

사각탱크내의 슬로싱 현상에 기인한 벽면운동에 대한 수치모사

Numerical simulation of hydroelastic effects of sloshing phenomena in a rectangular tank

하민호* · 정철웅†

Minho Ha and Cheolung Cheong

Key Words : Sloshing(슬로싱), Hydroelasticity(유탄성), Fluid-Solid Interaction(유체-구조 연성), Tuned Liquid Damper(동조액체댐퍼)

ABSTRACT

Hydroelastic effects on sloshing phenomena in a rectangular tank are numerically investigated. The dimension of the tank is $1000mm \times 600mm$, and the filling ratio of water is 20% of tank height. One of the side walls of tank is assumed to be flexible. The tank is excited into sway motion with amplitude of $100mm$ and frequency of $0.53Hz$ that is first natural frequency of water inside the tank. Prediction results for time histories of pressure and displacement of flexible and rigid walls are compared to quantitatively assess hydroelastic effects on sloshing phenomena.

1. 서 론

부유식 풍력 발전기는 수심이 깊은 해상에서 부유체 구조물 위에 설치된 풍력 발전기를 뜻한다. 해상에는 바람을 방해하는 지형물이 없기 때문에 육지에 비해 지속적이고 강한 바람이 생성된다는 이점이 있지만, 바람과 해류, 조류 등으로 인해 부유식 풍력 발전기의 안정적인 작동에 영향을 주는 많은 외부 가진원이 존재한다는 단점도 있다. 부유식 해상 풍력 발전기의 성능을 유지하기 위해서 이러한 해상 환경을 견딜 수 있도록 설계되어야 한다.

최근에 수동형 댐퍼 종류 중 하나인 동조액체댐퍼(Tuned Liquid Damper, TLD)를 이용하여 부유식 풍력 발전기의 진동을 저감하고자 하는 기초 연구가 진행되고 있다.^(1,2) 현재 동조액체댐퍼는 초고층 건물의 진동을 줄이기 위해 많이 사용되고 있다⁽³⁾. 동

조액체댐퍼 내에서 일어나는 슬로싱 현상이 외부의 힘에 대한 반력을 생성하여 진동을 줄여준다. 슬로싱이란 탱크의 움직임으로 인하여 탱크 내 자유표면을 가지는 유체의 운동을 말한다. 따라서 동조액체댐퍼의 성능을 해석/설계하기 위해서는 먼저 슬로싱 현상을 정확히 해석할 수 있어야 한다.

슬로싱 현상을 분석하는 방법을 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 이론적인 접근방법이다. 대표적인 연구로 Abramson⁽⁴⁾과 Faltinsen⁽⁵⁾의 연구를 예로 들 수 있다. 하지만, 이론적인 방법은 고차의 비선형식이나 복잡한 운동을 이해하기에는 한계가 있다. 두 번째 방법은 실험적인 접근이다^(4,6). Abramson⁽⁴⁾은 다양한 형상의 탱크나 점성효과 등을 바꾸어 가면서 실험을 진행하였다. 하지만 실험적인 방법도 모든 관련된 무차원 변수를 동시에 스케일 다운할 수 없기 때문에 스케일 모델의 결과를 실물로 확장하는데 어려움이 있다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 방법은 세 번째 방법으로서 컴퓨터를 이용한 수치적인 해석이고, 본 연구에서도 수치적 방법을 이용하여 연구를 수행하였다.

기존의 연구^(1,2)에서는 액체를 담고 있는 탱크 벽

† 교신저자: 정철웅, 부산대학교 기계공학부
E-mail : ccheong@pusan.ac.kr
Tel : 051)510-2311 , Fax : 051)514-7460
* 부산대학교 기계공학부

을 강체로 가정하고 해석하였다. 본 논문에서는 이를 확장하여 벽면의 탄성을 고려하고자 한다. 슬로싱 현상에 의한 유탄성 현상을 해석하기 위해서 FSI 해석 기법이 사용되어야 한다. FSI 해석 기법은 유체와 구조를 연성하여 해석하는 기법을 말한다. FSI 수치해석은 1-Way와 2-Way의 두 가지 해석 방법이 있다. 1-Way 해석 방법은 유체에서 구조로만의 데이터 이동이 있을 뿐 구조에서 유체로의 데이터 이동은 없다. 이때 구조는 유체로부터 힘, 압력, 열 등의 데이터를 받는다. 하지만 2-Way 해석 방법은 유체에서 구조만 데이터를 전송할 뿐만 아니라 구조에서 유체로 변경된 변위 데이터도 전송한다. 그래서 1-Way 해석 방법에 비해 2-Way 해석 방법이 시간이 더 오래 걸린다. 구조의 변화가 작은 경우 2가지 방법의 결과는 차이가 없지만 변위가 크게 나타나는 경우 2-Way 해석 방법이 더 정확하게 해석을 수행하는 것으로 알려져 있다⁽⁷⁾. 본 논문에서도 슬로싱 현상으로 인한 사각탱크 내의 벽면 운동을 수치해석하기 위하여 유체와 구조를 동시에 해석을 해야 하기 때문에 2-Way 해석 방법을 사용하였다. 벽면이 강체(Rigid)일 때의 결과와 비교 분석하여 슬로싱 현상이 사각탱크의 벽면 운동에 어떤 영향을 주는지 고찰하였다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 모델

(1) 해석 모델

수치 해석 대상은 이전 연구의 해석 모델^(1,2)을 이용하였다. 모델 크기는 $1000\text{mm} \times 600\text{mm}$ 이고 벽면의 두께는 2mm 로 설정하였다. 물의 높이는 탱크

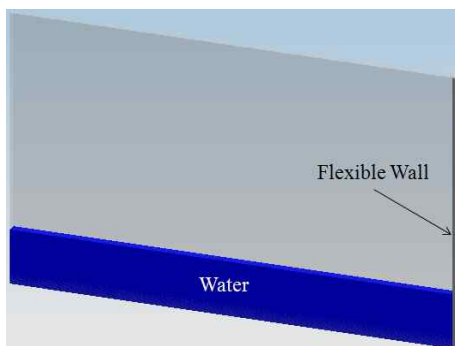


Figure 1 Numerical model

높이의 20%인 120mm 이다. 외부 가진은 진폭이 100mm 이고 진동수는 0.53Hz 이며 X축으로만 가진하였다⁽⁸⁾. Figure 1에서 수치해석에 사용된 모델을 나타내고 있다.

(2) 해석 모델 초기 조건

탱크 내부의 슬로싱 현상을 해석하기 위하여 사용된 유체의 특성과 해석 모델을 Table 1에 나타내었다. 물과 공기를 각각 독립적으로 해석하기 위해서 다상모델(Multiphase Model)을 비균질모델(Inhomogeneous Model)로 설정하였으며 슬로싱 현상이 일어날 때 기포가 생기기 때문에 이 기포를 정확히 해석하기 위해 물은 비압축성, 공기는 압축성으로 설정하였다⁽⁹⁾. 그리고 난류모델은 선행연구⁽²⁾를 통하여 대상 문제에 가장 정확한 결과를 제시하였던 Shear Stress Transport (SST) Model을 사용하였다.

수조의 벽면과 슬로싱 현상을 같이 해석하기 위해서 앞에서 언급한 FSI 해석 방법을 사용하였다. FSI 해석은 구조와 유체를 연성하여 해석하는 방법이기 때문에 구조와 유체를 모두 해석해야 한다. 그래서 유체부분 해석은 ANSYS CFX를 사용하였으며 구조부분 해석은 Mechanical APDL을 사용하여 해석을 수행하였다.

수치 해석에 사용된 Mesh와 경계조건은 Figure 2에 타내었다. 유체 부분에 사용된 Mesh의 크기는 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 로 설정하였고 Mesh의 수는 6000개 이다. 그리고 구조에 사용된 Mesh의 크기는 10mm 이고 Mesh 수는 60개 이다.

경계조건은 사각 수조 아랫면에 Displacement, 수조와 Flexible Wall이 만나는 면에 Fluid-Solid Interface 그리고 나머지 면에 Wall 경계조건을 설정하였다. 초기 조건은 31s때의 슬로싱 현상을 초기 조건으로 주었으며 총 2s 동안의 슬로싱 현상을 해석하였다. 총 해석시간은 CPU 3.2GHz(Quad core), RAM 4Gb 사양의 컴퓨터를 이용하여 약 17시간이 소요되었다.

Table 1 Computational parameters

Parameter	Setting
Multiphase Model	Inhomogeneous
Water	Incompressible
Air	Compressible
Turbulence Model	Shear Stress Transport

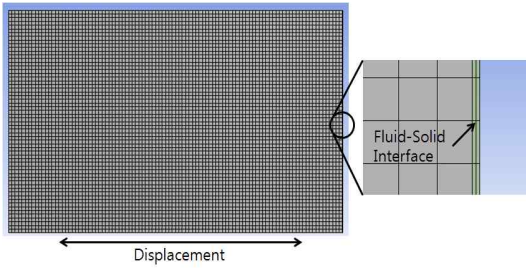


Figure 2 Computational Meshes and boundary conditions

2.2 해석 결과

먼저 벽면이 강체(Rigid)일 때와 탄성(Flexible)일 때의 압력 데이터를 Figure 3에 나타내었다. 압력 데이터를 계산한 위치는 $Z=60\text{mm}$ 이다.

Figure 3와 같이 탄성 벽면의 압력은 강체 벽면의 압력에 비해 더 높은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 탄성 벽면의 압력에 고주파 진동을 확인 할 수 있다. 이러한 진동의 원인을 확인하기 위해 탄성 벽면의 변위를 해석하였다. Figure 4는 탄성 벽면의 압력과 변위를 나타내었다.

Figure 4를 통하여 벽면의 변위에도 진동이 생기는 것을 확인 할 수 있다. 또한 벽면의 압력과 진동이 180도의 위상차 있는 것을 확인 할 수 있다. Figure 5에서 이러한 현상에 대해 벽면의 움직임을 추가 하여 좀 더 자세히 나타내었다. 진동으로 인해 벽면의 변위가 탱크 안쪽으로 향할 때 가장 압력이 크게 작용하며 다시 벽면의 변위가 탱크 바깥쪽으로 향할 때 압력이 낮아지게 된다. 이러한 현상으로 인하여 탄성 벽면은 강체 벽면보다 압력이 크게 나타나고 있다는 것을 알 수 있다.

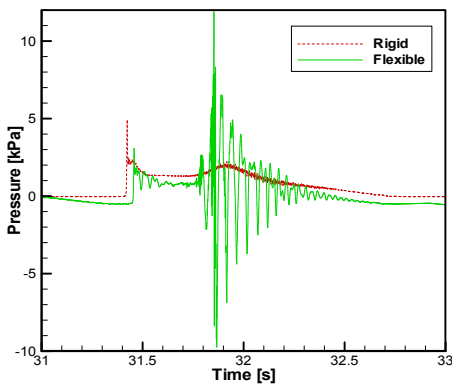


Figure 3 Time-history of pressure in rigid and flexible model

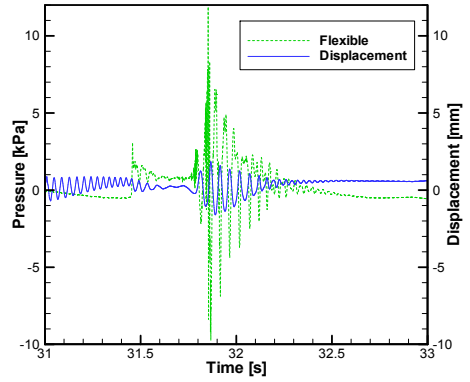
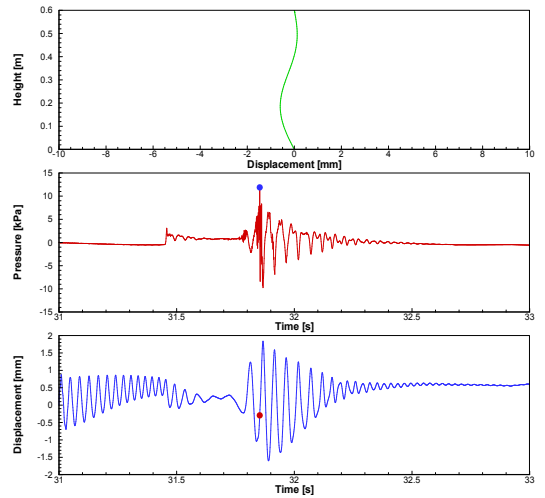
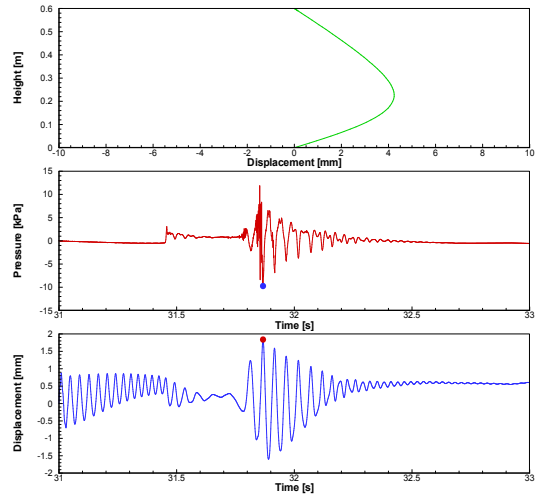


Figure 4 Displacement of flexible wall on tank



(a) 31.853s



(b) 31.867s

Figure 5 displacement of flexible wall and time history of pressure and displacement

3. 결 론

사각탱크내의 슬로싱 현상에 의한 유탄성 현상을 수치해석적으로 고찰하였다. 해석 모델의 크기는 $1000\text{mm} \times 600\text{mm}$ 이고 물의 높이는 120mm 이었다. 가진 진폭은 100mm 이고 가진 진동수는 0.53Hz 이며 이 진동수는 물이 채워진 사각탱크의 첫 번째 슬로싱 고유 진동수이다. 해석한 결과 강체(Rigid)벽면의 최대 압력에 비해 탄성(Flexible)벽면의 최대 압력이 높게 나타난다는 것을 확인하였고 이것은 벽면의 운동에 관계가 있다. 즉 벽면의 변위가 탱크 안쪽으로 향할 경우 큰 압력이 나타났고 변위가 탱크 바깥쪽으로 향할 경우 작은 압력이 나타났다. 따라서 슬로싱 현상에 의한 안정성을 확인할 때 강체 벽면으로 해석할 경우 탄성 벽면으로 해석하는 것보다 압력이 작게 나오기 때문에 더 정확한 계산을 위해 벽면의 정확한 재료 특성을 반영하여 해석을 진행해야 한다는 것을 확인할 수 있다.

추가적인 연구를 통하여 유탄성 슬로싱 현상에 대한 수치 해석결과를 실험결과와의 비교를 통하여 검증한 다음, 이를 TLD 해석으로 확장하고자 한다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20113020020010)

참 고 문 헌

(1) Minho Ha, Daegwan Kim, Hu In Choi, Cheolung Cheong, Sun Hong Kwon, 2012, "Numerical and experimental investigations into liquid sloshing in a rectangular tank," Advances in Wind and Structures 2012, Seoul, Korea, 26-30 Aug. 2012.

(2) Minho Ha, Daehwan Kim and Cheolung Cheong, 2012, "Numerical parametric study on liquid sloshing in a rectangular tank", Advances in Wind and Structures 2012, Seoul, Korea, 26-30 Aug. 2012

(3) Ahsan Kareem, Tracy Kijewski, 1999, Mitigation of motions of tall buildings with specific

examples of recent applications, Wind and Structures, Vol. 2, No. 3 201-251.

(4) Abramson, H. N., 1966, The dynamic behavior of liquids in moving containers, NASA SP-106

(5) Faltinsen, O. M., 1974, A nonlinear theory of sloshing in rectangular tanks, J. Ship Res., 18s4d, 224-241.

(6) Hye-Ri Lee, Kyung-Won Min, 2010, Experiment of a liquid damper controlling bi-directional wind responses of a tall building, KSNVE, Vol. 20, No. 3, 287-295.

(7) Friedrich Karl Benra, Hans Josef Dohmen, Ji Pei, Sebastian Schuster, Bo Wan, A comparison of one-way and two-way coupling methods for numerical analysis of fluid structure interactions, Journal of Applied Mathematics, Volume 2011.

(8) Hu In Choi, Jung Ho Park, Sun Hong Kwon, Ki Hyun Lee, Sang Beom Lee, Young Jun Yang, 2012, An experimental study on hydro-elasticity in sloshing, Preceedings of the 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.

(9) Bernhard Godderidge, Stephen Turnock, Chris Earl, Mingyi Tan, 2009, The effect of fluid compressibility on the simulation of sloshing impacts, Ocean Engineering 36, 578-587.