

파랑중 2차원 부유체 운동해석을 위한 입자법 시뮬레이션

박종천*, 이병혁**, 정성준***

Particle Simulation for Motion of 2-D Floating Body in Waves

Jong-Chun Park*, Byung-Hyuk Lee** and Sung-Jun Jung***

Key Words : Particle Method(입자법), 2-D Floating Body Motion(2차원 부유체 운동), Numerical Wavemaker(수치 조파기), Numerical Wave Absorber(수치 소파기), Nonlinear Free-Surface Motion(비선형 자유표면 운동)

Abstract

A particle method has been developed for analyzing the motion of 2-D floating body in waves. The particle method is based on the MPS(Moving Particle Semi-implicit) method suggested by Koshizuka et al. (1996), and the flow motion coupled with the motion of floating body can be simulated. The wavemaker and wave absorber are installed at the inflow and outflow boundaries in a computational domain, respectively. The motion characteristics of a floating body is investigated numerically under the various computational conditions.

1. 서론

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[1,2]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 일정속도로 이동하는 경우의 계산 등에 한정되었다[3]. 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[4], MPS법[5] 등은 격자를 이용하는 해석방법보다 복잡한 물리현상을 해석할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 또한 입자법은 이류항의 계산을 완전한 라그랑지(Lagrangian) 접근에 의해 입자의 이동으로 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, 2차원 수치 수조내에서 생성된 파도와 함께 상호작용하는 부유체를 시뮬레이션 하였다. 부유체는 문풀을 포함하여 문풀 내부의 유동을 확인할 수 있도록 하였으며, 빌지킬의 유무에 따른 결과를 비교해 보았다.

2. 지배방정식

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

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla P + \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (2)$$

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

연속방정식 (1)은 격자법에서 일반적으로 속도의 발산(Divergence)형으로 표시하는 반면, 본 연구에서는 밀도의 발산형으로 표시하였다. N-S 방정식 (2)의 좌변은 이류항을 포함한 라그랑지의 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 et al.[5]에 의해 제안된 MPS법을 도입하기로 한다. MPS법을 이용한 입자간 상호작용 모델은 이병혁 등[6,7], 김영훈 등[8]에 상세히 소개되어 있으며 본 논문에서 생략하기로 한다.

3. 부유체 운동의 표현

3.1 고체 운동 계산 모델

유동과 상호작용하면서 이동하는 강체의 시뮬레이션은 격자를 사용하는 방법으로 계산하기 힘들다. 하지만 MPS법에서는 후술하는 비교적 간단한 계산 모델을 사용하였다[9]. 각 시간 스텝에 있어서 먼저 유체 입자와 고체 입자를 구별하지 않고 동일하게 유체입자로서 비압축성 알고리즘의 계산을 행한다. 그 후 강체 입자

* 부산대학교 조선해양공학과, jcpark@pnu.edu

** 부산대학교 대학원, blue7892@pnu.edu

*** 대우조선해양(주), mildboyjun@hanmail.net

사이의 어긋난 상대적 위치를 수정하는 계산을 강체 입자에 대해서만 행하게 된다.

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

$$\vec{T} = \lambda \alpha \epsilon m \sum_{i=1}^n \vec{u}_i \quad (3)$$

$$\vec{R} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^n \vec{u}_i \times \vec{q}_i \quad (4)$$

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

$$\vec{r}_g = \lambda \alpha \epsilon m \sum_{i=1}^n \vec{r}_i \quad (5)$$

$$\vec{q}_i = \vec{r}_i - \vec{r}_g \quad (6)$$

$$I = \sum_{i=1}^n q_i^2 \quad (7)$$

식 (3)와 (4)로 구한 고체 중심의 속도와 각속도를 이용하여 각각의 고체 입자들의 속도를 다음 식을 사용하여 재계산 한다.

$$\vec{u}_i = \vec{T} + \vec{q}_i \times \vec{R} \quad (8)$$

3.2 운동방정식의 적용

입자법에서 고체를 계산하는 또 다른 방법으로는, Fig. 1에 보이는 바와 같이 고체 표면에 작용하는 압력을 적분하여 고체에 작용하는 힘과 모멘트를 계산하고, 이를 운동방정식에 대입하여 직접 고체의 운동을 계산하는 방법이 있다[10]. 이 방법은 부유체의 경계가 운동방정식으로 계산된 입자들로 표현되며, 이동격자나 수치 확산 등은 고려할 필요가 없다. 즉, 2차원에서 부유체의 운동방정식은 식 (9)와 식 (10)에 의해 부유체의 변위 및 각변위를 계산할 수 있다.

$$m \frac{d^2 \vec{r}_g}{dt^2} = \vec{F} \quad (9)$$

$$I_{zz} \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \vec{M} \cdot \vec{k} \quad (10)$$

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.

$$\vec{F} = \sum_{i \text{ on the hull surface}} P_i \vec{n}_i dS_i \quad (11)$$

$$\vec{M} = \sum_{i \text{ on the hull surface}} (\vec{r}_i - \vec{r}_g) \times P_i \vec{n}_i dS_i \quad (12)$$

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

3.3 부유체 운동 시뮬레이션의 비교

자유표면의 운동과 상호작용 하는 부유체를 계산하기 위해, 앞서 언급한 고체 운동 모델과 운동방정식을 이용한 방법을 비교하여 보았다. 비교를 위해서 Fig. 2과 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), 흘수 0.05(m)인 사각 물체가 떠 있다. 초기 입자간 거리 l_0 는 0.01(m)이며, 계산 전체에 사용된 입자는 약 4,000개 이다.

탱크는 다음 식에 의해 수평으로 주기운동하며, 내부의 유동을 발생시킨다.

$$A(t) = A_0 \sin(2\pi t / T) \quad (13)$$

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. 3에 나타낸다. 단, (a)에는 고체 운동 모델을, (b)에는 운동방정식을 적용한 결과를 나타내며 두 방법 간에 부유체 운동의 큰 차이는 없어 보인다. Fig. 4에는 시간 진행에 따른 회전각의 변화를 나타내며, 수조의 움직임에 따라 1초의 주기로 $5^\circ \sim 8^\circ$ 전후의 회전운동하는 경향을 볼 수 있다. 하지만 운동방정식을 적용한 경우 전체적으로 다소 불안정한 변화를 보이는 반면, 고체 운동 모델을 사용한 결과가 조금 더 회전각도가 안정적인 모습을 보인다. 따라서 본 논문에서는 부유체가 포함된 시뮬레이션에 고체 운동 모델을 적용하기로 한다.

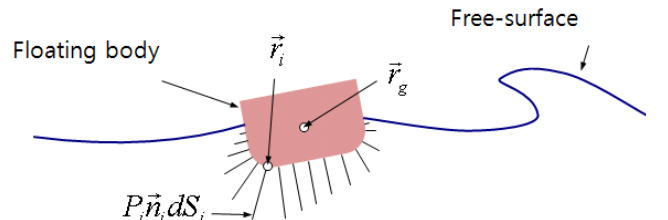


Fig. 1 Schematic of motion equation for 2D floating body simulation.

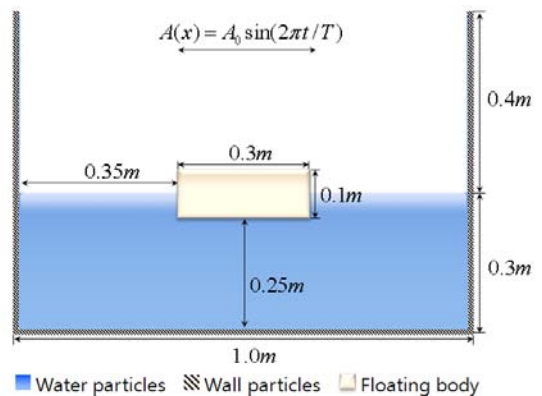
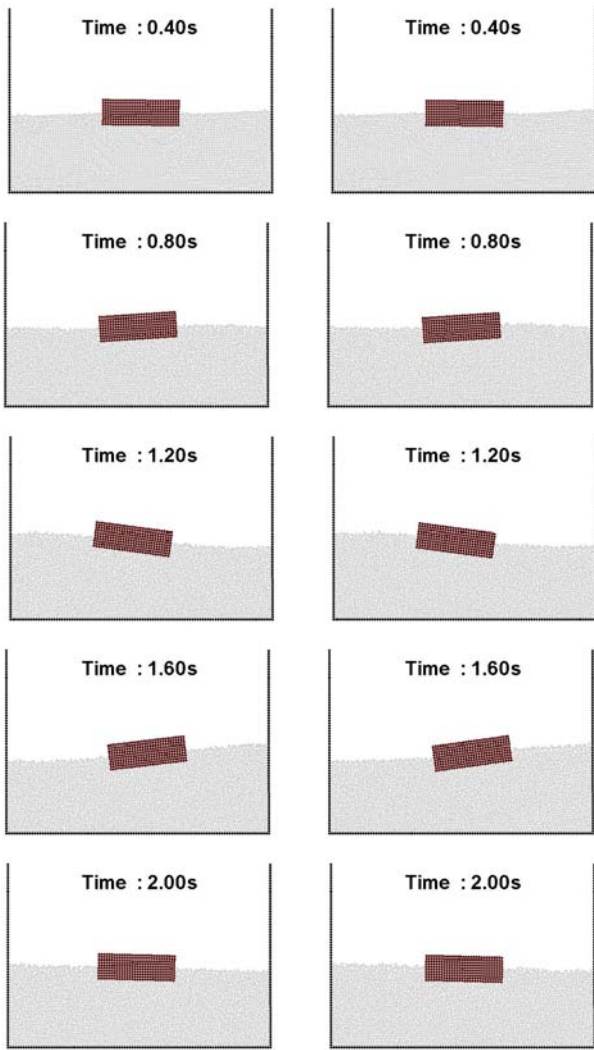


Fig. 2 Initial configuration of 2-Dimensional floating body simulation.



(a) Moving solid model (b) Motion equation

Fig. 3 Floating body motion coupled with free-surface motion.

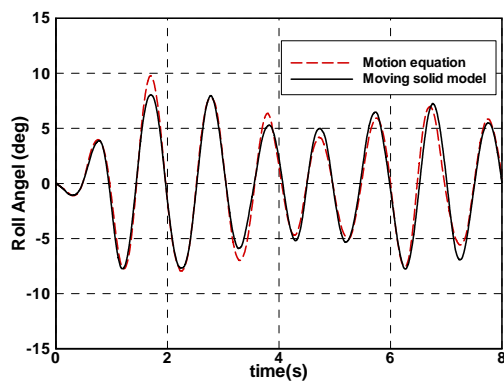


Fig. 4 Time series of roll angle of floating body.

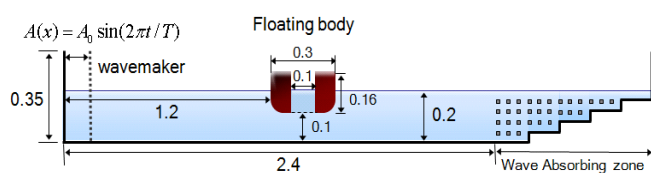


Fig. 5 Initial geometry of numerical wave tank and a floating body.

4. 피랑중 문풀을 갖는 부유체의 운동 시뮬레이션

피스톤형 조파기와 소파기가 장착된 수치 수조 내에 부유체를 추가하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 수치 수조와 2차원 부유체의 형상은 Fig. 5에 나타나 있다. 부유체의 횡단면 정 중앙에는 폭 10(cm)의 개구부를 두어, 문풀 유동을 모사할 수 있도록 설계하였다. 부유체 또한 입자들로 표현되며 부유체 운동은 강제 계산 모델로 계산하였다. 조파기 변위의 진폭은 0.04(m)이며, 주기는 1.0(sec)이다. 수조에 채워진 물의 밀도는 $1000(\text{kg}/\text{m}^3)$ 이며, 부유체의 밀도는 $618(\text{kg}/\text{m}^3)$ 로 설정하였다.

총 10주기의 수치 시뮬레이션 중 마지막 한주기인 9~10(sec)까지의 파랑중 선체 운동의 시뮬레이션 결과를 0.2(sec) 간격으로 Fig. 6(a)에 나타내었다. 부유체는 파도의 위상에 따라 상호작용하며 운동하고 있다. 이때 10주기 동안 부유체 중심의 이동궤적을 Fig. 7에 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 빌지킬을 부착시켜 빌지킬의 유무에 따른 운동 특성을 시뮬레이션 하였으며, 그 결과를 Fig. 6(b)에 나타내었다. 빌지킬은 부유체의 우측 하단과 좌측 하단에 각각 입자 3개를 추가하여 표현하였다. 부유체의 크기와 입자간 간격을 고려하면 빌지 킬이 상대적으로 크게 설계되었지만 부가물의 영향을 뚜렷하게 확인 할 수 있다. Fig. 8에 보이는 바와 같이 부유체 중심의 회전각을 비교해 보면 최대 15° 각도로 회전하던 부유체가 빌지킬의 영향으로 매우 안정적인 운동을 하고 있음을 확인 할 수 있다.

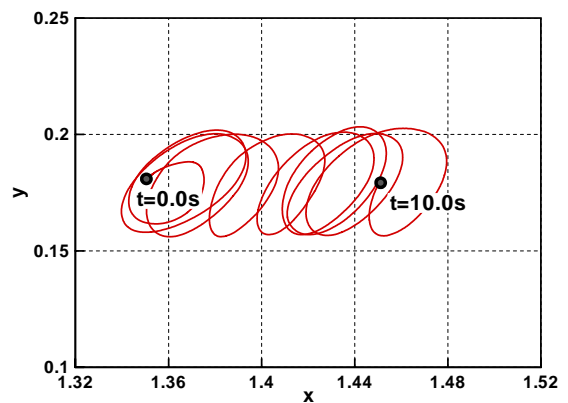


Fig. 7 Trace of center of gravity.

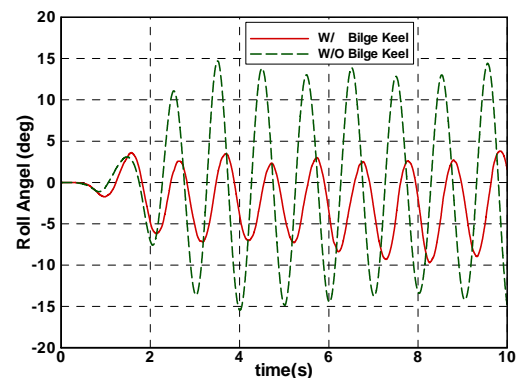


Fig. 8 Comparison of roll angle for a floating body w/ and w/o bilge keel.

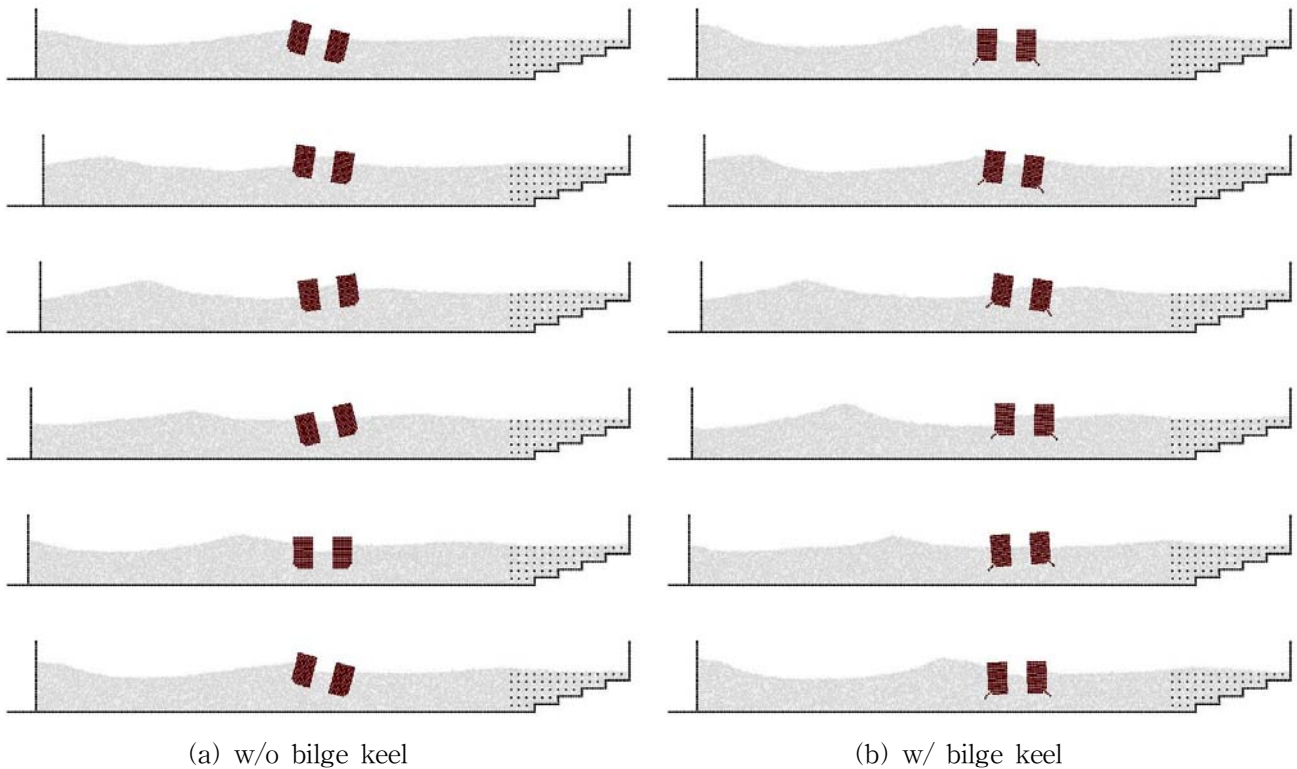


Fig. 6 Motion of floating body in waves.

5. 결론

본 논문에서는 지배방정식에 대한 MPS법의 입자간 상호작용 모델인 구배모델, 확산모델, 비압축성 모델, 자유표면 계산모델을 이용하여 조파-소파 시뮬레이션을 행하였다. 또한 강제 계산 모델을 도입하여 파도와 더불어 상호작용하는 부유체 운동을 시뮬레이션 하였다. 선박형상의 부유체에 문폴 유동을 모사할 수 있는 중앙개구부를 설치하였으며, 빌지 킬의 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.

참고문헌

[1] 김도정, 박제웅, 김주남, 정우철. 해양환경정화용 선박의 중앙개구부 특성에 관한 실험적 연구, 한국해양공학회지, 제20권 제2호 (2006), pp 46-51.
 [2] 유재훈, 최순호. Moonpool과 Azimuth Thruster를 장치한 Drillship의 저항추진성능, 대한조선학회논문집, 제41권 제6호

(2004), pp 33-39.
 [3] 송지수, 박승호. 진진하는 2차원 moonpool의 유동해석, 한국전산유체공학회 추계학술대회 (2003), pp 225-230.
 [4] Monaghan, J.J.. An Introduction to SPH, Comput. Phys. Commun., Vol 48 (1988), pp 89-96.
 [5] Koshizuka, S., Oka, Y.. Moving-Particle Semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, Nuclear Science and Engineering, Vol 123 (1996), pp 421-434.
 [6] 이병혁, 박종천, 류민철, 김용수, 김영훈. 비압축성 유동 해석을 위한 입자법 수치 시뮬레이션 기술 개발, 한국해양공학회지, 제21권 제4호 (2007), pp 8-14.
 [7] 이병혁, 박종천, 정성준, 류민철, 김용수, 김영훈. 입자법을 이용한 비선형성 자유표면 유동의 수치 시뮬레이션, 한국해양공학회지, 제21권 제6호 (2007), pp 53-58.
 [8] 김영훈, 정성준, 이병혁, 황성철, 박종천. 파랑 충격하중에 관한 3차원 입자법 수치모사, 한국해양공학회지, 제21권 제6호 (2007), pp 42-46.
 [9] Koshizuka, S., Nobe, A., Oka, Y.. Numerical Analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol 26 (1998), pp 751-769.
 [10] Sueyoshi, M. Numerical Simulation of Extreme Motions of a Floating Body by MPS Method, MTS/IEEE TECHNO-OCEAN'04, Vol 1 (2004), pp 566-672.