연직인장계류된 원형부유체의 파랑응답에 관한 연구 A Study on Wave Responses of Vertical Tension-Leg Circular Floating Bodies

이광호* · 김창훈** · 김도삼***

Kwang Ho Lee*, Chang Hoon Kim** and Do Sam Kim***

요 지 : 본 연구에서는 규칙파동장에 있어서 인장계류된 원형부유체의 파랑응답해석에 2차원 Navier-Stokes solver에 기초한 새로운 수치파동수조모형을 제안하였다. 본 수치파동수조모형에서는 이동구조물과 유체와의 상호작용을 해석하기 위하여 직각좌표계에서 임의형상의 불투과경계를 갖는 구조물과 유체와의 연성해석이 가능한 IBM(Immersed Boundary Method)과 자유수면 추적을 위한 VOF(Volume of Fluid)법을 결합하였다. 부유체운동에 대한 수치결과를 기존의 FAVOR(Fractional Area Volume Obstacle Representation)법에 의한 계산결과 및 수리실험과 비교하였다. 게다가, 수치모형의 보다 자세한 검증을 위하여 원형부유체의 동요 및 자유수면변동에 관한 수리모형을 추가로 실시하였고, 제안된 수치모형의 범용성과 타당성을 검증하기 위하여 직사각형부유체에 대한 수치 및 수리실험도 병행하였다. 이로부터 추정된 수치계산결과는 실험결과를 잘 재현하고 있는 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 수치파동수조, IBM, VOF법, 부유체, 부유체운동, 자유수면변형

Abstract : In the present study, we proposed a new numerical wave tank model to analyze the vertical tension-leg circular floating bodies, using a 2-D Navier-Stokes solver. An IBM(Immersed Boundary Method) capable of handling interactions between waves and moving structures with complex geometry on a standard regular Cartesian grid system is coupled to the VOF(Volume of Fluid) method for tracking the free surface. Present numerical results for the motions of the floating body were compared with existing experimental data as well as numerical results based on FAVOR(Fractional Area Volume Obstacle Representation) algorithm. For detailed examinations of the present model, the additional hydraulic experiments for floating motions and free surface transformations were conducted. Further, the versatility of the proposed numerical model was verified via the numerical and physical experiments for the general rectangular floating bodies. Numerical results were compared with experiments and good agreement was archived.

Keywords : numerical wave tank, IBM, VOF method, floating body, floating motion, free surface transformation

1. 서 론

최근, 연안이용의 다변화 및 환경에 대한 높은 사회적 관심에 따라 해안 및 해양구조물은 파랑 및 표사제어와 같은 구조물의 1차적인 기능성뿐만 아니라, 경제성, 경관 및 친환경 등과 같은 다양한 부가적인 기능성까지도 요구되고 있다. 이러한 사회적 요구에 부응하기 위하여 기존의 중력식구조물에 해수소통구를 설치하여 항내에서 수질악화를 최소화하거나, 구조물의 마루 위에 다양한 친수구조물을 설치하여 주변경관과의 조화를 도모하는 등의 많은 시도가 이루어져 오고 있다. 하지만, 중력식구조물은 기본적으로 해수순환을 차단하는 구조물로, 소규모 어항 등에서는 수질악화에 대한 위험성을 항상 내포하고 있다. 한편, 부유식구조물은 중력식구조물에 비해 1) 제

체 하부의 유수역을 통한 해수교환이 탁월하고, 2) 지반개량이 필요하지 않으며, 3) 구조물 주변의 지형변동이나 저서생물에 대한 영향이 적고, 4) 현장시공에 대한 공정이 거의 없으며, 구조물의 설치와 이설이 용이하고, 5) 현지조건에 따라 단면 형상을 다양화할 수 있는 등의 많은 장점을 지닌다. 따라서, 오래 전부터 여러 형태의 부유식구조물에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다. 대표적으로 Iwata et al.(1990)은 수리모형실험으로부터 계류된 잠수부유체와 고정부유체에 의한 쇄파발생기구와 특성 및 잠수부유체의 동요특성을 고찰하여 surging형쇄파와 plunging형쇄파의 중간형태의 쇄파가 존재한다는 것을 확인하였다. 또한, 부유체를 이용한 파랑제어구조물로 air-chamber를 이용하여 부유체의 고유주기를 제어할 수 있는 압축공기형부방파제(Kim and Iwata, 1992), 잠수수평판을 이용

*일본나고야대학 사회기반공학전공(Department of Civil Engineering, Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan)

**현대건설 토목환경사업부 토목환경기술개발실(Hyundai Engineering & Construction, Gye-dong, Jongno-gu, Seoul 110-920, Korea)

***한국해양대학교 토목공학과(Corresponding author : Do Sam Kim, Department of Civil Engineering, Korea Maritime University, Busan, 606-791, Korea, kimds@hhu.ac.kr)

한 하이브리드소파제(Kojima et al., 1998), 소파성능을 증가시키기 위하여 개발된 커튼식부방파제(Nakamura et al., 2000) 등의 신형식부유체들도 활발하게 제안되어 왔다. 국내에서도 마산시 원전어항에 커튼식부방파제가 처음으로 도입·설치되었으며, 김 등(2004)은 원전어항에서 채용하고 있는 부방파제를 대상으로 커튼판의 위치와 형태의 변화 및 수평판의 부착 유무에 따른 다양한 단면형상에 대한 파랑제어기능을 검토하였고, 이·송(2005)은 환경사방정식을 이용하여 부방파제가 설치된 원전어항을 대상으로 정온도 해석을 수행하였다.

한편, 이와 같은 부방파제의 소파성능에 대한 유효성을 검증하기 위하여 포텐셜이론에 기초한 경계요소법이나 고유함수전개법과 같은 수치모델들이 주로 적용되어 왔다. 그러나, 부유체의 우각부에서 발생하는 와류나 마루 위에서 발생하는 월파 및 쇄파와 같은 수리현상은 파랑제어성능 및 구조물의 동적응답과 직접적으로 관련되는 중요한 현상임에도 불구하고 기존의 수치모델에서는 이러한 현상들을 도입하기에 이론적인 한계가 있어 왔다.

Ataur Rahman et al.(2006)은 계산격자상에서 부유체가 점유하는 체적을 고려하는 FAVOR(Fractional Area Volume Obstacle Representation)을 적용하여 부유체의 파랑응답을 직접 해석할 수 있는 모델을 제안하였다. 하지만, FAVOR법에 의한 파랑응답해석에서는 일반적인 데카르트좌표계에 의한 이산화방정식에 기초하고 있기 때문에 부유체의 질량보존이나 이동경계면에 대한 경계조건의 취급 등에 있어서 많은 문제점을 포함하고 있고, 또한 곡면과 같은 복잡한 형상의 구조물에 적용하는 경우에는 그 적용성에 결정적인 단점을 가지고 있다. 구조물의 형상에 대한 재현성 및 경계조건과 연관된 문제들은 구조물의 형상에 따라 계산격자를 구성하는 구조물적 합격자법 등을 적용하여 해결할 수 있지만, 자유수면의 추적에 있어서 정도가 떨어지며, 구조물 주변의 격자형성에 많은 시간이 소요되는 등의 문제점도 포함하고 있다. 따라서, 최근에는 기존의 데카르트좌표계상에서 임의형상의 불투과경계를 갖는 물체와 유체와의 연성해석이 가능한 IBM(Immersed Boundary Method)이 수치유체역학의 다양한 분야에서 접목이 시도되고 있다. IBM은 본래 인체의 심장 내에서 혈류를 해석하기 위하여 Peskin(1977)에 의해 제안된 수치계산기법으로, 최근에는 혈류의 시뮬레이션뿐만 아니라, 수치유체역학의 다양한 분야에서 활용되기 시작하고 있다(Choi et al., 2007). 해안공학분야에 있어서도 Lee and Mizutani(2009)는 Lima e Silva et al.(2003)에 의한 directing-forcing IBM을 자유수면의 추적기법인 VOF법과 결합한 새로운 수치파동수조모델을 제안하였고, 수중에 고정된 수평원주 주변의 파동장에 적용함과 동시에 작용파력에 대한 실험결과와 비교하여 새로운 수치파동수조모델의 유효성을 검증하였다. Lee and Mizutani(2009)에 의한 수치파동수조모델에 적용된 IBM의 또 다른 장점 중의 하나는 계산에서 물리량의 위치를 나타내기 위한 Euler 좌표계와 구조물의 경계를 표현하기 위한 Lagrangian 좌표를 동

시에 적용하고 있기 때문에 이동경계를 추적할 수 있는 가능성에 있다.

본 연구에서는 고정수중구조물의 해석을 위하여 기개발된 Lee and Mizutani(2009)의 수치파동수조모델을 부유구조물로 확장적용하며, 더불어 전술한 바와 같이 기존의 데카르트좌표계상에서 곡면을 갖는 구조물도 해석가능한 IBM을 인장계류된 원형부유체에 적용하여 부유체의 파랑응답에 관한 유한변위의 해석수법을 구축하는 것을 목적으로 한다. 그리고, 데카르트좌표계에서 구조물의 형상표현이 비교적 용이한 직사각형부유체에 대한 수리 및 수치실험도 동시에 실시하여 수치모델의 범용성을 검토한다. 단, 본 연구에서는 IBM에 의한 부유체구조물의 파랑응답해석으로 적용범위를 한정하여 부유체의 회전운동을 구속시킨 연직계류부유체만을 해석대상으로 하였다.

2. 수리모형실험

연직계류된 직사각형 및 원형단면을 갖는 부유체를 대상으로 부유체 주변의 파동장 및 부유체의 파랑응답에 따른 변위에 관한 수리모형을 실시하였다. 단, 계산격자상에서 부유체가 점유하는 체적을 고려하는 기존의 FAVOR법의 경우에 원형부유체의 재현이 불가능하므로 본 연구에서 적용하고 있는 수치파동수조와 정확도를 비교하기 위하여 직사각형부유체에 대한 실험을 부가적으로 수행하였다. 또한, 수리모형실험의 범위는 본 연구의 주된 목적인 수치파동수조모델의 부유구조물에 대한 적용성이라는 측면에서 제한된 조건하에 실시되었다.

수리모형실험은 일본 나고야대학 2차원조파수로 (폭 : 0.7 m, 높이 : 0.9 m, 길이 : 30 m)에서 수행되었으며, 조파수로에 Photo 1에 나타난 바와 같이 아크릴로 제작된 직사각형 (폭 : 0.68 m, 높이 : 0.15 m, 길이 : 0.4 m, 중량 28.6 kg) 및 원형부유체 (폭 : 0.68 m, 직경 : 0.25 m, 중량 21.0 kg)를 체인을 이용하여 인장상태로 계류하였다. 피스톤형조파기로부터 규칙파를 발생시켰으며, 수로의 양 끝단에는 소파장치를 설치하여 반사파를 제어하였다. 수리실험의 전체적인 개요를 Fig. 1에

(a) Rectangular floating body (b) Circular floating body

Photo 1. Models of floating body.

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental arrangement.

나타낸다. 수리실험에서 측정항목은 부유체 전후면에서 수면 변동, 부유체의 수평 및 연직운동진폭 및 계류삭의 장력으로 구성된다. 여기서, 부유체 주변의 수면변동은 부유체의 전면에 3점 (W2, W3 및 W4) 및 부유체의 후면에 2점 (W5, W6)에 설치된 용량식파고계를 이용하여 측정하였으며, 목표파고의 검증을 위하여 조파기의 전면 (W1)에도 파고계를 설치하였다. 부유체의 이동변위는 Photo 2에 나타내는 ± 10 cm의 계측범위를 갖는 레이저변위계를 수평방향과 연직방향에 각각 2대를 설치하여 계측하였으며, 레이저변위계의 표적으로 Photo 3과 같은 두께 0.5 cm의 발포우레탄플레이트로 제작된 표적을 부유체의 모형에 부착하였다. 레이저변위계 표적의 증량은 모형에 비해 매우 적기 때문에 부유체의 운동에 미치는 영향은 무시될 수 있는 것으로 가정하였다.

3. IB법에 기초한 수치파동수조

본 연구에서는 Lee and Mizutani(2009)에 의해 제안된 수

Photo 2. Installation of laser displacement sensors.

Photo 3. Manufactured laser target.

치파동수조모델을 이용하여 인장계류된 잠수부유체의 동적해석을 수행한다. 이하에는 Lee and Mizutani(2009)에 의해 제안된 수치파동수조모델의 개요와 부유체의 동적응답해석을 위한 계산기법에 대하여 기술한다.

3.1 기초방정식

본 연구에서 적용하고 있는 수치파동수조모델은 쇄파와 같이 크게 변형되는 자유수면의 형상을 정도 높게 추적할 수 있는 VOF법과 유체와 구조물간의 상호작용(Fluid-Structure Interaction; FSI)을 해석할 수 있는 IBM으로 구성된다. Fig. 2에 수치파동수조의 개요를 나타낸다. IBM에서는 계산영역에 위치한 구조물의 불투과경계조건을 만족시키기 위하여 운동방정식에 외력항을 도입하여 계산을 수행한다. 따라서, 수치해석코드에서 유체의 지배방정식은 비압축성점성유체에 대한 연속방정식 (1)과 Navier-Stokes 방정식 (2), 그리고 자유수면의 추적을 위한 유체유효함수 C에 대한 이류방정식(3)으로 각각 구성된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = Q \quad (1)$$

$$\frac{Du_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + 2\nu \frac{\partial D_{ij}}{\partial x_j} - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial Q}{\partial x_i} - g_i - \gamma u_j \delta_{j2} + L_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (u_i C)}{\partial x_i} = CQ \quad (3)$$

여기서, x_i 는 데카르트좌표에서 $i = 1, 2$ 는 x, z 에 대응하며, u_i 는 i 방향의 유속성분 (u, w), p 는 압력, ν 는 동점성계수, $Q = q(z,t)/\Delta x_s$ 는 조파를 발생시키기 위한 조파소스, $q(z,t)$ 는 조파소스가 위치하는 $x = x_s$ 에서의 소스강도, Δx_s 는 $x = x_s$ 에서의 x 방향의 격자길이, t 는 시간, g 는 중력가속도, ρ 는 유체밀도, D_{ij} 는 변형속도텐서, γ 는 부가감쇠영역에서 양의 값을 갖는 감쇠계수, δ_{j2} 는 Kronecker delta함수, L_i 는 IBM에서 고려하는 계산영역 내에서 구조물에 의한 i 방향의 외력항(이하, Euler force)이다. 또한, Euler force L_i 는 Dirac delta함수를 이용하여 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$L_i = \int_{\Omega} \tilde{L}_{ki} \delta(x_i - x_k) dx_k \quad (4)$$

여기서, Ω 는 데카르트좌표계를 따르는 계산영역, x_k 는 구조

Fig. 2. Schematic illustration of a numerical wave tank.

물경계에 위치한 Lagrangian point의 좌표, $\delta(x_i - x_k)$ 는 Dirac delta함수, $\tilde{L}_{ki}$ 는 구조물 경계면에서 산정되는 유체력(이하, Lagrangian force)의 강도이다.

본 연구에서는 이상의 기본식 (1)~(3)을 데카르트좌표상에 서 엇갈린격자(staggered grid)에 기초하여 이산화하였으며, 구성된 이산화방정식을 유한차분법으로 계산하였다. 또한, 속도와 압력간의 결합을 해석하기 위하여 pressure-free projection법을 사용하였고, 유체유효수 C 에 대해서는 Hirt and Nichols(1981)의 VOF법을 적용하였다. 그 외의 차분방법, 경계조건 및 수치 해석과정에 대한 상세한 사항은 이 등(2008)과 동일하다.

3.2 IBM의 개요

IBM은 Fig. 3에 제시된 바와 같이 계산영역 내에서 유체와 구조물의 상호작용을 해석하기 위하여 데카르트격자를 구조물경계면에 위치한 Lagrangian point와 결합하여 구조물의 경계면에서 산정되는 유체력으로부터 수치적으로 경계조건을 만족시키는 계산기법이다. 따라서, IB법의 계산정도는 구조물의 경계면에서 산정되는 유체력에 좌우된다고 할 수 있다. 이러한 유체력을 평가하기 위하여 다양한 방법들이 제안되어 왔다 (Mohd-Yusof, 1997; Gilmanov et al., 2003; Lima e Silva et al.,

2003; Choi et al., 2007). 본 연구에서는 Lima e Silva et al. (2003)의 PV (Physical Virtual) 모델을 적용하였다. PV 모델에 있어서 식 (4)의 Lagrangian force $\tilde{L}_{ki}$ 는 구조물의 경계면에 위치한 Lagrangian point에서 힘의 평형을 고려하면 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\tilde{L}_{ki} = \frac{\partial u_{ki}}{\partial t} + u_{kj} + \frac{\partial u_{ki}}{\partial x_j} - v \frac{\partial^2 u_{ki}}{\partial x_j^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_k}{\partial x_i} + g_i \quad (5)$$

여기서, u_{ki} 는 경계면에서 유속, p_k 는 경계면에서 압력, 아래 첨자 i 는 데카르트좌표계의 방향, x_k 는 Lagrangian point의 좌표이다. 즉, Lagrangian force는 위의 식으로부터 산정되는 유체의 이동속도 및 경계면의 형상을 고려하여 식 (1)과 (2)로부터 얻어지는 수립자의 유속벡터와 압력으로부터 계산된다. 여기서, 식 (5)의 유속 및 압력에 대한 공간미분은 Lagrangian의 보간다항식으로부터 다음의 식으로 계산된다.

$$\Phi_i(l) = \sum_{m=0}^n \Psi_m(l) \Phi_m \quad (6)$$

$$\Psi_m(l)_i = \prod_{\substack{n=0 \\ n \neq m}}^m \frac{x_i(l) - x_i(n)}{x_i(m) - x_i(n)} \quad (7)$$

여기서, l 은 계산영역에 있어서 임의좌표, m 은 보간에 이용되는 절점, Φ_i 는 l 에 있어서 i 방향의 속도 및 압력 등을 나타내는 물리량, n 은 보간다항식의 차수이다. 따라서, Fig. 3과 같이 구조물의 경계에 위치한 Lagrangian point와 구조물의 외부에 설정된 인접한 보간점을 이용하면 식 (5)의 각 방향에 대한 공간변화율의 계산이 가능하게 된다. 한편, 식 (5)의 시간미분항은 경계면에서 유체속도와 경계면의 이동속도가 동일하다는 조건을 고려하면 다음의 식으로 산정될 수 있다.

$$\frac{\partial u_{ki}}{\partial t} = \frac{\tilde{u}_{ki} - u_{fki}}{\Delta t} \quad (8)$$

여기서, u_{fki} 는 u_{ki} 가 정의되는 위치에서의 유속, $\tilde{u}_{ki}$ 는 구조물

Fig. 3. Interpolation for variables at Lagrangian points.

경계면의 속도이다. 따라서, 식 (6)~(8)을 (5)에 대입하여 구조물 경계면에 위치한 Lagrangian point에서의 Lagrangian force를 계산할 수 있으며, 식 (4)로부터 Euler force의 계산이 가능하다. Euler force를 계산하기 위한 식 (4)의 Dirac delta함수는 Griffith and Peskin(2005)에 의해 제안된 다음의 이산식을 사용하였다.

$$D_i(x_k) = \frac{1}{\Delta x \Delta z} \phi\left(\frac{x_k - x}{\Delta x}\right) \phi\left(\frac{z_k - z}{\Delta z}\right) \quad (9)$$

여기서, ϕ 는 분포함수로 다음과 같이 정의된다.

$$\phi(r) = \begin{cases} f(r) & ; \quad 0 \leq |r| < 1 \\ 0.5 - f(2 - r); & 1 \leq |r| < 2 \\ 0 & ; \quad 2 \leq |r| \end{cases} \quad (10)$$

$$f(r) = \frac{3 - 2|r| + \sqrt{1 + 4|r| - 4|r|^2}}{8} \quad (11)$$

본 연구에서 적용하고 있는 IBM에 기초한 수치파동수조모델의 보다 자세한 사항은 Lee and Mizutani(2009)를 참조하기 바란다.

3.3 부유체의 동적응답해석

부유체를 계류삭으로 연직계류한 경우 Fig. 4와 같이 부유체의 이동속도, 수평 및 연직운동진폭은 부유체의 경계면에 위치한 Lagrangian point에서 압력을 적분한 파력과 부유체의 자중 및 계류삭에 작용하는 장력으로부터 계산될 수 있다. 연직계류의 경우 부유체의 회전운동이 구속되므로 부유체의 응답에 대한 기초방정식은 다음의 식 (12)의 수평방향합력과 식 (13)의 연직방향합력, 식 (14)의 모멘트합력 및 부유체의 저면에서 해저면까지의 거리에 관한 식 (15)로 각각 구성된다. 또한, 부유체의 운동 중에는 계류삭의 길이변화를 고려하지 않는 식 (15)를 적용하였다.

$$\Sigma F_x = ma_x = H_1 - H_2 - 2(T_1 + T_2)\sin\theta \quad (12)$$

$$\Sigma F_z = ma_z = -V_1 + V_2 + W + 2(T_1 + T_2)\cos\theta \quad (13)$$

$$\Sigma M_{cg,x} + \Sigma M_{cg,z} + \Sigma M_{cg,T} = 0 \quad (14)$$

$$Z = \sqrt{L_1^2 - \Delta x^2} \quad (15)$$

여기서, m 은 부유체의 질량, a_x, a_z 는 수평 및 연직방향가속도, $\Sigma M_{cg,x}, \Sigma M_{cg,z}$ 는 수평 및 연직방향모멘트의 합, $\Sigma M_{cg,T}$ 는 계류삭의 장력에 의한 모멘트의 합이다. 또한, Δx 는 $t_0 + \Delta t$ 후의 부유체의 수평방향운동에 대한 진폭으로 다음의 식에 의해 계산된다.

$$\Delta x = u_x \Delta t + \frac{1}{2} a_x (\Delta t)^2 \quad (16)$$

한편, 부유체는 인장계류되어 있기 때문에 연직방향운동진폭은 수평방향운동의 진폭에 의해 발생된다는 가정하에 산정되었다. 이상과 같은 부유체운동방정식의 외력산정법은 유체의 운동방정식으로부터 산정된 유체력에 기초하여 계산되는 Weak coupling기법이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 FAVOR법과 IBM에 의한 계산정도의 비교

IBM에 의한 수치파동수조모델의 계산정도를 FAVOR법을 이용한 모델결과와 비교하였다. Ataur Rahman et al.(2006)의 수리실험조건과 동일한 잠수직사각형부유체 (폭 : 0.68 m, 높이 : 0.18 m, 길이 : 0.4 m, 중량 15.6 kg)를 대상으로, case1; 주기 $T = 1.1$ s, 파고 $H_i = 5.6$ cm, 수심 $h = 68.0$ cm, 마루수심 $d = 6.0$ cm, 파형경사 $H_i/L_i = 0.03$, case2; $T = 1.3$ s, $H_i = 7.4$ cm, $h = 65.0$ cm, $d = 3.0$ cm, $H_i/L_i = 0.03$ 을 각각 적용하였으며, 수치계산에서 적용된 수평 및 연직방향의 계산격자는

Fig. 4. Definition of external forces and movement of floating body.

$\Delta x = 2.0$ cm, $\Delta z = 1.0$ cm이다.

본 수치파동수조모델에 의한 부유체의 수평 (sway) 및 연직운동 (heave)의 진폭에 대한 수치해석결과와 FAVOR법에 기초한 Ataur Rahman et al.(2006)의 계산 및 실험결과를 Fig. 5에서 각각 비교한다. 여기서, Ataur Rahman et al.(2006)의 실험결과와 FAVOR법에 의한 Ataur Rahman et al.(2006)의 수치해석결과 및 본 수치해석결과는 각각 동일한 계산조건하에 수행되었다. Fig. 5로부터 FAVOR법에 의한 수치해석모델은 sway 및 heave의 실험결과를 과대평가하고 있다는 것을 확인할 수 있고, 더욱이 heave 진폭에 대한 예측결과는 sway 보다 정확도가 떨어지는 것을 알 수 있다. 한편, heave에 관한 계산결과에 주목하면 IBM에 기초한 본 연구의 수치파동수조

모델이 FAVOR법에 의한 계산결과에 비해 부유체의 운동을 보다 잘 재현하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 계산정도에서 IBM과 FAVOR법의 차이는, FAVOR법은 Euler 격자를 이용하여 구조물에 작용하는 외력을 산정하는 반면에, IBM은 구조물의 경계면에 위치시킨 Lagrangian point를 통하여 부유체와 파랑의 상호작용을 고려하기 때문이다.

4.2 부유체의 마루 위에서 발생하는 쇄파형

본 연구의 수치파동수조모델에는 VOF법에 기초한 자유수면추적법을 도입하고 있기 때문에 부유체에 의한 파랑변형을 검토하기 전에 수리실험결과로부터 부유체 주변에서 발생하는 수면변동의 특성을 고찰하는 것도 큰 의의를 가진다. 따라서, 제한된 조건하에 수리실험이 수행되었지만, 연속촬영된 사진 영상으로부터 부유체의 마루 위에서 발생하는 쇄파특성을 아래에서 논의한다.

부유체의 마루 위에서 발생하는 쇄파양상을 Photo 4에 제시한다. 연속사진의 좌측에서부터 시간경과에 따른 파랑변형 과정을 차례로 나열하였다. 입사파랑은 사진의 우측에서 좌측으로 진행하며, 부유체의 우측이 해측이고, 좌측이 육측에 각각 해당한다. 직사각형부유체의 경우를 살펴보면 Iwata et al.(1990)의 연구결과에서 확인된 바와 같이 부유체의 전면에서 입사파랑의 파고가 증가되어 부유체의 마루 위로 진행함과 동시에 surging형쇄파와 plunging형쇄파의 중간형태의 쇄파가 발생하는 것을 알 수 있다. 이에 반해 원형부유체의 경우는 직사각형부유체에 비해 보다 해측에서 spilling형쇄파가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 직사각형부유체에 비해 원형부유체의 경우는 부유체 주변의 수면변동이 완만하다는 것을 알 수 있다. 한편, 부유체운동은 단면형상에 따라 변위량에 차이를 나타내지만, 부유체 전면에 파봉이 위치할 경우는 육측으로 이동되고, 파곡이 위치할 경우는 해측으로 이동되는 일련의 운동특성을 나타낸다.

4.3 수리실험결과의 비교

IBM은 원형부유체와 같이 곡면을 갖는 단면형상에 대해서도

Fig. 5. Comparisons of floating motions between experiments and computations.

Photo 4. Snapshots of wave deformation around rectangular floating body ($T = 1.2$ s, $H_i = 8.5$ cm, $d = 6.5$ cm, $H_i/L_i = 0.04$, $\theta = 90^\circ$).

직사각형테카르트격자에서 수치시물레이션이 가능한 수법이 다(Lee and Mizutani, 2009). 따라서, 본 절에서는 직사각형 및 원형부유체를 대상으로 실시한 수치실험결과와 비교하여 본 연구의 IBM에 기초한 수치파동수조모델의 이동구조물로의 적용성을 검토한다. 계산조건은 실험조건과 동일하며, 또한 직사각형 및 원형부유체 모두 동일한 조건으로, case1; 주기 $T=1.0$ s, 파고 $H_i=4.6$ cm, 수심 $h=60.0$ cm, 마루수심 $d=6.5$ cm, 파형경사 $H_i/L_i=0.03$, case2; $T=1.0$ s, $H_i=4.6$ cm, $h=60.0$ cm, $d=14.0$ cm, $H_i/L_i=0.03$ 을 각각 적용하였다. 수치계산에서 사용된 수평 및 연직방향의 계산격자는 각각 $\Delta x = \Delta z = 1.0$ cm이다. 단면형상에 따른 계산결과를 구분하기 위하여 직사각형부유체의 결과를 case1_rec 및 case2_rec, 원형부유체의 결과를 case1_cir 및 case2_cir로 표기한다.

Fig. 6과 7은 case1 및 case2의 계산조건에 대하여 부유체의 전면과 배후에서 발생하는 수면변동의 수치해석결과와 수리실험결과를 비교한 것이다. 부유체의 전면에서 결과인 Fig. 6(a)~(c)의 수위변동에 대한 수리모형실험 및 수치해석결과를 살펴보면 거의 상하 대칭적인 정현파형을 띄고 있으며, 이러한 파형은 원형부유체의 경우가 직사각형부유체에 비해 보다 명확하게 관찰된다. 한편, 부유체의 배후에서 수면변동을 나타내는 Fig. 6(d)와 (e)를 살펴보면 직사각형부유체의 경우 구조물의 마루 위에서 쇄파된 파랑이 재생되는 영역으로, 파봉 분열에 의한 고주파성분이 발달하는데 비해 원형부유체의 경

우는 이와 같은 고주파성분이 크게 발달되지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

Case2에 대한 결과인 Fig. 7에서도 6과 유사한 경향의 수면변동이 관찰되지만 Fig. 7에서는 부유체의 마루수심의 증가로 인하여 마루 위에서 쇄파가 발생되지 않으며, 이로 인하여 Fig. 6의 case1의 직사각형부유체의 배후에서 관찰되는 고주파성분이 발달되지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 7의 원형부유체의 경우는 부유체의 길이가 직사각형부유체의 0.6배로, 입사파장에 비해 상대적으로 작기 때문에 배후에서도 거의 정현파형을 나타낸다. 본 연구에서 적용한 수치파동수조모델은 수면변동진폭의 크기와 위상에서 약간의 차이를 보이고 있으나, 부유체 주변에서 발생하는 일련의 파랑변형과정을 고 정도로 재현하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 본 수치파동수조모델로부터 계산된 부유체의 운동진폭 $\text{sway}(\Delta x/H_i)$ 와 $\text{heave}(\Delta z/H_i)$ 의 시간변화를 수리모형실험결과와 비교한 것이다. 연직방향운동 heave의 수치계산결과는 수리모형실험과 다소 차이를 나타내지만 상대적으로 큰 변위량을 갖는 sway의 경우는 실험결과에 더 근접한 결과를 나타낸다. 한편, 동일한 입사파주기와 각기 다른 잠수심을 갖는 case1 및 case2의 계산결과를 비교하여 보면 거의 유사한 운동진폭을 갖는다는 것을 알 수 있다. 따라서, 연직인장계류부유체의 경우는 파랑에 의한 부유체의 운동진폭이 마루수심에 비해 입사파랑의 주기에 좌우되는 것으로 판단된다.

Fig. 6. Comparison of wave profiles for case 1.

Fig. 7. Comparison of wave profiles for case 2.

Fig. 8. Comparisons of floating motions with experimental results.

본 수치파동수조모델로부터 산정된 부유체 주변의 대표적인 유속벡터분포를 Fig. 9에 제시한다. 또한, 그림에서 유체유효함수 C 로부터 얻어진 수면변동의 공간분포도 동시에 나타나며, 입사파랑은 부유체의 좌측에서 우측으로 진행한다. Fig. 9로부터 부유체는 시간의 경과와 더불어 부유체 전면에 파봉이 입사하는 경우에 해측으로 밀려나고, 파곡이 위치하는 경우에 해측으로 되돌아 가는 부유체의 파랑응답 특성이 관찰된다. 또한, 수리실험에서 확인된 바와 같이 부유체의 마루 위에서 쇄파 발생으로 인한 빠른 유속성분이 관찰되며, 배후역에서 파랑이 재생성되는 파랑변형의 공간분포를 확인할 수 있다. 한편, 원형부유체 주변의 유속분포는 직사각형부유체에 비하여 부유체 배후에서 발생하는 와의 형성이 상대적으로 어려우며, 주변 파동장에 미치는 영향도 미소하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 이상의 결과로부터 본 연구의 수치파동수조모델은 곡면을 갖는 고정구조물뿐만 아니라, 이동구조물에 대해서도 직사각형격자상에서 수치재현성이 매우 탁월하다는 것을 알 수 있다.

5. 맺음말

본 연구에서는 IBM에 기초한 수치파동수조모델을 부유체의 파랑응답해석에 확장·적용하였다. 특히, 곡면을 포함하는 임의형상의 구조물로의 적용성을 논의하기 위하여 직사각형 및 원형부유체를 해석대상의 구조물로 선정하였다. 수치파동수조모델의 검증에 위하여 부유체 주변의 수면변동 및 부유체의 운동진폭에 대하여 제한된 수리실험을 실시하여 수치계산결과와 비교·검토하였다. 그 결과, IBM에 기초한 본 연구의 수치파동수조모델은 직사각형부유체와 같은 단순한 이동구조물뿐만 아니라, 원형부유체와 같은 곡면단면형상을 갖는 이동구조물에 대해서도 기존의 데카르트격자상에서 정도 높게 부유체의 파랑응답해석이 가능하다는 것을 확인하였다. 특히, 다기능화의 요구에 따라 복잡한 단면형상을 갖는 최근 해안·항만구조물의 기능성해석에서 데카르트좌표계에 의존하는 기존의 수치해석모델을 본 수치파동수조모델로 충분히 보완

Fig. 9. Snapshots of velocity fields around a floating body.

할 수 있다는 점에서 큰 의의를 갖는다고 할 수 있다. 하지만, 본 연구에서는 회전운동을 구축한 연직계류부유체만을 고려하고 있기 때문에 실제 계류형태와 다소 상이할 수 있다. 또한, 본 연구에서 제안한 수치모델은 2차원에 기초하고 있기 때문에 3차원성이 지배하는 현상에 대한 적용성이 떨어진다. 향후에는 경사계류 및 이완계류를 고려할 수 있고, 3차원해석이 가능한 수치파동수조모델을 개발할 계획에 있다.

참고문헌

- 김도삼, 이광호, 최낙훈, 윤희면 (2004). 신형식 부방파제의 파랑제어에 관한 연구. 한국해양 · 해양공학회지, 16, 1-9.
- 이광호, 이상기, 신동훈, 김도삼 (2008). 복수 연직 주상구조물에 작용하는 비선형파력과 구조물에 의한 비선형파랑변형의 3차원 해석. 한국해양 · 해양공학회논문집, 20(1), 1-13.
- 이정열, 송무석 (2005). 부방파제를 이용한 원전항의 정온효과 수치해석. 한국해양환경공학회지, 8(1), 23-30.
- Ataur Rahman, M., Mizutani, N. and Kawasaki, K. (2006). Numerical modelling of dynamic responses and mooring forces of submerged floating breakwater. Coastal Engineering, 53, 799-815.
- Choi, J.L, Oberoi, R.C., Edward, J.R. and Rosati, J.A. (2007). An immersed boundary method for complex incompressible flows. Journal of Computational Physics, 224, 757-784.
- Gilmanov, A., Sotiropoulos, F. and Balaras, E. (2003). A general reconstruction algorithm for simulating flows with 3D, geometrically complex, moving bodies. Journal of Computational Physics, 191, 660-669.
- Griffith, B.E. and Peskin, C.S. (2005). On the order of accuracy of the immersed boundary method: Higher order convergence rates for sufficiently smooth problems. Journal of Computational Physics, 208, 75-105.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. Journal of Computational Physics, 39, 201-225.
- Iwata, K., Kim, D.S., Asai, T. and Shimoda, N. (1990). Experimental study on wave breaking on a submerged floating body. Proceedings of Coastal Engineering, JSCE, 37, 604-608 (in Japanese).
- Kim, D.S. and Iwata, K. (1992). Dynamic behaviour of tautly moored semi-submerged structure with pressurized air-chamber and resulting wave transformation. Coastal Engineering in Japan, JSCE, 34(2), 223-242.
- Kojima, H., Yan, S., Irie, I. and Sekimoto, T. (1998). Hydraulic properties of a vertically-moored hybrid wave absorbing structure. Proceedings of Coastal Engineering, JSCE, 45, 711-715 (in Japanese).
- Lee, K.H. and Mizutani, N. (2009). A numerical wave tank using directing-forcing immersed boundary method and its application to wave force on a horizontal cylinder. Coastal Engineering Journal, 15(1), 27-48.
- Lima e Silva, A.L.F., Silveria-Neto, A. and Damasceno, J.J.R. (2003). Numerical simulation of two dimensional flows over a circular cylinder using the immersed boundary method. Journal of Computational Physics, 351, 351-370.
- Mohd-Yusof, J. (1997). Combined immersed boundaries/B-splines methods for simulations in complex geometries. CTR Annual Research Briefs, NASA Ames / Stanford University.
- Nakamura, T., Kamikawa, H., Kohno, T. and Makimoto, K. (2000). Performance and wave force characteristics of a double curtain-walled breakwater with different drafts. Proceedings of Coastal Engineering, JSCE, 47, 951-955 (in Japanese).
- Peskin, C.S. (1977). Numerical analysis of blood flow in the heart. Journal of Computational Physics, 25, 220-252.

원고접수일: 2011년 3월 9일

수정본채택: 2011년 6월 1일

게재확정일: 2011년 6월 8일