creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

OpenFOAM을 이용한 규칙파 중 병렬 배치된 두 부유체의 거동해석 시뮬레이션

Numerical simulation for hydrodynamic interaction behavior of side-by-side vessels in regular waves using OpenFOAM

지도교수 이 승 재

2016년 8월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

옥 호 탁

본 논문을 옥호탁의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 공학박사 조 효 제 (인)

위 원 공학박사 박 선 호 (인)

위 원 공학박사 이 승 재 (인)

2016년 8월

한국해양대학교 대학원

Collection @ kmou

목 차

List of Tables ····· iii
List of Figures ····· iv
Abstract ····· vi

1. 서 론
1.1 연구배경 및 목적 ····· 1
1.2 최근 연구동향 ····· 3
1.3 연구내용 ····· 5

2. Numerical methods
2.1 Coordinate systems ····· 6
2.2 Governing Equations ····· 7
2.3 VOF(Volume Of Fluid) method ····· 8
2.4 6DOF motions ····· 10
2.5 Moving mesh techniques ····· 11
2.6 Waves ····· 12
2.7 Discretization schemes ····· 14
2.8 Solving algorithm ····· 14

3. Numerical results of a single vessel
3.1 Principal Particulars ····· 15
3.2 Setting fluid domain ····· 17
3.3 Numerical analysis of a single vessel motion ····· 21

Collection @ kmou

4. Numerical results of side-by-side vessels

4.1 Motion RAOs ····· 26

4.2 Standing wave in the gap ····· 34

5. Conclusions

5.1 결론 ····· 43

5.2 향후과제 ····· 45

Reference ····· 46

Collection @ kmou

List of Tables

Table 3.1 Principal particulars of LNG-FPSO of MARIN ····· 15
Table 3.2 Size of cells for free surface used for sensitivity test ····· 18
Table 3.3 Simulation conditions for a single vessel ····· 21
Table 3.4 Principal particulars of mooring system of a single vessel ····· 22
Table 4.1 Simulation conditions for side-by-side vessels ····· 26
Table 4.2 Principal particulars of mooring system of side-by-side vessels 27

Collection @ kmou

List of Figures

Fig. 1.1 Side-by-side FLNG and LNG tank for LNG offloading system ····· 2
Fig. 1.2 Side-by-side Cylindrical FLNG and LNG tank for LNG offloading system ····· 2
Fig. 2.1 Example of Volume fraction variable (α) ····· 8
Fig. 2.2 Comparison of results of stokes first order theory and Stokes second order theory ····· 12
Fig. 2.3 Solving algorithm ····· 14
Fig. 3.1 Geometry of LNG-FPSO model ····· 16
Fig. 3.2 Schematic computational domain ····· 17
Fig. 3.3 Comparison of analytic solutions and numerical results (frequency=0.50rad/s) ····· 18
Fig. 3.4 Results of grid size sensitivity test (frequency=0.50rad/s) ····· 19
Fig. 3.5 Comparison of analytic solutions and numerical results (frequency=0.63rad/s) ····· 19
Fig. 3.6 Results of grid size sensitivity test (frequency=0.63rad/s) ····· 20
Fig. 3.7 Sketch of linear springs of a single vessel ····· 22
Fig. 3.8 Computational mesh of a single vessel ····· 23
Fig. 3.9 Heave time series of a single vessel ····· 23
Fig. 3.10 Measured and predicted motion RAOs of a single vessel (wave heading=90deg) ····· 24
Fig. 3.11 Measured and predicted motion RAOs of a single vessel (wave heading=0deg) ····· 25
Fig. 4.1 Sketch of linear springs of side-by-side vessels ····· 28
Fig. 4.2 Computational mesh of side-by-side vessels ····· 29
Fig. 4.3 Measured and predicted motion RAOs of side-by-side vessels (wave heading=90deg) ····· 31
Fig. 4.4 Measured and predicted motion RAOs of side-by-side vessels (wave heading=0deg) ····· 32

Collection @ kmou

Fig. 4.5 Gap distance of side-by-side vessels (wave heading=90deg, frequency=0.61rad/s) ····· 33
Fig. 4.6 Gap distance of side-by-side vessels (wave heading=0deg, frequency=0.55rad/s) ····· 33
Fig. 4.7 Standing wave amplitude of two-dimensional floating vessels inside the gap ····· 35
Fig. 4.8 Pressure contours of two-dimensional floating vessels ····· 36
Fig. 4.9 Maximum amplitude of standing wave in beam sea condition ····· 38
Fig. 4.10 Maximum amplitude of standing wave in head sea condition ···· 39
Fig. 4.11 Velocity and pressure contours in head sea (Frequency=0.72rad/s) ····· 40
Fig. 4.12 Wave elevation contours in head sea (frequency=0.72rad/s) ····· 41
Fig. 4.13 Standing wave elevation in beam sea (frequency=0.74rad/s) ····· 42
Fig. 4.14 Standing wave elevation in head sea (frequency=0.72rad/s) ····· 42

Collection @ kmou

Numerical simulation for hydrodynamic interaction behavior of side-by-side vessels in regular waves using OpenFOAM

Ok, Ho Tak

Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

In an analysis of floating body' s motion for ocean engineering, potential theory is known as a conservative method. This can be a relatively right approach since viscous effect of a single body is insignificant so that the results yield accuracy in global motion analysis. Moreover, the potential theory also requires less computing time compared to other methods such as model experiments and CFD (Computational Fluid Dynamics). However, complicated situations such as the structures with moonpool, side-by-side moored vessels, TLP, and semi-submersible with deep draft need to be evaluated by more accurate methods other than potential theory in order to overcome inaccurate solutions which can be occurred by viscous effects.

For side-by-side moored vessels, it clearly needs to be evaluated with accurate analysis because of viscous effect in areas of the gap between

Collection @ kmou

two vessels. A complex hydrodynamic interaction between two vessels can cause shielding effects which represents different motion aspects for both weather side vessel and shield side vessel. Another hydrodynamic effects caused by the gap is a gap-resonance problem that is an exaggerated motion when solved with linear potential theory.

In this study, CFD simulations for a single vessel and side-by-side vessels analysis are performed. The CFD codes are formulated for solving a Navier-Stokes using Finite Volume Method (FVM) using open source CFD code, OpenFOAM. Taking advantages of viscous damping and vortex shedding, three-dimensional numerical simulations for 6 DOF motions of a single vessel and side-by-side vessels are carried out. These conditions are considered for the simulation with external linear stiffness to prevent drift away of the vessels. The simulation results for a single vessel are compared with linear potential theory and model test results in order to validate the results. And the simulation results for side-by-side vessels are compared with linear potential theory in order to show that CFD code can be used effectively to predict the motions of side-by-side vessels in regular waves.

KEY WORDS: Hydrodynamics 유체동역학, Gap resonance 간극 공진 Side-by-side vessels 병렬 배치된 부유체, Viscous effects 점성 효과, Computational Fluid Dynamics 전산 유체 역학, OpenFOAM 오픈폼.

Collection @ kmou

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 LNG (Liquefied Natural Gas)의 수요가 증가하면서 해양플랜트 산업은 oil뿐만 아니라 LNG에 관심이 있다. LNG-FPSO와 FSRU (Floating Storage & Regasification Unit)와 같이 부유식 LNG 구조물과 LNG운반선 사이에서 수행되는 LNG 이송은 깊은 수심에서 작업이 수행되는 경우가 많으며, 이러한 작업 중에는 복수 또는 그 이상의 부유체와의 공동작업이 필요로 한다. Fig. 1.1과 Fig. 1.2와 같이 LNG 이송은 대부분 두 부유체가 병렬 배치 (side-by-side) 상태에서 작업이 수행된다. 이때, 부유체 사이에 좁은 간극이 생기게 되고, 이 좁은 간극 내부에서 갇힌 파는 standing wave 형태로 존재하며 간극으로 인한 공진 주파수에서 standing wave는 자유수면의 상승과 이로 인한 유체력의 증가를 초래한다. 좁은 간극에서 발생하는 유체력 증가는 두 부유체의 운동을 증가시키고, 이로 인해 작업성이 저하될 수도 있으며, 승조원들의 안전도 위협받을 수 있다. 또한, 선수파 조건에서 병렬배치 된 두 부유체 간의 유체동역학 상호작용 때문에 좌우 방향의 유체력도 발생하게 된다.

Collection @ kmou

Fig. 1.1 Side-by-side FLNG and LNG tank for LNG offloading system (출처 : http://www.theenergycollective.com/)

Fig. 1.2 Side-by-side Cylindrical FLNG and LNG tank for LNG offloading system (출처 : http://worldmaritimenews.com/)

Collection @ kmou

1.2 최근 연구동향

좁은 간극에서의 standing wave를 피스톤 모드 (piston mode)라 정의하고, 이러한 피스톤 모드는 FPSO 또는 Drill ship의 문풀 (moon pool)이나 반 잠수식 구조물, 쌍동선 등에서 발생하게 된다. 피스톤 모드의 공진 주파수에 관한 연구로, Molin (2001)은 문풀에서의 자유수면의 공진주파수와 형상에 대해서 선형 포텐셜 이론으로 일반화된 추정 식을 제안하였다.

선체 운동해석은 선형포텐셜 이론을 이용하여 해석하는 것이 보편적이다. 단일 선체의 운동과 같이 점성의 영향이 크지 않은 운동의 경우, 선형포텐셜 이론에 기초한 방법으로도 상당히 높은 수준의 정확도를 얻을 수 있고, 계산 시간도 비교적 적게 소요되어 실용적인 활용이 충분하다. 하지만, 병렬 배치된 선체의 운동계산은 비선형 유체동역학 상호작용으로 인해 선형포텐셜 이론으로 추정 하는 데는 한계가 있다. 이와 같은 선형포텐셜 이론의 한계를 실험과 비교한 연구들이 있다. Hong et al. (2002)은 하역작업 중의 FPSO와 유조선의 배치에 따른 유체동역학 상호작용을 고차 경계 요소법을 사용하여 예측한 결과를 비교하기 위해 모형시험을 수행하였다. Buchner et al. (2001)은 하역작업 중 병렬 계류된 부유체의 운동과 계류장치에 작용하는 하중을 예측하기 위해 비선형 효과를 고려한 시간 영역 수치 시뮬레이션을 연구하였다. Lee (2008)는 선형포텐셜 이론을 기반으로 병렬 계류된 FPSO와 LNG선에 슬로싱 효과 (sloshing effects)를 고려한 운동해석을 수행하였다. 이러한 연구 결과를 바탕으로, 선형포텐션 이론은 공진 주파수에서의 피스톤 모드가 실험 결과와 비교하여 과도한 추정값을 도출하고, 이를 억제하기 위해 인공 소산 계수 (artificial dissipation coefficient)를 도입하는 연구가 진행되었다. Jean-Robert et al. (2006), Pauw et al. (2007)은 병렬 계류된 부유체의 피스톤 모드 공진 주파수 영역에서 실험결과와 선형포텐셜 이론에 인공 소산 계수를 적용하여 예측한 결과를 비교하였다.

병렬 배치된 두 부유체의 간극에서 작용하는 standing wave는 유체의 점성 효과와 부유체의 빌지 (bilge)에서 나타나는 보텍스 (vortex)로 인하여 standing

Collection @ kmou

wave의 크기가 감소하게 된다. 빌지 보텍스와 점성 효과를 고려하지 못하는 선형포텐셜 이론은 standing wave를 과도하게 예측하고, 이로 인해 실험결과와 차이를 나타낸다. 이에 관한 연구로, Faltinsen et al. (2007)는 2차원 문풀 내부에 나타나는 유체의 운동에 대한 실험을 수행하였다. Kristiansen and Faltinsen (2008)은 2차원 문풀에 대한 실험결과를 Boundary Element Method with vortex tracking (BEM+VT)을 사용하여 예측된 결과와 비교함으로써 선체의 빌지에서의 보텍스의 영향이 standing wave 진폭을 감소시키는 것을 확인하였다. Sauder et al. (2010)은 병렬 배치된 2차원 선체에 대해서 비정상상태의 Navier-Stokes 방정식을 유한 체적법(Finite Volume Method)으로 계산한 수치해석 결과를 실험결과 및 BEM+VT을 사용한 결과와 비교하였다. Park and Heo (2012), Jiang et al. (2014)는 병렬 배치된 2차원 선체에 대하여 점성 유동장을 유한 체적법으로 계산한 결과를 실험결과와 비교하여 검증하였다. Park and Heo (2012)는 빌지의 형상에 따라 자유 표면과 유체력의 변화를 비교하였고, Jiang et al. (2014)는 동일한 선체에 선형포텐셜 이론과 함께 인공 소산 계수를 도입하여 해석한 결과와 실험결과와 비교하였다. 이를 통해 비정상상태의 Navier-Stokes 방정식을 유한 체적법으로 계산한 수치해석 결과는 인공 소산 계수와는 무관하게 정확한 유체력을 산정 할 수 있는 것을 확인하였다.

Collection @ kmou

1.3 연구내용

본 연구에서는 규칙파 조건에서 유체동역학 상호작용 영향이 크게 작용하는 병렬 배치된 두 부유체의 6자유도 운동 해석을 비정상 상태의 Navier-Stokes 방정식을 유한 체적법으로 수치 해석하였다. 이를 위해 open source codes인 Open Field Operation and Manipulation (OpenFOAM) C++ libraries를 사용하였다. CFD 수치해석 결과와 선형포텐셜 이론을 사용한 계산결과와 비교하였고, 이를 통해 병렬 배치된 상태에서의 두 부유체의 6자유도 운동 해석을 보다 정도 높게 해석하였다. 더 나아가 CFD의 정확도와 문풀이 있는 부유체, 병렬 배치된 부유체, TLP와 반 잠수식 구조물과 같은 복잡한 상황에서 활용 가능성을 검토하였다. CFD codes의 정확도를 검증하기 위해, CFD codes를 이용하여 단일 선체의 운동해석을 규칙파 환경 하에서 수행하고, 이를 실험 결과와 비교하였다. 또한 병렬 배치된 두 부유체의 운동해석 시뮬레이션 결과를 선형포텐셜 이론과 비교하였다.

Collection @ kmou

제 2 장 Numerical methods

2.1 Coordinate systems

일반적으로 강체의 동역학적 거동을 묘사하기 위해서는 오일러 각 (Euler’s angle)을 사용하는데, 하나의 회전축을 이용하여 회전하는 오일러 각은 특정상황에서 두 개의 축이 하나의 축으로 겹쳐져서 두 개의 축의 회전이 같은 회전으로 나타나는 짐벌락 (Gimbal Lock) 현상이 나타나게 된다. 본 연구에서는 짐벌락 현상을 방지하고 좌표계의 회전 순서의 영향을 받지 않기 위해서 좌표계를 표현하기 위한 기법으로 쿼터니언 (quaternion)을 사용하였다. 또한 이는 각 축의 회전 순서를 고려할 필요가 없기 때문에 연속적인 자세의 변화를 기술하는 보간 방법에 매우 용이하다. 쿼터니언은 4개의 파라미터를 가지는데 그 중에 3개는 회전축의 방향을 나타내며, 나머지 하나는 회전축에 대한 회전각을 나타내게 된다.

$$q = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta/2) \\ v_x \sin(\theta/2) \\ v_y \sin(\theta/2) \\ v_z \sin(\theta/2) \end{bmatrix} \tag{1}$$

여기서 v_x, v_y, v_z는 회전축 단위 벡터 의 직교 좌표계의 성분이고, θ는 벡터 $\vec{v}$의 방향으로 놓인 가상의 축을 기준으로 회전한 각이다. 쿼터니언을 이용한 방향코사인 행렬 로 표현하면 다음과 같다. 선체의 좌표는 방향코사인 행렬 을 통해 구한다.

Collection @ kmou

$$R=\begin{bmatrix} q_0^2+q_1^2-q_2^2-q_3^2 & 2(q_1q_2+q_0q_3) & 2(q_1q_3+q_0q_2) \\ 2(q_1q_2-q_0q_3) & q_0^2-q_1^2+q_2^2-q_3^2 & 2(q_2q_3-q_0q_1) \\ 2(q_1q_3-q_0q_2) & 2(q_2q_3+q_0q_1) & q_0^2-q_1^2-q_2^2+q_3^2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

2.2 Governing Equations

본 연구에서는 유동장 내부의 유체를 비압축성 유체라 가정하고, 비압축성 유체의 지배 방정식으로는 다음과 같은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다.

$$\nabla \cdot u = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) - \nabla \cdot (\mu \nabla u) = -\nabla P + \rho g \tag{4}$$

여기서 $\frac{\partial \rho u}{\partial t}$는 시간에 대한 변동압력, ∇P는 압력에 대한 변화율, $\nabla \cdot (\rho u u)$는 대류항이고, $\nabla \cdot (\mu \nabla u)$는 점성항이다. u는 유동장의 유체속도, ρ는 밀도, t는 시간, P는 압력, μ는 점성계수를 나타낸다. 본 연구에서는 미소 진폭 파에 대한 소각도 운동에 초점을 맞추고 있고, Yu and Kinnas (2008)에서 소각도 운동은 난류 모델을 이용한 결과와 층류에서의 계산결과가 큰 차이가 없다는 것을 확인 할 수 있다. 이로 인해 본 연구에서는 난류 모델을 사용하지 않고 층류조건에서 수치해석 하였다.

Collection @ kmou

2.3 VOF(Volume Of Fluid) method

본 연구에서의 유동장에는 혼합되지 않은 두 가지 유체가 존재한다. 여기서 하나는 공기이고, 다른 하나는 물이다. 상경계면인 자유수면을 표현하기 위해 자유수면을 추적하고 위치를 결정하는 VOF법을 사용하였다. 하나의 셀에 물이 차지하고 있는 비율을 α으로 정의하고 이에 대한 이송 방정식을 통해 자유수면을 표현한다. α를 이용하여 비압축성 유동장에서의 자유수면의 움직임은 아래와 같이 이송방정식을 통해 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (u\alpha) - \nabla \cdot [u_r(1-\alpha)\alpha] = 0 \qquad (5)$$

여기서 u는 유동장의 유체속도, u_r은 자유수면상의 물과 공기의 상대속도를 나타낸다. α는 하나의 셀에 물이 차이하고 있는 비율이다. α는 0과 1또는 0에서 1사이의 값을 가지는 계수이고, 이를 통해 상경계면인 자유수면을 표현 할 수 있다. Fig. 2.1은 각 셀에 물이 차지하고 있는 비율인 α를 나타낸 예이다.

Fig. 2.1 Example of Volume fraction variable (α)

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 && \text{in water} \\ 0 < \alpha &< 1 && \text{in free surface} \\ \alpha &= 0 && \text{in air} \end{aligned} \qquad (6)$$

Collection @ kmou

유체의 밀도와 동 점성계수 또한 α의 도입으로 인하여 다음과 같이 수정되어 사용된다.

$$\rho(x,t) = \rho_w \alpha + \rho_a (1-\alpha) \tag{7}$$

$$\nu(x,t) = \nu_w \alpha + \nu_a (1-\alpha) \tag{8}$$

ρ_w, ν_w는 물의 밀도와 동 점성 계수이고, ρ_a, ν_a는 공기의 밀도와 동 점성 계수이다.

Collection @ kmou

2.4 6DOF motions

강체로 가정한 부유체의 6자유도 운동은 병진 및 회전운동량을 적용하여 다음과 같은 식으로 표현 할 수 있다.

$$(F_{CG})_i = m\frac{d^2(x_{CG})_i}{dt^2} = m\ddot{\phi} \tag{9}$$

$$(L_{CG})_i = \frac{d}{dt}(I_{ij}\frac{d(\theta_{CG})_i}{dt}) = I_{ij}\ddot{\phi} \tag{10}$$

여기서 m과 I_{ij}는 각각 부유체의 질량과 관성모멘트이고, $\ddot{\phi}$는 가속도 성분 변화량을 나타낸다. x_{CG}, θ_{CG}는 각각 부유체의 병진운동과 회전운동 변위를 나타낸다. F_{CG}와 L_{CG}는 각각 부유체의 무게 중심에 작용하는 병진 운동과 회전운동의 힘과 모멘트를 나타낸다. i는 각 운동 방향의 모드를 나타낸다. 모드 i=1,2,3은 식 (9)에서 선체의 병진운동 (surge, sway, heave)이고, 모드 i=4,5,6은 식 (10)에서 선체의 회전운동 (roll, pitch, yaw)이다.

위의 수식에 대한 수치적분은 second-order Adams-Moulton scheme을 이용하였다. 본 연구에서는 선체의 운동 속도 변화량 $\dot{\phi}$와 변위 ϕ를 식 (11), (12)으로부터 계산한다.

$$\dot{\phi}^n = \dot{\phi}^{n-1} + \frac{\Delta t}{2}\ddot{\phi}^{n-1} \tag{11}$$

$$\phi^n = \phi^{n-1} + \frac{\Delta t}{2}\dot{\phi}^{n-1} \tag{12}$$

여기서, 선체의 가속도 성분 변화량 ($\ddot{\phi}$)은 식 (9)와 (10)으로부터 계산 할 수 있다.

Collection @ kmou

2.5 Moving mesh techniques

선체의 자세 변화를 처리하기 위해서는 형상의 움직임에 따라 새로운 격자계가 요구된다. 새로운 격자를 얻는 방법은 격자 재생성 기법 (mesh regeneration method), 중첩격자 기법 (overset mesh method), 격자 변형 기법 (mesh deformation method) 등이 있다. 격자 재생성 기법은 각 시간마다 새로운 격자를 재 생성하는 방법으로 계산 과정에서 새로운 격자를 생성하는 시간이 요구된다. 이로 인해 계산시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 중첩격자 기법은 독립적으로 생성된 격자를 중첩하여 전체 유동장을 계산하는 방법으로 물체의 대 변위 운동 해석에서 격자의 뒤틀림이 발생하지 않아 격자가 비교적 양호하기 때문에 대 변위 운동해석에 적합하다. 하지만 독립된 격자간의 변수의 정보전달을 위해 보간을 사용한다. 이로 인해 중첩영역에서 연속방정식과 N-S방정식의 보존을 만족하는 데에는 한계가 있다.

본 연구에서는 선체의 운동의 크기가 비교적 작다고 판단하여 작은 변위를 가지는 물체의 이동에 매우 간단하게 적용 할 수 있는 격자 변형 기법을 사용하였다. 격자 변형 기법 중 대상 선체의 형상을 보존하면서, 선체 주위 격자 shape의 node position을 갱신하며 기존 격자를 새로운 격자로 변형하는 mesh morphing method를 사용하였다. 이는 단순히 node position을 갱신하는 방법이므로 격자 재생성 기법, 중첩격자 기법와 비교해서 계산시간이 덜 소모되는 장점이 있다. 하지만 물체의 대 변위의 운동인 경우 격자의 뒤틀림으로 인해 해석이 발산하는 경우가 생기게 된다.

Collection @ kmou

2.6 Waves

본 연구에서는 해양 파를 시뮬레이션하기 위해 선형 파이론인 stokes first order theory를 사용한다. Fig. 2.2에서 stokes first order wave와 Stokes second order wave는 다음과 같이 비선형성의 차이가 나타난다. 본 연구에서는 선형포텐셜 이론의 결과와 직접 비교하기 위해 stokes first order theory를 사용하여 파의 비선형성을 최소화하였다.

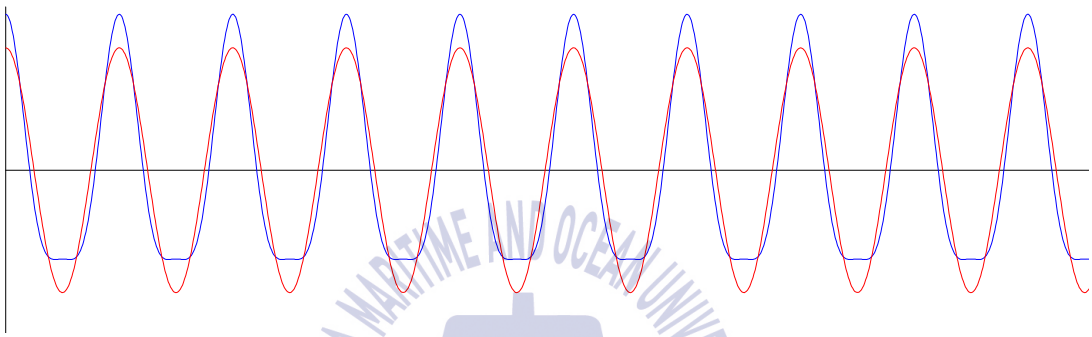


Fig. 2.2 Comparison of results of stokes first order theory and Stokes second order theory

다음 stokes first order theory로부터 유도된 wave elevation (η), 수평방향 유체입자 속도 (U), 수직방향 유체입자 속도 (V) 그리고 압력 (P)에 관한 식은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{H}{2} cos(wt - kx - \phi) \tag{13}$$

$$U = \frac{H\pi}{2} \frac{cosh(k(z+h))}{sinh(kh)} cos(wt - kx + \phi) \tag{14}$$

$$V = \frac{H\pi}{2} \frac{sinh(k(z+h))}{sinh(kh)} sin(wt - kx + \phi) \tag{15}$$

$$P = \rho_w g k \frac{H}{2} \frac{cosh(k(z+h))}{cosh(kh)} sin(wt - kx + \phi) \tag{16}$$

여기서 H는 파고, w는 파 주파수, k는 파수, ϕ는 위상, h는 수심, g는 중력가속도, t는 시간, x는 길이방향 거리, z는 자유수면 0을 기준으로 수직 상 방

Collection @ kmou

향의 좌표이다.

선형 파이론에 의하여 수치 조파기에서 생성된 파가 부유체에 의해 반사된 후 수치 조파기에 다시 영향을 주기 않게 하기 위해 인위적인 방법을 사용하였다. 수치 조파기와 인접되도록 generation zone을 설정하여 선형 파 이론과 N-S방정식을 조합해서 사용하며, 이에 관한 weight function은 식 (17)로 나타낸다.

$$w = 1 - \frac{exp(\sigma^{3.5}) - 1}{exp(1)} - 1 \tag{17}$$

여기서, w은 weight factor, σ는 generation zone 내부에서의 위치에 따른 가중치를 의미한다. 본 연구에서 σ는 입사파의 파장을 고려하여 조파성능이 충분히 보장될 수 있도록 선정하였다.

Collection @ kmou

2.7 Discretization schemes

유체의 지배방정식과 VOF 이송 방정식은 유한체적법 에 기초하여 이산화 된다. 지배방정식인 식 (4)의 대류항은 2차 정도를 가지는 linear upwind scheme을 사용하였고, 점성항은 역시 2차 정도를 가지는 중심차분법을 사용하였다. VOF 이송 방정식의 이산화는 van Leer limiter을 적용하였다. 속도와 압력의 연성을 위하여 PIMPLE (merged PISO-SIMPLE) algorithm을 사용하였다.

2.7 Solving algorithm

앞서 설명한 해석 방법들의 흐름을 flow chart로 나타내면 Fig. 2.1과 같다.

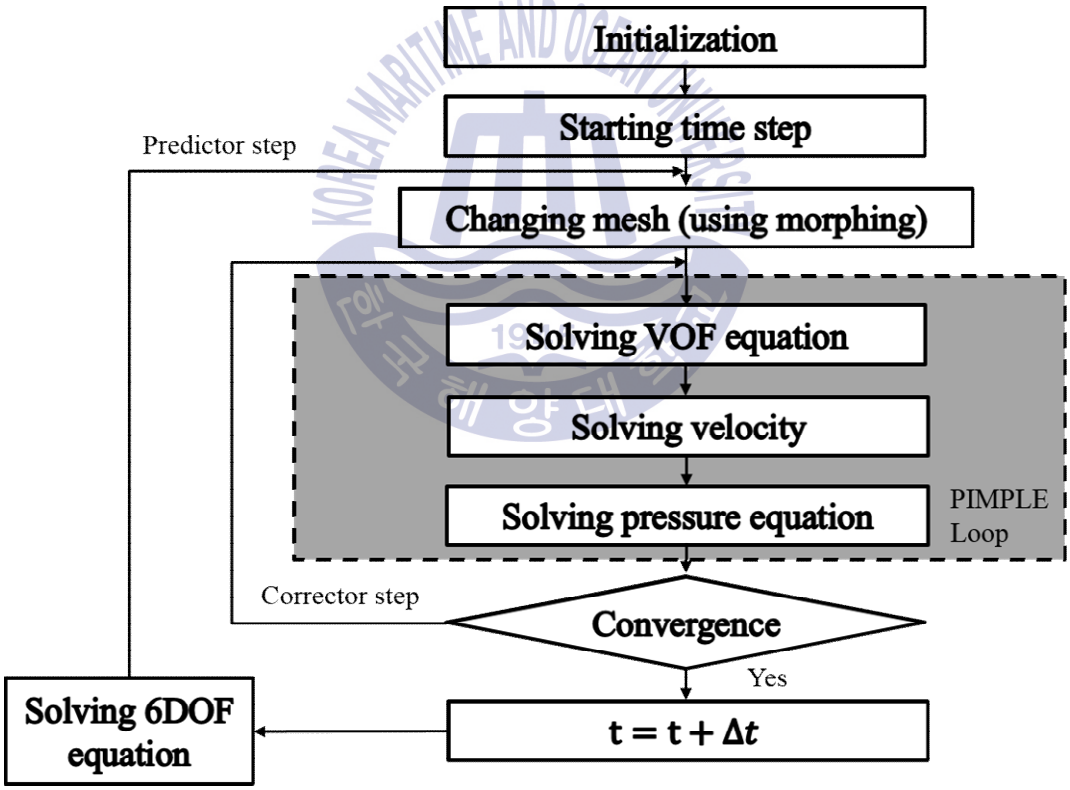


Fig. 2.3 Solving algorithm

Collection @ kmou

제 3 장 Numerical results of a single vessel

3.1 Principal Particulars

본 연구에서는 병렬 배치된 두 부유체의 운동을 계산하기 위한 기초 연구로써 MARIN (Maritime Research Institute of Netherlands)에서 수행한 LNG-FPSO를 대상으로 운동해석을 수행하고, 이를 실험결과 (Lee, 2008)와 비교하였다. 대상 선형의 주요 치수들은 다음 table 3.1과 같다.

Table 3.1 Principal particulars of LNG-FPSO of MARIN

Description	Magnitude
Length between perpendicular [m]	285.0
Breadth [m]	63.0
Draught [m]	13.0
Displacement volume [m^3]	220,017.6
Displacement mass in seawater [ton]	220,017.6
Longitudinal height [m]	142.26
Transverse metacentric height [m]	15.30
Vertical center of gravity [m]	16.71
Vertical center of buoyancy [m]	6.569
Transvers metacenter above base line [m]	32.01
Mass radius of gyration around X-axis [m]	19.49
Mass radius of gyration around Y-axis [m]	78.42
Mass radius of gyration around Z-axis [m]	71.25

Collection @ kmou

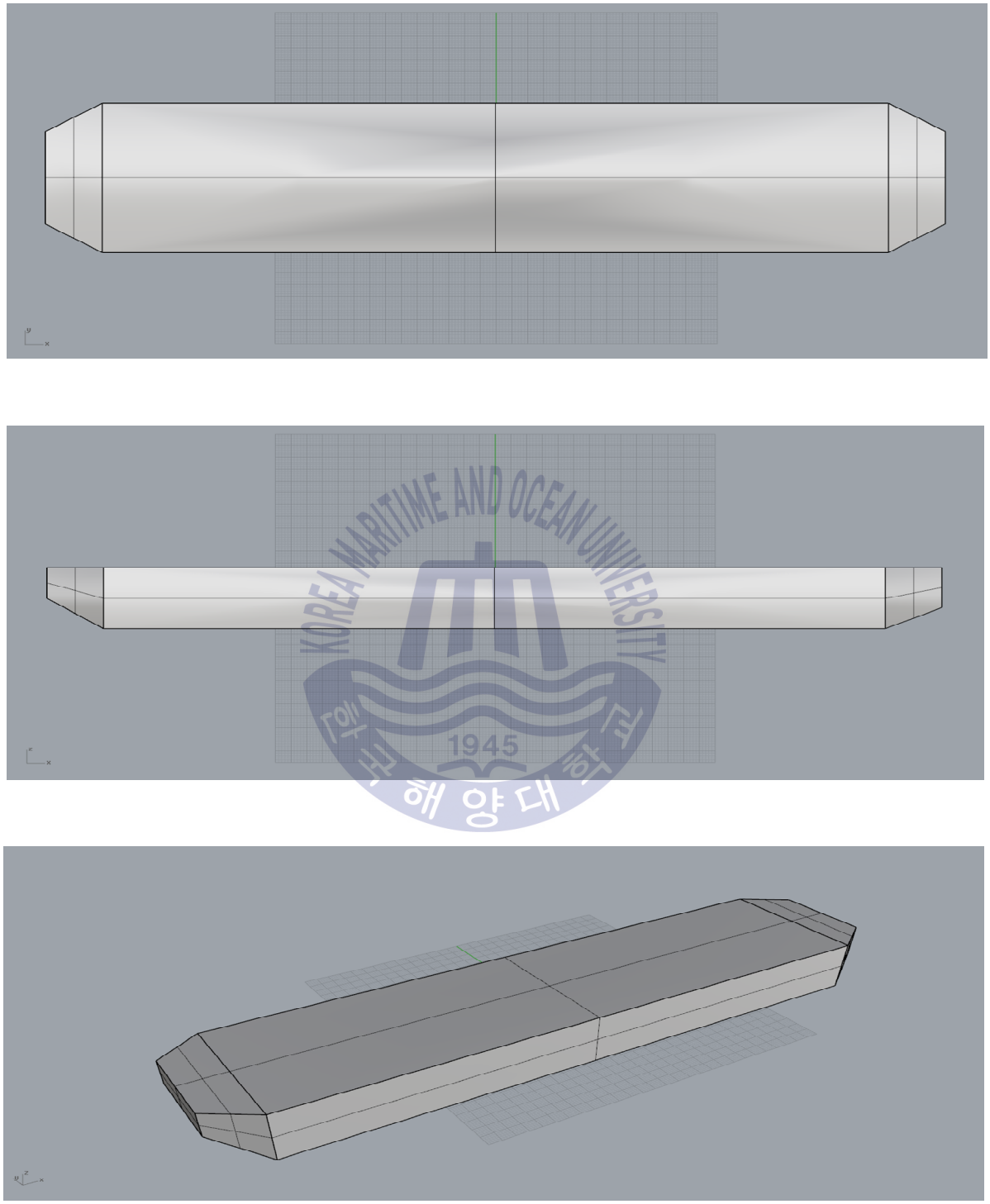


Fig. 3.1 Geometry of LNG-FPSO model

Collection @ kmou

3.2 Setting fluid domain

격자 크기에 따른 해석결과의 정확도를 확인하기 위하여 격자 민감도 테스트(grid size sensitivity test)를 수행하였다. 유동장의 경계들로 인한 반사파의 효과를 줄여주기 위해서 전체 유동장의 크기는 Fig. 3.2에서와 같이 각 파장 별로 최소한의 유동장의 크기를 만족하도록 설정하였고, 유동장의 앞뒤 양 옆의 경계면에 wave generation zone 조건을 통하여 반사되는 파가 감쇠되도록 하였다. 유동장에 발생하는 반사파를 줄이기 위해 여러 가지 격자 모델링 기법들이 있다. 일반적으로 유동장의 크기를 관찰 영역보다 크게 하고 수치적 에러를 통해 반사파를 감소시키는 방법이 있다. 하지만 이 방법을 통해 계산된 반사파의 영향은 본 연구에서 사용한 최소한의 유동장으로 계산한 결과보다 상대적으로 크게 계산되었다. 그러므로 본 연구에서는 다음과 같은 유동장 크기를 만족하는 격자를 생성하였다.

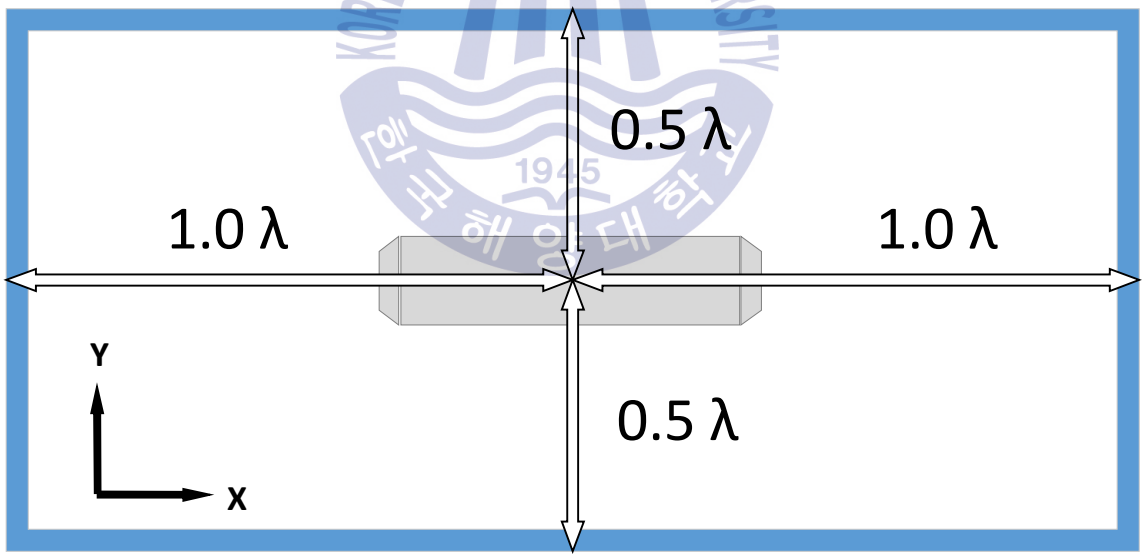


Fig. 3.2 Schematic computational domain

일반적으로 자유수면을 표현하는 VOF 방법의 한계로 인한 수치감쇠 때문에 생성된 입사파는 진행하면서 파고가 감소하게 된다. 입사파의 표현을 위한 타당한 격자 크기 결정을 위해 두 가지 파 조건에 대한 격자 민감도 테스트를 수행하였다. 격자 민감도 테스트를 위해 사용한 파 조건과 격자 크기는 Table 3.2

Collection @ kmou

와 같다. 자유수면 근처에서는 격자의 크기를 작게 하여 격자 밀도를 높게 생성하였다. 자유수면 근처에서 격자의 크기는 Table 3.2와 같이 각각 주파수 별로 4가지 조건을 test 하였다. 파고계의 위치는 추후에 고려할 부유체의 무게중심을 선택하였다.

Table 3.2 Size of cells for free surface used for sensitivity test

Grid size type	Wave amplitude [m]	Wave frequency [rad/s]	Grid size		
			$\triangle X$ [m]	$\triangle Y$ [m]	$\triangle Z$ [m]
Test 1	1.0	0.50	2.5	10.0	0.3125
Test 2			3.0	12.0	0.375
Test 3		0.63	4.0	16.0	0.5
Test 4			5.0	20.0	0.625

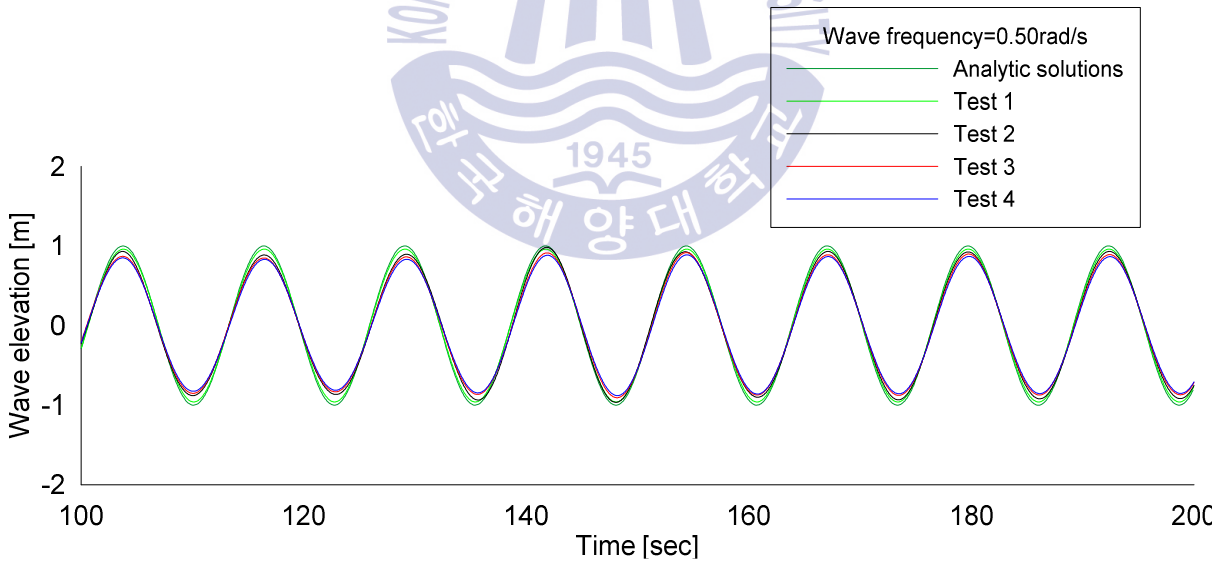


Fig. 3.3 Comparison of analytic solutions and numerical results (frequency=0.50rad/s)

Collection @ kmou

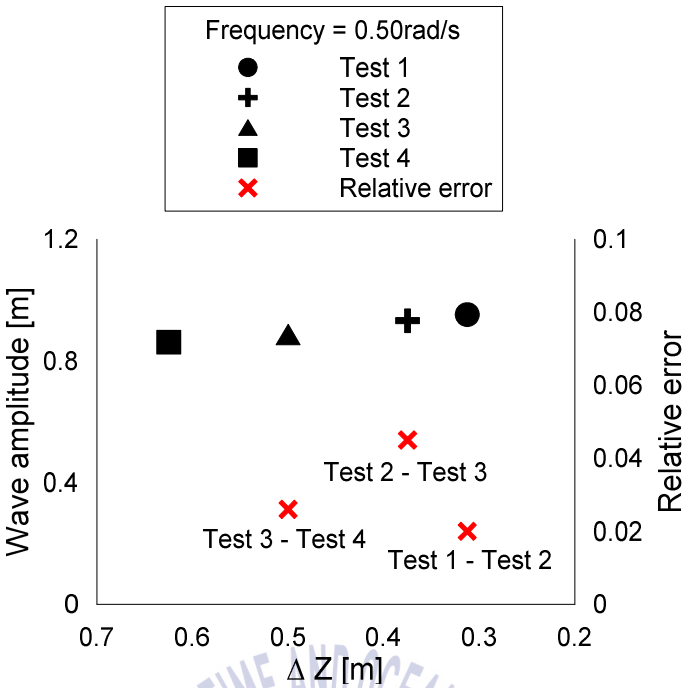


Fig. 3.4 Results of grid size sensitivity test (frequency=0.50rad/s)

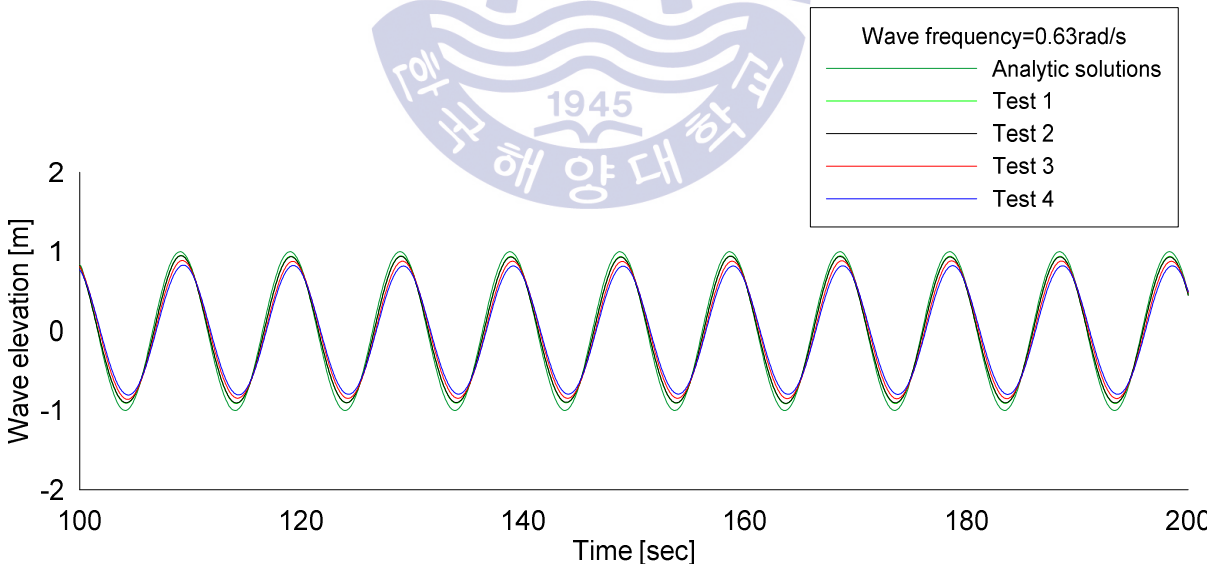


Fig. 3.5 Comparison of analytic solutions and numerical results (frequency=0.63rad/s)

Collection @ kmou

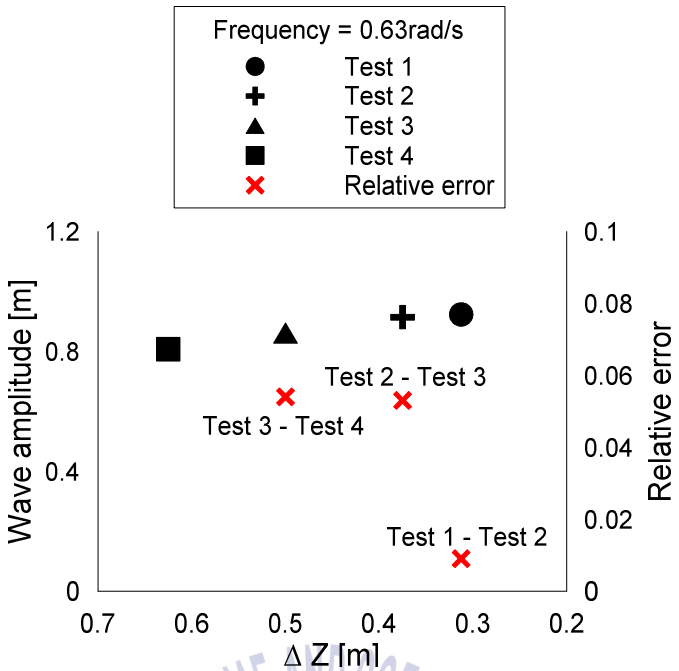


Fig. 3.6 Results of grid size sensitivity test (frequency=0.63rad/s)

Fig. 3.3과 Fig. 3.5는 stokes first order theory의 analytic solutions와 격자 크기에 따른 wave elevations를 시간 영역으로 나타내었다. Fig. 3.4과 Fig. 3.6은 격자의 크기에 따른 파진폭의 크기를 나타내었고, 수렴도를 확인하기 위해 각 test 마다의 상대적 오차를 비교해 보았다. Fig. 3.4과 Fig. 3.6에서 왼쪽 세로축은 계산된 파 진폭을 나타내었고, 오른쪽 세로축은 각 test의 상대적 오차를 나타내었다. 가로축은 Z방향의 격자의 크기를 나타내었다. 두 주파수 모두 격자 크기가 가장 큰 test 4에서 가장 큰 오차가 나타났고, 격자수가 증가함에 따라 계산된 파 진폭의 오차가 줄어들었다. 주파수가 0.5rad/s인 경우 입력한 파 진폭과 계산된 파 진폭을 비교한 결과 격자 사이즈가 가장 큰 test 4에서 대략 14%의 오차가 발생하였고, 가장 격자 사이즈가 작은 test 1에서 계산결과가 대략 4.8%의 오차가 발생하였다. 주파수가 0.63rad/s인 경우 test 4에서 대략 20%의 오차가 발생하였고, test 1에서 대략 7.7%의 오차가 발생하였다. test 1과 test 2의 상대적인 오차가 가장 작은 것을 확인하였고, 이를 통해 결과 값이 수렴하는 것을 확인 할 수 있었다. 계산 결과와 계산시간의 최적화를 통해 본 연

Collection @ kmou

구에서 추후에 수행되는 해석은 test 2인 격자 크기를 선정하였다. 격자 민감도 테스트 결과로부터 각 주파수 별로 파 진폭에 대한 오차가 다른 것을 확인하였고, 본 연구에서는 각 주파수마다 모든 격자 민감도 테스트를 수행하여 파 진폭을 계산하였다. 이를 추후 motion RAOs계산에 input wave amplitude로 적용하였다.

3.3 Numerical analysis of a single vessel motion

앞서 수행한 격자 민감도 테스트 결과를 바탕으로 단일 선체 운동 수치해석을 수행하였다. 이는 본 연구의 수치해석 결과를 실험결과 및 선형포텐셜 이론인 AQWA에서 예측한 결과와 비교하여 결과의 정도를 확인하기 위한 목표이다. 6자유도 선체 운동 수치해석을 위하여 사용한 입사파 조건은 Table 3.3과 같다. 이는 선형포텐셜 이론과의 비교를 위해 파의 비선형성 (Nonlinearity)이 과도하게 표현되지 않도록 하였다. 선형파는 파고 파장비가 0.02이하가 되어야 하고, 고 주파수에서도 이를 만족하기 위해 파 진폭을 1.0m으로 적용하였다. 선택된 주파수들은 motion RAOs의 주파수 변화에 따른 특징적 변화를 대변 할 수 있는 값을 선정하였다. 파의 방향은 +x축을 기준으로 파와 +x축이 이루는 각으로 나타낸다. 이는 반 시계방향을 양의 값으로 설정하였다.

Table 3.3 Simulation conditions for a single vessel

Wave amplitude [m]	Wave direction [deg]	Wave frequency [rad/s]
1.0	0.0 90.0	0.38, 0.46, 0.50, 0.55, 0.63, 0.72

surge, sway와 yaw 모드의 표류 운동을 제어하기 위한 계류 장치는 선형 스프링 (linear spring)으로 모델링 (modeling)하여 시뮬레이션에 적용하였다. (Lee, 2008) 선형 스프링의 강성 (stiffness)은 Table 3.4와 같이 적용하였고, 모식도는

Collection @ kmou

Fig. 3.5과 같다.

Table 3.4 Principal particulars of mooring system of a single vessel

Mooring stiffness	Surge	6.50	[N/m]
	Sway	2.43	[N/m]
	Yaw	1.76	[N · m/rad]

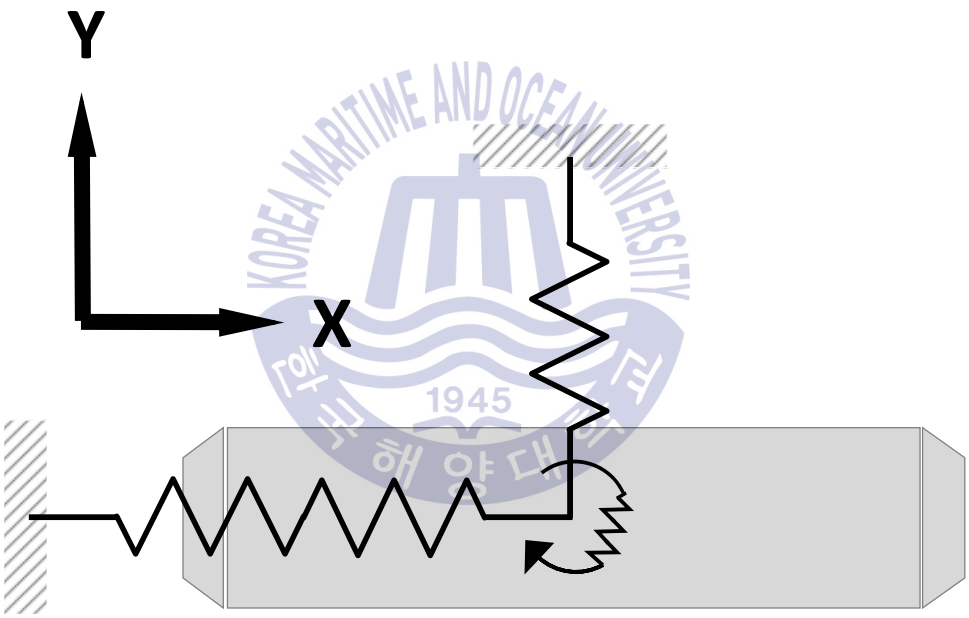


Fig. 3.7 Sketch of linear springs of a single vessel

입사파 조건에서 부유체 운동을 계산하기 위해서 앞서 수행한 격자 민감도 테스트에 기초하여 Fig. 3.6와 같이 유동장을 생성하였다. 또한 부유체 운동을 정도 높게 해석하기 위해 부유체 주변 격자의 밀도를 높게 설정하였다.

Collection @ kmou

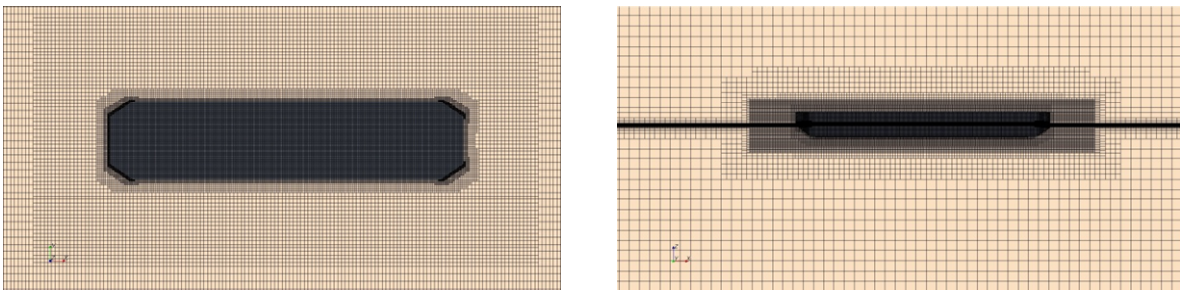


Fig. 3.8 Computational mesh of a single vessel

Fig. 3.7와 같이 각 주파수 별로 motion RAOs (Response Amplitude Operator)을 나타내기 위해 transient motion이 진행되는 시간은 배제하고, steady motion인 상태에서 대략 5주기의 average window 내에서 운동 진폭을 계산하여 motion RAOs를 나타내었다. Motion RAOs의 input data는 wave의 격자 민감도 테스트 결과를 통해 계산된 값을 사용하였고, 이는 대략 5%의 오차를 포함하고 있다.

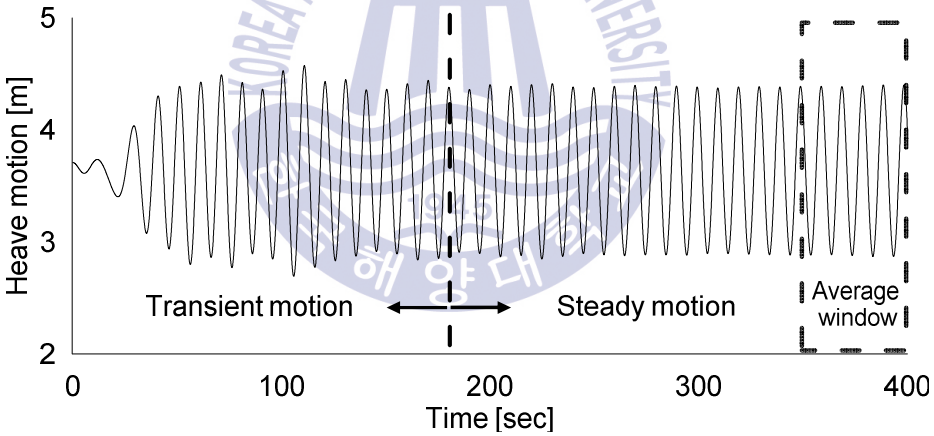


Fig. 3.9 Heave time series of a single vessel

OpenFOAM으로 계산된 부유체의 motion RAOs는 실험 결과 및 선형 포텐셜 이론을 통해 예측된 결과와 비교하였다. 6자유도로 수행하였으나 선수파조건에서는 선형의 좌우 대칭성 때문에 sway와 roll 운동은 거의 나타나지 않았다. 횡파조건에서는 미세한 전후 비대칭성 때문에, surge, pitch와 yaw의 크기가 매우 작게 관찰되었다. 우선 횡파조건 일 때, Fig. 3.8에서 sway의 공진 주파수는 0.09rad/s이고, 이는 표류 운동을 피하기 위해 적용한 선형 스프링 계류 시스템 때문에 나타났다. Heave 운동의 경우 포텐셜의 영향이 우세하기 때문에 선형포

Collection @ kmou

텐셜 이론을 사용하여 예측한 결과와 비슷한 경향을 보이고 있다. 하지만 실험결과는 본 연구와 선형포텐셜 이론과는 차이를 보이고 있다. Roll 운동의 경우 실험결과와 비교하였을 때, 공진주파수 영역을 제외한 주파수에서 비슷한 경향을 나타내었다. 하지만 본 연구 결과는 공진주파수 영역에서 실험결과 보다 비교적 큰 값을 나타내었고, 선형포텐셜 이론은 빌지 보텍스와 점성 효과를 고려하지 않아 공진주파수 영역에서 본 연구의 결과보다 roll 운동이 더 큰 값을 나타내었다. 선수파인 경우 Fig. 3.9과 같이 수치해석 결과를 실험결과와 선형포텐셜 이론의 결과와 비교 하였을 때, surge, heave, pitch 운동 모두 선형포텐셜 이론, 실험결과, 본 연구 결과에서 큰 차이를 보이지 않는다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서 수행한 단일 선체의 수치운동해석이 빌지 보텍스와 점성 효과를 고려한 운동 모사에 적합하다는 것을 확인 할 수 있다.

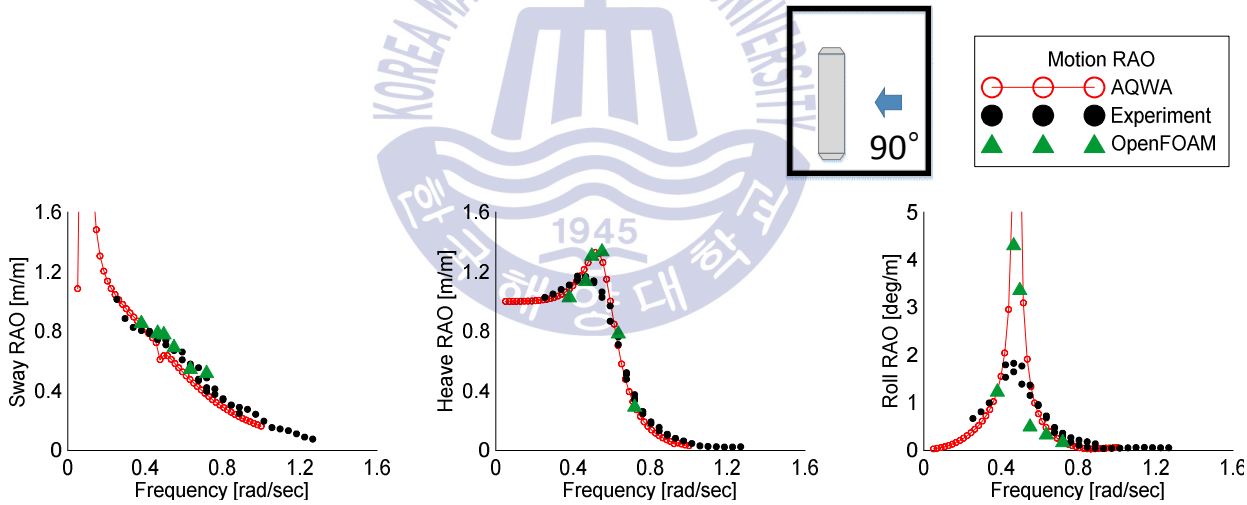


Fig. 3.10 Measured and predicted motion RAOs of a single vessel (wave heading=90deg)

Collection @ kmou

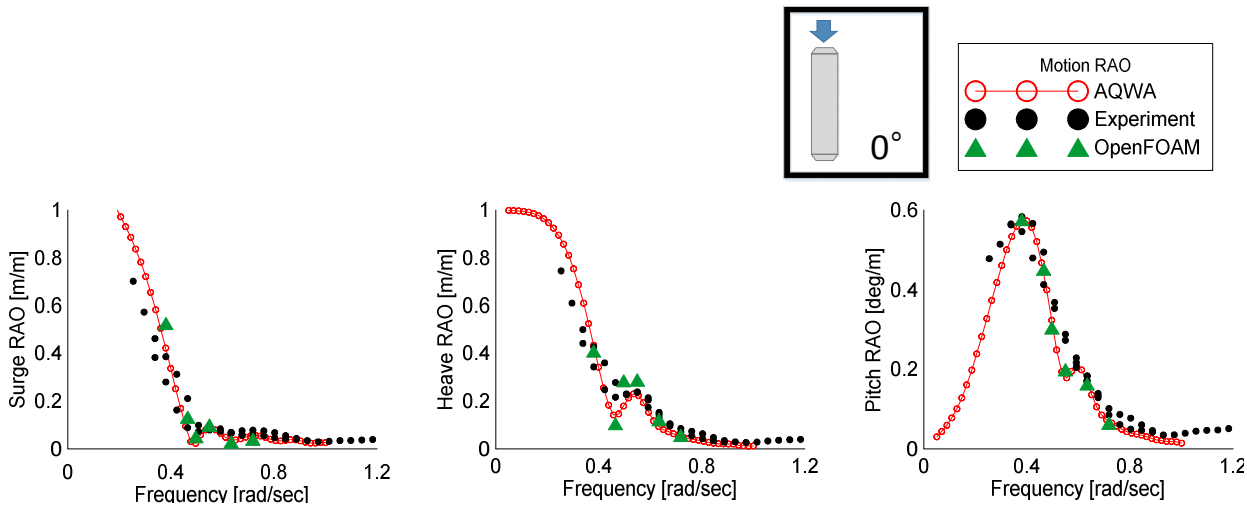


Fig. 3.11 Measured and predicted motion RAOs of a single vessel (wave heading=0deg)

Collection @ kmou

제 4 장 Numerical results of side-by-side vessels

4.1 Motion RAOs

앞서 수행된 단일 선형의 운동해석을 통해 검증된 CFD codes를 사용하여 병렬 배치된 동일한 두 부유체의 거동을 수치해석 하였다. 병렬 배치된 두 부유체의 6자유도 선체 운동 수치해석을 위하여 사용한 입사파 조건은 Table 4.1과 같다. 이는 선형포텐셜 이론과의 비교를 위해 파의 비선형성 (Nonlinearity)이 과도하게 표현되지 않도록 하였다. 선형파는 파고 파장비가 0.02이하가 되어야 하고, 고 주파수에서도 이를 만족하기 위해 파 진폭을 1.0m으로 적용하였다. 파 방향은 단일 선체 경우와는 다른 비대칭적인 유체동역학적 효과를 관찰하기 위해 0° 를 선정하고, shielding effect를 관찰하기 위해 90° 를 선정하였다. 선택된 주파수들은 단일 선체 경우와 마찬가지로 motion RAOs의 주파수 변화에 따른 특징적 변화를 대변 할 수 있는 값을 선정하였다. 동일한 두 부유체 사이의 gap 크기는 모든 조건에서 15m이다.

Table 4.1 Simulation conditions for side-by-side vessels

Wave amplitude [m]	Wave direction [deg]	Wave frequency [rad/s]
1.0	90.0	0.38, 0.42, 0.46, 0.49, 0.55, 0.63, 0.69, 0.72, 0.74
	0.0	0.43, 0.48, 0.53, 0.58, 0.61, 0.68, 0.73, 0.74, 0.75

Collection @ kmou

병렬 배치된 두 부유체 해석에서 surge, sway and yaw 모드의 표류 운동을 제어하기 위해 Fig. 4.1와 같이 계류 장치를 선형 스프링으로 모델링 하였다. Hawsers와 fenders를 사용하면 더 현실적인 모델링이 이루어지겠지만, 그들의 비선형성으로 인해 본 연구의 목적인 선형포텐셜 이론과의 비교 시 야기될 복잡성을 제거하기 위해 본 연구에서는 Hawsers와 fenders를 적용하지 않았다. 대신 독립적인 선형 스프링을 적용하였고, Roll과 pitch 운동에 선형 스프링의 영향이 미치기 않기 위해서 계류 시스템의 공진주파수가 저 주파수가 되도록 Table 4.2과 같이 강성을 적용하였다. 모식도는 Fig. 4.1과 같다.

Table 4.2 Principal particulars of mooring system of side-by-side vessels

Mooring stiffness	Surge	6.50	[N/m]
	Sway	2.43	[N/m]
	Yaw	3.74	[N · m/rad]

Collection @ kmou

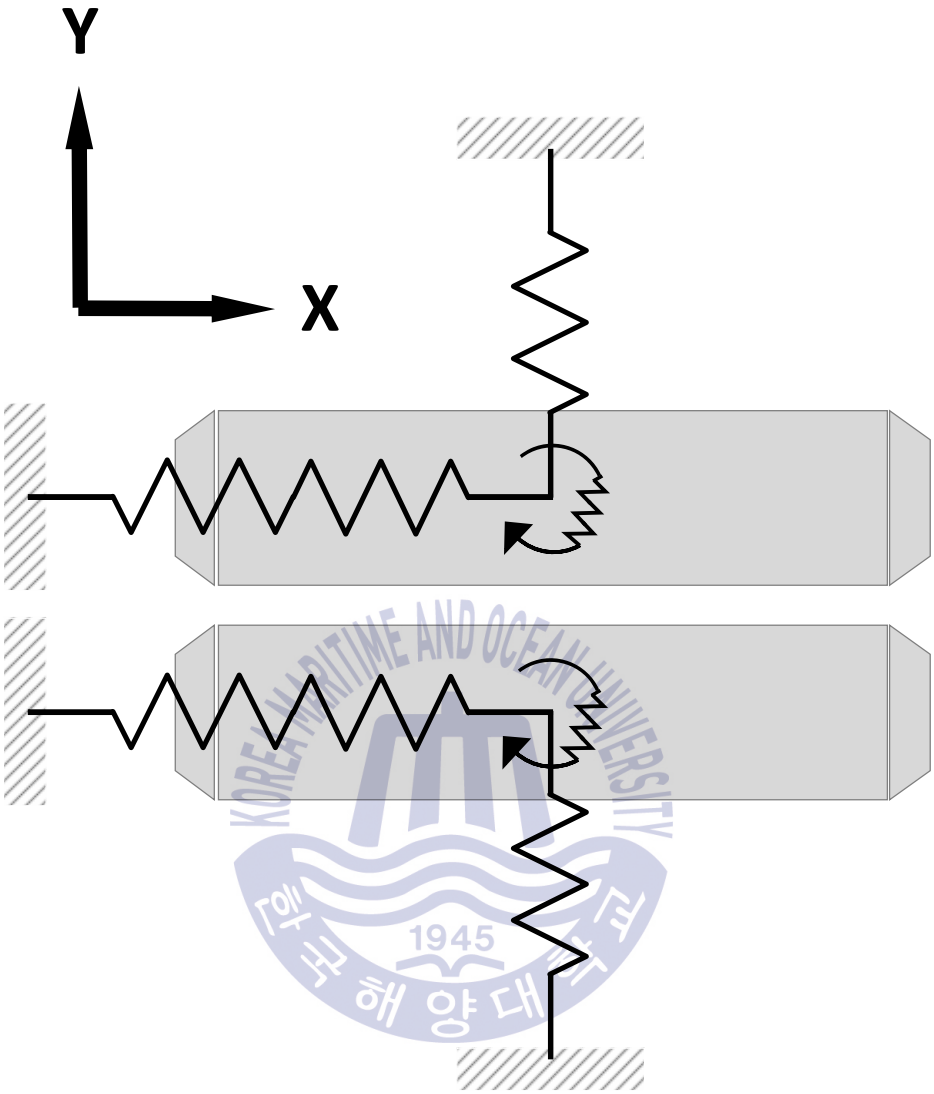


Fig. 4.1 Sketch of linear springs of side-by-side vessels

Collection @ kmou

앞서 수행한 단일 선체 해석에서 적용한 격자 생성방법과 같이 자유수면 근처에서는 격자의 크기를 작게 하여 격자 밀도를 높게 만들었고, 부유체 운동을 정도 높게 해석하기 위해 부유체 주변 격자 또한 격자의 밀도를 높게 하였다.

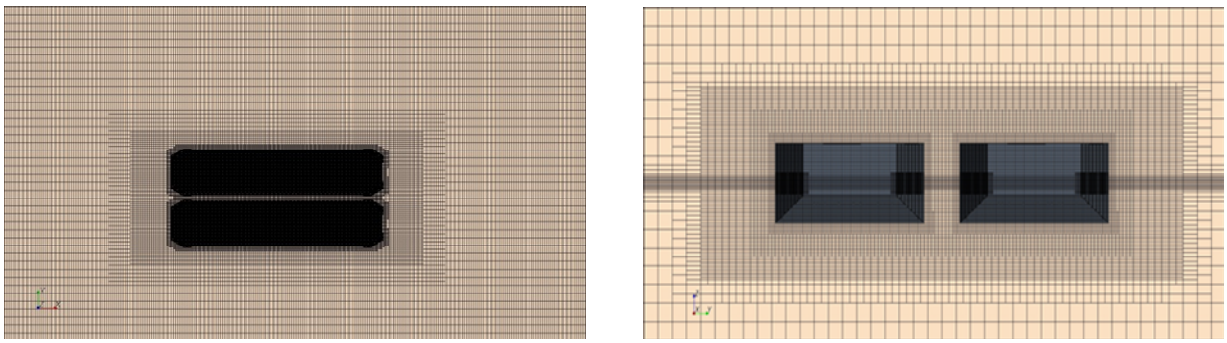


Fig. 4.2 Computational mesh of side-by-side vessels

Fig. 4.3은 횡파조건에서 병렬 배치된 두 부유체의 heave, roll, pitch motion RAOs 결과이고, Fig. 4.4는 선수파조건에서 병렬 배치된 두 부유체의 heave, roll, pitch motion RAOs 결과이다. Fig. 4.3에서 모든 운동모드의 motion RAOs는 피스톤 모드의 공진주파수 영향을 덜 받는 0.3~0.6rad/s범위에서 선형포텐셜 이론과 비교적 비슷한 경향을 나타내었다. 하지만 피스톤 모드 공진주파수 영역인 0.6~0.8rad/s범위에서의 motion RAOs는 선형포텐셜 이론과 CFD codes의 결과 모두 갑작스런 변화가 나타났다. 이는 단일 선체 수치운동해석에서는 나타나지 않았던 변화이고, 피스톤 모드의 공진주파수 범위에서 standing wave에 의해 유체력이 증가하여 나타난 결과이다. 이 공진주파수 범위에서 CFD codes를 이용한 heave와 pitch 운동의 결과는 Sauder et al. (2010)와 Park and Heo (2012)에서 언급한 것과 같이 빌지 보텍스와 점성 효과로 인해 standing wave를 과도하게 예측하는 선형포텐셜 이론의 결과보다 standing wave가 작아져서 운동 또한 작게 나타났다.

입사파에 1차적으로 노출되어있는 weather side vessel (No.1)에 의해서 weather side vessel 뒤에 위치한 shield side vessel (No.2)은 운동의 크기가 작아지는 shielding effects가 생기게 된다. 이로 인해 전반적인 주파수 영역에서 weather side vessel의 운동에 비해 shield side vessel의 운동이 더 작게 계산되

Collection @ kmou

었다.

두 부유체의 heave와 roll 운동의 연성으로 인하여 roll 공진주파수에서 heave motion RAOs의 불연속적인 변화가 관찰되었다. 빌지 보텍스와 점성 효과를 고려하지 못하는 선형포텐셜 이론은 roll 운동을 과도하게 예측하였기 때문에 heave motion RAOs 역시 CFD codes의 결과에 비해 급격하게 변화하였다.

단일 선체 운동해석에서 선수파조건인 경우, 선형의 좌우대칭성 때문에 sway와 roll 운동이 나타나지 않는다. 하지만 Fig. 4.4에서 병렬 배치된 두 부유체의 경우 비대칭적인 유체동역학 효과로 인하여 roll 운동이 나타난다. 동일한 두 부유체를 병렬 배치하였기 때문에 간극에서 각 부유체에 동일한 동역학적 힘이 작용한다. 이로 인해 두 부유체의 roll 운동이 모두 동일함을 확인할 수 있다.

Collection @ kmou

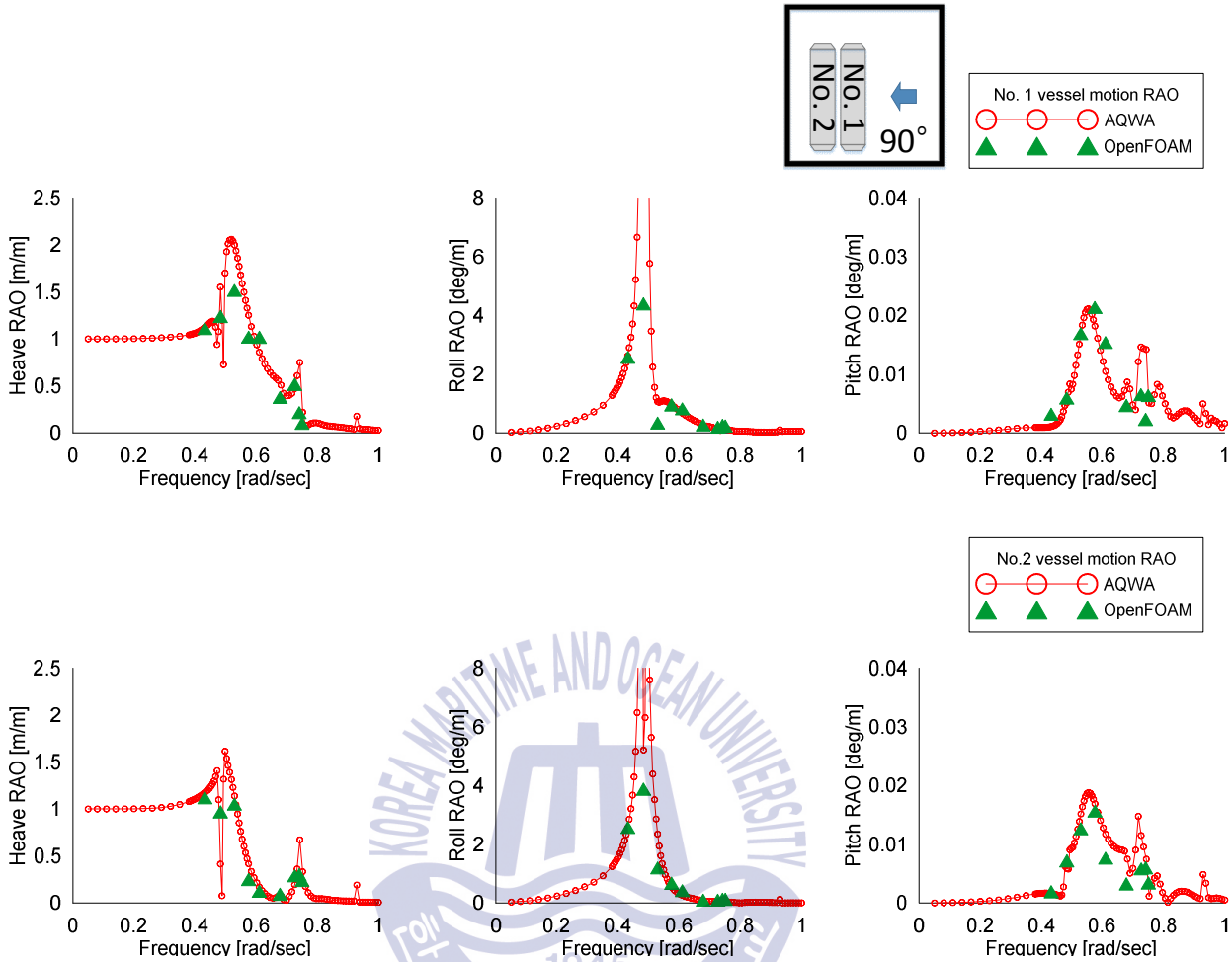


Fig. 4.3 Measured and predicted motion RAOs of side-by-side vessel (wave heading=90deg)

Collection @ kmou

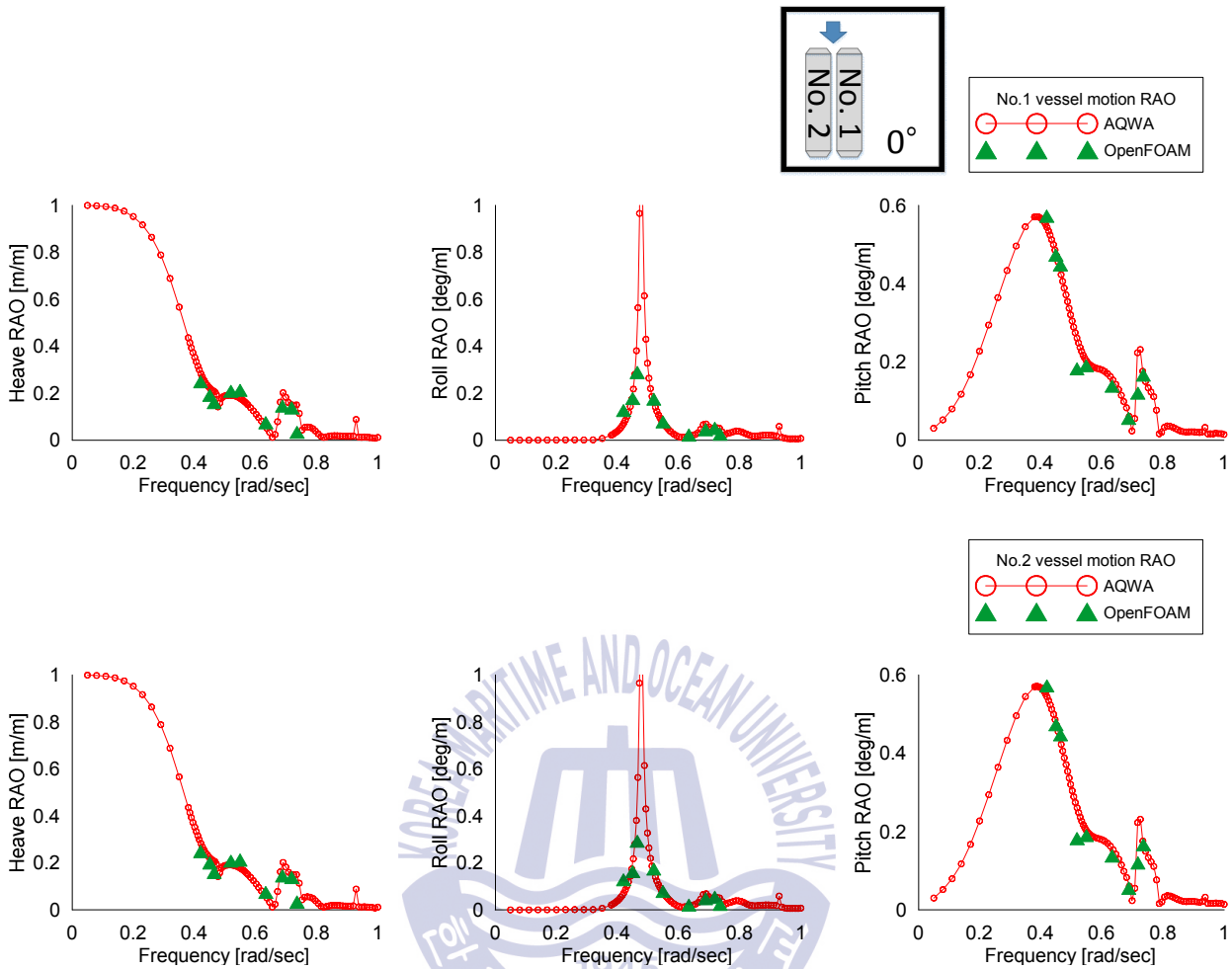


Fig. 4.4 Measured and predicted motion RAOs of side-by-side vessel (wave heading=0deg)

Fig. 4.5와 Fig. 4.6는 각각 횡파와 선수파 조건에서 gap의 크기 변화가 가장 크게 발생한 0.61rad/s와 0.55rad/s의 주파수에서 두 부유체의 sway motion에 의한 gap 크기의 변화를 시간 영역으로 나타내었다. 두 부유체는 각각 독립된 선형 스프링으로 계류 시스템을 모델링하였기 때문에 sway 모션에 의한 최소 gap은 횡파의 경우 13.43m, 선수파의 경우 14.75m로 gap의 변화가 크게 작용하지 않았다. 하지만 실제에서는 본 연구에서 다루지 않은 hawser나 fender를 사용하기 때문에 본 연구의 결과 보다 gap이 더 작일 질 것이라고 판단된다.

Collection @ kmou

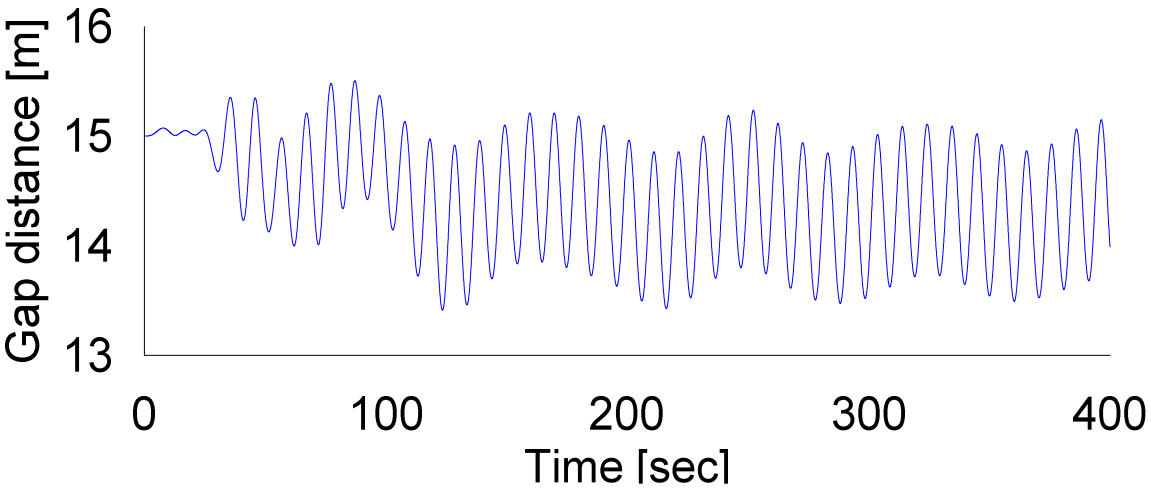


Fig. 4.5 Gap distance of side-by-side vessels (wave heading=90deg, frequency=0.61rad/s)

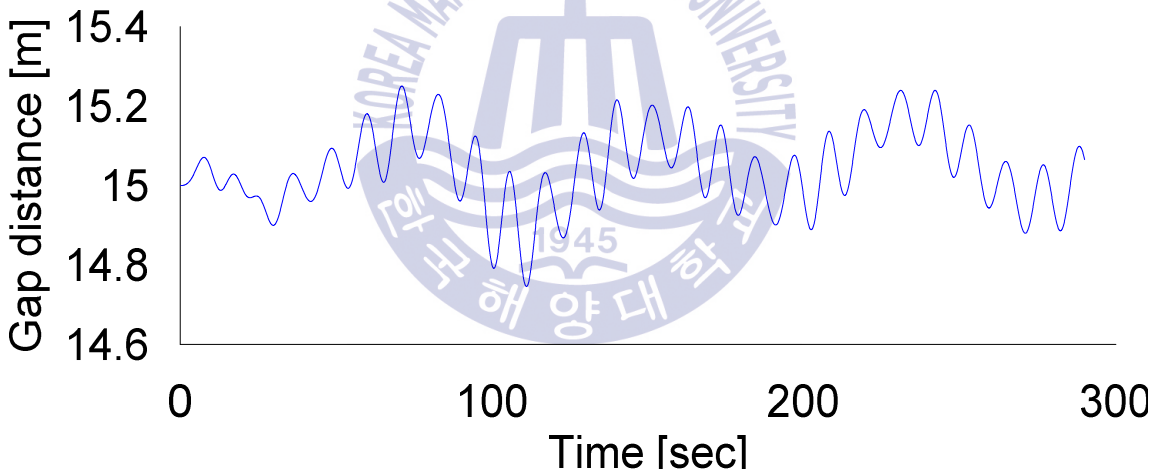


Fig. 4.6 Gap distance of side-by-side vessels (wave heading=0deg, frequency=0.55rad/s)

Collection @ kmou

4.2 Standing wave in the gap

Sauder et al. (2010)와 Park and Heo (2012)에서 언급한 것과 같이 빌지에서의 보텍스의 영향이 standing wave의 감쇠효과로 작용하며, CFD codes를 사용하면 빌지 보텍스의 영향이 고려되어 standing wave의 크기가 작아진다. 빌지 보텍스의 영향이 standing wave의 감쇠효과로 작용하는 것을 확인하기 위해 2차원 병렬 배치된 고정된 두 부유체 사이에 작용하는 standing wave를 계산하였다. Fig. 4.7는 사각 빌지와 흘수의 40%에 해당하는 빌지 반경을 적용한 원형 빌지 선형에 대해서 2차원 병렬 배치된 두 부유체에 작용하는 standing wave amplitude를 나타내었다. Gap 공진 주파수 영역에서 원형 빌지의 standing wave amplitude 결과가 사각 빌지의 결과보다 더 크게 나타나는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 vorticity를 표현 할 수 있는 정도로 격자의 밀도가 조밀하지 않아 표현하기 어렵다. 이로 인해 vorticity를 표현하지 않고, 압력의 분포로부터 보텍스를 추정하였다. Fig. 4.8은 빌지 보텍스의 영향을 확인하기 위해 gap 공진 주파수에서 사각 빌지와 원형 빌지에서 나타나는 압력의 contours를 나타내었다. 원형 빌지 끝단에서 압력 분포의 크기와 강도가 사각 빌지에서 압력 분포의 크기와 강도에 비하여 매우 작은 것을 확인 할 수 있다. 이는 standing wave를 감쇠시키는 원인인 빌지 보텍스가 원형 빌지에서 비교적 작게 작용한다고 할 수 있고, 이로 인하여 원형 빌지에서 standing wave amplitude가 비교적 크게 나타났다. 이를 통해 빌지 보텍스 영향이 standing wave의 감쇠로 작용하는 것을 확인 할 수 있다.

Collection @ kmou

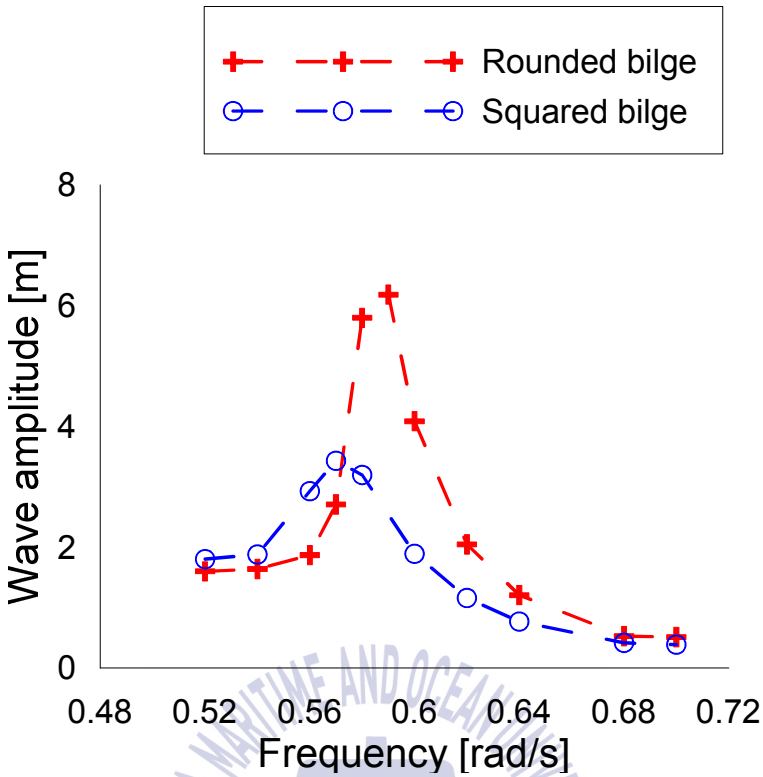
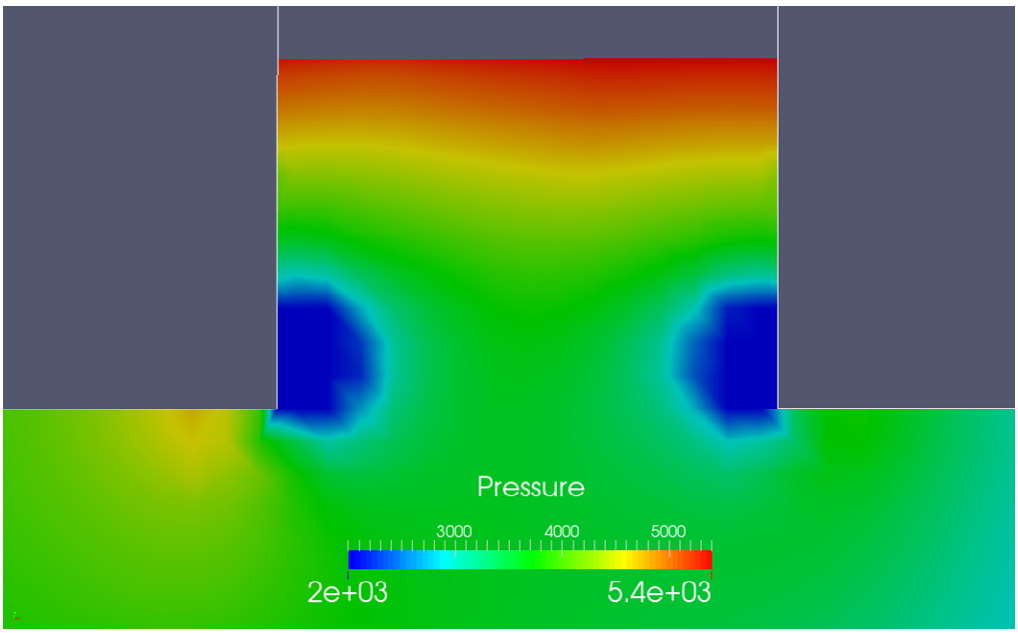
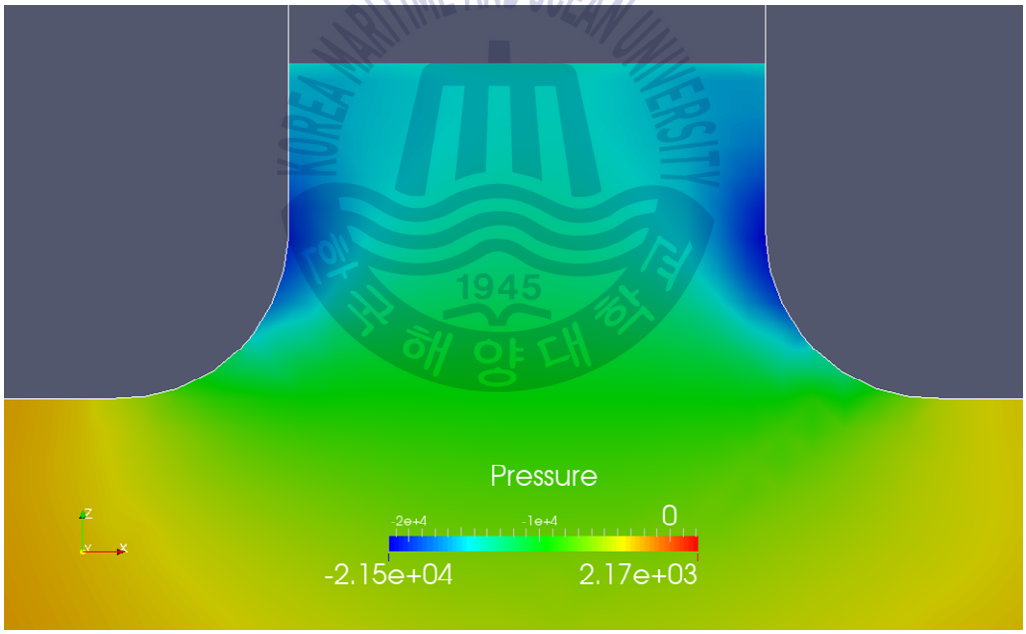


Fig. 4.7 Standing wave amplitude of two-dimensional floating vessels inside the gap

Collection @ kmou



(a) Squared bilge (Frequency = 0.57rad/s)



(b) Rounded bilge (Frequency = 0.59rad/s)

Fig. 4.8 Pressure contours of two-dimensional floating vessels

Collection @ kmou

Fig. 4.5과 Fig. 4.6는 각각 횡파와 선수파조건에서 병렬 배치된 두 부유체의 간극에서 나타나는 maximum standing wave amplitude를 선형포텐셜 이론에 인공소산계수를 적용한 결과와 인공소산계수를 적용하지 않은 결과를 CFD codes의 계산결과와 비교하였다. 주파수 별로 standing wave의 shape은 각각 다른 형태로 나타나고, standing wave의 shape의 변화에 따라 maximum standing wave가 계측되는 위치도 변화하기 때문에 본 연구에서는 maximum standing wave가 발생하는 위치를 추적하여 maximum standing wave amplitude를 Fig. 4.5과 Fig. 4.6에 나타내었다. 횡파조건, 선수파조건에서 선형포텐셜 이론결과와 CFD codes의 결과는 각각 0.74rad/s, 0.72rad/s에서 가장 큰 maximum standing wave amplitude를 나타내었다. 전반적으로 maximum standing wave amplitude는 빌지 보텍스와 점성 효과로 인하여 인공소산계수를 적용하지 않은 선형포텐셜 이론의 결과 보다 CFD codes의 결과가 더 작은 것을 확인 할 수 있다. 선형포텐셜 이론은 인공소산계수의 값에 따라 standing wave 결과가 큰 차이를 나타나는 것을 확인 하였다. 이를 통해 인공소산계수를 적용하면 standing wave의 크기를 줄여 줄 수 있지만, 실제 작용하는 standing wave를 표현하기 위한 인공소산계수를 산정하기 어렵다. 하지만 CFD codes는 인공소산계수와는 무관하게 정확한 유체력을 산정 할 수 있는 것을 확인하였다.

Fig. 4.7는 standing wave의 크기가 작아지는 원인인 빌지에서의 보텍스의 영향을 관찰하기 위해 속도와 압력 contours를 나타내었다. 본 연구에서는 vorticity를 표현 할 수 있는 정도로 격자의 밀도가 조밀하지 않아 표현하기 어렵다. 이로 인해 vorticity를 표현하지 않고, 속도와 압력의 분포로부터 보텍스를 추정하였다. Fig. 4.7 (a)는 standing wave가 가장 크게 발생하는 주파수인 0.72rad/s에서의 maximum velocity가 관찰되었을 시점의 속도 contours 결과이다. Fig. 4.7 (b)는 standing wave가 가장 크게 발생하는 주파수인 0.72rad/s에서의 minimum pressure가 관찰되었을 시점의 압력 contours 결과이다. 주파수 0.72rad/s에서 간극내부의 빌지에서 유체속도가 크게 변화하였고, 이때 빌지의 압력이 상대적으로 작게 작용하는 것을 확인 할 수 있다. 이를 통해 빌지 보텍스가 작용했다는 것을 추정하였다.

Collection @ kmou

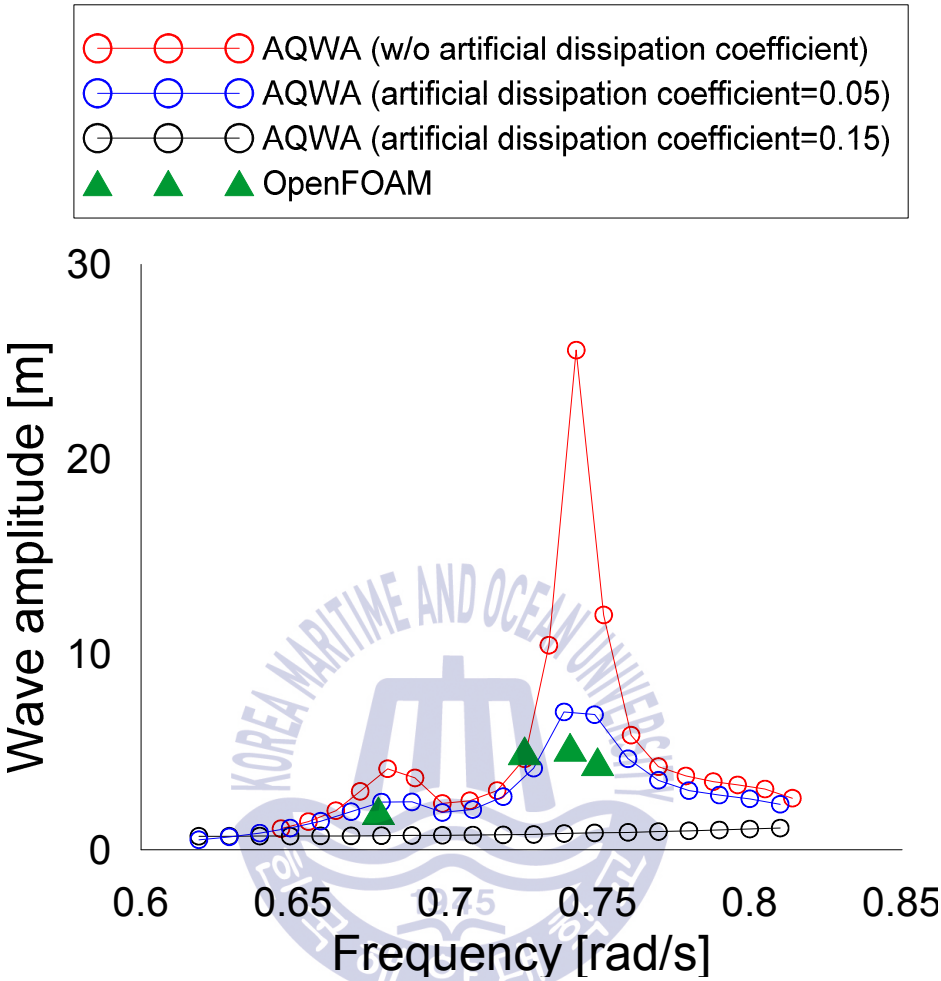


Fig. 4.9 Maximum amplitude of standing wave in beam sea condition

Collection @ kmou

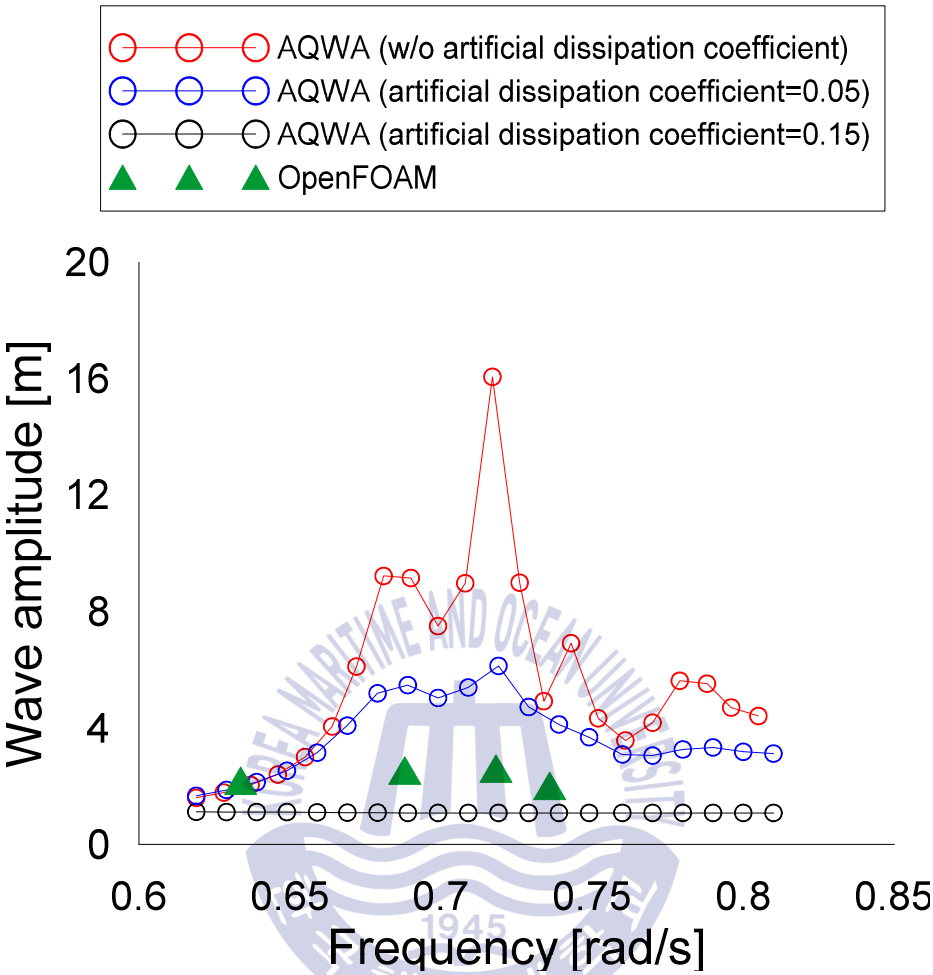
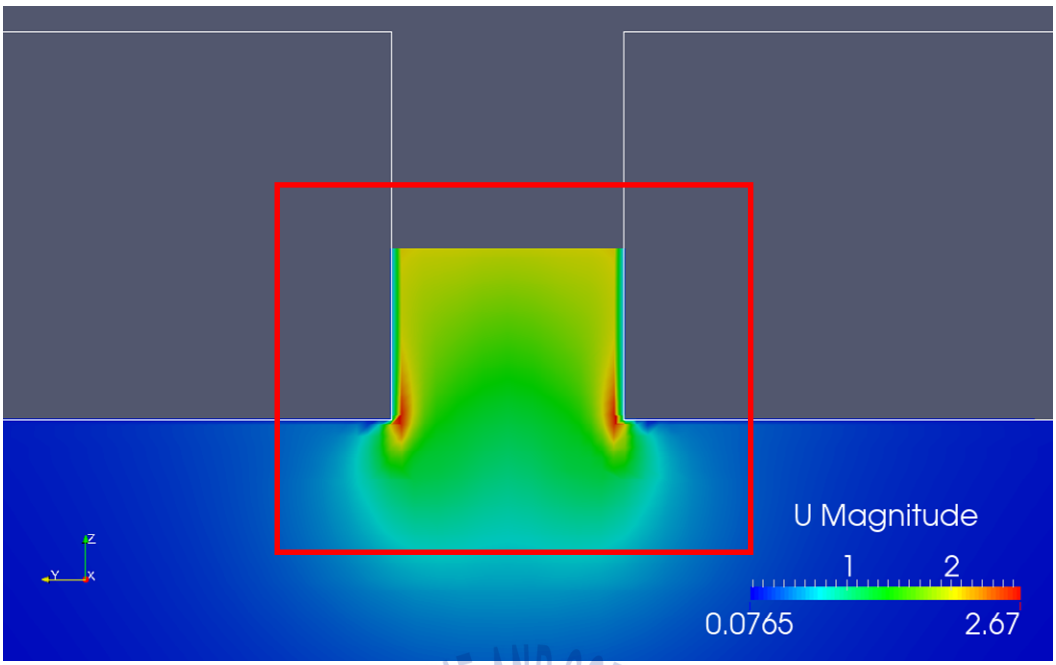
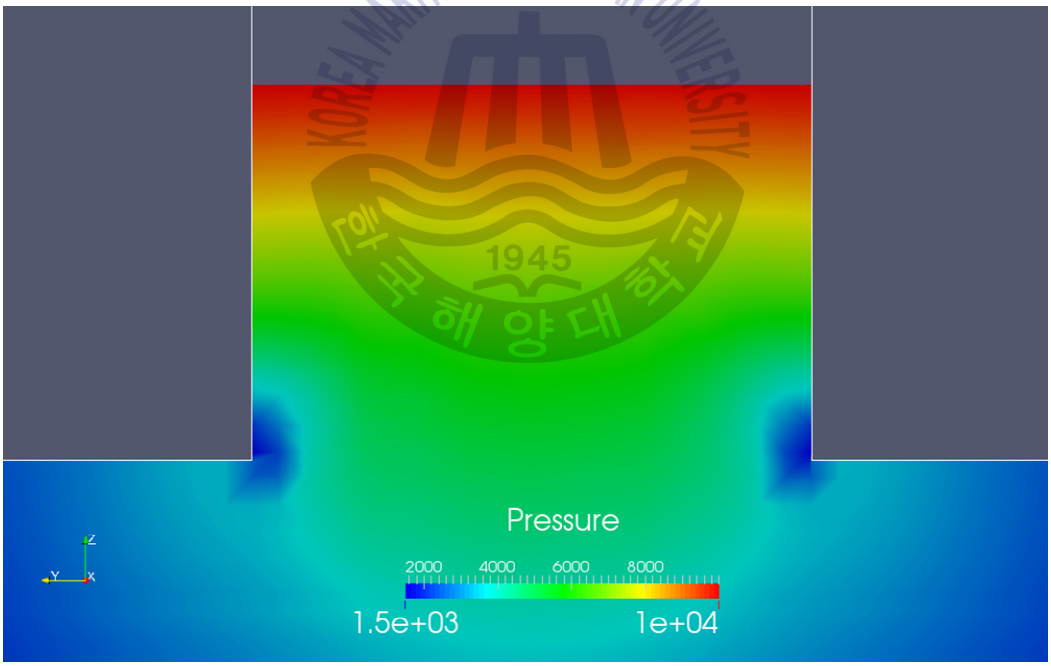


Fig. 4.10 Maximum amplitude of standing wave in head sea condition

Collection @ kmou



(a) velocity



(b) Pressure

Fig. 4.11 Velocity and pressure contours in head sea (Frequency=0.72rad/s)

Collection @ kmou

Fig. 4.8은 (a), (b), (c) 차례대로 선수파조건하에 피스톤 모드 공진주파수에서 간극내부의 wave elevation, 간극 반대편 선측의 wave elevation, 단일선체에서 나타난 wave elevation의 contour을 나타내었다. Fig. 4.8 (a)에서와 같이 간극내부에서는 standing wave로 인해 wave elevation이 크게 나타났다. 반면 간극 반대편 선측인 Fig. 4.8 (b)는 standing wave가 작용하지 않아 wave elevation이 간극 내부의 wave elevation에 비해 상대적으로 작게 나타났다. 참고로 비교를 위해 단일 선체의 경우를 보면 간극이 없으므로 wave elevation이 작은 것을 확인 할 수 있다.

이 결과를 선형포텐셜 이론과 비교를 위해서 간극내부의 standing wave elevation을 Fig. 4.9과 Fig. 4.10에 나타냈다. Fig. 4.9과 Fig. 4.10은 횡파와 선수파에서 피스톤 모드 공진주파수인 0.74rad/s와 0.72rad/s에서의 standing wave elevation을 나타냈다. 가로축은 선체중심을 기준으로 선미에서 선수까지의 길이를 나타내었고, 세로축은 standing wave elevation을 나타내었다. 두 방법의 비교를 위해서 선형포텐셜 이론과 CFD codes의 같은 위상인 시점에서 maximum standing wave elevation이다. Fig. 4.9과 Fig. 4.10에서 알 수 있듯이 빌지 보텍스와 점성 효과를 고려하지 못하는 선형포텐셜 이론은 standing wave를 과도하게 표현하고 있다.

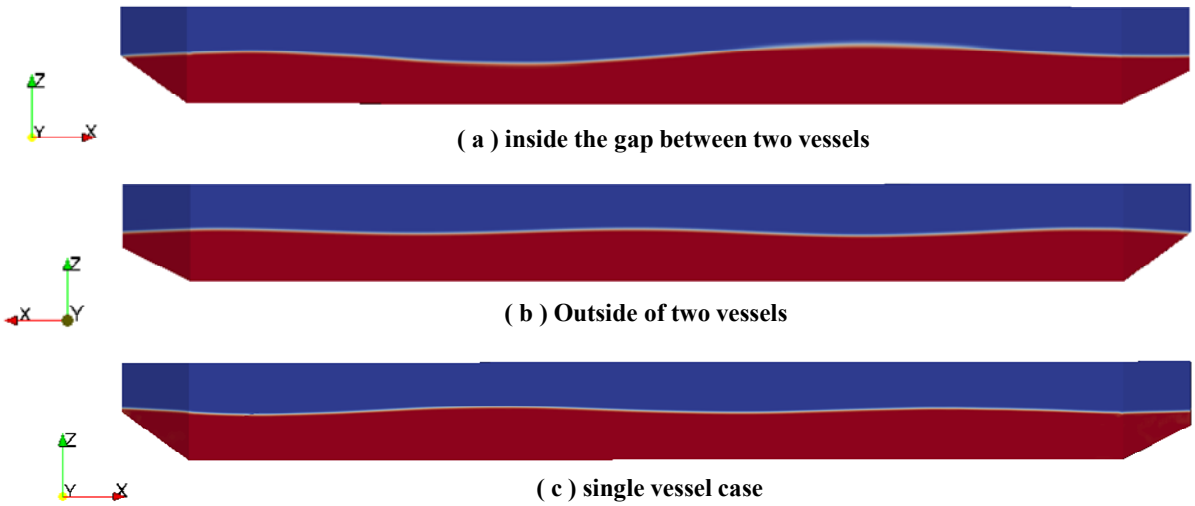


Fig. 4.12 Wave elevation contours in head sea (frequency=0.72rad/s)

Collection @ kmou

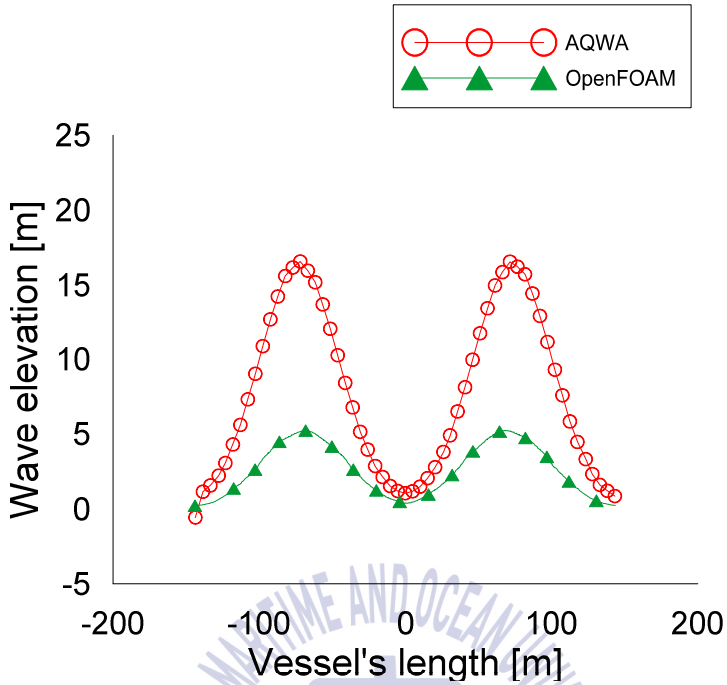


Fig. 4.13 Standing wave elevation in beam sea (frequency=0.74rad/s)

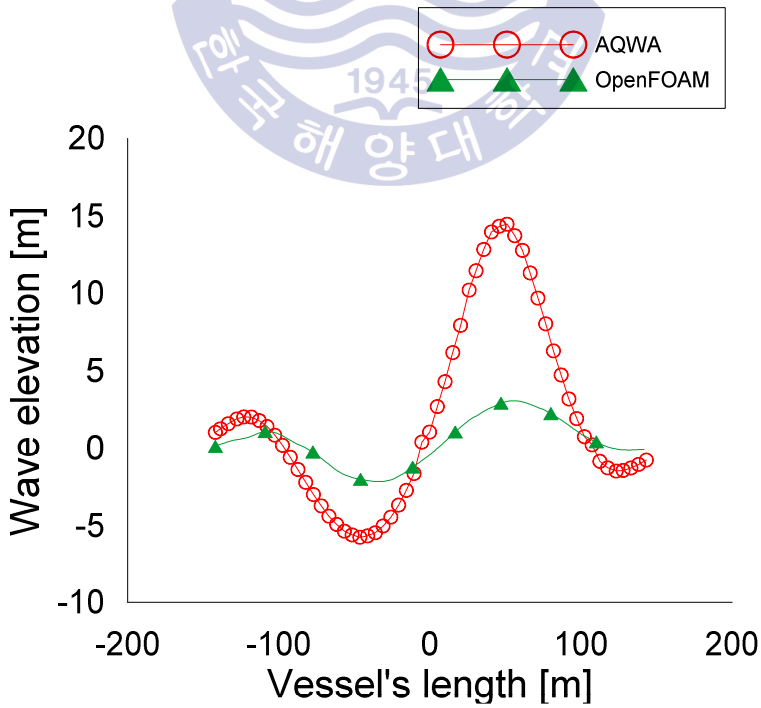


Fig. 4.14 Standing wave elevation in head sea (frequency=0.72rad/s)

Collection @ kmou

제 5 장 Conclusions

5.1 결론

본 연구는 규칙파 조건에서 CFD codes를 이용하여 단일 선체와 병렬 배치된 두 부유체의 6자유도 운동 해석을 수치해석 하였다.

단일 선체 운동해석은 CFD codes인 OpenFOAM 을 이용한 수치해석 결과를 실험결과와 선형포텐셜 이론의 결과와 비교 하였을 때, 모든 운동 모드에서 선형포텐셜 이론, 실험결과, 본 연구 결과에서 큰 차이를 보이지 않는다는 것을 알 수 있다. 하지만 본 연구 결과는 횡파조건에서의 roll 공진주파수 영역에서 실험결과 보다 비교적 큰 roll 운동이 나타났고, 선형포텐셜 이론은 부유체의 빌지 보텍스와 점성 효과를 고려하지 않아 본 연구의 결과보다 roll 운동이 더 큰 값을 나타내었다. 이를 통해 본 연구에서 수행한 단일 선체의 수치운동해석이 빌지 보텍스와 점성 효과를 고려한 운동 모사에 적합하다는 것을 확인 할 수 있다.

병렬 배치된 두 부유체의 운동은 선형포텐셜 이론과 CFD codes의 수치해석 결과를 비교하였다. 본문에서 언급한 주파수 범위에서 부유체 운동은 전반적으로 선형포텐셜 이론 결과와 CFD codes 해석 결과가 유사하였다. 하지만 피스톤 모드 공진주파수 범위에서 motion RAOs는 standing wave를 과도하게 예측하는 선형포텐셜 이론의 결과보다 CFD codes의 결과가 더 작은 것을 확인 하였다. 빌지 보텍스와 점성 효과를 고려하지 못해 과도하게 예측하는 선형포텐셜 이론의 standing wave보다 CFD codes의 standing wave가 사실적으로 모사되는 것을 확인하였고, 또한 선형포텐셜 이론이 피스톤 모드 공진주파수에서 standing waves를 과도하게 예측하기 때문에 motion RAOs를 과도하게 추정하였다는 것

Collection @ kmou

을 확인하였다.

단일 선체 운동해석에서는 roll의 공진주파수 영역에서 선형포텐셜 이론의 결과와 CFD codes의 결과가 차이를 보였을 뿐 다른 영역의 주파수에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러므로 단일 선체 운동해석은 선형포텐셜 이론을 이용하여 계산하는 방법이 계산시간을 절약 할 수 있어 더 효율적이다. 하지만 복잡한 유체동역학적 상호작용 문제인 병렬 배치된 두 부유체의 운동해석 시 실험을 통해 해석하는 것이 보편적이다. 하지만 실험은 준비과정에서 실험모델 설치의 부정확성과 계측장비로 인한 예측 할 수 없는 오류, 수조공간의 제약, 재료에 대한 한계, 시간이 많이 걸리는 한계가 존재한다. 본 연구에서 사용한 CFD codes를 이용하면 다양하고 복잡한 유체동역학 상호작용 문제에 대해서 비교적 적은 시간에 정확한 값을 해석 할 수 있을 것으로 기대된다.

Collection @ kmou

5.2 향후 과제

본 연구에서 사용한 mesh morphing method은 격자을 변형시켜 기존 격자를 매 시간마다 새로운 격자로 변형시키는 방법이다. 하지만 간극에서 격자의 밀도가 높아질 경우 mesh morphing method로 변형 되는 격자의 뒤틀림 현상이 발생하고, 이로 인해 해석 결과가 발산 가능성이 있다. 본 연구에서는 격자의 뒤틀림 현상에 영향을 미치지 않도록 최소 간극을 15m로 충분히 설정하여 연구를 진행하였다. 하지만 병렬 배치된 두 부유체 사이의 gap이 좁을수록 피스톤 모드 공진주파수에서 standing wave의 영향은 더 클 것이라고 판단된다. Standing wave가 지배적으로 작용하게 되면 motion RAOs는 선형포텐셜 이론의 결과와 CFD codes 의 계산결과는 더욱 차이를 보일 것으로 예상된다. 그러므로 추후 mesh regeneration method 또는 overset mesh method를 이용하여 gap effect가 지배적인 최소한의 간극을 가지는 병렬 배치된 두 부유체의 운동을 연구 할 필요가 있다.

Collection @ kmou

Reference

Buchner, B. Van Dijk, A. & De Wilde, J., 2001. *Numerical multiple-body simulations of side-by-side mooring to an FPSO,* In The Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers.

Faltinsen, O.M. Rognebakke, O.F. & Timokha, A.N., 2007. *Two-dimensional resonant piston-like sloshing in a moonpool,* Journal of Fluid Mechanics, 575, 359-397.

Hong, S.Y. Kim, J.H. Kim, H.J. & Choi, Y.R., 2002. E*xperimental study on behavior of tandem and side-by-side moored vessels,* In The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers.

Jean-Robert, F. Naciri, M. & Xiao-Bo, C., 2006. *Hydrodynamics of Two Side-by-side Vessels Experiments And Numerical Simulations,* In The Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers.

JIANG, S.C. LU, L. TENG, B. & BAI, W., 2014. *Numerical Simulation of Gap Resonance between Twin Boxes under Forced Heave Motion,* In The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers.

Kristiansen, T. & Faltinsen, O.M., 2008. *Application of a vortex tracking method to the piston-like behaviour in a semi-entrained vertical gap,* Applied

Collection @ kmou

Ocean Research, 30(1), 1-16.

Lee, S.J., 2008. *The effects of LNG-sloshing on the global responses of LNG-carriers. Doctoral dissertation*, Texas A&M University.

Molin, B., 2001. *On the piston and sloshing modes in moonpools,* Journal of Fluid Mechanics 430, 27-50.

Park, J. & Heo. J., 2012. *Numerical Analysis on Hydrodynamic Forces Acting on Side-by-Side Arranged Two-Dimensional Floating Bodies in Viscous Flows,* Journal of the society of Naval Architects of Korea, 49(5), 425-432.

Pauw, W.H. Huijsmans, R.H. & Voogt, A., 2007. *Advances in the hydrodynamics of side-by-side moored vessels,* In ASME 2007 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, pp. 597-603, American Society of Mechanical Engineers.

Sauder, T. Kristiansen, T. & Ostman, A., 2010. *Validation of a numerical method for the study of piston-like oscillations between a ship and a terminal,* In The Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers.

Yu, Y.H. & Kinnas, S.A., 2008. *Prediction of Hydrodynamic Performance for Various Ship-Shaped Hulls under Excessive Roll Motions Using an Unsteady Navier-Stokes Solver,* In The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers.

Collection @ kmou