

방현재와 계류삭 효과를 고려한 부유체의 상대운동 모사

신 상 목*

부경대학교 조선해양시스템공학과

SIMULATION OF RELATIVE MOTION OF FLOATING BODIES INCLUDING EFFECTS OF A FENDER AND A HAWSER

Sangmook Shin*

Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University

A developed code is applied to simulate relative motion of floating bodies in a side-by-side arrangement, including effects of a fender and a hawser. The developed code is based on the flux-difference splitting scheme for immiscible incompressible fluids and the hybrid Cartesian/immersed boundary method. To validate the developed code for free surface flows around deforming boundaries, the water wave generation is simulated, which is caused by bed movement. The computed wave profile and time histories of wave elevation are compared with other experimental and computational results. The effects of a fender and a hawser are modeled by asymmetric force acting on the floating bodies according to a relative displacement with the bounds, in which the fender and the hawser exert no force on the bodies. It has been observed that the floating body can be accelerated by a gap flow due to a phase difference caused by the free surface. Grid independency is established for the computed time history of the body velocity, based on three different size grids.

Key Words : 부유체(Floating body), 병렬배치(Side-by-side arrangement), 상대운동(Relative motion), 방현재(Fender), 계류삭(Hawser), 비압축성 자유표면 유동(Incompressible free surface flow)

1. 서 론

해상에 계류된 FPSO(Floating Production Storage and Offloading) 주위에서 원유나 LNG 등을 적재하는 선박의 경우 등 병렬 배치된 부유체들의 운동 해석은 여러 연구자들에 의해 보고되어 왔다. Koo and Kim[1]은 포텐셜 유동 해석과 계류삭 장력이 고려된 강성 행렬을 이용하여 병렬 배치된 부유체 운동 해석을 수행하였다. Hong et al.[2]은 고차 경계요소법을 이용하여 병렬 배치된 부유체들의 운동 해석을 수행하고 실험 결과와 비교하였다. Heo and Park[3]은 상용 프로그램 Fluent의 이동 격자 기법을 이용하여 병렬 배치된 2차원 단면 주위의 점성 유동 해석 결과를 보고하였다. 그러나 움직이거나 변형하는 물체 주위 점성 자유표면 유동 해석은 아직 어

려 가지 어려움을 야기한다.

Shin et al.[4]은 FDS 기법과 HCIB 법을 이용하여 움직이거나 변형하는 물체 주위 비압축성 자유표면 유동 해석에 적합한 새로운 기법을 제안하였다. 이 방법에서 자유표면은 밀도가 다른 비압축성 유동장 내부에 존재하는 움직이는 접촉 불연속면으로 간주된다. 종속변수 분포에 불연속이 발생하는 자유표면 주위에서 근사화된 Riemann 문제의 해를 이용하는 FDS 기법[5]을 이용하여 질량 및 운동량 유량을 추정함으로써 추가적인 처리 없이 자유표면을 강건하게 포착한다. 움직이거나 변형하는 물체 경계 조건 처리를 위해 경계 비정합(non-boundary conforming) 기법의 일종인 HCIB 법[6]을 사용한다. HCIB 법은 가상경계법과 달리 계산 영역이 순간 유체 영역의 부분 집합이 되도록 함으로써 물체의 두께가 배후 격자계보다 얇아도 물체 경계가 정확히 표현되며 Euler 방정식 해석이 용이하다는 등의 장점을 갖고 있다. 개발된 FDS-HCIB 코드는 수중의 주위 수면파, Rayleigh-Taylor 불안정성 및 비정상 조파기 주위 비점성 유동 등 다양한 경우에 대해 보고된 실험 및 계산 결과들과의 비교를 통한 검증이 수행된 후 구

Received: November 17, 2014, Revised: January 7, 2015,
Accepted: January 8, 2015.

* E-mail: smshin@pknu.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.1.001>

© KSCFE 2015

형 탱크 내부의 급격한 3차원 슬로싱[4], 탄성 썩기의 수면 입수에 대한 유탄성 해석[7] 및 전진하면서 동요하는 물체 주위 내면과 해석[8,9] 등에 적용되었다.

본 연구에서는 개발된 FDS-HCIB 코드가 방현재와 계류삭의 영향이 고려된 부유체의 상대 운동을 모사하기 위해 확장되었다. 상대 운동하는 물체 경계면 주위 자유표면 유동에 대한 추가적 검증으로서 바닥면 상승에 따른 수면과 전파를 모사하고 계산된 결과들을 다른 실험 및 계산 결과들과 비교하였다. 두 부유체 사이에 부착된 방현재와 계류삭 효과를 모사하기 위한 모델링을 제안하고 이를 적용하여 부유체의 유체-구조 연성 해석을 수행하였다.

2. 수치해석 기법

개발된 FDS-HCIB 코드에 사용된 수치해석 기법들은 Shin et al.[4,8]에 자세히 보고되어 있다. 영역 내부에 종속 변수들의 불연속적 변화를 허용하기 위해, 비압축성 유체의 질량 및 운동량 보존과 각 유체들의 비압축성 조건은 다음과 같이 적분 형태로 표현되었다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} Q d\Omega + \oint_S (F_{inv} - F_{vis}) dS = \int_{\Omega} B d\Omega \quad (1)$$

$$Q = [\rho, \rho u_i, 0]^T \quad (2)$$

$$F_{inv} = [\rho\theta, \rho u_i \theta + p n_i, \theta]^T \quad (3)$$

$$F_{vis} = [0, \tau_{ij} n_j, 0]^T \quad (4)$$

$$B = [0, -\rho g \delta_{i3}, 0]^T \quad (5)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, u_i 는 각 방향 속도 성분, θ 는 검사 표면에서의 법선속력, p 는 압력, n_i 는 검사표면의 법선벡터 성분, τ_{ij} 는 점성응력 텐서, g 는 중력가속도, Ω 는 검사체적, S 는 검사표면이다. 지배방정식의 마지막 식은 각 유체들의 비압축성 조건을 강제한다.

자유표면은 유동장 내부의 움직이는 접촉 불연속면으로 간주되었으며 추가적인 처리 없이 식 (1)에 의해 포착되었다. 자유표면에서 밀도의 불연속에도 불구하고 각 유체들에 대한 비압축성 조건이 자유표면에서 법선 속도의 연속을 강제하며 이에 따라 운동량 보존식으로부터 자유표면에서 압력의 연속이 보장된다. 따라서 종속 변수의 불연속에도 불구하고 식 (1)의 유량(flux)들이 타당하게 계산되면 추가적인 처리 없이 자

유표면에서 요구되는 물리적 조건들의 만족이 보장된다.

불연속면 주위에서 비점성 유량을 계산하기 위해 물리적 시간단계마다 가상시간에 대한 의사압축성을 도입하여 쌍곡선(hyperbolic) 문제를 형성하고 근사화된 Riemann 해를 이용하는 FDS 기법을 적용하였다. 본 연구에서 사용된 Roe의 가중평균 변수들과 고유벡터 및 고차의 정도 유지를 위한 종속 변수 재구성 등은 Shin et al.[4]에 자세히 보고되어 있다.

지배 방정식은 격자 조밀도가 조절된 Cartesian 배후 격자계에서 이산화되었으며 움직이거나 변형하는 물체 경계는 매 순간 위치 및 속도 벡터가 주어지는 물체 표면 위의 Lagrangian 제어점들의 집합으로 표현되었다. 순간 계산 영역의 경계는 물체 경계 주위 절점들 중 유체 영역 내부 절점인 가상경계절점들에 의해 정의된다. 배후 격자계의 국부 간격보다 얇은 물체 형상도 정확히 표현이 가능하게 하고 항상 닫힌 계산 영역이 정의되도록 하기 위하여 물체 표면과 접촉하는 배후 격자계의 선분 요소를 기준으로 한 가상경계절점 분류 방법이 적용되었다[10].

매 순간 물체 주위에 분포된 가상경계절점들마다 그 절점을 지나면서 물체 표면과 수직으로 만나는 국부법선이 부여된다. 국부법선을 유동장 방향으로 연장하여 배후격자계의 선 요소와 만나는 점을 찾는다. 국부법선의 물체 표면 위의 접점에서의 속도 벡터는 그 접점에서 인접한 Lagrangian 제어점들에서 주어진 속도 벡터들을 보간하여 추정한다. 국부법선의 유동 영역쪽 접점에서의 종속변수들은 접하는 배후 격자계 선 요소 양쪽 절점에서 가상시간 단계마다 갱신되는 종속 변수들을 이용하여 보간한다.

가상경계절점을 관통하여 물체 표면과 수직으로 만나는 국부법선의 양쪽 접점들에서 종속변수들이 추정되면 가상경계절점에서 양쪽 접점들과의 거리들과 국부법선을 따라 가정된 종속변수의 변화 형태를 이용하여 가상경계절점에서의 종속 변수들을 추정한다. 본 연구에서 밀도는 유동장으로부터 외삽되었으며 속도는 가상경계절점 주위에서 선형적 변화를 가정하였다. 압력의 경우 정수력학적 압력을 제거한 압력을 유체 영역으로부터 외삽한 후 중력 방향의 높이차에 따른 정수력학적 효과를 보정하였다.

3. 용기하는 해지면 주위 자유표면 유동

개발된 FDS-HCIB 코드에 대해 상대적 변화가 있는 경계면 주위 자유표면 유동해석의 추가적인 검증 예로서 해지면 용기에 따른 비정상 자유표면 유동을 모사하고 계산된 결과를 다른 실험 및 계산 결과들과 비교하였다. Fig. 1은 이 문제에 대한 개략도이다. 이 문제에 대해 Hammack and Segur[11]은 수조 모형실험 결과와 Korteweg-de Vries 방정식 해석결과

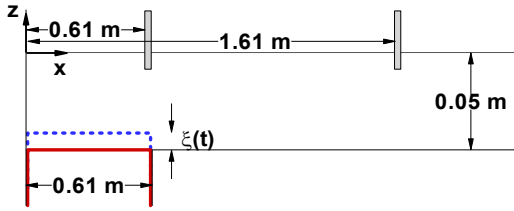


Fig. 1 Schematic diagram of bed movement

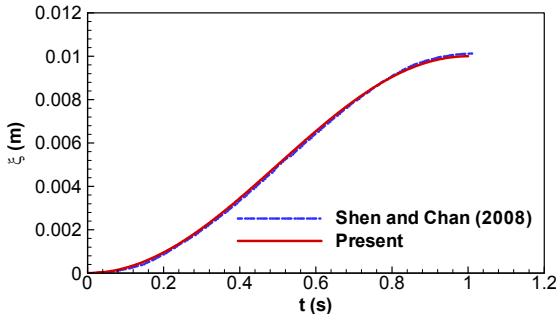


Fig. 2 Comparison of time histories of upward bed motion

를 비교하였으며 Shen and Chan[12]은 VOF 및 가상경계법을 이용한 해석결과를 보고하였다.

실험에서 수조의 길이는 15 m이고 수심은 0.05 m이다. 수조의 왼쪽에는 시간에 따라 변위 $\xi(t)$ 로 상하방향으로 움직이는 폭 0.61 m의 실린더가 위치한다. 수조의 왼쪽 벽으로부터 각각 0.61 m, 1.61 m 떨어진 지점에서 파고의 시간 이력 이 보고되어 있다. 본 연구에서 계산 영역은 $0 m < x < 20 m$, $-0.05 m < z < 5 m$ 이고 좌표축의 원점은 수조의 왼쪽 벽면과 초기 수면의 교점에 위치한다. 움직이는 벽면 주위에서 수평 격자의 최소 간격은 0.025 m이고 점차 증가시켜 0.075 m가 되면 이후 $x < 15 m$ 까지 수면과 포착을 위해 일정하게 유지된 후 나머지 계산영역에서 다시 증가되었다. 수직 방향의 경우 자유표면 및 바닥면에서 최소 격자 간격은 0.0005 m로 주어졌으며 그 외의 영역에서는 연속적으로 증가되었다. 생성된 배후 격자계에는 수평 및 수직 방향으로 각각 204개 및 123개의 절점들이 분포되었다. 본 계산에서 가정된 바닥면 변위의 시간 이력은 다음과 같다.

$$\xi(t) = \xi_0/2[1 - \cos(\pi t/t_c)], \quad 0 \leq t \leq t_c \quad (6)$$

실험에서의 동일하게 ξ_0 와 t_c 는 각각 0.1 m 및 1 s로 주어졌으며 $t = t_c$ 이후 바닥면의 변위는 ξ_0 로 일정하게 유지된다. Fig. 2에서는 본 계산에서 가정된 바닥면 운동의 시간 이력이 Shen and Chan[12]에서 가정된 변위와 비교되었으며 두 변위

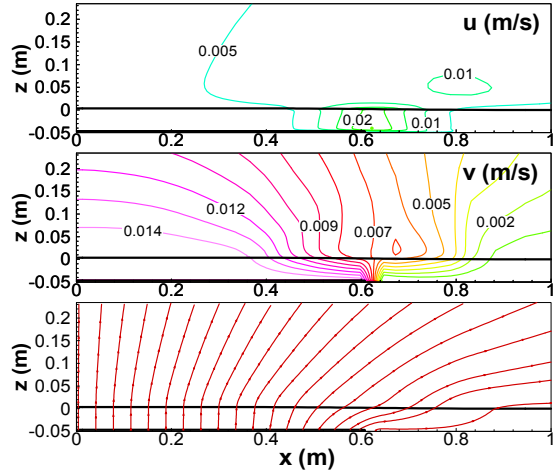


Fig. 3 Horizontal and vertical velocity contours, and streamlines around a moving bed, at $t = 0.4 s$; $-0.2 m/s < u < 0.08 m/s$, $\Delta u = 0.005 m/s$; $-0.01 m/s < v < 0.015 m/s$, $\Delta v = 0.001 m/s$

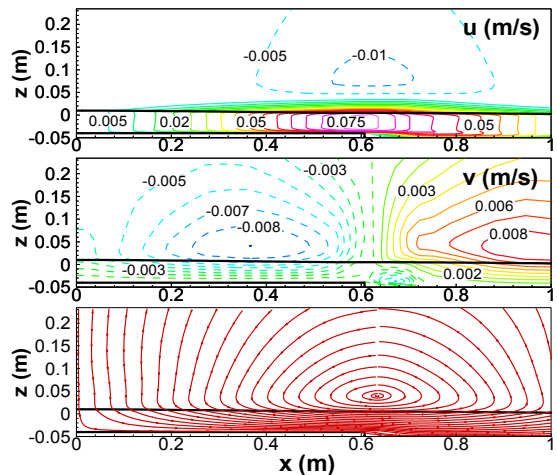


Fig. 4 Horizontal and vertical velocity contours, and streamlines around a moving bed, at $t = 1.0 s$; $-0.2 m/s < u < 0.08 m/s$, $\Delta u = 0.005 m/s$; $-0.01 m/s < v < 0.015 m/s$, $\Delta v = 0.001 m/s$

들이 거의 동일함을 확인할 수 있다. 용기하는 바닥면 상부 및 측면에는 각각 100개 및 50개의 Lagrangian 절점들이 고르게 분포되었으며 각 Lagrangian 절점들의 위치 및 속도는 식 (6)에 의해 계산되었다.

Fig. 3-4는 바닥면 용기 속도가 최대치에 가까워지는 $t = 0.4 s$ 와 바닥면이 정지하는 순간인 $t = 1 s$ 에서의 등속도선과 순간 유선 분포를 보여준다. 바닥면이 상승하는 과정 동안 바닥면 주위에서는 일정하게 수직 상승하는 유동이 지배적이며 용기부 끝단 주위에서는 바깥쪽으로 밀려나는 유동이 형성될 수 관찰할 수 있다. $t = 0.4 s$ 및 $1 s$ 의 유동장 비교로부터 수

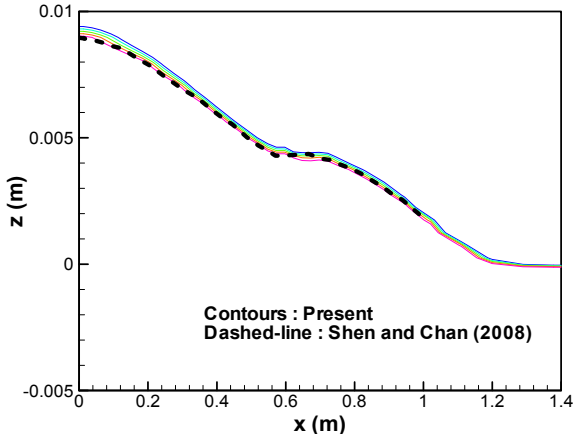


Fig. 5 Comparison of computed wave elevation near a moving bed, at $t = 1.0$ s

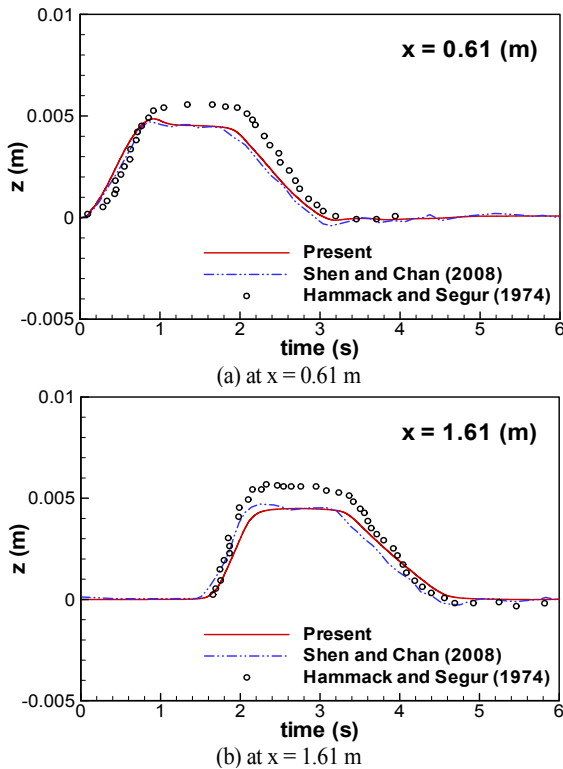


Fig. 6 Comparison of time histories of wave elevation

평 속도의 경우 바깥으로 밀려나는 유동이 계속 강해지지만 수직 속도는 바닥면이 정지하는 순간 이미 용기부 끝단 왼쪽과 오른쪽에서 각각 하강 및 상승하는 형태로 변해 있음을 관찰할 수 있다. $t = 1$ s에서의 이러한 유동은 용기부 끝단 해수면 근처에 중심을 둔 큰 와류 형태의 유동을 형성한다.

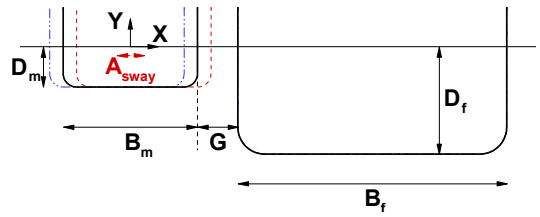


Fig. 7 Schematic diagram of two floating bodies under relative motion

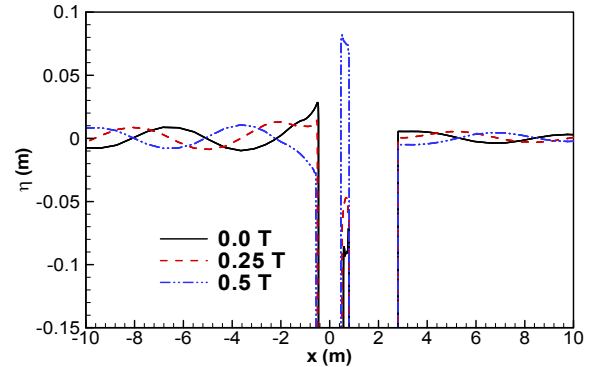


Fig. 8 Comparison of wave profiles around two floating bodies under relative motion, at $t = 0T, 0.25T, \text{ and } 0.5T$

수면 근처에서의 수직 및 수평 속도 분포의 비교로부터 수직 속도는 부드러운 변화를 보이나 매질 경계면에 대한 접선 속도에 가까운 수평 속도의 경우 급격한 변화가 포착되어 있음을 관찰할 수 있다.

Fig. 5에서는 바닥면 용기가 끝나는 순간인 $t = 1$ s에서 계산된 자유표면 형상을 Shen and Chan[12]에 의해 보고된 결과와 비교하였다. 바닥면 용기가 짧은 시간 동안 이루어지는 경우에 흔히 가정되는 형태인 순간 바닥면과 유사한 형태의 수면파와는 다르게 용기부 끝단까지 수면은 완만히 하강하여 끝단 주위에서 평탄부를 형성한 후 다시 원래의 수심까지 완만히 하강하는 형태이며 이러한 수면 형상은 그림에서 점선으로 표시된 Shen and Chan[12]의 결과와 거의 일치함을 확인할 수 있다.

Fig. 6에서는 $x = 0.61$ m 및 1.61 m에서 계산된 파고의 시간 변화들이 Shen and Chan[12]의 계산 결과(이점쇄선) 및 Hammack and Segar[11]의 실험 결과(기호)와 비교되었다. 그림에서 두 계산 결과들은 해저면 용기에 의해 생성되어 전파된 수면파의 파고를 실험 결과보다 다소 작게 예측하고 있음을 볼 수 있다. Shen and Chan[12]은 이러한 불일치에 대한 주요 원인으로 바닥면 변위의 시간 이력에 포함된 불명확성으로 추정하였다. Fig. 2에서 확인되는 바와 같이 바닥면 변위의 시간 이력이 거의 동일한 두 계산의 경우 계산된 파고 변

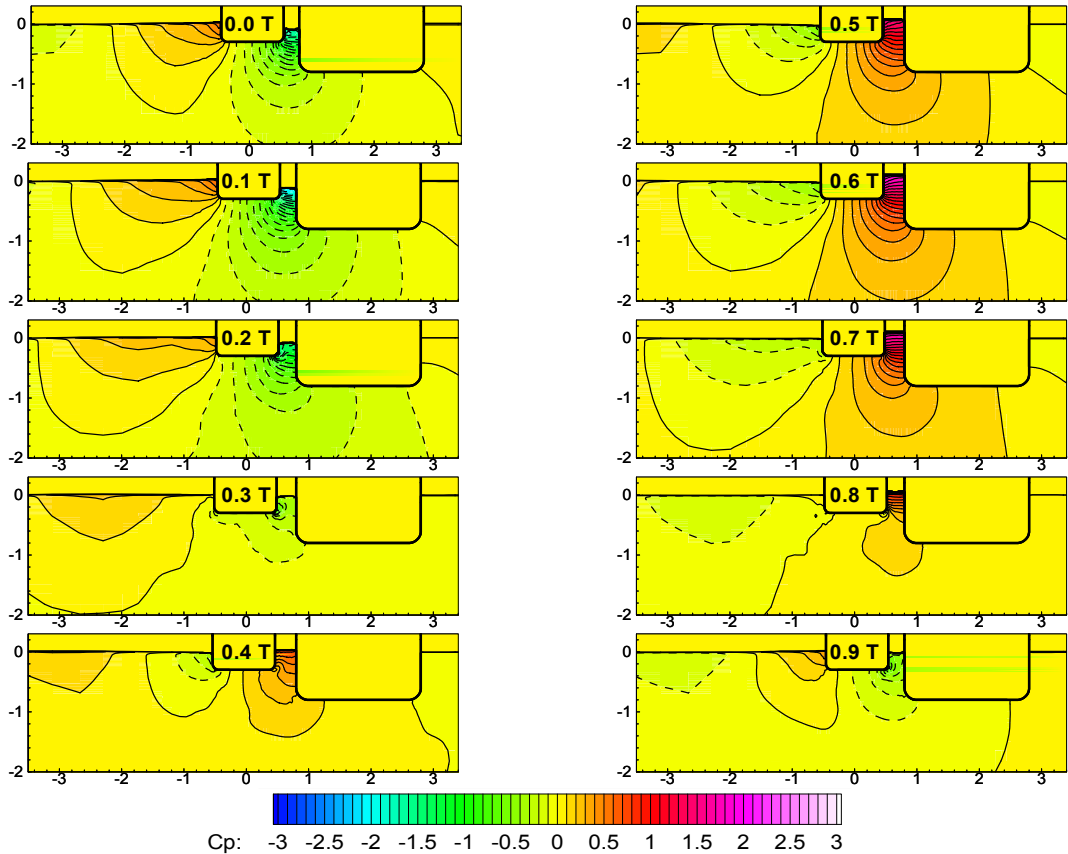


Fig. 9 Time evolution of pressure fields around two floating bodies under relative motion

화들이 좋은 일치를 보인다는 사실은 Shen and Chan[12]의 그러한 추정을 뒷받침한다. 두 계산 결과들의 경우 $x = 0.61$ m 및 1.61 m 모두에서 최대 파고의 높이, 파 도착 시간 및 일정한 파고의 지속시간, 그리고 상대적으로 빠른 수면 상승과 완만한 하강 등 여러 가지 특성에서 거의 유사한 결과들을 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 상대운동을 하는 부유체 주위 자유표면 유동

방현재와 계류삭 효과가 고려된 부유체의 운동 모사에 앞서 고정된 부유체 주위에서 좌우동요를 하는 부유체 주위 자유표면 유동이 해석되었다. Fig. 7은 이 문제에 대한 개략도이다. 좌표계의 원점은 교란이 없는 자유표면 위의 좌우동요의 중심에 위치한다. 모든 길이는 좌우동요하는 부유체의 폭 B_m 으로 무차원화 되었다. 우측의 고정된 부유체의 폭 B_s 는 $2 B_m$ 이며 부유체들의 흘수 D_m, D_s 는 각각 $0.3 B_m$ 및 $0.8 B_m$ 이다. 두 부유체의 모서리 부분들은 반경이 $0.1 B_m$ 및 $0.3 B_m$ 인 원호로 주어졌다. 두 부유체 사이의 평균 간격 G 는 $0.3 B_m$ 이며

왼쪽의 부유체는 정지 상태에서부터 다음 식으로 주어지는 좌우동요를 한다.

$$x(t) = A_{sway} \cos(\omega t) \tag{7}$$

여기서 좌우동요의 진폭 A_{sway} 는 $0.05 B_m$ 및 $0.1 B_m$ 인 경우들에 대한 결과들을 비교하였으며 무차원화 된 각 속도 $\omega^2 B_m/g$ 는 1로 주어졌다. 좌우동요의 최대속도 및 움직이는 부유체의 폭 B_m 로 무차원화 된 Reynolds 수는 10^5 이다. 계산 영역은 $-50 < x/B_m < 50, -20 < z/B_m < 20$ 이다. Δx 및 Δz 의 최소값은 $0.02 B_m$ 및 $0.01 B_m$ 로 주어졌으며 159개 및 148개의 절점들이 각각 수평 및 수직 방향으로 배치되었다.

Fig. 8은 A_{sway} 가 $0.05 B_m$ 인 경우에 대해 계산된 수면파의 시간변화를 보여준다. 두 부유체 사이에서는 해수면의 상하변위가 매우 커지며 고정된 오른쪽 부유체 우측에도 파가 약하게 전파되고 있음을 관찰할 수 있다.

Fig. 9에서는 좌우동요의 한 주기 동안 수심에 따른 정수압을 제거한 압력장의 시간 변화를 보여준다. 움직이는 부유

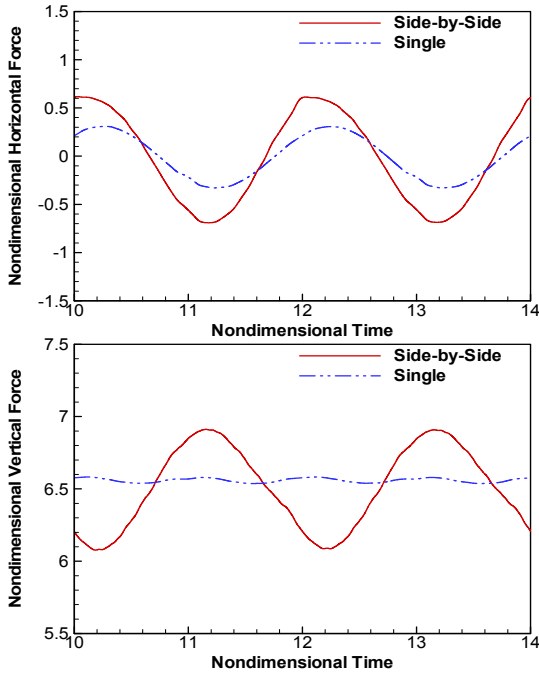


Fig. 10 Comparison of forces acting on a moving body, $A_{sway} = 0.05 B_m$

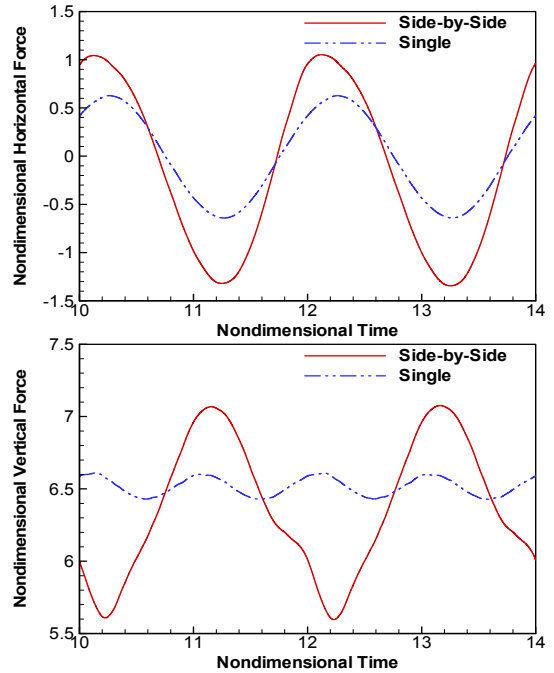


Fig. 11 Comparison of forces acting on a moving body, $A_{sway} = 0.1 B_m$

체의 왼쪽면에서는 좌우동요에 의한 가속도가 극값을 갖는 순간들인 $0T$ 및 $0.5T$ 근처에서 각각 양의 압력과 음의 압력이 크게 발생하며 이러한 사실은 부가질량(added mass) 효과가 압력장 변화에 지배적인 영향을 미치는 경우임을 의미한다. 그러나 두 부유체 사이에서는 좁은 간극을 향해 접근하거나 멀어져가는 부유체의 상대속도 영향이 커짐에 따라 압력의 극값이 부유체 왼쪽보다 약간 늦게 발생함을 관찰할 수 있다. 간극 내부에서의 압력 변화는 외부의 경우보다 증가하며 이러한 차이는 Fig. 8에서 보인 간극 내부와 외부에서 파고들의 차이를 뒷받침한다. 간극 내에서의 압력 변화 증가는 좌우동요하는 부유체 바닥에 작용하는 압력의 비대칭성을 증가시키며 이에 따라 수직력의 진폭이 커지게 된다.

Fig. 10-11은 좌우동요의 진폭이 각각 $0.05 B_m$ 및 $0.1 B_m$ 인 경우 움직이는 부유체에 작용하는 수평력 및 수직력의 시간 변화(실선)가 고정된 부유체가 없는 경우(이점쇄선)에 작용하는 힘들의 시간 변화와 비교되었다. 단일 부유체의 경우 수평력은 단순 조화와 유사하나 두 부유체의 경우 고정된 부유체에 의한 양쪽 압력장 변화 차이에 따라 비대칭적 특성이 강해진다. 또한 고정된 부유체에 의해 발생하는 움직임은 부유체 바닥면 압력분포의 좌우 비대칭성은 수직력의 급격한 증가를 초래함을 확인할 수 있다. 이러한 수직력의 큰 차이는 동일 위상($1.0T$)에서 병렬 배치된 부유체와 단독 부유체 주위

압력장들의 비교를 보여주는 Fig. 12에서 더욱 명확하게 확인된다.

5. 방현재 및 계류삭 효과가 고려된 부유체의 상대운동

전 절의 병렬 배치되어 상대운동을 하는 부유체 주위의 유동 해석에 방현재 및 계류삭 효과가 추가된 유체-구조 연성 해석이 수행되었다. 오른쪽의 고정된 부유체 및 왼쪽의 움직이는 부유체의 형상 및 흡수는 전 절과 동일하나 왼쪽 부유체의 운동은 작용하는 유체력과 두 부유체의 상대변위에 따라 결정되는 방현재와 계류삭에 의한 힘을 외력으로 하여 다음과 같이 Newton 제2법칙으로부터 계산되었다.

$$M_b \frac{dV_b}{dt} = F_{fluid} + F_{f-h} \tag{8}$$

여기서 M_b 는 왼쪽 부유체의 질량, V_b 는 부유체의 수평방향 속도, F_{fluid} 는 부유체에 작용하는 수평방향 유체력이며 F_{f-h} 는 방현재와 계류삭에 의한 수평력이다. n 번째 물리적 시간단계에서 계산된 유체력 및 그 순간 두 부유체의 상대변위에 근거

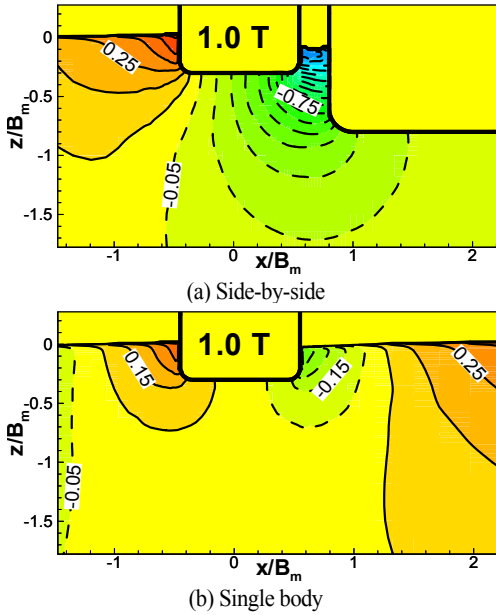


Fig. 12 Comparison of pressure fields around moving floating bodies; (a) Side-by-side, (b) Single body

한 방현재와 계류삭에 의한 힘을 이용하여 n+1 번째 시간 단계에서 왼쪽 부유체의 변위 X_b^{n+1} 및 속도 V_b^{n+1} 는 다음과 같이 추정되었다.

$$\frac{X_b^{n+1} - X_b^n}{\Delta t} = \frac{1}{2} (V_b^{n+1} + V_b^n) \quad (9)$$

$$\frac{V_b^{n+1} - V_b^n}{\Delta t} = \frac{1}{M_b} F_{fluid}^n + \frac{1}{M_b} F_{f-h}(X_b^n) \quad (10)$$

본 연구에서는 계류삭과 방현재에 의해 작용하는 힘은 두 부유체의 상대변위 δ 에 따라 다음과 같이 작용한다고 가정되었다.

$$F_{f-h}(\delta) = \begin{cases} -K_h(\delta + \epsilon_h) & \delta < -|\epsilon_h| \\ 0 & -|\epsilon_h| \leq \delta \leq \epsilon_f \\ -K_f(\delta - \epsilon_f) & \delta > \epsilon_f \end{cases} \quad (11)$$

여기서 K_h 및 K_f 는 각각 계류삭 및 방현재에 의해 발생하는 인력 및 척력의 상대변위에 대한 비례상수들이며 ϵ_h 및 ϵ_f 는 왼쪽 부유체가 기준점으로부터 좌측이나 우측으로 움직임에 따라 계류삭의 인력 및 방현재의 척력이 발생하기 시작하는 변위의 절댓값들이다. Fig. 13은 위와 같은 가정에 의해 상대

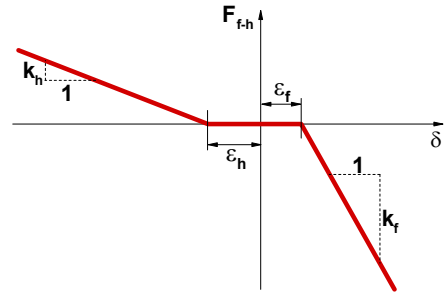


Fig. 13 Modeling of force acting on a floating body by a fender and a hawser according to the displacement

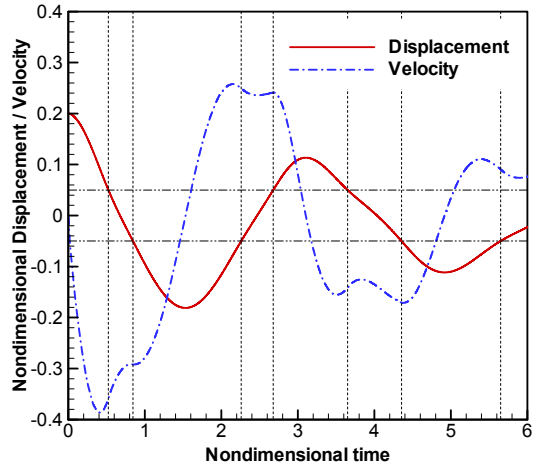


Fig. 14 Time histories of displacement and velocity of a moving body under effects of a fender and a hawser

변위에 따라 작용하는 계류삭 및 방현재에 의한 힘의 예를 보여준다. 본 계산에 사용된 격자계는 전 절의 경우와 동일하며 수평 및 수직 방향 격자의 최소간격을 각각 1.5배(medium) 및 2배(coarse)로 증가시킨 격자계를 사용하여 계산된 결과들의 격자 의존도를 검토하였다.

오른쪽의 부유체는 계속 정지 상태이며 왼쪽의 부유체는 초기 정지 상태에서 방현재에 의한 척력에 의해 움직이기 시작한다. 이후 유체력과 상대변위에 따라 작용하는 방현재 및 계류삭에 의한 힘으로부터 왼쪽 부유체의 속도 및 위치를 식 (9)-(10)으로부터 갱신하였다. 보고된 결과에서 $\epsilon_h = \epsilon_f = 0.05 B_m$ 이고 초기 상대변위 δ 는 $0.2 B_m$ 이고 두 부유체 사이 간격은 $0.1 B_m$ 이다. 왼쪽 부유체의 질량은 평균깊수에서의 배수량과 같고 부유체의 폭, 중력가속도를 기저로 하여 무차원화 된 K_h/M_b 및 K_f/M_b 는 각각 10 및 20으로 주어졌다.

Fig. 14은 무차원화 된 시간에 따라 계산된 왼쪽 부유체의 좌우동요 변위와 속도 변화를 보여준다. 그림에는 부유체의

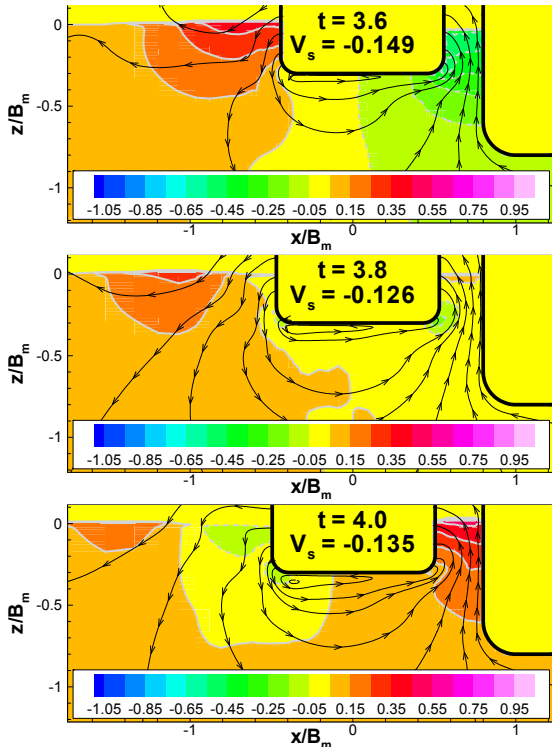


Fig. 15 Time variation of pressure fields and streamlines around a moving floating body under effects of a fender and a hawser

변위에 따라 방현재와 계류삭에 의한 힘이 작용하지 않는 시간 영역들이 표시되어 있다. 그림으로부터 방현재나 계류삭에 의한 힘이 작용하는 동안에는 부유체 운동의 시간 이력이 유체력의 감쇠 효과에 의해 감쇠조화 운동과 유사함을 관찰할 수 있다. 또한 계류삭 및 방현재 힘의 비대칭적 특성에 따라 천천히 잡아당겨지고 빠르게 밀려남을 관찰할 수 있다. 그러나 방현재와 계류삭에 의한 힘이 작용하지 않는 시간 동안에는 작용하는 유체력만에 의한 속도 변화가 나타난다. 그림에서 보조선으로 표시된 시간 동안에는 유체력에 의해 부유체의 속력이 커지는 경우도 발생함을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 아래에서 설명되듯이 무한 유체장의 경우와 달리 자유표면 효과로 인해 물체 가속도와 유체력 시간 변화 사이의 위상차가 존재하기 때문에 발생한다.

유체력에 의한 부유체의 속력 증가를 설명하기 위해 Fig. 15에 방현재와 계류삭에 의한 힘이 작용하지 않는 시간 동안 부유체 주위 유동장의 시간 변화를 나타내었다. $t = 3.6$ 이전까지 부유체는 방현재에 의해 왼쪽으로 밀려나면서 가속되어 부유체의 속력이 음의 극값에 가깝다. 압력장의 경우 왼쪽으로 가속되는 부유체의 가속을 방해하는 왼쪽의 높은 압력 및

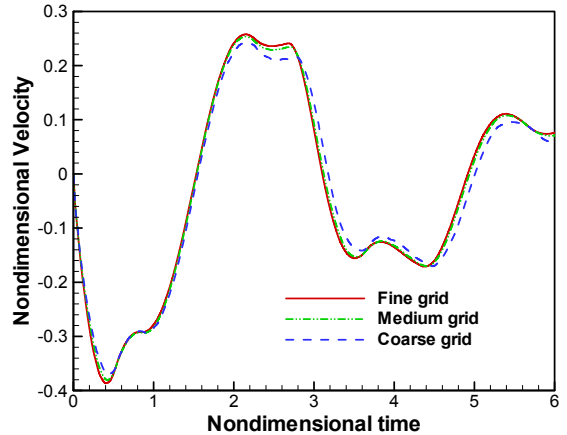


Fig. 16 Grid independency test for computed time history of the velocity using fine, medium, and coarse grids

간극 내부의 낮은 압력 분포가 형성되어 있음을 관찰할 수 있으며 간극 내 자유표면은 최저 위치에 가까운 상태이다. 속도장의 경우 부유체의 왼쪽에서는 유체가 밀려나고 간극 쪽으로 유체가 유입되는 순간으로서 간극 내부 자유표면은 상승을 시작한다. 이러한 자유표면의 상승은 간극 내부의 압력의 점진적 증가를 의미하며 부유체의 가속도 변화에도 불구하고 $t = 4$ 까지 계속 유지됨을 관찰할 수 있다. 이렇게 형성된 간극 내부의 압력 증가는 부유체를 오른쪽으로 밀어 속력의 증가를 발생시킨다.

Fig. 16은 앞서 기술된 바와 같이 수평 및 수직 방향 최소 격자 간격들을 모두 1.5배 및 2배로 증가시킨 경우에 계산된 좌우동요 속도의 시간변화 비교를 보여준다. 가장 거친 격자의 경우 계산 결과는 다른 두 격자계의 결과와 다소 차이가 있으나 유체력에 의한 속력 증가 현상은 세 격자계 모두에서 비슷한 양상을 보임을 확인할 수 있다.

6. 결 론

개발된 FDS-HCIB 코드가 인접한 부유체들의 유체-구조 연성 해석에 적용되었다. 바닥면 상층에 따른 수면파 생성 및 전파에 대한 모사를 수행하고 파고의 시간변화를 다른 실험 및 계산결과와 비교하여 전파되는 수면파의 여러 특성들에서 좋은 일치치를 보임을 확인하였다. 바닥면 용기 과정에서 자유표면 형상이 용기부 끝단 주위에서 평탄부를 형성하는 등 바닥면 형상과 다른 특성을 보임을 확인하였다.

병렬 배치되어 좌우동요 하는 부유체 주위 자유표면 유동 해석을 수행하였다. 부가질량 효과가 지배적인 외부 유동장과 달리 간극 내부 압력장의 시간변화에는 두 부유체의 상대 속

도 효과도 커짐을 확인하였다. 간극 내부와 외부 압력장의 비대칭성은 부유체에 작용하는 수직력을 증가시킴을 확인하였다.

방현재와 계류삭에 의한 힘을 모사하기 위한 모델이 제안되었다. 제안된 모델은 부유체의 좌우동요에 대한 유체-구조 연성 해석에 적용되었다. 물체의 순간 가속도에 따라 부가질량 효과를 초래하는 무한 유체장의 경우와 달리 자유표면이 존재하는 경우에는 작용하는 순간 유체력이 물체의 속력을 증가시킬 수 있음을 관찰하였다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] 2005, Koo, B.J. and Kim, M.H., "Hydrodynamic interactions and relative motions of two floating platforms with mooring lines in side-by-side offloading operation," *Applied Ocean Research*, Vol.27, pp.292-310.
- [2] 2005, Hong, S.Y., Kim, J.H., Cho, S.K., Choi, Y.R. and Kim, Y.S., "Numerical and experimental study on hydrodynamic interaction of side-by-side moored multiple vessels," *Ocean Engineering*, Vol.32, pp.783-801.
- [3] 2012, Heo, J.K. and Park, J.C., "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*, Vol.49(5), pp.425-432.
- [4] 2012, Shin, S., Bae, S.Y., Kim, I.C., Kim, Y.J. and Yoon, H.K., "Simulation of free surface flows using the flux-difference splitting scheme on the hybrid Cartesian/immersed boundary method," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.68, pp.360-376.
- [5] 2007, Gao, F., Ingram, D.M., Causon, D.M. and Mingham, C.G., "The development of a Cartesian cut cell method for incompressible viscous flow," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.54(9), pp.1033-1053.
- [6] 2005, Gilmanov, A. and Sotiropoulos, F., "A hybrid Cartesian/immersed boundary method for simulating flows with 3D, geometrically complex, moving bodies," *Journal of Computational Physics*, Vol.207(2), pp.457-492.
- [7] 2013, Shin, S. and Bae, S.Y., "Simulation of water entry of an elastic wedge using the FDS scheme and HCIB method," *Journal of Hydrodynamics*, Vol.25(3), pp.450-458.
- [8] 2013, Shin, S., "Simulation of two-dimensional internal waves generated by a translating and pitching foil," *Ocean Engineering*, Vol.72, pp.77-86.
- [9] 2012, Shin, S., "Numerical simulation of three-dimensional internal waves using the FDS scheme on the HCIB method," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.17(1), pp.8-15.
- [10] 2007, Shin, S., Bae, S.Y., Kim, I.C., Kim, Y.J. and Goo, J.S., "Computations of flow over a flexible plate using the hybrid Cartesian/immersed boundary method," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.55, pp.263-282.
- [11] 1974, Hammack, J.L. and Segur, H., "The Korteweg-de Vries equation and water waves. Part 2. Comparison with experiments," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.65(2), pp.289-314.
- [12] 2008, Shen, L. and Chan, E.S., "Numerical simulation of fluid-structure interaction using a combined volume of fluid and immersed boundary method," *Ocean Engineering*, Vol.35(8-9), pp.939-952.