

점성유동장에 병렬배치된 2차원 부유체에 작용하는 유체력에 관한 수치해석

허재경¹·박종천^{1,†}
부산대학교 조선해양공학과¹

Numerical Analysis on Hydrodynamic Forces Acting on Side-by-Side Arranged Two-Dimensional Floating Bodies in Viscous Flows

Jae-Kyung Heo¹·Jong-Chun Park^{1,†}

Department of naval architecture and ocean engineering, Pusan National University¹

Abstract

Viscous flow fields of side-by-side arranged two-dimensional floating bodies are numerically simulated by a Navier-Stokes equation solver. Two identical bodies with a narrow gap are forced to heave and sway motions. Square and rounded bilge hull forms are compared to find out the effects of vortex shedding on damping force. Wave height, force RAOs, added mass and damping coefficients including non-diagonal cross coefficients are calculated and a similarity between the wave height and force RAOs is discussed. CFD which can take into account of viscous damping and vortex shedding shows better results than linear potential theory.

Keywords : Hydrodynamic force(유체력), Piston mode(피스톤 모드), Vortex shedding(보텍스 방출), Side-by-side arrangement(병렬 배치), Viscous flows(점성유동), CFD(전산유체역학)

1. 서론

해양산업의 발전과 함께 선박과 해양플랜트의 종류가 다양해지고 있으며, 이와 더불어 복잡하고 어려운 해상 작업이 요구되고 있다. 개별 선박이 일반적으로 수행하는 화물의 운송 작업 외에 복수의 선박 또는 선박 및 해양플랜트와의 공동 작업이 이뤄지고 있다. 복수의 선박 또는 해양구조물간의 공동 작업은 대부분 일정한 간격과 배치형태를 유지한 채로 수행되며, 특별한 경우에는 병렬로 배치된 상태에서 작업이 이뤄진다. 병렬 배치된 상태에서 요구되는 작업으로는 해상급유나 화물이송이 가장 대표적이라 할 수 있다. 해양 작업 지원선의 경우에는 부유식 또는 중력식 해양플랜트에 근접하여 물류의 지원 작업 등을 수행한다. 또한, LNG 시장의 성장으로 등장한 LNG-FSRU나 LNG-FPSO의 경우에도 병렬계류를 통한 적하역 작업이 주목받은 바 있다.

좁은 간극을 사이에 둔 선박 또는 해양구조물에는 공진현상이 수반된 자유표면의 거동과 유체력이 발생한다. 피스톤 모드(piston mode)라고도 불리는 이러한 공진현상은 쌍동선이나 문풀(moon pool)에서도 발생되며, 공진주파수에서 급격한 수면의 상승과 유체력의 증가를 초래한다. 이에 따라 작업성이 저하될 수 있으며 승조원의 안전도 위협받을 수 있다. 피스톤 모드의 공진주파수에 대해서는 Fukuta (1977)와 Aalbers (1984)가 드릴쉽(drillship)의 문풀 내부의 액체 거동을 스프링-질량-댐퍼 시스템으로 모델링

하여 공진주파수를 추정하였고, Molin (2001)은 선형 포텐셜 이론으로 좀 더 일반화된 추정식을 제안하였다.

병렬계류된 부유체에는 선수와 조건에서 상하방향의 유체력 뿐만 아니라, 부유체간의 상호작용으로 인해 좌우방향의 유체력도 발생되어 계류력에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Kodan (1984)은 사각형의 바지선과 일반 상선이 병렬로 계류되어 있는 상태에서 선미사파가 상선쪽으로 유입되는 경우에 발생하는 운동을 계속하였으며, 이를 두 선체간의 상호작용 유무에 따라 해석 및 비교하였다. Hong, et al. (2002)은 LNG FPSO와 셔틀탱커의 직렬 계류(tandem mooring)와 병렬계류에 대하여 모형시험과 고차 경계요소법을 통해 비교하였다. Kashiwagi, et al. (2005)은 횡파중의 Wigley선형과 사각 바지선형에 대한 모형시험을 수행하였으며, 상호작용 효과를 고려한 고차 경계요소법의 결과와 비교하였다.

선체 운동해석과 마찬가지로 병렬계류 해석에 대해서도 포텐셜 이론이 보편적으로 사용되고 있다. Koo and Kim (2005)은 병렬계류된 부유체의 시간영역 해석에서 유체력 계수 가운데 상호작용으로 인한 교차항이 중요하게 작용하는 것을 확인하였다. Hong, et al. (2005)은 고차 경계요소법을 사용하여 모형시험과 비교하였고, 공진이 발생하는 일부 영역을 제외하고는 대체로 일치하는 결과를 얻었다. Kim and Kim (2008)은 시간영역 3차원 랜킨 패널법(Rankine panel method)을 사용하여 병렬계류된 두

선체간의 운동과 유체력을 추정하였고, 주파수 영역의 계산결과와 비교하였다. Kim, et al. (2009)은 병렬계류 상태에서 컨테이너 하역작업시 동적거동을 추정한 바 있으며, Koo and Lee (2011)는 2차원 문풀에 대한 시간영역에서의 비선형 해석을 수행하였다.

그러나, Huijsmans, et al. (2001)이 지적인 바와 같이 포텐셜 이론은 공진 주파수에서 실험치에 비하여 과도한 값을 추정하며, 이를 억제시키기 위한 인위적인 조치가 취해지기도 한다. 감쇠판(damping lid)이나 인공 소산 계수(artificial dissipation coefficient)를 도입하여 실험과 근접한 결과를 얻을 수 있으나, 실험 결과를 얻기 전까지 인공 소산 계수의 크기를 결정하는 방법은 알려져 있지 않다 (Chen, 2004; Pauw, et al., 2007; Bunnik, et al., 2009).

이러한 포텐셜 이론과 실험과의 차이는 주로 점성이나 보텍스에 의한 영향으로 알려져 있으며 최근 이에 관한 연구결과가 보고되고 있다. Kristiansen and Faltinsen (2008)은 보텍스 추적법을 사용하여 2차원 문풀에 대한 Faltinsen, et al. (2007)의 실험결과와 비교하였고, 최근에는 유한 체적법에 기초한 영역 분할법을 사용하여 점성의 효과를 고려하였다 (Kristiansen & Faltinsen, 2012). Heo, et al. (2010)은 동일한 문풀에 대하여 점성유동장을 유한체적법으로 계산하였고, 포텐셜 이론에서와 같은 인위적인 감쇠기법을 사용하지 않고도 실험과 근접한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 그러나, CFD를 이용한 계산은 다양한 유동장 정보를 제공한다는 장점에도 불구하고, 계산시간, 격자제 의존도, 움직이는 물체에 대한 동적 해석의 어려움 등으로 인하여 병렬 배치 문제에 많이 적용되지 못하고 있다.

본 논문에서는 점성과 보텍스의 영향이 크게 작용하는 병렬배치된 2차원 선체에 대하여 수평방향과 상하방향으로 강제 조화운동을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 유한체적법에 기초한 비정상 상태의 CFD 해석을 피스톤 모드를 포함한 넓은 주파수 범위에 걸쳐 수행하였다. 자유표면과 보텍스 방출을 포함한 점성유동장을 고찰하였고, 부유체간의 상호작용으로 인한 유체력을 계산하여 정량적인 평가도 시도하였다. 이를 통해 보텍스 방출을 포함한 점성 유동장이 파고 및 유체력에 미치는 영향을 상세히 검토하고자 하였다. 또한, 병렬 배치문제에 있어서 CFD의 정확도 및 활용 가능성도 검토하였다. 제 2장에서는 지배방정식과 경계조건을 포함한 계산조건에 대하여 기술하였고, 제 3장에서는 유체력과 유동장을 포함한 시뮬레이션 결과를 고찰하였다. 끝으로 제 4장에서 본 연구를 통해 도출된 결론을 정리하였다.

2. 수치 모델링

2.1 지배방정식

본 연구에서는 점성 비압축성 유동장에서의 강제조화 운동을 다루었다. 지배방정식으로는 식 (1)과 (2)의 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\frac{\tau}{\tau} \right) + \rho \vec{g} \tag{2}$$

여기서, \vec{V} , p , ρ , \vec{g} 는 각각 속도, 압력, 밀도, 중력가속도이고, $\frac{\tau}{\tau}$ 는 식(3)과 같이 정의되는 응력텐서이다.

$$\frac{\tau}{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} I \right] \tag{3}$$

여기서, μ 와 I 는 각각 점성계수와 단위행렬을 의미한다.

운동량에 관한 지배방정식을 물리량 ψ 에 대하여 격자의 이동 속도 \vec{V}_g 로 움직이는 검사체적 V 에 대하여 적분형으로 나타내면 아래의 식 (4)와 같이 된다.

$$\int_V \frac{\partial(\rho \psi)}{\partial t} dV + \oint_S \rho \psi (\vec{V} - \vec{V}_g) \cdot d\vec{A} = \oint_S \mu \nabla \psi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\psi dV \tag{4}$$

여기서, S , \vec{A} , S_ψ 는 각각 검사표면, 면적벡터, 소스항을 가리킨다.

2.2 지배방정식의 이산화

지배방정식은 유한체적법으로 이산화된다. 대류항은 MUSCL (Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws) 방법을 사용하였고, 점성항에는 중심차분법을 사용하였다. 속도와 압력의 연성을 위하여 PISO(Pressure Implicit with Splitting of Operators) 법을 사용하였다. 자유표면은 양해법의 HRIC(High Resolution Interface Capturing) VOF(Volume of Fluid)법을 사용하여 물과 공기영역으로 정의된다. 본 연구에서는 상용 CFD 프로그램인 Fluent를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

2.3 계산 조건

본 연구에 사용된 선형은 Faltinsen, et al. (2007)이 실험에 사용한 선형과 동일하다. Fig. 1에서와 같이 2차원 사각형상의 선형으로 일정간격을 유지하고 강제 조화운동이 구현된다. 본 연구에서는 사각형 빌지 선형 외에도 흡수의 5%에 해당하는 빌지 반경을 적용한 원형 빌지 선형에 대해서 계산을 수행하여 보텍스 방출에 의한 영향을 검토하였다. 선형의 폭(B), 흡수(T)와 간극(G)은 각각 0.36m, 0.18m, 0.18m이다.

Faltinsen, et al. (2007)은 2차원 파랑수조에서 강제 상하운동을 적용하여 문풀 내부와 외부의 파고를 예측하였다. 본 연구에서는 실험에 사용된 파랑수조의 조건과 최대한 동일하게 모델링하였다. 두 개의 선체가 동일한 위상으로 강제 운동하므로 두 물체

의 중앙에 대칭조건을 적용하였다. 전체 계산영역의 길이는 대칭면으로부터 15 m이며, 실제 파랑수조와 유사한 7 m 길이의 파랑영역과 8 m에 달하는 감쇠영역으로 구성하였다. 감쇠영역에는 격자의 크기를 지수함수로 급격히 증가시켜 반사파의 영향을 최소화시켰다 (Park, et al., 1999). 감쇠영역의 끝에는 경계조건으로 정수압을 적용하였고, 속도와 VOF에는 길이방향으로의 구배를 0으로 설정하였다. 정수상태의 수심은 1.03 m로 파랑수조와 동일하며, 바닥면에는 점착(no-slip) 조건을 적용하였다.

물체는 식 (5)와 같이 상하방향과 좌우방향으로 조화운동을 한다. 두 선체의 중앙면에 대칭조건이 적용되어 있으므로 상하방향 운동에서는 두 선체가 같은 방향으로 운동하며, 좌우방향 운동에서는 상호 반대로 운동하게 된다.

$$\dot{\eta}_j = -\eta_{ja}\omega \cos(\omega t) \quad (5)$$

여기서, η_j 는 j 방향의 변위이고, j 는 2와 3으로 각각 좌우방향과 상하방향을 가리킨다. η_{ja} 는 진폭으로 실험과 동일한 0.0025 m이며, ω 는 원진동수이다. 물체의 강제 조화운동은 Fluent의 이동 격자기법인 layering 기법을 사용하여 구현하였다. 계산에 사용된 시간간격은 주기의 약 1/250에 해당하는 0.005 초를 적용하였다.

본 계산의 Rn 는 흘수를 기준으로 약 10^3 정도이므로 층류 유동으로 가정하였다. 보텍스 방출을 포함한 복잡한 간극 내부의 유동을 세밀하게 포착하기 위하여 균일한 크기의 격자를 간극내부에 분포시켰다. 격자의 최소 폭과 높이는 각각 선체 폭의 0.42%와 운동진폭의 5%로 적용하였다. 격자계 의존도를 검토하였으며, 최종적으로 파랑영역에 167,000개의 격자의 분포된 격자계를 사용하였다. 격자수에 따른 의존도는 다음 장에 정리하였다.

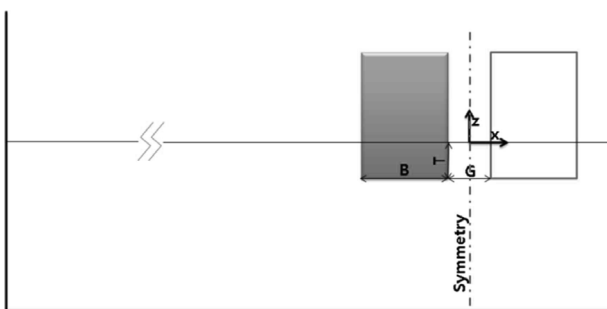


Fig. 1 Schematic view of computational domain and hull form arrangement

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 격자 의존도

계산결과의 고찰에 앞서 격자수에 따른 계산정확도를 검토하였다. 공진주기 근처에서 3개의 격자계에 대해 파고의 변화를 비교

하였다. 3개의 격자계는 감쇠영역을 포함한 전체 계산영역에 걸쳐서 각각 84,375(coarse), 116,450(medium), 176,000(fine)개의 격자를 가지고 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 3개의 격자계에서 거의 같은 크기의 파고가 발생되고 있다. 본 연구에서는 간극 내부의 유동장을 보다 정확하게 포착하기 위하여 가장 조밀한 격자계를 채택하였다.

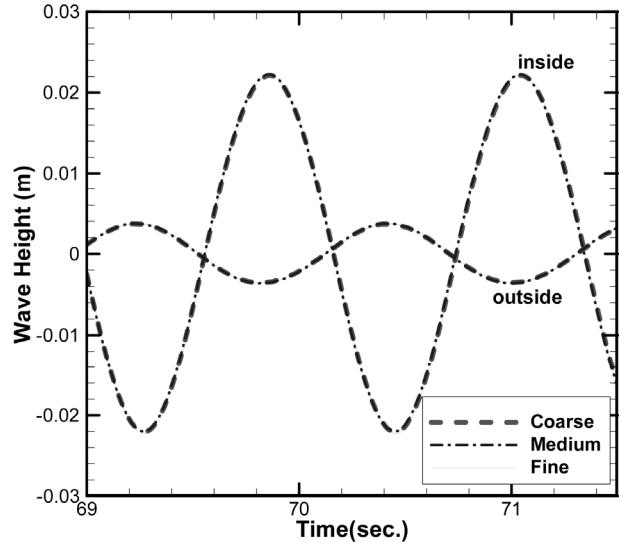


Fig. 2 Time histories of wave height inside and outside the gap near resonance frequency in forced heave motion $\omega^2 G/g=0.5180$

3.2 자유 표면

식 (5)에 의한 강제운동을 피스톤 모드를 포함할 수 있는 여러 주기에 대하여 80초까지 수행하였다. 60초 이후에는 모든 계산에서 주기적으로 정상상태에 수렴된 파고, 유체력 등을 얻을 수 있었다. 본 논문에서는 60초 이후 얻어진 계산 결과를 사용하였다.

CFD 계산의 정확도를 확인하기 위하여 Fig. 3에서와 같이 간극 내부(W_{in})와 외부(W_{out})의 파고를 실험결과 및 선형포텐셜 이론의 결과와 비교하였다. 간극 내부는 대칭조건이 적용된 간극의 중앙에서 계측되었으며, 간극외부는 물체로부터 700 mm 떨어진 위치에서 계측되었다. Faltinsen, et al. (2007)의 실험과 선형 포텐셜 해석은 모두 사각형 빌지 선형에 대한 결과이다.

사각형 빌지 선형에 대한 본 CFD 계산결과는 피스톤 모드를 포함한 공진주기를 Fig. 3에서와 같이 잘 추정하고 있다. 또한, 정량적으로도 모형실험 결과에 근접한 값을 보여주고 있다. 이에 비해 선형 포텐셜 계산결과는 공진주파수에서 실험결과에 비하여 매우 과대한 결과를 보여주고 있다. 사각형 빌지 선형에 대한 결과임에도 불구하고, 심지어 원형 빌지 선형에 대한 CFD 해석 결과보다도 큰 결과를 주고 있다.

원형 빌지 선형의 경우에는 사각형 빌지 선형에 비하여 공진주파수 주위에서 파고가 더 높게 나타나고 있다. 공진주파수에서 멀리 위치한 주파수들에서는 빌지 형상에 의한 차이가 미미

하나, 공진주파수 주위에서는 그 차이가 급격히 증가하고 있음을 볼 수 있다.

좌우운동에서도 상하운동과 동일한 경향을 보여주고 있다. 상하운동과 동일한 주파수에서 공진이 발생하고 있으며, 원형과 사각형 빌지형상의 차이도 공진주파수 근처에 집중되고 있다. 파고의 높이는 상하운동에서 더 높게 나타나고 있다.

3.3 유체력

인접한 물체가 있는 경우 물체간에는 상호작용이 발생하여 강제 운동 모드 이외의 유체력이 발생하게 된다. Fig. 4에는 강제운동으로 인한 유체력을 나타내었다. 유체력은 $\rho g T G$ 로 무차원화하였다. 파고와의 비교를 위하여 Fig. 3의 파고의 RAO를 검색적으로 포함시켰다.

빌지반경으로 인한 영향은 파고에서 확인된 것과 거의 동일하

게 나타나고 있다. 좌우방향과 상하방향 모두 같은 주파수에서 공진이 발생하고 있으며, 원형 빌지 선형에서 더 큰 유체력이 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 앞절에서 다루었던 자유수면의 높이와 같이 상하운동보다는 좌우방향의 운동에서 더 큰 힘이 발생하고 있다. 상하방향의 강제운동에서는 상하방향의 힘보다 좌우방향의 힘이 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 좌우방향의 운동에서도 좌우방향의 힘이 상하방향의 그것보다 더 크게 나타났으며, 두 힘간의 차이가 더 증가되었다. 이 때 그 힘들간에는 크기의 차이는 존재하나, RAO의 경향은 거의 동일하게 나타나고 있다. 또한, 여기에 파고의 RAO까지 같이 비교할 경우 공진주파수의 발생 위치를 포함한 RAO의 전체적인 경향이 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 이러한 상사성은 상하방향 뿐만 아니라 좌우방향의 운동에서도 동일하게 나타나고 있다. 이로부터 자유표면의 거동과 유체력간에는 매우 밀접한 관련이 있음을 알 수 있으며, 유체력의 추정을 위해 자유표면의 정확한 추정이 필요할 것으로 예상할 수 있다.

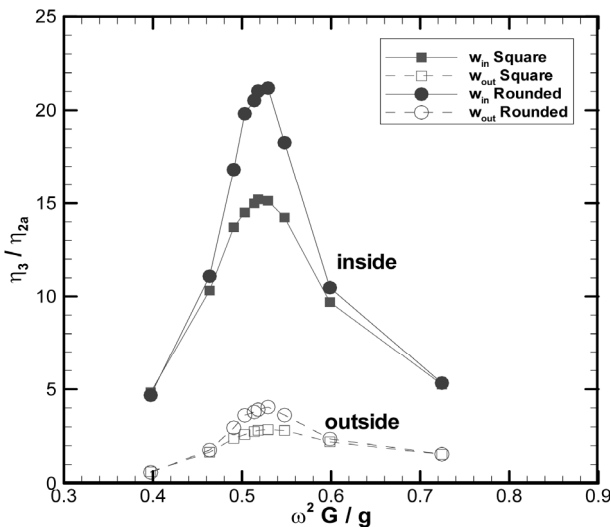
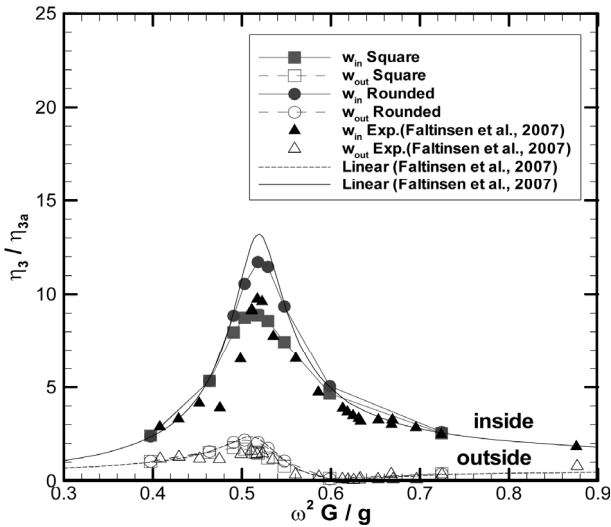


Fig. 3 Wave elevation inside and outside the gap (top: heave motion; bottom: sway motion)

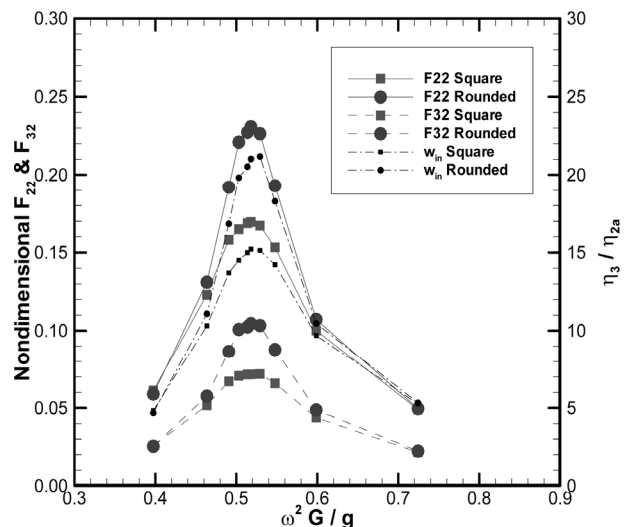
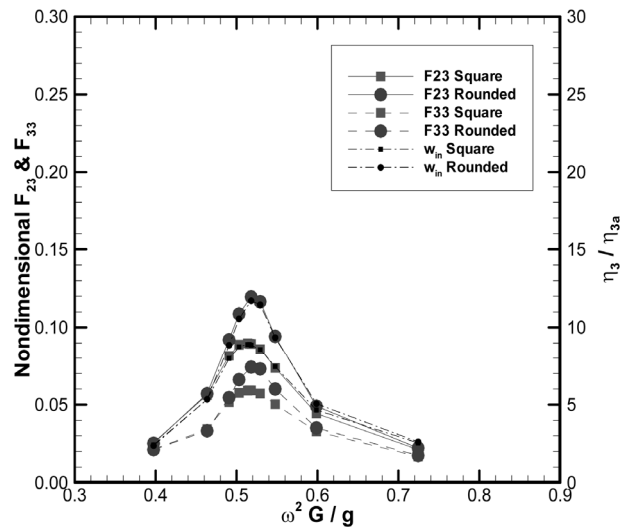


Fig. 4 RAOs of sway and heave force (top: heave motion; bottom: sway motion)

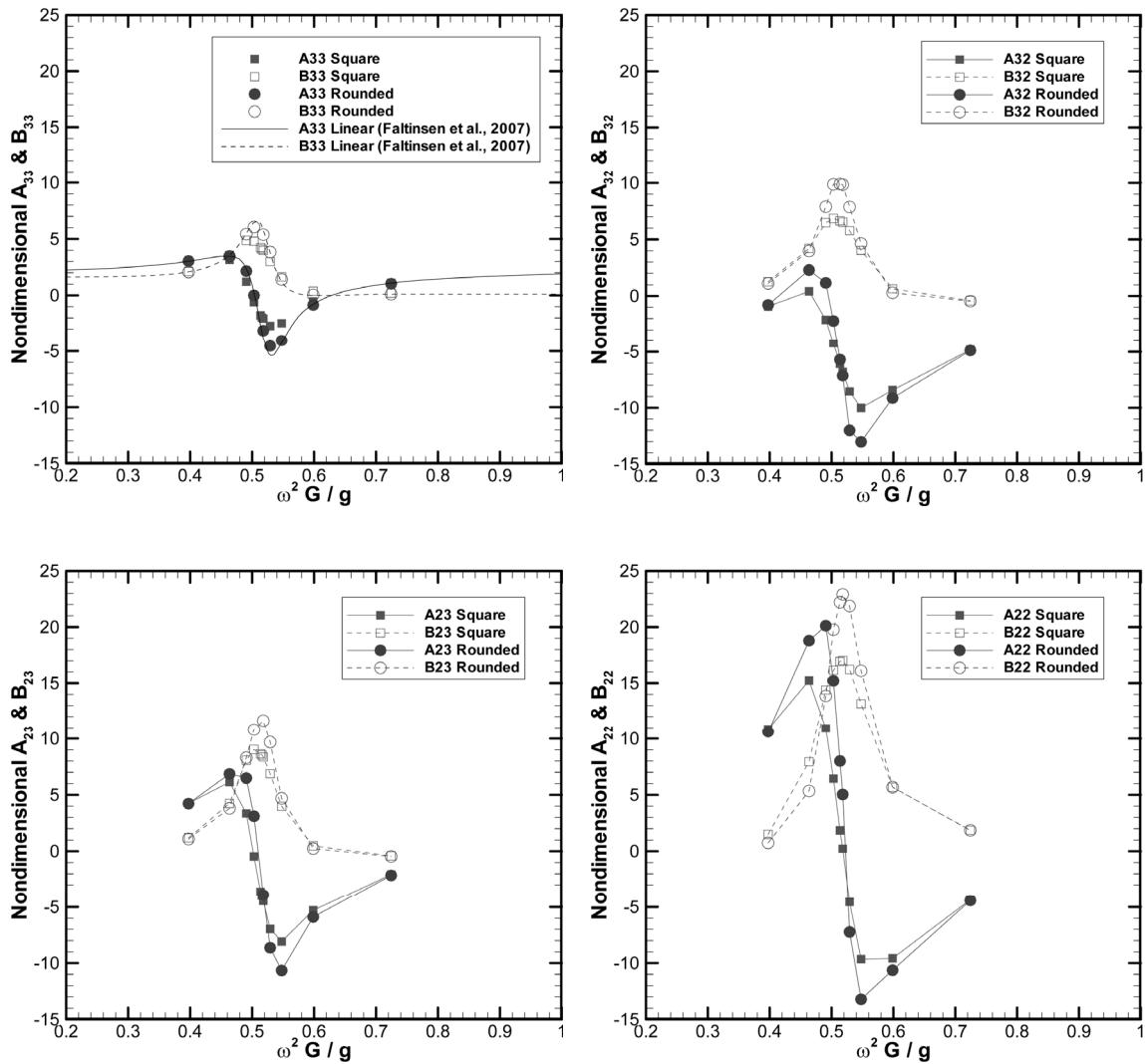


Fig. 5 Added mass and damping coefficients (left: heave motion; right: sway motion)

Fig. 5는 교차성분을 포함한 부가질량과 감쇠계수를 보여주고 있다. 여기서, 부가질량과 감쇠계수는 각각 ρG^2 과 $\rho G^2 \sqrt{gG}$ 으로 무차원화된 값이다.

유체력 계수의 크기는 유체력의 크기에 비례해서 나타나고 있다. 빌지 형상의 영향도 유체력에서와 동일하게 원형 빌지의 유체력 계수가 크게 나타나고 있다.

교차성분을 포함한 4가지 부가질량 모두 공진주기 주위에서 증가한 후 급격히 음의 값으로 감쇠하는 피스톤 모드의 전형적인 특징을 잘 보여주고 있다. 감쇠항 역시 공진주기 근처에서 급격히 상승한 후 고주파 영역에서 0으로 수렴하는 피스톤 모드의 경향을 잘 보여주고 있다.

Faltinsen, et al. (2007)의 선형 포텐셜 해석 결과에서는 A33과 B33이 본 점성유동 해석 결과보다 크게 나타나고 있다. 이것은 Fig. 3의 파고 비교에서도 확인할 수 있었던 것처럼, 포텐셜 이론이 간극 유동문제에서 일반적으로 보여주는 과다추정의 사례로 판단된다. 이에 비해 본 CFD 해석결과는 파고에서의 실험 대

비 정확도 및 파고와 유체력과의 상사성으로 미루어 볼 때 포텐셜 결과보다는 타당한 결과로 판단된다.

3.4 점성 유동장

전 절에서 선형에 따라 파고 및 유체력에 차이가 발생함을 확인하였다. 이에 대한 원인을 유동장 분석을 통해 파악하고자 하였다. Fig. 6은 상하운동에서 얻어진 와도(vorticity)의 분포를 보여주고 있다. 사각형 빌지 선형에서는 끝단에서 강한 보텍스가 방출되고 있으며, 방출 후에는 시계방향으로 문폴 내부로 이동하며 점차 소멸되고 있다. 이에 비해 원형 빌지 선형에서는 끝단 주위에서 약한 강도의 보텍스가 방출되고 있어서 사각형 빌지 선형에서와 같이 간극 내부를 방출된 보텍스로 채우지 못하고 있다. 즉, 원형 빌지 선형에서는 간극내 액체가 매우 자유롭게 상하운동을 하고 있으나, 사각형 빌지 선형에서는 끝단에서 강한 보텍스가 방출되고, 이들이 간극 내부를 회전하면서 간극 내부 액체의 상하운동을 억제시키게 된다.

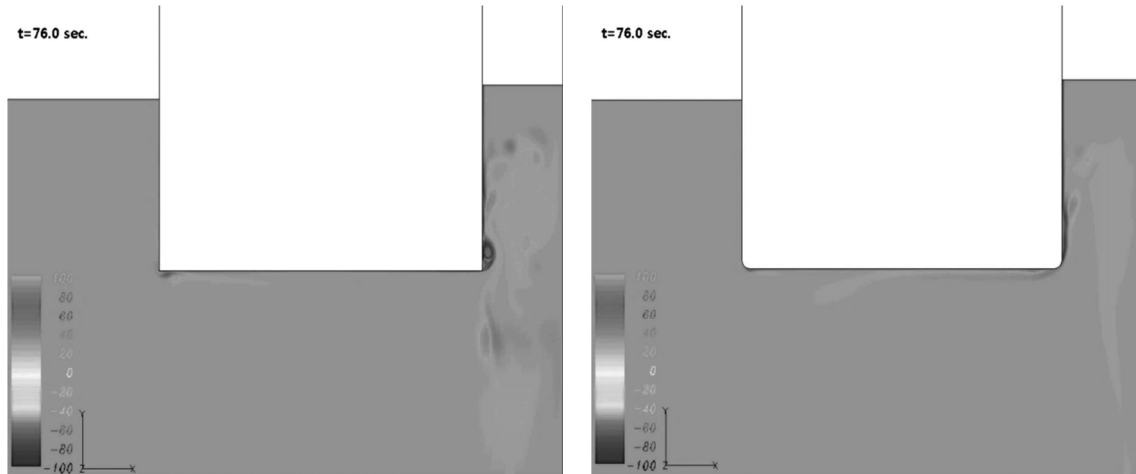
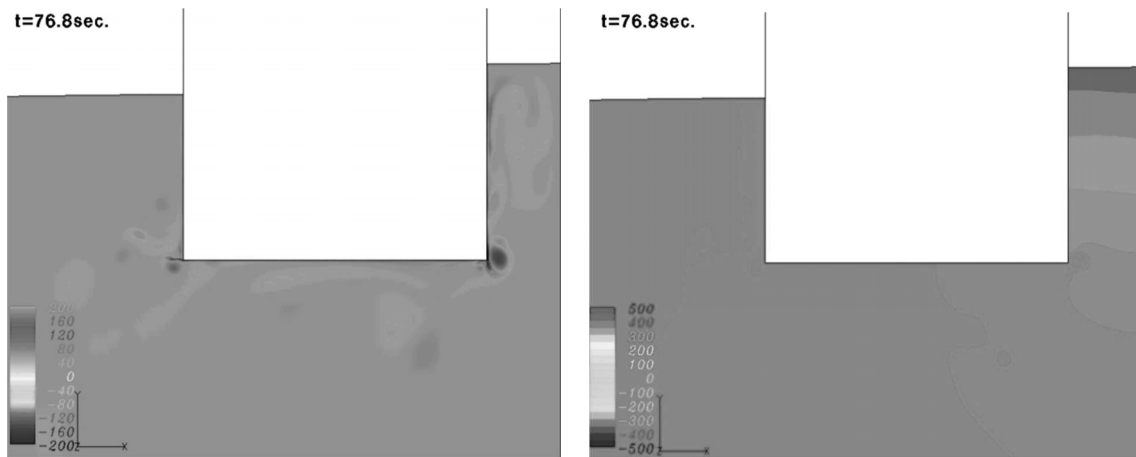
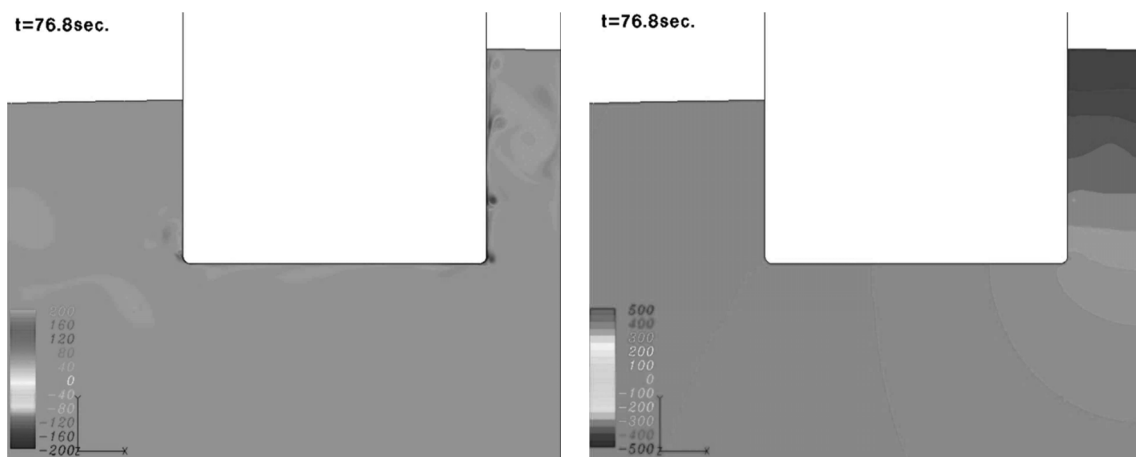


Fig. 6 Vorticity contours around square(left) and rounded(right) corners under forced heave motion at $\omega^2 G/g=0.5292$



(a) Square corner



(b) Rounded corner

Fig. 7 Vorticity(left) and pressure(right) contours around square and rounded corners under forced sway motion at $\omega^2 G/g=0.5292$

또한, 두 선형 모두 벽면에서 약한 와도가 존재하고 있으며, 벽면에서의 마찰력도 감쇠력으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 좌우 운동에서의 와도분포를 보여주고 있다. 사각형

빌지 선형에서는 강한 보텍스가 끝단에 부착되어 있고, 선체 벽면에는 이전 주기에 방출된 보텍스의 흔적이 매우 약하게 남아 있다. 이에 비해 원형 빌지 선형에서는 빌지 끝단에서의 보텍스

의 크기와 강도가 사각형 빌지에서의 그것들에 비하여 매우 작으며, 이전 주기에서 방출된 보텍스들이 선체를 따라 자유표면쪽으로 방출되어 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 원형 빌지 선형에서 생성되는 끝단 보텍스의 강도는 간극내 액체의 운동을 억제할 수 있을 만큼 충분히 크지 못하며, 액체의 상하 운동에 의해 그대로 자유표면까지 흘러 올라가게 된다. 이로 인해 자유표면과 보텍스의 상호작용도 발생하고 있으며, 유동장도 복잡하게 나타나고 있다. 결국, 상하운동에서와 마찬가지로 빌지 끝단에서 생성되는 보텍스의 크기와 강도가 간극 내부 유체의 운동을 좌우하고 있음을 알 수 있다.

보텍스로 인한 감쇠력의 차이는 압력장에도 영향을 주고 있으며, 그차이를 압력분포로부터 확인할 수 있다. 간극내 파고가 거의 최고위에 달한 시점에서의 압력분포이다. 보텍스로 인한 감쇠가 미미한 원형 빌지 선형에서의 압력분포가 사각형 빌지선형에서의 압력보다 높게 나타나고 있다. 이로 인하여 좌우방향과 상하방향 유체력 모두 원형 빌지 선형에서 높게 나타나게 된다.

병렬배치된 선체 사이의 간극 유동에서는 선박의 횡동요에서와 같이 보텍스로 인한 감쇠력이 매우 중요한 역할을 하고 있는 것으로 확인되었다. 보텍스의 감쇠력이 파고와 유체력에 그대로 전달되어 나타나고 있으며, 파고에 대한 추정 정확도로 미루어 볼 때 CFD 해석이 간극유동을 잘 추정하고 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

이동 격자 기법을 이용하여 병렬 배치된 2차원 선형에 대하여 강제 조화운동을 CFD를 이용하여 시뮬레이션 하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

CFD 해석이 포텐셜 이론에 비하여 모형시험과 비교적 잘 일치하는 파고를 추정하였다. 포텐셜 해석이 비물리적으로 과도한 파고를 억제하기 위하여 인위적인 조치를 사용하는 것에 비하여, CFD는 특별한 수치기법을 사용하지 않은 상태에서 타당한 결과를 얻을 수 있었다.

유체력과 파고 사이에 매우 밀접한 관련이 있음을 확인하였다. 파고와 유체력 RAO간에 상사성이 존재하고 있으며, 이러한 상사성을 토대로 유체력 등에 대한 CFD 결과의 실용적인 활용도가 가능할 것으로 기대된다.

본 연구에 사용된 선형에서는 보텍스로 인한 감쇠력이 지배적인 것으로 나타났으며, CFD가 보텍스 감쇠 현상을 잘 포착할 수 있음을 확인하였다. 또한, 자유표면을 포함한 유동장의 정보를 통해 보텍스를 이용한 유동제어까지도 가능할 수 있을 것으로 예상된다.

향후, 보다 많은 실험결과 및 포텐셜 이론과의 비교가 필요하며 이러한 과정을 통해 CFD가 병렬배치 문제에 기여할 수 있기를 기대한다.

참고 문헌

Aalbers, A.B., 1984. The Water Motions in a Moonpool. *Ocean Engineering*, 11(6), pp.557-579.

Bunnik, T. Pauw, W. & Voogt, A., 2009. Hydrodynamic Analysis for Side-By-Side Offloading. *11th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan.

Chen, X.-B., 2004. Hydrodynamic in Offshore and Naval Applications – Part I. *a key note lecture in the 6th International Conference on Hydrodynamics*, Perth, Australia.

Faltinsen, O.M. Rognebakke, O.F. & Timokham, A.N., 2007. Two-Dimensional Resonant Piston-like Sloshing in a Moonpool. *Journal of Fluid Mechanics*, 575, pp.359-397.

Fukuta, K., 1977. Behavior of Water in Vertical Well with Bottom Opening of Ship and its Effects on Ship-Motion. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 141, pp.107-122.

Heo, J.K. Park, J.C. Koo, W.C. & Kim, M.H., 2010. Numerical Analysis of a Floating Body with Two-Dimensional Moonpool Including Piston Mode. *29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Shanghai, China.

Hong, S.Y. Kim, J.H. Kim, H.J. & Choi, 2002. Experimental Study on Behavior of Tandem and Side-by-side Moored Vessels. *12th International Offshore and Polar Engineering*, Kitakyushu, Japan.

Hong, S.Y. et al., 2005. Numerical and Experimental Study on Hydrodynamic Interaction of Side-by-Side Moored Multiple Vessels. *Ocean Engineering*, 32(7), pp.783-801.

Huijsmans, R.H.M. Pinkster, J.A. & de Wilde, J.J., 2001. Diffraction and Radiation of Waves around Side by Side Moored Vessels. *11th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Stavanger, Norway.

Kodan, N., 1984. The Motions of Adjacent Floating Structures in Oblique Waves. *3rd International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, pp.206-213.

Kashiwagi, M. Endo, K. & Yamaguchi, H., 2005. Wave Drift Forces and Moments on Two Ships Arranged Side by Side in Waves. *Ocean Engineering*, 32(5-6), pp.529-555.

Kristiansen, T. & Faltinsen, O.M., 2008. Application of a Vortex Tracking Method to the Piston-like Behaviour in a Semi-Entrained Vertical Gap. *Applied Ocean Research*, 30(1), pp.1-16.

- Kristiansen, T. & Faltinsen, O.M., 2012. Gap Resonance Analyzed by a New Domain-decomposition Method Combining Potential and Viscous Flow DRAFT. *Applied Ocean Research*, 34, pp.198-208.
- Kim, K.-H. & Kim, Y., 2008. Time-Domain Analysis of Motion Responses of Adjacent Multiple Bodies in Waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(1), pp.63-72.
- Kim, Y.-B. Kim, M.-H. & Kim, Y.-Y., 2009. Dynamic Analysis of Floating Bodies Considering Multi-body Interaction Effect. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(6), pp.659-666.
- Koo, B.J. & Kim, M.H., 2005. Hydrodynamic Interactions and Relative Motions of Two Floating Platforms with Mooring Lines in Side-by-Side Offloading Operation. *Applied Ocean Research*, 27, pp.292-310.
- Koo, W.C. & Lee, K.R., 2011. Flow Analysis of Two-Dimensional Floating Body with Moon Pool Using a Numerical Wave Tank. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(2), pp.107-112.
- Molin, B., 2001. On the Piston and Sloshing Modes in Moonpools. *Journal of Fluid Mechanics*, 430, pp.27-50.
- Park, J.C. Kim, M.H. & Miyata, H., 1999. Fully Non-linear Free-Surface Simulations by a 3D Viscous Numerical Wave Tank. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 29(6), pp.685-703.
- Pauw, W.H. Huijsmans, R.H.M. & Voogt, Arjan., 2007. Advances in the Hydrodynamics of Side-by-side Moored Vessels. *26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, San Diego, USA.

