

## 밀도함수법을 이용한 2차원 슬로싱 현상의 수치시뮬레이션

이영길\*, 정광열†\*\*, 이승희\*

인하대학교 기계공학부 선박해양공학전공\*

인하대학교 대학원 조선해양공학과\*\*

Numerical Simulation of Two-dimensional Sloshing Phenomena Using  
Marker-density Method

Young-Gill Lee\*, Kwang-Leol Jeong†\*\* and Seung-Hee Lee\*

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea\*  
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School of Inha University,  
Incheon, Korea\*\*

### Abstract

Two dimensional sloshing phenomena in regularly excited liquid cargo tank are numerically simulated with finite difference method. Navier-Stokes equations and continuity equation are computed for this study. The free-surface is determined every time step satisfying kinematic boundary condition using marker-density method. And the exciting force is treated by adding the acceleration of the tank to source term. The results are compared with other existing experiment results. And the comparison results show a good agreement. The sloshing phenomena in the tank of the 138K LNG carrier in sway motion is simulated with present calculation methods in low filling level. To find the relations between impact pressure and excitation condition, the calculations are performed in various amplitudes and periods. The averaged maximum pressures are compared each other.

※Keywords: Sloshing(슬로싱), LNG carrier(천연가스 운반선), Marker-density method(밀도함수법), Free-surface(자유수면), Liquid cargo tank(액체화물창)

### 1. 서론

LNG운반선이나 VLCC와 같이 큰 액체 화물창

을 갖는 선박의 경우 선박의 동요에 의하여 화물창 내부에서 격렬한 슬로싱 현상이 발생하게 된다. 이로 인하여 화물창 내부에 국부적인 충격압이 발생하여 구조부재에 손상을 줄 수 있다(Park et al. 2005b).

여러 가지 수치기법과 실험을 통하여 슬로싱 현상을 예측하기 위한 연구가 수행되어왔다. 해석적

접수일: 2009년 9월 7일, 승인일: 2009년 12월 7일

† 교신저자: kwangleol@inha.edu, 032-860-8840

인 접근방법은 직사각형 또는 구형의 단순한 형상에 대하여 주로 수행되었으며, 자유수면이 천정과 부딪치는 경우 해석에 어려움이 있다. 그렇기 때문에 이론적인 접근은 단순한 유동에 대하여만 적용이 되고 있다. 실험적 연구의 경우 선박의 6 자유도 운동을 모두 고려한 모형을 통하여 충격하중을 측정할 수 있다. 그러나 모형실험을 통한 충격압력을 실선크기로 확장하는 데는 많은 어려움이 있다(Kim et al. 1993, Kim and Shin 2000).

Hamlin et al.(1986)은 직사각형 화물창의 바닥에 있는 내부부재의 영향을 실험을 통하여 확인하였다. Mikelis et al.(1984)은 액체 화물창에서 슬로싱에 의한 최대 충격압의 발생위치를 연구하였다. Rizzuto and Tedeschi(1994)는 선박의 운동과 슬로싱 충격하중의 관계를 연구하기 위하여 운항중인 선박의 화물창의 슬로싱 압력을 계측하였다. Arai(1984)는 부분적으로 적재된 모형탱크 내부유체의 고유진동수와 기진주파수를 일치시켜 공진이 일어나는 모형탱크의 시간에 따른 압력의 변화를 측정하였으며, MAC(Maker-And-Cell)법을 이용한 2차원 수치계산결과와 비교하였다. 또한 3차원으로 확장하여 실험결과와 비교하기도 하였다(Arai et al. 1992). Kim et al.(1993)과 Kim(2001)은 SOLA-SURF기법을 이용하여 2차원으로 수치시뮬레이션 하였으며 Park et al.(2005b)은 SOLA-VOF기법을 이용하여 3차원으로 시뮬레이션 하였다. Yoon et al.(2008)은 Leve-Set법을 이용하여 화물창의 병진운동과 회전운동으로 발생하는 슬로싱 유동의 특성을 비교 분석 하였다. Kim et al. (2007)은 유체를 입자로 정의하는 SPH법의 슬로싱 유효성과 민감성에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 밀도함수법을 이용하여 슬로싱 현상을 시뮬레이션 하였다. 계산조건은 공개된 실험의 조건(Arai 1984)과 같게 하였고, 계산결과는 실험결과와 비교하여 정도를 검증하였다. 또한 sway 운동의 주기와 진폭을 변화시키며 138K LNG 운반선에서 발생하는 2차원 슬로싱 현상을 모형크기로 시뮬레이션 하였다. 화물창의 동요에 의하여 유체에 작용하는 체적력은 생성항에 더해줌으로써 고려해 주었다.

## 2. 수치기법

계산에 사용된 지배방정식은 2차원 비압축성 점성유동에서의 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식이다. 지배방정식은 직사각형 교차가변 격자계에서 시간에 대하여는 전진차분법으로, 공간에 대하여는 중심차분법으로 이산화 되었다. 또한 대류항에 대하여는 정도 항상을 위하여 시간에 대하여는 Adams-Bashforth 기법을 사용하였고, 공간에 대하여는 3차 상류차분기법, 그리고 2차 혼합기법, 1차 상류차분기법을 주위 격자의 수를 고려하여 적용하였다. 압력분포는 압력의 포아송 방정식을 SOR법으로 계산하여 구하였다. 물체경계격자는 격자선과 물체표면이 만나는 점을 이은 선분으로 근사하였고, 물체표면 주위에서의 미분항 계산을 위하여 불규칙 압력정의점간 거리(Irregular leg length)를 이용하여 첨착 조건을 만족시켰다. 물체경계격자에서 속도와 압력은 압력이 수렴 할 때까지 동시 반복(simultaneous iteration)기법으로 계산하였다.

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} + u \frac{\partial M_p}{\partial x} + w \frac{\partial M_p}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

밀도함수의 수송 방정식(식(1))은 자유수면 위치를 결정하는데 적용되었다. 밀도함수( $M_p$ )의 초기 값은 각 물과 공기의 밀도 값과 같게 하였다. 각각의 물과 공기의 밀도가 스칼라 값  $\rho^{<1>}$ 과  $\rho^{<2>}$ 일 때 자유수면의 위치는  $\rho^{<1>}$ 과  $\rho^{<2>}$ 의 산술평균값( $\rho^{<C>}$ )을 갖는 위치로 정의 하였다.

Fig. 1은 자유수면의 상태에 따른 격자의 분류를 나타낸다. AF와 WF는 공기와 물의 자유수면 격자를 의미한다. A와 AA는 공기격자를 의미하며, A는 밀도함수 계산에 사용되는 격자이고 AA는 사용되지 않는 격자이다. W와 WW는 물격자를 의미하며, W는 밀도함수 계산 시 사용되는 격자를 의미하고 WW는 밀도함수 계산에 사용되지 않는 격자이다.

밀도함수 값이  $\rho^{<C>}$ 보다 작고 이웃한 격자 중 밀도함수 값이  $\rho^{<C>}$ 보다 큰 격자가 있으면 AF, 이웃한 격자가 모두  $\rho^{<C>}$ 보다 작으면 A로 정의

하였다. 밀도함수 값이  $\rho^{<C>}$ 보다 크고 이웃한 격자 중 밀도함수 값이  $\rho^{<C>}$ 보다 작은 격자가 있으면 WF로 정의 하였고 이웃한 격자가 모두  $\rho^{<C>}$ 보다 크면 W로 정의하였다. 이웃한 격자가 모두 A격자인 경우 다시 AA로 재정의 하였으며, 같은 방법으로 W격자의 이웃한 격자가 모두 W격자인 경우 WW격자로 재정의 하였다.

AF격자와 이웃한 WF격자의 밀도함수값을 선형으로 보간 하여  $\rho^{<C>}$ 를 갖는 위치를 결정하였다. 오랜 시간 계산을 지속하면 밀도함수 값이 넓게 퍼지는 현상이 나타난다. 이러한 현상을 없애기 위하여 밀도함수 계산에 사용되지 않는 WW격자와 AA격자의 밀도함수 값은 물과 공기의 밀도  $\rho^{<1>}$ 와  $\rho^{<2>}$ 로 재정의 하였다.

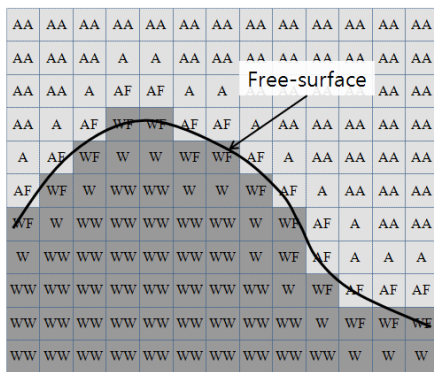


Fig. 1 Classification of cells for free-surface definition

밀도함수법과 VOF법은 수송방정식을 계산하여 자유수면을 정의한다는 점이 유사하나, 자유수면의 속도와 압력을 계산하는 방법에 차이가 있다. VOF법은 자유수면 격자의 속도와 압력 계산 시 자유수면에 의하여 상이 완전히 분리된 것으로 처리하지 않기 때문에 자유수면격자의 속도와 압력 계산 시 물과 공기의 비율에 따라 점성계수와 밀도를 변화시키며 계산을 수행한다(Park et al. 2005a). 반면, 밀도함수법에서는 자유수면에 의하여 공기와 물이 완전히 분리된 영역으로 처리하게 된다. 물 영역 계산 시 자유수면은 압력을 구속하는 경계면으로 처리하고, 공기 영역 계산 시에는 속도를 구속하는 경계면으로 처리한다.

자유수면의 동역학적 경계조건은 식(2)와 같다. 식(2)에서  $p_{air}$ 는 자유수면에서의 공기압력이고,  $p_{water}$ 는 자유수면에서의 물압력이다. 자유수면의 압력은 Fig. 2, 식(3)과 같이 자유수면을 포함하는 공기격자의 압력에서 체적력에 의한 압력을 더하여 계산하였다. 식(3)의  $F_x, F_z$ 는 선박의 움직임으로 발생한 X와 Z방향의 체적력을 의미하며, 본 연구에서  $F_z$ 는 중력이다. 자유수면 주위 격자의 압력 포아송 방정식 계산에는 격자간의 거리가 아닌 자유수면까지의 거리와 자유수면의 압력을 이용하였다.

$$p_{water} = p_{air} \text{ on free-surface} \quad (2)$$

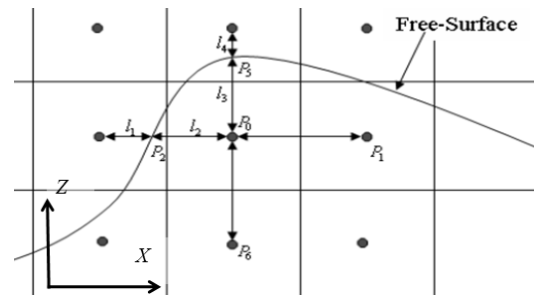


Fig. 2 Schematic of irregular star for pressure calculation on free-surface

$$\begin{aligned} p_1 &= p_{i+1,j,k} \\ p_2 &= p_{i-1,j,k} + \rho_{gas} F_x l_1 \\ p_3 &= p_{i,j,k+1} + \rho_{gas} F_z l_4 \\ p_4 &= p_{i,j,k-1} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{D(z-\eta)}{Dt} = 0 \quad (4)$$

자유수면의 운동학적 경계조건은 식(2)와 같다. 위 식에서  $\eta$ 는 수면변위이다. 식(2)는 자유수면과 유체입자의 속도가 같다는 것을 의미하며, 자유수면에서의 전단력은 그 크기가 작아 경계조건을 단순화를 위하여 무시하였다. 자유수면을 포함하는 공기의 속도는 Fig. 3와 같이 주위 물의 속도를 Lagrangian 다항식으로 계산하여 자유수면의 운동학적 경계조건을 만족시켰다.

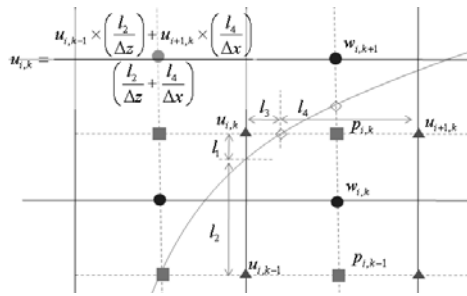


Fig. 3 Schematic for velocity calculation on free-surface

선박의 병진운동에 의하여 유체에 작용하는 체적력은 아래의 식(5)와 같다. 식(5)의  $X_0$ 는 진폭을 의미하며,  $\omega$ 는 각진동수.  $\epsilon$ 은 초기 위상을 나타낸다.

$$F_x = -X_0 \omega^2 \cos(\omega t + \epsilon) \quad (5)$$

본 연구에서는 높은 레이놀즈수에서의 유동에서 격자크기 이하의 난류특성을 고려하기 위하여 2차원 Subgrid-scale (SGS) 난류모형을 적용하였다 (Jeong and Lee 2004).

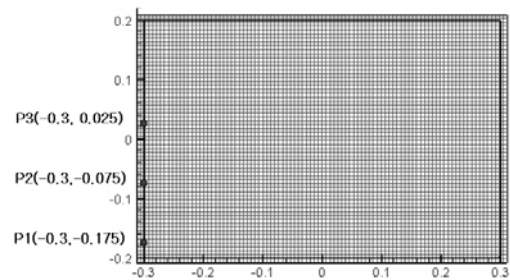
### 3. 계산기법 검증

계산기법을 검증하기 위하여 두 가지 CASE에 대하여 계산결과를 실험과 비교하였다. CASE 1과 CASE 2는 병진동요인 경우로, 고유주기는 0.99초이다(Arai 1984). CASE 1과 CASE 2는 공간이 일어나도록 기진주기를 1.00초로 결정하였다. CASE 2는 탱크 상부에 chamfer가 있어 충격압 발생이 예상되는 조건이다. CASE 1과 CASE 2의 계산조건은 Arai(1984)와 같은 조건이다. Table 1은 각 CASE의 기진 주기와 진폭을 나타낸 것이다.

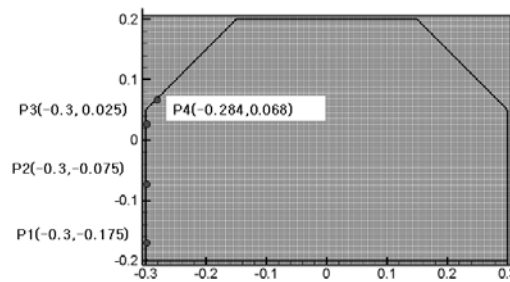
Table 1 Computation conditions for verification of calculation methods

	CASE #	Period	Amp.	Filling ratio
Translation motion	CASE 1	1.00 sec	0.05 m	50%H
	CASE 2			50%H

Fig. 4는 계산에 사용된 격자계와 압력측정 위치를 나타낸다. CASE 1에 사용된 격자의 크기는  $X, Z$ -방향으로 약 0.0065m로 총격자수는 약 60,000개이고, CASE 2에 사용된 격자의 크기는  $X, Z$ -방향으로 약 0.0035m로 총격자수는 약 240,000개이다. 시간간격은 짧은 시간동안 압력변화가 큰 충격압을 계산하기 위하여 1/2000초로 계산하였다.



(a) CASE 1



(b) CASE 2

Fig. 4 Computational domain and pressure measuring points for the verification

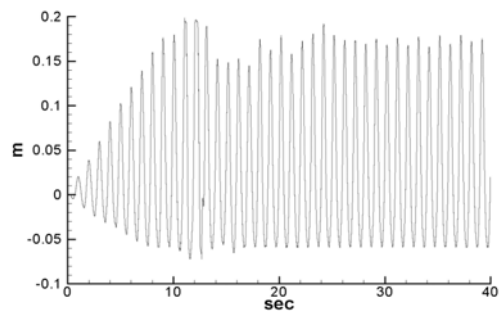
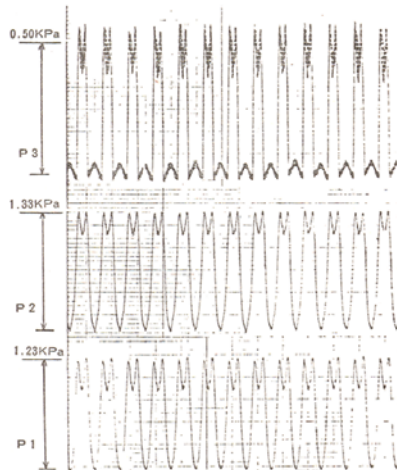


Fig. 5 Water elevation history (CASE 1, right side)

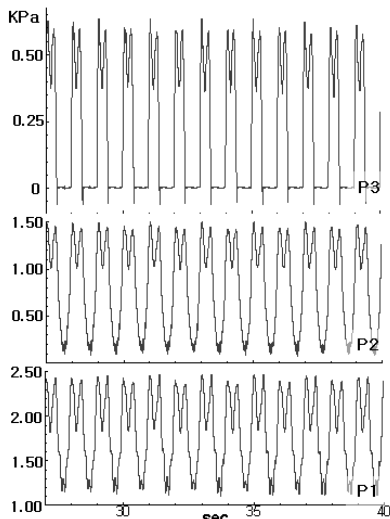
Fig. 5는 CASE 1의 우측벽면에서의 수위기록을 나타낸다. CASE 1의 경우 공진주기 0.99sec, 기진주기 1.00sec로 공진이 발생하여 초기에 파고가 지속적으로 증가한다. 20초 이후 점성과 마찰에 의하여 파고가 증가하지 않고 주기적으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6는 CASE 1의 각 압력측정 위치에서의 압력변화를 나타낸 그래프이다. Arai(1984)의 실험결과와 비교하여 정량적, 정성적으로 실험과 유사한 결과를 보임을 확인할 수 있다. P3과 같이 파고의 변화에 따라 유

체의 상(狀)이 변하는 경우도 실험결과와 일치함을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 CASE 2의 압력기록을 실험결과와 비교한 것이다. 정성적, 정량적으로 실험과 유사한 결과를 얻었으나 P3점에서 정량적으로 압력이 다소 낮게 나타나고 있다. 이는 Fig. 8에 보이는 것과 같이 P3의 위치에서 와(渦)가 벽에서부터 떨어지는 현상을 적절히 시물레이션 하지 못하기 때문으로 판단된다. Fig. 8에서 와는 현재 사용된 격자 크기의 약 4배 정도로 그 크기가 작아 박리현상을 적절히 시물레이션 하는데 한계가 있으며, 격자의

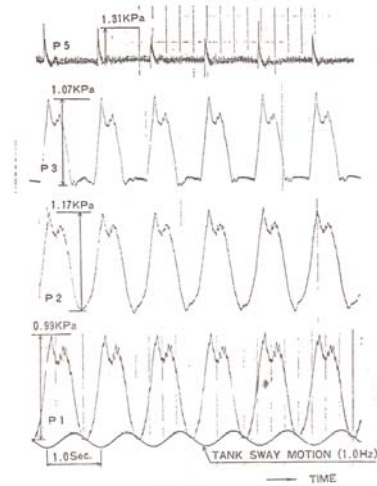


(a) Arai(1984)'s experiment result

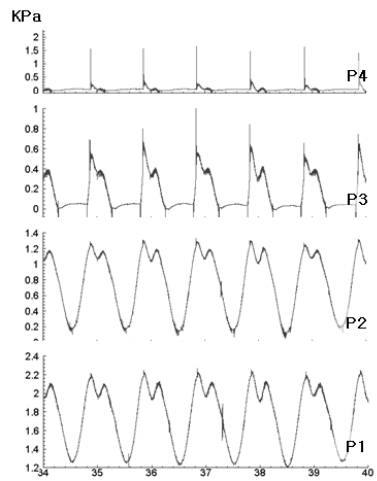


(b) Present result

Fig. 6 Comparison of pressure variation (CASE 1)



(a) Arai(1984)'s experiment result



(b) Present result

Fig. 7 Comparison of pressure variation (CASE 2)

크기와 시간간격에 민감하게 반응하게 된다.

충격압이 발생하는 P4점에서의 압력도 실험과 정성적으로 정량적으로 유사하게 나타나고 있다.

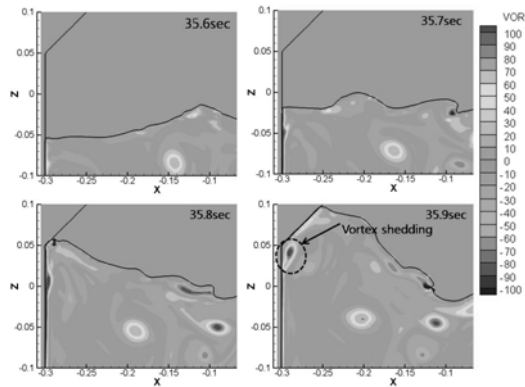


Fig. 8 Vorticity Contour of CASE 2

#### 4. 적재량이 낮은 LNG 화물창 슬로싱 시뮬레이션

슬로싱 현상은 적재량에 따라 그 유동의 특성에 큰 차이가 있다. Fig. 9는 LNG 화물창의 적재량에 따른 슬로싱 충격압의 크기와 파형의 특징을 개략적으로 나타낸 것이다(LR 2009). 일반적으로 적재량이 많은 경우 화물창 내부에 정상파(standing wave)가 발생하며, 적재량이 적은 경우 진행파(travelling wave)가 발생한다. 적재량이 적은 조건에서 진폭이 커지게 되면 진행파가 전복되는 수력도약(hydraulic jump)이 발생한다. 정상파에 의한 슬로싱 충격압은 대부분 화물창의 천정과 상부의 기울어진 벽에서 발생하고, 진행파와 수력도약에 의한 슬로싱 충격압은 화물창의 벽면에서 발생한다. 슬로싱에 의한 충격압은 화물창에 구조적 손상을 줄 수 있어 Fig. 10과 같이 화물의 적재량을 제한하고 있다. Fig. 10의 % $L_T$ 은 화물창 길이와 적재깊이의 비율을 의미하며, %H는 화물창의 높이와 적재깊이의 비율을 의미한다. LNG 운반선의 경우 10% $L_T$ 이상, 70%H이하의 조건은 화물을 실지 못하게 되어있으며, 70%H~95%H와 10%H~ 10% $L_T$ 은 제한적으로 허용하고 있다.

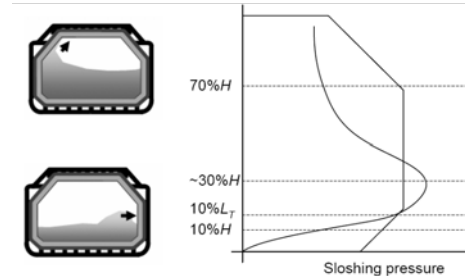


Fig. 9 Sloshing phenomena at different tank fill height (Lloyd's Register 2009)

본 연구에서는 진행파와 수력도약이 발생하고 제한적으로만 적재가 허용되는 10% $L_T$ 을 계산 대상으로 선정하였다. 이 경우 적재 높이는 모형크기로 0.125m이고 고유주기는 약 2.4초이다. Sway 운동의 주기와 진폭의 변화에 따른 충격압의 변화를 분석하였다. 대상선박은 138K LNG운반선이며, 화물창의 제원은 Table 2와 같다(Jeong 2006). 본 연구에서는 격자계와 시간간격의 의존성을 줄이기 위하여 실선크기가 아닌 1/30의 모형크기로 계산을 수행하였다.

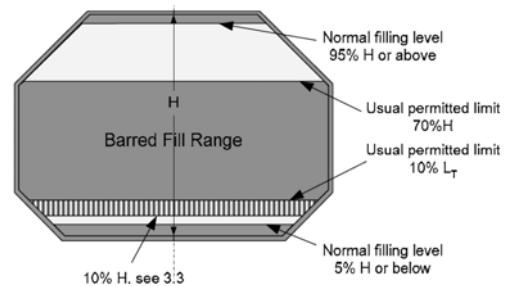


Fig. 10 Typical permissible filling levels of LNG carrier (Lloyd's Register 2008)

Table 2 Tank dimensions of 138K LNG carrier

	real ship	model
Height	26.86 m	0.895 m
Breadth	37.40 m	1.247 m
Length	52.84 m	1.761 m
Lower chamfer	3.87 m	0.129 m
Upper chamfer	5.29 m	0.176 m

Fig. 11과 같이 격자계를 작성하였으며, 압력의 측정위치는 충격압력이 예상되는 하부의 기울어진 벽과 화물창 옆면이 맞닿는 부분으로 높이는 0.1m이다. 격자의 크기는  $X, Z$ -방향으로 각 0.01m이고 시간간격은 1/2000초이다. 기진 조건과 충격압력의 관계를 알아보기 위하여 Table 3과 같이 주기와 진폭을 변화시켰으며, 각 계산은 80초간 수행하였다. 각 CASE의 이름은 주기의 변화에 따라 a~f까지 알파벳을 붙였으며, 진폭에 따라 1~5까지의 숫자를 붙였다.

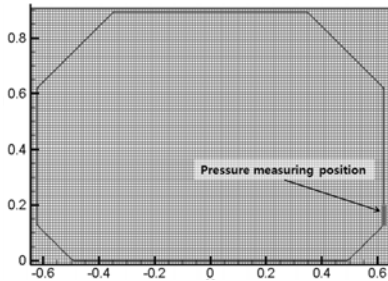


Fig. 11 Computational domain and pressure measuring position for the 138K LNG carrier (model scale)

Table 3 Computation conditions for 138K LNG carrier

Period (sec) \ Amp. (m)	1.50 (a)	1.75 (b)	2.00 (c)	2.25 (d)	2.50 (e)	3.00 (f)
0.05	CASE a-1	CASE b-1	CASE c-1	CASE d-1	CASE e-1	CASE f-1
0.10	CASE b-2	CASE b-2	CASE c-2	CASE d-2	CASE e-2	CASE f-2
0.15	CASE c-3	CASE b-3	CASE c-3	CASE d-3	CASE e-3	CASE f-3
0.20	CASE d-4	CASE b-4	CASE c-4	CASE d-4	CASE e-4	CASE f-4
0.25	CASE e-5	CASE b-5	CASE c-5	CASE d-5	CASE e-5	CASE f-5

Fig. 12는 Fig. 11의 압력측정영역에서 매 시간 단계마다 발생하는 가장 큰 압력을 기록한 예이다. 규칙동요를 하는 조건에서도 충격압이 일정하지 않게 나타나고 있다. 이는 계산조건의 진폭이 커 유동이 격렬하고 비선형성이 크기 때문이다.

각 CASE의 최대압력기록에서 가장 큰 충격압 10개를 평균하여 각 CASE의 대표값으로 정의 하

였다. 유동이 충분히 발달된 상태만을 고려하기 위하여 초기 10초 이전의 압력은 무시하였다. 각 계산조건에서의 최대 충격압 10개의 평균을 정리하면 Fig. 13과 같다.

Fig. 13의 (a)는 주기의 변화에 따른 충격압의 변화를 보여준다. 진폭이 0.15m이하인 경우 주기 1.75초에서 최대값을 보이고 있으나 진폭이 큰 0.20m 이상에서는 주기가 짧아질수록 충격압이 크게 나타나고 있다. 모든 진폭에서 주기의 변화

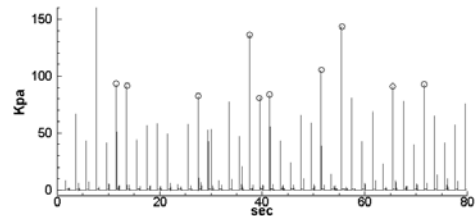
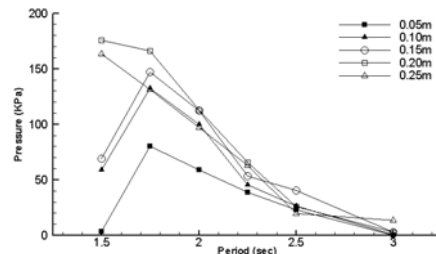
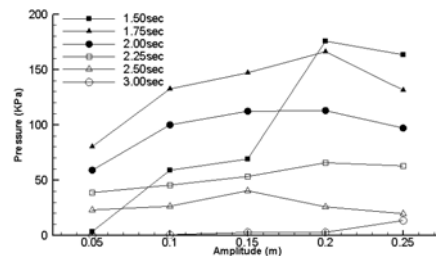


Fig. 12 An example of maximum pressure history and the largest 10 impact pressures (CASE b-2)



(a) Impact pressure variations as varying the periods



(b) Impact pressure variations as varying the amplitudes

Fig. 13 Comparison of averaged values of the 10 largest impact pressures

에 따라 충격압의 변화가 큰 것을 확인 할 수 있다. Fig. 13의 (b)는 진폭의 변화에 따른 압력의 변화를 나타낸 것이다. 가장 짧은 주기인 1.50초의 경우 진폭에 따라 압력의 변화가 크게 나타나고 있으나, 그보다 주기가 긴 나머지 조건에서는 진폭에 따라 충격압의 변화가 크지 않으며 진폭이 증가함에 따라 충격압이 증가하다 다시 줄어드는 경향을 보인다.

Fig. 14는 주기 1.5초에서 진폭에 따른 벽에 부딪치는 자유수면의 형상을 비교한 것이다. CASE a-2와 CASE a-3에서는 액체가 chamfer를 타고 올라가는 모습을 보이고 있으나 CASE a-4와 CASE a-5에서는 벽에 곧바로 부딪치는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 파형의 변화가 충격압의 급격한 변화의 원인으로 판단된다.

Fig. 15는 주기 2.0초에서 벽에 부딪치는 자유수면의 형상을 진폭에 따라 비교한 것이다. CASE c-2, CASE c-3, CASE c-4에서는 파가 벽에 바로 부딪치고 있으나 CASE c-5의 경우 기울어진 벽을 타고 올라가는 모습을 볼 수 있다. 이러한 이유로 진폭에 따라 증가하던 압력이 CASE c-5에서 감소하는 것으로 판단된다. Fig. 14과 Fig. 15는 특정시간에서의 파형으로 매주기마다 같은 형상의 파가 발생하지는 않으나 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였다.

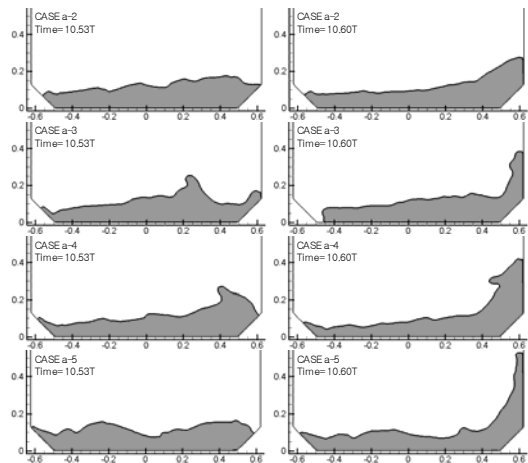


Fig. 14 Comparison of wave profiles approaching the wall (period 1.5sec)

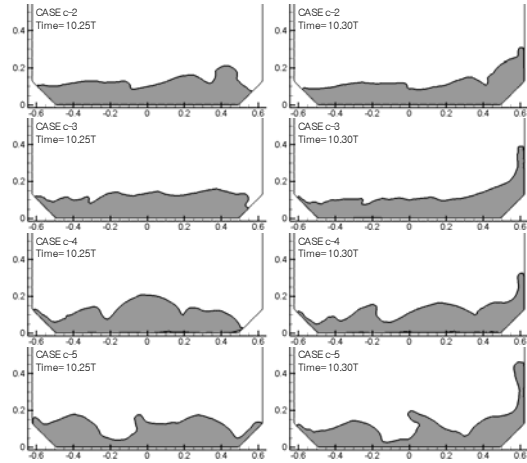


Fig. 15 Comparison of wave profiles approaching the wall (period 2.0sec)

### 5. 결론

본 연구에서는 2차원 슬로싱 현상을 수치적으로 시뮬레이션하기 위한 수치기법을 개발하였다. 비선형성이 강한 자유수면의 위치는 밀도함수법을 이용하여 정의하였다. 계산기법의 검증을 위하여 기존의 실험(Arai 1984)과 같은 조건에서 시뮬레이션 하였으며 그 결과를 서로 비교하여 정도를 검증하였다. 비교 결과 정성적으로나 정량적으로 실험결과와 잘 일치함을 확인하였다.

또한, 138K LNG 운반선에서 발생하는 슬로싱 현상을 1/30 모델 크기로 2차원 시뮬레이션 하였다. 10%L<sub>T</sub>(14%H)의 적재조건에서 Sway운동의 주기와 진폭을 변화시키며 충격압의 변화를 비교하였다. 슬로싱 충격압은 진폭의 영향보다 주기의 영향이 크게 나타나는 것을 확인하였으나 주기가 짧은 경우 진폭의 영향이 상대적으로 증가한다.

동일한 주기에서 진폭을 증가시키는 경우 화물창의 벽에 접근하는 파의 경향이 변하게 되면, 충격압이 증가하지 않고 감소하는 경우가 발생하기도 한다. 반대로 파형의 변화로 급격하게 충격압이 증가하기도 한다.

### 후 기

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구 되었습니다.



## 참 고 문 헌

- Arai, M., 1984, "Experimental and Numerical Studies of Sloshing Pressure in Liquid Cargo Tanks," J. SNAJ, No. 155, pp. 114-121.
- Arai, M., 1986, "Experimental and Numerical Studies of Sloshing in Liquid Cargo Tanks with Internal Structures," IHI Engineering Review, Vol. 19, No. 2, pp. 51-56.
- Arai, M., Cheng, L.Y., and Inoue, Y., 1992, "3D Numerical Simulation of Impact Load due to Liquid Cargo Sloshing," J. SNAJ, No. 171, pp. 177-184.
- Hamlin, N.A., Lou, Y.K., Maclean, W.M., Seibold, F. and Chandras, L.M., 1986, "Liquid Sloshing in Slack Ship Tanks - Theory, Observation And Experiments," The Society of Naval Architects and Marine Engineering, 1986 Annual Meeting, pp. 1-35.
- Jeong, K.L. and Lee, Y.G., 2004, "Comparison of Numerical Methods for Two-dimensional Wave Breaker on a Plane Beach of Constant Slope," Proceedings of KSCFE 2004 Spring Meeting, pp. 119-125.
- Jeong, K.L., 2006, Numerical Simulation of Three-dimensional Sloshing Phenomena in a Liquid Cargo Tank, Master Thesis, Inha Univ.
- Kim, Y., 2001, "Numerical Simulation of Sloshing Flows with Impact Load," Applied Ocean Engineering, Vol. 23, pp. 53-62.
- Kim, Y., Nam, B. and Kim, Y.H., 2007, "Study on the Effects of Computation Parameter in SPH Method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 4, pp. 398-407.
- Kim, Y.H. and Shin, Y.S., 2000, "Sloshing Flows in Ship Tank," J. SOTECH, Vol. 4, No. 3, pp. 21-32.
- Kim, Y.H., Park, Y.J., and Lee, H.R., 1993, "A Numerical Study on the Prediction of Sloshing Impact Pressure," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 30, No. 4, pp. 61-73.
- Lloyd's Register, 2008, Guidance on the Operation of Membrane LNG Ships to Reduce the Risk of Damage due to Sloshing.
- Lloyd's Register, 2009, Sloshing Assessment Guidance Document for Membrane Tank LNG Operations
- Mikelis, N.E.M., Miller, J.K. and Taylor, K.V., 1984, "Sloshing in Partially Filled Liquid Tanks and Its Effect on Ship Motions : Numerical Simulation and Experimental Verification," The Royal Institution of Naval Architects, 1984 Spring Meeting, pp. 1-11.
- Park, I.R., Kim, W.J., Kim, J. and Van, S.H., 2005a, "A Study on a VOF Methods for the Improvement of Free Surface Capturing," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 2, pp. 88-97.
- Park, J.J., Kim, M.S., Kim, Y.B. and Ha, M.K., 2005b, "Numerical Sloshing Analysis of LNG Carriers in Irregular Waves," Special Issue of SNAK, pp. 38-43.
- Rizzuto, E. and Tedeschi, R., 1994, "Dynamic Pressures in Sloshing Phenomena: a Comparison between Full Scale Measurement and Numerical Calculations," NAV'94.
- Yoon, H.S., Lee, J.M., Chun, H.H. and Lee, H.G., 2008, "A Numerical Study on the Sloshing Characteristics in a Two-dimensional Rectangular Tank Using the Level Set Method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 2, pp. 132-143.



< 이 영 길 > < 정 광 열 > < 이 승 희 >