

내부 슬로싱 현상에 따른 사각상자 형태의 부유체 서지 거동에 대한 수치적 고찰

Numerical Investigation on Surge Motion of a Rectangular Floating Body due to Inner Sloshing Phenomena

하 민 호* · 정 철 응†
Minho Ha and Cheolung Cheong

(Received May 7, 2013 ; Revised June 17, 2013 ; Accepted June 17, 2013)

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 motion of liquid inside a tank is known to suppress movement of the tank subject to external excitations at specific frequency. The effects of sloshing phenomena inside a rectangular floating body on its surge motion are investigated by varying external excitation frequency. First, a grid-refinement study is carried out to ensure validity of grid independent numerical solutions using present numerical techniques. Then, surge motion of the floating body subjected to external wave is simulated for five different excitation frequencies of which the center frequency equals to the natural frequency of internal liquid sloshing. The normalized amplitudes of surge motion of the target floating body are compared according to the excitation frequency, for the 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 the excitation frequency.

1. 서 론

풍력발전기는 신재생에너지원 중의 하나인 바람의 힘을 이용하여 전력을 생산하는 설비로서 화석연료의 고갈로 인하여 신재생에너지의 중요성이 강조됨에 따라 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 최근에는 소음, 경관 등의 환경문제와 좋은 품질로 인하여 설치 장소를 육지에서 해상으로 이동하고

있는 추세이다. 해상 풍력발전기 중에서 깊이가 깊지 않은 근해에서 사용하는 고정식 해상 풍력발전기는 이미 선진국에서 활발히 실용화되어 운용되고 있으며, 최근에는 좀 더 풍부한 자원을 찾아 깊은 수심에서도 설치할 수 있는 부유식 해상 풍력발전기에 대한 관심이 높아지고 있다.

부유식 해상 풍력발전기란 부유식 해상 구조물 위에 풍력터빈을 설치 한 것을 말한다. 부유식 해상 풍력발전기는 깊은 수심에서도 설치할 수 있다는 장

† Corresponding Author ; Member, Pusan National University
E-mail : ccheong@pusan.ac.kr
Tel : +82-51-510-2311, Fax : +82-51-514-7640
* Pusan National University

‡ Recommended by Editor Hyung-Jo Jung
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

점이 있지만 바람이나 파도, 해류 등으로 인하여 큰 운동이 생기는 단점이 있다. 이러한 운동을 제어하여 감소시키는 것은 부유식 해상 풍력발전기의 효율성에 가장 핵심적인 요소이다. 이러한 부유체의 운동을 제어하기 위해 현재 초고층 건물에 많이 사용되는 동조액체댐퍼(tuned liquid damper)⁽¹⁾를 적용하고자 한다. 동조액체댐퍼란 내부의 일부분이 물로 채워져 있는 탱크를 말하는데 외력에 의한 내부 물의 운동이 반력을 생성하여 설치된 구조물의 운동을 줄여주는 역할을 한다.

이 논문에서는 이러한 동조액체댐퍼의 내부 슬로싱에 대한 선행연구⁽²⁻⁴⁾를 바탕으로 외부 가진력에 노출되어있는 부유체의 운동을 내부 슬로싱 현상으로 제어가 가능한지를 수치적으로 고찰하였다. 문제를 단순화하기 위하여 간단한 형상인 사각상자 형태의 부유체와 내부의 물을 이용하여 부유체에 대한 동조액체댐퍼의 운동 저감 특성을 확인하고자 한다.

내부 슬로싱과 사각 형상의 부유체와의 연계 운동에 대한 실험은 몇몇의 선행연구에서 수행하였다^(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 파동 이론
수치해석결과와의 비교와 경계조건의 적용을 위

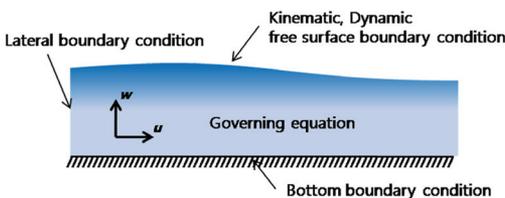


Fig. 1 Boundary conditions of wave

하여 파동이론 결과를 이용하였다. 파동이론은 유체를 비점성, 비회전 그리고 비압축성 유체라고 가정하고 있다. 수조에서 파의 이론은 경계조건 문제로 생각할 수 있다⁽⁷⁾. Fig. 1은 u방향으로 진행되는 반복되는 파 중 한 파장을 그림으로 나타내었다. Fig. 1에서 나타낸 경계조건을 적용하여 수조내부 수면의 파에 대한 이론을 유도할 수 있다. 비압축성 가정에 따라 속도의 포텐셜 함수는 다음과 같은 라플라스 방정식을 만족해야 한다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

다음에서 수조 내부의 각 경계조건들에 대해서 기술한다. 먼저 물의 바닥에서는 면에 수직인 속도가 아래 식과 같이 0이 되어야 하고,

$$w = 0 \tag{2}$$

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

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} \tag{3}$$

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

그리고 옆면에서는 주기경계조건을 적용한다.

$$\begin{aligned} \phi(x, t) &= \phi(x + \lambda, t) \\ \phi(x, t) &= \phi(x, t + T) \end{aligned} \tag{5}$$

식 (1)~(5)의 지배방정식과 경계조건들을 사용하여 변수분리법을 이용하면 속도 포텐셜 방정식은 다음 식으로 나타나게 된다.

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

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \tag{7}$$

식 (7)을 이용하여 파의 주파수와 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 조파 방식식은 다음과 같이 표현할 수 있다⁽⁷⁾.

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

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

동격자(moving mesh)에 의해 생성된 파의 수치적 감쇄를 최소화하고 계산영역의 경계에서 반사되어 오는 파를 최소화하기 위하여 수조의 길이 방향으로 3부분으로 나누어 격자를 구성하였다⁽⁸⁾. 왼쪽의 첫 번째 구간은 동격자에 의해 파를 생성하는 구간으로서 동격자에 의한 수치적 감쇄를 줄이기 위해 길이를 1 m로 구성하였다. 두 번째 구간은 물리적인 계산영역으로서 조파기에서 만들어진 파를 전파시키고 부유체의 운동을 모사하기 위한 영역으로 6 m 길이로 설정하였다. 세 번째 구간은 수조 끝의 벽면으로

부터 물리영역으로 되돌아오는 반사파의 영향을 줄이기 위한 감쇄영역으로서 급격하게 격자간격을 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.

선형과동 이론이 성립하는 범위 내에서 부유체의 운동을 모사하기 때문에 난류의 영향은 작다는 가정하에 층류유동으로 해석하였다. Anant Lal & Elangovan⁽⁹⁾의 연구에서 파의 생성에 대해 난류모델을 사용한 결과와 층류유동으로 해석한 결과와 다른 난류 모델로 해석한 결과 사이에 큰 차이를 보이지 않는다고 보고하였다.

경계조건은 위쪽 면에는 열림(opening) 경계조건을 설정하였고 나머지 면은 벽면(wall) 경계조건으로 설정하였다. 특히 왼쪽면은 조파기를 모사하기 위한 경계조건으로 식 (9)로 정의되는 사인파형의 동격자를 적용하였다.

3. 수치해석 결과

(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

Table 1 Mesh size and wave amplitude of each case

Case	Δx (m)	Δy (m)	λ_n (m)
1	0.04	0.02	0.0147
2	0.04	0.01	0.0192
3	0.02	0.01	0.0229
4	0.02	0.005	0.0275
5	0.01	0.005	0.0275
6	0.02	0.0025	0.0300
7	0.01	0.0025	0.0302
8	0.02	0.00125	0.0313



Fig. 2 Geometry of flume

확인하기 위해 Table 1과 같이 격자크기를 줄여 가면서 수치적으로 계산되는 파의 진폭을 계산하였다. 부유체가 위치하게 될 조파기로부터 x축으로 2 m 떨어진 곳에서 파의 진폭을 계산하였으며 조파기로 생성한 이론적인 파의 주파수는 8.6 rad/s, 파장은 0.8327 m이고 진폭은 파장의 1/20인 0.0416 m로 설정하였다.

계산결과 격자의 크기에 따라 예측되는 파동의 진폭이 민감하게 변하는 것을 확인할 수 있다⁽¹⁰⁾. Table 1과 Fig. 3에 나타난 것과 같이 6번째 경우의 격자부터 수치해석결과가 수렴하는 것을 알 수 있다. 하지만 수렴한 수치해석 결과는 2.1절에서 기술한 포텐셜 이론으로 예측되는 파의 진폭에 대해 약 28 % 정도의 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 이론결과의 근사 지배방정식과 달리 수치해석은 Navier-Stokes 방정을 풀기 때문에 이론결과에서는 고려할 수 없는 유체의 점성과 비선형성과 더불어 지배방정식을 이산방정식으로 전환할 때 발생하는 수치적인 감쇄의 영향인 것으로 판단된다. 이 연구에서는 선형이론에 기초하여 부유체의 운동을 입사파의 진폭으로 정규화하여 분석하기 때문에 상대적인 운동의 비교에서는 이론결과와 수치결과의 차이의 정량적인 분석은 중요하지 않다. 하지만 향후 부유체 운동에 대한 정량적인 진폭의 예측을 위해서는 이론결과와 수치해석결과의 차이에 대한 정량적인 분석이 추가적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다. 이후의 모든 계산결과는 6번째 경우의 격자를 사용하여 수행하였다.

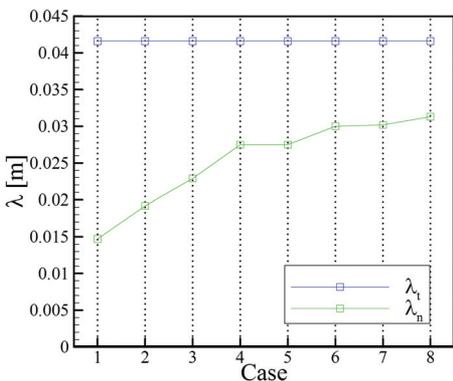


Fig. 3 Comparison of numerically predicted wave amplitudes with those using inviscid potential theory

(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⁾. 따라서 이 논문에서는 경사도를 1/20으로 설정하고 이 값을 유지하기 위해 파의 주파수에 따라 진폭도 변경하면서 계산을 수행하였다. Table 2에 식 (9)의 조파 경계조건에 사용한 파의 파장과 진폭을 정리하였다.

Table 2의 설정을 적용하여 해석을 수행하였으며 부유체의 예정 위치인 조파기에서 2 m 떨어진 곳에서의 파의 진폭을 계산하였다. 계산결과를 다음 Table 3과 Fig. 4에 나타내었다.

수치해석을 통해 계산된 파의 진폭과 이론적인 파의 진폭과의 차이는 최적격자에서 선정된 격자의 결과와 비슷한 것을 확인할 수 있다. 고주파에서는 파의 진폭이 작아짐에 따라 상대적인 격자 크기로 인한 수치적 감쇄가 크게 나타나 약간 차이가 커지지만 주파수에 따른 경향은 이론결과와 일치함을 확인할 수 있다. 계산된 파의 진폭은 부유체 운동의 변위 값을 정규화할 때 사용하였다.

(3) 부유체 해석

파에 의한 부유체 운동을 해석하기 위해 Fig. 5와

Table 2 Wave length and amplitude

ω (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

L : wave length, H : wave amplitude

Table 3 Result of wave amplitude

ω (rad/s)	λ_t (m)	λ_n (m)
7.6	0.0533	0.0392
8.1	0.0469	0.0340
8.6	0.0416	0.0300
9.1	0.0372	0.0248
9.6	0.0334	0.0202

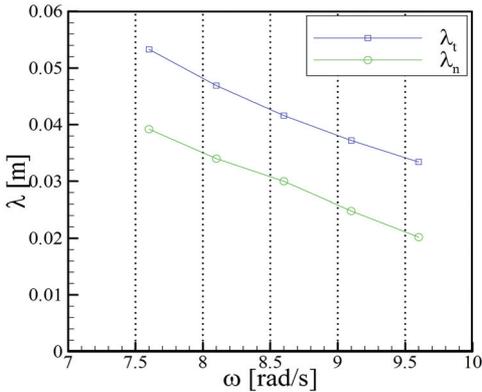


Fig. 4 Comparison of numerically predicted wave amplitudes versus excitation frequencies with those from inviscid potential theory

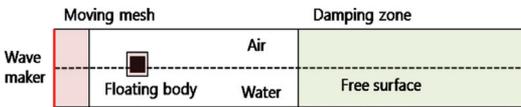


Fig. 5 Geometry of a flume and a floating body

같이 앞 절에서 기술한 것과 같은 계산영역에 부유체를 추가로 위치시켰다. 부유체는 길이가 0.4 m인 정사각형 형상이고 물에 잠기는 높이는 길이의 반인 0.2 m로 설정하였다. 부유체의 운동은 서지(surge) 방향만 움직이도록 설정하였고 파로 인해 뒤로 밀리는 현상을 줄이기 위해 0.875 N/m의 스프링 상수를 가진 스프링으로 고정하였다.

(3) 물이 없는 부유체의 운동 해석

먼저 물이 없는 사각상자 형태의 부유체 운동을 해석하였다. 물의 유무에 따라 물의 추가 질량으로 인하여 부유체 전체 질량이 변하게 되고 이는 부유체의 운동에 영향을 주게 된다. 이러한 질량으로 인한 영향을 없애기 위하여 물이 없는 부유체의 질량을 물이 있는 부유체의 전체 질량과 동일하게 설정하였다. 각 주파수에 대한 예측 결과를 Table 4에 정리하여 나타내었다.

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

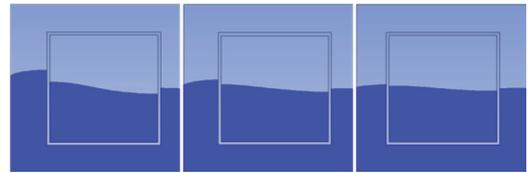
Table 4 Displacement of floating body without water

ω(rad/s)	D(m)	λ _n (m)	D/λ _n
7.6	0.0144	0.0392	0.3685
8.1	0.0082	0.0340	0.2408
8.6	0.0075	0.0300	0.2508
9.1	0.0054	0.0248	0.2165
9.6	0.0036	0.0202	0.1776

D : displacement of a floating body

Table 5 Displacement of the floating body with water

ω(rad/s)	D(m)	λ _n (m)	D/λ _n
7.6	0.0067	0.0392	0.1708
8.1	0.0031	0.0340	0.0897
8.6	0.0016	0.0300	0.0527
9.1	0.0020	0.0248	0.0815
9.6	0.0030	0.0202	0.1508



(a) 7.6 rad/s (b) 8.1 rad/s (c) 9.6 rad/s

Fig. 6 Motion of fluid inside and outside the tank

(4) 물이 있는 부유체의 운동 해석

물이 있는 부유체의 운동을 해석하였다. 부유체의 두께는 0.01 m로 설정하였으며 내부에 물의 높이는 0.19 m로 설정하였다. 나머지 다른 설정은 이전의 해석과 동일하다. 각 주파수에 대한 예측 결과를 Table 5에 정리하여 나타내었다. 내부 슬로싱의 공진주파수에서 무차원화된 변위 값이 최소가 됨을 확인할 수 있다. Fig. 6은 부유체 외부와 내부의 유체 모습을 나타내고 있는데 내부 슬로싱 형상이 외부파의 형상과 반대 위상을 가짐으로써 서지운동을 감소시킬 수 있다.

(5) 결과 비교

부유체 운동의 수치예측 결과를 실험 결과와의 비교를 통하여 그 유효성을 검증하고, 이를 바탕으로 물의 유무에 따른 서지운동의 변화를 비교 분석하기

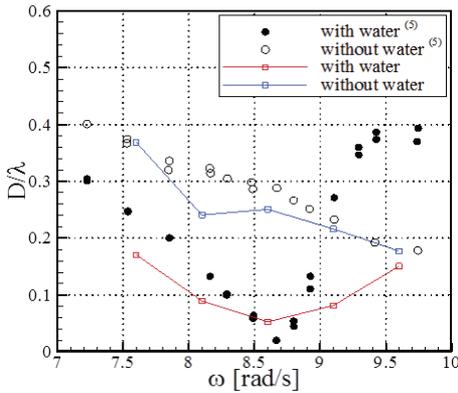


Fig. 7 Predicted normalized amplitudes of surge motions of the floating body in the cases with and without water

위하여 Fig. 7에서 무차원화된 서지 운동에 대한 예측결과와 측정결과⁽⁵⁾를 주파수에 따라 비교하였다. 전체적으로 두 결과가 유사한 경향을 나타내는데, 먼저 물이 없을 경우에는 두 결과 모두 외부가진원의 주파수가 높아질수록 부유체의 운동이 감소하고 그 경향이 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 물이 있을 경우에도 슬로싱 고유주파수 이전까지 서지운동의 진폭이 감소하다가 이후에 증가하는 현상이 예측결과와 측정결과에 동일하게 나타난다. 하지만 예측결과에서는 물이 있는 경우가 물이 없는 경우에 비해 전체적으로 변위가 감소하지만 실험 결과에서는 슬로싱 고유주파수보다 큰 고주파수영역에서는 물이 있는 경우가 물이 없는 경우에 비해 변위가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 고주파수영역에서 물이 있는 경우의 예측결과와 측정결과와의 차이에 대한 원인에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 하지만 해석 및 실험 결과 둘 다 가진파의 가진주파수가 부유체 내부 물의 슬로싱 고유주파수($\omega=8.6$ rad/s)와 일치하면 부유체의 운동이 최소가 되는 것을 확인할 수 있다. 즉 내부의 슬로싱 현상이 부유체의 운동을 감소시키고 특히 외부가진 주파수가 슬로싱 고유주파수와 동일할 때 부유체의 운동을 최소화할 수 있음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

내부 슬로싱 현상에 의한 부유체의 운동을 수치

적으로 고찰하였다. 임의의 주파수를 가지는 파를 생성하고 이에 노출되어있는 부유체의 운동을 모사하였다. 내부 슬로싱 고유주파수 8.6 rad/s를 중심으로 0.5 rad/s로 변화시키며 물이 있을 때와 없을 때의 부유체 운동을 비교하였다. 먼저 예측결과와 실험 결과의 비교를 통해 해석 결과를 검증하였다. 물이 있는 경우의 슬로싱 고유주파수 보다 큰 고주파 영역에서의 차이를 제외하면 실험 결과와 비슷한 경향을 보이는 것을 확인하였다. 그리고 가진파의 진폭으로 무차원화된 서지 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 가능성을 확인하였으며, 후속연구를 통하여 해상풍력발전기에 사용되는 실제 부유체에 적용함으로써 관련기술의 실용화 가능성을 타진할 예정이다.

후 기

이 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20113020020010)입니다.

References

- (1) Kareem, A. and Kijewski, T., 1999, Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications, Wind and Structures, Vol. 2, No. 3, pp. 201~251.
- (2) Ha, M. H., Kim, D. H., Choi, H. I., Cheong, C. U. and Kwon, S. H., 2012, Numerical and Experimental Investigations Into Liquid Sloshing in a Rectangular Tank, Advances in Wind and Structures 2012, Seoul, Korea.
- (3) Ha, M. H., Kim, D. H. and Cheong, C. U., 2012, Numerical Parametric Study on Liquid Sloshing in a Rectangular Tank, Advances in Wind and Structures 2012, Seoul, Korea.
- (4) Seo, M. W., Jeong, W. B. and Cho, J. R., 2012, Experiment on Sloshing of Annular Cylindrical Tank for

Development of Attitude Control Devices of Floating Offshore Wind Turbines, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 1, pp. 25~33.

(5) Rognebakke, O. F. and Faltinsen, O. M., 2003, Coupling of Sloshing and Ship Motions, Journal of Ship Research, Vol. 47, No. 3, pp. 208~221.

(6) Kim, Y. H., Sung, H. G., Cho, S. K., Jeong, H. U. and Choi, H. S., 2012, An Experimental Study on the Sloshing Effect to the Rectangular Cylinder's 1-DoF & 2-DoF Motions, KAOSTS, pp. 1388~1392.

(7) Dean, R. G. and Dalrymple, R. A., 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, pa-

ges 1~12, Rio de Janeiro.



Minho Ha received his BS degree in Mechanical Engineering from Pusan National University in 2011. He then continued his study as a MS in Pusan National University. His main research interest is on coupled motion of a floating body and sloshing liquid such as a tuned liquid damper.



Cheolung Cheong received his BS in Aerospace Engineering from Seoul National University in 1997. He received his MS and PhD degrees in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University, Korea, in 1999 and 2003. He is now an associate professor at the School of Mechanical Engineering, Pusan National University in Busan, Korea. Dr. Cheong's current research interests include fan broadband noise, wind turbine noise, and computational aeroacoustics.