산 유체 역학 결과와 진동대 실험 결과에 대한 비교 평가 연구를 다루지 않아 수치해석 모델의 검증이 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 전산 유체 역학을 이용하여 원통형 강재 탱크의 내부 벽면에 작용하는 유체 압력의 비선형 특성을, 서로 직교하는 3방향 성분(2개의 수평 성분과 1개의 수직 성분)으로 구성된 지진파를 고려하여 분석하였다. 이를 분석하기 위해서 활용한 수치 계산 모델은 ANSYS-CFX<sup>[16]</sup>를 사용하였고, 문헌에서 이용 가능한 진동대 실험 데이터 결과와 비교를 통해 분석에서 활용된 전산 유체 역학 해석 기법을 검증하였다. 추가적으로 검증된 모델링 기법을 캘리포니아에 위치한 실제 강재 탱크에 적용하여 지진파의 수직 성분이 벽면 유체 압력 응답에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 전산 유체 역학 구성 방정식

### 2.1 지배방정식

전산 유체 역학에서는 Navier-Sokes 방정식 모델을 직접 수치 모사와 난류 길이 척도에 대한 해상도를 가진 격자를 이용하거나, 단순화하여 계산할 수 있다. 이때, 난류 유동을 모사하기 위해 다양한 난류 모델들은 Reynolds Averaged Navier-Sokes(RANS) 방정식을 기반으로 문제를 접근할 수 있으며, 난류 전단 응력과 유동 특성간의 Boussinesq 가정을 기반으로 계산되기 때문에 많이 활용되고 있다. 따라서 RANS 방정식 기반의 전단 응력 전송(shear stress transport, SST) 모델을 활용하여 벽면 근처에서의 유동과 유동 분리 현상을 예측하였다.

### 2.2 연속 방정식과 운동량 방정식

공기와 액체 사이 경계면 현상을 효율적으로 해결하기 위해 비균질 모델을 활용하였으며, 다상 유동에 대한 공기와 물(유체) 상의 총 분율은 식 (1)로 표현할 수 있다. 각 매질의 상들 사이에서 보존 방정식은 식 (2)와 같이 비압축성으로 정의된다. 다상 유동의 연속방정식과 운동량 방정식은 식 (3)과 식 (4)의 형태로 표현된다<sup>[17]</sup>. 여기서  $\rho$ 는 밀도,  $\gamma$ 는 고정된 체적분율,  $p$ 는 압력,  $U_i$ 와  $U_j$ 는 속도,  $\mu_\alpha$ 는 유력 텐서,  $i, j$ 는 요소 텐서를 나타낸다. 그리고  $F_b$ 는 체적력,  $\Gamma_{\alpha\beta}$ 는 상간의 질량 전달로서 균질모델로 가정하여 계산된다.

$$\sum_{\alpha}^{Np} \gamma_{\alpha} = 1 \quad (1)$$

$$\sum_{\alpha} \frac{d}{dx_j} \gamma_{\alpha} U_{\alpha j} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} (\gamma_{\alpha} \rho_{\alpha}) + \frac{d}{dx_i} (\gamma_{\alpha} \rho_{\alpha} U_i) = \Gamma_{\alpha} = \sum_{\beta=1}^{N_p} \gamma_{\alpha\beta} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (\gamma_{\alpha} \rho_{\alpha} U_i) + \frac{d}{dx_j} (\gamma_{\alpha} \rho_{\alpha} U_i U_j) = & \\ -\gamma_{\alpha} \frac{dp}{dx_i} + \frac{d}{dx_j} \left[ \gamma_{\alpha} \mu_{\alpha} \left( \frac{dU_i}{dx_j} + \frac{dU_j}{dx_i} \right) \right] & \\ + \sum_{\beta=1}^{N_p} \left( \Gamma_{\alpha\beta} U_i^{\beta} - \Gamma_{\beta\alpha} U_i^{\alpha} \right) + F_b & \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Gamma_{\alpha\beta} = \dot{m}_{\alpha\beta} A_{\alpha\beta} \quad (5)$$

$\dot{m}_{\alpha\beta}$ 의 질량 전달은 상  $\alpha, \beta$  간의 경계면에서의 질량 유동량을 의미하며,  $A$ 는 계면 간의 체적분율 밀도와 계면 면적 밀도에 비례한다. 따라서 두 상에서의 속도 영역은 동일하다.

### 2.3 전단 응력 전송 모델

전단 응력 전송(SST) 모델은 난류 전단 응력 전달을 모사하여 유동의 압력 구배를 정확하게 예측할 수 있고 내부 가진에 의한 비선형 유체 흐름을 포착하는데 적합하다. 이때 활용된 와동 점성 수식은 식 (6) - 식 (8)과 같다. 식에서,  $F_2$ 는 유동 변수와 표면까지의 거리에 기반한 블랜딩 함수이며,  $F_1$ 과 유사하게 혼합된 함수이다.  $F_1$ 은 가장 가까운 표면과 유동 변수의 거리에 기반하였으며, 벽면 경계조건 구속에 의해 제한되어 있다. 이는 자유 전단 흐름에 대한 기본 가정이 정확하지 않기 때문이다.  $v_t$ 는 와점성 계수,  $k$ 는 난류 운동 에너지,  $a_1$ 는 상수,  $w$ 는 난류 주파수,  $y$ 는 다음 표면까지의 거리를 의미한다. 전단 응력 전송 모델의 대한 장점과 자세한 설명은 Menter<sup>[18]</sup>의 연구에 기술되어 있다.

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 w; (\partial u / \partial y) F_2)} \quad (6)$$

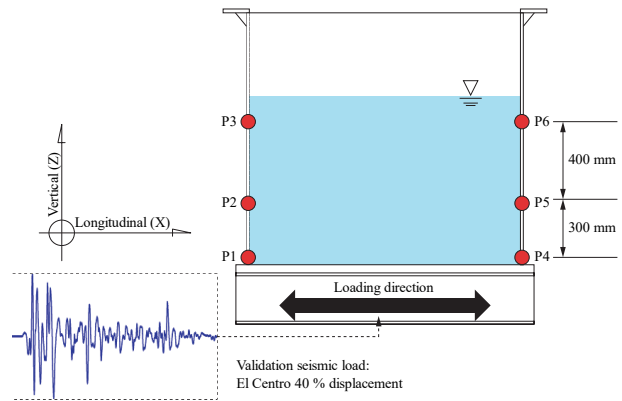
$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (7)$$

$$\arg_2 = \max \left( 2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 w y}; \frac{500 v}{y^2 w} \right) \quad (8)$$

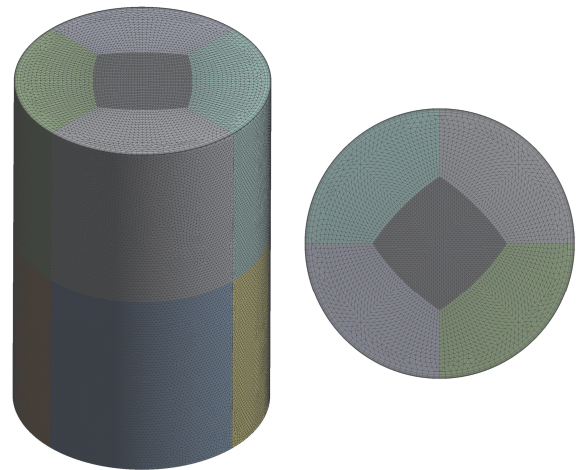
## 3. 진동대 실험결과 수치해석 검증

### 3.1 모델 검증에 사용된 대상 강제 물탱크

전산 유체 역학 분석 방법은 Back *et al.*<sup>[19]</sup>의 진동대 실험 연구 결과와 시뮬레이션 해석 결과를 비교하여 검증되었다. Fig. 2는 모델 검증에 사용된 세부사항을 나타내며, 실험체는 원통형으로서, 직경은 1 m, 높이는 1.5 m, 그리고 물의 높이는 0.8 m이다. 수평 및 수직 운동을 동시에 받는 물탱크의 진동대 실험 결과가 전무한 실정이기 때문에, 수평 방향 입력 지진파에 종속된 실험체를 모델 검증을 위한 대상 구조물로 선택하였다. 선택한 입력 운동은 1940년 El Centro 지진의 남북방향 성분이다. 진동대에 부과된 입력 하중은 실제 지진의 40 % 크기로서, 최대지반가속도와 최대지반변위는 각각 0.173 g와 11 mm를 갖는다(Fig. 1).



(a) Cylindrical steel water tank model



(b) Water tank model for CFD simulation

**Fig. 1.** Cylindrical steel water tank used for model validation

본 연구에서는 입력 하중을 변위 하중으로 선택하여 탱크 하단에 재하하였다. 그리고 Baek *et al.*<sup>[19]</sup>의 실험연구에서는 탱크 내 슬로싱 응답을 보다 명확하게 조사하기 위해 20 mm 두께의 강재 탱크를 제작하여 탱크의 강성을 충분히 보장하였다. 측정에서는 액체의 비선형 거동이 탱크에 미치는 영향을 분석하기 위하여 12개의 압력계를 사용하였으며, 그림에는(Fig. 1) 모델 검증에서 사용된 압력계의 위치만 나타내었다. 시험용 탱크의 높이가 1.5 m이고 수위가 0.8 m이기 때문에, 압력은 미세 압력 변화를 측정할 수 있는 정밀 기공 압력계가 사용되었다. 압력계는 강재탱크 4방향 벽면의 높이에 따라 0 mm, 300 mm 및 700 mm 높이에(탱크 바닥에서 떨어진 위치) 3개씩 총 12개의 유압게이지가 부착되어있지만, 하중이 작용하는 수평 방향 내벽 표면의 설치된 정밀 공극 압력 센서 측정 결과만을 활용하여 전산 유체 역학의 계산 모델 검증에 사용되었다.

### 3.2 전산 유체 역학 모델 검증

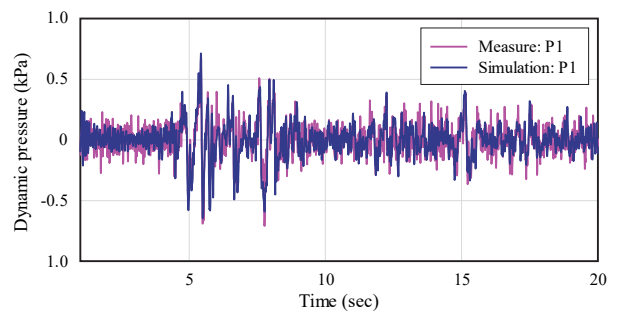
전산 유체 역학에 사용된 유한 체적 요소 모델(finite volume method, FVM)은 인접하고 있는 절점들 사이 유한체적 내 그리드 점에서의 물리량들과 상관관계를 근사해로 구할 수 있다. Fig. 1(b)를 보면 원통형 탱크의 요소는 정렬 격자를 유지하기 위해 O-그리드 유형으로 구성하였으며, 유체 동압력을 정확하게 계산하기 위해 벽면 근처에 조밀한 요소층을 형성하였다. Table 1은 전산 유체 역학 수치 모델에서 사용된 경계 조건을 나타낸다. 해석에 사용된 유체는 물과 공기이다. 물은 비압축성 액체이고, 공기는 이상기체로 가정된다. 유동해석에서 유체 영역과 맞닿는 물탱크 벽면은 마찰이 없는 벽면 경계조건으로 설정되고 변위기반 지진하중을 바닥면에 입력하중으로 재하하였다. 이에 물탱크 벽면이 내부 유체를 밀어내면서 유체가 흔들리는 슬로싱 현상이 발생

**Table 1.** Setting conditions of CFD model

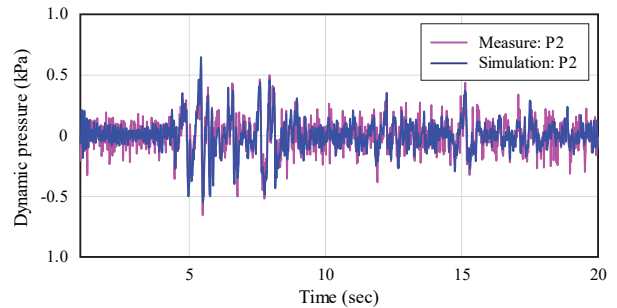
| Parameter               |       | Condition                       |
|-------------------------|-------|---------------------------------|
| Liquid                  | Water | Incompressible fluid            |
|                         | Air   | Ideal gas                       |
| Seismic load            |       | Earthquake displacement         |
| Watertank wall          |       | No-slip wall boundary condition |
| Temporal discretization |       | Second-order backward Euler     |
| Monitoring point        |       | Hydrodynamic pressure           |

하게 된다. 내부 유체가 슬로싱으로 발생하는 유체의 동압력을 측정하기 위해, Fig. 1(a)에 표시된 계측점이 선택되었다.

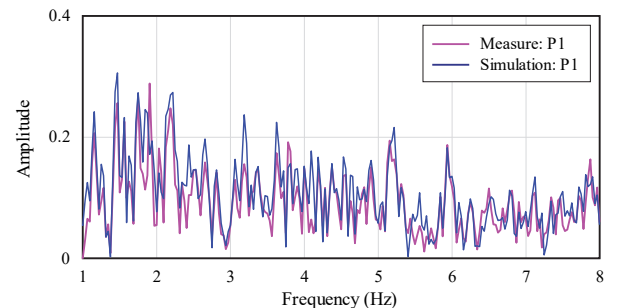
Fig. 2는 계측 위치 P1과 P2에서 전산 유체 역학 결과와 진동대 실험의 유체 동압력에 대한 시간 이력을 비교한다. 모델 검증에서 자유수면(P3) 근처의 응답 데이터는 측정 센서의 오류로 인해 측정에서 제외되었다. 그림에서 보는 것과 같이 가진을 시작한 초기의 응답은 측정된 압력 응답과 상이하게 발생되었다. 이는 수치 해석의 안정성을 보장하기 위해, 가진 시작 후 1초 동안 입력 변위가 없는 것으로 가정하였기 때문이다. 전산 유체 역학을 통해 분석되는 비선형 슬로싱 해석 모델은 2차 역방향 오일러(second-order backward Euler) 방법을 선정하여 유동의 수치적 안정성을 보장하였다. 또한 최소 5회 이상의 반복적인 수렴 과정을 거치게



(a) Pressure time history at monitoring point P1



(b) Pressure time history at monitoring point P2



(c) FFT results at monitoring point P1

**Fig. 2.** Comparison of measured and analyzed hydrodynamic pressure time histories

하여, 단시간에 급격한 탱크 움직임으로 인한 내부 유체 영역의 강성 변화를 고려하도록 해석을 진행하였다. 그럼에도 불구하고 진동대 실험과 해석에서 최대 유체 동압력 기준 6 % 이내의 오차가 발생하였다. 이는 해석상 오차와 진동대 실험에서의 계측 오차 누적으로 나타난 결과로 볼 수 있다. 수치 해석 결과는 유체 영역의 움직임으로 주변 절점들로부터 압력이 분산되어 계산되면서 실제 압력보다 낮은 동압력이 계산된다. 또한 분석에서 활용된 진동대 실험 결과에서는 강재 모델의 대류모드 감쇠 수준이 0.13 %로 측정되었다. 이는 일반적으로 제안되고 있는 0.5 %보다 약 4배 낮은 감쇠 수준이다. 이러한 해석과 계측상의 오차로 인하여 시간당 동압력 차이가 발생된 것으로 사료된다.

Fig. 2(c)는 P1 지점의 시간영역에 대한 유체 동압력 결과를 고속푸리에변환(fast Fourier transform, FFT)으로 변환한 결과를 보여준다. 변환된 수치해석 결과와 진동대 실험 결과는 주파수별 진폭의 크기와 주기성에 대해 유사함을 보였다. 분석 결과, 전산 유체 역학의 수치 해석 모델은 강재 물탱크의 전반적인 압력 응답 거동을 모사하는 데 적합하다고 판단된다.

## 4. 제안된 해석 모델링 기법의 적용

### 4.1 실제 원통형 강재 물탱크의 수치해석 모델

실제 강재 물탱크의 지진 압력 응답을 조사하기 위해 Haroun<sup>[20]</sup>에서 사용된 원통형 강재 탱크를 해석모델로 선정하였다. 탱크는 높이 대비 직경 비율이 1보다 약간 큰 원통형이다. Fig. 3에 도시된 바와 같이, 탱크의 직경과 높이는 각각 18.29 m과 19.51 m이며, 17.56 m 높이까지 물로 채워진다(물 충전율: 탱크 높이의 90 %).

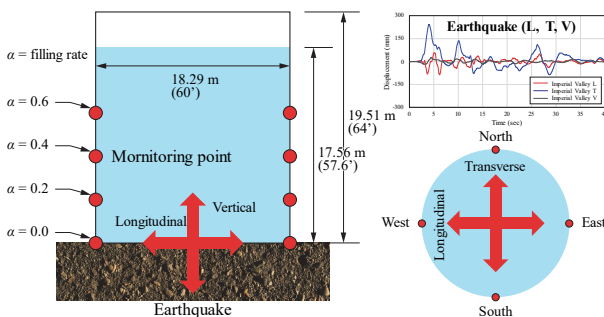
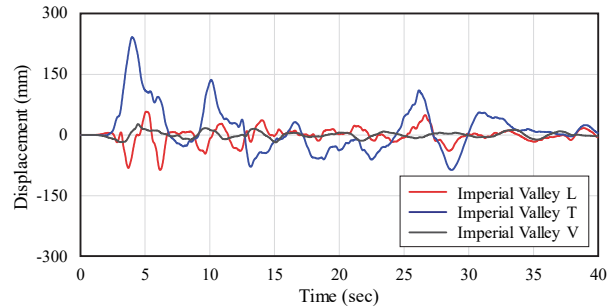


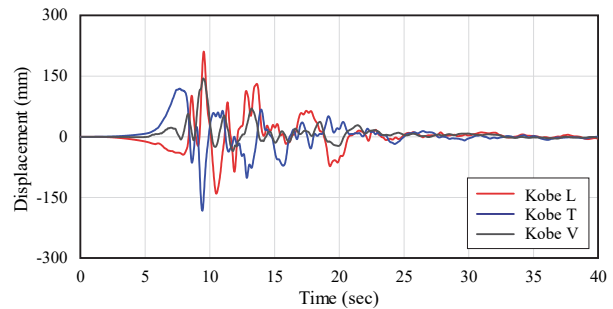
Fig. 3. Description of the water tank, direction of input ground motions and location of pressure monitoring points

### 4.2 입력 지진파 선택

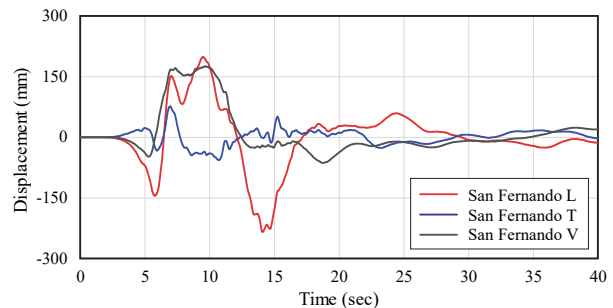
실제 강재 탱크의 지진 벽면 압력 응답을 조사하기 위해 본 연구에서는 NGA-West2 online ground motion database로부터 1940년 Imperial Valley 지진, 1995년 Kobe 지진, 그리고 1971년 San Fernando 지진을 선택하였다<sup>[21]</sup>. 사용된 모든 지진은 3개의 직교 성분(2개의 수평 성분과 1개의 수직 성분)을 포함하고 있다. 특히, 1971년 Pacoima Dam 관측소에서 기록한 San Fernando 지진 데이터는 관측소와 해석 대상 강재 탱크의 위치와 가깝기 때문에 선정되었다. 또한 다른 2개의 지진파는 비교대상을 위해 선정되었다. Fig. 4는 앞서 설명된 세 개의 지진에 대한 변위 시간 이력을 보여주며, 이 지진파에 대한 방향별 최대지반변위(mm)가 Table 2에



(a) Imperial Valley



(b) Kobe



(c) San Fernando

Fig. 4. Displacement time histories of input ground motions: Imperial Valley, Kobe, and San Fernando earthquakes

요약되어 있다. 모델 검증에서 전술한 것과 같이, 지진파의 변위 시간 이력(Fig. 4) 입력 하중으로 탱크 바닥면의 재하된다(Fig. 3).

**Table 2.** Peak ground displacement of three earthquakes

| Component | Imperial Valley | Kobe  | San Fernando |
|-----------|-----------------|-------|--------------|
| L         | 86.6            | 210.7 | 390.0        |
| T         | 242.0           | 183.0 | 128.0        |
| V         | 26.7            | 144.0 | 293.0        |

L, T, and T indicate the longitudinal, transverse, and vertical component of an earthquake, respectively.

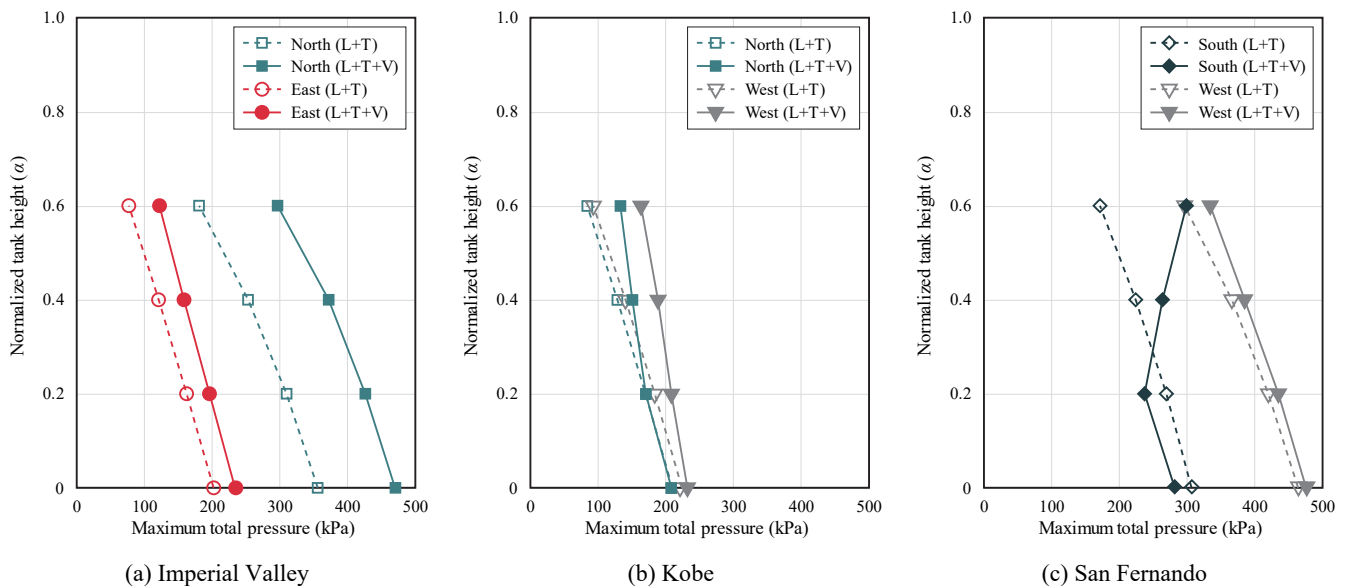
## 5. 수직 지진파 성분에 의한 강재 물탱크의 압력 응답 특성 분석

Haroun and Tayel<sup>[10]</sup>은 수직 지진파 성분이 물탱크에 미치는 중요성을 강조하였다. 이에 따라, 본 연구에서는 전산 유체 역학 해석 방법을 활용하여 수평 및 수직 지진파 성분을 동시에 강재 물탱크 하단에 재하하여 물탱크 내부 벽면의 유체 압력 변화를 조사하였다. 분석에서는 종방향(L)과 횡방향(T)의 수평 지진파 성분만을 동시에 물탱크에 가질 때(L+T)와 두 방향의 수평 지진파 성분과 한 방향의 수직(V) 지진파 성분이 동시에 가진(L+T+V) 경우에 대하여

물탱크 내부 벽면에 작용하는 압력을 비교하였다.

Fig. 5는 L+T 지반 운동의 경우와 L+T+V 지반 운동의 경우를 고려할 때 벽면에 작용하는 최대 유체 압력을 탱크 높이에 대한 물높이 비율인 계측 높이 비( $\alpha$ )로 정규화하여 동·서·남·북 방향에 계측하였다. 또한 지진으로 인해 발생된 탱크 내부 유체 전압력(total pressure)은 정수압(hydrostatic pressure)과 동수압(hydrodynamic pressure)의 합으로 표현된다.

Imperial Valley 지진의 경우(Fig. 5(a)), L+T 지반 운동 일 때, 수면에서 탱크 하단부로 갈수록 최대 압력 차이가 선형적으로 증가되는 추이를 보였다. 그리고 L+T+V 지반 운동이 작용할 때, 계측 높이비( $\alpha$ )가 증가함에 따라 수위표면 근처 모든 방향 벽면에서 최대 압력이 증가되었다. 수직 지진파 성분도 포함되면, 탱크 높이를 따라 인접한 계측지점 사이의 최대 전압력 차이가 줄어들었다. 이는 수직 지진파 성분이 유체의 충격 압력(impact pressure)에 영향을 미친다는 사실에 기인한다. 추가적으로 수직 지진파 성분의 추가는 최대 지반변위가 발생하는 북쪽 방향에서 탱크 높이별 최대 응답이 32% - 64%로 증가되지만, 다른 방향에서는 약 10% 압력이 감소되었다. 즉, 수직 지진파 성분으로 인해 높이별 압력 변화 추이는 방향별로 다른 결과를 나타내었다. 이러한 결과를 토대로, 수평 및 수직 지진파 성분으로부터 발생된 비선형 슬로싱 현상으로 인해 벽면 유체 압력이 북쪽에 더 집중된다는 사실과 관련이 있다.



**Fig. 5.** Comparison of maximum total pressure distribution under L+T and L+T+V ground motions of three earthquakes in normalized tank height

Kobe 지진의 경우(Fig. 5(b)), 수직 지진파 성분을 포함 시키면, 수위표면 근처( $\alpha=0.6$ )에서는 4방향에서 최대 전압력이 크게 증가한 반면(54% - 76%), 탱크 하단부( $\alpha=0.0$ )에서는 최대 전압력 증가가 미비하였다. Kobe 지진의 수직 지진파 성분은 최대 전압력이 발생하는 위치를 변화시켰는데, L+T 지반 운동일 때 최대 전압력은 서쪽방향 벽면에 최대 응답을 발생시킨 반면 L+T+V 지반 운동에서는 최대 전압력이 북쪽방향 위치에서 발생하였다. 그 이유는 세 방향 지진파에 의해 코리올리 효과가 발생하기 때문이다<sup>[22]</sup>. 또한 수직 지진파 성분은 탱크 높이별 최대 전압력을 1%에서 66% ( $0.0 \leq \alpha \leq 0.6$ )까지 증가시켰다. 따라서 수직 지진파는 탱크 하단부보다 자유 표면 근처에서 유체 압력에 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

San Fernando 지진의 경우(Fig. 5(c)), L+T+V 지반 운동이 가진될 때 남쪽 및 서쪽 방향 벽면의 높이에 따른 전압력 분포는 다른 두 지진해석 결과와 다른 경향을 보였다. 다른 두 지진의 응답 결과에서는 높이가 증가함에 따라 최대 전압력이 감소되었지만, San Fernando 지진에서는  $\alpha$ 가 0.2에서 0.6으로 증가함에 따라 최대 전압력의 크기가 모든 방향에서 증가되었다. 그리고 수직 지진파로 인해 3방향 벽면의 수면 근처( $\alpha=0.6$ ) 계측지점에서 최대 전압력이 크게 증가하였지만(74% - 163%), 서쪽방향 수면 근처( $\alpha=0.6$ )의 최대 전압력에는 큰 영향을 주지 못하였다.

요약하면, 탱크 내에 발생하는 슬로싱으로 인한 유체 압력은 지진파의 특성과 수직 지진파 성분의 고려 여부에 따

라 크게 달라진다. 또한 수직 지진파 성분은 최대 전압력의 크기, 탱크 높이에 따른 최대 전압력 분포, 그리고 최대 전압력이 발생하는 위치를 변경시켰다. 이러한 이유로, 수직 지진파 성분으로 인한 충격 압력은 물탱크를 설계할 때 적절히 고려되어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 6은 Fig. 4의 3종류 지진파에 대한 지반 가속도 에너지 스펙트럴 밀도(power spectral density, PSD) ( $\text{g}^2/\text{Hz}$ )를 보여준다. Fig. 7은 각 지진파로부터 발생된 최대 압력이 발생하는 방향에 대한 유체 동압력의 에너지 스펙트럴 밀도( $\text{kPa}^2/\text{Hz}$ )를 나타낸다. 여기서 각 계측지점마다 최대 압력 에너지는 대류(convective) 및 충격(impulsive) 성분으로 분류될 수 있다. 대류 성분은 슬로싱에 기인한 응답으로 저주파 범위에서 관찰되고, 충격 성분은 지진파로 인해 관성력이 포함되어 고주파 범위에서 에너지를 갖는 모드를 의미한다. Imperial Valley 지진의 지반 가속도 에너지는(Fig. 6(a)) Kobe 지진 그리고 San Fernando 지진과 비교하여(Fig. 6(b)와 6(c)), 상대적으로 작은 지반 가속도 에너지를 갖는다. 수평방향 지반 가속도 에너지는 약 8 Hz까지 큰 에너지를 갖지만, 수직방향 지반 가속도 에너지는 8 Hz 이후 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. Kobe 지진은(Fig. 6(b)), 4 Hz 이내에서 큰 지반 가속도 에너지를 가지고 있으며, 수직 방향 지반 가속도 에너지는 약 4 Hz - 5 Hz 주파수 범위에서 수평방향 지반 가속도보다 상대적으로 더 큰 에너지가 발생된다. 그리고 San Fernando 지진은(Fig. 6(c)), 가장 큰 수직 지반 가속도 에너지를 가지고 있어, 다른 두 지진보다 상대적으로

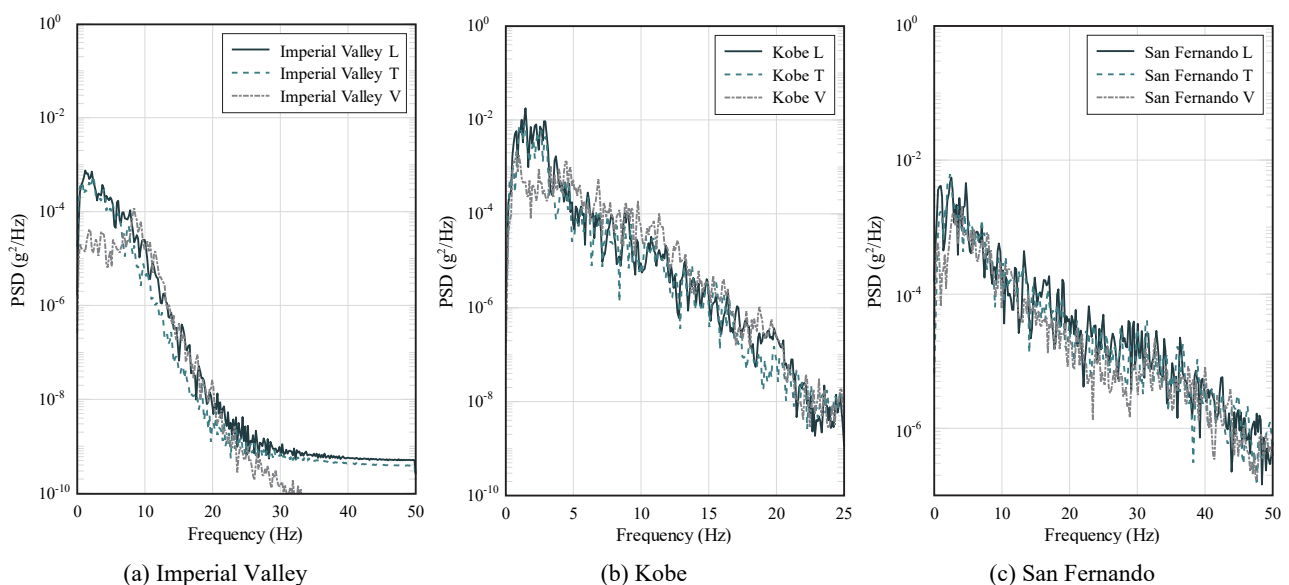


Fig. 6. PSD of input motions

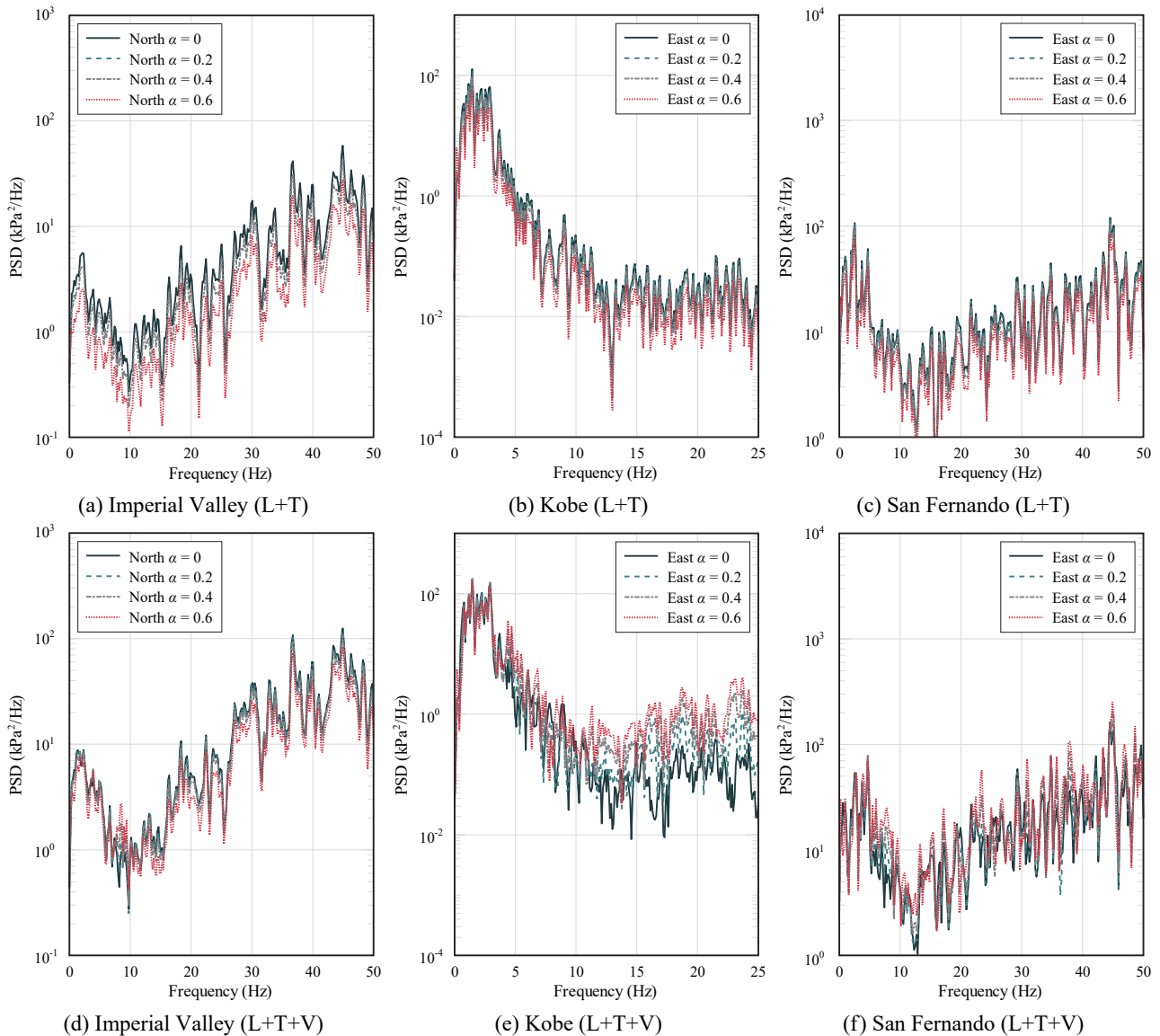


Fig. 7. PSD of hydrodynamic pressure response on the wall

큰 지반 가속도 에너지를 갖는다. 이 지진에서는 수평방향 지반 가속도 에너지가 6 Hz까지 큰 에너지를 갖고 있지만, 수직방향 지반 가속도 에너지는 8 Hz 부근에서 크게 상승되는 것을 볼 수 있다.

Imperial Valley 지진의 L+T 지반 운동을 입력지진파로 재하한 경우와 L+T+V 지반 운동을 입력지진파로 고려한 경우, 유체 압력 에너지 응답 결과에서는(Fig. 7(a)와 7(d)) L+T+V 지반 운동에서 에너지가 상승하였다. 이 지진의 경우, 다른 지진보다 수직방향 지반 가속도 에너지가 상대적으로 작다. 하지만 벽면에 발생한 압력 에너지 결과에서는 수면 근처( $\alpha = 0.6$ ) 계측지점에서 수직 지진파의 고려로 인하여 충격 모드(고주파 영역)의 유체 압력 에너지가 증가하였다.

그리고 가장 큰 수직 지진파 성분을 가지는 San Fernando 지진의 유체 압력 에너지 응답과 충격모드 영역에서 유사한 경향을 보였다(Fig. 7(c)와 7(f)). 이와는 달리, Kobe 지진의 유체 압력 에너지 결과에서는(Fig. 7(b)와 7(e)) 충격모드 범위에서 대류모드 범위보다 작은 유체 압력 에너지가 분석되었다. 이는 수직방향 지반 가속도 에너지가 다른 지진에 비해 상대적으로 작은 에너지를 가지며, 짧은 시간 동안 점차 감소되는 탱크의 움직임에 기여하기 때문에, 내부 유체 관성력이 미비하게 작용하면서 낮은 에너지가 발생하였다. 그러나 Kobe 지진은 수직 지반 변위가 Imperial Valley보다 크게 작용하기 때문에 L+T+V 지반 운동 시 수면 근처( $\alpha = 0.6$ ) 계측지점에서 유체 압력 에너지가 상승하였다. San

Fernando 지진의 경우에도(Fig. 7(c)와 7(f)), 수면 근처( $\alpha = 0.6$ ) 계측지점을 관찰할 때 L+T+V 지반 운동의 유체 압력 에너지가 L+T 지반 운동의 유체 압력 에너지보다 컸다. 이는 San Fernando 지진의 수직 방향 변위 시간 이력은 약 5초 동안 지반 운동이 크게 발생되면서 탱크 내부 물의 흐름이 크게 바뀌었기 때문이다. 즉, 수직 지진파 성분으로 인해 분리된 물 입자가 다시 수면으로 되돌아가면서 입자의 운동 에너지가 증가되고 이로 인해 벽면에 작용하는 유체 압력 에너지의 상승으로 이어졌다(Fig. 8). 동시에 지진파 형태도 내부 유체 관성력의 영향을 미치면서 충격모드의 압력 에너지 응답을 상승시켰다.

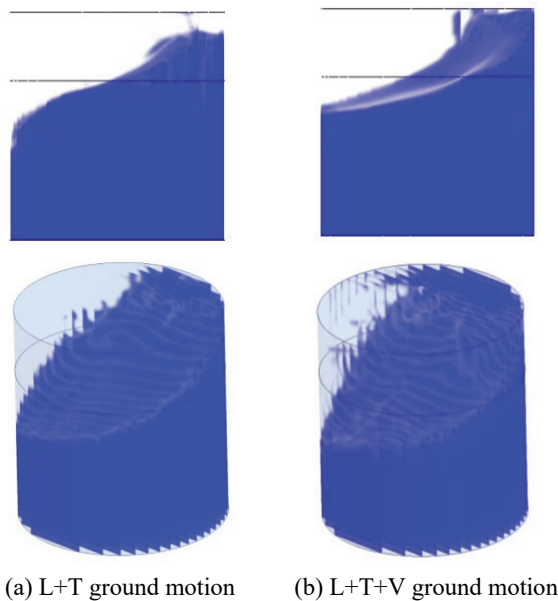


Fig. 8. Sloshing in steel tank under San Fernando earthquake

## 6. 결론

본 연구에서는 지진하중에 종속된 원통형 강재 물탱크 내부 벽면에 작용하는 유체 압력 에너지의 특성을 전산 유체 역학 방법을 활용하여 분석하였다. 이를 위해 비선형 슬로싱 현상을 수치적으로 모사할 수 있는 ANSYS-CFX 프로그램을 활용하였다. 그리고 슬로싱 현상으로 인해 발생하는 벽면 근처의 유동흐름과 수면에서의 유동 분리를 예측하기 위해 전단 응력 전송 모델을 사용하였다. 활용된 수치해석 모델 결과는 기존 슬로싱 실험연구에서 수행된 진동대 실험 결과와 비교하여 수치해석 모델링 기법을 검증하였다. 검증

에 사용된 수치해석 기법을 활용하여 캘리포니아에 위치한 실제 원통형 강재 물탱크에 대하여 해석 모델을 생성하였고, 대상 탱크에 대하여 수직 지진파 성분이 유체 압력 응답에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 지반 운동 특성에 따라 탱크 내부 벽면에 작용하는 유체 압력 에너지 응답변화를 관찰하기 위해 세 개의 다른 지진파를 선택하였다. 연구 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

슬로싱으로 인해 발생된 물탱크 내부 벽면의 유체 압력 에너지 응답은 지진파 자체의 특성에 크게 좌우되었다. 수평과 수직 방향 지진파를 동시에 고려할 경우, 수면 근처 계측 위치에서 수직 지진파를 고려하지 않았을 때보다 에너지가 상승하였다. Kobe 지진이나 San Fernando 지진은 Imperial Valley 지진보다 수면 근처( $\alpha = 0.6$ )에서 압력 에너지 상승폭이 컸는데, 이는 상대적으로 수직 지반운동의 강도가 컸으며, 지진의 지속시간도 길게 발생하였기 때문이다. 이에 따라 수평 지반 운동만 작용할 때보다 수직 지진파 성분이 추가로 고려될 때 물의 흐름에 변화가 발생되면서 수면 근처에서의 압력 에너지가 증가하였다.

지반 운동의 특성과 수직 지진파 성분의 고려 여부에 따라 최대압력, 탱크 높이에 따른 최대 전압력 분포, 및 최대 전압력의 발생 위치가 변화되었다. 수직 지진파 성분을 추가로 고려하여 수치해석을 수행한 결과, 유체의 충격 압력 에너지 증가로 인해 탱크 높이별 유체 압력 에너지가 증가되고, 방향별 압력 특성도 변화되었다. 그리고 세 방향 지진파 성분이 동시에 작용하여 탱크 내부 유체에 코리올리 효과가 발생되면서 최대 압력이 발생하는 위치도 변화되었다. 따라서 강재 물탱크를 설계 시 수평 지진파 성분뿐만 아니라 수직 지진파 성분도 구조 설계의 주요한 인자임을 알 수 있다.

## 감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1C1C1007780).

## 참고문헌(References)

- [1] Oh, C.K., Lee, S.R., Park, J.H., and Bae, D. (2016) Comparison of Allowable Axial Stress Provisions of Cylindrical Liquid Storage Tanks Under Seismic Ex-

- citation, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.4, pp.293-301 (in Korean).
- [2] Bae, D., Park, J.H., and Oh, C.K. (2016) Comparison of Design Standards for Seismic Design of Steel Liquid Storage Tanks, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.3, pp.195-202 (in Korean).
- [3] Housner, G.W. (1957) Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers, *Bulletin of the Seismological Society of America*, SSA, Vol.47, No.1, pp.15-35.
- [4] Chen, W., Haroun, M.A., and Liu, F. (1996) Large Amplitude Liquid Sloshing in Seismically Excited Tanks, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol.25, No.7, pp.653-669.
- [5] Sakata, M., Kimura, K., and Utsumi, M. (1984) Non-Stationary Response of Non-Linear Liquid Motion in a Cylindrical Tank Subjected to Random Base Excitation, *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, Vol.94, No.3, pp.351-363.
- [6] Zeiny, A. (2004) Simplified Modeling of Liquid-Structure Interaction in the Seismic Analysis of Cylindrical Liquid Storage Tanks, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Canadian Association for Earthquake Engineering, Canada, Paper No. 1914.
- [7] Cooper, T.W. (1997) *A Study of the Performance of Petroleum Storage Tanks During Earthquakes, 1933-1995*, NIST GCR 97-720, National Institute of Standards and Technology, USA.
- [8] Di Carluccio, A., Fabbrocino, G., and Manfredi, G. (2008) FEM Seismic Analysis of Steel Tanks for Oil Storage in Industrial Facilities, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Chinese Association of Earthquake Engineering, China.
- [9] Yun, J.H., Kang, T.W., Yang, H., and Jeon, J.-S. (2018) Earthquake-Induced Wall Pressure Response Analysis of a Square Steel Liquid Storage Tank, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol. 22, No.5, pp.261-269 (in Korean).
- [10] Haroun, M.A., and Tayel, M.A. (1985) Response of Tanks to Vertical Seismic Excitations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol.13, No.5, pp.583-595.
- [11] Kianoush, M.R., and Chen, J.Z. (2006) Effect of Vertical Acceleration on Response of Concrete Rectangular Liquid Storage Tanks, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.28, No.5, pp.704-715.
- [12] Yamada, Y., Iemura, H., Noda, S., and Shimada, S. (1987) Long-Period Response Spectra from Nonlinear Sloshing Analysis Under Horizontal and Vertical Excitations, *Natural Disaster Science*, Japan Society of Natural Disaster Science, Vol.9, No.2, pp.39-54.
- [13] Vakilaadsarabi, A., Miyajima, M., and Murata, K. (2012) Study of the Sloshing of Water Reservoirs and Tanks Due to Long Period and Long Duration Seismic Motions, *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Sociedade Portuguesa de Engenharia Sismica, Portugal.
- [14] Godderidge, B., Tan, M., Earl, C., and Turnock, S. (2007) Grid Resolution for the Simulation of Sloshing Using CFD, *Proceedings of the 10th Numerical Towing Tank Symposium*, Ensietu/TUHH, Germany.
- [15] Frandsen, J.B. (2004) Sloshing Motions in Excited Tanks, *Journal of Computational Physics*, Elsevier, Vol.196, No.1, pp.53-87.
- [16] ANSYS (2016) *CFX-17 User's Guide*, ANSYS Inc, USA.
- [17] Godderidge, B., Turnock, S., Tan, M., and Earl, C. (2009) An Investigation of Multiphase CFD Modelling of a Lateral Sloshing Tank, *Computers Fluids*, Elsevier, Vol.38, No.2, pp.183-193.
- [18] Menter, F.R. (1994) Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, *AIAA Journal*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol.32, No.8, pp.1598-1605.
- [19] Baek, E.-R., Choi, H.-S., Park, D.-U., Kim, N.-S., and Kim, J.-M. (2017) Shake Table Test DB of the Liquid Storage Tank for Fluid Sloshing Analysis, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, KSNVE, Vol.27, No.5, pp.545-554 (in Korean).
- [20] Haroun, M.A. (1983) Vibration Studies and Tests of Liquid Storage Tanks, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol.11, No.2, pp.179-206.
- [21] Ancheta, T.D., Darragh, R.B., Stewart, J.P., Seyhan, E., Silva, W.J., Chiou, B.S.-J., Wooddell, K.E., Graves, R.W., Kottke, A.R., Boore, D.M., Kishida, T., and Donahue, J.L. (2014) NGA-West2 Database, *Earthquake Spectra*, Sage, Vol.30, No.3, pp.989-1005.
- [22] Eswaran, M., and Saha, U.K. (2011) Sloshing of Liquids in Partially Filled Tanks: A Review of Experimental Investigations, *Ocean Systems Engineering*, Techno-Press, Vol.1, No.2, pp.131-155.

---

**요 약 :** 본 연구는 강재 물탱크가 수평방향과 수직방향 성분을 포함한 지진하중에 종속될 때, 전산 유체 역학을 이용하여 강재 물탱크 내부 벽면에 작용하는 유체 압력 응답 거동을 분석한다. 이를 위해 본 연구에는 우선 문헌에서 이용 가능한 진동대 실험 데이터와 수치해석 결과를 비교함으로써 해석 모델링 기법을 제안한다. 또한 수직 지진파 성분에 의해 발생하는 슬로싱 유체 압력의 변화를 분석하기 위해 실제 강재 물탱크를 선택한 후 제안된 모델링 기법을 이용해 해석 모델을 생성한다. 생성된 모델에 대해 수직 성분 지진파의 고려에 따라 두 가지 경우의 지진하중 시나리오를 사용하여 수치해석 결과를 분석한다. 비교 결과, 수직 지진파 성분을 고려하면, 강재 탱크 내부의 최대 압력, 탱크 높이에 따른 압력 분포도 및 최대 압력 발생 위치를 변화시킴을 알 수 있다.

**핵심용어 :** 전산 유체 역학, 수직 지반 운동, 강재 물탱크, 비선형 슬로싱, 유체 동압력

---