

하이브리드 기법을 이용한 고정된 해양구조물에 작용하는 파랑하중에 관한 수치 시뮬레이션

남보우* · 홍사영* · 김용환**

*한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양구조물·플랜트연구부

**서울대학교 공과대학 조선해양공학과

Numerical Simulation of Wave Forces acting on Fixed Offshore Structures Using Hybrid Scheme

Bo-Woo Nam*, Sa Young Hong* and Yonghwan Kim**

Marine Structure & Plant Research Department, MOERI/KORDI, Daejeon, Korea

**Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

KEY WORDS: Hybrid scheme 하이브리드 기법, Wave force 파랑력, Finite volume method (FVM) 유한체적법, Volume-of-fluid (VOF) method VOF법

ABSTRACT: In this paper, the diffraction problems for fixed offshore structures are solved using a hybrid scheme. In this hybrid scheme, potential-based solutions and the Navier-Stokes-based finite volume method (FVM) with a volume-of-fluid (VOF) method are combined. We introduce a buffer zone for efficient wave-making and damping. In this buffer zone, the near field solution from FVM-VOF is gradually changed to Stokes' 2nd order wave solutions. Three different models, including the truncated cylinder, sphere, and wigleyIII model, are numerically investigated in regular waves with a wave steepness of 1/30. The efficiency and accuracy of the hybrid scheme are numerically validated from results using different domain sizes and buffer zones. The wave exciting forces from the FVM-VOF simulations are compared with experiments and potential-based solutions from the higher-order boundary element method (HOBEM). This comparison shows good agreement between the hybrid scheme and potential-based solutions.

1. 서 론

해양구조물 주위의 유동에 대한 수치계산을 수행할 경우 적절한 수치 모델링을 통해 계산영역을 한정할 필요가 있으며, 그에 합당한 경계조건이 필요하다. 특히 해양파가 존재하는 경우 한정된 계산영역에서 파를 얼마나 정확히 생성(또는 소파)하는지는 수치해석 해의 정확도와 밀접한 연관을 가진다. 일반적으로 파의 정도를 높이기 위해서는 자유표면 근처에 조밀한 격자가 요구되며, 특히 VOF(Volume-of-fluid)기법과 같이 고정 좌표계에서 자유표면을 추적하는 방법은 경계면의 변화를 정확히 표현하기 위해서 많은 격자점이 필요하다. 또한 모든 수치기법은 수치적인 감쇠와 위상왜곡을 포함하기 때문에 생성된 파가 전파되는 동안 점차 파고 및 파장이 변화를 일으키게 된다. 또한 파와 구조물의 상호작용에 의한 회절 및 반사파들에 대한 적절한 처리가 요구된다. 이러한 파 생성 및 소파에 관한 수치적인 어려움을 극복하고자 최근 Biauasser et al.(2003)과 Bunnik et al.(2008)은 포텐셜 기반의 해와 VOF기법의 해를 결합한 하이브리드 기법을 제안한 바 있다. 하지만 기존의 하이브리드 기법의 대부분은 파고가 높은 극한파(또는 쇄파)에 대한 문제를

주로 다루었으며, 또한 구조물에 의한 회절 및 반사파에 대한 특별한 고려가 부족하였다. 최근에 Kim et al.(2010)은 양방향 결합을 통해 회절 및 반사파에 대한 고려를 극복하였으며, 규칙 파 및 장시간의 불규칙파 시뮬레이션을 통해 개발된 기법의 유효성을 보여주었다. 하지만 그의 방법은 2차원에 한정되어 있었으며, 점성 유동장 내에 와(Vorticity)가 생기면 그 해를 포텐셜 계산영역으로 결합하기 어려운 단점이 있다. 남보우와 홍사영(2010)은 포텐셜 기반의 유한요소법과 VOF법을 결합하여 단방향(One-way) 하이브리드 기법을 제안한 바 있으며, 천이 영역(Buffer zone)을 둬으로써 회절 및 반사파에 대한 적절한 처리가 이루어지도록 하였다. 수치예제로 규칙파, 불규칙파 및 집중파에 대한 시뮬레이션을 수행하고 검증하였다.

본 연구에서는 남보우와 홍사영(2010)의 하이브리드 기법을 확장하여 고정된 해양구조물에 대한 파 회절문제(Wave diffraction problem)에 적용하였으며, 파고가 낮은 규칙파 중 파랑력에 관한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 절단 실린더 모델을 이용하여 계산영역을 변화시켜 가면서 파랑하중 및 파고를 관찰하여, 하이브리드 기법이 유효하게 적용될 수 있는지를 살펴본다. 다음으로 구와 WigleyIII 모델을 이용하여 하이브리드 기

교신저자 남보우: 대전광역시 유성구 신성로104(장동 171), 042-866-3934, bwnam@moeri.re.kr

본 연구는 한국해양연구원 주요연구사업 '해양구조물의 극한 응답해석기술개발'의 연구결과 중 일부임을 밝힙니다.

법에 의한 파랑하중 결과와 포텐셜 기반의 수치해와 비교하여 개발된 기법의 검증 수행하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 유한체적법

비압축성 점성유동의 지배방정식은 질량보존에 근거한 연속 방정식(Continuity equation)과 운동량 보존으로부터 유도되는 운동량 방정식(Momentum equation)으로 구성된다. 이들 지배 방정식을 적분형태로 표시하면 다음과 같다(Ferziger and Peric, 2002).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho u_j n_j dS = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho u_i d\Omega + \int_S \rho u_i u_j n_j dS = \int_{\Omega} \left(\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho b_i \right) d\Omega \quad (2)$$

여기서 Ω 는 검사체적(Control volume)이며, S 는 검사체적을 둘러싼 표면을 가리킨다. 스칼라양인 ρ 와 p 는 각각 유체밀도와 압력이다. x_i 는 Cartesian 좌표이며, u_i 는 그에 대응하는 속도 성분이다. n_i 는 검사표면 S 에서의 단위 법선벡터를 나타내며, τ_{ij} 는 점성 유효응력을 나타낸다. b_i 는 단위 체적력(Body forces) 성분이며 중력을 포함한다. 본 논문에서는 난류모델은 고려되지 않았다. 본 연구에서는 Cartesian 격자를 이용하여 유동계산을 수행하였으며, 2단계의 Fractional step method를 이용하여 시적분을 수행하였다. 물체에 대해서는 Fadlun et al.(2000)에 의한 가상경계법(Immersed boundary method)을 이용하여 모사하였으며, 이 경우 조밀한 Cartesian 격자를 이용하여 계단형상 또는 공극률을 이용하여 근사적으로 물체형상을 표현하게 된다.

이상유동(Two-phase flow)에 대한 문제를 해결하기 위해 자유표면을 암시적으로 다루는 VOF기법을 적용하였다. 이 기법에서는 두 유체를 하나의 단일 유체로 취급하고, 유체의 밀도와 점성은 식 (3)과 (4)와 같이 체적비율(Volume fraction), α 에 따라 자유표면 근처에서 공간적으로 변하게 된다.

$$\rho = \rho_1 \alpha + \rho_2 (1 - \alpha) \quad (3)$$

$$\mu = \mu_1 \alpha + \mu_2 (1 - \alpha) \quad (4)$$

VOF기법에서는 지배방정식과 함께 α 에 대한 이송 방정식을 추가적으로 풀게 된다. 본 연구에서는 Ubbink and Issa(1999)의 제안을 따라 이송방정식 (5)의 시간항은 2차의 Crank-Nicholson 방법을 이용하였으며, 대류항은 CICSAM기법을 이용하여 이산화하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \alpha d\Omega + \int_S \alpha u_j n_j dS = 0 \quad (5)$$

2.2 하이브리드 기법

포텐셜 유동 해석기법은 수치 감쇠가 적어 생성된 파를 멀리 정확히 전파할 수 있다. 하지만 자유표면이 쇄파하거나 분리, 결합되는 현상을 표현할 수 없고, 구조물 근처에서의 점성효과

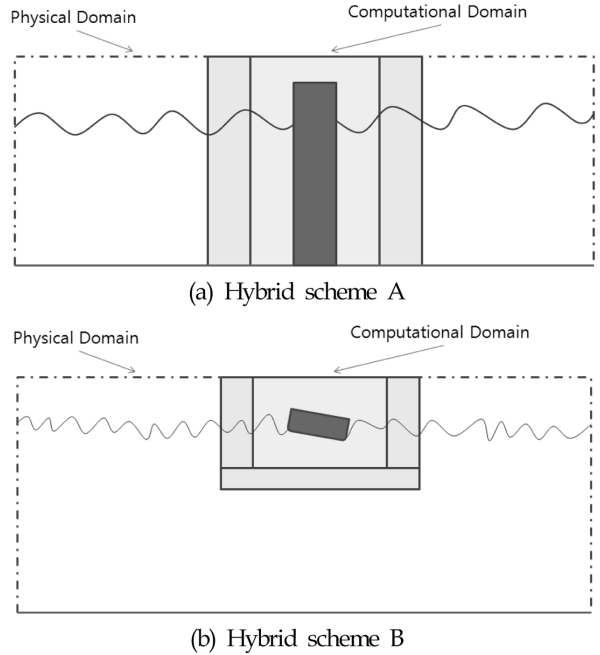


Fig. 1 Two hybrid scheme

를 정확히 반영하기 힘들다. 반면 Navier-Stokes 방정식을 직접 계산할 경우 정확하고 효율적인 파 생성이 힘들다. 본 연구에서는 그러한 두 방법의 장점을 결합한 하이브리드 기법을 이용하여 효율적인 파 생성 및 전파를 구현하였다. 두 기법을 결합하는 방법으로 Kim et al.(2003)이 포텐셜 해석에서 사용한 방법을 확장하여 적용하였다. 즉 Fig. 1의 계산영역 외곽의 천이영역에 식 (6)과 같이 운동량 방정식에 부가적인 체적력을 포함하여 입사파를 점차적으로 강제하여 파를 생성하게 된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho u_i d\Omega + \int_S \rho u_i u_j n_j dS = \int_{\Omega} \left(\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho b_i + \beta(u_i - u_i^I) \right) d\Omega \quad (6)$$

여기서 u_i^I 는 포텐셜 유동 해석에 의한 유속을 나타내며, β 는 감쇠계수이다. 천이영역은 Fig. 1(a)처럼 평면방향으로만 천이영역을 설정할 수 있으며, 때론 수심이 깊은 경우 Fig. 1(b)에서처럼 깊이방향으로도 계산영역을 절단할 필요가 있다.

남보우와 홍사영(2010)의 연구에서는 포텐셜 해로 유한요소법을 이용한 수치해석 해를 이용하였으나, 본 연구에서는 규칙파에 한정되어 수치 시뮬레이션을 수행하였기 때문에 포텐셜 유동을 따로 풀지 않고 포텐셜 모델기반의 해석체인 Stokes' 2nd wave를 이용하였다.

3. 수치해석 결과 및 검증

3.1 절단 실린더

개발된 하이브리드 기법의 효율성을 확인하기 위하여 계산영역의 크기를 변화시켜 가며 파고 및 파랑하중의 변화를 관찰하였다. Fig. 2에서 보인 것처럼 계산영역을 3가지로 달리하여 수

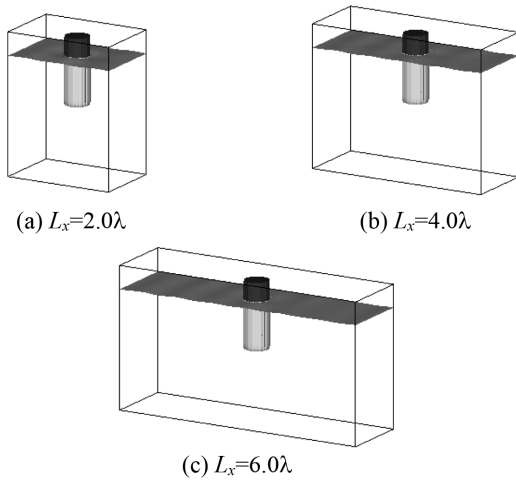


Fig. 2 Domains with different size ($k_0a = 2.0$)

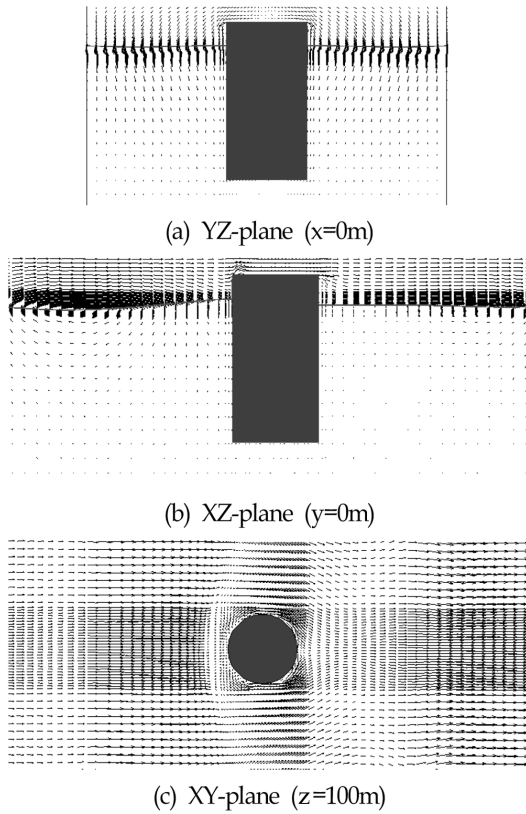


Fig. 3 Velocity field around truncated cylinder ($k_0a = 2.0$, $T = 8$ sec)

치시물레이션을 수행하였다. 여기서 절단실린더의 홀수는 반지름의 3배에 해당하는 모델이다. $k_0a = 2.0$ 인 규칙파를 생성하였으며, a 는 실린더 반지름이며, k_0 는 ω^2/g 에 해당한다. Fig. 3은 수치시물레이션에 대한 속도장을 3가지 단면에 대해 보여주고 있다. 자유표면과 물체표면 근처에 격자가 조밀하게 배치된 모습을 확인 할 수 있으며, 유동이 파의 진행에 따라 부드럽게 진행되어 감을 확인할 수 있다. 상대적으로 밀도가 낮은 공기영역에서 높은 속도가 발생하며, 파장이 실린더의 직경보다 매우 길기 때문에 물체의 의한 교란파에 의한 영향이 비교적 작게 나

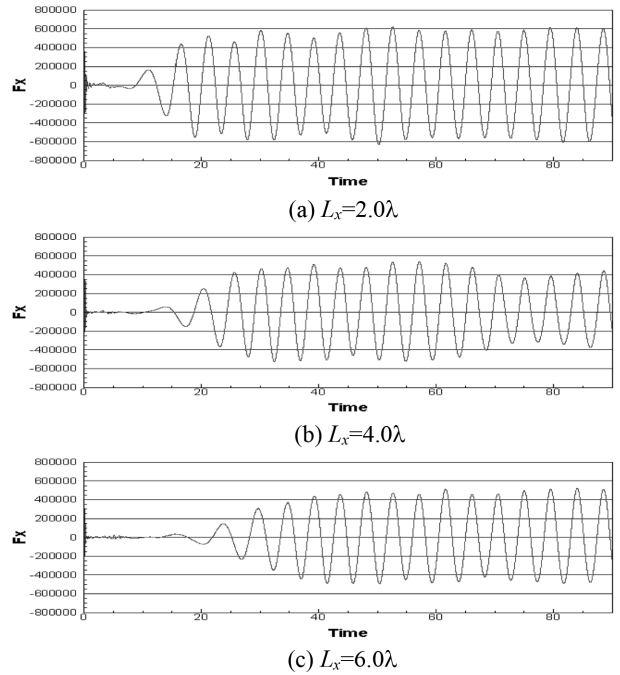


Fig. 4 Comparison of horizontal wave force time history using conventional wave making ($k_0a = 2.0$)

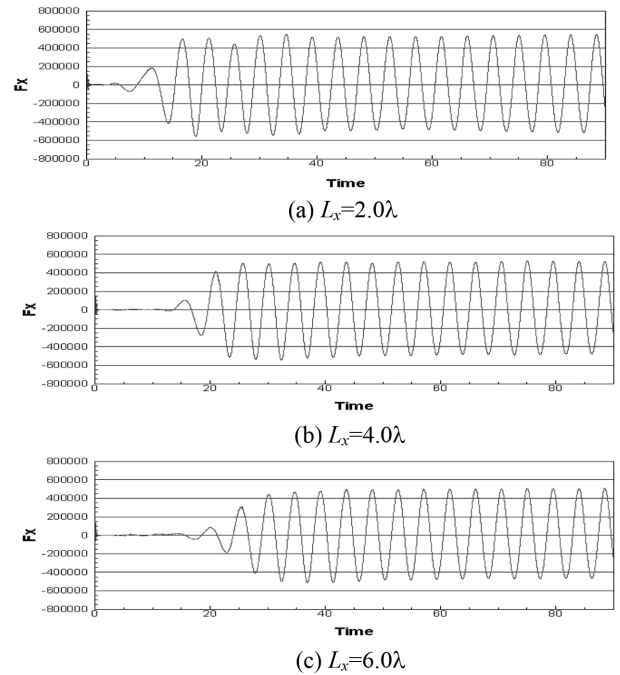


Fig. 5 Comparison of horizontal wave force time history using hybrid scheme ($k_0a = 2.0$)

타남을 볼 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 속도경계조건만을 이용한 조파기법을 이용한 경우와 하이브리드 조파기법을 이용한 경우에 각각의 계산 영역을 이용했을 때의 파랑하중 시계열을 비교하여 보여주고 있다. 천이 영역 없이 속도경계조건만을 이용할 경우 반사파에

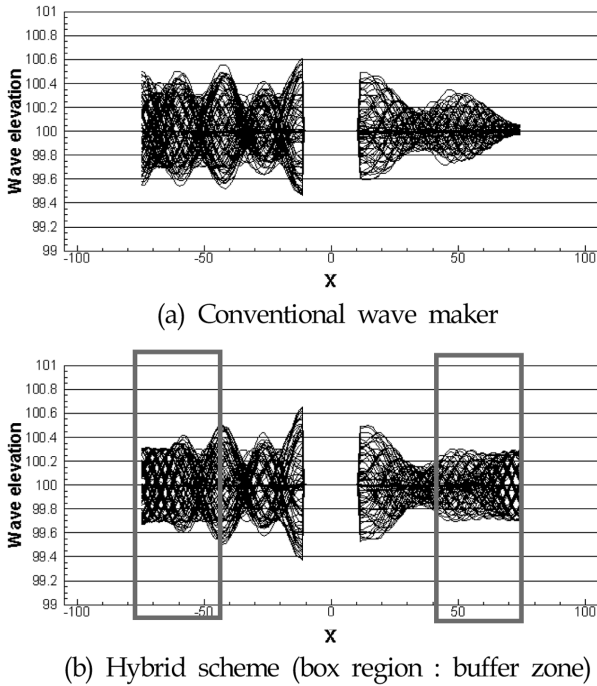
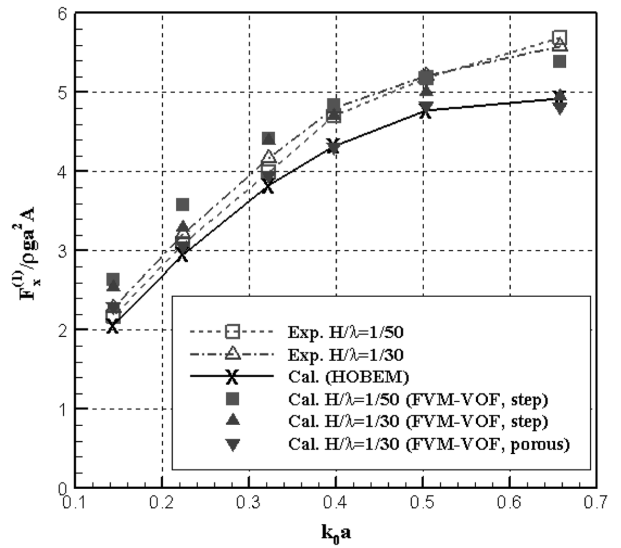


Fig. 6 Comparison of wave elevations ($L_x = 4.0\lambda$, $k_0a = 2.0$)

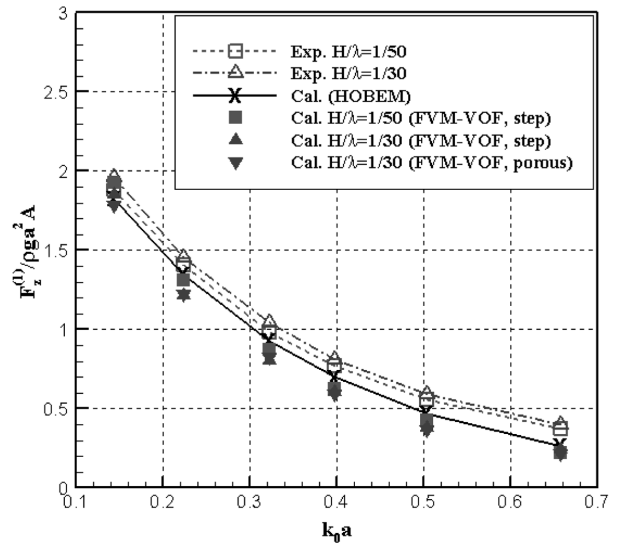
의해서 시계열이 규칙파임에도 불구하고 진폭의 변화가 발생함을 볼 수 있다. 반면 하이브리드 조파기법을 이용할 경우 천이 영역의 영향으로 반사파가 잘 흡수되고 입파사만 전달됨을 알 수 있으며, 그로 인해 작은 계산영역만 이용할 경우에도 매우 안정되게 파랑하중을 계산할 수 있음을 보여준다.

Fig. 6은 $y=0$ 의 중심선을 따라서 전체 공간적 파고 분포를 전체 시뮬레이션 시간에 대해 중첩해서 보여주고 있다. 이 경우 특별한 반사파 처리를 하지 않을 경우 Fig. 6(a)와 같이 실린더 앞부분에 정상파가 생성되어 조파면까지 해가 오염이 되지만, Fig. 6(b)에서처럼 천이영역 두어 포텐셜 해를 강제한 경우에는 경계면에서 입사파가 영향을 받지 않고 그대로 생성되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 7은 성홍근 외(2007)의 파랑하중 모형 시험과 동일한 절단 실린더 모델을 이용하여 수치해석을 수행한 결과이다. Fig. 7(a)와 (b)는 하이브리드 기법(A)을 적용하여 계산된 파랑하중의 수평 및 수직 성분을 각각 모형시험 결과와 비교하여 보여주고 있다. 두 개의 파기울기($H/\lambda = 1/50, 1/30$)에 대해 수치시뮬레이션을 수행하였으며, 비교를 위해 포텐셜 기반의 고차경계요소법(Choi et al., 2001)에 의한 수치해석결과를 같이 표시하였다. 모든 주파수 영역에서 하이브리드 기법에 의한 수치계산은 모형 시험 결과와 전체적인 경향이 모두 잘 일치하고 있다. 다만 산란계수(k_0a)가 큰 영역, 즉 파장이 짧은 영역에서 파기울기 1/30의 수치계산에 의한 수평력은 모형 시험 결과보다 다소 작게 나타나고 있으며, 산란계수가 작을 때 파 기울기 1/50의 수치계산은 모형 시험 결과보다 약간 크게 나타남을 볼 수 있다. 수직력의 경우에는 모형 시험, 고차경계요소법, 그리고 하이브리드 기법에 의한 결과가 경향과 크기 모두 잘 일치함을 확인할 수 있다. 하이브리드 기법에 의한



(a) Horizontal force



(b) Vertical force

Fig. 7 Comparison of wave exciting forces acting on truncated cylinder

결과 중 1/30 기울기에 대해서는 두 가지 가상경계법, 즉 계단형상에 의한 물체 표현과 공극률을 이용한 물체표현 모두를 이용하여 수치계산을 수행하였다. 이 경우 두 수치계산은 전반적인 결과는 거의 동일하였으나, 수평력의 경우 산란계수가 작은 영역에서 공극률을 이용한 결과가 모형 시험 결과와 더 유사함을 확인할 수 있다. 이는 공극률을 이용할 경우 동일한 격자에서 원형 실린더 형상을 더 가깝게 표현해주기 때문으로 생각된다.

두 번째 하이브리드 기법(B)의 유효성을 살펴보기 위해서 Fig. 8에서처럼 깊이가 다른 세 가지 계산영역에 대해 수치 계산을 수행하였다. Fig. 9(a)와 (b)는 계산영역의 깊이를 다르게 하였을 경우 수평 파랑력에 미치는 영향을 두 개의 파주파수에 대해 각각 보여주고 있다. 이 경우 바닥경계면에는 포텐셜해로

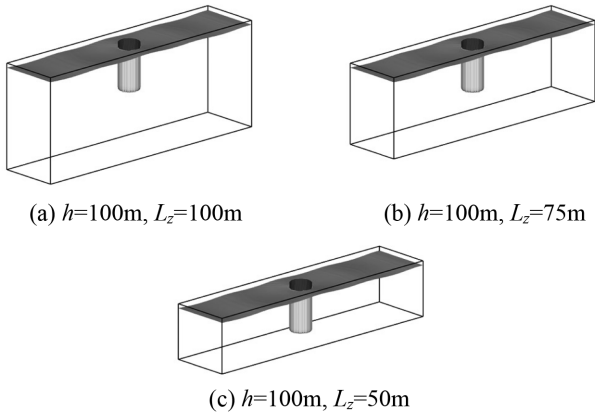


Fig. 8 Three different domain for hybrid scheme B ($k_0a = 2.0$)

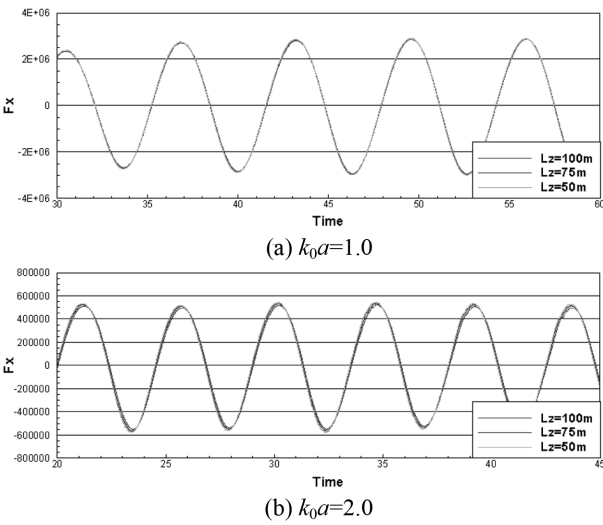


Fig. 9 Comparison of force time history

부터 얻은 속도장을 부여하였으며, 본 계산에서는 깊이 방향으로는 천이영역을 두지 않았다. Fig. 9에서처럼 바닥방향으로 산란 및 회절파에 대한 고려를 하지 않았음에도 불구하고 계산된 파랑하중은 깊이방향 계산영역 크기와 상관없이 거의 동일함을 알 수 있다. 본 계산모델은 주어진 파 조건에서 두 번째 하이브리드기법(B)에 의한 수치 시뮬레이션이 해의 정확도에 크게 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다.

3.2 Sphere

구 형상에 대한 수치 시뮬레이션을 앞서 확인한 하이브리드 기법 B를 이용하여 수행하였다. 이 경우 반구의 반지름은 10m이며, 수심은 100m이다. 규칙파의 파장은 20m~60m까지 5개의 파에 대해 수치시뮬레이션을 수행하였으며, 모든 파 기울기는 1/30으로 동일하다. 계산영역은 앞 절의 수치계산을 토대로 길이방향으로 파장의 6배에 해당하는 갖게 하고, 폭방향으로는 파장의 2배에 길이로 설정하였다. 깊이 방향으로는 정수면으로부터 20m 아래부터 계산영역을 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 수치격자는 약 110만의 유한체적을 갖는다. Fig. 10은 수치

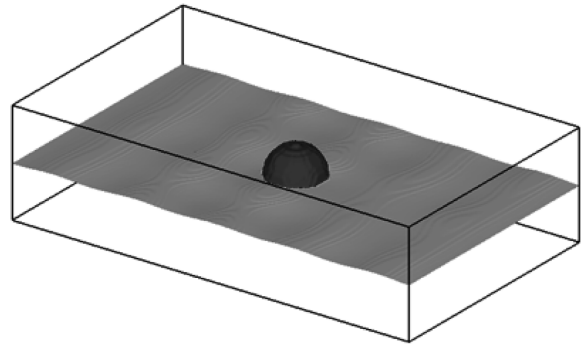


Fig. 10 Snapshot of sphere simulation ($L_w = 20$ m)

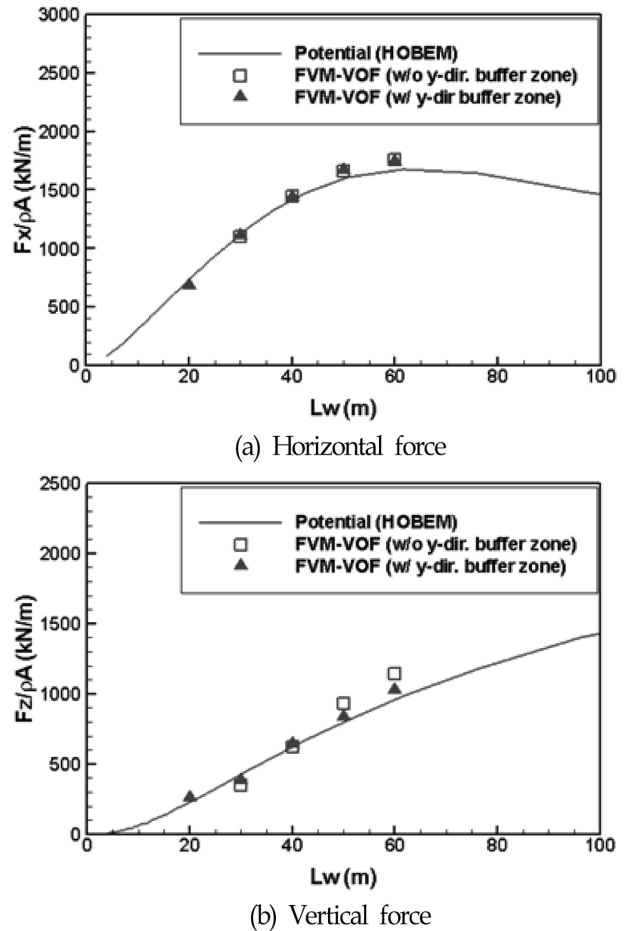


Fig. 11 Comparison of wave exciting forces acting on sphere

시뮬레이션에 의한 자유표면 형상을 보여주고 있으며, Fig. 11(a)와 (b)는 각각 수직과 수평하중에 대해 하이브리드기법에 의한 결과를 고차경계요소법(Choi et al., 2001)을 이용한 포텐셜 해석결과와 비교하여 보여주고 있다. 본 계산은 포텐셜 해석결과와 높은 일치도를 보여주고 있으며, 특히 길이방향(x-dir)뿐만 아니라 폭 방향(y-dir)으로 천이 영역을 둘 경우 포텐셜 수치 해석 해와 좀 더 가까워짐을 확인할 수 있다. 이는 폭 방향의 천이 영역이 벽면효과를 줄여줄 수 있음을 수치적으로 확인해 주고 있다.

3.3 WigleyIII

Journée(1992)에 의해 제안된 WigleyIII 선박 형상에 대해서도 하이브리드 기법 B를 이용하여 수치시뮬레이션을 수행하였다. 이 경우에도 4개의 파장에 대해 파기울기 1/30인 규칙파로 수치시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 12는 수치 시뮬레이션에 의한 자유표면 형상을 보여주고 있으며, Fig. 13(a)와 (b)는 각각 선체에 작용하는 수직과 수평하중을 포텐셜 모델에 기반한 고차경계요소법의 결과와 비교하여 보여주고 있다. 수평력이 약간의 차이를 보이지만 전체적인 경향과 크기는 대체로 잘 일치함을 확인할 수 있다.

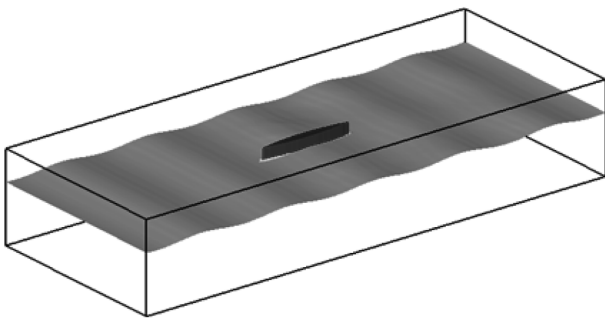
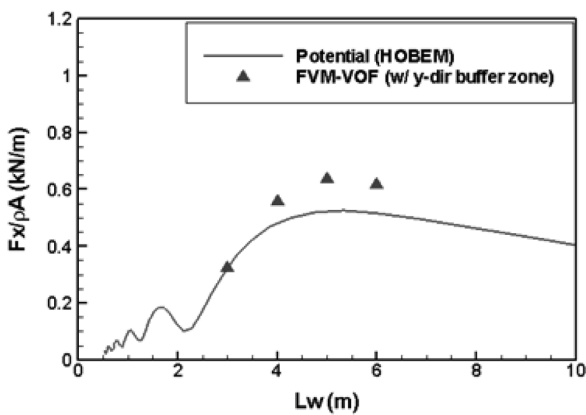
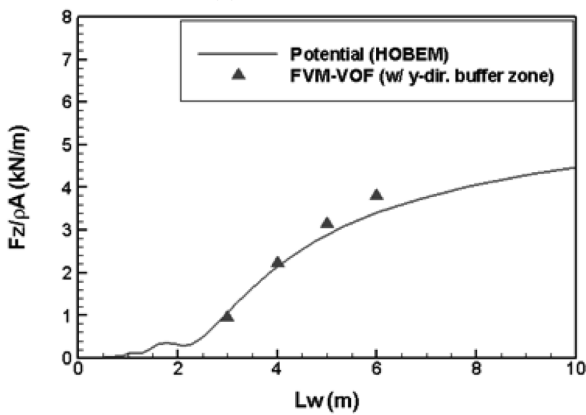


Fig. 12 Snapshot of wigleyIII simulation



(a) Horizontal force



(b) Vertical force

Fig. 13 Comparison of wave existing forces acting on wigleyIII model

4. 결 론

본 논문에서는 Navier-Stokes 모델과 포텐셜 모델을 결합한 하이브리드 모델을 이용하여 다양한 해양구조물에 대해 파랑하중 계산을 수행하였다. 천이영역(Buffer zone)을 이용하여 포텐셜 해를 점차적으로 강제함으로써 반사파의 영향이 줄어들면서 효율적인 수치계산을 수행하였다. 개발된 기법에 대해 계산영역을 변화시켜가며 파랑하중 및 파고를 관찰하여, 개발된 기법의 유효성을 수치적으로 살펴보았다. 또한 절단실린더와 구, WigleyIII선형에 대해 규칙파 시뮬레이션을 수행하여, 수직 및 수평 파랑력을 실험 또는 포텐셜 기반의 고차경계요소법 결과와 비교하여 하이브리드기법의 정확도를 검증하였다.

후 기

한국해양연구원의 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

남보우, 홍사영 (2010). "하이브리드 기법을 이용한 효율적인 파 생성기법에 관한 연구", 춘계 한국해양공학회, pp 2485-2488.

성홍근, 김영식, 남보우, 홍사영 (2007). "원형실린더에 작용하는 파랑하중에 대한 실험적 고찰", 추계 한국해양공학회, pp 105-111.

Biausser, B., Grilli, T.S. and Fraunie, P. (2003). "Numerical Simulations of Three-dimensional Wave Breaking by Coupling of a VOF Method and a Boundary Element Method", 13th ISOPE, Hawaii, pp 333-339.

Bunnik, T., Veldman, A. and Wellerns, P. (2008). "Prediction of Extreme Wave Loads in Focused Wave Groups", 18th ISOPE, Vancouver, pp 32-38.

Choi, Y.R., Hong, S.Y. and Choi, H.S., (2001). "An Analysis of Second-order Wave Forces on Floating Bodies by Using a Higher-order Boundary Element Method", Ocean Engineering, Vol 13, No 5, pp 117-138.

Fadlun, E.A., Verzicco, R., Orlandi, P. and Mohd-Yusof, J. (2000). "Combined Immersed-Boundary Finite-difference Methods for Three-dimensional Complex Flow Simulations", Journal of Computational Physics, Vol 161, pp 35-60.

Ferziger, J.H. and Peric, M. (2002). Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer-Verlag, Heidelberg.

Journée, J.M.J. (1992). Experiments and Calculations on 4 Wigley Hull Forms in Head Waves, Report0909, Delft University of Technology.

Kim, J.W., Kyoung, J.H., Ertekin, R.C. and Bai, K.J. (2003). Wave Diffraction of Steep Waves by Bottom-mounted Vertical Cylinders, 22th OMAE, Canvun.

Kim, S.H., Yamashiro, M. and Yoshida, A. (2010). "A Simple

Two-way Coupling Method of BEM and VOF Model for Random Wave Calculations”, Coastal Engineering, Vol 57, pp 1018-1028.

Ubbink, O. and Issa, R.I. (1999). “A Method for Capturing Sharp Fluid Interfaces on Arbitrary Meshes”, Journal of

Computational Physics, Vol 153, pp 26-50.

2010년 10월 15일 원고 접수

2010년 10월 25일 심사 완료

2010년 12월 17일 게재 확정