파랑 중 오일붐 성능 예측을 위한 2차원 입자법 시뮬레이션

남정우* · 박지인** · 황성철** · 박종천** · 정세민**

*STX조선해양(주), 조선기술본부

**부산대학교 조선해양공학과

2-Dimensional Moving Particle Simulation for Prediction of Oil Boom Performance in Waves

Jung-Woo Nam*, Ji-In Park**, Sung-Chul Hwang**, Jong-Chun Park** and Se-Min Jeong**

*Shipbuilding Engineering Sales Division, STX Offshore and Shipbuilding Co. Ltd., Changwon, Korea

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

KEY WORDS: Moving particle semi-implicit(MPS) method MPS법, Particle interaction model 입자간 상호작용 모델, Oil boom 오일 붐, Oil failure 기름 누유, 2D Wave flume 2차원 조파수조

ABSTRACT: Oil booms are one of the most widely used types of equipment for the protection of coastal areas against oil spills. In some situations, however, there are several types of oil leaks from the oil boom. Important factors regarding these phenomena include the surrounding ocean environment, such as waves, the density and viscosity of oil, the length of the oil boom skirt, etc. To estimate the performance of the oil boom, it is necessary to predict the behavior of the spilled oil and oil boom. In the present study, the prediction of oil boom performance in waves was carried out using the Pusan-National-University-modified Moving Particle Semi-implicit (PNU-MPS) method, which is an improved version of the original MPS proposed by Koshizuka and Oka (1996). The governing equations, which consist of continuity and Navier-Stokes equations, are solved by Lagrangian moving particles, and all terms expressed by differential operators in the governing equations are replaced by the particle interaction models based on a kernel function. The simulation results were validated through a comparison with the results of Violeau et al. (2007)..

1. 서 론

2010년 멕시코 만에서 발생한 기름유출 사고로부터 알 수 있듯이, 해양에서의 기름유출 사고는 단기간에 해양환경과 생태계를 파괴시키며, 피해 지역의 사회적·경제적 손실 또한 상당하다. 선박에 의한 대부분의 기름 유출 사고는 선박의 좌초, 충돌, 침몰 등 다양한 해양 사고뿐만 아니라 선박운항 중의 설비 손상, 부주의 등 다양한 원인에 의해 발생되고 있다.

지금까지, 기름유출 사고에 대한 방재 대책으로는 2차적인 해양 오염이 염려되는 화학적인 방법보다 오일 붐을 설치하는 직접적인 방법이 주로 사용되고 있다. 오일 붐은 대체로 부표, 프리보드(Free board), 부력과 복원력 확보를 위한 밸러스트(Ballast), 오일 차폐를 위한 스커트(Skirt), 응력 흡수를 위한 인장 부재 등 다섯 가지 요소로 구성된다. 하지만 오일 붐은 유출된 기름의 이동 및 확산을 차단하는 것에는 효과적일 수 있으나 강력한 조류, 기

름의 밀도와 점성 그리고 오일 붐의 흡수의 길이 등과 같은 다양한 상황에 따라 Fig. 1에 나타난 바와 같이 오일 붐에서 기름 누유에 대한 다양한 문제점을 가지고 있다(Violeau et al., 2007):

(a) **Entrainment** : 오일 붐이 조류에 노출되는 경우 오일 펜스 상부 측에 형성되는 파랑과 강한 와류로 인해 유막 하부의 일부가 이탈되어 스커트 하부로 유출되는 현상이다. Entrainment는 작은 오일 방울로 시작되어 하나의 흐름 형태로 발달되어 진행되며 0.4m/s 정도의 낮은 유속에서도 발생할 수 있어 오일 붐 설계단계에서 우선적으로 검토되어야 한다.

(b) **Drainage** : 상대적으로 밀도가 높은 오일의 경우 오일 붐 주위에 스커트가 막지 못할 정도로 오일 막이 두껍게 모여 스커트의 하부로 유출되는 현상이다. Drainage가 발생하기 위한 임계 유속은 스커트의 깊이와 기름의 속성에 따라 다르지만, 일반적으로는 Entrainment를 위한 임계 유속보다 빠른 편이다.

(c) **Splash-over** : 해양환경이 거친 경우 유막의 일부가 오일

Received 19 June 2013, revised 7 August 2013, accepted 13 August 2013

Corresponding author Jong-Chun Park: +82-051-510-2480, jcpark@pnu.edu

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KSOE 2011 in Daejeon.

Fig. 1 Five different modes of oil leakage: entrainment, drainage, splash-over, boom submergence and boom planing(Violeau et al., 2007)

뿔의 Free board를 넘어 월류하게 되는 현상이다.

(d) Submergence : 강한 해류에 의해 오일 뿔은 수중에 잠기는 현상을 말하며, 이 경우 오일 뿔의 효율성은 크게 떨어진다.

(e) Boom planing : Entrainment의 경우보다 더 높은 조류에 노출되는 경우 오일 뿔은 수면에 가지런히 놓게 되어 오일 포집능력은 크게 저하된다.

이와 관련하여, Milgram and Houten(1978)은 유적누유(Droplet entrainment) 현상을 해석하기 위해 경계면에서의 동압력과 점성력의 상대적인 균형과 예측된 경계면의 형태 사이의 관계를 이론 및 실험적으로 조사하였으며, Lee and Kang (1997) 등은 배수누유(Drainage failure), 유적누유, 축적한계누유(Failure by critical accumulation) 등 3가지 누유 메커니즘을 실험을 통해 확인하였다.

난류의 영향과 유층 내 순환류 등 실험적 연구에서 고려할 수 없었던 현상들을 고려하기 위해 오일 뿔의 누유 메커니즘에 대해 CFD(Computational fluid dynamics)기법을 통한 연구가 활발히 진행되었다. Goodman et al.(1996)은 해류 속도에 따른 오일 뿔의 성능을 시뮬레이션 하는 수치적 모델을 개발하였고, Zheng and AN(1999)은 SIMPLE(Semi-Implicit method for pressure-linked equation)방법에 VOF(Volume-of-fluid) 모델을 적용하여 기름 누유를 시뮬레이션 하였다. Bae and Jung(2003)과 Xing et al.(2010)은 상용프로그램인 FLUENT를 이용하여 오일 뿔에서의 기름 누유 시뮬레이션을 수행하였다.

상술한 수치적 연구는 주로 격자 기반의 Eulerian 접근법으로 진행되어 왔다. 하지만 Eulerian 접근법을 이용한 연구에서는 기름 제적의 정밀한 추적과 분산적인 기름의 분리 또는 합체 등의 과정에 따른 보존성에 문제가 있어 보인다. 한편, Violeau et al.(2007)는 입자를 이용한 SPH(Smoothed particle hydrodynamics)법을 이용하여 개수로에서 다양한 조류 및 파랑 조건하에서 오일 뿔을 이용한 누유 시뮬레이션을 수행하였다. 입자법은 격자를 이용하는 해석방법보다 복잡한 물리현상을 해석할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 특히 입자법은 대류항(Convection)의 계산을 완전한 Lagrangian 접근에 의해 입자의 이동으로 계산함으로써 기름 입자의 정밀한 제적을 추적할 수 있으며, 격자 기반의 Eulerian 방법에서 간혹 심각하게 유발될 수 있는 대류항에 의한 수치확산이 없을 뿐만 아니라 질량이 완벽히 보존되는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 Koshizuka and Oka(1996)가 제안한 MPS(Moving particle Simulation)법의 유동장 안정성을 향상시킨 PNU-MPS(Pusan-national-university-modified moving particle simulation)법(Lee et al., 2011)을 이용하여, 오일 뿔을 이용한 파랑중 기

름유출 방재에 관한 2차원 입자법 시뮬레이션 수행하였다. 방재 시뮬레이션에 앞서 시뮬레이션에 사용되는 조파기 및 소파영역의 성능을 검증하기 위하여 경사면 구조물에서의 월파 시뮬레이션을 수행하여 실험결과(Saville, 1995) 및 타 시뮬레이션 결과들과 비교하였다. 그리고 2차원 파랑중 오일뿔의 성능을 예측하기 위해 기름의 특성, 오일 뿔 스킴의 각도, 그리고 파고의 변화에 따른 오일 뿔의 누유 상태를 관찰하였으며, Violeau et al.(2007)의 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 또한, SPS(Sub-particle scale) 난류 모델을 도입하여 난류효과에 대해 검토하였다.

2. 수치 시뮬레이션 기술

2.1 지배방정식

비압축성 유체의 지배 방정식으로는 다음과 같은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다.

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

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

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

연속방정식 (1)은 격자법에서는 통상적으로 속도의 발산(Divergence)으로 표현되는 반면, 입자법에서는 밀도에 관한 식으로 표현된다. Navier-Stokes 방정식 (2)의 좌변은 대류항을 포함한 Lagrangian의 전미분(Total derivative) 형태이고, 이는 입자의 직접적인 이동에 의해 계산된다. 한편, 우변은 압력 구배항, 점성항 그리고 외력항으로 구성되어 있다. 비압축성 점성 유동을 시뮬레이션하기 위해서 지배방정식의 편미분 연산자를 포함하는 모든 항은 MPS법(Koshizuka and Oka, 1996)의 상호작용 모델에 의해 치환되어야 한다. 본 연구에서는 원래의 MPS법(Koshizuka and Oka, 1996)을 개량하여 정확도와 안정성을 향상시킨 PNU-MPS법(Lee et al., 2011)을 도입하여 입자간 상호작용 모델로 치환하기로 한다. 구배 모델은 Khayyer and Gotoh(2011)가 제안한 방법을 적용하였으며, PNU-MPS법에의 도입은 Jeong et al.(2013)에 상세히 서술되어 있다. 강제 운동 모델은 Koshizuka and Oka(1996)가 제안한 수동적 이동고체 모델(Passively moving-solid model)을 사용하였으며 모델의 타당성 검토는 Lee et al.(2013)에서 수행된 바 있다. 한편, 물과 기름의 경계부근에서는 Jeong et al.(2013)에서와 같이 밀도와 동점성계수를 주변 입자들로부터 가중평균된 값(Weight-averaged value)을 사용하였다. 각각의 모

텔에 관한 상세한 설명은 생략하기로 한다.

2.2 Sub-particle scale(SPS) 난류 모델의 도입

MPS법은 복잡한 자유수면 유동을 효과적이며 정확하게 해석할 수 있으며, 일반적인 층류해석만으로도 타당한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 해안 부근에서 쇄파가 발생하는 경우는 쇄파에 의해 유기되는 난류효과에 대한 검토가 필요하다. 기존의 MPS법 및 PNU-MPS법은 난류 모델을 포함하지 않고 있으며, 입자법에서는 균일한 크기의 입자 집합으로 유체를 표현하기 때문에 현재의 계산기 능력으로는 Kolmogorov 스케일 이하의 입자 크기를 설정하는 DNS 해석은 현실적으로 불가능하다. 이를 보완하기 위해 Gotoh et al.(2001)은 격자법에서 많이 사용하는 SGS(Sub-grid scale) 난류모델과 유사한 개념으로 SPS(Sub-particle scale) 난류모델을 입자법에 도입하여 LES(Large eddy simulation) 개념의 난류 모델을 제안하였다.

입자 스케일(Particle scale, PS) 이하의 난류효과를 고려하기 위하여 식 (3)과 같이 유동 속도를 평균 유속($\bar{u}$)과 변동량(u')으로 구분한다.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (3)$$

LES와 같은 평균 조작을 시행하면 운동방정식 (2)는 식 (4)와 같이 SPS Reynolds 응력항($\overline{u'_i u'_m}$)이 추가된 PS 유동에 관한 운동방정식으로 표현이 될 수 있다.

$$\frac{D\bar{u}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_m^2} - \frac{\partial (\bar{u}'_i \bar{u}'_m)}{\partial x_m} \quad (4)$$

여기서 SPS Reynolds 응력항은 아래와 같다.

$$-\bar{u}'_i \bar{u}'_m = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_m} + \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{im} \quad (5)$$

단, k 는 난류 운동 에너지(Turbulent kinetic energy)이며, 와점성 계수 ν_t 및 난류에너지 소산율 ε 는 다음과 같다.

$$\nu_t = C_\nu k^{1/2} \Delta \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{C_\varepsilon k^{3/2}}{\Delta} \quad (7)$$

여기서, Δ 는 입자의 지름, C_ν 와 C_ε 는 모델 정수이다.

식 (5)~(7)과 PS 이하의 소영역에서의 국소 평형성을 가정한 식 (8)로부터 식 (9)와 같이 와점성 계수를 구할 수 있다.

$$-\bar{u}'_i \bar{u}'_m \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_m} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_m} + \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_m} = \varepsilon \quad (8)$$

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \left\{ \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_m} + \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_m} \right\}^{1/2} \quad (9)$$

단, C_s 는 Smagorinsky 정수이다.

2.3 평면 2차원 유동장에서의 SPS 난류 모델

앞서 설명한 SPS 모델을 2차원 난류유동에 적용하기 위해서는, Reynolds 응력항의 이산화가 필요하다. 다시 말해, 입자 스케일의 속도로 표현된 유동지배 방정식인 식 (4)의 우변 3번째

항만을 계산하여 더해 주면 식 (10)과 (11)이 되고, MPS법의 기존 해석절차는 변경 없이 그대로 사용할 수 있다.

$$F_{psx} = \frac{\partial}{\partial x} \left(2\nu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \right\} \quad (10)$$

$$F_{psy} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\nu_t \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \frac{2}{3} k \right) \quad (11)$$

이 때, 와점성 계수 및 난류 운동 에너지는 에너지 생성항 P_r 을 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 P_r^{1/2} \quad (12)$$

$$k = \frac{C_v}{C_\varepsilon} \Delta^2 P_r \quad (13)$$

$$P_r = 2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 \quad (14)$$

SPS Reynolds 응력항의 편미분 계산은 MPS법의 구배모델을 참고하여 아래와 같이 이산화 할 수 있다.

$$\left\langle \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right\rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{\phi_j - \phi_i}{x_{ij} - x_{ix}} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right] \quad (15)$$

또한, 모델상수는 식 (6)과 (12) 그리고 식 (13)으로부터 아래의 관계가 성립된다.

$$C_s^2 = C_\nu^{3/2} C_\varepsilon^{-1/2} \quad (16)$$

여기서, $C_\nu=1.0$ 로 하고, 난류 혼합층에 대한 Smagorinsky 정수의 표준값인 $C_s=0.15$ 를 이용하면 $C_\nu=0.08$ 이 된다.

3. 수치 시뮬레이션

3.1 경사면 구조물에서의 월파 시뮬레이션

본 연구에서는 파랑 중 오일붐 시뮬레이션에 앞서 조파기 및 소파영역의 성능을 검증하기 위해 기울기 1:3을 가진 경사면 구조물에서의 월파 시뮬레이션을 재현해 보았다.

Fig. 2에는 경사면 구조물의 형상 및 저면 기울기를 나타낸다. 구조물의 제원은 Table 1에 보이는 바와 같이 구조물의 경사면 기울기는 1:3이며, 정수면(SWL)으로부터 해저까지의 수심 d_t , 정수면으로부터 1:3의 경사면 구조물 바닥까지의 수심 d_s , 정수면 위로부터 구조물 최고높이까지의 천정고 R_c 를 가지고 있다. 입사파로는 $H_s=0.95\text{m}$, $T=4.73\text{s}$ 의 규칙파가 작용한다.

Fig. 2 Schematic view of sloping seawall for wave overtopping simulation

Fig. 3 Time-sequential nonlinear overtopping and overflow motions at the sloping seawall

Table 1 Dimension of seawalls and Wave characteristics

d_t (m)	d_s (m)	R_c (m)	H_s (m)	T (s)
3.0	0.75	0.50	0.95	4.73

유입파는 수조의 왼쪽 벽에 설치된 피스톤 형의 조파기에 의해 생성되며, 식 (17)에 의해 수평 운동한다.

$$A(t) = A_0 \sin(2\pi t/T) \quad (17)$$

여기서 A 는 조파기의 시간에 따른 변위, A_0 는 조파기 변위의 진폭, T 는 주기를 나타낸다. 조파기 변위 진폭은 다음과 같은 과정으로 구하였다. 먼저, 시뮬레이션 환경을 천수영역으로 가정하고 주어진 파도의 주기를 이용해 식 (18)에 의해 파장(λ)을 구한 뒤, 식 (19)로부터 파수(k)를 계산한다. 식 (20)를 이용하여 최종적으로 조파기의 스트로크(Stroke, S)를 계산하고, 최종적으로 식 (21)에 의해 조파기 변위의 진폭을 얻었다(Dean and Dalrymple, 1984).

$$\lambda = T\sqrt{gd} \quad (18)$$

$$k = \frac{2\pi}{T\sqrt{gd}} \quad (19)$$

$$\left(\frac{H_w}{S}\right)_{piston} = kd \quad (20)$$

$$A_0 = \frac{S}{2} \quad (21)$$

여기서 g 는 중력가속도이며, d 는 수심이다.

Fig. 3은 경사면 구조물 주위의 시간에 따른 파형변화를 나타낸다. 월파형 구조물의 전면에서는 파형의 비선형성이 강하게 나타나며 구조물을 타고 넘는 월파의 동적 거동이 수치적으로 잘 표현되고 있음을 알 수 있다. 이 때 경사면 구조물에서의 무

Table 2 Comparison between numerical models with the measured dimensionless overtopping discharges

$Q(10^{-3})$ Experiment	$Q(10^{-3})$ Amazon	$Q(10^{-3})$ 2-D BWNM	$Q(10^{-3})$ LES	$Q(10^{-3})$ Present
66	39	46	54	61

Fig. 4 Comparison between numerical models with the measured dimensionless overtopping discharges

차원 월파 충전량에 대한 결과를 실험결과(Saville, 1995) 및 Amazon(Hu et al., 2000), 2-D BWNM(Soliman et al., 2003), LES(Park et al., 2008) 등의 시뮬레이션 결과와 비교하여 Table

2에 요약하였다. 또한 다양한 파랑 조건하에서 실험과 시뮬레이션 결과에 대한 월파 충전량 상관분포를 Fig. 4에 나타낸다. 결과적으로 본 시뮬레이션 조건 하에서는 본 연구에서 얻어진 결과가 타 계산결과에 비해 실험치에 보다 정량적으로 근접해 있음을 알 수 있다. 이 때, 무차원 월파 충전량은 식 (22)과 같이 구하였다 (Hu et al., 2000).

$$Q = \frac{Q'}{H_o \sqrt{g H_o}} \quad (22)$$

여기서 Q' 은 평균 월파 충전량이며, H_o 는 심해파고이다. 본 시뮬레이션에서 $H_o=1\text{m}$ 이다. 월파 충전량은 $4 \leq T \leq 5$ 에서 측정하였다

3.2 2차원 파랑중 오일붐 성능 예측 시뮬레이션

앞서 설명한 PNU-MPS 법을 이용하여 Violeau et al.(2007)의 시뮬레이션과 동일한 조건하에서 2차원 파랑중 기름유출 방재 시뮬레이션을 수행하였다. 단, Violeau et al.(2007)의 경우 난류 모델로는 $k-L_m$ 난류모델을 적용하고 있다. Fig. 5에는 시뮬레이션의 조건을 도식화하여 나타낸다. 수조의 길이는 24.5m, 높이는 3.5m, 초기수심은 2.0m이다. 수조의 왼편에는 피스톤 형 수치 조파기가 설치되어 있다. 계산에 사용된 붐은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 직경은 0.5m, 스커트의 길이는 0.80m이고, 조파기로부터 7m떨어진 곳에 위치한다. 붐의 초기 경사는 반시계방향을 양으로 하며, 스커트의 계류를 고려하는 대신에 수직 방향의 운동만을 허용하고, 수평 및 회전 운동은 제한하였다.

본 시뮬레이션에 사용된 유체 입자는 약 72,000여개이며, 초기 입자간 거리는 0.02m이다. 시뮬레이션에 사용된 물과 기름의 특성은 Table 3에 나타내며, 기름은 두께 0.04m의 수평방향 5m에 걸쳐서 정수면 상에 배치하였다.

유입파의 주기는 4.0s이며, 총 시뮬레이션 시간은 8주기이다. Table 4에는 시뮬레이션에서 사용된 파고(H_w)와 붐의 스커트의 각도를 정리하였다.

시뮬레이션에 사용한 기름의 종류와 붐의 스커트의 각도 그리고 파고에 따른 오일 붐에서의 누유의 평가에 대한 시뮬레이션 결과를 Violeau et al.(2007)의 시뮬레이션의 결과와 비교하여 Table 5에 정리하였다. 결과적으로 Violeau et al.(2007)의 결과와 동일하게 파고가 높은 경우($H_w=1.0\text{m}$), 대부분의 조건 하에서 누유 현상이 일어나는 것을 확인 할 수 있다. 두 시뮬레이션의 결과는 파고가 높고 스커트의 각도가 큰 단 한 경우를 제외하고 모두 일치한다. 이는 두 방법에 있어 유동장 안정화에 크게 기여하는

이산화 기법(SPH법 : MPS법) 및 난류모델($k-L_m$ 난류모델 : SPS 모델)의 차이 등에 따른 것으로 해석할 수 있다. 보다 엄밀한 비교를 위해서는 향후 실험결과의 확보가 필요할 것으로 보인다.

Fig. 7은 $H_w=1.0\text{m}$ 와 $\theta=-10^\circ$ 의 조건 하에서 가벼운 기름에 대해 시간에 따른 누유 모습을 Violeau et al.(2007)의 시뮬레이션 결과와 상호 비교하였다. 두 결과 모두 Splash-over 현상이 발생하여 오일 붐을 넘어 월류하는 것을 확인 할 수 있다. 전체적으로 상호 유사한 경향을 확인 할 수 있지만, 부분적으로 기름 입자들의 이류 및 확산의 형태에 다소 차이를 발견할 수 있다.

Fig. 8은 스커트의 각도에 따른 오일 붐에서의 누유를 확인하였다. 스커트의 각도가 음인 경우에는 Submergence 현상에 근접한 Splash-over 현상과 같은 누유 현상이 심화되어 나타나는

Table 3 List of parameters of the three types of fluid

Type of fluid	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$\nu(\text{m}^2/\text{s})$
Water	1000	1.00×10^{-6}
Light oil	850	3.32×10^{-6}
Heavy oil	995	3.00×10^{-2}

Table 4 List of wave height and skirt angle considered for the simulation

$H_w(\text{m})$	Light oil	Heavy oil
0.5	$-10^\circ, +10^\circ, +40^\circ$	$-10^\circ, +10^\circ$
1.0	$-10^\circ, +10^\circ, +40^\circ$	$-10^\circ, +10^\circ$

Fig. 5 Initial setup of the numerical wave tank

Fig. 6 Geometry of oil boom

Table 5 Comparison of the type of oil leakage obtained between PNU-MPS and SPH methods

Oil	Angle(θ)	SPH (Violeau et al., 2007)		PNU-MPS (Present)	
		$H_w = 0.5\text{m}$	$H_w = 1.0\text{m}$	$H_w = 0.5\text{m}$	$H_w = 1.0\text{m}$
Light	-10°	No leakage	Splash-over	No leakage	Splash-over
	10°	No leakage	No leakage	No leakage	No leakage
	40°	No leakage	Drainage	No leakage	Splash-over, Submergence, Drainage
Heavy	-10°	No leakage	Splash-over, Submergence	No leakage	Splash-over, Submergence
	10°	No leakage	Drainage	Drainage	Drainage

Fig. 7 Comparison of the splash-over profiles between PNU-MPS and SPH methods (Light oil, skirt angle $\theta = -10^\circ$ and wave height $H_w = 1.0\text{m}$)

Fig. 8 Effect of skirt angle with heavy oil and wave height $H_w = 1.0\text{m}$

Fig. 10 Effect of oil type for wave height $H_w = 1.0\text{m}$ and skirt angle $\theta = +10^\circ$

Fig. 9 Effect of wave height with light oil and skirt angle $\theta = -10^\circ$

것을 확인 할 수 있다. 즉, 스커트의 각도에 따라 동일한 파랑하에서 오일 붐의 거동 또한 달라지고, 스커트가 음의 각도를 가질 때 파랑이 붐 위쪽을 타고 넘어가기 용이해 지기 때문이라

판단된다. 한편 스커트의 각도가 양인 경우에는 오일 붐으로 인해 Splash-over 현상이 억제되는 것을 알 수 있다. 하지만, 붐의 스커트 전면에 정제되었던 기름이 파랑과의 상호작용에 의해 스커트의 하부로 일부 유출되는 배수누유 현상이 관찰된다.

Fig. 9는 파고의 변화에 따른 누유의 형태를 비교하였다. 파고가 상대적으로 낮은 경우($H_w = 0.5\text{m}$) 기름의 누유가 발생하지 않지만, 파고가 높은 경우($H_w = 1.0\text{m}$) 심각한 Splash-over 현상이 발생한다. 이처럼 파랑 조건은 누유 현상에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있으며, 이에 대해 향후 보다 심도 깊은 연구가 진행되어야 할 것이다.

Fig. 10은 기름의 종류에 따른 오일 붐에서의 누유를 확인한 결과를 나타낸다. 두 경우 모두 Drainage 현상이 발생하는 것을

Fig. 11 Comparison of the splash-over profiles between w/o and w/ turbulence model (Light oil, skirt angle $\theta = -10^\circ$ and wave height $H_w = 1.0\text{m}$)

알 수 있으나, 가벼운 기름에 비해 동점성계수가 10^4 배가량 큰 무거운 기름의 경우 일부 기름 입자들이 봄의 스커트 하단부를 지나면서 뭉치는 것이 관찰된다.

마지막으로, 난류모델 유무에 따른 영향을 살펴보기 Table 4와 동일한 조건으로 기름의 종류와 봄의 스커트의 각도 그리고 파고에 따라 오일 봄에서의 누유의 평가를 수행하였다.

결과적으로 난류모델의 도입은 누유현상에 크게 영향을 미치지 않았으며, Fig. 11에 나타내듯이 $H_w = 1.0\text{m}$ 와 $\theta = -10^\circ$ 의 조건 하에서 가벼운 기름에 대해 시간에 따른 파형, 기름 입자의 분포, 오일 봄의 운동 등은 난류모델의 유무에 상관없이 유사한 결과를 보인다. 또한 Fig. 12에서도 알 수 있듯이 동일한 시각에서의 순간 유선 분포 역시 매우 흡사해 보인다. 따라서 본 연구 결과와 SPH법(Violeau et al., 2007)과의 결과차이는 결국 이산화 기법에 따른 상이함이 가장 큰 원인인 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 13은 오일 봄 주위에서 난류운동에너지 분포의 시간변화

Fig. 12 Comparison of instantaneous stream lines between w/o and w/ turbulence model for light oil, skirt angle $\theta = -10^\circ$ and wave height $H_w = 1.0\text{m}$

Fig. 13 Distribution of turbulent kinetic energy near oil boom for light oil, skirt angle $\theta = -10^\circ$ and wave height $H_w = 1.0\text{m}$

를 나타낸다. 특히 파랑과 상호작용하며 운동하는 오일 붐 주변에서 활발한 난류운동에너지 분포를 확인 할 수 있으며, 특히, 오일 붐 끝단에서 비롯된 강한 난류에너지를 확인 할 수 있다. 또한 오일 붐 후면의 자유표면 근처에는 붐의 상부에서 발생된 비선형 월류에 의해 보다 강력한 난류에너지 띠(Turbulent energy band)가 관찰되며, 이는 Splash-over의 누유로 인해 넘어온 기름 입자들이 물 입자들과 상호작용함에 따라 형성된 것으로 보인다. 이와 관련하여 향후 좀 더 정확한 검증을 위하여 실험과의 비교가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 PNU-MPS법을 사용하여 오일 붐을 이용한 파랑 중 기름유출 방재에 관한 2차원 입자법 시뮬레이션 수행하였다. 먼저, 시뮬레이션에 사용될 수조의 조파기 및 소파영역의 성능을 검증하기 위하여 경사면 구조물에서의 월파랑 산정 문제를 통해 실험결과(Saville, 1995) 및 타 시뮬레이션 결과들과 비교하였다. 본 시뮬레이션을 통해 산출된 월파랑은 타 시뮬레이션에 비해 실험치에 보다 근접한 것을 알 수 있었다. 이후, 2차원 파랑중 오일붐의 성능을 예측하기 위해 기름의 특성, 오일 붐 스커트의 각도 그리고 파고의 변화에 따른 오일 붐의 누유 상태를 관찰하였으며, Violeau et al.(2007)의 시뮬레이션의 결과와 비교하여 거의 유사한 경향이 나타나는 것을 확인하였다. 좀 더 정확한 검증을 위하여 실험과의 비교가 필요할 것으로 판단되어진다. 향후 본 시뮬레이션 기법은 다양한 파랑 조건하에서 계류된 오일 붐의 다자유도 운동 시뮬레이션을 통해 보다 효과적인 오일 붐 설계와 누유 방재에 적극 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것(2011-0011220)을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Bae, S.H., Jung, Y.C., 2003. Modelling of Oil Boom Failure using the Fluent. *Journal of Korean Navigation and Port Research*, 27(2), 239-246.
- Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1984. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Prentice-Hall, Inc., US., 170-186.
- Goodman, R.H., Brown, H.M., AN, C.F., Rowe, R.D., 1996. Dynamic Modeling of Oil Boom Failure Using Computational Fluid Dynamics. *Spill Science and Technology Bulletin*, 3(4), 213-216.
- Gotoh, H., Shibahara, T., Sakai, T., 2001. Sub-particle-scale Turbulence Model for the MPS Method - Lagrangian Flow Model for Hydraulic Engineering. *Advanced Methods for Computational Fluid Dynamics*, 9(4), 339-347.
- Hu, K., Mingham, C.G., Causon, D.M., 2000. Numerical Simulation of Wave Overtopping of Coastal Structures Using the Non-linear Shallow Water Equations. *Coastal Engineering*, 41, 433-465.
- Jeong, S.M., Nam, J.W., Hwang, S.C., Park, J.C., Kim, M.H., 2013. Numerical Prediction of Oil Amount Leaked from a Damaged Tank Using Two-dimensional Moving Particle Simulation Method. *Ocean Engineering*, 69, 70-78.
- Khayyer, A., Gotoh, H., 2011. Enhancement of Stability and Accuracy of the Moving Particle Semi-implicit Method. *Journal of Computational Physics*, 230, 3093-3118.
- Koshizuka, S., Oka, T., 1996. Moving-particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid. *Nuclear Science and Engineering*, 123, 421-434.
- Lee, B.H., Jeong, S.M., Hwang, S.C., Park, J.C., Kim, M.H., 2013. A Particle Simulation of 2-D Vessel Motions Interacting with Liquid-Sloshing Cargo. *Computer Modeling in Engineering and Science*, 91(1), 43-63.
- Lee, B.H., Park, J.C., Kim, M.H., Hwang, S.C., 2011. Step-by-step Improvement of MPS Method in Simulating Violent Free-surface Motions and Impact-loads. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 200, 1113-1125.
- Lee, C.M., Kang, K.H., 1997. Prediction of Oil Boom Performance in Currents and Waves. *Spill Science and Technology Bulletin*, 4, 257-266.
- Milgram, J.H., Van Houten, R.J., 1978. Mechanics of a Restrained Layer of Floating Oil above a Water Current. *Journal of Hydronautics*, 12(3), 93-108.
- Park, J.C., Lee, B.H., Hong, K.Y., 2008. Wave Overtopping Simulations over Coastal Structures. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22, 1222-1229.
- Saville, T., 1995. Laboratory Data on Wave Run up and Overtopping on Shore Structures. Dayton, Ohio, U.S. Army, Beach Erosion Board, Document Service Centre, 64.
- Soliman, A., Raslan, M.S., Reeve, D.E., 2003. Numerical Simulation of Wave Overtopping Using Two Dimensional Breaking Wave Model. *Coastal Engineering VI*, Cadiz, Spain, 439-447.
- Violeau, D., Buvat, C., Abed-Meraim, K., de Nanteuil, E., 2007. Numerical Modelling of Boom and Oil Spill with SPH. *Coastal Engineering*, 54, 895-913.
- Xing, F., Wanqing, W., Bin, Z., 2010. Numerical Experimental Set-up of Oil Containment by Rigid Floating Boom in Wave. *Bioinformatics and Biomedical Engineering Conf.*, 1-5.
- Zheng, Z., AN, C.-F., 1999. Preliminary Numerical Simulation of Boom Failure with VOF Model. *ACTA SCIENTIAE CIRCUMSTANTIAE*, 19, 604-609.