플로터를 이용한 슬로싱 충격하중 저감효과가 선체운동에 미치는 영향

남정우* · 김경성** · 황성철* · 허재경* · 박종천* · Moo-Hyun Kim**

*부산대학교 조선해양공학과

**Department of Civil Engineering, Texas A&M University

Effect on Vessel Motion Caused by Mitigation of Sloshing Impact Loads using Floaters

Jung-Woo Nam*, Kyung-Sung Kim**, Sung-Chul Hwang*, Jae-Kyung Heo*,
Jong-Chun Park* and Moo-Hyun Kim**

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

**Department of Civil Engineering, Texas A&M University, Texas, USA

KEY WORDS: Moving particle simulation (MPS) method MPS법, Sloshing 슬로싱, Floater 부유구, Long-time simulation 장시간 시뮬레이션, Coupling of liquid-sloshing/vessel-motion 슬로싱-선체운동 연성

ABSTRACT: When a liquid cargo tank is partially filled with fluid, internal impact loads can be occurred from the vessel's motions. In this study, liquid sloshing problems with a thin top layer of particles with a lighter density than water and the coupling effects of the liquid-sloshing/vessel-motion were investigated in order to reduce the sloshing-induced impact loads. The PNU-MPS (Pusan-National- University-modified Moving Particle Simulation) method for solving the liquid motion inside a tank and the CHARM3D BEM (Boundary Element Method) based time-domain ship motion analysis program for vessel-motion simulation were coupled. From the simulation results, we could see that the floaters seemed to be quite effective at reducing the sloshing impact loads in the case of tank-only sloshing problems, but not as much for the coupling problem with vessel motion.

1. 서 론

최근 전 세계적으로 친환경에너지에 대한 수요가 증가하고 있으며, 고유가와 동일본 대지진으로 인한 원전상태 이후 천연 가스를 이용한 화력발전소 수요가 증가되고 있다. 특히, 조선분야에서는 액화천연가스(LNG; Liquefied natural gas)의 수요증가에 따라 선박의 운항경비 절감과 해양자원 개발을 위해 초대형 LNG 운반선, FSRU(Floating storage regasification unit), LNG-FPSO(Floating production storage and offloading) 및 LNG-FSRU 등과 같은 고 부가가치 선박의 발주가 증가하고 있다. 하지만 이들과 같은 대형 LNG 저장 탱크를 갖는 선박은 슬로싱(Sloshing)으로 인한 탱크 내부의 구조 손상뿐만 아니라, 슬로싱에 의한 유체 충격하중은 선박의 운동에도 영향을 주어 운항 안정성에 관한 심각한 위험요소가 발생할 수 있다. 따라서 슬로싱 현상에 대한 정확한 예측을 통하여 이를 감소시킬 수 있는 방안 연구가 절실히 필요하다.

이에 대한 연구는 주로 여러 가지 격막(Baffle)을 이용한 슬로싱 충격하중 저감연구가 지속적으로 진행되고 있다(Akyildiz and Ünal, 2005; Biswal et al., 2006; Liu and Lin, 2009; Goudarzi

and Sabbagh-Yazdi, 2012; Jung et al., 2012). 격막을 이용한 경우 설치와 제조의 용이성이 뛰어나지만, 격막의 슬로싱 충격하중 저감 효과는 대상이 되는 모델, 설치 높이 및 개구폭(Opening width) 등의 설계인자에 강하게 영향을 받는다는 문제점이 존재한다. 한편, 최근에는 공진주파수 부근에서의 극심한 슬로싱 현상을 회피하고, 슬로싱 충격하중을 저감하기 위해 정수면 상에 부유구나 부유식 블랭킷(blanket)을 배치하는 연구 또한 진행 중에 있다(Hwang et al., 2010; Lee et al., 2011a; Kim et al., 2011a).

슬로싱 현상은 자유표면의 급격한 변화와 기체와 액체가 공존하는 혼상류를 동반하기 때문에 수치 시뮬레이션의 많은 어려움이 있다. 수치 시뮬레이션 방법에는 대부분 격자 기반의 방법인 유한체적법(FVM)과 유한차분법(FDM)이 널리 사용된다. 하지만 극심한 자유표면 유동이나, 유체-고체간의 충돌과 같은 복잡한 물리현상을 포함하는 문제나 자유표면의 분리 또는 합체에 의해 격자 생성이 어려우며 격자가 꼬이는 등의 문제가 발생한다. 한편, 입자 기반의 수치시뮬레이션 방법은 격자 기반의 해석방법보다 복잡한 물리현상을 해석할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 특히 입자법은 이류항의 계산을 완전한 Lagrangian 접근인 입자 이동으로 계산하기 때문에 격자 기반의 Eulerian 방법에서 심각

하게 유발되는 수치 확산이 없을 뿐만 아니라 질량이 완벽히 보존되는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 Hwang et al. (2010)과 Lee et al. (2011a)에 의해 소개된 자유표면상에 수평으로 배치된 부유구를 이용하여 슬로싱 충격압력 저감에 관한 연구를 바탕으로 좀 더 다양한 파랑 환경 하에서 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, 나아가 슬로싱-선체운동의 연성 시뮬레이션을 통해 부유구에 의한 슬로싱 저감 효과를 연구하였다. 이 때, 슬로싱 탱크 내의 유동은 Moving particle simulation(MPS) 법(Koshizuka and Oka., 1996)을 개량한 PNU-MPS(Pusan-national-university-modified MPS) 법(Lee et al., 2011b)을, 그리고 시간영역에 대한 선체 운동 계산은 경계 요소법(Boundary element method) 기반의 CHARM3D(Kim et al., 2011b)를 연성하여 시뮬레이션 하였다.

2. 수치 시뮬레이션 기법

2.1 슬로싱 유동 시뮬레이션 기법

비압축성 점성유동에 대한 지배방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식이다.

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

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

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 이류항을 포함한 라그랑지의 전미분(Total derivative) 형태이고, 이는 입자의 직접적인 이동에 의해 계산된다. 한편, 우변은 압력 구배항, 점성항 그리고 외력항으로 구성되어 있다. 비압축성 점성 유동을 시뮬레이션하기 위해서는 지배방정식의 편미분 연산자를 포함하는 모든 항은 MPS 법(Koshizuka and Oka, 1996)의 상호작용 모델로 치환되어야 한다. 본 연구에서는 기존의 MPS 법을 개량하여 정확도와 안정성을 향상시킨 PNU-MPS 법(Lee et al., 2011b)을 도입하여 입자간 상호작용 모델로 치환하였다.

2.2 시간영역 선체운동 시뮬레이션 기법

모든 구조물에 대한 유체력의 계수들은 3차원 산란(Diffraction) 및 방사(Radiation)에 관한 계산 프로그램을 이용하여 주파수 영역에서 선행 계산한다(Lee et al., 1991; Lee, 1995). 계산된 계수들은 합성적분(Convolution integral)을 포함하는 푸리에 변환으로 시간 영역에 상응하는 값들도 변환되어진다. 그 식은 다음과 같다.

$$F_R = -M(\infty)\ddot{\zeta} - \int_{-\infty}^t R(t-\tau)\dot{\zeta}(\tau)d\tau \quad (3)$$

여기서 $M(\infty)$ 은 무한 주파수 영역에서의 부가질량(Added mass)을 나타내며, 합성적분은 시간 t 에 따라 생성되는 파에 의한 물체상의 힘을 나타낸다. 부가질량은 식 (4)와 같이 계산된다.

$$M^a(\infty) = M^a(w) + \int_0^\infty R(t) \frac{\sin(wt)}{w} dt \quad (4)$$

여기서 $M^a(\infty)$ 는 주파수 w 일 때의 부가질량을 나타낸다. $R(t)$ 은 지연함수(Retardation function) 또는 시간 기억함수로 불리며, 방사 문제의 주파수영역 해법과 관련이 있다. $R(t)$ 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$R(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty C(w) \cos(wt) dw \quad (5)$$

$$C(w) = 2\gamma \sqrt{M + M^a(w)} K \quad (6)$$

식 (6)은 각 주파수에서의 방사 감소 계수이며, K 는 복원 행렬(Restoring matrix), 그리고 γ 는 감쇠비를 나타낸다. 지연함수는 6×6 크기를 가지는 행렬의 방사 감소 계수와 상응된다. 그 후, 각 시간 간격에 따른 선체 운동은 식 (7)으로 구하여 진다.

$$[M + M^a(\infty)]\ddot{\zeta} + \int_{-\infty}^t R(t-\tau)\dot{\zeta}(\tau)d\tau + K\zeta = F(t) \quad (7)$$

여기서 $F(t)$ 는 존재하는 모든 외력을 포함한다. 본 연구에서는 풍력과 조력은 포함되지 않았으므로, 식 (8)과 같이 외력항에는 파력과 선체 점성 저항력으로 이루어진다.

$$\vec{F}_{ext}(t) = \vec{F}_w(t) + \vec{F}_{hv}(t) \quad (8)$$

2.3 슬로싱-선체운동 연성

본 연구에서 수행되어진 선체 운동과 선체에 탑재된 유체 수조의 연성을 위해, 슬로싱 힘 벡터는 식 (7)의 우변의 외력항에 추가로 삽입된다. 따라서 식 (7)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\vec{F}(t) = \vec{F}_{ext}(t) + \vec{F}_{slosh}(t) \quad (9)$$

슬로싱의 힘은 관성력과 유체의 상호 작용력을 포함하고 있다.

$$\vec{F}_{slosh}(t) = \vec{F}_{int}(t) + [m_{\tan k, ij}] \frac{\partial^2 \tilde{\zeta}}{\partial t^2} \quad (10)$$

상호 작용력 $\vec{F}_{int}(t)$ 는 정수압의 복원항과 동압의 부가질량항에 영향을 미친다. 수조내의 유체 운동으로 인해, 수조 내부의 질량 분포와 상응하는 질량 관성모멘트는 시간에 따라 지속적으로 바뀌게 되며, 이 효과는 현재 시간 영역 계산에 포함되어 진다.

Fig. 1 Schematic view of tank dimension and position of pressure gauge

3. 수치 시뮬레이션

3.1 2차원 슬로싱의 단시간 시뮬레이션

본 연구의 타당성을 검증하기 위해 Kishev et al.(2006)이 수행한 실험과 비교하였다. Fig. 1에 보이는 바와 같이, 사각 탱크의 크기는 폭 0.60(m), 높이 0.30(m)이다. 적하율(Filling ratio, FR)은 40%, 압력의 측정 지점 P1은 바닥으로부터 0.10(m) 떨어진 탱크의 우측 벽면이다. 탱크는 수평방향으로 식 (11)와 같이 운동한다.

$$X = A \sin(2\pi t / T) \quad (11)$$

여기서 진폭 A는 0.05(m), 주기 T는 1.3(s)와 1.5(s)이다.

시뮬레이션에 사용된 유체 입자는 약 2,900여개이며, 초기 입자간 거리는 0.01(m)이다. 중력가속도 g 는 $9.81(\text{m/s}^2)$, 동점성 계수 ν 는 $10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$ 이고 표면 장력 효과는 무시하였다.

Fig. 2와 3은 주기 $T=1.3(\text{s})$ 와 $1.5(\text{s})$ 인 경우 탱크내 P1 지점에서의 시간에 따른 압력을 실험과 비교한 것이다. 주기 $T=1.3(\text{s})$ 인 경우 탱크의 수평운동으로 인해 발생한 파가 한 쪽 벽면과 충돌하여 발생하는 압력 극치(Peak)와 벽면 충돌에 의해 상승한

Fig. 2 Time history for the pressure at period $T=1.3(\text{s})$

Fig. 3 Time history for the pressure at period $T=1.5(\text{s})$

Fig. 4 Comparison of free-surface profiles between experiments and simulation at period $T=1.3(\text{s})$. From top to bottom, $t=0.1T$ and $0.2T$

유체가 하강하여 반대쪽 벽면으로 진행되는 유체들 간의 충돌로 인해 발생하는 압력 극치가 주기별로 2개씩 나타난다. 반면, $T=1.5(\text{s})$ 경우 압력의 시계열이 주기 $T=1.3(\text{s})$ 인 경우와 다소 다른 경향을 보인다. 이는 탱크 내에 정상파(Standing wave)가 상대적으로 작은 파봉괴(Bore)와 중첩되어 운동하므로 한 주기 내에 3개의 극치를 갖게 되기 때문이다. 주기 $T=1.3(\text{s})$ 와 $1.5(\text{s})$ 인 경우 압력극치는 다소 임의성을 띄지만 압력의 시계열이 실험과 잘 일치함을 확인할 수 있다. Fig. 4에는 주기 $T=1.3(\text{s})$ 인 경우 자유표면 형상을 실험과 비교하였다. 매우 복잡하고 비선형성이 강한 자유표면을 유동이 나타나며 실험과 시뮬레이션 결과가 유사한 경향을 보인다.

3.2 2차원 슬로싱의 장시간 시뮬레이션

앞선 결과에서 나타나듯이 탱크내 P1 지점에 작용하는 압력의 시계열은 압력의 극치가 임의성을 띄는 경향을 보인다. 이를 위하여 장시간의 시뮬레이션에 의한 통계해석이 필요하게 된다 (Kishev et al., 2006; Choi et al., 2010). 본 절에서는 질량보존이 확실한 입자법의 장점을 이용하여 장시간 시뮬레이션에 의한 압력의 통계해석을 수행하였다.

초기 조건은 앞서 수행한 시뮬레이션과 동일하다. 단, 적하율은 20%이고, Fig. 1에 나타난 바와 같이 압력의 측정지점 P2는 바닥으로부터 0.05(m) 떨어진 탱크의 우측 벽면이다. 탱크의 수평방향 운동 주기 T 는 $0.8 \sim 1.7(\text{s})$, 진폭 A는 $0.06(\text{m})$ 이며, 총 시뮬레이션 시간은 320 주기이다. 주기 별 P2 지점에 작용하는 압력을 통계해석 하였다. 통계해석에는 최대 극치 압력(P_{max}), 상위 1/10 확률에 해당하는 극치 압력의 평균($P_{1/10}$), 그리고 각 주기별 극치 압력의 평균(P_{avg})이 사용되었다. $P_{1/10}$ 의 계산에는 초기 20주기를 제외한 총 300개의 극치 중 상위 10%인 30개의 극치가 사용되었다.

진동하는 사각 탱크 내부 유체는 고유진동수를 가지며, 식 (12)와 같이 선형분산 관계식에 의해 도출할 수 있다(Lamb, 1932).

$$T_n = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\pi}{L} g \tanh\left(\frac{\pi H}{L}\right)}} \quad (12)$$

여기에서 H 는 적재 수심 그리고 L 은 탱크의 길이를 나타낸다. Fig. 5는 P2에 작용하는 압력의 주기 별 통계해석의 결과이다.

Fig. 5 Statistic analysis of pressure probed at P2

식 (16)으로부터 계산한 고유주기는 1.589(s)인 반면, 시뮬레이션과 실험의 경우 약 1.3(s)이다. 즉 해석적으로 계산된 고유 주기보다 시뮬레이션과 실험을 통해 얻어진 고유 주기가 18.2% 작게 나타난다. P_{avg} 를 기준으로 주기 1.3~1.5(s)일 때 시뮬레이션 결과는 실험의 샘플링 주파수가 1kHz인 경우의 실험결과와는 다소 차이를 보이지만, 실험의 샘플링 주파수가 3kHz나 5kHz인 경우와는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.3 적하율에 따른 2차원 슬로싱의 장시간 시뮬레이션

상술한 결과들을 통해 슬로싱 현상의 단·장시간 예측이 타당하다는 사실을 알 수 있었다. 본 절에서는 슬로싱 탱크 내 유체의 적하율에 따른 충격압력의 통계적인 경향을 파악하기 위해 탱크 내 벽면 모든 지점인 360개 지점에서 압력에 관한 장시간 시뮬레이션 결과의 통계해석을 수행하였다. 이 때, 적하율은 20~80%

Fig. 6 Statistic analysis of pressure along the wall with various filling ratio (blue dotted line: P_{max} , green straight line: $P_{1/10}$, and red dashed line: P_{avg})

이고 그 외 시뮬레이션 조건은 3.2절의 계산 조건과 동일하다.

Fig. 6은 적하율에 따른 각 벽면에 작용하는 충격압력의 통계 해석 결과를 나타낸다. 단, 각 적하율에 따른 공진 주기는 시뮬레이션의 결과 중 충격압력이 가장 큰 주기이며, 식 (12)에 의해 계산된 공진주기와는 평균 18% 정도의 오차를 보인다. 단순한 사각 탱크 형상에서의 슬로싱 현상은 적하율이 낮은 20%인 경우 양 측벽 면의 정수면 부근에서 충격압력이 크게 나타나며, 적하율이 40% 이상인 경우 탱크의 상단 모서리에서 충격압력이 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 Det norske veritas(DNV)(2006)의 보고서에 보고된 것과 같이 일반적으로 적하율에 따른 충격압력이 작용하는 범위와 유사하게 나타나고 있다.

3.4 슬로싱 충격하중 완화를 위한 부유구 시뮬레이션

Fig. 7은 슬로싱의 충격하중 완화를 위한 부유구(Floater)를 배치한 초기형상을 나타낸다. 앞서 3.1절에서 수행한 단시간 2차원 슬로싱 시뮬레이션과 동일한 조건에 밀도가 200(kg/m³)인 부유구를 정수면 상에 배치하였다. 이때 부유구의 초기 입자간 거리는 0.01(m)이고, 적하율은 40%이다.

Fig. 8은 Fig. 5의 통계 결과를 토대로 P1 지점에 가장 큰 충격압력이 작용하는 주기 $T=1.3$ (s)일 때, 부유구를 포함하는 경우와 그렇지 않은 경우의 P1에 작용하는 압력의 시계열이다. 두 경우 모두 시간에 따른 압력의 전체적인 경향은 유사하지만, 각 주기 별 극치가 부유구의 존재로 인해 급격히 감소되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9의 장시간 시뮬레이션 결과에서 나타나듯이 각 주기별 충격압력이 감소된 것을 확인 할 수 있으며, 특히 주기 $T=1.3$ (s)

Fig. 7 Schematic view of a tank and floaters with dimensions and principal pressure gauge position

Fig. 8 Comparison for time history of pressure at P1 w/ and w/o floaters in case of FR=20%

Fig. 9 Statistic analysis of pressure probed at P2 w/ and w/o floaters in case of FR=20%

Fig. 10 Statistic analysis of pressure along the wall with FR=20% and $T=1.3(s)$ (blue dotted line: P_{max} , green straight line: $P_{1/10}$, and red dashed line: P_{avg})

인 경우 $P_{1/10}$ 의 결과를 기준으로 약 39.41%의 충격압력이 감소하였다. 또한 Fig. 10에도 볼 수 있듯이 부유구를 포함한 경우 양 측벽 면의 정수면 근처에서 충격압력이 크게 감소하는 효과를 확인할 수 있다. 이는 Lee et al.(2011a)에서도 언급한 것처럼 탱크의 주기적 수평운동으로 인해 탱크 내부에 생성/발달된 파가 전파되는 동안 가속도가 상대적으로 높은 파 전면(Wave front)에 부유구가 집중 배치됨에 따라 측벽 면에 작용하는 유체의 충격압력을 감소시킨 것으로 보인다. 하지만, Fig. 10에서 나타나듯이 상대적으로 가벼운 부유구들의 활발한 운동의 영향으로 상단의 모서리 부근에서는 충격압력이 다소 증가하는 경향이 보인다. 이 때, 탱크의 모든 벽면에 작용하는 압력을 적분한 총합력은 $P_{1/10}$ 을 기준으로 부유구가 있는 경우 약 2.29%의 감소만 보인다. 따라서 슬로싱 감쇠 부유구는 슬로싱 탱크의 측벽 면에 작용하는 집중 충격압력을 분산시키는 효과가 있는 반면, 탱크의 모든 벽면에 작용하는 총합력에는 크게 기여하지 않음을 알 수 있다.

3.5 슬로싱-선체운동 연성 시뮬레이션

본 절에서는 슬로싱-선체운동 연성 방법을 이용하여 부유구에

Fig. 11 Model of MARIN-FPSO with sloshing Tanks (left) and model for panel method (right)

Table 1 Characteristics of sloshing tanks

Designation	Magnitude (AFT)	Magnitude (Forward)
Tank aft from aft perpendicular	61.08m	209.54m
Tank bottom from keel line	3.3m	3.3m
Tank Length	49.680m	56.616m
Tank Breadth	47.0m	47.0m
Tank Height	32.0m	32.0m

Table 2 Principal particulars of FPSO (bare hull) and mooring system

Description	Magnitude
Length Between Perpendicular	285.0m
Breadth	63.0m
Draught	13.0m
Mooring System	
Surge	$6.50 \times 10^5 \text{ N/m}$
Sway	$2.43 \times 10^6 \text{ N/m}$
Yaw	$1.76 \times 10^8 \text{ Nm/rad}$

Table 3 Simulation conditions

Wind	N/A
Current	N/A
Wave	Heading 90 Degree (beam)
	Significant Height 5.0m
	Peak period 12s
	γ of JONSWAP spectrum 3.3
Filling Ratio	18%

의한 충격하중 저감 효과가 선체 운동에 미치는 영향을 확인하였다. Fig. 11에는 사용된 MARIN-FPSO 모형을, 그리고 Tables 1~3에는 시뮬레이션에 사용된 슬로싱 탱크와 선체의 재원 및 시뮬레이션 조건을 각각 나타낸다. 단, 본 연구에서는 실제의 계류선(Mooring line) 대신 선형 스프링을 적용하였으며, 불규칙 파랑 중 총 시뮬레이션 시간은 1800초이다.

Fig. 12는 좌우동요(Sway), 상하동요(Heave), 횡동요(Roll) 운동의 RAO를 나타낸다. 선행된 슬로싱 단독 실험의 결과로부터 유추한다면 감소된 충격 하중으로 인해 선체 운동에 관한 RAO의 감소가 예상되지만, 결과적으로 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 이것은 부유구에 의한 탱크 내 슬로싱의 충격하중에는 영

Fig. 12 Comparison of simulated RAOs

향을 미치나, 불규칙 파랑 중에 놓인 선체 운동에는 전반적으로 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 이는 Fig. 12에서 나타나듯이 슬로싱 감쇠 부유구는 탱크의 좌우 벽면에서의 집중 충격압력(P_{max})은 감소시키는 반면 탱크 벽면에 작용하는 충격 압력의 총합은 $P_{1/10}$ 기준으로 전후의 탱크 별로 각각 약 1.3%, 2.0%의 감소만 보이며 선체 운동에는 크게 기여하지 않기 때문이라 판단된다.

Fig. 13 Statistic analysis of pressure along the wall (blue dotted line: P_{max} , green straight line: $P_{1/10}$, and red dashed line: P_{avg})

4. 결 론

본 논문에서는 PNU-MPS법(Lee et al., 2011b)을 이용하여 부

유구를 이용한 슬로싱 충격하중 저감에 관한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 단·장시간 탱크 벽면에 작용하는 압력을 실험과 비교하여 타당성을 검증하였다. 또한, 이를 통해 부유구를 이용한 슬로싱 충격하중 저감 시뮬레이션을 수행하였으며, 장시간 시뮬레이션 결과 적하율 20%의 조건하에서 $P_{1/10}$ 을 기준으로 최대 39.41%의 충격압력의 저감 효과를 확인하였다. 또한 CHARM3D (Kim et al., 2011b)를 이용한 선체운동과의 연성 해석을 통해 부유구가 선체 운동에 미치는 영향을 확인하였다. 그 결과 주어진 조건하에서 부유구가 선체 운동에 미치는 영향은 상대적으로 미비하다는 것을 알 수 있었다. 다시 말해, 부유구는 슬로싱 탱크의 벽면에 걸리는 충격 하중을 저감시키는 효과는 있으나 불규칙 파랑 중에 놓인 선체 운동에는 크게 영향을 주지 않는다는 것을 확인 할 수 있었다. 향후 본 논문에서 개발된 연성 기술을 이용하여 다양한 슬로싱/선체운동의 공학적 응용문제에 적용이 가능할 것으로 보인다.

후 기

본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Akyildiz, H. and U'nal, E. (2005). "Experimental Investigation of Pressure Distribution on a Rectangular Tank Due to the Liquid Sloshing", Ocean Engineering, Vol 32, No 11-12, pp 1503-1516.
- Biswal, K.C., Bhattacharyya, S.K. and Sinha, P.K. (2006). "Non-linear Sloshing in Partially Liquid Filled Containers with Baffles", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol 68, No 3, pp 317-337.
- Choi, H.I., Kwon, S.H., Park, J.H. and Choi, Y.M. (2010). "A Study on the Effect Filling Ratio on Sloshing Impact Pressure", Journal of the Korean Society of Ocean Engineers, Vol 24, No 6, pp 30-33.
- Det Norske Veritas (DNV) (2006). "Sloshing Analysis of Lng Membrane Tanks", Classification Notes No.30.9
- Goudarzi, M.A. and Sabbagh-Yazdi, S.R. (2012). "Analytical and Experimental Evaluation on the Effectiveness of Upper Mounted Baffles with Respect to Commonly used Baffles", Ocean Engineering, Vol 42, pp 205-217.
- Hwang, S.C., Lee, B.-, Park, J.C. and Sung, H.G. (2010). "Particle-based Simulation for Sloshing in a Rectangular Tank", Korean Soc. Ocean Engrg., Vol 24, No 2, pp 20-27 (in Korean).
- Jung, J.H., Yoon, H.S., Lee, C.Y. and Shin, S.C. (2012). "Effect of the Vertical Baffle Height on the Liquid Sloshing in a Three-dimensional Rectangular Tank", Ocean Engineering, Vol 44, pp 79-89.

- Kishev, Z., Hu, C. and Kashiwagi, M. (2006). "Numerical Simulation of Violent Sloshing by a CIP-Based Method", *Journal of Marine Science and Technology*, Vol 11, pp 111-122.
- Kim, Y., Kim, S.Y., Kim, K.H., Chun, S.E., Suh, Y.S. Park, J.J., Hwang-Bo, S.M. and Lee, Y.J. (2011a). "Model-scale Sloshing Tests for an Anti-sloshing Floating Blanket System", *Proceedings of 2011 International Offshore and Polar Engineering Conference*, Maui, pp 129-136.
- Kim, K.S., Lee, B.H., Kim, M.H. and Park, J.C. (2011b). "Simulation of Sloshing Effect on Vessel Motions by Using MPS (Moving Particle Simulation)", *Computer Modeling Engineering Sciences*, Vol 79, No 3, pp 201-221.
- Koshizuka, S. and Oka, T. (1996). "Moving-particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid", *Nuclear science and engineering*, Vol 123, pp 421-434.
- Lamb, H. (1932). "Hydrodynamics", Cambridge University Press.
- Lee, B.H., Park, J.C., Kim, M.H. and Hwang, S.C. (2011a). "Moving Particle Simulation for Mitigation of Sloshing Impact Loads Using Surface Floaters", *Computer Modeling Engineering Sciences*, Vol 75, No 2, pp 89-112.
- Lee, B.H., Park, J.C., Kim, M.H. and Hwang, S.C. (2011b). "Step-by-step Improvement of MPS Method in Simulating Violent Free-surface Motions and Impact-loads", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol 200, pp 1113-1125.
- Lee, C.H. (1995). "WAMIT Theory Manual: MIT Report 95-2", Dept. of Ocean engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Lee, C.H., Newman, J.N., Kim, M.H. and Yue, D.K.P. (1991). "The Computation of Second-order Wave Loads", *Proceedings of 10th International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engng*, pp 23-28.
- Liu, D. and Lin, P. (2009). "Three-dimensional Liquid Sloshing in a Tank with Baffles", *Ocean Engineering* Vol 36, No 2, pp 202-212.

2012년 6월 13일 원고 접수

2012년 7월 31일 심사 완료

2012년 8월 20일 게재 확정