

정사각형 수조 진동대실험에 대한 상관해석

손일민¹, 김재민^{2*}, 최형석³, 백은림⁴

Post-Correlation Analysis for Shake Table Test of Square Liquid Storage Tank

Il-Min Son¹, Jae-Min Kim^{2*}, Hyung-Suk Choi³, Eun-Rim Baek⁴

Abstract: In this study, a post-correlation analysis for shaking table test of square water storage tank is presented for the use of advances in earthquake-resistant design of liquid storage tank. For this purpose, the ANSYS CFX program is selected for the CFD analysis. Sensitivity analysis for resonant sloshing motion in terms of grid size and turbulence model suggested that (1) horizontal grid size as well as vertical grid size is a key variable in the sloshing analysis, and (2) the SST turbulence model is best for the sloshing analysis. Finally, correlation analyses for a non-resonant harmonic input and scaled earthquake excitation of the El Centro (1940) NS component are carried out using the grid and turbulence model established through the post-correlation analysis for the resonant motion. As a result, sloshing time histories by the CFD analysis agreed very well with the test results.

Keywords: Post-correlation analysis, Seismic analysis, Fluid storage tank, Sloshing, Shake table test

1. 서 론

최근 들어 청정에너지로 각광받고 있는 LNG의 대량 저장을 위한 LNG 수출기지 또는 인수기지 건설이 세계적으로 증가함에 따라 대형 원통형 액체저장시설의 설계고도화를 위한 연구개발이 활발하다(Kim et al., 2011; Kang, 2012; Kim et al., 2012). 이러한 LNG 저장시설은 내진설계 시 유연한 탱크에서 그 영향이 두드러지게 나타나는 FSI(Fluid-Structure Interaction) 효과를 필수적으로 고려해야 한다(Eurocode 8, 1998; API 650, 2007; API 620, 2002). 특히 유체를 저장하는 구조물은 지진시 과도한 유체의 슬러싱(sloshing) 운동이 발생하면 구조물에 손상을 주고, 저장물의 유출로 인한 환경파괴나 인명피해와 같은 2차적인 재해를 유발시킬 수 있다. 따라서 이러한 재해를 사전에 예방하기 위하여 유체저장탱크의 슬러싱 운동을 정확하게 산정하는 것은 매우 중요하다.

유체부분의 거동을 고려하는 대표적인 방법은 집중질량모델 방법, 변위기반 유체요소를 이용하는 방법, 비선형 CFD(Computation Fluid Dynamics) 해석기법을 이용하는 방법이 있다. 변위기반 유체요소를 이용할 경우 고유진동수가 0에 가까운

수많은 hourglass mode들을 피하기 위한 방안이 필요하며 해의 안정성 확보를 위한 모델링 노하우가 요구된다(Ha et al., 2012; Hwang, 2015).

한편, 최근 CFD 해석기술이 비약적으로 발전함에 따라 유체의 지배방정식과 경계조건의 비선형까지 고려한 유체의 거동해석이 가능하다. 이에 따라 CFD 해석기법은 기존의 간략해석기법에서는 적용하지 못했던 유체-구조물 사이의 경계조건, 점성, 온도 등의 변수들을 고려할 수 있어 실제현상과 유사한 유체-구조물 상호작용효과를 고려할 수 있는 장점이 있다(Hwang, 2015; ANSYS CFX, 2016).

하지만 이러한 CFD 해석에 사용되는 상용프로그램들은 동일한 문제를 동일한 조건에서 해석하더라도 해석결과가 일치하지 않는 문제점이 있다. 이 같이 해석결과가 다른 이유는 CFD 해석이론 및 난류모델 적용방법 등이 다르기 때문이다. 따라서 CFD 프로그램을 이용한 유동해석의 신뢰성을 확보하기 위해서는 진동대실험과 같은 실제 실험 결과에 대한 상관해석을 통한 해석모델의 검증이 필요하다(Ibrahim et al., 2001; Ha et al., 2012; Hosseini et al., 2013; Dhole et al., 2015; Chen et al., 1996; Haroun and Chen, 1994).

최근 정사각형 및 원통형의 강제 유체저장탱크에 대한 진동대실험을 수행하고, 이 정보를 슬러싱해석 모델의 검증에 활용할 수 있도록 데이터베이스(DB)로 구축하여 무료로 제공되고 있다(Baek et al., 2016).

이 연구에서는 위와 같은 진동대실험 DB 중 정사각형(1 m × 1 m) 수조 실험 결과에 대한 상관해석(post-correlation analysis)을 수행하였다. 이를 위하여 ANSYS CFX 프로그램을 CFD 해석 툴로 선택하고 슬러싱 공진이 발생하는 운동에 대한 해석모델의 요소크기 및 난류모델에 따른 슬러싱응답의 민감도

¹정회원, 전남대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

²정회원, 전남대학교 해양토목공학과 교수, 교신저자

³정회원, 부산대학교 지진방재연구소 책임연구원

⁴정회원, 부산대학교 지진방재연구소 선임연구원

*Corresponding author: jm4kim@jnu.ac.kr

Dept. of Marine and Civil Engineering, Chonnam National University, Yeosu, 59626, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

를 평가하였다. 이로부터 결정된 CFX 해석모델을 사용하여, 공진이 아닌 진동수가진 및 지진파 입력에 대한 CFD 해석을 수행하고, 실험 결과와 비교하였다. 비교결과, 슬러싱 공진 운동에 상관된 액체저장탱크의 CFD 해석모델을 사용하여 지진 해석을 수행할 경우, 실험 결과와 매우 유사한 CFD 해석 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

2. 진동대실험

진동대실험(Baek et al., 2016)을 실시한 수조의 형상은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 정방형이며, 수조 내 유체는 비압축성이며 균질한 물을 이용하였다. 그리고 수조의 높이는 1.5 m, 액체저장 깊이는 0.8 m이고, 수조의 길이는 1.0 m이다. 유체운동의 충격성분(impulsive component) 보다는 유체 슬러싱 거동을 보다 명확하게 평가하기 위하여 탱크가 강제처럼 거동하도록 벽체를 두께 20 mm인 강재로 제작하였다. 유체가 없을 때 이 탱크의 첫 번째 고유진동수는 29.31 Hz로서 강제처럼 거동한다.

그리고 유체의 슬러싱에 의한 자유수면의 높이 변화 및 동수압을 측정하기 위해 총 5개의 정밀 파고계와 12개의 동수압계 등을 설치하였다. 유체의 슬러싱을 계측하기 위한 수위계의 위치는 Fig. 2와 같다. 진동대실험은 부산대학교 지진방재



Fig. 1 Configuration of specimen for square liquid storage tank

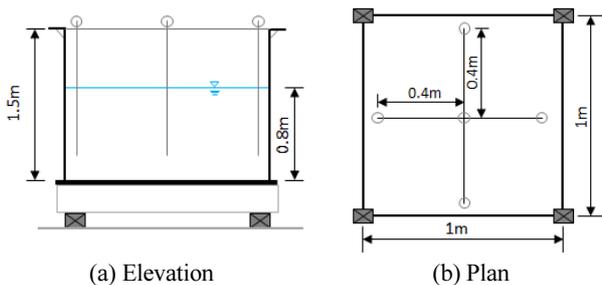


Fig. 2 Sensor location of water level meter

연구센터의 3자유도 진동대를 이용하였다. 그리고 유체 및 저장탱크의 진동수에 따른 거동을 평가하기 위하여 정현파(sine wave) 변위를 입력하여 가진하였다. 또한 유체저장탱크의 지진응답거동을 평가하기 위하여 El-Centro NS(1940년, PGA=0.34g) 가속도를 10%의 비율로 작게하여 가진하였다.

3. 상관해석

3.1 지배방정식과 CFD 프로그램

슬러싱 문제는 유체자유표면의 비선형적 거동으로 인해 정확한 해석에 어려움이 있으며 이러한 비선형성 자유표면 문제에 경계면 포착법(interface capturing method)이 사용되는데 이와 관련된 VOF(Volume of Fluid)가 주로 사용된다(Hwang, 2015). 또한 슬러싱 현상은 자유수면 경계층을 기준으로 이중의 유체가 존재한다. 따라서 자유표면에서 물과 공기의 경계를 표현하기 위해서 다상유동(multiphase fluid) 문제로 접근한 수치모델을 사용한다. 일반적으로 VOF 모델에서 다음의 비정상, 점성 유체를 고려하고 유체의 밀도가 일정한 비압축성 유체에 대한 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식은 각각 식 (1)과 식 (2)로 표현된다.

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + b_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

여기서, x_j 는 좌표계이고, b_i 는 중력항과 같은 외력항이며, ν 는 점성계수(viscous coefficient), ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, t 는 시간, u_i 는 i -축방향 유체의 속도이다.

또한 다상유동의 특성을 고려하기 위해서 각 유체에 대한 Volume Fraction(r_j 로 표기)을 적용하여 유체와 기체 등이 혼합된 다상유동의 각 유체에 대한 밀도(ρ)와 동점성계수(μ)를 식 (3)과 같이 정의한다. 여기서 다상유체의 Volume Fraction은 식 (4)에서와 같이 그 합이 1이 된다.

$$\mu = \sum_{j=1}^3 \mu_j r_j, \quad \rho = \sum_{j=1}^3 \rho_j r_j \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^3 r_j = 1 \quad (4)$$

이 연구에서는 다상유동의 Navier-Stokes 방정식의 해를 구하기 위해 상용 수치해석 프로그램인 ANSYS CFX를 사용하였다. CFX는 요소기반 유한체적법(finite volume method)을 사용하여 3차원 요소로 정의된 각 체적에서 질량, 운동량, 에너지 등을 계산한다(ANSYS CFX, 2016).

3.2 CFD 해석의 사용자 입력변수

CFD 해석은 수치오차, 모델링오차, 사용자오차, 적용불확실도, 소프트웨어 오차 등과 같은 잠재적인 오차 또는 불확실성을 가진다. 이 연구에서는 CFD 해석의 수치오차와 모델링오차가 발생할 수 있는 원인으로 요소크기와 난류모델을 설정하였다. 그리고 이 같은 변수에 대한 민감도해석을 통해 상관해석에 사용될 요소크기와 난류모델을 결정하였다.

3.2.1 요소크기

CFD 해석에서 수치오차들은 공간적으로 요소밀도를 증가시키거나 시간간격을 작게 함으로써 감소될 수 있다. 상관해석 대상은 유체슬러싱의 고유진동수(5.529 rad/s)인 정현파로 가진한 진동대실험이다. 중심에서 0.4m 위치에서 최대수위(η_{max})를 정확하게 계산할 수 있는 요소크기를 결정하기 위해 Table 1과 같이 요소크기에 따른 수위변화에 대한 민감도해석을 수행하였다. Fig. 3은 Table 1의 16번째 요소크기를 적용한 모델이다. 경계조건은 위쪽 면에 열림(opening) 경계조건을 설정하였고 나머지 면은 벽(wall) 경계조건으로 설정하였다. 지진입력은 해석모델 바닥에 변위입력을 적용하였고 해석시간 간격(Δt)은 0.003906초(진동대실험 계측 시간간격)로 충분히 작게 하였다.

민감도해석 결과, 슬러싱해석을 위한 요소크기는 수직방향 요소크기뿐만 아니라 수평방향 요소크기에 따라 예측되는 수

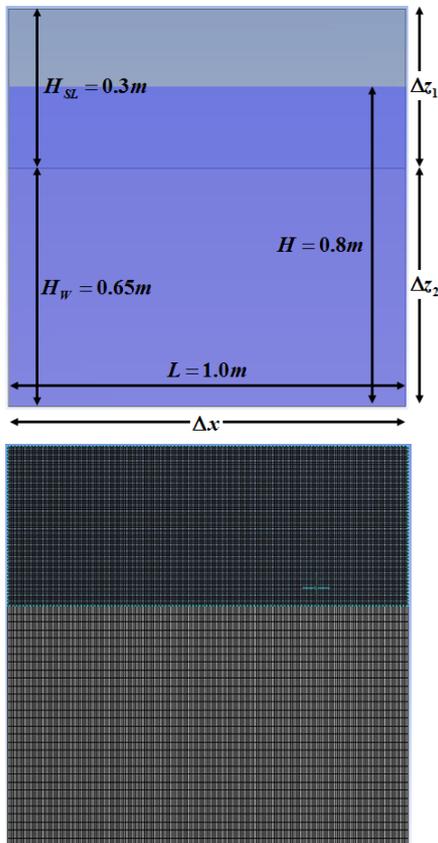


Fig. 3 Numerical model and computation meshes of Case 16

Table 1 Peak sloshing height at x=0.4 m according to mesh size

Case	Δx (m)	Δz_1 (m)	Δz_2 (m)	η_{max} (m)
1	0.02	0.02		0.060
2	0.01	0.02		0.074
3	0.005	0.02		0.080
4	0.0025	0.02		0.090
5	0.02	0.01		0.098
6	0.01	0.01		0.110
7	0.005	0.01		0.118
8	0.0025	0.01		0.121
9	0.02	0.005	0.02	0.120
10	0.01	0.005		0.130
11	0.005	0.005		0.135
12	0.0025	0.005		0.138
13	0.02	0.0025		0.127
14	0.01	0.0025		0.137
15	0.005	0.0025		0.140
16	0.0025	0.0025		0.142
17	0.002	0.002		0.142

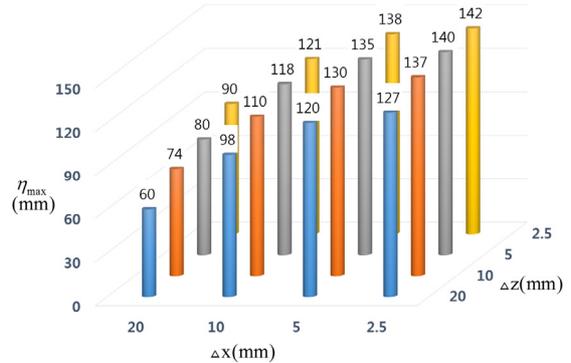


Fig. 4 Peak sloshing height at x=0.4m according to mesh size

위가 민감하게 변하는 것을 확인할 수 있다. Table 1과 Fig. 4에 나타난 것과 같이 16번째 경우의 요소크기부터 수치해석 결과가 수렴하는 것을 알 수 있다. 하지만 수렴한 수치해석 결과는 실험 결과($\eta_{max}^{(test)}=0.150m$)와 6% 정도의 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 Navier-Stokes 방정식을 풀기 때문에 유체의 점성, 비선형성과 더불어 지배방정식을 이산방정식으로 전환할 때 발생하는 수치적인 감쇠의 영향인 것으로 판단된다.

3.2.2 난류모델

CFD 해석을 위한 난류모델(turbulent model)로는 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 기반으로한 DES(Detached Eddy Simulations), LES(Large Eddy Simulations), k- ϵ 모델, k- ω 모델, 레이놀즈 응력 모델(RSM: Reynolds Stress Model) 등이 있다. 이들 난류모델은 난류의 전단응력도 종류와 마찬가지로

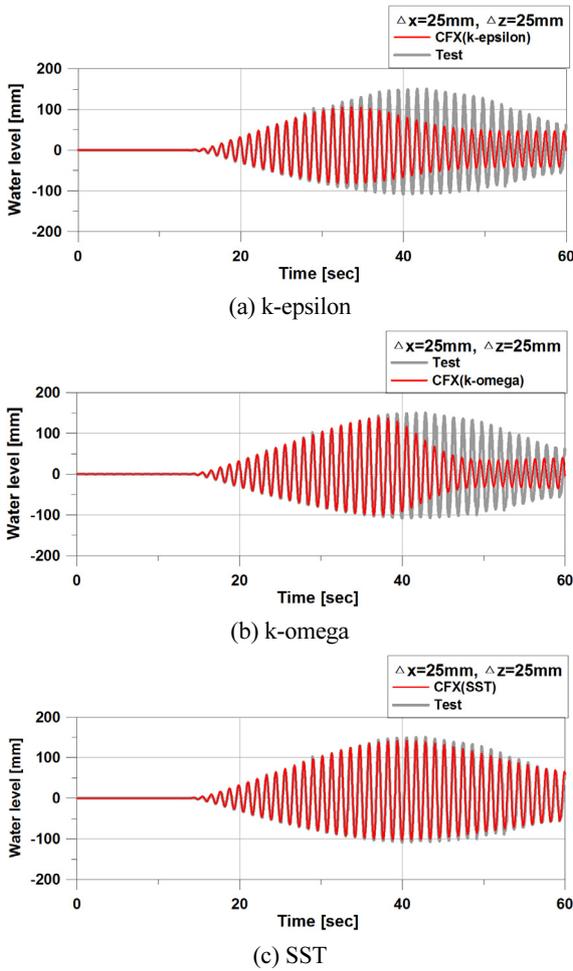


Fig. 5 Comparison of the time history of sloshing height depending on turbulence model

가지로 속도구배를 가진 항으로 나타낼 수 있다고 가정한 Boussinesq 가정에 기반을 두고 있다(ANSYS CFX, 2016). 이 때 난류로 인한 벽체에서 저항을 등가점성계수로 묘사하며, 이 등가점성계수를 와점성계수(eddy viscosity)라 한다. 이를 와점성모델(EVM, Eddy Viscosity Model)이라고도 한다. 와점성모델은 해석하려는 문제에 따라 적합한 난류모델이 사용되지 않는다면, 그 결과가 실제와 매우 큰 차이를 보이거나 물리적으로 불가능한 유동 현상을 예측할 가능성이 있다는 단점이 있다(K-water, 2015).

이 연구에서는 ANSYS CFX에서 제공하는 여러 난류모델들 중 k- ϵ 모델, k- ω 모델, SST(Shear Stress Transport)모델을 사용하였다. 수치해석 대상은 3.2.1절에서 수행된 예제와 동일하며 16번째 요소크기를 사용하였다(Fig. 4). 난류모델에 따른 수위를 계산하고 실험 결과와 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 계산결과, 난류모델에 따라 예측되는 수위가 다른 것을 확인할 수 있다. Fig. 5에 나타난 것과 같이 SST모델의 경우 실험 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 기존 연구 결과와 일치한다(Ha et al., 2012). 이와 같이 난류모델링이 수위 예측에 중대한 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여준다.

Table 2 Input motion of shake table test

Case	wave	Frequency (rad/s)	amplitude	$\eta_{max}^{(test)}$ (mm)
1	sine	5.529	2mm	150.0
2	sine	6.283	2mm	15.8
3	El Centro	-	10% of PGA	21.3

3.3 상관해석

상관해석은 Table 2와 같이 유체의 고유진동수(5.529 rad/s)에 대한 정현파, 고유진동수가 아닌 진동수(6.283 rad/s)에 대한 정현파와 지진응답거동을 평가하기 위한 El-Centro NS(1940년, PGA=0.34g)지진파 입력에 대한 실험 결과에 대해 수행하였다.

해석 모델은 3.2절에서 수행된 최적요소크기, 난류모델을 이용하여 작성하였다. Table 2의 Case 1은 Fig. 4, Case 2와 Case 3는 Fig. 6과 같이 모델링 하였고, 이때 슬러싱 운동은 자유표면의 일부영역만이 참여하므로 슬러싱 영역(H_{sl})을 설정하였다. 슬러싱영역은 진동대실험 DB로부터 최고 수위를 이용하여 설정하였다. 이렇게 함으로써 계산에 필요한 요소의 개수를 줄여 해석시간을 단축시킬 수 있다.

한편, 경계조건은 수조 아래면에 변위조건, 수조 윗면에 열림 조건, 나머지 벽면에 벽 조건을 설정하였다.

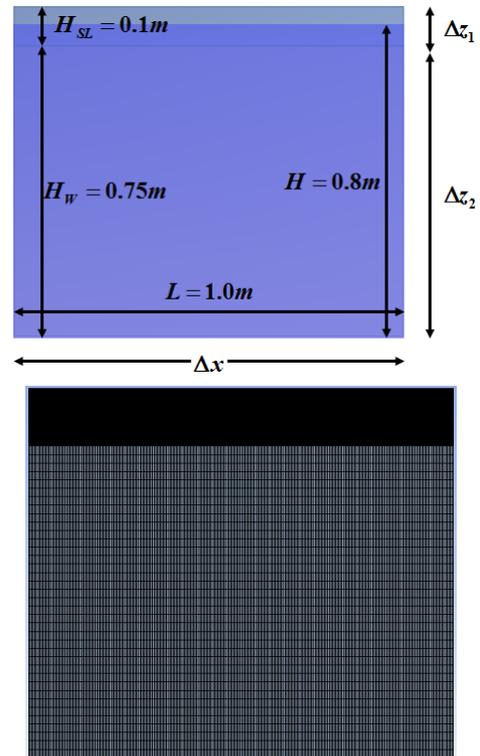


Fig. 6 Numerical model for harmonic motion at non-resonant frequency (5.529 rad/s) and El Centro earthquake input

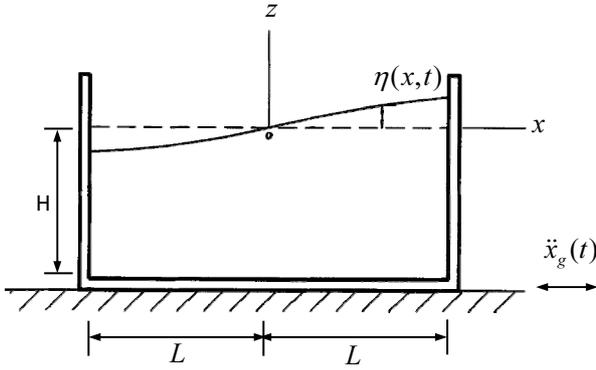


Fig. 7 Liquid sloshing in 2-D domain

3.4 선형슬러싱해석

Eurocode 8을 포함한 대부분의 현행 설계기준에서는 슬러싱 모드 1개만을 사용한 식 (5)와 같은 Haroun 방법을 사용하고 있다.

$$d_{\max} = 0.837R \frac{S_{as}}{g} \quad (5)$$

여기서, R 은 유체저장탱크의 반경, $S_{as} = S_a (T = T_{slosh}, \xi = \xi_{slosh})$, S_a 는 탱크바닥면에 입력되는 지진과의 스펙트럴가속도, T_{slosh} 은 기본 슬러싱모드의 주기, ξ_{slosh} 은 기본 슬러싱모드의 감쇠비, g 는 중력가속도($=9.806 \text{ m/s}^2$)이다.

그러나 여러 연구결과(Kim et al., 2002; Choi et al., 2007; Goudarzi et al., 2009)에 의하면, 슬러싱해석시 고차 슬러싱모드를 고려하여 해석할 필요가 있다. 따라서 이 연구에서는 슬러싱변위를 산정하기 위한 슬러싱모드를 10개 사용하였다.

Fig. 7과 같은 2차원 사각형 수조에 대한 벽체에서 슬러싱 변위 $\eta(t)$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다. 유체의 점성을 무시한 사각형 수조의 운동방정식은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n(t) \sin(\lambda_n x) \quad (6)$$

여기서, $\lambda_n = \frac{(2n-1)\pi}{2L}$ 이며, $\eta_n(t)$ 는 n 번째 슬러싱모드에 의한 벽체에서 유체 수직변위로서 다음과 같은 운동방정식의 해이다.

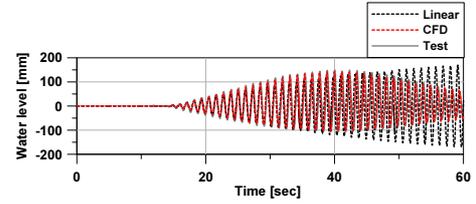
$$\ddot{\eta}_n(t) + 2\omega_n \zeta_n \dot{\eta}_n(t) + \omega_n^2 \eta_n(t) = \Gamma_n \ddot{x}_g(t) \quad (7)$$

여기서, $\Gamma_n = (-1)^n \frac{(\omega_n)^2}{(2n-1)^2} \frac{L}{g} \frac{8}{\pi^2}$, ζ_n 은 n 번째 슬러싱모드의 감쇠비로서 통상 0.005(0.5%)를 사용하고, \ddot{x}_g 는 바닥면에서 가속도이며, 슬러싱 응답에 대한 고유진동수 ω_n 은 다음과 같다.

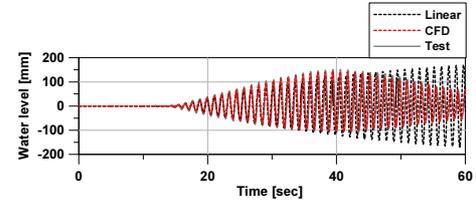
$$\omega_n = \sqrt{g \lambda_n \tanh(\lambda_n H)} \quad (\text{rad/s}) \quad (8)$$

3.5 상관해석결과

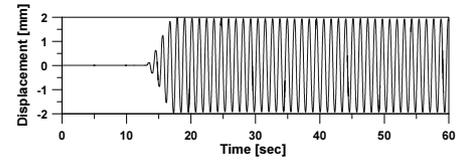
먼저, 가진주파수가 유체의 공진주파수와 일치하여 비선형성이 뚜렷한 경우(Case 1)에 대한 해석을 수행하고 실험 결과와 비교하여 Fig. 8에 정리하였다. Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 각각



(a) Sloshing amplitude at $x=0.4 \text{ m}$

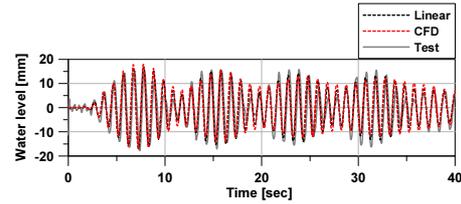


(b) Sloshing amplitude at $x=-0.4 \text{ m}$

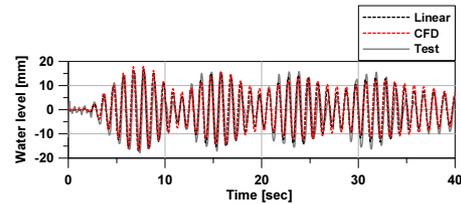


(c) Displacement at bottom of shake table

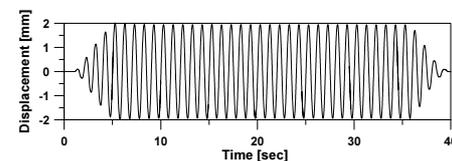
Fig. 8 Comparison of time history of sloshing height for Case 1



(a) Sloshing amplitude at $x=0.4 \text{ m}$



(b) Sloshing amplitude at $x=-0.4 \text{ m}$



(c) Displacement at bottom of shake table

Fig. 9 Comparison of time history of sloshing height for Case 2

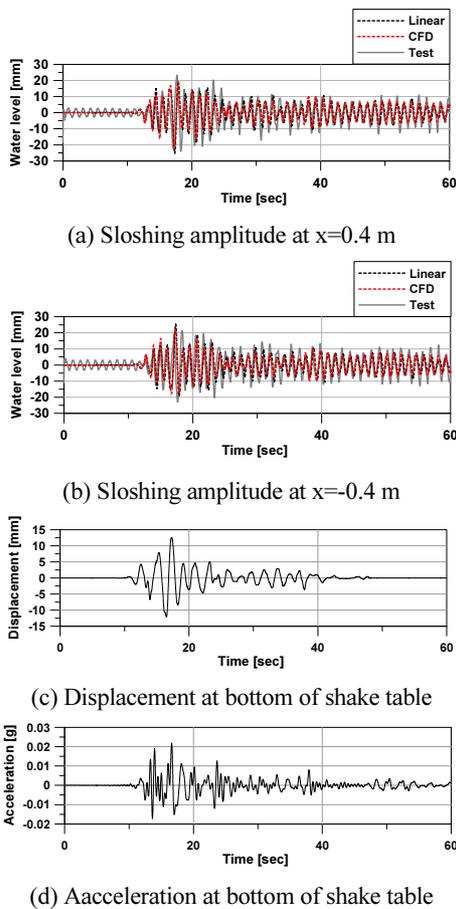


Fig. 10 Comparison of time history of sloshing height for Case 3

$x = +0.4$ m와 $x = -0.4$ m 지점에서의 슬러싱 높이를 비교한 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 선형해석 결과는 실험 결과와 다른 반면, CFD해석 결과는 실험 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

다음으로, 가진 진폭이 작거나 유체의 공진주파수에 근접하지 않는 Case 2와 Case 3에 대하여 해석을 수행하고 Fig. 9와 Fig. 10에 비교하였다. Fig. 9(a)와 Fig. 10(a)는 $x=0.4$ m, Fig. 9(b)와 Fig. 10(b)는 $x=-0.4$ m 지점에서의 슬러싱 높이를 비교한 것이다. 그림에서 보이는 것처럼 Case 2와 Case 3 모두 해석시간 전체에 걸쳐 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한, CFD해석 결과뿐만 아니라 선형해석 결과도 실험 결과와 잘 일치하였다. 이는 Case 2와 Case 3에서 유체운동의 크기가 Case 1에 비해 매우 작아 선형적으로 거동했기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결론

이 연구에서는 CFD 해석 프로그램을 검증하기 위한 정사각형 구조 진동대실험 DB를 활용하여 CFD 해석에 필요한 주요 변수인 요소크기, 난류모델에 대한 민감도 해석을 수행하였다. 그리고 민감도해석 결과를 이용하여 CFD 해석 모델을

작성하고, 지진의 크기가 다른 3가지 실험조건에 대하여 상관 해석을 수행하였다. 또한 현행 실무에서 사용되고 있는 선형 해석을 수행하여 실험 결과와 CFD 해석의 차이를 알아보았다. 이상과 같은 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 슬러싱해석을 위한 CFD 모델의 요소크기는 수직방향 요소크기뿐만 아니라 수평방향 요소크기에 따라 예측되는 수위가 민감하게 변하는 것을 확인할 수 있다.
- 2) CFD 모델의 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델, $k-\omega$ 모델과 ANSYS CFX에서 제공하는 SST 난류모델에 대하여 지진해석을 수행하였다. 해석결과, 난류모델에 따라 예측되는 수위가 다른 것을 확인하였고, SST모델이 실험 결과와 잘 일치하였다. 이와 같이 난류모델링이 수위 예측에 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 확인하였다.
- 3) 지진의 주파수와 가진 진폭이 다른 3가지 예제에 대하여 CFD 해석을 통한 상관해석을 수행하였고, 선형해석 결과와 실험 결과를 비교하였다. 그 결과, 가진 진폭이 작거나 유체의 공진주파수와 근접하지 않은 경우에는 CFD해석, 선형해석, 실험 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 하지만 가진주파수가 유체의 공진주파수와 일치할 경우, 선형해석은 해석시간 전체에 걸쳐 선형 증가하는 반면에 CFD해석 결과는 실험 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.
- 4) 가진주파수가 유체의 공진주파수와 일치한 경우에 유체의 슬러싱 최대값을 비교한 결과, 선형해석은 실험 결과와 12% ~ 14% 차이를 보인 반면에 CFD해석 결과는 실험 결과와 5% ~ 6% 차이를 나타내었다.

감사의 글

이 연구는 국토교통과학기술진흥원 창의도전연구(14CTAP-C077514-01)의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

- ANSYS CFX (2016), ANSYS CFX User's Guide Releases 17.0, Canonsburg, PA, ANSYS, Inc.
- API 620 (2002), Design and Construction of Large Welded Low Pressure Storage, American Petroleum Institute.
- API 650 (2007), Welded Tanks for Oil Storage, American Petroleum Institute.
- Baek, E. R., Choi, H. S., Kim, J. M., and Kim, N. S. (2016), Shake Table Test of Liquid Storage Tank for Nonlinear Fluid Sloshing Analysis, *The Korean Society for Noise and Vibration Engineering*.
- Chen, W., Haroun, M. A., and Liu, F. (1996), Large Amplitude Liquid Sloshing in Seismically Excited Tanks, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 653-669.
- Choi, K. H., and Cho, S. Y. (2007), Seismic Response of Cylindrical Steel Tanks Considering Fluid-Structure Interaction, *International*

- Journal of Steel Structures*, 7(2), 147-152.
- Dhole, A., Raval, C., and Shrivastava, R. (2015), Fluid Structure Interaction Simulation of Automotive Fuel Tank Sloshing using Nonlinear Fluid Properties, SAE Technical Paper 2015-26-0240, doi:10.4271/2015-26-0240
- Eurocode 8 (1998), Design Provisions of Earthquake Resistance of Structures, Part 4: Silos, Tanks and Pipelines, *European Committee for Standardization*, Brussels.
- Goudarzi, M. A., and Sabbagh-Yazdi, S. R. (2009), Numerical Investigation on Accuracy of Mass Spring Models for Cylindrical Tanks under Seismic Excitation, *International Journal of Civil Engineering*, 7(3), 190-202.
- Ha, M. H., Kim, D. H., Choi, H. I., Cheong, C. L., and Kwon, S. H. (2012), Numerical and Experimental Investigations into Liquid Sloshing in a Rectangular Tank, *Proceedings of Advances in Civil, Environmental, and Materials Research 2012*, Seoul, Korea (in Korea).
- Haroun, M. A., and Chen, W. (1994), Correlation of Computed and Observed Large-amplitude Liquid-sloshing Under Sinusoidal Base Excitation, *Proceedings of IMAC XII – 12th International Modal Analysis Conference*, Session 10.
- Hosseini, M., Vosoughifar, H., and Farshadmanesh, P. (2013), Simplified Dynamic Analysis of Sloshing in Rectangular Tanks with Multiple Vertical Baffles, *Journal of Water Science Research*, 5(1), 19-30.
- Hwang, S. Y. (2015), Numerical Simulation of Multiphase FSI Analysis of the LNG Cargo Insulation Subjected to Sloshing Pressure, Ph.D. Dissertation, Inha University, Korea (in Korea).
- Ibrahim, R. A., Pilipchuk, V. N., and Ikeda, T. (2001), Recent Advances in Liquid Sloshing Dynamics, *Applied Mechanics Review*, ASME, 54(2), 133-199.
- Kang, B. R. (2012), Simplified Method for Analysis of Fluid-Structure-Soil Interactions Considering Cylindrical LNG Storage Tank, M.Sc. Dissertation, Chonnam National University, Korea (in Korea).
- Kim, J. M., Jang, S. H., and Yun, C. B. (2002), Fluid-Structure-Soil Interaction Analysis of Cylindrical Liquid Storage Tanks Subjected to Horizontal Earthquake Loading, *Structural Engineering and Mechanics*, 13(6), 615-638.
- Kim, J. M., Kang, B. R., Park, H. J., Yun, C. B., and Jung, M. J. (2012), Issues in Modeling Pile-Supported Above-Ground LNG Storage Tank for Seismic Response Analysis, *Computational Structure Engineering Institute of Korea Conference*, 589-593.
- Kim, J. H., Song, S. Y., Son, W. B. and Lim, Y. M. (2011), Study on the Accuracy Improvement of Simplified Liquid Storage Tanks Seismic Design, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 15, 93-98.
- K-water (2015), A Planning Research : Development of K-water Numerical Analysis Model for Integrated Water Resources Management, Korea Water Resources Corporation.

Received : 08/24/2016

Revised : 10/10/2016

Accepted : 10/19/2016

요 지 : 이 연구에서는 유체저장탱크의 내진 설계 고도화에 활용하기 위하여 정사각형 구조의 슬러싱 진동대실험에 대한 상관해석을 수행하였다. 이를 위하여 CFD 프로그램인 ANSYS CFX를 이용하였다. CFD 해석 프로그램 검증을 위해 슬러싱 공진이 발생하는 운동에 대한 해석 모델의 요소크기 및 난류모델에 대한 슬러싱응답의 민감도해석을 수행하였다. 그 결과, 수직방향 요소크기 뿐만 아니라 수평방향 요소크기에 따라 수위 예측에 민감한 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한, SST 난류모델을 사용한 CFD해석 결과가 실험 결과와 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 이로부터 결정된 CFX 해석모델을 사용하여, 가진 주파수와 가진 진폭이 다른 3가지 실험 결과에 대하여 상관해석을 수행하였다. 그 결과, CFD해석모델을 사용하여 지진해석을 수행할 경우, 슬러싱응답이 실험 결과와 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : CFD, 상관해석, 지진해석, 유체저장탱크, 슬러싱, 진동대실험
