

내부 슬로싱 현상을 이용한 사각상자 형태의 부유체 Sway 거동 모 사에 대한 수치적 고찰

Numerical study of sway motion of a rectangular floating body with inner sloshing phenomena

하민호* · 정철웅†

Minho Ha and Cheolung Cheong

Key Words : Wave(파), Wave maker(조파기), Sloshing(슬로싱), Tuned Liquid Damper(동조액체댐퍼), Floating body(부유체).

ABSTRACT

In this paper, possibility of controlling motion of a floating structure using a tuned liquid damper (TLD) is numerically investigated. A TLD is a tank partially filled with liquid. Sloshing phenomena of liquid inside a tank can suppress movement of the tank subject to external excitations at specific frequency. The effects of sloshing phenomena inside a rectangular floating body on its sway motion are investigated by varying excitation frequency. First, a grid-refinement study is carried out to ensure validity of grid independent numerical solutions using present numerical techniques. Then, sway motion of the floating body subjected to wave with five different frequencies are simulated. The normalized amplitudes of sway motion of the target floating body are compared over the frequency, for cases with and without water inside the floating body. It is shown that the motion of the floating body can be minimized by matching the sloshing natural frequency to excitation frequency.

기 호 설 명

- η : 파의 진폭
- h : 물의 높이
- k : 파수
- g : 중력가속도
- L : 수조의 길이

1. 서 론

신재생에너지원 중의 하나인 풍력발전기는 바람의 힘을 이용하여 전력을 생산하는 설비로서 화석 연료의 고갈로 인하여 신재생에너지에 대한 중요성이 강조되면서 최근에 관련 연구가 활발히 진행되고

있다. 특히 육지에서는 소음, 경관 등의 환경문제로 설치가 어려워짐에 따라 설치 장소를 해상으로 이동하고 있다. 좋은 해상 풍질은 이러한 추세를 더욱 가속화하고 있다. 해상풍력 중에서도 깊이가 깊지 않은 근해에서 사용되는 고정식 해상풍력발전기는 이미 선진국에서 활발히 실용화되어 운용되고 있으며, 최근에는 좀 더 풍부한 자원을 찾아 깊은 수심에서도 설치 할 수 있는 부유식 해상 풍력발전기에 대한 관심이 높아지고 있다. 부유식 해상 풍력발전기란 부유식 해상 구조물 위에 풍력터빈을 설치 한 것을 말한다. 이러한 풍력발전기는 깊은 수심에서도 설치 할 수 있다는 장점이 있지만 바람이나 파도, 해류 등으로 인하여 많은 진동이 생기게 된다. 이러한 진동의 적절한 제어가 부유식 해상풍력발전기의 효율성에 가장 핵심적인 요소이다. 이미 초고층 건물에 많이 사용되는 동조액체댐퍼(Tuned Liquid Damper, 이하 TLD)⁽¹⁾를 이용하여 이러한 부유체의 운동을 제어하기 위한 기초연구⁽²⁻⁴⁾가 수행되었다.

† 교신저자; 정철웅, 부산대학교 기계공학부
E-mail : ccheong@pusan.ac.kr
Tel : 051-510-2311, Fax :051-514-7640
* 부산대학교 기계공학부

TLD 란 내부의 일부분이 물이 채워져 있는 탱크를 말하는데 이 내부 물의 운동에 의해 외력에 대한 반력이 생성되어 설치된 구조물의 진동을 줄여주는 역할을 한다.

이 논문에서는 이러한 TLD 의 내부 슬로싱에 대한 선행연구^(2,3)를 바탕으로 내부 슬로싱의 고유주파수를 이용하여 임의의 주파수를 가진 외부 가진력에 노출되어 있는 부유체의 운동을 조절하기 위한 가능성을 수치적으로 고찰하였다. 문제를 단순화하기 위하여 간단한 형상인 사각상자 형태의 부유체와 내부의 물을 이용하여 부유체에 대한 동조액체 덤퍼의 진동저감 특성을 확인하고자 한다.

내부 슬로싱과 사각 형상의 부유체와의 연계 운동에 대한 실험은 몇몇의 선행연구를 통하여 이루어졌다.^(5,6) 예측결과의 유효성을 확인하기 위하여 Rognebakke & Faltinsen⁽⁵⁾의 실험 모델과 동일하게 해석 모델을 설정하였다. 먼저 주파수에 따른 파의 전파 특성을 해석하여 부유체가 설치될 위치에서의 파의 진폭을 계산하였다. 이 계산결과는 부유체의 운동을 해석할 때 부유체의 변위를 정규화하기 위한 데이터로 사용하였다. 다음으로 내부 물의 유무에 따른 부유체 운동을 해석하여 내부 슬로싱에 의해서 부유체의 운동이 주파수에 따라 어떻게 변하는지 확인하였다.

2. 수치해석기법

2.1 수조의 파동 이론

(1)비점성 포텐셜 파의 이론 (Wave theory)

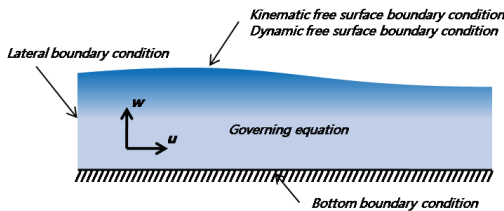


Figure 1 Boundary conditions of wave

파의 이론에서 유체는 비점성, 비회전 그리고 비압축성 유체로 가정하였다. 수조에서 파의 이론은 경계조건 문제로 생각할 수 있다.⁽⁷⁾ Fig.1은 반복되는 파 중 한 파장을 그림으로 나타내었다. Fig.1에서 나타낸 경계조건을 적용하여 수조내부 수면의 파에 대한 이론을 유도하였다. 지배방정식은 속도의 포텐셜함수에 대한 라플라스 방정식으로 표현할 수

있다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

경계조건들은 먼저 물의 바닥에서는 면에 수직한 속도가 아래 식과 같이 0이 되어야 하고,

$$w = 0 \quad (2)$$

수면에서의 운동학적과 동역학적인 자유표면 경계조건은 각각 다음 아래의 두 식으로 정리할 수 있다.

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (3)$$

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\eta = C(t) \quad (4)$$

그리고 옆면에서는 주기경계조건을 적용한다.

$$\phi(x, t) = \phi(x + L, t) \quad (5)$$

$$\phi(x, t) = \phi(x, t + T)$$

식(1-5)의 지배방정식과 경계조건들을 사용하여 변수분리법을 이용하면 속도 포텐션은 다음 식으로 나타나게 된다.

$$\phi = \frac{H}{2} \frac{g}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \sigma t) \quad (6)$$

$$\text{여기서 } \sigma^2 = gk \tanh kh \quad (7)$$

식 (6-7)을 이용하여 파의 진동수와 파장을 결정할 수 있다.

(2) 조파 이론 (Wave maker theory)

수치적으로 파를 생성하는 방법은 유체의 속도를 지정하거나 경계의 변위를 설정하는 방법이 있다. 여기서 경계의 변위를 설정하는 방법은 대표적으로 플랩(Flap) 방식과 피스톤(Piston) 방식이 있다. 각각의 방식에 대한 수식은 다음 식으로 표현할 수 있다.

플랩 방식 (Flap type)

$$\frac{H}{S} = 4 \left(\frac{\sinh kh}{kh} \right) \frac{kh \sinh kh - \cosh k + 1}{\sinh 2k + 2kh} \quad (8)$$

피스톤 방식 (Piston type)

$$\frac{H}{S} = \frac{2(\cosh 2kh - 1)}{\sinh 2kh + 2kh} \quad (9)$$

여기서 H 는 생성하고자 하는 파의 진폭이고 S 는 조파기의 변위이다. 따라서 원하는 파의 진폭을 결정하면 경계조건으로 적용할 조파기의 변위를 설정할 수 있다.

2.2 Wave 수치해석

(1) 계산격자

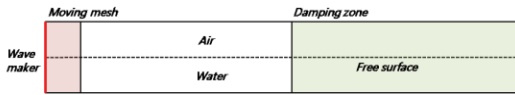


Figure 2 Geometry of flume

Fig.2는 수치해석을 위한 계산영역을 나타내고 있다. 길이가 13.5m이고 높이는 2m인 수조를 모델링 하였으며 물의 높이는 1m이다. 파의 생성 방법은 피스톤 방식으로 경계의 변위를 설정하여 생성하였다.

동격자(Moving mesh)에 의해 생성된 파의 수치적 감쇄를 최소화하기 위하여 수조의 길이 방향으로 3 부분으로 나누어 격자를 구성하였다.⁽⁸⁾ 왼쪽의 첫 번째 구간은 동격자에 의해 파를 생성하는 구간으로서 1m 길이로 구성하였다. 두 번째 구간은 물리적인 계산영역으로서 조파기에서 만들어진 파를 전파시키고 부유체의 운동을 모사하기 위한 영역으로 6m 길이로 설정하였다. 세 번째 구간은 수조 끝의 벽면으로부터 물리영역으로 되돌아오는 반사파의 영향을 줄이기 위한 감쇄영역으로서 급격하게 격자 간격을 늘임으로써 수치적 감쇄를 극대화하였다.

(2) 지배방정식과 수치기법

유체의 지배방정식으로 비정상, 비압축성 Reynolds-Average Navier-Stokes(RANS) 방정식을 사용하였다. 파를 생성하기 위해 물과 공기를 같이 해석하는 다상(Multiphase) 모델을 이용하였고 Volume of fluid (VOF) 방법을 이용하여 자유표면을 해석하였다.

선형파동 이론이 성립하는 범위내에서 부유체의 운동을 모사하기 때문에 난류의 영향은 작다는 가정하에 층류유동으로 해석하였다. Anant Lal과 Elangovan⁽⁹⁾의 연구에서 파의 생성에 대해 난류모델을 사용한 결과와 층류유동으로 해석한 결과 사이에 큰 차이를 보이지 않는다고 보고하였다.

해석경계조건은 위쪽 면에는 열림(Opening) 경계조건을 설정하였고 나머지 면은 벽면(Wall) 경계조건으로 설정하였다. 특히 왼쪽면은 조파기를 모사하기 위한 경계조건으로 식 (8)로 정의되는 사인파형의 동격자를 적용하였다.

3. 수치해석결과

(1) 최적격자

해석하고자 하는 부유체의 운동은 파의 진폭에 민감한 영향을 받고 이러한 파의 진폭은 수면근처에서의 격자 해상도에 따라 큰 차이를 보인다. 따라서 자유표면 근처의 격자 크기에 따른 파의 진폭 변화를 확인하기 위해 표 1과 같이 격자크기를 줄여가면서 수치적으로 계산되는 파의 진폭을 계산하였다. 부유체가 위치하게 되는 곳인 조파기로부터 x축으로 2m 떨어진 곳에서 계산하였으며 조파기로 생성한 이론적인 파의 진동수는 8.6rad/s, 진폭은 0.0416m 이고 파장은 0.8327m 이다.

Table 1 Mesh size of each cases

Case	$\Delta x(m)$	$\Delta y(m)$	Wave amplitude(m)
1	0.04	0.02	0.01713
2	0.04	0.01	0.02049
3	0.02	0.01	0.02432
4	0.02	0.005	0.02851
5	0.01	0.005	0.02851

계산결과 격자의 크기에 따라 예측되는 파동의 진폭이 민감하게 변하는 것을 확인할 수 있다.⁽¹⁰⁾ 표 1에 나타난 것과 같이 4번째 경우의 격자부터 수렴하는 것을 알 수 있다. 하지만 수렴한 수치 해석 결과는 2.1절에서 기술한 이론으로 예측되는 파의 진폭에 대해 약 31% 정도의 상대오차를 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 점성에 의한 영향과 수치적인 감쇄의 영향인 것으로 보인다. 이후의 모든 계산 결과는 Case 4에 사용한 격자를 사용하였다.

(2) 주파수에 따른 파의 진폭 변화 해석

식 (7)에 의해 주파수가 변하면 파의 파장이 변하게 된다. 이때 파의 파장에 비해 진폭이 커지게 되면 쇄파(Wave breaking)현상이 나타나게 되는데 이를 막기 위해서는 파의 파장과 진폭의 비인 경사도(Steepness)를 일정하게 유지해야 한다.⁽⁵⁾ 이러한 경사도를 유지하기 위해 파의 주파수에 따라 진폭도 변경하면서 계산을 수행하였다. 표 2에서 식 (9)의 조파 경계조건에 적용된 사용된 변수 값을 정리

하였다.

Table 2 Parameters of wave maker

Freq.(rad/s)	L (m)	H (m)
7.6	1.0662	0.0533
8.1	0.9387	0.0469
8.6	0.8327	0.0416
9.1	0.7437	0.0372
9.6	0.6683	0.0334

표 2의 설정을 적용하여 해석을 수행하였으며 부유체의 예정 위치인 조파기에서 2m 떨어진 곳에서의 파의 진폭을 계산하였다. 계산한 결과를 다음 표 3에 나타내었다. 이론식에서 예측할 수 있는 것과 같이 주파수에 따라 파의 진폭이 감소함을 확인 할 수 있다.

Table 3 Result of wave amplitude

Freq.(rad/s)	Wave Amp.(m)
7.6	0.04073
8.1	0.03331
8.6	0.02766
9.1	0.02218
9.6	0.01694

위의 계산 결과는 추후 부유체 운동의 변위 값을 정규화 할 때 사용한다.

(3) 부유체 해석

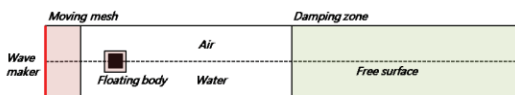


Figure 3 Geometry of flume and floating body

파에 의한 부유체 운동을 해석하기 위해 Fig.3과 같이 이전의 계산영역에 부유체를 추가하였다. 부유체는 길이가 0.4m인 정사각형 형상이고 물에 잠기는 높이는 길이의 반인 0.2m로 설정하였다. 부유체의 운동은 스웨이(sway)방향만 움직이도록 설정하였고 파로 인해 뒤로 밀리는 현상을 줄이기 위해 0.8N/m의 스프링 상수를 가진 스프링으로 고정하였다.

(3) 물이 없는 부유체의 운동 해석

먼저 물이 없는 사각상자 형태의 부유체 운동을

해석하였다. 각 주파수에 대한 예측 결과를 아래 표 4에 정리하여 나타내었다.

파의 진폭이 외부가진 주파수가 증가함에 따라 감소하기 때문에 부유체 운동의 변위 역시 같은 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 정규화된 변위 값은 대체로 감소하지만 감소경향은 현격히 줄어들음을 알 수 있다.

Table 4 Displacement of floating body without water

Freq.(rad/s)	Disp.(m)	Wave Amp.(m)	Disp./Wave Amp.
7.6	0.02738	0.04073	0.6722
8.1	0.01980	0.03331	0.5944
8.6	0.01784	0.02766	0.6449
9.1	0.01170	0.02218	0.5275
9.6	0.00960	0.01694	0.5667

(3) 물이 있는 부유체의 운동 해석

물이 있는 부유체의 운동을 해석하였다. 내부와 외부 사이의 두께는 0.01m로 설정하였으며 내부에 물의 높이는 0.19m로 설정하였다. 나머지 다른 설정은 이전의 해석과 동일하다. 각 주파수에 대한 예측 결과를 아래 표 5에 정리하여 나타내었다. 내부 슬로싱의 공진주파수에서 무차원화된 변위 값이 최소가 됨을 확인 할 수 있다. Fig.5에서 부유체 외부와 내부의 유체 모습을 나타내고 있는데 내부 슬로싱 형상이 외부파의 형상과 반대 위상을 가짐으로써 sway 운동을 감소시킴을 알 수 있다.

Table 5 Displacement of floating body with water

Freq.(rad/s)	Disp.(m)	Wave Amp.(m)	Disp./Wave Amp.
7.6	0.00882	0.04073	0.2165
8.1	0.00242	0.03331	0.0726
8.6	0.00056	0.02766	0.0202
9.1	0.00186	0.02218	0.0838
9.6	0.00289	0.01694	0.1706

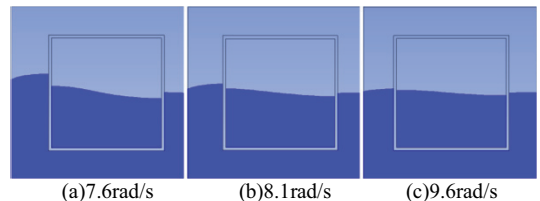


Figure 4 Motion of fluid inside and outside tank

(4) 결과 비교

부유체 내부에 물의 유무에 따른 결과를 비교하기 위해 Fig.5에 무차원화된 sway 운동의 변위 값을

주파수에 따라 나타내었다. 먼저 내부에 물이 없을 경우 외부가진 파의 주파수가 높아지면 부유체의 움직임이 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 물이 있을 경우 부유체의 움직임이 물이 없을 경우에 비해 작아지는 것을 확인 할 수 있고 파의 주파수가 내부 물의 고유진동수인 슬로싱 고유진동수 ($f = 8.6\text{rad/s}$)과 일치하면 부유체의 운동이 최소가 되는 것을 확인 할 수 있다. 즉 내부의 슬로싱 현상이 부유체의 운동을 감소시키고 특히 외부가진 주파수가 슬로싱 고유주파수와 동일할 때 부유체의 운동을 최소화할 수 있음을 확인하였다.

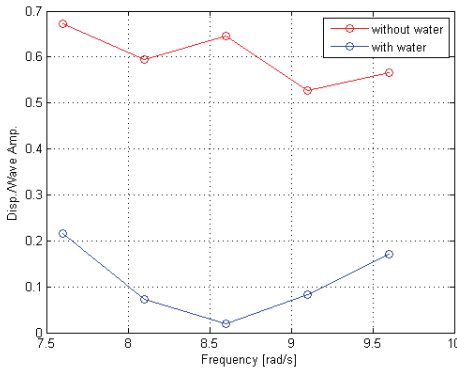


Figure 5 Normalized displacement of floating body with and without water

3. 결 론

부유체 내부의 물의 슬로싱에 의한 부유체의 운동을 수치적으로 고찰하였다. 임의의 주파수를 가지는 파를 생성하고 이에 노출되어있는 부유체의 운동을 모사하였다. 내부 슬로싱 고유주파수 8.6rad/s를 중심으로 $\pm 0.5\text{rad/s}$ 로 변화시키며 물이 있을 때와 없을 때의 부유체 운동을 비교하였다. 가진하는 파의 진폭으로 무차원된 sway 운동 변위의 비교를 통하여 물이 있을 때 대체적으로 물이 없을 때에 비해 진폭이 감소하는 것을 확인하였으며, 특히 슬로싱 고유주파수에서 운동이 최소가 되는 것을 확인하였다.

이 결과를 바탕으로 내부 슬로싱 주파수를 조정하여 외부 가진력에 대한 부유체의 운동을 제어할 수 있다는 것을 확인하였으며, 후속연구를 통하여 해상 풍력발전기에 사용되는 실제 부유체에 적용함으로써 관련기술의 실용화 가능성을 타진할 예정이다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) Ahsan Kareem, Tracy Kijewski, 1999, Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications, Wind and Structures, Vol. 2, No. 3, pp.201~251.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Myeongwoo Seo, Weuibong Jeong, Jinrae Cho, 2012, Experiment on sloshing of annular cylindrical tank for development of attitude control devices of floating offshore wind turbines, KSNVE, 23(1), pp.25~33.
- (5) Rognebakke, O. F., Faltinsen, O. M., 2003, Coupling of Sloshing and Ship Motions, Journal of Ship Research, Vol. 47, No. 3, pp.208~221.
- (6) YunHo Kim, Hong G. Sung, SeokKyu Cho, HuiUn Jeong, Hang S. Choi, 2012, An experimental study on the sloshing effect to the rectangular cylinder's 1-DoF & 2-DoF motions, KAOSTS, pp.1388~1392.
- (7) Robert G. Dean, Robert A. Dalrymple, 2000, Water wave mechanics for engineers and scientists, World Scientific.
- (8) Maguire, A. E., 2011, Hydrodynamics, control and numerical modeling of absorbing wavemakers, University of Edinburgh.
- (9) Anant Lal, M. Elangovan, 2008, CFD simulation and validation of flap type wave-maker, WASET, 46, pp.76~82
- (10) Silva, M. C., Vitola, M. d. A., Pinto, W. T. P., and Levi, C. A., 2010, Numerical Simulation of monochromatic wave generated in laboratory: Validation of a CFD code. In 23 Congresso Nacional de Transport Aquaviario Construcao Naval Oshore, pages 1~12, Rio de Janeiro.