

입자법에 의한 파랑중 2차원 부유체 운동 시뮬레이션

정성준* · 박종천** · 이병혁** · 류민철* · 김용수*

*대우조선해양(주) 선박해양 기술연구소

**부산대학교 조선해양공학과

Numerical Simulation of Two-dimensional Floating Body Motion in Waves Using Particle Method

SUNG-JUN JUNG*, JONG-CHUN PARK**, BYUNG-HYUK LEE**, MIN-CHEOL RYU* AND YONG-SOO KIM*

*Ship and Ocean R&D Institute, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co, Ltd, Geoje, Korea

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

KEY WORDS: Particle method 입자법, Moving particle semi-implicit (MPS) 입자간 상호작용 모델, Computational fluid dynamics 전산유체역학, Non-linear free surface 비선형 자유표면, Moon-pool 문풀, Two-dimensional floating body motion 2차원 부유체 운동

ABSTRACT: A moon-pool is a vertical well in a floating barge, drilling ship, or offshore support vessel. In this study, numerical simulation of two-dimensional moon-pool flow coupled with a ship's motion in waves is carried out using a particle method, the so-called MPS method. The particle method, which is recognized as one of the gridless methods, was developed to investigate nonlinear free-surface motions interacting with structures. The method is more feasible and effective than convectional grid methods in order to solve a flow field with complicated boundary shapes.

1. 서 론

문풀(Moon-pool)이란 일부 특수선의 목적에 따라 선체에 상하로 크게 뚫린 중앙개구부를 의미한다. 최근 심해로 해양 개발이 확대되면서 시추, 광물채취, 탐사 등의 목적으로 문풀을 갖는 특수선의 건조가 크게 증가하고 있다.

문풀의 유무가 선박에 미치는 영향에 대한 실험적 연구(김도정 등, 2006; 유재순과 최순호, 2004)가 수행되고 있으나, 수치 시뮬레이션으로 문풀이 존재하는 선박과 파도의 상호작용을 수치 시뮬레이션 하고자 한다면 자유표면의 처리와 선박의 운동에 필요한 격자계의 도입 그리고 문풀 내부유동의 표현 등 까다로운 수치 기법이 많이 필요로 하게 된다. 그래서 지금까지의 수치 시뮬레이션은 대부분 격자를 이용하여 문풀이 일정 속도로 이동하는 경우의 계산 등에 한정되었다(송지수와 박승오, 2003). 또한 유체-고체간의 상호연성 작용이 필요한 문제, 비선형성이 강한 자유표면 유동 문제 등의 해석에는 격자생성이 문제가 되어 해석의 어려움이 있다.

한편, 입자를 이용하는 수치 시뮬레이션인 SPH법(Monaghan, 1988), MPS법(Koshizuka and Oka, 1996) 등은 격자를 이용하는 해석방법보다 복잡한 물리현상을 해석할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 또한 입자법은 이류항(convection)의 계산을 완전한 라그랑지(Lagrangian) 접근에 의해 입자의 이동으로 계산함으로써

으로 계산함으로써 오일러(Eulerian) 접근 방법에서 심각하게 유발되는 수치확산이 없다. 그리고 복잡한 형상의 유동장을 풀기 위하여 격자 생성에 많은 어려움과 방대한 시간이 소요되는 격자법과는 달리 격자를 생성할 필요가 없다.

본 논문에서는 MPS법을 기본으로, 조파-소파 시뮬레이션을 하였다. 또한 생성된 파도와 함께 상호작용하는 부유체를 시뮬레이션 하였다. 부유체는 문풀을 포함하여 문풀 내부의 유동을 확인 할 수 있도록 하였으며, 빌지길의 유무에 따른 결과를 비교해 보았다.

2. 지배방정식

비압축성 점성 유동에 관한 지배방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes(N-S) 방정식으로 다음과 같다.

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F} \tag{2}$$

여기서 ρ 는 밀도, t 는 시간, \vec{u} 는 속도벡터, ∇ 은 구배 연산자, P 는 압력, ν 는 동점성계수, \vec{F} 는 외력을 각각 나타낸다.

연속방정식 (1)은 격자법에서 일반적으로 속도의 발산(Divergence)형으로 표시하는 반면, 본 연구에서는 밀도의 시

교신저자 박종천: 부산광역시 금정구 장전동 산 30

051-510-2480 jcpark@pusan.ac.kr

간 미분형으로 표시하였다. N-S 방정식 (2)의 좌변은 이류항을 포함한 전미분(Total derivative) 형태이고, 입자의 직접적인 이동에 의해 계산된다. 비압축성 점성 유동을 시뮬레이션 하기 위해서는 식 (2)의 구배항, 확산항 및 비압축성을 나타내는 입자간의 상호작용 모델이 필요하며, 본 연구에서는 이러한 모델들에 대하여 Koshizuka and Oka(1996)에 의해 제안된 MPS법을 도입하기로 한다. MPS법을 이용한 유체-구조물 상호작용에 대한 타당성 검증은 이병혁 등(2007a; 2007b), 김영훈 등(2007)에 상세히 소개되어 있으며 본 논문에서 생략하기로 한다.

3. 입자 상호작용 모델

MPS법에서는 연속체의 이산적인 계산을 입자 상호작용 모델을 통해서 행한다. 즉, 지배방정식의 편미분 연산자에 대응하는 입자간 상호 작용 모델을 만들고, 지배방정식의 각각의 항과 등가인 입자 상호 작용 모델로 치환한다. 각각의 모델들에 대한 상세한 검증은 이병혁 등(2007a)에 소개되어 있다.

3.1 커널 함수(Kernel function)

연속 유체는 입자의 속도성분, 질량, 압력과 같은 물리량으로 나타내어진다. 유체의 흐름은 입자들의 상호작용 움직임에 의해 가시화되므로 지배방정식은 입자간 상호작용으로 표시할 수 있다. MPS법에서 입자 상호 작용은 커널 함수에 기초하여 이루어져 있다. 본 연구에서 사용한 커널 함수의 구체적인 식은 식 (3)과 같으며 Fig. 1에는 그 형상을 나타낸다.

$$w(r) = \begin{cases} (1 - \frac{r}{r_e})^3 (1 + \frac{r}{r_e})^3 & r \leq r_e \\ 0 & r_e < r \end{cases} \quad (3)$$

여기서 r 은 두 입자 사이의 거리이고, r_e 는 입자 상호작용 범위를 나타내는 커널 크기(Kernel size)이다. 커널 함수는 두 입자 사이의 거리 즉 중심 입자에서 주변 입자까지의 거리에 따라 각각의 입자에 대하여 물리량의 가중치를 주는 것이다. 단, 임계거리 r_e 는 초기 입자 배치 상태에서 평균 입자간 거리 l_0 에 임의의 값을 곱하여 얻는다.

3.2 구배 모델(Gradient model)

입자 i 의 구배 모델은 입자 i 와 그 주변 입자 j 사이에서 구배 벡터를 $(P_j - P_i)(\vec{r}_j - \vec{r}_i) / |\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2$ 으로 계산하고 이것을 커널 함수로 평균 한 것이다(Fig. 2). 단, 구배 모델에서 동일한 입자에 대한 구배 벡터는 고려하지 않는다.

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{P_j - P_i}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} (\vec{r}_j - \vec{r}_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right] \quad (4)$$

여기서 d 는 계산 공간의 차원이고, n^0 는 초기 입자 배치 상태에서의 입자수밀도(Particle number density)이다. 입자 i 의 입

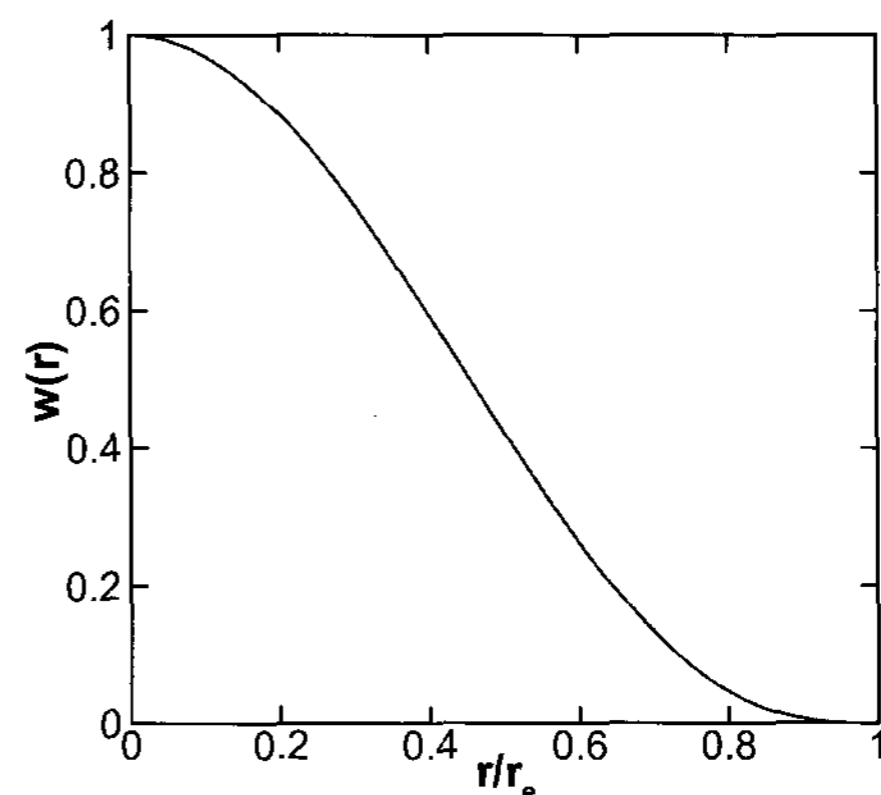


Fig. 1 Kernel employed in the present study

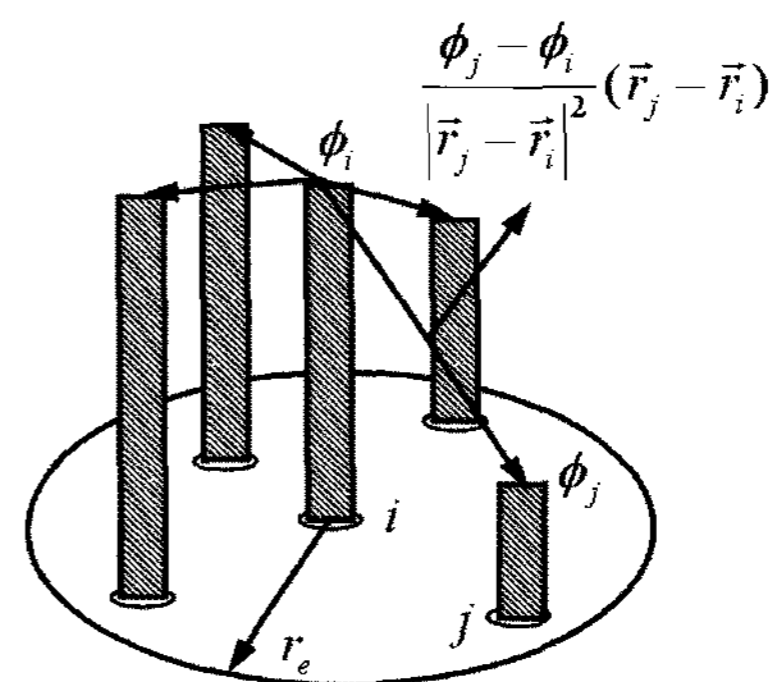


Fig. 2 Gradient model of MPS method

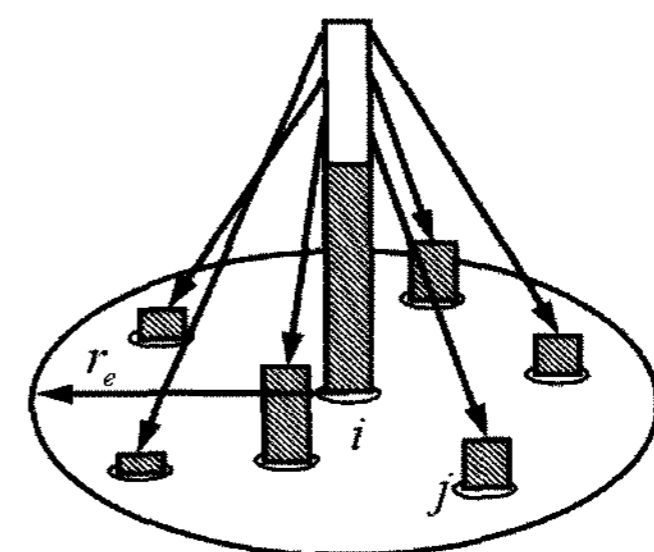


Fig. 3 Laplacian model of MPS method

자수밀도는 식 (5)과 같이 정의한다.

$$n_i = \sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \quad (5)$$

3.3 확산(Laplacian) 모델

수학 연산자인 라플라시안(Laplacian, ∇^2)은 물리적으로 확산을 의미하며, Fig. 3에서 표시하는 바와 같이 입자 i 가 갖는 물리량의 일부를 주위의 입자 j 쪽으로 커널 함수의 분포에 따라 분배해 주는 역할을 한다.

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle = \frac{2d}{\lambda n_i} \sum_{j \neq i} [(\phi_j - \phi_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)] \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) |\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2}{\sum_{j \neq i} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)} \cong \frac{\int_V w(r) r^2 dv}{\int_V w(r) dv} \quad (7)$$

식 (6)의 d 는 계산 공간의 차원, λ 는 해석해와 동일한 분산을 유지하기 위해 사용하는 계수이다.

3.4 비압축성 모델

만약 입자의 질량이 모두 동일하다면, 유체의 밀도는 입자수 밀도에 비례하므로 연속방정식 식 (1)은 입자수밀도가 일정하다는 조건과 동일하다.

MPS법에서는 비압축성 유동의 계산 알고리즘으로서 SMAC 법과 거의 유사한 알고리즘을 사용한다(Fig. 4). 매 시간스텝은 양과 음의 2단계로 나눈다. 시각 n 에 있어서 입자의 위치, 속도, 압력은 각각 \vec{r}_i^n , \vec{u}_i^n , P_i^n 라고 하면, 제 1단계에서는 점성항과 외력항의 계산을 통하여 입자의 중간속도인 \vec{u}_i^* 를 계산하고, 입자의 중간속도 \vec{u}_i^* 를 이용하여 입자의 중간위치 \vec{r}_i^* 를 계산한다. 즉, 식 (8)에 의한 입자의 이동은 격자를 사용하는 방법에 있어서 이류항의 계산에 해당된다. 계산된 입자의 중간 위치를 이용하여 입자수밀도 n_i^* 를 계산할 수 있다.

$$\vec{r}_i^* = \vec{r}_i^n + \Delta t \vec{u}_i^* \quad (8)$$

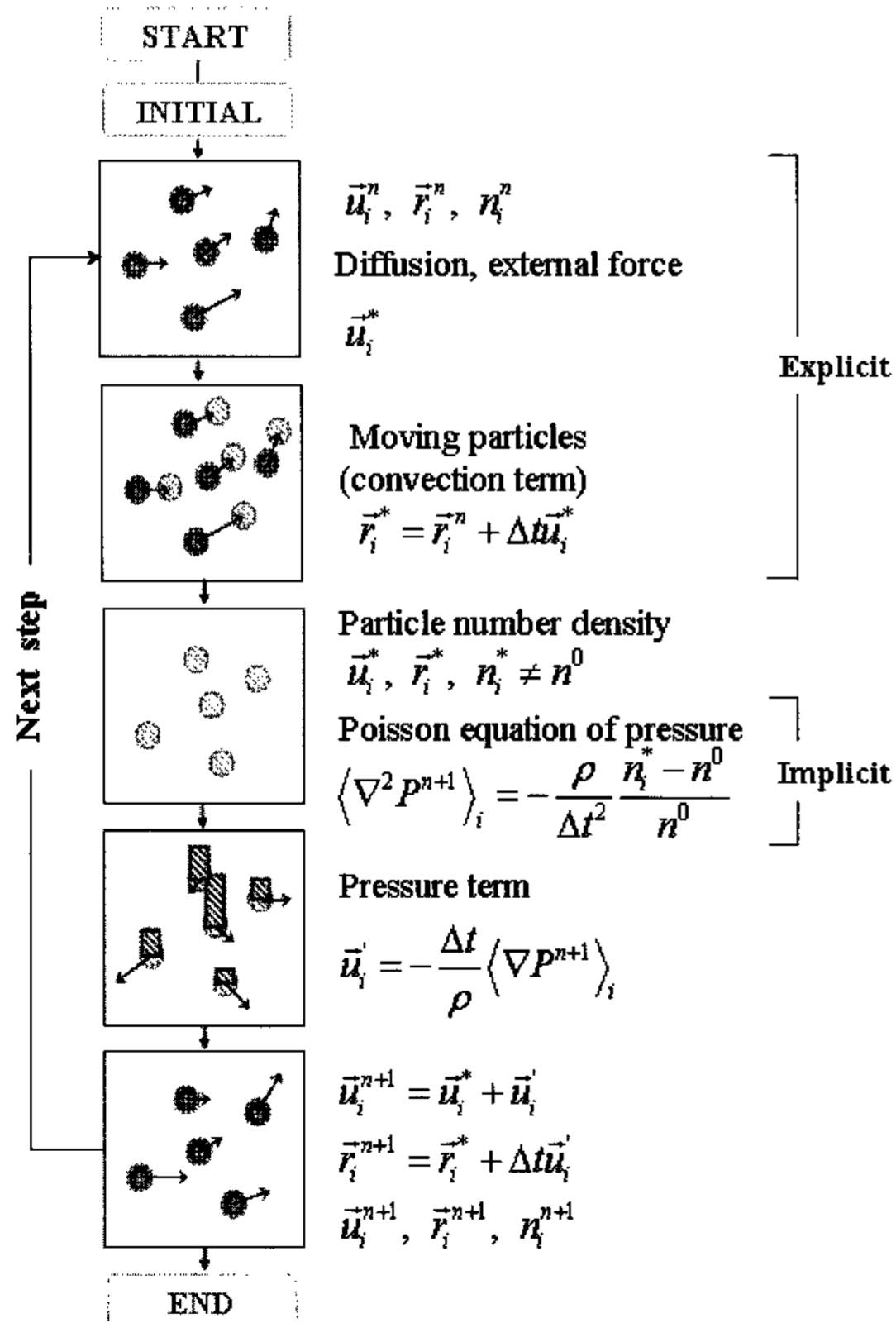


Fig. 4 Algorithm of the present particle method

제2단계에서는, 양적인 부분(제1단계)의 계산이 종료된 단계에서의 입자수 밀도를 n^* 라 할 때, n^* 는 n^0 와 동일하지 않다. 여기서 제2단계의 음적인 부분에서 입자수밀도를 n^0 와 동일하도록 설정한다. 이때, 입자의 위치, 속도, 압력 등 새로운 시각 $n+1$ 에서의 값들이 수정되었다면 다음과 같게 된다.

$$n^0 = n^{k+1} = n^* + n' \quad (9)$$

$$\vec{u}^{n+1} = \vec{u}^* + \vec{u}' \quad (10)$$

$$\vec{r}^{n+1} = \vec{r}^* + \Delta t \vec{u}' \quad (11)$$

여기서 n' 는 입자수밀도의 수정량, \vec{u}' 는 속도의 수정량이다. \vec{u}' 는 다음과 같이 음적인 압력구배항에 의하여 발생한다고 가정한다.

$$\vec{u}' = -\frac{\Delta t}{\rho_0} \langle \nabla P^{n+1} \rangle \quad (12)$$

속도의 수정량과 입자수밀도의 수정량은 압축성 유동의 질량 보존법칙

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (13)$$

이고, 좌변의 제 2항의 ρ 를 일정한 값 ρ_0 로 근사하면 다음 식이 얻어진다

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho_0 \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (14)$$

유체의 밀도는 입자수밀도에 비례하므로 다음과 같이 바뀌어 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{n^0} \frac{Dn}{Dt} + \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (15)$$

단, 입자수밀도의 수정량 n' 은 속도의 수정량 \vec{u}' 에 의해 발생한다. 동시에 시간에 대해서 이산화한다.

$$\frac{n'}{n^0 \Delta t} + \nabla \cdot \vec{u}' = 0 \quad (16)$$

식 (12)의 발산을 취하고 식 (16)에 대입하면 다음과 같이 압력에 관한 포아송(Poisson) 방정식이 얻어진다.

$$\langle \nabla^2 P \rangle^{n+1} = -\frac{\rho_0}{\Delta t^2} \frac{n^* - n^0}{n^0} \quad (17)$$

식 (17)의 우변은 제 1단계의 입자수밀도 n_i^* 와 초기 입자수밀도 n^0 와의 차를 나타낸다. 좌변은 확산 모델인 식 (6)을 사용하여 1차방정식으로 이산화 할 수 있으며, 적절한 반복해법에 의해 구할 수 있다. 구해진 압력을 식 (12)에 대입하여 속도의 수정치 \vec{u}_i' 를 계산한다.

최종적으로, 시각 $n+1$ 에서 입자의 속도와 위치는 각각 식 (10), (11)에 의해 새롭게 얻어진다.

본 방법과 SMAC법과의 차이는 이류항이 입자의 이동에 의해 직접 계산된다는 것과 압력의 포아송 방정식에 있어서 우변의 소스항이 속도의 발산이 아닌 입자수밀도로 표시되는 것이다.

3.5 자유표면 경계조건

자유표면 경계조건으로 운동학적 경계조건과 동역학적 경계조건이 있다. 본 연구에서 동역학적 경계조건은 자유표면 입자의 압력을 대기압과 동일한 0의 값으로 고정하고, 운동학적 경계조건은 자유표면 입자를 직접 이동하여 만족시킨다. 두 경계조건을 만족시키기 위해서는 자유표면 입자의 탐색이 선행되어야 하며, 자유표면의 판정조건에 입자수밀도(n^0)를 이용한다. 즉, 자유표면의 외부에는 입자가 배치되지 않으므로 자유표면상의 입자는 상대적으로 입자수밀도가 낮아지게 된다 (Fig. 5). 따라서 반응적 알고리즘에서 양적인 계산이 종료된 시점에서

$$n_i^* < \beta n^0 \quad (18)$$

을 만족하는 입자는 자유표면상에 존재한다고 가정한다. 단, β 는 상수이며 1.0 미만으로 한다. 이 조건은 자유표면의 형상을 고려할 필요 없이 모든 입자에 대해 동일하게 정의할 수 있으므로 유체 내부에 기체가 생기거나 유체가 분열·합체되는 경우에도 적용이 가능하다.

4. 선체 운동의 표현

4.1 고체 운동 계산 모델

유동과 상호작용하면서 이동하는 강체의 시뮬레이션은 격자를 사용하는 방법으로 계산하기 힘들다. 하지만 MPS법에서는 후술하는 비교적 간단한 계산 모델을 사용하였다(Koshizuka et al., 1998). 각 시간 스텝에 있어서 먼저 유체 입자와 고체 입자

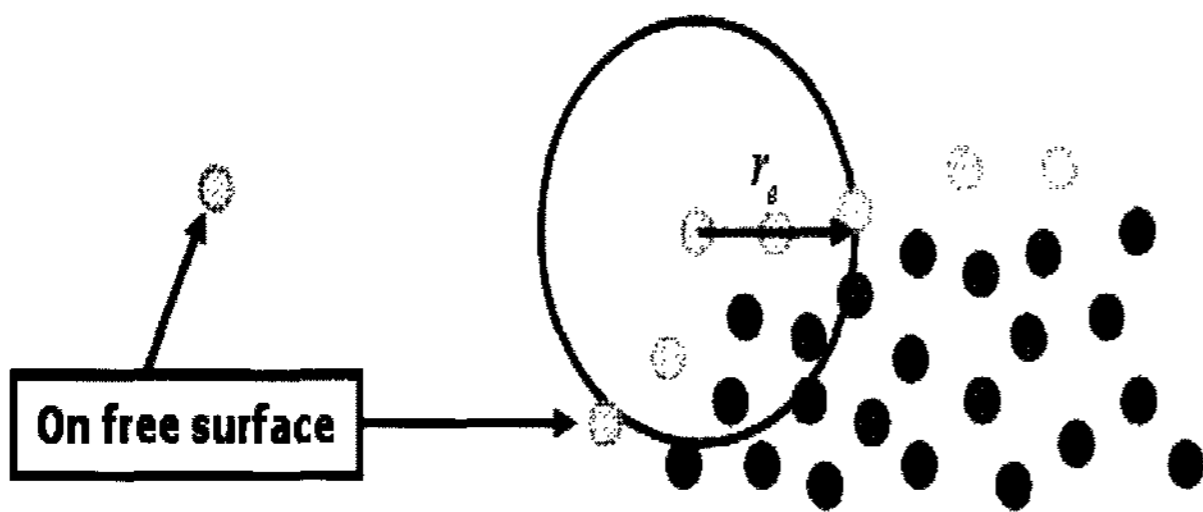


Fig. 5 Free-surface model of MPS method

를 구별하지 않고 동일하게 유체입자로서 비압축성 알고리즘의 계산을 행한다. 그 후 강제 입자사이의 어긋난 상대적 위치를 수정하는 계산을 강제 입자에 대해서만 행하게 된다.

고체 중심의 병진 속도 벡터 \vec{T} 와 각속도 벡터 \vec{R} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \vec{u}_i \quad (19)$$

$$\vec{R} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^n \vec{u}_i \times \vec{q}_i \quad (20)$$

단, \vec{r}_g 는 고체의 중심 좌표, I 는 관성모멘트, 그리고 \vec{q}_i 는 각 고체 입자와 중심과의 거리벡터이며 다음과 같이 구한다.

$$\vec{r}_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \vec{r}_i \quad (21)$$

$$\vec{q}_i = \vec{r}_i - \vec{r}_g \quad (22)$$

$$I = \sum_{i=1}^n |\vec{q}_i|^2 \quad (23)$$

식 (19)와 (20)으로 구한 고체 중심의 속도와 각속도를 이용하여 각각의 고체 입자들의 속도를 다음 식을 사용하여 재계산 한다.

$$\vec{u}_i = \vec{T} + \vec{q}_i \times \vec{R} \quad (24)$$

4.2 운동방정식의 적용

입자법에서 고체를 계산하는 또 다른 방법으로는, Fig. 6에 보이는 바와 같이 고체 표면에 작용하는 압력을 적분하여 고체에 작용하는 힘과 모멘트를 계산하고, 이를 운동방정식에 대입하여 직접 고체의 운동을 계산하는 방법이 있다(Sueyoshi, 2004). 이 방법은 부유체의 경계가 운동방정식으로 계산된 입자들로 표현되며, 이동격자나 수치 확산 등은 고려할 필요가 없다. 즉, 2차원에서 부유체의 운동방정식은 식 (25)과 식 (26)에 의해 부유체의 변위 및 각변위를 계산할 수 있다.

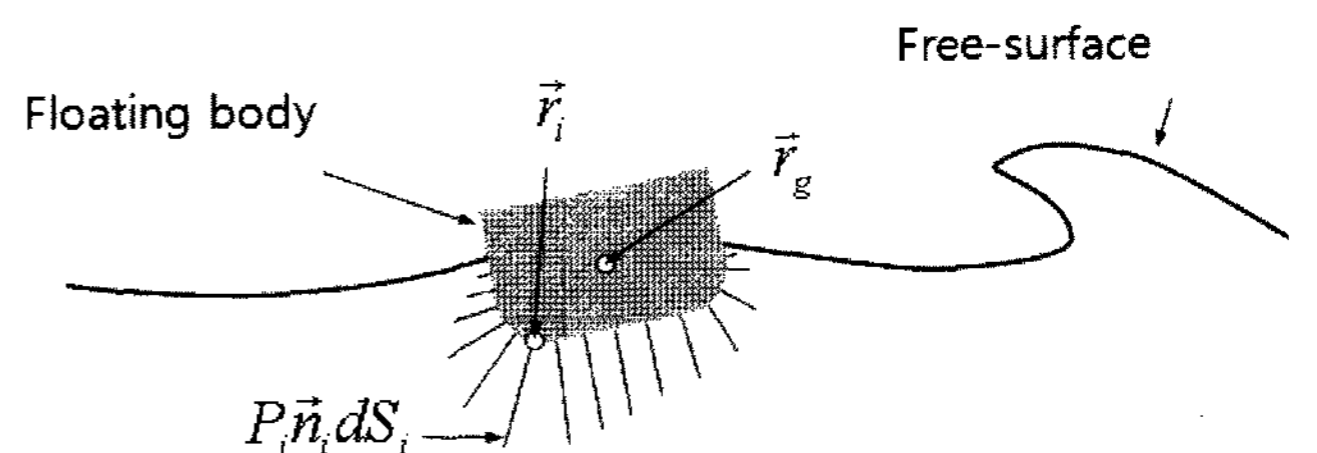


Fig. 6 Schematic of motion equation for 2D floating body simulation

$$m \frac{d^2 \vec{r}_g}{dt^2} = \vec{F} \quad (25)$$

$$I_{zz} \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \vec{M} \cdot \vec{k} \quad (26)$$

여기에서, m 은 고체의 질량, \vec{r}_g 는 고체의 중심 좌표, θ 는 회전축의 회전각도, I_{zz} 는 회전축에 대한 질량 관성모멘트, \vec{k} 는 2D 평면에서 수직방향으로의 법선 단위벡터이다. 한편, \vec{F} 와 \vec{M} 은 물체에 걸리는 유체력과 모멘트로서 각각 물체의 병진운동과 회전운동에 영향을 주며 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{F} = \sum_i \text{on the hull surface} \vec{P}_i n_i dS_i \quad (27)$$

$$\vec{M} = \sum_i \text{on the hull surface} (\vec{r}_i - \vec{r}_g) \times \vec{P}_i n_i dS_i \quad (28)$$

여기서 \vec{n}_i 는 표면 요소(입자)가 차지하는 면적 dS_i 에 법선 단위벡터이다.

4.3 부유체의 운동 시뮬레이션 비교

자유표면의 운동과 상호작용 하는 부유체를 계산하기 위해, 앞서 언급한 고체 운동 모델과 운동방정식을 이용한 방법을 비교하여 보았다. 비교를 위해서 Fig. 7과 같은 수조를 움직여, 수조 내부의 부유체가 보이는 운동 특성을 살펴보았다.

상부가 개방된 사각 수조는 길이 1.0(m), 높이 0.7(m), 정수면과 바닥과의 거리 0.3(m)이다. 수조의 중앙에는 비중이 0.5이며 길이 0.3(m), 높이 0.1(m), 홀수 0.05(m)인 사각 물체가 떠 있다. 초기 입자간 거리 l_0 는 0.01(m)이며, 계산 전체에 사용된 입자는 약 4,000개이다.

탱크는 다음 식에 의해 수평으로 주기운동하며, 내부의 유동을 발생시킨다.

$$A(t) = A_0 \sin(2\pi t / T) \quad (29)$$

여기서 A 는 시간에 따른 수조의 수평변위, A_0 는 진폭, T 는 주기를 나타낸다. 본 연구에서는 $A_0=0.01$ (m), $T=1.0$ (sec)의 비교적 안정적인 조건으로 시뮬레이션 하였다.

부유체 운동의 시뮬레이션 결과를 Fig. 8에 나타낸다. 단, (a)에는 고체 운동 모델을, (b)에는 운동방정식을 적용한 결과를 나타내며 두 방법 간에 부유체 운동의 큰 차이는 없어 보인다. Fig. 9에는 시간 진행에 따른 회전각의 변화를 나타내며, 수조의 움직임에 따라 1초의 주기로 5°~8° 전후의 회전운동하는 경향을 볼 수 있다. 하지만 운동방정식을 적용한 경우 전체적으로 시간에 따른 회전각의 변위차가 크게 나타나며, 고체 운동 모델을 사용한 경우 회전 각도의 시간변화가 다소 안정적

인 모습을 보인다. 따라서 본 논문에서는 부유체가 포함된 시뮬레이션에 고체 운동 모델을 적용하기로 한다.

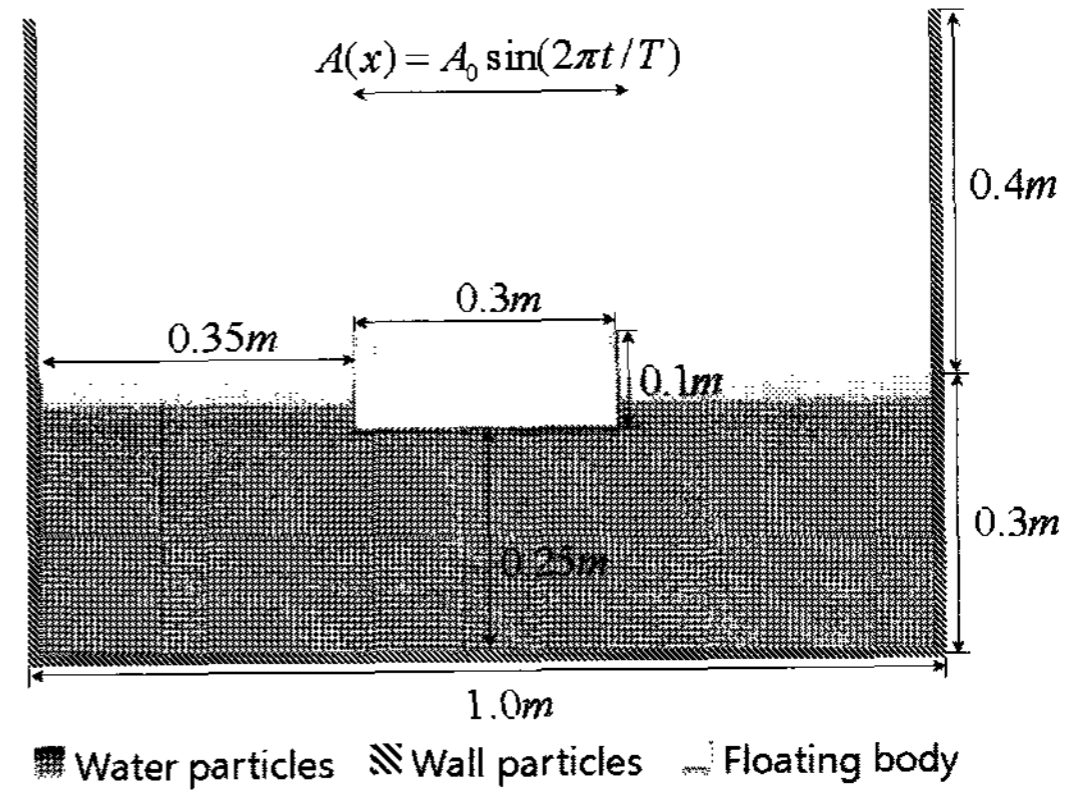


Fig. 7 Initial configuration of 2-dimensional floating body simulation

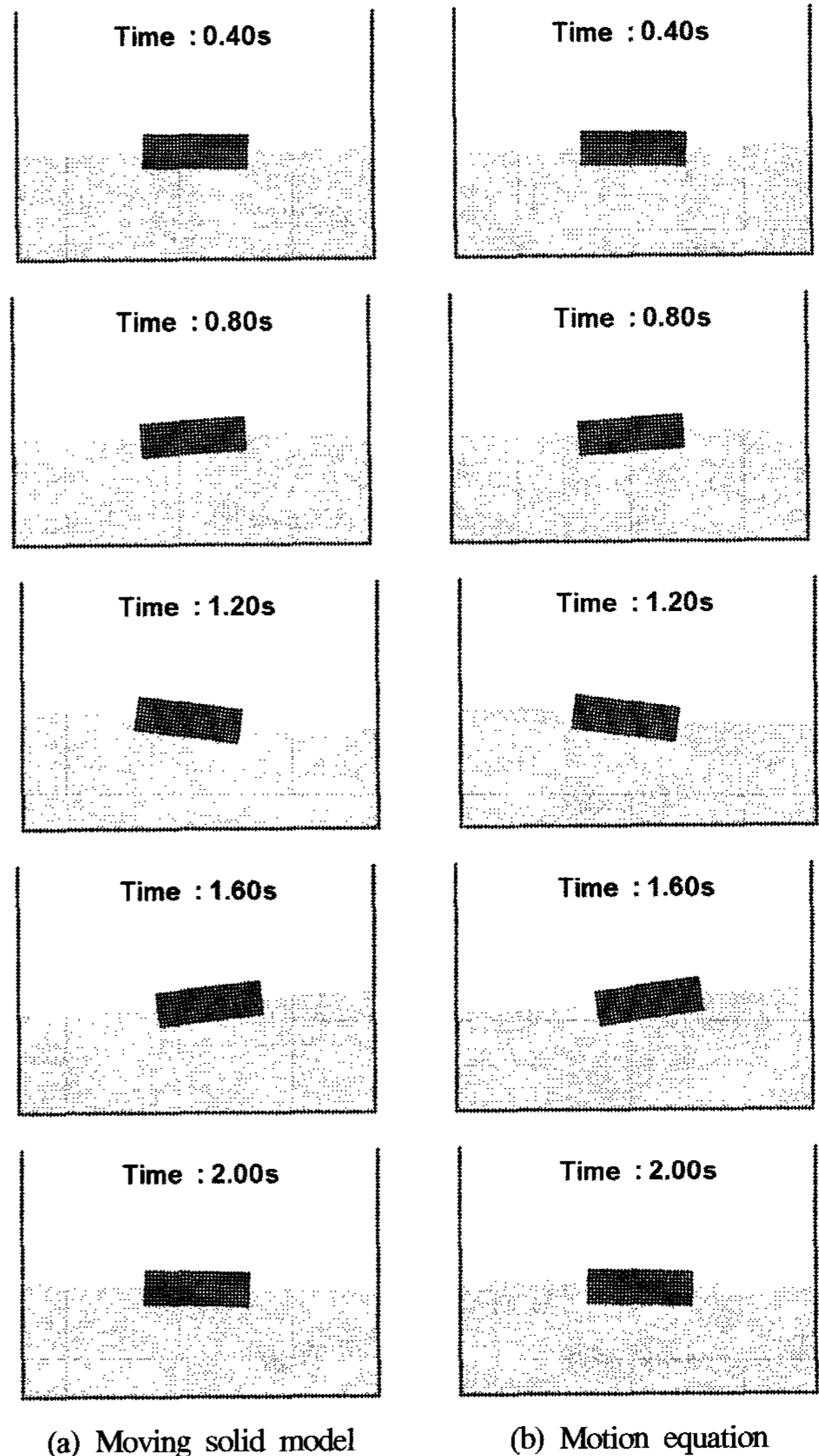


Fig. 8 Floating body motion coupled with free-surface motion

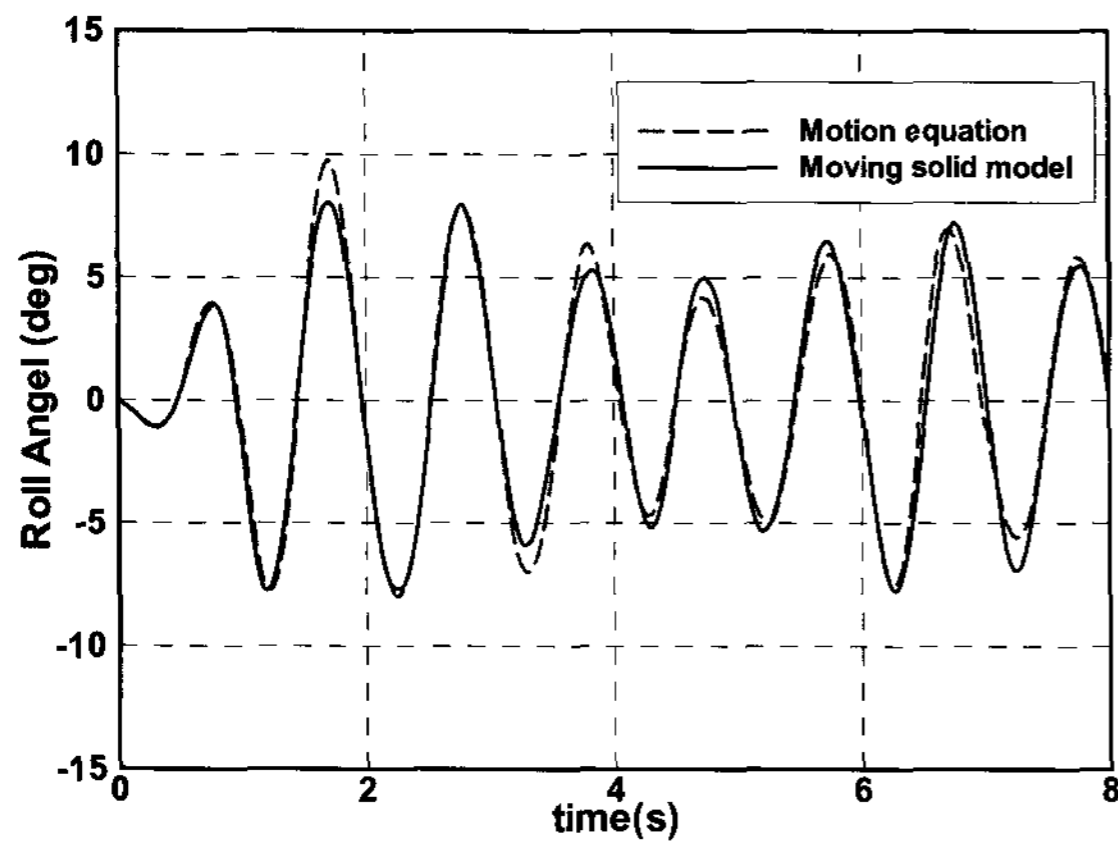


Fig. 9 Time series of roll angle of floating body

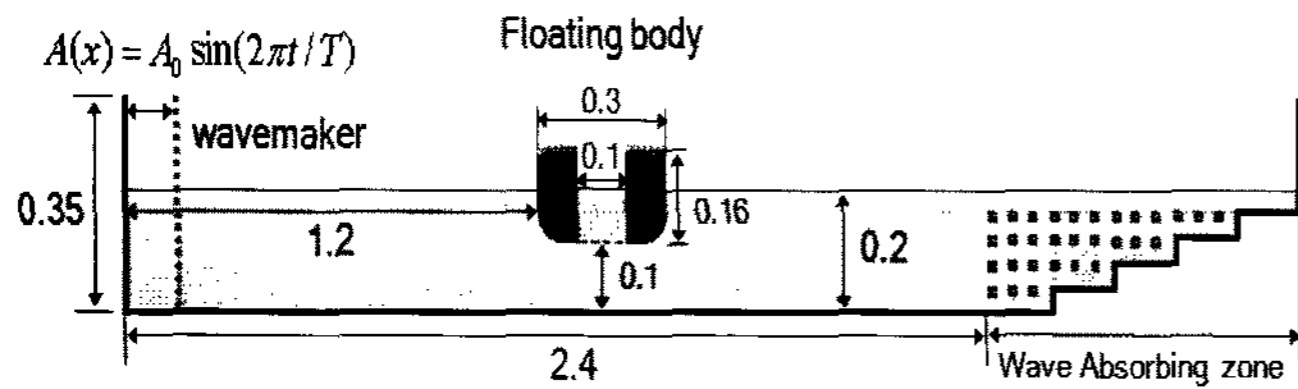


Fig. 10 Initial geometry of numerical wave tank and a floating body

5. 수치 시뮬레이션

5.1 조파-소파 시뮬레이션

먼저, 상술한 MPS 법을 이용하여 2차원 조파-소파 시뮬레이션에 적용해 보았다. Fig. 10은 사용된 2차원 수치수조의 형상을 보여 준다. 수조의 길이는 2.4(m)이며 높이는 0.35(m)이고, 정수면과 바닥 간 거리는 0.2(m)이다. 본 시뮬레이션에 사용된 입자는 약 7,000여개이며 초기 입자간 거리는 0.01(m)이다.

조파 시뮬레이션을 위해 수치수조의 왼쪽 벽을 식 (29)와 같이 수평 주기 운동하는 피스톤 형 조파기로 설정하였다. 이때, 조파기의 진폭과 주기는 각각 $A_0=0.02(m)$ 와 $T=1.0(sec)$ 이다.

한편, 수치조파기의 반대편에는 소파 영역을 설치하여 반사파에 의한 에너지를 흡수하여 계산영역에 악영향을 미치는 것을 최소화 하였다. 소파영역은 계단 형상의 경사저면을 갖으며, 투과형 부가물이 정렬되어 있다. 여기서 소파영역의 바닥을 경사면 대신 계단 형태로 선택한 이유는, 입자의 정규배치 과정에서 부가물을 손쉽게 정렬하기 위해서였다.

Fig. 11에는 시각 $t=10(sec)$ 에서 소파기의 유무에 따른 정지사진을, Fig. 12에는 조파기로부터 1파장만큼 떨어진 곳에서 시간에 따른 파고의 변화를 측정하여 각각 비교하였다. 오른쪽 벽이 연직벽인 경우에는 파도가 반사 되어 증폭되는 정지파(Standing wave) 현상이 나타나 파고가 증폭되는 경향을 보이지만, 소파영역이 존재하는 경우에는 파고가 증폭되거나 파도가 다시 계산영역으로 반사되어 악영향을 미치는 일이 크게 개선되었음을 알 수 있다.

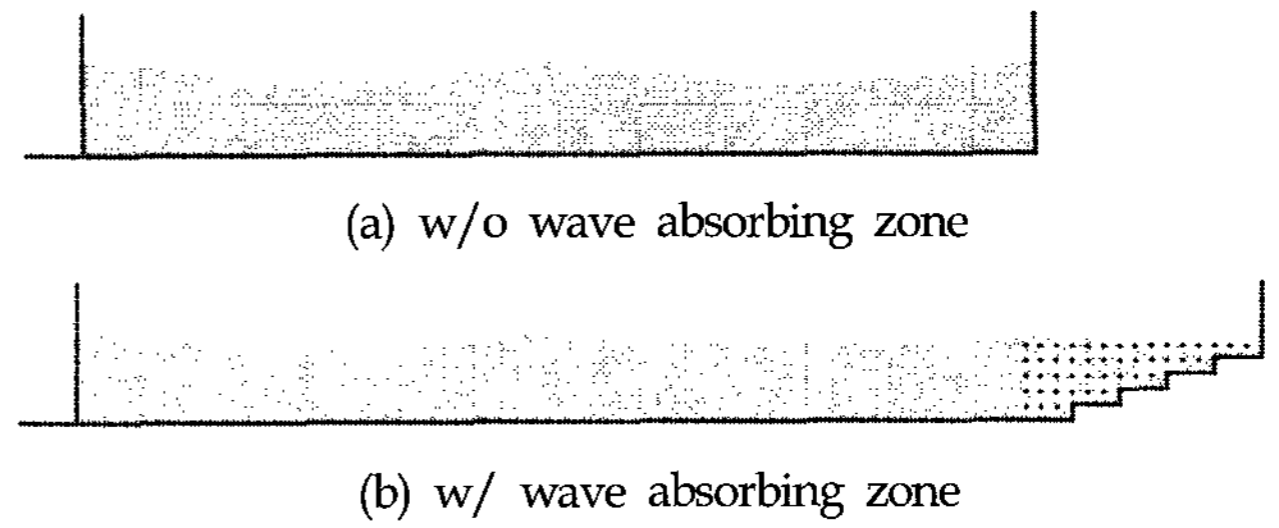


Fig. 11 wave profile of simulation (t = 10.0 s)

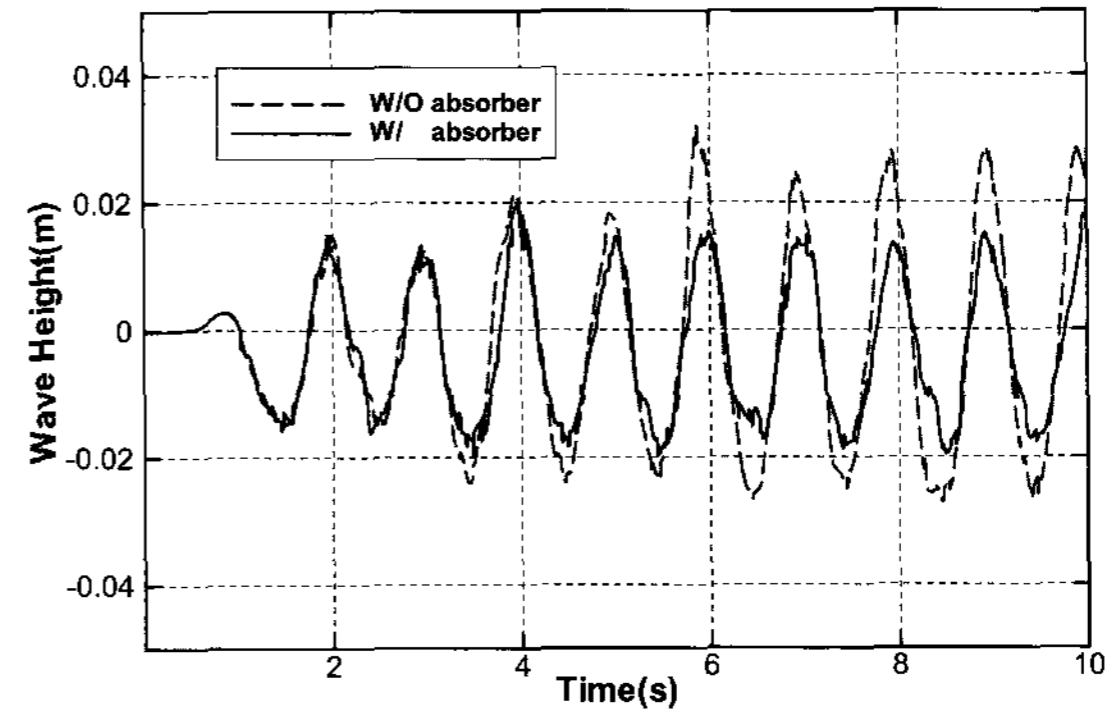


Fig. 12 Wave elevation probed at $x = 1.2$ m from numerical wavemaker

4.2 문풀을 갖는 부유체의 시뮬레이션

앞 절에서 조파기와 소파기가 장착된 수치 수조 내에 부유체를 추가하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 부유체의 횡단면 형상은 Fig. 10에 나타나 있다. 부유체의 횡단면 정 중앙에는 폭 10(cm)의 개구부를 두어, 문풀 유동을 모사할 수 있도록 설계하였다. 부유체 또한 입자들로 표현되며 부유체 운동은 강체 계산 모델로 계산하였다. 조파기 변위의 진폭은 0.04(m)이며, 주기는 1.0(sec)이다. 수조에 채워진 물의 밀도는 $1000(kg/m^3)$ 이며, 부유체의 밀도는 $618(kg/m^3)$ 로 설정하였다.

총 10주기의 수치 시뮬레이션 중 마지막 한주기인 9~10(sec)까지의 파랑중 선체 운동의 시뮬레이션 결과를 0.2(sec) 간격으로 Fig. 13(a)에 나타내었다. 부유체는 파도의 위상에 따라 상호작용하며 운동하고 있다. 이때 10주기 동안 부유체 중심의 이동궤적을 Fig. 14에 보인다. 부유체는 한 주기 동안 약 0.1(m)씩 원운동을 하며 오른쪽으로 밀려가는 것을 알 수 있다. 또한 문풀 내부의 유동이 외부의 파랑 운동과는 위상차를 보이며 변화하고 있는 것을 알 수 있다.

다음으로, 부유체에 발지킬을 부착시켜 발지킬의 유무에 따른 운동 특성을 시뮬레이션 하였으며, 그 결과를 Fig. 13(b)에 나타내었다. 발지킬은 부유체의 우측 하단과 좌측 하단에 각각 입자 3개를 추가하여 표현하였다. 부유체의 크기와 입자간 간격을 고려하면 발지 킬이 상대적으로 크게 설계되었지만 부가물의 영향을 뚜렷하게 확인 할 수 있다. Fig. 15에 보이는 바와 같이 부유체 중심의 회전각을 비교해 보면 최대 15° 각도로 회전하던 부유체가 발지킬의 영향으로 매우 안정적인 운동을 하고 있음을 확인 할 수 있다.

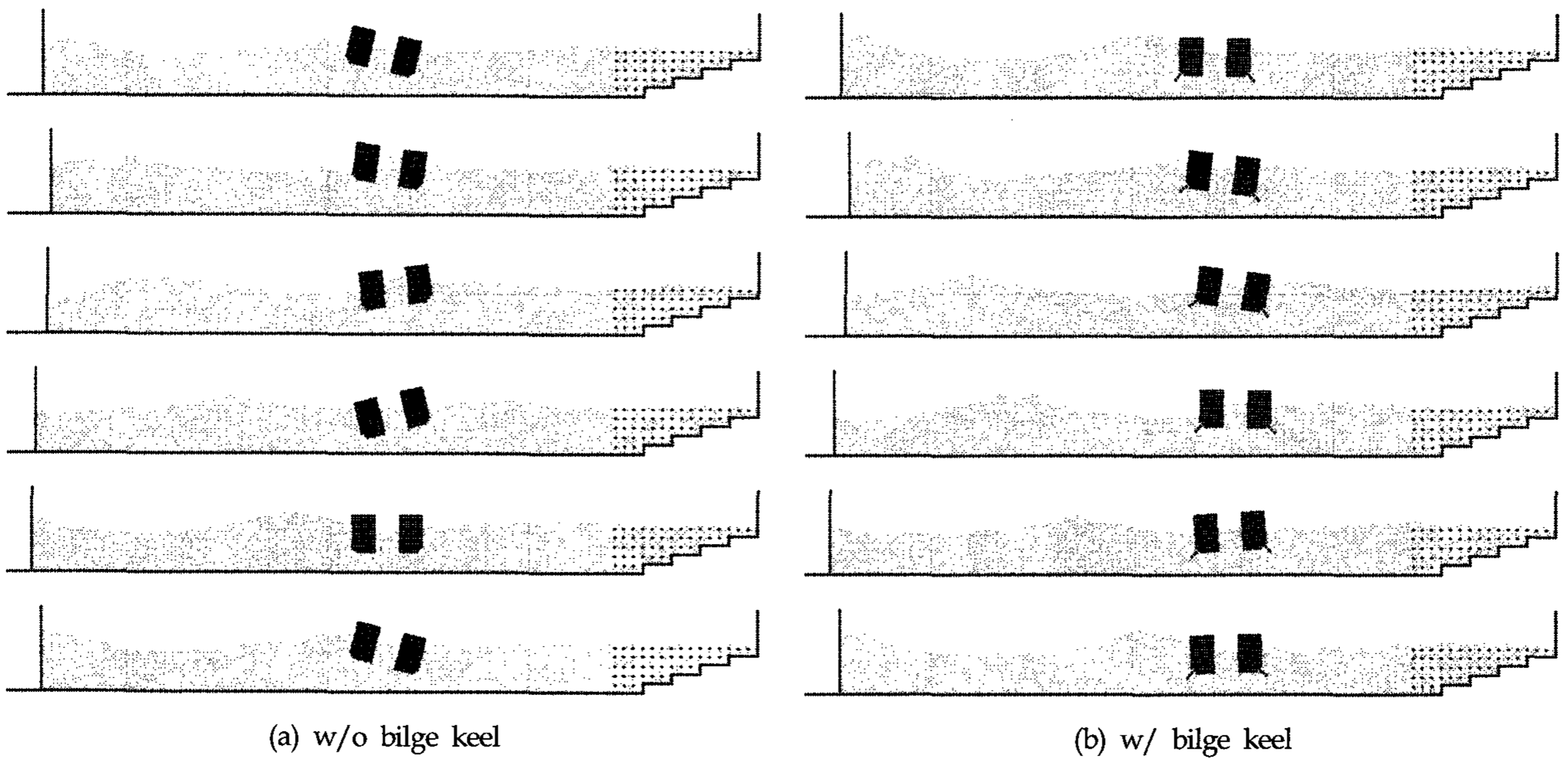


Fig. 13 Motion of floating body in waves

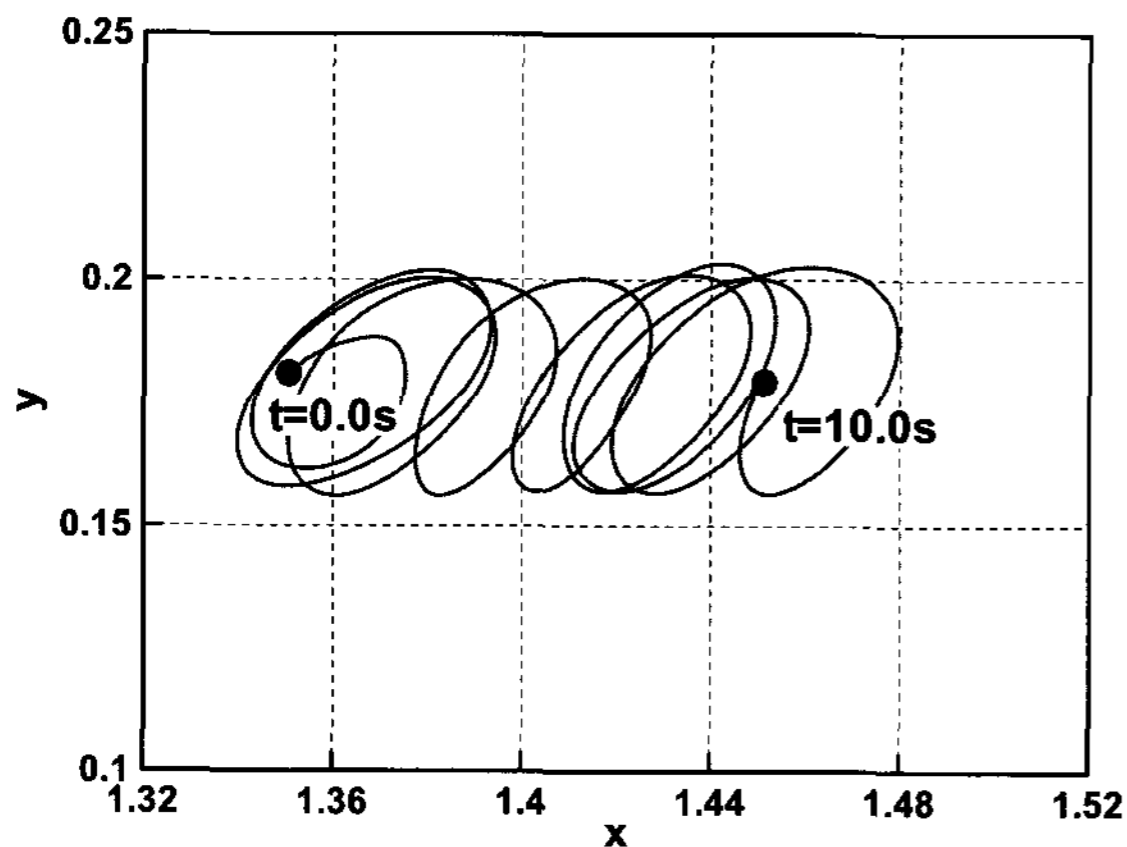


Fig. 14 Trace of center of gravity

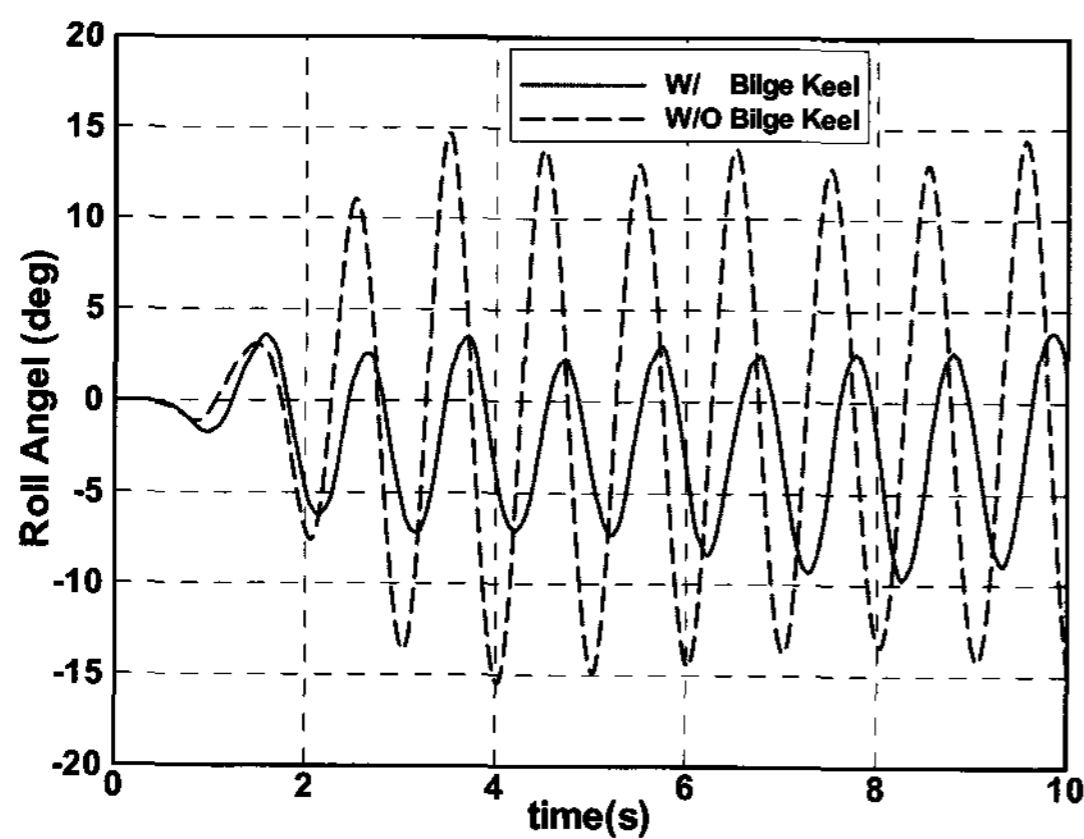


Fig. 15 Comparison of roll angle for a floating body with and without bilge keel

6. 결 론

본 논문에서는 지배방정식에 대한 MPS법의 입자간 상호작용 모델인 구배모델, 확산모델, 비압축성 모델, 자유표면 계산 모델을 이용하여 조파-소파 시뮬레이션을 행하였다.

또한 강체 계산 모델을 도입하여 파도와 더불어 상호작용하는 부유체 운동을 시뮬레이션 하였다. 선박형상의 부유체에 문폴 유동을 모사할 수 있는 중앙개구부를 설치하였으며, 빌지 킴의 유무에 따른 부유체의 운동특성을 비교해 보았다.

비선형성이 강한 비압축성 자유표면 유동 해석에 입자법의 장점을 확인했을 뿐 아니라, 향후 다양한 선박의 운동 해석에도 적용할 수 있을 것이라 기대된다.

후 기

본 연구는 대우조선해양(주)의 “유체충격에 기인한 유체-고체간의 상호연성 시뮬레이션 기술 개발”과제의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 지원에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김도정, 박제웅, 김주남, 정우철 (2006). “해양환경정화용 선박의 중앙개구부 특성에 관한 실험적 연구”, 한국해양공학회지, 제20권 제2호, pp 46-51.
- 송지수, 박승호 (2003). “전진하는 2차원 moonpool의 유동해석”, 한국전산유체공학회 추계학술대회, pp 225-230.
- 유재훈, 최순호 (2004). “Moonpool과 Azimuth Thruster를 장치한 Drillship의 저항추진성능”, 대한조선학회논문집, 제

- 41권 제6호, pp 33-39.
- 김영훈, 정성준, 이병혁, 황성철, 박종천 (2007). "파랑 충격하중에 관한 3차원 입자법 수치모사", 한국해양공학회지, 제21권 제6호, pp 42-46.
- 이병혁, 박종천, 류민철, 김용수, 김영훈 (2007a). "비압축성 유동 해석을 위한 입자법 수치 시뮬레이션 기술 개발", 한국해양공학회지, 제21권 제4호, pp 8-14.
- 이병혁, 박종천, 정성준, 류민철, 김용수, 김영훈 (2007b). "입자법을 이용한 비선형성 자유표면 유동의 수치 시뮬레이션", 한국해양공학회지, 제21권 제6호, pp 53-58.
- Koshizuka, S., Nobe, A., Oka, Y. (1998). "Numerical Analysis of Breaking Waves Using the Moving Particle Semi-implicit Method", *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol 26, pp 751-769.
- Koshizuka, S., Oka, Y. (1996). "Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid", *Nuclear Science and Engineering*, Vol 123, pp 421-434.
- Monaghan, J.J. (1988). "An Introduction to SPH", *Comput. Phys. Commun.*, Vol 48, pp 89-96.
- Sueyoshi, M. (2004). "Numerical Simulation of Extreme Motions of a Floating Body by MPS Method", *MIS/IEEE TECHNO-OCEAN'04*, Vol 1, pp 566-672.
-
- 2007년 11월 20일 원고 채택
2008년 3월 25일 최종 수정본 채택