

FDS-HCIB법을 이용한 고립파에 의한 물체 운동 모사

신상묵[†] · 김인철 · 김용직
부경대학교 조선해양시스템공학과

Simulation of Body Motion Caused by a Solitary Wave using the FDS-HCIB Method

Sangmook Shin[†] · In Chul Kim · Yong Jig Kim
Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Wave-body interaction is simulated using a developed code based on the flux-difference splitting scheme for immiscible and incompressible fluids and the hybrid Cartesian/immersed boundary method. A free surface is captured as a moving contact discontinuity within a fluid domain and an approximated Riemann solver is used to estimate the inviscid flux across the discontinuity. Immersed boundary nodes are identified inside an instantaneous fluid domain near a moving body, then dependent variables are reconstructed at those immersed boundary nodes based on interpolation along local normal lines to the boundary. Free surface flows around an oscillating cylinder are simulated and the computed wave elevations are compared with other reported results. The generation of a solitary wave by a moving wave-maker is simulated and the time histories of wave elevations at two different points are compared with other results. The developed code is applied to simulate body motion of an elastically mounted circular cylinder as a solitary wave passes the body. The force acting on an elastically mounted cylinder is compared with the force acting on a fixed cylinder. Grid independency of the computed body motion is established based on a comparison of results using three different-size grids.

Keywords : Wave-body interaction(물체-파 상호작용), Free surface capturing(자유표면 포착), Non-boundary conforming(경계 비정합), Body motion(물체 운동), Wave force(파력)

1. 서론

움직이거나 변형하는 물체 주위 자유표면 유동 해석은 여러 가지 문제들에서 요구된다. Das and Batra (2011)는 연성된 Lagrangian-Eulerian 기법을 사용하여 슬래밍 과정에서 구조물의 동적 변형이 주위 유체 압력장에 많은 변화를 초래한다고 보고하였다. Seo, et al. (2012)는 가상영역(fictitious domain)법과 level set 법을 이용하여 움직이는 바닥 면과 자유표면 사이 원주 주위의 2차원 층류 유동 해석을 보고하였다. Heo and Park (2012)는 Fluent의 layering 기법을 이용하여 조화운동을 하는 2차원 부유체 주위 점성 유동 해석 결과를 보고하였다. 그러나 자유표면 주위에서 움직이거나 변형하는 물체 주위 유동 해석은 수치해석 기법들에 많은 어려움을 초래하고 있다.

VOF 및 level set 혹은 ghost fluid 법 등 다양한 형태의 자유표면 유동 해석 기법들이 개발되어 왔다. 그러나 기존의 대부분

의 방법들에서는 매 순간 자유표면을 추적하고 자유표면에서 동역학적 조건 만족을 위한 추가적인 처리가 필요하다. 이러한 자유표면 구성 및 추가적인 처리는 자유표면이 복잡해지면 각 유체 성분들의 보존이나 정확한 자유표면 구성 등에 어려움을 초래한다. 최근 들어 자유표면을 유동 영역 내부에 존재하는 움직이는 접촉 불연속(moving contact discontinuity)면으로 포착하는 기법들에 대한 연구들이 보고되고 있다 (Qian, et al., 2006; Gao, et al., 2007). 이러한 기법들에서는 불연속면 주위에서 flux 계산을 위해 근사화된 Riemann 문제의 해를 이용하는 flux-difference splitting(FDS) 기법이 이용된다. Shin, et al. (2010)는 밀도가 다른 비압축성 유체들에 대한 FDS 기법을 이용하여 댐 붕괴 및 Rayleigh-Taylor 불안정성 등에 대한 해석 결과를 보고하였다.

변형하거나 움직이는 물체에 대한 경계조건 처리를 위해 다양한 형태의 경계 비정합(non-boundary conforming) 기법들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 경계 비정합 기법의 대표적인 예인 가상경계법(immersed boundary method)에서는 계산 영역

을 유동 영역 외부 즉 물체 내부로 확장하고 유동 영역 외부에서 지배 방정식에 도입된 추가 항 들을 조절하여 유동 영역 경계에 서 물체 경계조건을 만족시킨다. 이 방법은 물체의 두께가 배후 격자보다 얇아지는 경우처럼 물체 형상에 따라 기법의 적용에 어 려움이 발생한다. Gilmanov and Sotiropoulos (2005)는 계산 영 역이 순간 유동 영역의 내부에 국한되도록 하는 경계 비정합 기 법인 Hybrid Cartesian/Immersed Boundary(HCIB) 법을 제안하 였다. Shin, et al. (2007)는 HCIB 법에서 이산화된 유동 해석 문 제의 well-posedness를 보장하기 위한 새로운 계산 영역의 경계 정의 방법을 제안하고 박판 방정식과 결합하여 유연 평판 주위의 동적 유체-구조 상호 작용을 해석하였다. 이러한 방법에서는 물 체의 형상에 관계없이 적용이 가능하고 Euler 방정식 해석에도 적 용이 용이하다.

최근 Shin, et al. (2012)는 FDS 기법과 HCIB 법을 결합하여 변형하거나 움직이는 물체 주위 자유표면 유동 해석을 위한 새로 운 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 수중의 주위 조파 현상에 대한 실험 결과 및 비점성 자유표면 유동 등을 포함한 다양한 경 우에 대해 보고된 결과들과의 비교를 통해 검증되었다. Yoon and Shin (2012)는 개발된 FDS-HCIB 코드를 이용하여 계산된 bi-lobe 탱크 내 sloshing에 대한 결과를 실험 결과와 비교한 후 임의의 회전 운동을 하는 bi-lobe 탱크 내의 3차원 sloshing 계산을 보고하였다. 본 연구에서는 개발된 FDS-HCIB 코드에 유체력에 따른 물체의 동적 거동 해석을 연성하여 물체-파 상호작용을 모사하였다. 개발된 코드의 추가적 검증을 위해 수면 하에서 조 화운동 하는 원주에 의한 자유표면 유동 및 움직이는 조파기에 의한 고립파 전파를 해석하고 그 결과들을 다른 보고된 결과들과 비교하였다. 개발된 코드는 탄성 지지된 원주를 통과하는 고립파 에 의해 원주에 작용하는 파력 모사에 적용되었으며 원주가 고정 된 경우에 대한 작용 파력의 시간 변화와의 비교를 통해 물체 운 동이 파력에 미치는 영향을 관찰하였다.

2. 지배 방정식

지배 방정식은 임의의 밀도 분포를 갖는 비압축성 유체들에 대 한 질량 및 운동량 보존식들과 각 유체들의 비압축성 조건식이다. 본 연구에서는 매질 경계면이 영역 내부에 존재하는 불연속면으 로 고려되기 때문에 다음과 같이 적분 형태로 표현된 지배 방정 식이 적용된다.

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

여기서 Ω 는 검사체적, S 는 검사표면, Q 는 보존변수 벡터, F_{inv} 및 F_{vis} 는 각각 비점성 및 점성 flux, B 는 체적력 벡터로서 다음과 같다.

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

$$F_{inv} = [\rho\theta, \rho u\theta + p n_x, \rho v\theta + p n_y, \theta]^T \quad (3)$$

$$F_{vis} = [0, \tau_{xx} n_x + \tau_{yx} n_y, \tau_{xy} n_x + \tau_{yy} n_y, 0]^T \quad (4)$$

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

여기서 ρ 는 검사체적 내 유체의 평균밀도, u 및 v 는 x, y 방향 의 속도 성분, p 는 압력, θ 는 검사표면에서의 법선속력, τ_i 는 점 성응력, (n_x, n_y) 는 검사표면에 대한 법선 단위벡터, g 는 중력가속 도이다.

식 (1)의 마지막 식으로부터 각 유체들의 비압축성 조건이 강 제되어 매질 경계면에서의 법선속도 연속이 자동적으로 보장된 다. 이러한 비압축성 유동의 법선속도 연속은 운동량 보존식에 의해 압력의 연속을 강제한다. 따라서 불연속면의 존재에도 불구 하고 물리적으로 타당한 flux들만 계산되어 적분 형태의 지배 방 정식을 만족시키면 경계면에서의 추가적인 처리 없이도 타당한 자유표면 유동 해석이 보장된다.

3. FDS 기법에 의한 flux 계산

영역 내부에 존재하는 불연속에도 불구하고 물리적으로 타당 한 flux 계산을 위하여 임의의 밀도 분포를 갖는 비압축성 유체들 에 대한 FDS 기법이 적용되었다. 이 방법은 보존변수 벡터들의 차이에 따른 비점성 flux 차에 대한 도약 조건(jump condition)을 만족시키도록 선형화된 Riemann 문제의 해를 이용하여 flux를 계 산한다. 각각의 물리적 시간단계 내에서 가상시간(pseudo-time) τ 를 도입하여 다음과 같이 가상시간 및 비점성 flux에 대한 hyperbolic 문제를 형성한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \iint_{\Omega} Q d\Omega + \frac{\partial}{\partial \tau} \iint_{\Omega} \tilde{Q} d\Omega \\ + \iint_S (F_{inv} - F_{vis}) dS = \iint_{\Omega} B d\Omega. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\tilde{Q} = [\rho, \rho u, \rho v, p/\beta]^T \quad (7)$$

여기서 β 는 가상시간에 대한 의사압축성 계수이다. 가상시간 에 대해 압력을 포함한 비점성 flux로 구성된 Riemann 문제의 해 로부터 flux는 다음과 같이 표현된다.

$$F_{inv} = \frac{1}{2} [F_{inv}(\tilde{Q}^R) + F_{inv}(\tilde{Q}^L)] - \frac{1}{2} |\hat{A}| (\tilde{Q}^R - \tilde{Q}^L) \quad (8)$$

$$|\hat{A}| = R | \wedge | R^{-1} \quad (9)$$

여기서 \tilde{Q}^R 와 \tilde{Q}^L 는 검사표면 양쪽에서 재구성된 보존변수

벡터들이고 \hat{A} 는 Roe의 평균 변수들에 대한 비점성 flux 벡터의 Jacobian 행렬이며 R는 Jacobian 행렬의 고유벡터들로 구성된 행렬이며, $|A|$ 는 Jacobian 행렬의 고유치들의 절대값들을 요소로 하는 대각행렬이다. 임의의 검사표면 양쪽 보존변수 벡터 조합들에 대해서도 Jacobian 행렬에 의한 도약 조건을 만족시키기 위해서는 밀도의 제곱근을 기저로 하는 Roe의 평균 변수들로 Jacobian 행렬이 구성되어야 한다. 본 연구에서 사용된 Roe의 평균 변수 구성과 eigen-system에 대한 자세한 내용은 Shin, et al. (2012)에 보고되어 있다.

고차의 정도를 유지하기 위해 검사 표면 양쪽에서의 종속변수들은 검사체적의 중심에 저장된 gradient들을 이용하여 재구성되었다. 재구성 과정 동안 유동 영역 내부에 존재하는 불연속면 주변에서의 비물리적 진동을 억제하기 위해 제한자들이 사용되었다 (Shin, et al., 2010). 매질 경계면에서의 밀도 불연속에 따른 정수력학적 압력 기울기의 불연속이 초래하는 검사표면에서 재구성된 압력의 오차를 제거하기 위해 Qian, et al. (2006)이 제안한 정압 및 동압에 대한 압력 기울기 분리 방법이 적용되었다.

점성 flux 계산은 검사표면 양쪽 요소의 중앙에 저장된 속도 성분들에 대한 미분치들의 평균값을 이용하여 추정되었다. 경계면에서의 점성계수는 양쪽 요소의 평균 밀도를 기저로 한 가중평균에 의해 추정되었다.

4. HCIB 법에 의한 움직이는 물체 경계조건 처리

HCIB 법 (Shin, et al., 2007)을 이용하여 움직이는 물체 경계조건이 처리되었다. 지배 방정식은 격자 조밀도가 조절된 Cartesian 배후 격자계에서 이산화되었다. 각각의 물리적 시간 단계마다 물체 표면 위에 분포된 Lagrangian 절점들의 위치와 속도가 유동 해석의 경계조건으로 주어지며 인접한 두 Lagrangian 절점들을 연결하는 선분들의 집합으로 물체 표면이 정의된다. 각각의 물리적 시간 단계마다, 계산영역의 경계는 물체 주위 유동 영역 내부 절점들로 구성되는 가상경계(immersed boundary) 절점들의 집합에 의해 정의된다.

가상경계 절점들을 찾기 위하여 배후 격자계의 모든 선 요소들마다 물체 경계면 위의 선분과 접촉하는지 여부를 판별한다. 선 요소가 물체 경계와 접촉하는 경우 선 요소 양쪽의 절점들 중 유동 영역 내부의 절점은 가상경계 절점으로 분류된다. 이러한 가상경계 절점 분류 방법은 가상경계 절점이 아닌 유동영역 절점은 반드시 다른 유동영역 내부 절점 혹은 가상경계 절점과 연결되지는 점을 보장하며 물체의 두께가 영이더라도 물체 주위에 가상경계 절점들이 분포된다는 장점을 갖고 있다 (Shin, et al., 2007).

가상경계 절점들이 결정되면 각각의 가상경계 절점들마다 그 점을 통과하면서 물체 표면과 수직으로 만나는 국부 법선(local normal line)을 부여한다. 국부 법선을 유동영역 내부로 연장하여 배후 격자계의 선 요소와 만나는 점을 찾는다. 국부 법선의 물체 표면 위의 점에서의 속도 성분들은 인접한 Lagrangian 절점들에

서 주어진 속도 벡터들을 이용하여 보간한다. 국부 법선의 유동 영역 내부 선 요소 위의 점에서의 종속변수들은 가상시간 단계마다 선 요소 양쪽의 절점들에서 계산되는 종속변수들을 보간하여 갱신한다.

국부 법선 양쪽에서 종속변수들이 추정되면 국부 법선을 따른 종속변수 변화들에 대한 가정으로부터 가상경계 절점에서의 종속변수들이 추정된다. 본 연구에서는 가상경계 절점 주위에서 국부 법선을 따른 속도의 선형적 변화가 가정되었다. 밀도는 유동 영역 내부로부터 외삽되었으며 압력은 유동영역 내부에서 외삽한 후 정수력학적 입력차를 고려한 수정을 하였다.

5. 수면 하에서 진동하는 원주 주위 자유표면 유동

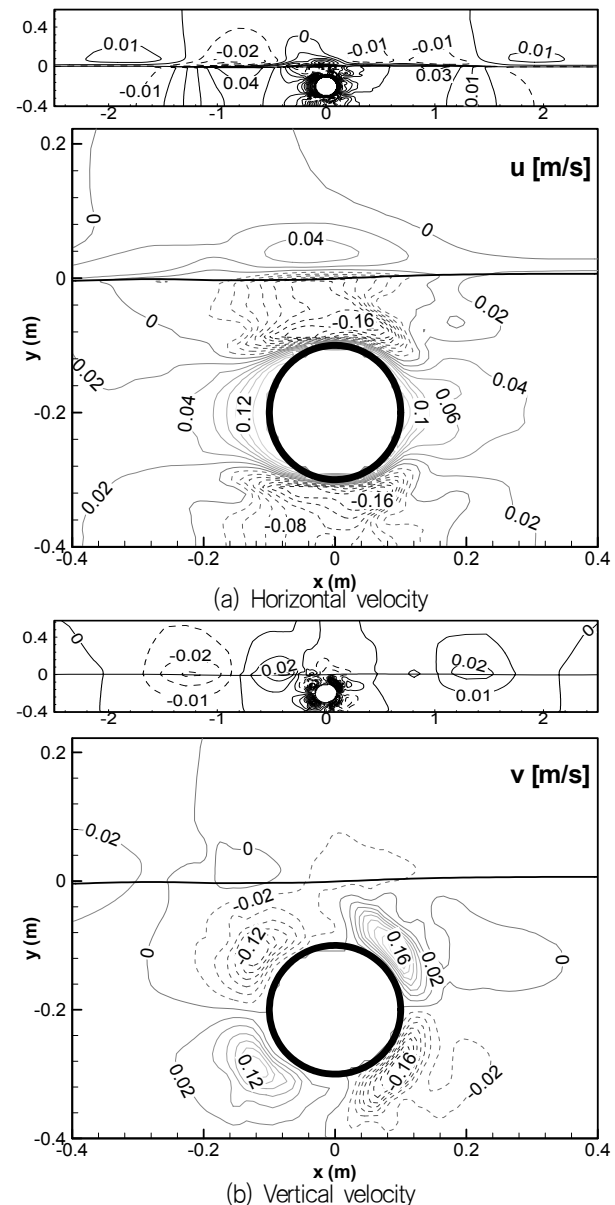


Fig. 1 Instantaneous velocity distribution around a horizontally oscillating cylinder, at $t = 0.75T$

개발된 FDS-HCIB 코드를 이용하여 수면 하에서 수평 및 수직 방향의 조화운동을 하는 원주 주위의 자유표면 유동을 모사하고 계산된 파형들을 Bai, et al. (2010)의 계산 결과들과 비교하였다. 원주의 직경은 0.2m이고 수조의 길이 및 수심은 각각 16m 및 0.4m이다. 초기 정지 상태에서 원주의 운동이 시작되며 수직 및 수평 방향의 운동은 수조 중심점 (0, -0.2m)로부터 원주 중심의 변위 $A_{osc}\cos(\omega t)$ 로 주어진다. 조화운동들의 주기 T는 모두 2s이며 수평 및 수직 운동의 진폭 A_{osc} 는 각각 0.05m 및 0.04m이다. 물과 공기의 밀도 ρ 는 각각 1000kg/m^3 및 1.2kg/m^3 이고 동점성계수 ν 는 각각 $1.0 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 과 $1.5 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ 로 주어졌다. 중력가속도 g 는 9.81m/s^2 이다.

계산 영역은 $-8\text{m} < x < 8\text{m}$, $-0.4\text{m} < y < 2\text{m}$ 로 주어졌으며 초기 자유표면은 $y = 0$ 에 위치한다. 배후 Cartesian 격자계의 최소 간격은 수평 및 수직 방향으로 각각 0.01m와 0.0004m로 주어졌으며 전체 절점 수는 각 방향으로 178개와 111개이다. 원주 표면 위에는 200개의 Lagrangian 제어점들이 균일하게 분포되었으며 물체 운동에 따라 물리적 시간단계마다 위치 및 속도 벡터들이 주어졌다.

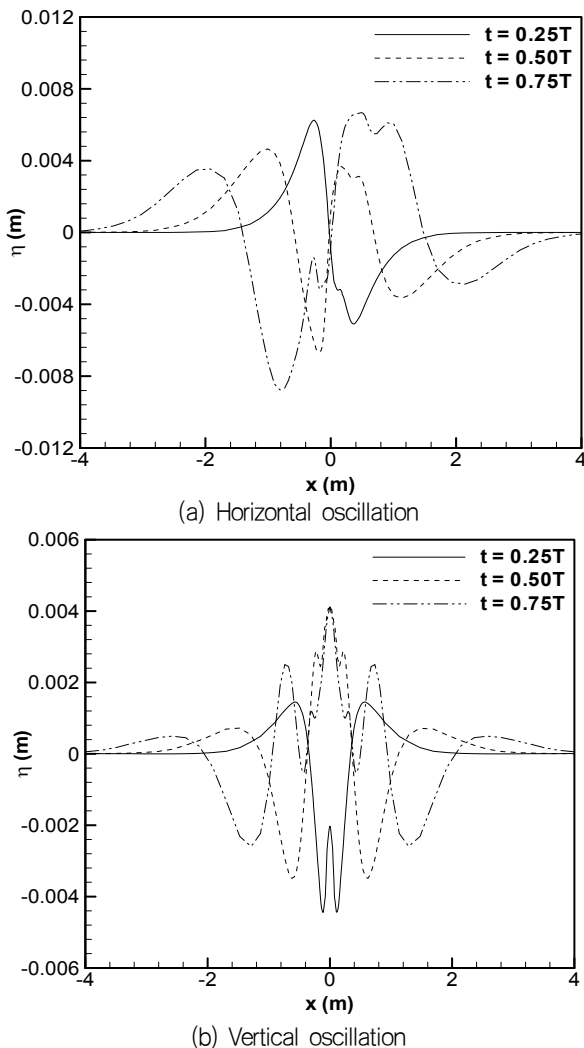


Fig. 2 Time variation of wave elevation caused by an oscillating cylinder

원주 표면에서는 점착조건이 사용되었으며 수조의 벽면들에서는 비점성의 벽조건이 주어졌다. 계산영역의 윗쪽 경계에서는 종속변수들이 유동영역으로부터 외삽되었다. 초기 $t = 0$ 에서 유체의 속도는 정지상태이며 압력은 정수력학적 분포로 주어졌다. 물리적 시간간격 Δt 는 0.000125s이다.

Fig. 1은 원주가 수평방향으로 진동하는 경우 $t = 0.75T$ 인 순간 원주 주위의 속도장을 보여준다. 원주로부터 멀어지면 작은 파고에도 불구하고 전파되는 파에 의한 전형적인 속도장이 명확히 포착되었다. 자유표면에 대한 접선속도에 가까운 u 의 경우 경계면 주위에서 급격한 변화를 보이며 법선속도에 가까운 v 의 경우에는 자유표면을 가로지르며 부드러운 변화를 보인다. 그림에 보인 순간은 원주의 병진운동 속도가 0.157m/s로 최대가 되는 순간으로서 원주가 자신의 후류 속으로 진행 함에도 불구하고 물체 경계층이 존재하는 doublet과 유사한 유동장이 지배적임을 관찰할 수 있다.

Fig. 2는 원주의 수직 및 수평방향 진동이 진행됨에 따라 전파되는 파형의 시간변화를 보여준다. Bai, et al. (2010)이 보고한 바와 같이 외부로 전파되는 긴 파장의 파에 고주파 성분의 파가 중첩되어 불규칙한 파형 변화를 보인다. Fig. 3에서는 원주가 한 주기의 진동을 종료한 시점에서 계산된 순간 파형을 Bai, et al. (2010)에 의해 보고된 결과와 비교하였다. Bai, et al. (2010)의 결과에 비해 본 계산 결과의 파형 변화가 더 복잡하지만 수평 및 수직 운동 모두 두 결과들이 유사함을 관찰할 수 있다.

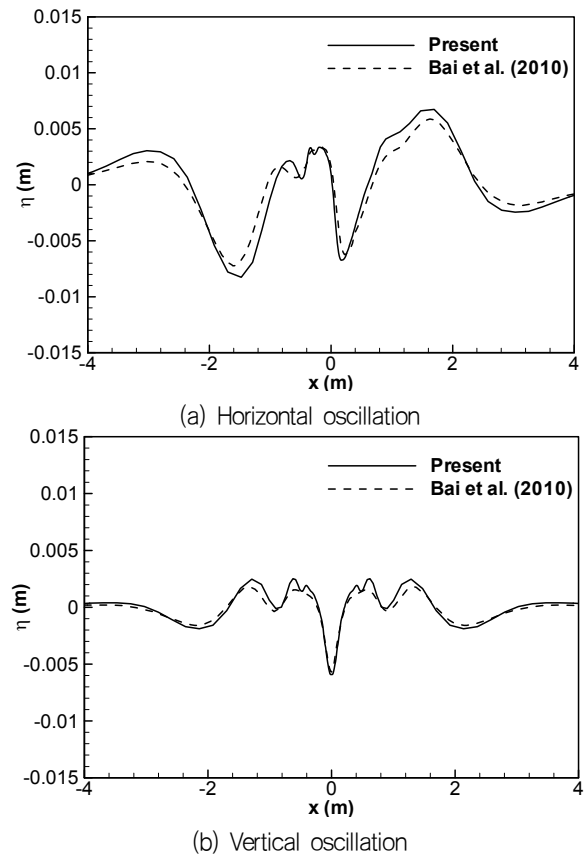


Fig. 3 Comparison of computed wave elevations around an oscillating cylinder, at $t = 1T$

6. 움직이는 조파기에 의한 고립파 전파

탄성 지지된 원주와 진행하는 고립파의 상호작용 모사에 앞서 움직이는 조파기에 의한 고립파의 전파를 모사하고 계산된 결과를 Sriram and Ma (2012)에 의해 보고된 계산결과와 비교하였다. 본 연구에서는 Goring (1979)에 의해 제안된 방법에 따라 고립파를 생성하였다. 전파하는 고립파를 생성하기 위해 피스톤 형태의 조파기가 다음과 같은 운동을 한다.

$$X_p = \frac{H}{kh} \tanh k(c\tau - x_p) \quad (10)$$

$$k = \sqrt{3H/4h^3} \quad (11)$$

$$c = \sqrt{g(h+H)} \quad (12)$$

여기서 x_0 는 $t = \tau$ 에서의 조파기의 변위이고, H 는 생성된 고립파의 파고, h 는 수심, g 는 중력가속도이다. 조파기의 전체 변위 S 는 $2H/kh$ 이고 Goring (1979)이 제안한 바와 같이 조파기의 운동 지속 시간은 $2/kc(3.80+H/h)$ 로 제한되었다. 각각의 물리적 시간 단계마다 식 (10)에 대한 수치해로부터 조파기의 위치 및 속도를 추정하여 조파기 벽면에 위치한 Lagrangian 절점들을 이동시켰다.

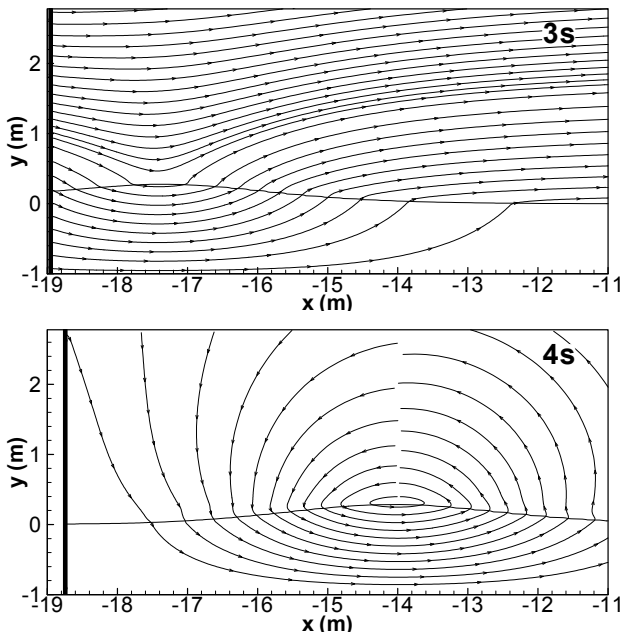


Fig. 4 Comparison of instantaneous streamlines around a moving wave maker, at $t = 3s$ (above) and $4s$ (below)

계산 결과들의 비교를 위해 Sriram and Ma (2012)가 사용한 변수들이 본 계산에서도 사용되었다. 수조의 길이는 40m 이고,

수심 h 는 1m, 생성된 고립파의 파고 H 는 0.3m 이다. 움직이는 조파기 벽면에서는 점착조건이 주어졌으며 수조의 바닥면은 비점성의 벽으로 처리되었다. 수조의 왼쪽 벽면인 $x = -20m$ 에서 우측으로 움직이기 시작하는 조파기의 운동을 포착하기 위해 Δx 가 0.025m인 조밀한 격자 간격이 조파기의 운동 영역에서 유지되었다. 이후 격자 간격을 연속적으로 증가시켜 0.25m가 되면 고정된 격자 간격으로 파 포착 영역을 이산화하였다. 수직 방향 최소 격자 간격 Δy 는 자유표면 주위에서 0.005m 이다.

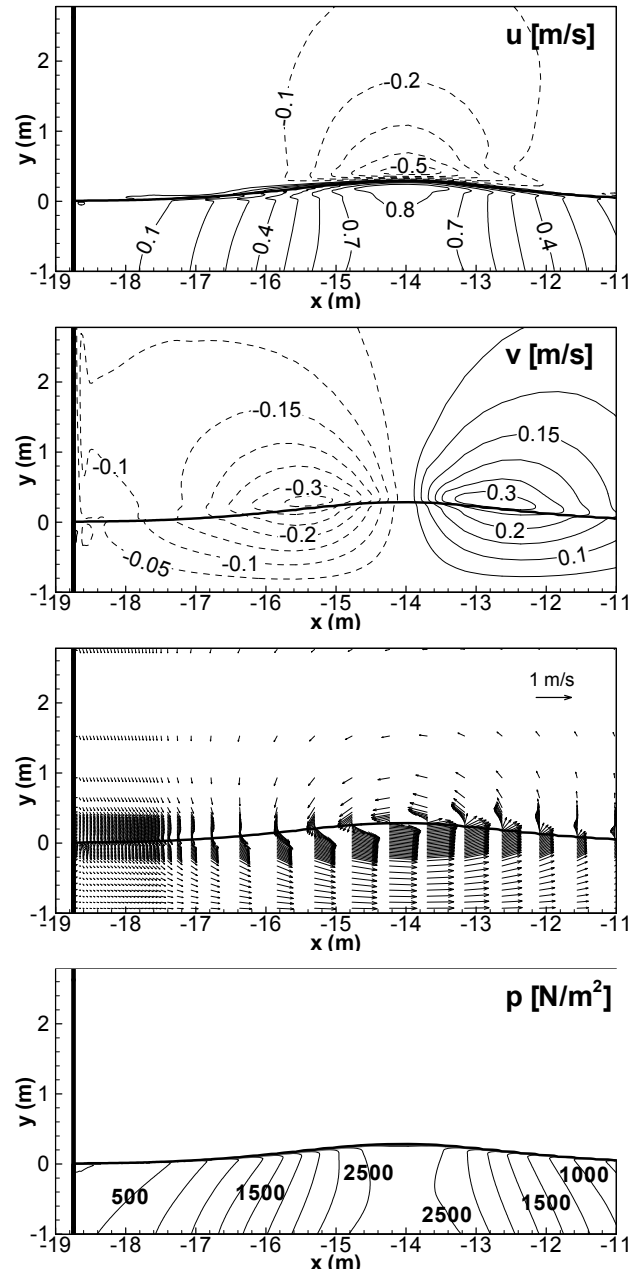


Fig. 5 Velocity field and pressure distribution around generated solitary wave, at $t = 4s$

Fig. 4는 조파기의 운동이 거의 종료되는 시점인 조파기 운동 시작 후 $t = 3s$ 와 $4s$ 에서의 순간 유선 분포를 보여준다. 조파기

의 속도가 영으로 감에 따라 벽면으로부터 밀려나는 유동으로부터 자유표면의 정점을 중심으로 한 와류 형태의 유동으로 변화해 감을 관찰 할 수 있다. Fig. 5는 $t = 4s$ 에서의 속도장 및 정수압이 제거된 압력장 분포를 보여준다. 앞의 경우와 마찬가지로 경계면 주위에서 불연속에 가까운 수평 속도 변화와 수직 속도의 부드러운 변화를 관찰할 수 있다. 수직 속도의 경우 조파기 벽면을 타고 내려오는 공기의 경계층이 포착되어 있음을 관찰할 수 있다. 정수압이 제거된 압력 분포는 자유표면을 경계로 하는 관내 유동의 압력장과 유사한 분포를 보여준다. 즉 파의 위상전파 속도로 이동하는 관찰자에게는 자유표면 및 바닥면 사이의 정상 관내 유동처럼 보인다. 즉 파정 주위에서 단면적 확대에 따른 최고 압력이 형성되고 파정에서 양쪽으로 압력이 단조감소해 나간다. 특히 파정 부근의 자유표면을 따른 유속 방향 변화는 회전 중심적인 아래쪽을 향하는 압력 기울기 존재를 함축하며 이는 파정 주위에 발생하는 국부적인 압력 증가로 확인된다.

Fig. 6에서는 조파기의 최초 위치로부터 10m 및 20m 떨어진 지점에서 계속된 파고의 시간변화들을 Sriram and Ma (2012)에 의해 보고된 결과들과 비교하였다. 조파기의 운동 시작 시점 등에 따른 불명확성을 제거하기 위해 파정이 첫 번째 계측점을 통과하는 시점을 영으로 한 축을 사용하였다. 두 계산 결과들은 파의 형상 및 전파속도 그리고 전파 과정에서의 파고 변화 등에서 거의 유사한 결과를 보여준다. 자유표면 주위에서의 수평방향 속도의 급격한 변화에도 불구하고 파의 전파 과정에서 수치적 분산이 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있다.

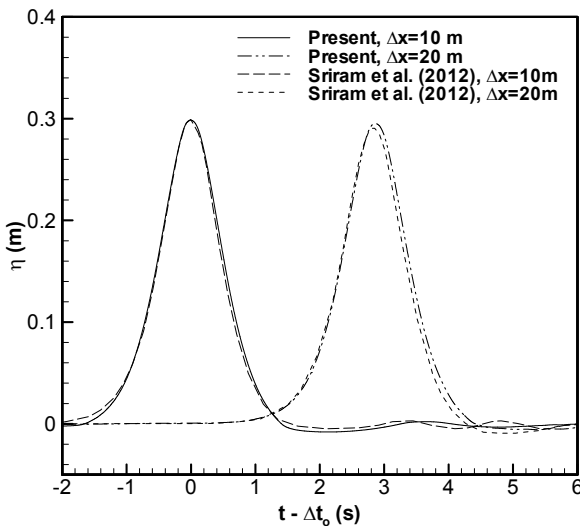


Fig. 6 Comparison of time histories of wave elevation recorded at $\Delta x = 10m$ and $20m$ from the wave maker

7. 탄성 지지된 원주로 전파하는 고립파

개발된 FDS-HCIB 코드를 이용하여 탄성 지지된 원주로 전파하는 고립파에 의한 원주의 운동을 모사하고 물체 운동에 따라 원주에 작용하는 고립파에 의한 힘의 변화를 관찰하였다. 계산

영역은 $-20m < x < 50m$, $-1m < y < 20m$ 이고 $y = 0$ 에 초기 자유표면이 위치한다. 직경이 0.4m인 원주의 수직 위치는 $y = -0.5m$ 로 고정되어 있으나 수평 방향으로는 $x = 0$ 을 중심으로 스프링에 연결되어 작용하는 유체력에 의해 운동한다. 전 질의 경우처럼 수조의 왼쪽 벽에 위치한 조파기에 의해 파고 $H = 0.3m$ 의 고립파가 생성된 후 오른쪽으로 전파된다. 원주 표면 및 조파기 표면에서는 점착 조건이 주어졌으며 수조의 바닥 면은 비점성의 벽면으로 처리되었다. 계산 영역의 오른쪽 경계에서는 밀도, 속도 및 압력 등의 종속 변수들이 유동장으로부터 외삽되었다. 매 순간 원주의 표면에 균일하게 분포된 200개의 Lagrangian 절점들에서 외삽된 압력과 점성응력을 적분하여 원주에 작용하는 유체력을 계산한 후 다음과 같이 Newton 제 2법칙에 의해 원주의 운동을 계산한다.

$$\frac{X^{n+1} - X^n}{\Delta t} = \frac{1}{2}(V^{n+1} + V^n) \tag{13}$$

$$\frac{V^{n+1} - V^n}{\Delta t} + C_s X^{n+1} = C_p F_x^n \tag{14}$$

여기서 X^n , V^n 은 n-번째 물리적 시간 단계에서 원주의 수평방향 중심 위치 및 수평 속도이고, F_x^n 은 원주에 작용하는 유체력이며 C_s 와 C_p 는 원주 질량으로 나누어진 스프링 힘과 유체력에 관련된 계수들이다. 본 계산에서는 고립파의 통과 시간과 질량 및 탄성 계수에 의한 고유 주기를 감안하여 C_s 는 2로 주어졌으며, 주어진 탄성 계수에서 유체력에 의한 물체의 최대 변위 크기를 고려하여 C_p 도 2로 주어졌다. 물리적 시간 단계마다 원주 운동에 따라 Lagrangian 절점들의 위치 및 속도 벡터를 갱신하여 이산화된 유동해석 문제의 경계조건을 제공한다. 사용된 배후 Cartesian 격자계 및 수치적 변수들은 전 절점들의 경우와 유사하나 물체 운동을 포착하기 위해 격자 간격을 연속적으로 줄여 물체 주위에서는 0.01m의 격자 간격이 일정하게 유지되도록 하였다. 전체 격자계에는 수평 및 수직 방향으로 417개와 238개의 절점들이 분포되었다. Fig. 7은 계산에 사용된 배후 Cartesian 격자계와 원주가 운동 중인 순간 물체 경계(점선)와 그 주위에서 포착된 기상경계 절점들(실선)을 보여준다.

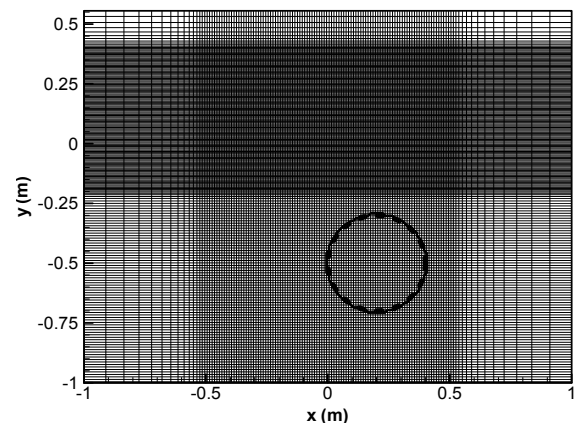


Fig. 7 Background Cartesian grid and immersed boundary nodes around the body boundary

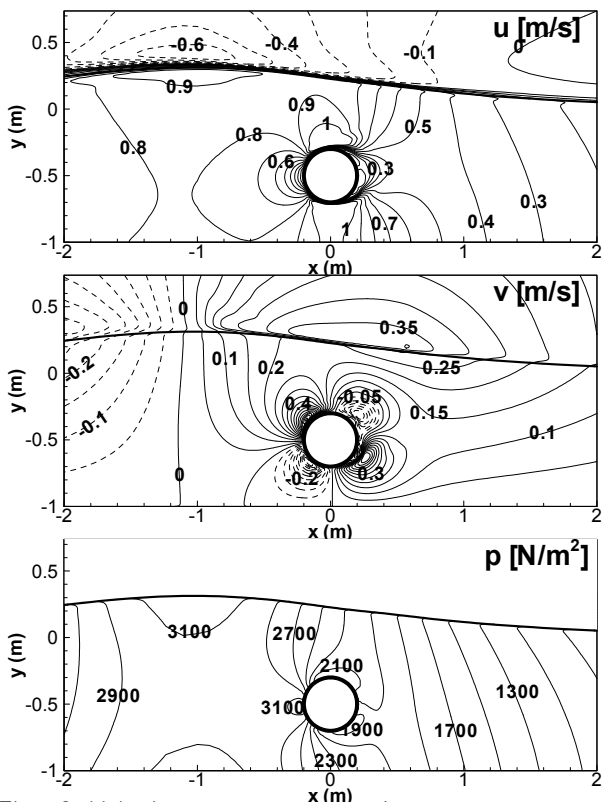


Fig. 8 Velocity components and pressure contours around a fixed cylinder at $t = -0.3s$

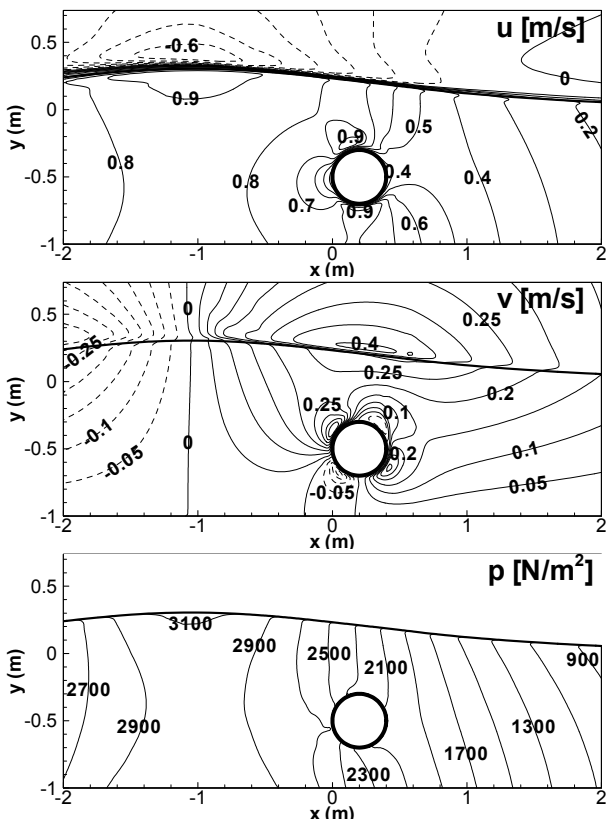


Fig. 9 Velocity components and pressure contours around an elastically mounted cylinder at $t = -0.3s$

Fig. 8과 9는 전파되는 고립파의 정점이 $x = 0$ 을 통과하기 0.3s 전 원주가 고정된 경우와 원주가 탄성 지지되어 파력에 의해 운동하는 경우에 대해 속도 성분 및 정수압이 제거된 압력 분포를 보여준다. 속도장의 경우 두 경우 모두 고립파에 의해 유기된 오른쪽으로 향하는 유동 속에 놓인 원주 주위 박리가 발달되기 전 초기 유동과 유사한 분포임을 관찰할 수 있다. 그러나 원주가 탄성 지지된 경우에는 원주가 유동 방향으로 밀려 남으로써 상대 유속을 줄이는 효과가 나타남을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 두 경우에 대한 속도 벡터 분포를 비교한 Fig. 10 과 11에서도 확인할 수 있다. 압력 분포의 경우 고립파의 진행에 따른 압력의 연속적 변화에 유입 유동 속 원주 주위 압력장이 중첩되는 형태임을 관찰할 수 있으며 압력의 경우에도 탄성 지지된 경우 유입 유동 효과가 감소하고 있다.

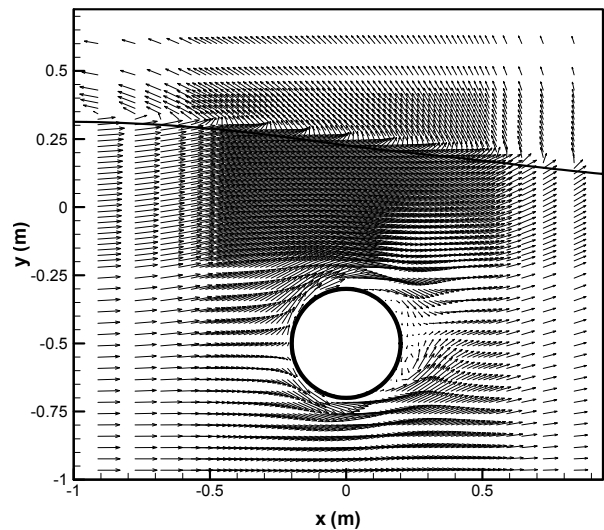


Fig. 10 Velocity vectors around a fixed cylinder at $t = -0.3s$

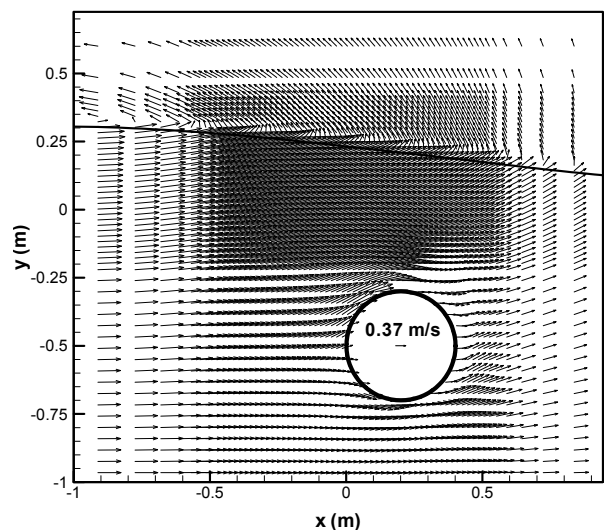


Fig. 11 Velocity vectors around an elastically mounted cylinder at $t = -0.3s$

Fig. 12는 고립파의 정점이 원주를 지나간 후 $t = 1.5s$ 에서의 탄성 지지된 원주 주위 속도 및 압력 분포를 보여준다. 속도장의 경우 스프링 복원력에 의한 원주의 왼쪽 방향으로의 운동에 따른 유속 분포에 물체 후방 박리에 따른 와류가 형성되고 있음을 관찰 할 수 있다. 압력장의 경우 Fig. 9와 비교하여 원주의 상대 속도 영향이 강해졌음을 관찰할 수 있다.

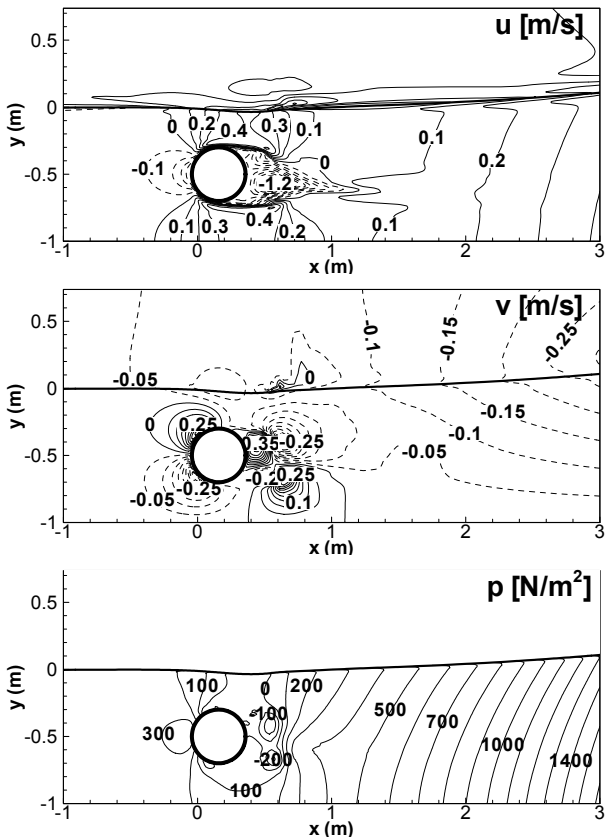


Fig. 12 Velocity components and pressure contours around an elastically mounted cylinder at $t = 1.5s$

Fig. 13은 원주가 고정된 상태와 탄성 지지된 경우들에 대해 원주에 작용하는 유체력의 시간 변화들을 보여준다. 원주가 고정된 경우에는 고립파에 의해 유기된 유속 분포에 의한 힘은 계속 오른쪽으로 작용하며 $t = 0$ 주위에서 가장 크다. 진행되는 고립파 주위의 압력 기울기에 의한 힘은 $t > 0$ 에서는 오른쪽으로 그 이후에는 왼쪽으로 작용한다. 이러한 두 가지 형태 효과의 중첩으로 인해 $t = 0$ 이전에 우측으로 향하는 큰 힘이 발생한 후 압력 기울기 효과에서 유속 효과가 감해진 작은 크기의 왼쪽으로 작용하는 힘이 발생함을 관찰할 수 있다. 원주가 탄성 지지된 경우 원주가 파력에 의해 오른쪽으로 밀려나면 상대유속의 감소를 초래하여 작용하는 유체력을 감소시킨다. 이 동안은 원주의 가속에 따른 부가질량 효과도 오른쪽으로 작용하는 힘을 역시 감소시키는 방향이다. 그러나 Fig. 12에 보인 순간인 $t = 1.5s$ 의 경우 탄성 지지된 원주에 오히려 더 큰 힘이 작용하며 이는 앞서 설명된 바와 같이 스프링 복원력에 의한 원주의 운동에 따른 효과이다.

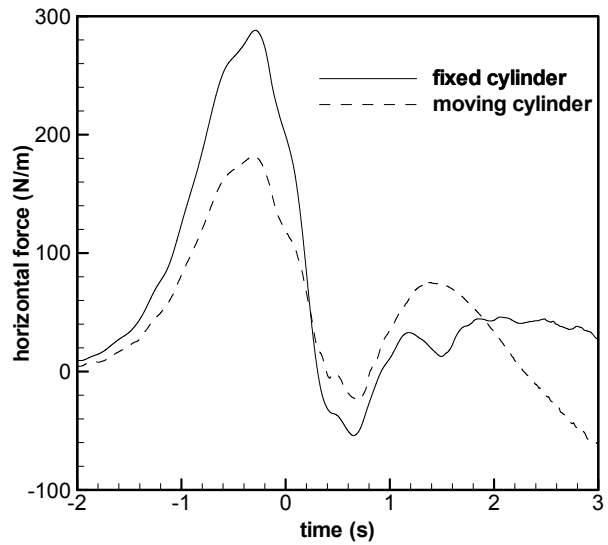


Fig. 13 Comparison of time histories of forces acting on fixed and elastically mounted cylinders

계산된 결과의 격자 독립성을 확인하기 위하여 세 가지 다른 크기의 격자가 사용된 경우에 대해 원주의 시간에 따른 운동을 Fig. 14에서 비교하였다. 가장 거친 격자계의 경우 초기 운동을 다소 과도하게 예측하나 세 가지 결과 모두 유사함을 관찰 할 수 있다. Shin, et al. (2007)에 보고된 바와 같이 물체의 변형이나 운동은 작용하는 유체력의 복잡한 시간 변화에도 불구하고 운동 방향식이 일종의 필터 역할을 함으로써 부드러운 시간 변화를 보이고 이에 따라 격자 의존도도 비교적 쉽게 제거된다.

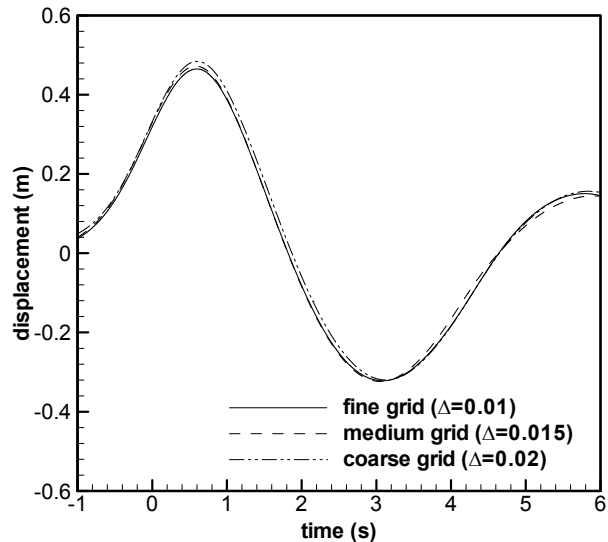


Fig. 14 Grid independency tests for computed time history of horizontal motion of an elastically mounted cylinder

8. 결론

개발된 FDS-HCIB 코드가 물체와 파의 상호작용 모사에 적용

되었다. FDS 기법과 HCIB 법이 모두 배후 Cartesian 격자계에서 추가적인 처리 없이 자유표면 포착 및 움직이는 물체 경계조건 처리를 진행하기 때문에 매 순간 Lagrangian 절점들의 위치 및 속도들만 결정되면 이후 전 과정이 자동적으로 강건하게 처리될 수 있음을 확인하였다.

개발된 FDS-HCIB 코드는 수면 하에서 수평 및 수직 진동하는 원주에 의한 수면파 전파 과정에서의 자유표면 변화를 정확히 모사할 수 있음을 확인하였다. 또한 움직이는 조파기에 의한 고립파 전파에 대한 계산 결과도 다른 보고된 결과들과 좋은 일치를 보임을 확인하였다.

탄성 지지된 원주로 고립파가 전파하는 경우 물체 운동에 따라 작용하는 유체력의 변화가 해석되었다. 고정된 원주의 경우 고립파에 의한 유기 유속과 압력 기울기에 의한 힘의 증첩으로 유체력의 시간 변화를 설명하고 원주의 운동이 상대 유속의 감소와 부가질량 효과를 초래하여 초기 작용 유체력을 감소시킴을 관찰하였다. 이후 스프링 복원력에 의한 물체의 속도 증가는 작용 유체력을 증가시킴을 관찰하였다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

References

- Bai, W. Mingham, C.G. Causon, D.M. & Qian, L., 2010. Finite Volume Simulation of Viscous Free Surface Waves using the Cartesian Cut Cell Approach. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 63(1), pp.69-95.
- Das, K. & Batra, C., 2011. Local Water Slamming Impact on Sandwich Composite Hulls. *Journal of Fluids and Structures*, 27(4), pp.523-551.
- Gao, F. Ingram, D.M. Causon, D.M. & Mingham, C.G., 2007. The Development of a Cartesian Cut Cell Method for Incompressible Viscous Flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 54(9), pp.1033-1053.
- Gilmanov, A. & Sotiropoulos, F., 2005. A Hybrid Cartesian/Immersed Boundary Method for Simulating Flows with 3D, Geometrically Complex, Moving Bodies. *Journal of Computational Physics*, 207(2), pp.457-492.
- Goring, D.G., 1979. *Tsunamis—the propagation of long waves on to shelf*. Ph.D. Pasadena: California Institute of Technology.
- Heo, J.K. & Park, J.C., 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), pp.425-432.
- Qian, L. Causon, D.M. Mingham, C.G. & Ingram, D.M., 2006. A Free-Surface Capturing Method for Two Fluid Flows with Moving Bodies. *Proceedings of the Royal Society A*, 462(2065), pp.21-42.
- Seo, J.H. Jung, J.H. Yoon, H.S. Park, D.W. & Chun, H.H., 2012. Laminar Flow Structures Near a Circular Cylinder in between a Free-Surface and a Moving Wall. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(3), pp.213-221.
- Shin, S. Bae, S.Y. Kim, I.C. Kim, Y.J. & Goo, J.S., 2007. Computations of Flow over a Flexible Plate using the Hybrid Cartesian/Immersed Boundary Method. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 55(3), pp.263-282.
- Shin, S. Bae, S.Y. Kim, I.C. Kim, Y.J. & Yoon, H.K., 2012. 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*, 68(3), pp.360-376.
- Shin, S. Kim, I.C. & Kim, Y.J., 2010. Numerical Simulation of Free Surface Flows using the Roe's Flux-Difference Splitting Scheme. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(1), pp.11-19.
- Sriram, V. & Ma, Q.W., 2012. Improved MLPG_R Method for Simulating 2D Interaction between Violent Waves and Elastic Structures. *Journal of Computational Physics*, 231(22), pp.7650-7670.
- Yoon, H.K. & Shin, S., 2012. Simulation of Sloshing in a Bi-Lobe Tank under Arbitrary Rotation using the FDS Scheme and the HCIB Method. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(11), pp.3491-3501.



신 상 목

김 인 철

김 용 직