

탱크 내 격벽에 의한 간극 변화가 선박 운동에 미치는 영향 연구

김경성* · 유선진**†

* 동명대학교 조선해양공학부, ** 동명대학교 디지털미디어공학부

A Study of Sloshing Tank on Vessel Motions with Various Baffle Clearance

Kyung Sung Kim* · Sunjin Yu**†

* School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Tongmyong University Busan 48520, Korea

** School of Digital Media Engineering, Tongmyong University Busan 48520, Korea

요 약 : 선박의 유체 저장 탱크 내부의 적재용량에 의한 선박 운동 고유 특성의 변화는 많은 실험 과 연구를 통해 밝혀졌다. 또한 이러한 현상에 의한 선박 운동 특성 변화를 최소화하기 위한 장치는 지속적으로 연구 및 개발되고 있으며, 특히 횡동요 운동에 대한 저감효과에 대한 부분이 주를 이루고 있다. 본 연구에서는 이러한 장치 중 하나인 저장탱크 내부의 격벽에 의한 횡동요 저감장치의 길이 변화에 따른 간극의 변화에 의한 선박 운동의 변화를 수치 시뮬레이션 하였다. 본 연구를 위해 경계요소법 기반의 부유체 운동 프로그램과 입자법 기반의 전산유체역학 프로그램이 동적 연성된 프로그램을 사용하였으며, 동적 연성된 프로그램은 동일 실험과의 비교를 통해 검증하였다. 검증된 프로그램은 격벽의 길이를 달리하여 간극에 변화를 준 다양한 경우에 대해 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 액체 저장량의 변화 및 액체 탱크 내부의 격벽에 의한 간극의 차이에 의해 선박 운동 특성이 변화함을 응답 진폭 함수의 비교를 통해 확인하였다. 주목할 만한 결과로써 적재용량에 따라 변화하는 선박의 운동 특성이 간극을 조정함으로써 동일한 선박 특성을 가지게 됨을 확인하였으며, 이는 격벽에 의한 간극의 조정을 통한 선박 운동 제어가 가능함을 보여준다. 추후 격벽의 수 및 각기 다른 길이를 가진 격벽에 의한 연구를 수행하여 격벽 길이 조정을 통한 선박 운동 특성 제어에 대한 연구를 수행할 계획이다.

핵심용어 : 탱크 내 격벽, 선체운동제어, 선박운동-슬로싱 연성, 입자기반 전산유체역학, 횡동요제어

Abstract : The effects of inner liquid sloshing on vessel motions are a well-known factor. It was investigated experimentally and numerically. In this regard, the study of many efforts to reduce natural phenomena of vessel motions by adopting special devices especially for roll motions. Among many devices, inserting baffles in the inner liquid tank is very common. In this study, one investigated the vessel motions with inner sloshing tanks with baffles inside. For the numerical simulation, one employed a dynamically coupled program between boundary-element-method-based vessel motion analysis program and a particle-based computational fluid dynamics program. Comparing corresponding experimental results validated the dynamically coupled program. The validated coupled program was used to simulate vessel motions, including sloshing effects with various lengths of inner baffles. The simulation results show that not only the filling ratio of inner liquid, but also the length of clearance due to baffles influenced the vessel motions. The significant point of this study was that the natural frequency of vessel motions can be maintained irrespective of the amount of filling ratio through adjustment of the clearance. In a future study, the effects of various numbers of baffles with various clearances would be conducted to percuss the possibility of vessel motion control with inner liquid sloshing effects.

Key Words : Sloshing tank with baffles, Vessel motion control, Coupling between vessel motion and sloshing, Particle method CFD, Roll motion control

1. 서 론

해상 운송량은 지난 수십 년 동안 다양한 화물에 대해 증가되어 왔고, 이에 대응하기 위해 적재용량 증가를 위한 선

박의 크기는 지속적으로 증가해 왔다. 따라서 적재 화물의 용량에 따른 선박 운동의 변화는 필수적으로 고려해야 하는 요소로 발전하였다. 특히 적재화물이 유체인 경우 선박의 고유주기가 바뀌거나 복수개의 고유주기를 가지기도 하며, 이로 인해 선박 설계 시 환경조건 뿐만 아니라 적재화물의 변화에 따른 영향을 고려하여 재평가해야 한다(Lee and Kim, 2010; Kim et al., 2011). 이러한 문제들을 해결하기 위해 부유

* First Author : kyungsungkim@gmail.com, 051-629-1655

† Corresponding Author : sjyu@tu.ac.kr, 051-629-1212

체 고유특성을 유지하면서 선박에서 가장 취약한 횡동요 운동을 저감시키는 방안들이 제안되어 왔다.

횡동요 운동을 저감하는 가장 대표적인 방식은 빌지-킬 (bilge-Keel) 방식으로 기다란 판 형태의 부가구조물을 선저에 부착하여 횡동요시의 형상저항 및 점성저항을 증가시켜 횡동요 운동을 저감하는 방식이다. 또 다른 방식으로는 화물창 주변 혹은 상부에 U-Tube 혹은 Horizon-Tube를 장착하여 tube 내부의 유체 운동에 의한 복원력 증가로 횡동요를 저감하는 방식도 있다. 이러한 Passive 방식 이외에도 Mazrouk and Nayfeh(2009)에서 제안한 능동형 횡동요 저감 탱크 역시 주목을 받고 있다. 이러한 Tube나 Tank 형태는 내부 유동효과가 선박의 운동과 다른 위상을 가지게 하는 방식을 이용한다는 점에서 그 효과는 높으나 초기 설치비용 증가 및 적재용량이 줄어드는 단점이 존재한다.

앞서 언급한 내부 유동 효과와 이를 고려한 선박 운동에 관한 연구는 다양한 연구가 수행되어 왔다. Yang and Kim (2011)에서는 포텐셜 기반 Boundary Element Method(BEM)법을 이용하여 극한 환경에서의 Tension Leg Platform의 거동에 관한 연구를 수행하였다. 내부 유동을 고려한 선박 운동에 대한 연구는 Lee et al.(2010)에서 Fluid Volume Method(FVM)을 이용한 내부 유동 시뮬레이션 결과를 선박 운동 프로그램과 동적 연성하여 선박 운동에 대한 내부 유체 효과를 연구하였으며, Kim et al.(2011)에서는 내부 유동 시뮬레이션 방법을 격렬한 자유표면 구현이 우수한 입자기반 전산유체역학 방법을 이용하여 선박 운동에 대한 내부 유체 효과를 연구하였다.

격렬한 운동을 가지는 내부 유동을 위한 입자기반 전산유체역학 프로그램은 대표적으로 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)(Monaghan, 1988)와 Moving Particle Semi-Implicit(MPS)법(Koshisuka and Oka, 1996)이 있다. SPH법의 경우 압력해법에 상태방정식을 이용하여 빠른 계산이 가능하지만 정확도가 MPS법에 비해 떨어지는 단점이 있었다. 그러나 현재는 iSPH(Incompressible SPH)법(Xu et al., 2009)에서 압력해법에 MPS법과 같은 포아송 방정식을 이용하면서 발전되어 왔다. 본 연구에서는 위 두가지 입자법 중 압력진동 능력이 더 우수하다고 판단되는 MPS법을 이용하였다. MPS법은 처음 고안된 이후 Tanaka and Masunaga(2010)에서 압력해법을 위한 포아송 방정식의 소스항을 입자속도의 발산으로 정의하면서 압력의 안정화를 시도하였으며, 이후 Lee et al.(2010)에서 완화계수의 물리적 접근을 통해 더욱 안정화 되었다. 유체의 특성인 표면장력 연구는 Nomura et al.(2001)에서 제안되었으며, 이후 Kim et al.(2014)에서 법선 벡터의 정확도를 높이는 방식으로 MPS법을 발전시켜 왔다.

본 연구에서는 Cho and Kim(2016)에서 제안한 격벽을 가지

는 슬로싱 탱크의 특성의 변화로부터 착안하여, Liquefied Natural Gas(LNG)선에 내부 유체 적재 탱크에 격벽을 설치하여 선박 운동에 영향을 미치는 유체력에 대한 연구를 수행하였다. 또한 격벽과 탱크 바닥과의 간극의 변화에 따른 내부 유동 변화와 그에 따른 선박 운동의 변화에 대한 연구를 수행하였다.

2. 수치해석 모델

2.1 입자법(Moving Particle Semi-Implicit Method)

완전 라그랑지안 접근법을 따르는 입자기반 전산유체역학 방식 중 하나인 MPS는 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 사용한다.

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

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

여기서 ρ 는 밀도, \vec{u} 는 입자의 속도, t 는 시간, ∇ 는 구배, ∇^2 는 라플라시안, μ 는 점성계수, \vec{F} 는 외력을 나타낸다. 식(2)의 좌변은 라그랑지안 방식에 따라 전미분형태로 나타내어진다. 식(2)의 우변은 각각 압력구배, 점성효과 그리고 외력항을 나타내며, 라그랑지안 법을 고려하여 입자 상호 연성 모델을 이용한 차분형태로 바뀌어서 풀이될 수 있다. Kim et al.(2011)에서는 차분방정식을 입자수밀도와 가중치 함수, 그리고 입자의 위치 및 속도를 이용한 Lagrangian 방식의 형태로 변환하였으며, 본 연구에서는 Kim et al.(2011)에서 사용한 차분법을 사용하였다.

입자법은 입자들이 연속유체를 이산화된 입자로 모사하며 서로 독립적으로 물리량을 가지고 운동을 하므로, 연속성을 위배할 수 있다. 이를 해결하기 위해 중심 입자에 영향을 미치는 주위 입자의 가중치를 함수화하는 가중치 함수를 이용하여 연속성을 유지하면서 주위 입자들이 중심 입자에 미치는 영향을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 Lee et al.(2010)에서 제안한 가중치함수를 사용하였으며, 그 형태는 다음과 같다.

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

여기서 r 은 입자간의 거리, r_e 는 유효거리를 나타내며,

$r_e = l_0 \times 2.1$ 로써 l_0 는 초기 입자배치시의 입자간 간격이다. 식(3)에서 보이는 것과 같이 유효거리를 벗어나면 상호작용의 크기는 0으로써, 주위입자는 중심입자에 영향을 끼치지 않는다. 여기서 계수 2.1은 Lee et al.(2010)의 연구에서 가장 적합한 값으로 설정된 값을 사용하였다.

입자법에서는 자유 표면 경계조건 중 운동학적 자유표면 경계조건은 입자를 추적함으로써 자동적으로 만족되어진다. 그러나 동역학적 자유 표면 경계조건은 자유 표면 입자에 대기압 ($p_{atm} = 0$)를 대입함으로써 만족되어지며, 이를 위한 자유 표면 입자 탐색은 Lee et al.(2010)에서 제시된 복수 조건의 자유표면 탐색법을 따른다.

$$n_i^* = \beta_1 n_0 \tag{4}$$

$$N_i = \beta_2 N_0 \tag{5}$$

여기서 n_i 은 i -th 입자의 입자수 밀도, N_i 는 i -th 입자의 유효반경 내의 주변입자 개수를 나타내며, β_1 and β_2 는 계수로써, 본 연구에서는 Lee et al. (2010)에서 수치 테스트를 통해 구해진 0.97과 0.85를 사용하였다. n_0 는 초기 배치에서의 입자수밀도를 N_0 는 초기 배치에서의 주변입자의 개수를 나타낸다. 주변입자의 개수는 유효반경 내의 입자를 탐색하여 구할 수 있다. 입자수 밀도 n_i 는 입자법에서 유체의 밀도에 대응하여 사용되는 개념으로써 다음의 공식을 이용하여 구할 수 있다.

$$n_i = \sum_{j \neq i} w(|r_j - r_i|) \tag{6}$$

여기서 n_i 는 입자수 밀도, r 은 입자의 위치벡터이며 아래 첨자 i, j 는 각각 중심입자와 주변입자를 나타낸다. 입자수 밀도를 구하는 반경은 가중치 함수, w ,를 구하기 위한 유효반경과 동일한 $2.1l_0$ 를 사용하였다.

2.2 부유체 운동 기법

선체 운동 시뮬레이션을 위해 선체에 영향을 미치는 부가질량, 감쇠계수 및 파력 등의 유체력 계수는 3차원 회절 및 방사 연산 프로그램을 통해 주파수영역의 값으로 구할 수 있다. 3차원 회절 및 방사 프로그램의 자세한 내용은 Lee et al.(1991)에서 찾을 수 있다. 확보된 유체력 계수는 시간영역 계산에 직접 대입이 불가능하기 때문에 Volterra Expansion을 포함한 중첩 적분 기법을 이용하여 변환되며 그 식은 다음과 같다.

$$F_R = -M^a(\infty)\ddot{\zeta} - \int_{-\infty}^t R(\tau-t)\dot{\zeta}(\tau)d\tau \tag{7}$$

여기서 ζ 는 변위이며, 위첨자는 시간미분, F_R 은 방사력, $R(t)$ 는 지연함수를 나타낸다. $M^a(\infty)$ 는 주파수가 무한대일 때의 부가질량을 나타내며, 우변의 두 번째 항인 중첩 적분치는 시간이 t 일 때 부유체의 운동에 의해 생성된 파에 기인한 체적력을 나타낸다. 이때 기준 시간인 참조 시간은 τ 이다. 무한대 영역의 부가질량은 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$M^a(\infty) = M^a(\omega) + \int_0^\infty R(t) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} dt \tag{8}$$

여기서 $M^a(\omega)$ 는 주파수가 ω 일 때의 부가질량으로써 앞서 언급한 주파수영역 해석으로부터 구할 수 있으며, 지연함수, $R(t)$,는 지연함수으로써 시간 기억 효과에 연관된다. 지연함수는 아래의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$R(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty C(\omega) \cos(\omega t) d\omega \tag{9}$$

여기서 $C(\omega) = 2\gamma\sqrt{[M+M^a(\omega)]K}$ 이며 γ 는 감쇠율을 K 는 복원력 계수를 나타낸다. 각각 대응하는 지연함수는 6X6 행렬로 구성된 방사 감쇠 계수를 통해 각각 구한다. 이를 이용한 운동 방정식의 최종형태는 다음과 같다.

$$[M+M^a(\infty)]\ddot{\zeta} + \int_{-\infty}^t R(\tau-t)\dot{\zeta}(\tau)d\tau + K\zeta = F(t) \tag{10}$$

여기서 M 는 부유체의 질량, $F(t)$ 는 외력을 나타낸다. 본 연구에서 바람과 조류의 영향은 무시한다. 슬로싱 효과를 선체 운동에 적용하기 위해 외력항은 다음과 같이 구성된다.

$$F(t) = F_{ext}(t) + F_{slosh}(t) \tag{11}$$

여기서 $F(t)$ 는 부유체에 적용되는 외력의 총합이며, $F_{ext}(t)$ 는 조파력과 선체 점성 감쇠력을 포함하고, $F_{slosh}(t)$ 는 전산유체역학으로부터 구하여진 내부 유동의 충격력과 관성력으로 구성된다.

3. 수치해석 결과

Gaillarde et al.(2004)에서는 사각형 바아지선에 두 개의 슬로싱 탱크를 설치한 뒤 탱크 내부 유량을 변경하여 불규칙과랑 중의 선박의 응답 실험을 수행하였다. 수치 해석을 위해 Fig. 1과 같이 Gaillarde et al.(2004)에서 수행하였던 실험과 같은 형태인 Box-Barge 형태의 FPSO(Floating Production Storage Offloading)를 선정하였다. Gaillarde et al.(2004)에서는 사각형 바아지선에 두 개의 슬로싱 탱크를 설치한 뒤 탱크 내부 유량을 변경하여 불규칙과랑 중의 선박의 응답 실험을 수행하였다. 부유체의 크기 및 특성은 Table 1에 나타나 있으며, 부유체에 탑재된 유체저장탱크의 특성 및 위치는 Table 2에 나타나 있다. 탱크 내 유체적재량 및 외부환경조건은 Table 3에 나타나 있으며 이는 Gaillarde et al.(2004)의 실험과 동일하게 설정하였다.

본 연구에 앞서 검증 및 격벽 효과와의 비교를 위해 Kim et al.(2011)에서 수행한 시물레이션을 기반으로 동일한 시물레이션 수행하였다. 선박운동 프로그램과 슬로싱 해석을 위한 전산유체역학 프로그램은 동적으로 연동되었다. 연동방식은 선박운동 프로그램으로부터 변위를 전달받은 전산유체역학 프로그램이 이를 이용하여 슬로싱에 의한 힘을 연산한다. 연산된 슬로싱에 의한 힘은 선박운동프로그램으로 전달되어 외력으로 사용된다. 슬로싱 연산이 진행되는 동안 선박운동프로그램은 시물레이션을 멈추고 외력이 전달되기 전까지 대기한다. 선박의 제원, 유체저장탱크 및 적재량, 그리고 외부환경조건은 동일하게 설정하였다. Fig. 2는 시물레이션 결과에 따른 횡동요 방향의 Response Amplitude Operator(RAO)이다. 결과에서 보이듯이 적재량에 따른 횡동요 RAO의 값은 변화하며 이는 고유주기의 이동 및 분리를 나타내고 있다. 따라서 내부 유체저장 탱크를 포함한 선박의 경우 이러한 변수에 대한 고려를 반드시 해주어야 할 필요가 있음을 보여주고 있다. 본 시물레이션에서는 계산의 편리성과 연산속도확보를 위해 3차원이 아닌 2차원 탱크로 시물레이션을 수행하였으며, 슬로싱 연산을 위해 사용된 입자는 22,476개이다.

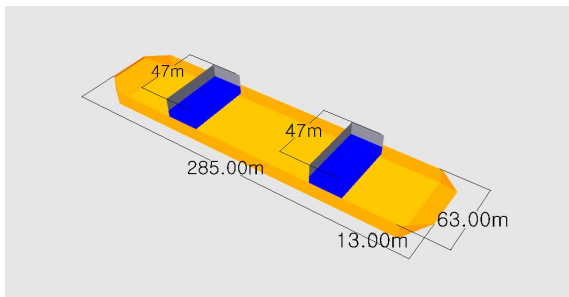


Fig. 1. Schematic model of floating vessel.

Table 1. Principal particular of FPSO

Description		Magnitude
Length Between Perpendicular		285.0 m
Breadth		63.0 m
Draft		13.0 m
Mooring System (Linear Spring)	Surge	$6.5 \times 10^5 N/m$
	Sway	$2.43 \times 10^6 N/m$
	Yaw	$1.76 \times 10^8 Nm/rad$

Table 2. Characteristics of sloshing tank

Designation	Magnitude (AFT)	Magnitude (FWD)
Tank AFT from AFT Perpendicular	61.08 m	209.54 m
Tank bottom from Keel Line	3.3 m	3.3 m
Tank Length	49.68 m	56.616 m
Tank Breadth	47.0 m	47.0 m
Tank Height	32.0 m	32.0 m

Table 3. Environmental condition

Wind	N/A	
Current	N/A	
Wave	Heading	90 degree
	Height	5.0 m
	Peak Period	12 sec
	γ (JONSWAP)	3.3
Filling Level	0 %, 18 %, 37 %, 56 %	

본 연구에서는 격벽에 의해 변화된 내부 유체력을 이용하여 선박 운동의 변화 및 이를 이용한 선박 운동 제어 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 연구를 위해 Fig. 3과 같이 사각형 유체 저장 탱크에 2개의 격벽을 탱크 상부로부터 아랫방향으로 설치를 하였다. 그리고 격벽의 길이를 조절하여 격벽과 탱크 바닥간의 간극을 조절하도록 설계하였다.

본격적인 시물레이션에 앞서 격벽에 의한 내부 유동의 변화를 확인하기 위해 탱크 단독 시험을 실시하였다. 탱크의 좌측 벽면에서 자유표면의 변화를 계측하였으며 간극의 크기는 0 m ~ 7m까지 변화하도록 설정하였다. 탱크는 $x = A \sin\left(\frac{2\pi}{tT}\right)$ 로 움직이며 여기서 t 는 시물레이션 시간, T 는 운동주기 그리고 A 는 운동 진폭이다. A 와 T 는 각각 0.05 m와 1.3 sec로 설정하였다. 시물레이션을 위해 총 11,238개의 입자가 사용되었으며, 이중 7,858개는 유체입자로 사용되었다. 자유표면 높이 변화를 Fast Fourier Transform(FFT)를 통해 변환한 결과

는 Fig. 4에 나타나 있다. 결과에서 보이듯 간극이 전혀 없는 경우에는 약 0.45 rad/s 부분의 단일 고유 주기만이 관측되었다. 그러나 간극을 조절함에 따라 또 다른 peak가 관측되었으며 간극이 넓어지면서 이는 초기 고유주기보다 높은 값을 가지는 것이 확인되었다. 이로써 격벽 및 격벽과 탱크 바닥과의 간극의 영향으로 내부유동은 급격히 변화하는 것이 확인되었으며 이는 내부 유동이 선박 운동에 영향을 미치는 경우 큰 변화를 줄 것이라고 판단이 가능하다.

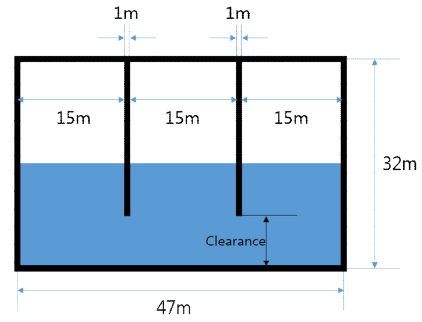
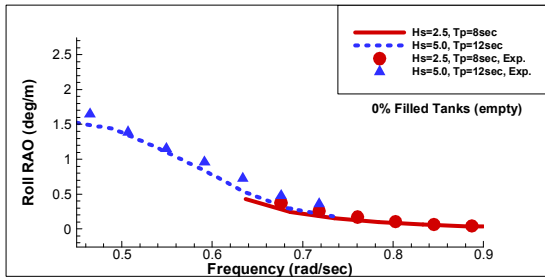
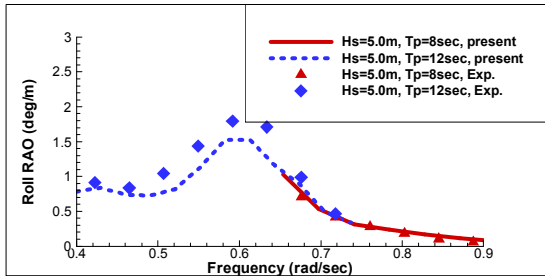


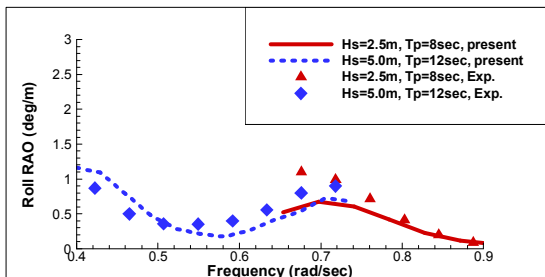
Fig. 3. Sloshing tank with baffles.



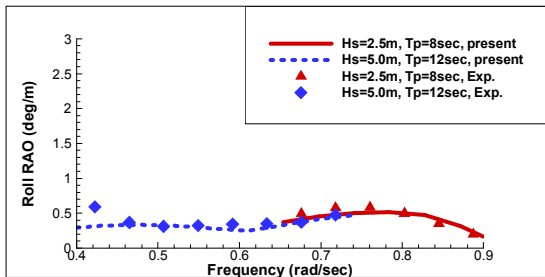
(a) Bare Hull



(b) 18% filled



(c) 37% filled



(d) 56% filled

Fig. 2. Roll RAO from each filling ratio of inner tank.

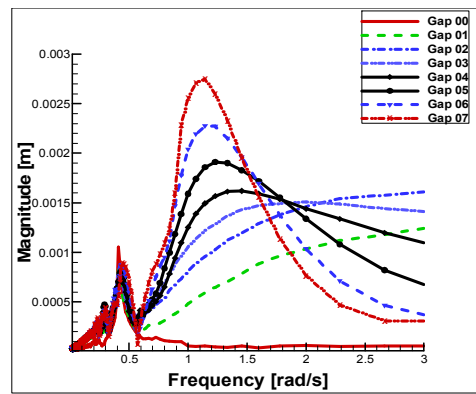


Fig. 4. FFT results from Sway Motion.

격벽에 의해 변화된 내부 유동이 선박에 미치는 영향을 연구하기 위해 Fig. 1의 선체에 Fig. 3의 격벽이 추가된 유체 저장탱크를 탑재하였다. 유체저장탱크의 크기는 Table 2와 동일하다. 시뮬레이션의 외부환경조건은 앞서 수행된 시뮬레이션과 동일한 Table 3의 조건을 사용하였다. Fig. 5~7은 내부 유체 적재량이 각각 18%, 37% 그리고 56%인 경우에 대해 격벽의 간극을 0m~10m까지 변경한 경우에 대한 횡동요방향의 RAO이며 비교를 위해 격벽이 없는 경우를 함께 표시하였다. 보이는 결과에서 특이한 점은 적재량의 차이가 있음에도 불구하고 격벽과 탱크바닥과의 간극이 0m, 즉 완전히 막힌 경우에는 슬로싱 효과가 현저히 줄어드는 현상에 의해 적재량 차이에 따른 변화가 거의 없이 비슷한 RAO를 보여주고 있다. 또한 간극의 차이가 점점 커짐에 따라 고유주기는 고주파방향으로 이동을 하는 것이 확인되었으며 격벽의 끝이 내부유동에 영향을 미치지 않을 정도로 간극이 발생한 경우에는 격벽이 없는 경우와 같은 결과를 보여주었다.

앞서 수행한 시뮬레이션 결과를 통해 격벽을 설치하고 간극을 0로 설정하면 선박은 내부유체적재량과 무관하게 일정한 고유주기를 가질 수 있음을 알 수 있다. 그러나 RAO의

탱크 내 격벽에 의한 간극 변화가 선박 운동에 미치는 영향 연구

크기는 단위파고에 대한 선박의 운동응답을 나타내며, 적재 화물이 없는 경우 1m의 입사파에 의한 선박의 횡동요 응답은 약 1.5도임을 Fig. 2를 통해 알 수 있다. 이는 파고가 5m인 입사파가 선박의 측면으로 입사될 시 선박은 약 7.5도 정도 기울어진다는 것이다. 그러나 Fig. 5~7에서의 결과값을 보면 간극이 0m인 경우 단위파고에 대한 응답은 약 3.5도로써 5m의 파가 입사되는 경우 선박은 17.5도 기울어지게 되며 이는 전복 위험성이 높아진다는 것을 의미한다.

Fig. 8은 격벽과 탱크 바닥과의 간극이 2m인 경우에 대한 각각의 적재량에 대한 횡동요 RAO이며, Fig. 9는 간극이 9m 일 때의 횡동요 RAO의 비교이다. Fig. 8의 경우 유체적재량이 없는 경우와 고유주기는 비슷하지만 RAO의 크기가 상대적으로 높아 여전히 전복의 위험이 존재한다. 그러나 Fig. 9의 경우인 간극이 9m인 경우에는 고유주파수의 크기가 증가하고 분리되는 현상을 보였으나 RAO의 크기가 허용가능하며 본 선박의 고유주기에서 크게 벗어나지 않음을 알 수 있다. 본 연구의 결과를 통해 격벽의 적정 설계를 통한 슬로싱 현상의 제어는 선박운동특성 제어에 적용할 수 있음을 확인되었다. 이는 선박의 설계 시 조건을 크게 변화시키지 않으면서 내항성 및 운항 중 발생할 수 있는 불확실성을 저감할 수 있다.

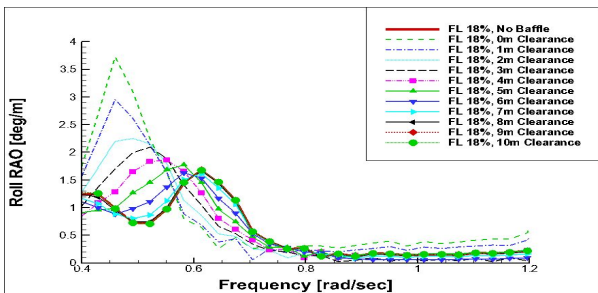


Fig. 5. Comparison of roll RAO at 18% filled tank with various clearance.

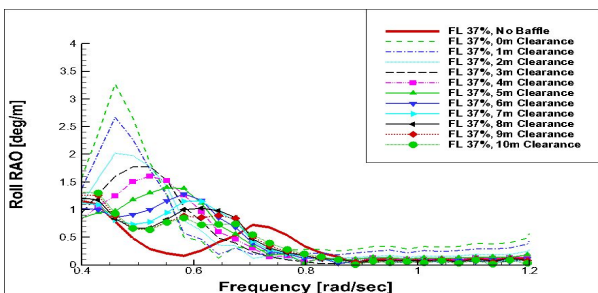


Fig. 6. Comparison of roll RAO at 37% filled tank with various clearance

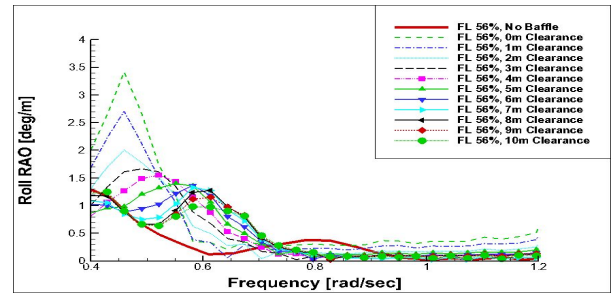


Fig. 7. Comparison of roll RAO at 56% filled tank with various clearance.

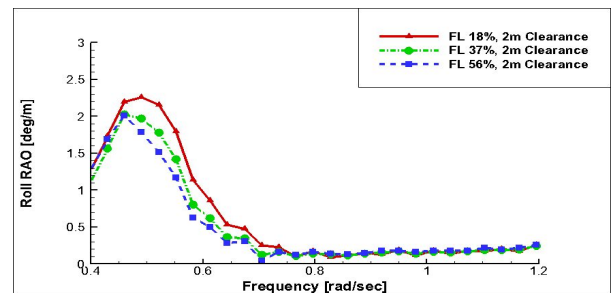


Fig. 8. Roll RAO with 2m Clearance.

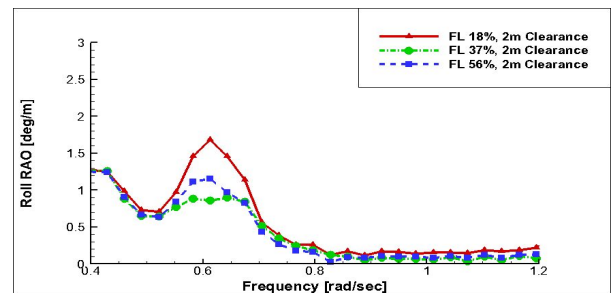


Fig. 9. Roll RAO with 9m Clearance.

4. 결 론

본 연구에서는 격벽 효과로 인해 변화된 내부 유동이 선박 운동에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였다. 시뮬레이션을 위해 포텐셜 기반 BEM 프로그램을 사용한 선박 운동 시뮬레이션 프로그램과 입자기반 전산유체역학 프로그램인 MPS법을 동적 연성하였다.

격벽 효과 연구에 앞서 내부 유체의 적재량이 선박운동에 미치는 영향에 대해 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 통해 획득한 RAO비교를 통해 선박 운동의 고유주기가 내부적재량에 따라 이동 및 분리되는 것을 확인하였다. 이 후 동일 선박에 격벽이 추가된 내부탱크를 설치하고 격벽과 탱크바닥간의 간극을 0m~9m까지 변화시켜 격벽에 의해 변화된

내부 유동이 선박 운동에 미치는 영향에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 주목할 부분은 격벽과 바닥간의 간극에 따라 선박의 RAO는 변화함을 파악하였으며, 특정 고유주기를 간극을 조절함으로써 조정이 가능함을 발견하였다. 따라서 적재량의 크기에 관계없이 간극의 조절만으로도 선박의 고유주기를 일정하게 유지할 수 있음을 관찰하였다.

본 연구에서 격벽효과를 이용한 선박의 운동 예측 및 제어의 기반이 될 것으로 사료되며, 향후 격벽의 형태 및 개수 등이 선박의 운동에 미치는 영향에 대해 연구할 예정이다.

후 기

본 연구는 2018학년도 동명대학교 교내학술연구비지원(과제번호/2018F029) 및 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2018R1D1A1B07048254) 지원에 의해 이루어졌습니다. 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Cho, I. H. and M. H. Kim(2016), Effect of dual vertical porous baffles on sloshing reduction in a swaying rectangular tank, *Ocean Engineering*, Vol. 126, pp. 364-373.
- [2] Gaillarde, G., A. Ledoux and M. Lynch(2004), *Coupling between liquefied gas and vessel's motion for partially filled tanks: Effect on seakeeping*, Design & Operation of Gas Carriers, The Royal Institution of Naval Architects, London, UK.
- [3] Kim, K. S., B. H. Lee, M. H. Kim and J. C. Park(2011), Simulation of Sloshing Effect on Vessel Motions by using MPS (Moving Particle Simulation), *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, Vol. 79, No. 3, pp. 201-221.
- [4] Kim, K. S., M. H. Kim and J. C. Park(2014), Development of Moving Particle Simulation Method for Multiliquid-Layer Sloshing, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2014, 350165.
- [5] Koshizuka, S. and Y. Oka(1996), Moving-Particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, *Numerical science and Engineering*, Vol. 123, pp. 421-434.
- [6] Lee, B. H., J. C. Park and M. H. Kim(2010), Numerical simulation of impact loads using a particle method, *Ocean Engineering*, Vol. 37, pp. 164-173.
- [7] Lee, C. H., J. Newman, M. H. Kim and D. K. Yue(1991), The computation of second-order wave loads, 10th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Stavanger, Norway, pp. 113-123.
- [8] Lee, S. J. and M. H. Kim(2010), The effects of inner liquid motion on LNG vessel responses, *J. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 132, No. 2, doi:10.1115/1.4000391.
- [9] Marzouk, M. and A. H. Nayfeh(2009), Control of ship roll using passive and active anti-roll tanks, *Ocean Engineering*, Vol. 36, No. 9, pp. 661-671.
- [10] Monaghan, J. J.(1988), An Introduction to SPH, *Computer Physics Communications*, Vol. 48, pp. 89-99.
- [11] Nomura, K., S. Koshizuka, A. Oka and H. Obata(2001), Numerical Analysis of Droplet Breakup Behavior Using Particle Method, *J Nucl Sci Technol*, 38(12), pp. 1057-1064.
- [12] Tanaka, M. and T. Masunaga(2010), Stabilization and Smoothing of Pressure in MPS Method by Quasi-compressibility, *Journal of Computational Physics*, Vol. 229, No. 11, pp. 4279-4290.
- [13] Xu, R., P. Stansby and D. Laurence(2009), Accuracy and Stability in Incompressible SPH (ISPH) Based on the Projection Method and a New Approach, *Journal of Computational Physics*, Vol. 228, No. 18, pp. 6703-6725.
- [14] Yang, C. K. and M. H. Kim(2011), The Structural safety assessment of a tie-down system on a tension leg platform during hurricane events, *Ocean Systems Engineering, An International Journal* Vol. 1, No. 4, pp. 263-293.

Received : 2018. 05. 08.

Revised : 2018. 07. 09. (1st)

: 2018. 07. 23. (2nd)

Accepted : 2018. 10. 26.