

가진 주파수에 따른 이차원 사각탱크 내부의 슬로싱에 관한 수치적 연구

정재환,¹ 이창열,² 윤현식,^{*3} 김효주³

¹부산대학교 조선해양공학과

²현대중공업 선박성능연구 2실

³부산대학교 조선해양플랜트 글로벌 핵심 연구센터

NUMERICAL STUDY OF THE SLOSHING PHENOMENON IN THE 2-DIMENSIONAL RECTANGULAR TANK WITH VARIABLE FREQUENCY AT A LOW FILLING LEVEL

J.H. Jung,¹ C.Y. Lee,² H.S. Yoon^{*3} and H.J. Kim³

¹Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan Univ.

²Dept. Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries

³Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan Univ.

The present study investigates the sloshing phenomena in a two-dimensional rectangular tank at a low filling level by using a level set method based on finite volume method. The code validations are performed by comparing between the present results and previous numerical and experimental results, which gives a good agreement. Various excitation frequencies and excitation amplitude of the 30% filling height tank have been considered in order to observe the dependence of the sloshing behavior on the excitation frequency and amplitude. Regardless of excitation amplitude, the maximum value of wall pressure occurs when the excitation frequency reaches the natural frequency. The time sequence of free surface and corresponding streamlines for excitation frequencies have been presented to analysis the variation of wall pressure according to time, which contributes to explain the double peaks in the time variation of wall pressure.

Key Words : 슬로싱(Sloshing), 레벨셋법(Level set method), 가진 주파수(Excitation frequency), 저 적재량(Low filling level)

1. 서 론

슬로싱(sloshing)은 액체 저장탱크에 외부 가진력이 작용하여 탱크 내부의 액체가 출렁이는 현상을 말한다. 이러한 현상이 주기적으로 나타나게 되면 저장 탱크를 구조적으로 손상시킬 수 있다. 따라서 슬로싱은 육상, 해상, 항공 및 철도 운송 등의 다방면에서 공학적으로 연구되어왔다. 특히 조선분야의 경우 대형화 추세에 있는 액화천연가스(liquefied natural gas)운반선에 대한 슬로싱의 충격 하중 해석은 선박의 크기 증가, 새로운 항로 그리고 운항조건에 따라 더욱 더 중요시되고 있다.

선박이 파도에 의해 운동을 할 때 슬로싱의 주기가 LNG

탱크 내 액체의 고유 주기에 가까워지면 공진의 발생과 동시에 액체는 탱크 내벽에 국부적으로 충격 하중을 가하여 손상을 줄 수 있다. 만약 손상된 탱크 내벽이 극저온에 노출되면 취성 파괴로 이어져 인명, 경제 및 환경적 손실을 야기한다. 뿐만 아니라, 극심한 슬로싱에 의한 하중은 선박의 조종성 상실을 야기할 수 있다. 따라서 슬로싱을 최소화 하거나 방지하는 기술이 필요하다. 이를 위해서는 무엇보다 슬로싱을 물리적으로 올바르게 이해하고 액체 거동에 대한 정확한 유체역학적 해석이 선행되어야 한다. 이러한 필요성에 기인하여 다양한 방법으로 슬로싱 현상에 대한 연구가 이루어져왔다[1-4].

Shin et al.[5]은 공진 발생 시 슬로싱으로 인한 화물창의 구조 손상 가능성을 피하기 위해 직사각형 탱크의 바닥에 배플(baffle)을 설치하였으며 슬로싱 고유주기를 산정하여 이를 수치계산 결과와 비교 하였다.

Park and Chun[6]은 주기적으로 진동하는 탱크 내부의 미소 표면파에 대한 연구를 위해 레벨셋법(level set method)을 사용하였다. 시간 간격과 격자 시스템 등의 변화에 따른 수치

Received: November 24, 2014, Revised: March 16, 2015,

Accepted: March 16, 2015.

* Corresponding author, E-mail: lesmodel@pusan.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.1.016>

© KSCFE 2015

해석결과를 비교 및 분석하여 슬로싱 문제의 해법으로서 레벨셋법의 적용 가능성을 보여 주었다.

Lee et al.[7]은 부분적으로 유체가 채워진 사각형 저장탱크가 병진운동 할 때 슬로싱 실험을 연구하였으며 슬로싱 저감 연구를 위해 날개형 및 격막형 배플을 고안하여 그 효과를 확인하였다.

Yoon et al.[4]은 주기적으로 진동하는 2 차원 탱크 내부의 액체 슬로싱 특성을 파악하기 위하여 이동 좌표계와 레벨셋법을 이용하여 시간에 따라 움직이는 저장탱크의 이동과 자유 표면의 변화를 예측하였다.

Chen et al.[8]은 적재량 변화에 따른 슬로싱의 동적하중을 산정하였고 탱크 모서리 영역을 45°와 60°로 모따기를 하여 모따기에 따른 탱크 내부의 동적하중 분포 변화를 나타내었다.

앞서 언급한 연구들의 대부분은 탱크 내부 액체의 고유 주기와 동일한 주기를 탱크 운동의 가진 주기로 고려하여 슬로싱에 대한 평가를 수행하였다. 그러나 많은 경우, 탱크 운송 시 저장 탱크는 복잡한 운동 환경에 노출되므로 체계적인 슬로싱 평가를 위해서는 고유 주기뿐만 아니라 다양한 가진 주기 변화에 따른 슬로싱 특성 이해가 필요하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 탱크 운동의 가진 주파수 및 진폭 변화에 따른 2차원 사각 탱크 내부 액체 거동, 자유 표면 그리고 압력 변화 등을 평가하여 슬로싱 특성을 이해하고자 한다.

2. 수치 해석 방법

2.1 지배 방정식

운동하는 2차원 탱크 내부의 비압축성, 점성 이상(two-phase) 유체의 유동에 대한 무차원화된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = -\frac{1}{\rho(\phi)} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho(\phi)} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu(\phi)}{Re} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + f_i \tag{2}$$

여기서 u_i 는 속도, x_i 는 좌표계, p 는 압력, t 는 시간, ρ 는 밀도 그리고 μ 는 동점성계수를 나타낸다. 또한 각 변수들은 특성길이(L , characteristic length), 특성 속도($U_0(=\sqrt{gL})$,

characteristic velocity)와 특성 시간($t_0(=\sqrt{L/g})$, characteristic time)을 이용하여 아래 식 (3)과 같이 무차원화 되었다.

$$x_i = \frac{x_i^*}{L}, \quad u_i = \frac{u_i^*}{U_0}, \quad p = \frac{p^*}{\rho_i U_0^2}, \quad t = \frac{t^*}{t_0} \tag{3}$$

또한, 이상 유체의 밀도와 점성계수는 각각 액체의 밀도(ρ_l)와 점성계수(μ_l)로 무차원화 되었다.

$$\rho = \frac{\rho^*}{\rho_l}, \quad \mu = \frac{\mu^*}{\mu_l} \tag{4}$$

지배방정식 식 (2)의 f_i 는 중력과 탱크의 상대운동(회전 및 병진운동)에 의해 유체에 작용하는 체적력을 나타내며, $x(i=1)$ 및 $y(i=2)$ 방향에 대해 식 (5), (6)으로 표현된다. 체적력에 대한 상세한 수식 유도 및 각 항에 대한 물리적 의미는 Ibrahim[9]을 통해 참고할 수 있다.

$$f_1 = 2\dot{\theta}\nu - \frac{\sin\theta}{Fr^2} + y\ddot{\theta} + x\dot{\theta}^2 - \ddot{x}_c \tag{5}$$

$$f_2 = 2\dot{\theta}\nu - \frac{\cos\theta}{Fr^2} - x\ddot{\theta} + y\dot{\theta}^2 - \ddot{y}_c \tag{6}$$

식 (2)의 무차원 변수 Re 와 식 (5), (6)의 Fr 은 각각 Reynolds 수와 Froude 수를 의미한다.

$$Re = \frac{\rho_l U_0 L}{\mu_l}, \quad Fn = \frac{U_0}{\sqrt{gL}} \tag{7}$$

2.2 레벨셋법 (Level set method)

액체 탱크 내부 자유수면의 움직임을 모사하기 위해 상 경계면의 위치를 정량적으로 추적하는 방법인 레벨셋법을 사용하였다. 본 연구에 적용된 레벨셋법에 대한 상세한 설명은 Jeon et al.[10]를 통해 참고할 수 있다. 레벨셋법은 상 경계면 추적을 위해 계산된 ϕ 가 상 경계면으로부터 떨어진 곳에서는 정확도가 다소 낮아지는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해서 재초기화(re-initialization) 과정이 도입되는데, 본 연구에서는 Sussman et al.[11]에 의해 제안된 재초기화 방법을 사용하였다.

2.3 수치 해석 기법

기초방정식은 유한체적법(finite volume method)을 기반으로

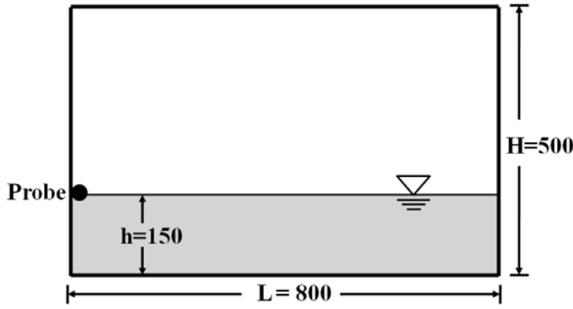


Fig. 1 Schematic of tank system(unit:: mm)

하여 비엇갈림 격자계(non-staggered grid)를 사용하였다. 속도와 압력은 격자의 셀 중심(cell center)에서 계산되었다[12]. 대류항은 MUSCL(Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws) 기법을, 확산항은 중심차분(central difference)법을 사용하여 이산화 하였다[13]. 시간 진행은 Kim and Moin[14]이 제안한 Fractional-step method를 이용하였으며 확산항은 Crank-Nicolson scheme을, 비선형항과 외력항 등은 2 단계 Adams-Bashforth scheme을 적용하였다.

2.4 해석 영역 및 경계 조건

Fig. 1은 본 연구에 사용된 사각 탱크를 나타내고 있으며 탱크 벽면에 작용하는 압력을 측정하기 위해 탱크 좌측 벽면에 자유 수면과 동일한 위치에 압력 측정계를 설치한 것을 보여준다. 병진운동에 따른 슬로싱 특성을 관찰하기 위해 탱크의 모든 경계조건은 점착(no-slip)조건을 사용하였다.

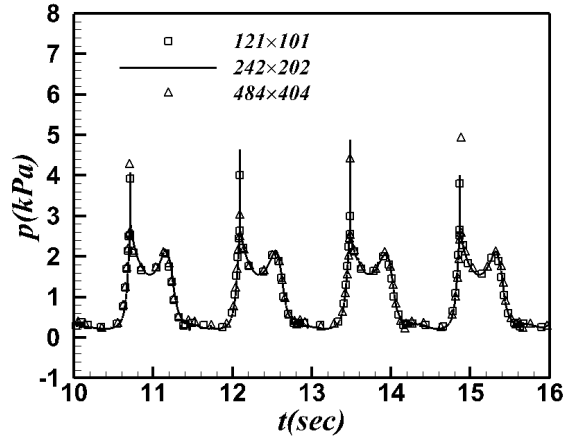
병진 운동에 따른 슬로싱 특성을 관찰하기 위하여 탱크 내 액체 적재량은 탱크 높이의 30%(= 0.3H)가 적용되었으며 해석에 사용된 다양한 진폭과 주파수는 Table 1에 정리하였다. 여기서 fr 은 고유 진동수, ω_n 과 가진 주파수, ω_s 의 비 (frequency ratio, ω_s/ω_n)를 의미하며 진폭은 탱크의 가로방향 길이(L) 대비 2%, 5% 그리고 7.5%로 산정하였다.

진동하는 사각 탱크 내부의 유체는 고유 진동수(natural frequency)를 가지며, 그 값은 식 (8)로 계산할 수 있다[15].

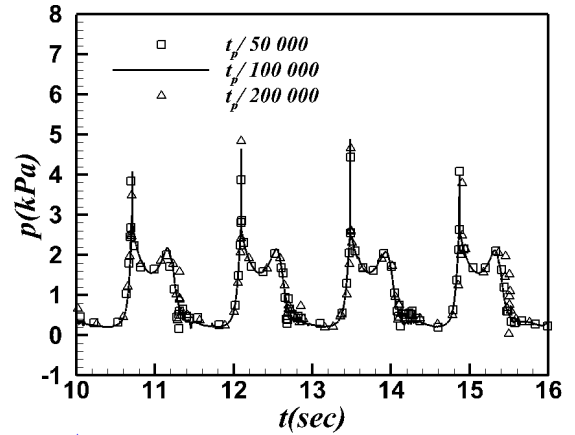
$$\omega_n = \sqrt{\frac{n\pi g}{L} \tanh\left(\frac{n\pi h}{L}\right)} \tag{8}$$

Table 1 Conditions of surge motion

Filling height	Excitation Amplitude (α)	Excitation Frequency Ratio (fr)
0.3H	0.025L (=10 mm)	0.5 ~ 1.5
	0.05L (=20 mm)	
	0.075L (=30 mm)	



(a)



(b)

Fig. 2 Time histories of the pressure for three different (a) grid systems and (b) time step sizes

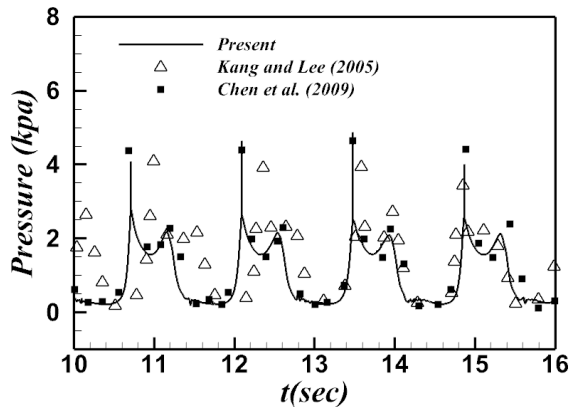


Fig. 3 Comparison of time histories of the pressure with the experimental results of Kang and Lee (2005), and with the numerical results of Chen et al. (2009) at P_{T1}

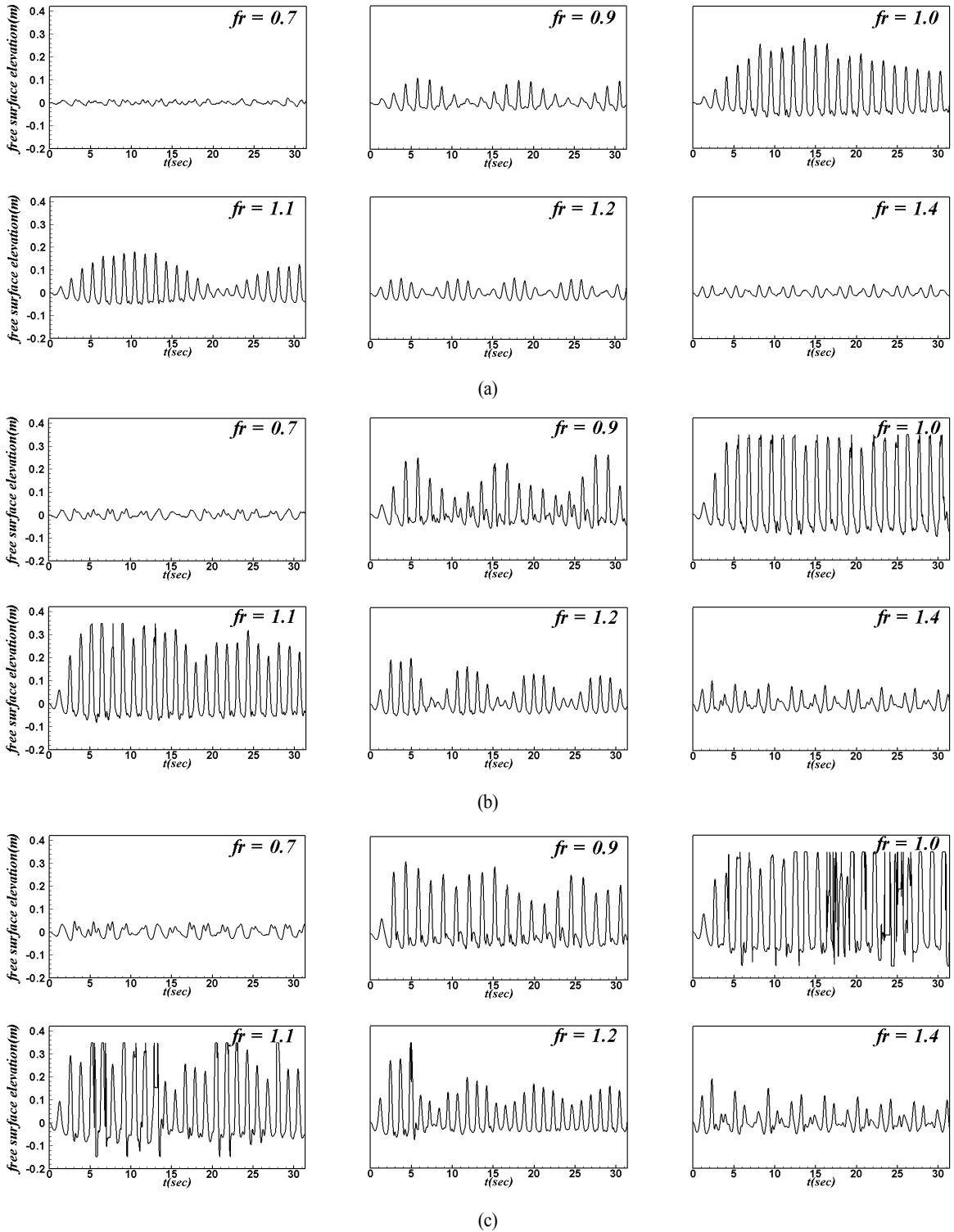


Fig. 4 Time histories of free surface elevation at the left wall under surge motion with various frequency ratios : (a) $\alpha = 0.025L$, (b) $\alpha = 0.05L$ and (c) $\alpha = 0.075L$

그리고 탱크의 변위는 식 (9)와 같이 정의 된다.

$$x(t) = \alpha \sin(\omega_s t) \tag{9}$$

여기서 α 와 ω_s 는 진폭 및 가진 주파수를 각각 나타낸다.

2.5 수치 해석 방법 검증

본 연구에서는 격자 및 시간 의존성 평가를 수행하였다. 먼저 격자 의존성 평가에 고려된 격자계는 세 가지로, 이에 해당되는 격자수는 121×101 , 242×202 그리고 484×404 이다. 이때 벽면에 작용하는 유체충격하중 및 유체의 속도 기울기를 정도 높게 예측하기 위해 벽면에 격자가 집중된 비균일 격자계를 사용하였다. 그리고 시간 간격 의존성 평가를 위해 탱크 내 액체의 고유주기와 동일한 탱크의 운동 가진 주기(t_p)의 $1/50,000$, $1/100,000$ 그리고 $1/200,000$ 에 해당하는 시간 간격을 고려하였다. 그 결과, 격자 및 시간 간격 의존성은 크지 않은 것을 Fig. 2를 통해 확인할 수 있으며, 계산 시간과 해석결과와의 정도를 고려하여 격자수, 242×202 그리고 시간 간격, $t_p/100,000$ 가 계산 조건으로 고려되었다. 선정된 격자계 및 시간 간격이 고려된 계산 결과를 Kang and Lee[16]의 실험결과와 Chen et al.[8]의 레벨셋법을 이용한 수치해석 결과와 비교하였으며 Fig. 3에 도시하였다. 두 선행 연구들은 본 연구와 같은 형상의 탱크를 사용하였으며 사용된 진폭과 가진 주파수 또한 동일하다. 본 수치 결과는 선행 연구들과 비교하였을 때 전반적으로 잘 일치하는 것을 Fig. 3를 통해 확인할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 자유수면의 높이

Fig. 4는 사각 탱크가 진폭(α) 0.025L, 0.05L, 0.075L로 변진 운동 할 때, 좌측 벽면에서 계측된 시간 변화에 따른 자유 수면의 높이를 사각 탱크의 가진 주파수 비, fr 별로 보여준다. 탱크 운동의 진폭 크기와 관계없이 $fr=0.7$ 일 때 자유수면의 변동 폭은 다른 fr 들에 비해 상대적으로 미비한 것을 확인할 수 있으며 자유수면의 변화는 일정한 주기적 특성을 거의 갖지 않는 것으로 판단된다. 그러나 탱크의 진폭과 관계없이 가진 주파수가 고유 진동수 근처, 즉 $fr=1$ 에 다가감에 따라 자유수면의 변동 폭은 증가하고, 그 크기는 매우 불규칙적으로 변하지만 주기적인 패턴이 관찰된다. $fr=1$ 이후, 다시 자유수면의 변동 폭은 감소하고 $fr=1$ 보다 낮은 가진 주파수 비에서 나타나는 특성과 또 다른 경향을 가지는 것을 확인할 수 있다. 전반적으로 사각 탱크의

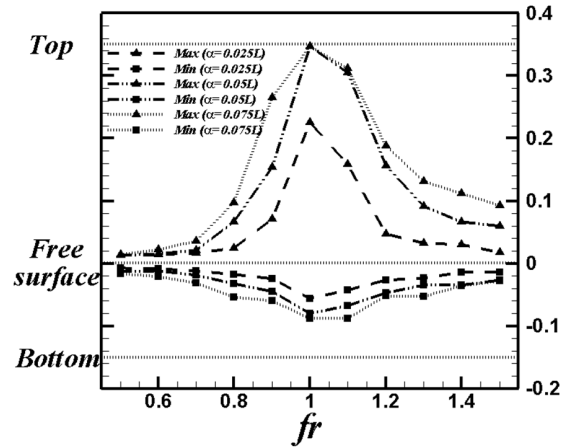


Fig. 5 Free surface elevation with various excitation amplitudes according to fr

진폭이 증가하면 자유수면의 변동폭도 증가하는 것을 Fig. 4(a),(b)와 fig. 4(c)의 비교를 통해 관찰할 수 있다.

Fig. 5는 fr 의 변화에 따른 탱크 내부 최대 및 최소 평균 자유 수면의 높이를 나타낸다. 최대 평균 자유수면 높이는 고유 진동수로 다가갈수록 증가하며 진폭 0.05L과 0.075L에서 자유 수면이 탱크의 윗 벽면까지 도달하는 것을 확인할 수 있다. 즉 탱크의 병진 운동이 일정 크기 이상의 진폭을 가지고 탱크의 가진 주파수가 고유 진동수와 일치하거나 가까워지면, 슬로싱은 탱크 상부 벽면에 구조적인 문제를 야기할 수 있음을 보여준다. 그리고 자유수면의 최대 및 최소 높이 차이는 탱크의 진폭이 증가함에 따라 증가하며 진폭에 관계없이 주파수 비가 1일 때 가장 크게 나타나는 것을 Fig. 5의 관찰을 통해 확인할 수 있다.

3.2 벽면에서의 압력 시계열

Fig. 1에서 보는 바와 같이 좌측벽면의 자유수면 높이에 압력 측정계를 설치하여 진폭 0.025L, 0.05L와 0.075L에서 가진 주파수 변화시켜 가며 벽면에 작용하는 압력을 계측하였고 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 진폭에 관계없이 가진 주파수가 고유 주파수에 다가가면, 즉 주파수비가 1에 가까워질수록 시간 변화에 따른 압력 변동 값은 증가하고, 뚜렷한 이중 정점(double peak)이 관찰된다. 그러나 $fr=1$ 이후, fr 이 증가함에 따라 이중 정점의 특성은 사라지고 단일 주기를 갖지 않는 복잡한 압력 시계열이 나타난다. Fig. 4와 Fig. 6의 비교를 통해 진폭과 fr 에 변화에 따른 압력 분포 특성은 자유수면 높이 변화 특성과 유사한 경향을 가지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 자유 수면의 변화와 압력 변동량은 서로 직접적인 상호관계를 가지는 것으로 판단된다.

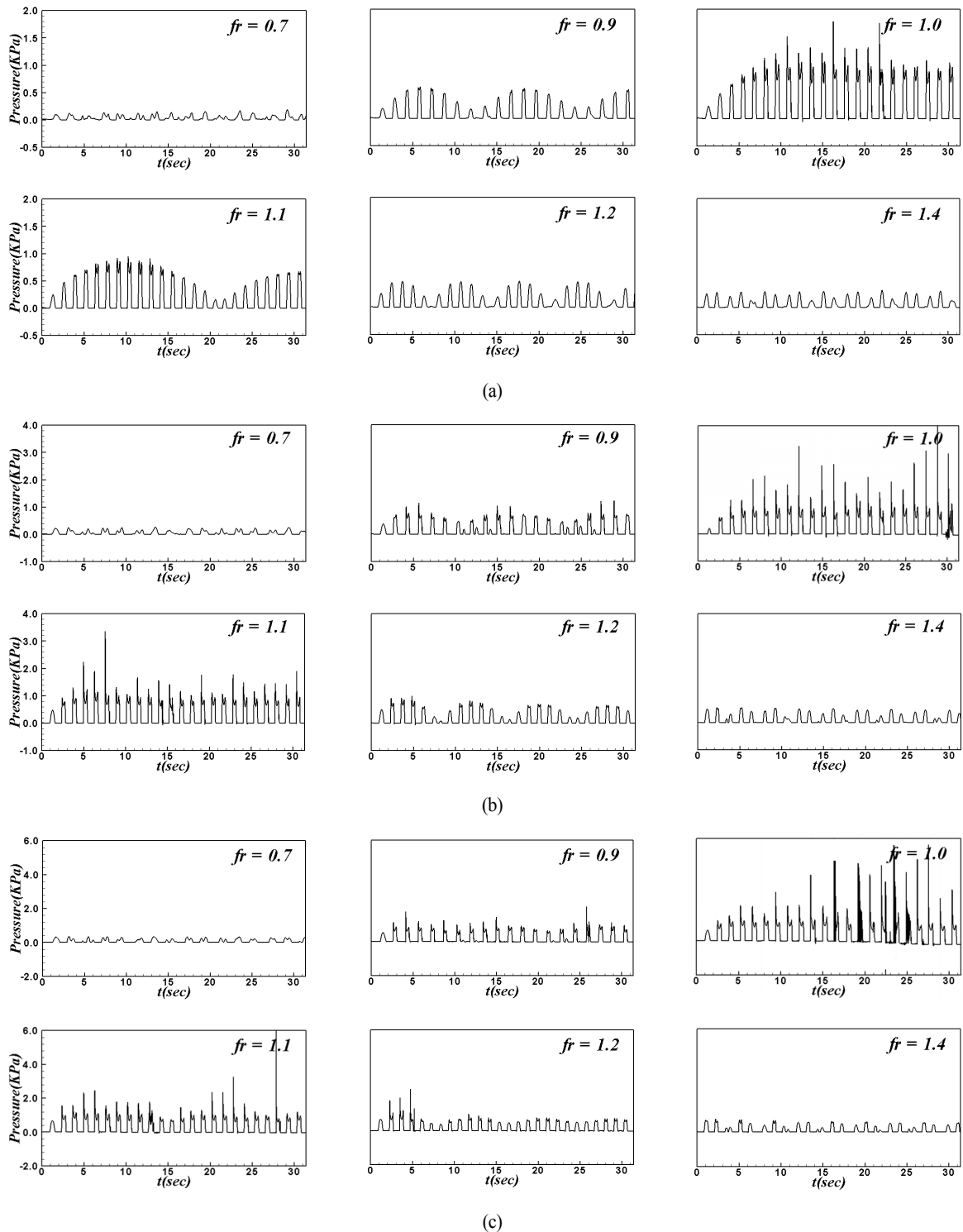


Fig. 6 Time histories of pressure at the left wall under surge motion with various frequency ratios : (a) $\alpha = 0.025L$, (b) $\alpha = 0.05L$ and (c) $\alpha = 0.075L$

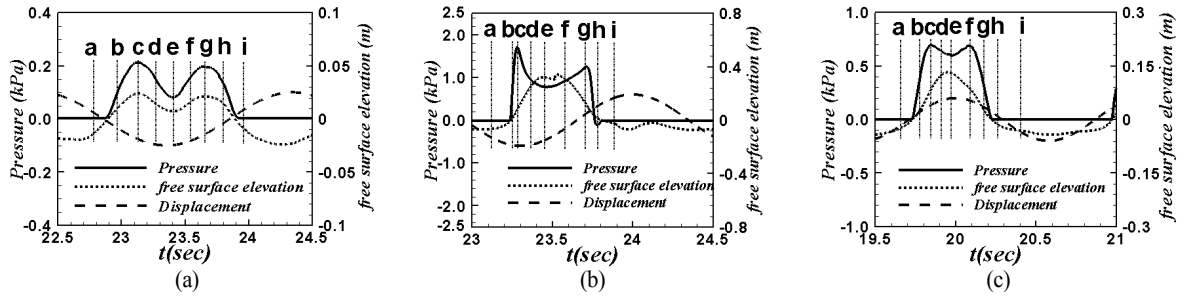


Fig. 7 Pressure and free surface elevation profiles with various phases at $\alpha = 0.05L$: (a) $fr = 0.7$, (b) $fr = 1.0$ and (c) $fr = 1.2$

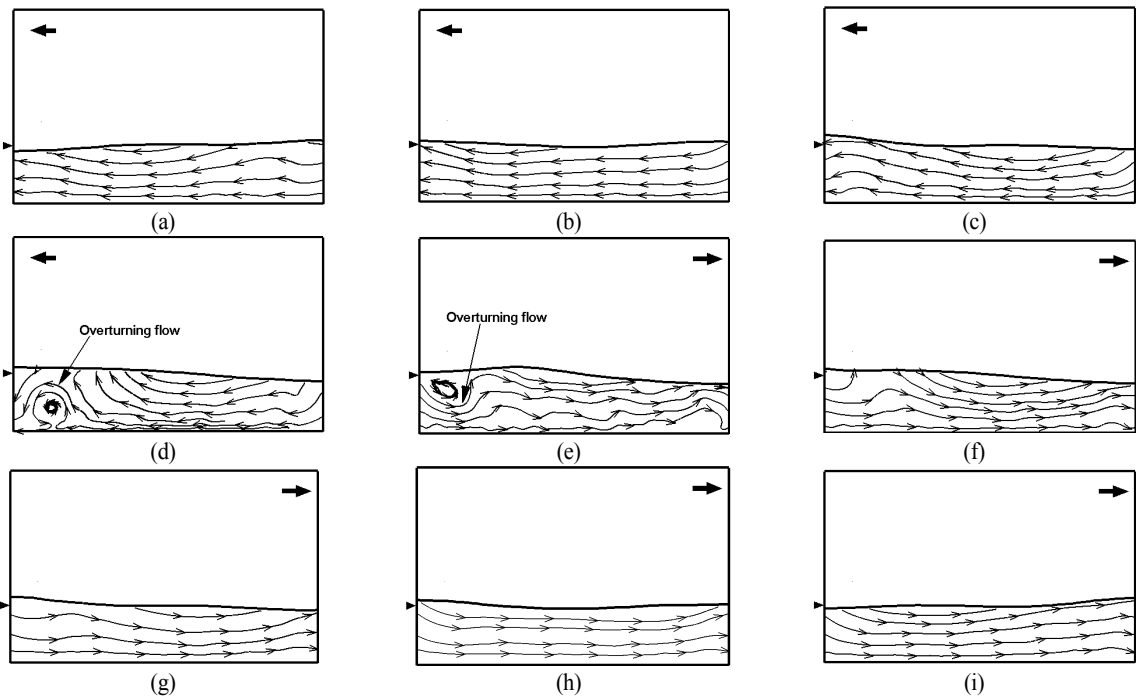


Fig. 8 Free surface deformations with streamline: alphabet of each subtitle matches to the phase in Fig. 7(a)

3.3 탱크 내 액체 거동 특성

앞선 결과들을 통해 자유수면의 높이 변화와 압력 변동량은 서로 밀접한 관계가 있음을 확인하였다. 궁극적으로 이 두 물리량들은 탱크 내 액체 거동에 따라 달라지기 때문에 진폭과 가진 주파수비 변화에 따른 탱크 내 액체 거동 특성을 이해하는 것이 중요하다.

Fig. 7에 고유 진동수를 기준으로 하여 고유 진동수 보다 낮은 영역($fr = 0.7$)과 높은 영역($fr = 1.2$) 그리고 고유 진동수 영역($fr = 1.0$)으로 나누어 진폭 $0.05L$ 에서 한주기 동안 병진 운동하는 사각탱크의 벽면 압력시계열, 자유수면의 높이 변화 그리고 탱크의 운동 위치를 나타내었다. 그리고 Fig.

8-10은 세 가지 가진 주파수 비에서 Fig. 7에 나타난 알파벳 위치에 따른 탱크 내 액체 거동 변화를 나타내었다.

가진 주파수가 고유 진동수 보다 낮은, $fr = 0.7$ 인 경우, 탱크가 좌측 최대 이동지점($x = -0.02m$)에 도달하기 전에 압력은 첫 번째 정점을 가지며 탱크가 좌측 최대 이동지점에 도달한 이후에 두 번째 정점이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 압력의 이중 정점은 자유수면의 높이 변화에서 나타나는 이중 점정과 동일한 시간대에 발생하는 것을 Fig. 7(a)에서 관찰할 수 있다. 이러한 특성은 자유수면 형상을 포함한 액체 거동 특성(Fig. 8)에서도 확인된다. 탱크가 좌측으로 이동하게 될 때 액체 또한 탱크 운동 방향과 같은 방향으

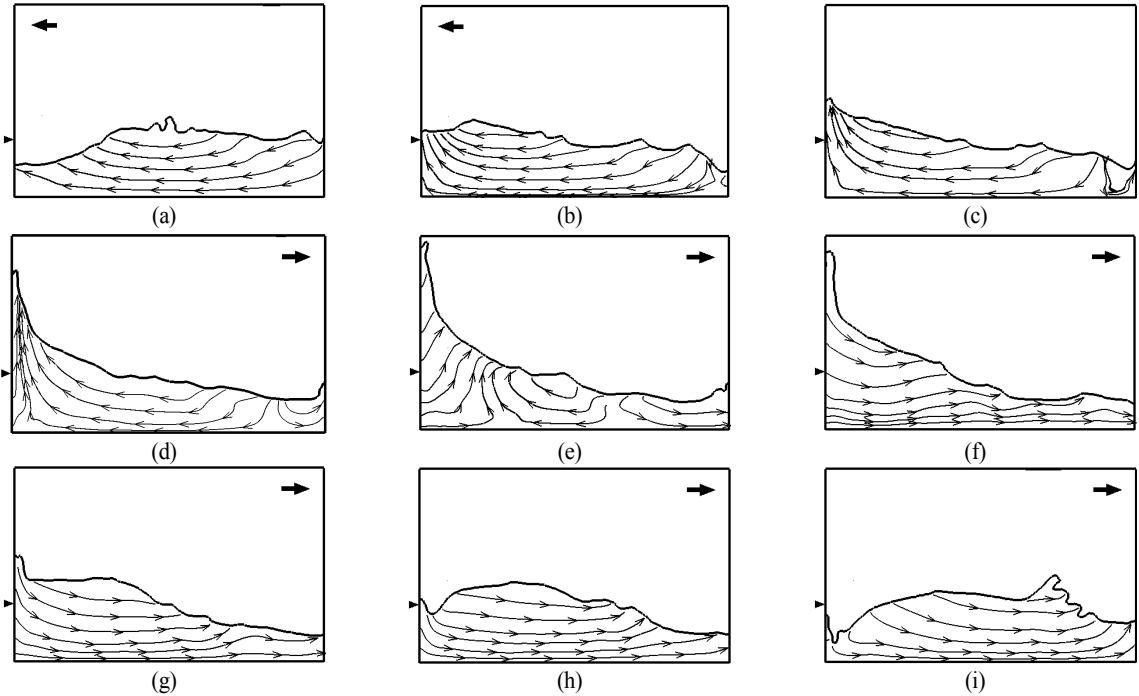


Fig. 9 Free surface deformations with streamline: alphabet of each subtitle matches to the phase in Fig. 7(b)

로 이루어지며, 좌측 최대 이동지점에 도달하기 직전의 시간 Fig. 8(c)에서 좌측 벽면에서 자유수면의 높이는 첫 번째 정점을 가진다. 탱크가 좌측 최대 이동지점에 도달한 직후인 시간 Fig. 8(e)에서 자유수면의 높이가 소폭 감소하지만 시간 Fig. 8(g)에서 자유수면의 높이는 두 번째 정점을 가지는 것을 관찰할 수 있다. 다른 가진 주파수에 비해서 탱크의 운동 속도가 상대적으로 작으므로 탱크 내 액체 거동은 탱크의 운동 방향과 전반적으로 동일한 방향으로 움직이는 정위상(in phase) 특성을 가진다. 이로 인해 액체와 벽면의 상대 가속도 차이는 크지 않게 되어 벽면에 작용하는 압력의 크기는 다른 주파수에 비해 작고 벽면 근방의 자유수면의 높이 변화, 즉 정수압에 의존하는 것으로 판단된다.

가진 주파수가 고유 진동수와 동일한, $fr = 1.0$ 의 경우, 탱크가 좌측 최대 이동지점($x = -0.02m$)에 도달했을 때 압력은 첫 번째 정점을 가지게 된다. 이후 좌측 최대 이동지점에서 탱크가 다시 우측으로 이동하면서 자유수면의 높이는 최대가 되고 탱크가 초기 위치($x = 0.0m$)에 도달한 직후 자유수면은 초기 자유수면의 위치에 오면서 두 번째 압력 정점이 나타나는 것을 Fig. 7(b)를 통해 확인할 수 있다. 압력과 자유수면의 이중 정점이 동일 시간대에 나타나는 $fr = 0.7$ 의 경우와 다르게 압력의 이중 정점과 자유수면의 단일 정점이 시간차를 가지고 나타나는 것을 Fig. 7(a),(b)의 비교를 통해

확인할 수 있다. 또 앞서 설명한 특성들은 자유수면 형상을 포함한 액체 거동을 나타낸 Fig. 9을 통해 좀 더 상세히 이해할 수 있다. 탱크가 초기 위치($x = 0.0m$)를 지나 좌측 최대 이동지점에 도달하는 시간 Fig. 9(c)에서 탱크의 가속도가 가장 크고 이루하는 물의 수평방향 운동 가속도도 가장 커진다. 따라서 벽면과 액체의 상대 가속도 차이 증가로 인해 왼쪽 벽면에 가하는 액체의 충격력도 가장 커지므로 압력은 시간 Fig. 9(c)에서 최대값을 보인다. 이후 시간 Fig. 9(e)에서 액체는 좌측 상부 벽면까지 상승하면서 수평방향의 액체 운동 에너지의 감소로 벽면에 작용하는 하중은 줄어들게 된다. 시간 Fig. 9(g)에서 액체는 벽면을 타고 급격히 내려오면서 탱크의 좌측 영역에 물이 적체가 되어 좌측 벽면에 국부적인 압력 상승을 유도하게 된다. 즉, 좌측 벽면의 압력은 두 번째 정점을 가지게 된다. 다른 주파수에서 나타나는 액체 거동과 비교하였을 때 $fr = 1.0$ 의 액체 거동은 공진으로 인해 그 변화가 매우 크게 나타나며, 자유수면은 불안정하고 복잡한 형태를 띠는 것을 Fig. 8-10의 비교를 통해 확인할 수 있다.

가진 주파수가 고유 진동수 보다 큰, $fr = 1.2$ 의 경우, 탱크가 우측 최대 이동지점($x = 0.02m$)에 도달하기 직전과 직후에 압력의 첫 번째와 두 번째 정점이 각각 나타나며, 압력의 두 정점이 나타나는 그 사이, 즉 탱크가 우측 최대 이동지점에 도달했을 때 자유수면의 높이는 단일 정점을 가지는

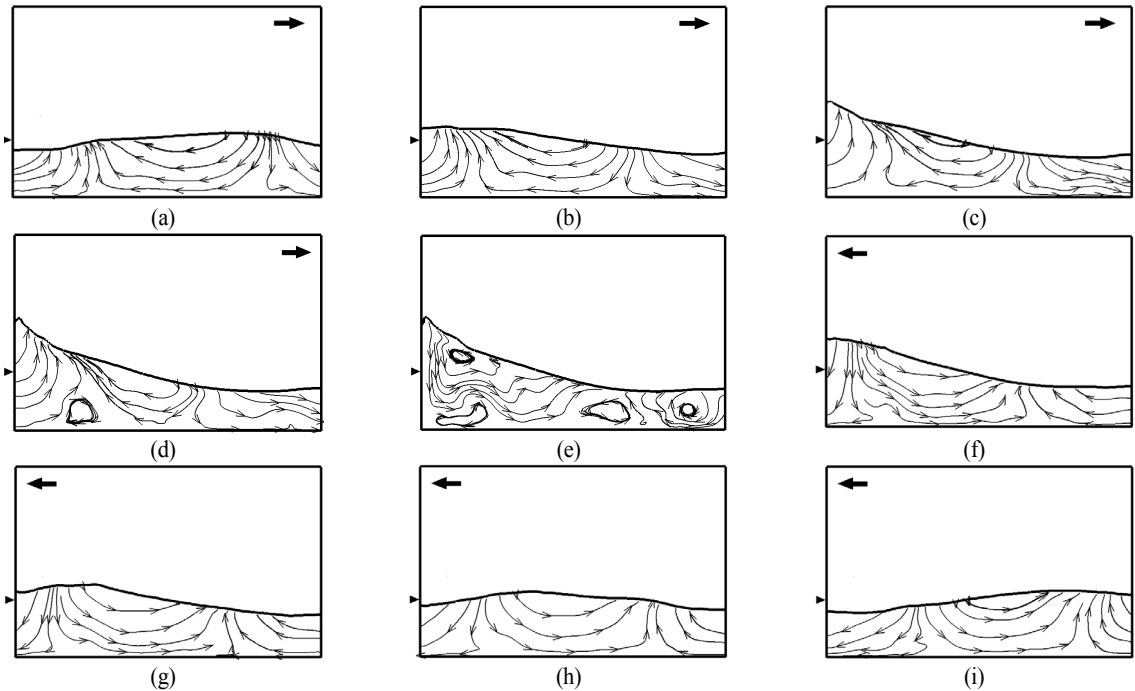


Fig. 10 Free surface deformations with streamline: alphabet of each subtitle matches to the phase in Fig. 7(c)

것을 Fig 7(c)에서 확인할 수 있다. 이것은 $fr = 0.7$ 에서 나타나는 액체 거동과 반대되는 특성으로, 탱크의 운동 방향과 액체의 거동 방향이 서로 반대인 것을 확인할 수 있고 이러한 특성은 탱크 내 액체 거동을 나타낸 Fig. 10에서도 관찰된다. 시간 변화에 따라 탱크는 오른쪽으로 움직이는데 액체는 왼쪽으로 흐르는 것을 Fig. 10(a)-(c)에서 볼 수 있다. 이러한 이유로, 가진 주파수가 고유 진동수 보다 높은 영역에서는 다른 영역에 비해 탱크가 상대적으로 빠르게 움직이기 때문에 탱크의 내부 액체가 탱크의 운동과 함께 거동하지 않고 액체 고유의 운동을 하는 것으로 판단된다. 즉, 탱크 내 액체 거동은 탱크의 운동 방향과 전반적으로 반대 방향으로 움직이는 역위상(out of phase) 특성을 가지는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 다양한 가진 주파수에서 병진 운동하는 저적재량 2차원 사각탱크 내부의 슬로싱 현상을 해석하였다. 수행한 연구의 주요 결과들은 다음과 같다.

(1) 저 적재량을 가진 2차원 사각 탱크가 주기적으로 병진운동을 할 때 시간에 따른 탱크 내부의 유동 구조, 자유 수면의 변화, 벽면에서의 압력 변동 등을 탱크의 가진 주파

수를 변화시켜가며 관찰하였다.

- (2) 탱크의 가진 주파수가 고유 진동수에 근접할 때 자유수면과 압력의 변동량 증가하고, 압력은 뚜렷한 이중 정점(double peak)을 가지는 것을 확인 하였다.
- (3) 가진 주파수 비의 변화에 따라 탱크 내부의 액체 거동은 다른 형태로 나타남을 볼 수 있었다. 특히 가진 주파수가 고유 진동수 보다 낮을 때 탱크 내 액체 거동은 탱크의 운동 방향과 전반적으로 동일한 방향으로 움직이는 정위상(in phase) 특성을 가지며, 가진 주파수가 고유 진동수 보다 클 때 탱크 내 액체는 탱크의 운동 방향과 전반적으로 반대 방향으로 거동하는 역위상(out of phase) 특성을 가지는 것을 확인하였다.
- (4) 벽면 압력 시계열에서 나타나는 이중 정점은 탱크의 동적 거동에 기인한 액체의 유동과 탱크 자체의 동적 거동의 상호작용으로 발생하는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(한국연구재단)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2010-0025618). 또한, 2011년도 정부(한국연구재단)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2011-0030662).

References

- [1] 2003, Bae, S.Y., "A study on vibration characteristics with sloshing mode effect in water tank structure," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.40, No.6, pp.88-95.
- [2] 2005, Noh, B.J., "Sloshing load analysis in spherical tank of LNG carrier," *Special issue of the Society of Naval Architects of Korea*, pp.22-30.
- [3] 2005, Park, J.J., Kim, M.S., Kim, Y.B. and Ha, M.K., "Numerical sloshing analysis of LNG carriers in irregular waves," *Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea*, pp. 38-43.
- [4] 2008, Yoon, H.S., Lee, J.M., Chun, H.H. and Lee, H.G., "A Numerical Study on the Sloshing Characteristics in a Two-dimensional Rectangular Tank Using the Level Set Method," *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, Vol.45, No.2, pp.132-143.
- [5] 1994, Shin, J.R., Choi, K.S., Kang, S.Y. and Kim, H.S., "Estimation of Sloshing Natural Periods in Liquid Cargo Tanks," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol.8, No.2, pp.93-104.
- [6] 1999, Park, I.R. and Chun, H.H., "A Study on the Level-Set Scheme for the Analysis of the Free Surface Flow by a Finite Volume Method," *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, Vol.36, No.2, pp.40-49.
- [7] 2003, Lee, Y.S., Kim, H.S., Lee, J.H., Kim, Y.W. and Ko, S.H., "A Study on the Reduction of the Sloshing of Storage Tank Using Wing and Diaphragm Baffle," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.27, No.12, pp.2039-2046.
- [8] 2009, Chen, Y.G., Djidjeli, K. and Price, W.G., "Numerical simulation of liquid sloshing phenomena in partially filled containers," *Computers & Fluids*, Vol.38, No.4, pp.830-842.
- [9] 2005, Ibrahim, R.A., *Liquid Sloshing Dynamics: Theory and Applications*, Cambridge University Press, New York, USA.
- [10] 2011, Jeon, C.H., Yoon, H.S. and Jung, J.H., "Direct forcing/fictitious domain-Level set method for two-phase flow-structure interaction," *The Korean Society of Ocean Engineers*, Vol.25, No.4, pp.36-41.
- [11] 1998, Sussman, M.S., Fatemi, E., Smereka, P. and Osher, S., "An improved level set method for incompressible two-phase flows," *Comput. Fluids*, Vol.27, pp.663-680.
- [12] 1994, Zang, Y., Street, R.L. and Koseff, J.R., "A Non-staggered Grid, Fractional Step Method for Time-Dependent Incompressible Navier-Stokes Equations in Curvilinear Coordinate," *J. Comput. Phys.*, Vol.114, pp.18-33.
- [13] 1991, Perng, C.Y. and Street, R.L., "A coupled multigrid-domain-splitting technique for simulating incompressible flows in geometrically complex domains," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol.13, pp.269-286.
- [14] 1985, Kim, J. and Moin, P., "Application of a fractional-step method to incompressible navier-stokes equations," *J. Comput. Phys.*, Vol.59, pp.308-323.
- [15] 1932, Lamb, S.M., "*Hydrodynamics*," Dover Publications, Inc., NewYork.
- [16] 2005, Kang, D.H. and Lee, Y.B., "Summary Report of Sloshing Model Test for Rectangular Model," Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co.,Ltd. South Korea, No.001.