

배플의 높이 변화에 따른 3차원 사각 탱크 내부의 슬로싱 현상에 관한 수치적 연구

이창열*, 윤현식†**, 정재환*

부산대학교 조선해양공학과*
부산대학교 첨단조선공학연구센터**

Numerical Study on Liquid Sloshing in the Three-dimensional Rectangular Tank with Various Baffle Heights

Chang Yeol Lee*, Hyun Sik Yoon†** and Jae Hwan Jung*

Department of Naval Architecture and, Ocean Engineering, Pusan National University*
Advanced Ship Engineering Research Center, Pusan National University**

Abstract

This study aims at investigating the effect of the baffle height on the liquid sloshing in the three-dimensional (3D) rectangular tank. In order to simulate the 3D incompressible viscous two-phase flow in the 3D tank with partially filled liquid, the present study has adopted the volume of fluid (VOF) method based on the finite-volume method which has been well verified by comparing with the results of the relevant previous researches. The ratio of the baffle height (h_B) to filling level (h) has been changed in the range of $0 \leq h_B/h \leq 1.2$ to observe the effect on the impact loads on the side wall and free surface behavior. Generally, as baffle height increases, the impact pressure on the wall decreases and the deformation of free surface becomes weaker. However it seemed that a critical ratio of the baffle height existed to reveal the lowest impact pressure on the wall. Consequently, $h_B/h = 0.8$ among h_B/h s considered in the study showed the lowest impact pressure.

※Keywords: Sloshing phenomena(슬로싱 현상), Baffle(배플), Free surface(자유수면), Three-dimensional tank(3차원 탱크)

접수일: 2009년 9월 21일, 승인일: 2009년 12월 16일

† 교신저자: lesmodel@pusan.ac.kr, 051-510-3685

1. 서 론

항공기, 선박, 자동차 및 지상에 설치된 각종 액체 저장 탱크는 외부 가진력으로 인하여 탱크 내의 액체가 출렁거리는 현상을 수반하는데, 이를 일반적으로 슬로싱(sloshing)이라 한다.

이러한 슬로싱은 탱크벽면에 국소적인 충격하중을 가하여 구조물에 손상을 입힌다. 특히 초대형 액체천연가스 운반선의 경우는, 슬로싱에 의해 발생한 탱크 벽면의 작은 구조적 손상이 극저온 상태에 노출되면 취성파괴로 이어져 대형사고의 가능성을 높인다.

이와 같은 슬로싱 현상이 일어나는 시스템의 안정성과 제어성을 향상 시키기 위해 슬로싱 거동에 대한 정확한 예측이 절실히 요구되고 있으며, 또한 이를 억제하기 위한 방안들이 강구되고 있다. 따라서, 이와 관련된 다양한 연구들이 진행되어져 오고 있다(Lee and Choi 1998, Park et al. 2005, Hwang et al. 2008, Yoon et al. 2008).

본 연구에서 고려한 슬로싱 현상의 제어 기법의 일환인 격막 즉, 배플(baffle)은 형상의 단순함에 의한 제작의 용이성으로 인해 응용적인 측면에서와 학술적인 측면에서 지속적으로 관심의 대상이 되어져왔다. 배플에 관한 초기 연구는 1950년대 이후 NASA를 중심으로 시작되어졌다. Akyildiz and Ünal(2005)은 배플의 유무에 따른 3D 사각탱크 내부에 채워진 액체의 비선형적인 거동 및 벽면의 압력 변동량을 실험을 통해 연구하였다. Biswal et al.(2006)은 수평형 배플의 위치, 길이 및 개수의 변화에 따른 사각 및 원통형 탱크 내부 액체의 2차원 비선형 슬로싱 특성을 FEM(finite element method)를 이용하여 연구하였다. 이들은 배플이 자유수면과 가까워질수록 탱크 내부의 슬로싱 현상이 저감되는 결과를 보여주었다. Liu and Lin(2009)은 VBF(Virtual boundary force method)를 사용하여 유동장 내부의 배플을 재현하였으며, 수평형 및 수직형 배플이 설치된 사각 탱크 내부의 슬로싱 현상을 연구하여 수직형 배플이 수평형 배플보다

슬로싱에 의한 벽면 충격압력의 저감에 더 효율적임을 보였다.

국내에서는 Lee et al.(2003)은 날개형 또는 격막형 배플을 탱크에 설치하여 실험을 통해 연구하였다. 그들은 격막형 배플의 높이를 적재 높이에 대비하여 0.2에서 0.6까지 변화 시키거나 병진 운동하는 탱크 내부의 슬로싱 현상이 배플에 의해 억제되는 것을 확인하였다. Kwack and Ko(2003)는 좌우 병진 및 피칭 운동을 하는 2차원 사각탱크 내부의 슬로싱 현상을 수치해석을 통해 연구하였다. 또한, 이들은 자유수면 높이의 변위에 대한 표준편차를 활용하여 수직형 및 수평형 배플들이 슬로싱에 미치는 영향을 비교·분석하였다. 최근 Lee and Hur(2009)는 관형 및 다공형 배플을 포함한 2차원 탱크가 병진 운동할 때 벽면 충격 압력과 슬로싱 소음 특성을 수치 해석하였다. 특히 수직형 배플의 높이를 적재높이의 0.5배, 1.0배 및 1.5배를 고려하여 수직형 배플이 슬로싱 소음을 저감시키는 것을 확인하였다.

이상에서 살펴 본 선행 논문들은 수직형 배플의 높이를 적재높이 대비하여 제한적으로 고려하여 연구를 진행하여 배플이 미치는 영향에 대해서 일반적인 결론을 내리고 있다.

따라서 본 연구에서는 3차원 사각 탱크가 좌우로 병진 운동할 때 탱크 길이방향의 중앙에 설치된 배플의 높이를 보다 세밀화하여 다양한 배플의 높이에 따른 자유수면 형상을 포함한 액체의 거동 및 충격 압력의 분석을 통해 탱크 내부의 슬로싱 특성에 대하여 연구한다.

2. 수치해석방법

2.1 지배방정식 및 수치해석방법

본 연구에서는 탱크 내 슬로싱 현상에 대한 유동 수치해석을 수행하기 위하여 유한 체적법에 근거한 범용 프로그램인 FLUENT 6.3.26를 사용하였다. 본 연구에서 3차원 비정상 비압축성 유체에 대한 지배방정식으로 연속(continuity) 방정식은 식(1)과 같으며, 난류유동을 해석하기

위한 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes)방정식으로 유도된 운동량(momentum) 방정식은 식(2)와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left(\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) + \rho g_i + F_i \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도, t 는 시간, u_i 는 유속, P 는 압력, μ 는 유체 점성계수, g_i 는 중력 가속도, F_i 는 외력항이다. 식(2)의 $\overline{u'_i u'_j}$ 는 Reynolds stress 항으로 본 연구에서는 $k-\omega$ SST 모델을 사용하여 해석하였다.

탱크에 부분적으로 차있는 유체는 다른 상을 가지는 이상유체(two-phase)로 고려하였으며, 유체의 계면을 추적하는 방법으로 VOF 기법을 이용하였다.

압력보정은 PISO(pressure implicit with splitting of operators)알고리즘을 사용하였고, Momentum 항은 QUICK(quadratic upstream interpolation for convective kinematics)을 사용하였다. 수렴판정은 연속방정식 및 운동량방정식의 Residual 값이 10^{-3} 이하가 되면 수렴한 것으로 판정하였다. 위에 간략히 언급한 본 연구에서 도입한 수치해석방법들에 대한 보다 자세한 내용은 Fluent User Guide 를 참고할 수 있다.

2.2 해석 모델 및 검증

본 연구에서 고려한 3 차원 사각 탱크의 형상은 Fig. 1(a)에 제시된 것과 같은 직육면체 형태이다. 사각 탱크의 제원은 길이 $L=0.8$ m, 높이 $H=0.5$ m, 폭 $B=0.4$ m 이다. 배플은 사각 탱크의 중앙에 설치되었으며 배플의 높이는 액체의 높이에 대한 배플의 높이 비(h_B/h)로 0.2 에서 1.2 까지

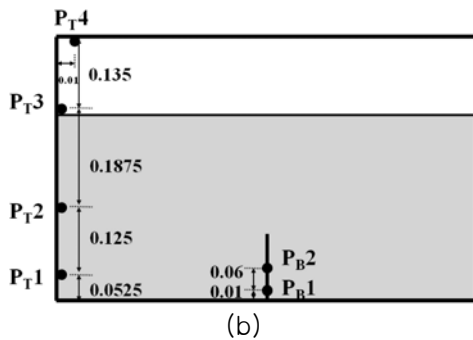
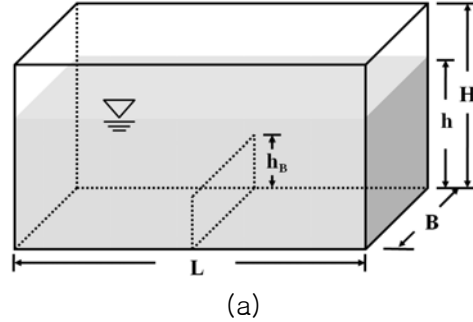


Fig. 1 Schematics of system (a) fluid-contained rectangular tank with baffle and (b) the position of probes (unit: m).

0.2 간격으로 설정되어 졌다. 계산의 용이성 및 효율성을 위하여 배플의 두께는 고려되지 않았다. 액체의 초기높이(h)는 탱크의 높이(H)에 70%인 0.35 m 로 설정되어 졌다.

탱크에 국소적으로 가해지는 충격 압력을 측정하기 위하여 Fig. 1(b)에 도시한 바와 같이 탱크의 폭 방향으로 중앙 단면에 해당하는 벽면에서 서로 다른 4 개의 Probe 들(P_T1 , P_T2 , P_T3 and P_T4)을 설치하였으며, 배플에는 높이 방향으로 서로 다른 Probe 들 (P_B1 and P_B2)을 설치하였다.

정지 상태의 탱크는 물이 중력에 의해 아래쪽에 평형상태로 유지하게 되며, 탱크의 병진 운동은 식 (3)와 같이 정의된다.

$$x_r(t) = \alpha \sin(\omega_s t) \quad (3)$$

여기서, α 와 ω_s 는 진폭 및 가진 주파수를 각각

나타낸다. 본 연구에서 고려되어진 α 는 0.025L(0.02m) 이며, ω_n 는 탱크의 내부에서 공진이 발생하는 유체의 고유주파수로 계산하였다. 이러한 진동하는 사각 탱크 내부의 유체는 고유진동수(natural frequency)를 가지며, 그 값은 식 (4)에 의해 계산할 수 있다 (Lamb 1932). 아래의 ω_n 는 첫번째 모드를 고려하였다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{n\pi g}{L} \tanh\left(\frac{n\pi h}{L}\right)} \quad (4)$$

본 연구에서는 사용된 격자의 의존성을 평가하기 위하여 Table 1 에 나타낸 세 가지 격자계를 적용하였다. 이러한 세가지 격자계를 사용하여 계산수행을 통해 얻은 Probe 에서 시간에 따른 압력값들의 크기 및 주기는 거의 동일한 것을 Fig. 2 로부터 확인할 수가 있다.

Table 1 Grid systems for grid dependence test

Case	$N_x \times N_y \times N_z$	Δx	Δy	Δz
1	60×40×30	0.013	0.012	0.013
2	80×50×40	0.01	0.01	0.01
3	160×100×50	0.005	0.005	0.008

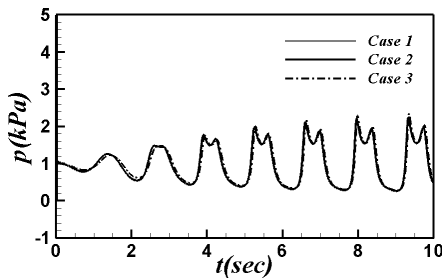


Fig. 2 Time histories of the pressure at P_{T1} for three different grid systems.

따라서, 본 연구에서는 세가지 격자계들 중에서 계산의 효율성을 고려하여 Case 2 를 사용하여 모든 계산을 수행하였다.

본 계산의 타당성 검증을 위하여 Fig. 1(b)에 표시되어 있는 P_{T1} 에서의 측정된 압력 시계열을 Kang 과 Lee(2005)의 실험결과 및 Chen et al.(2009)의 레벨셋법을 이용한 수치해석 결과와 비교하였다. 두 선행 연구들은 본 연구와 같은 형상의 탱크를 사용하였으며 진폭과 가진 주파수 등의 조건은 동일하다. 본 연구의 결과는 선행 연구결과들에서 보여주는 압력시계열의 주기 및 진폭 압력의 크기 등을 잘 재현하는 것을 Fig. 3 에서 확인할 수가 있다.

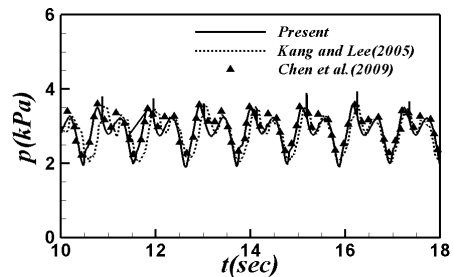


Fig. 3 Comparison of time history of pressure at P_{T1} with references.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4 는 사각 탱크가 병진 운동할 때 한 주기 동안 일정시간 간격으로 4 개의 서로 다른 순간들에서 자유수면 형상을 포함한 액체의 거동을 보여준다. 배플이 설치되지 않은 경우($h_B/h=0$)에 해당하는 Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이, 탱크의 병진 운동으로 인해 탱크 내부의 액체는 좌우로 출렁이면서 좌우벽면과 충돌하여 벽면을 타고 수직상승하여 윗벽면까지 도달하는 강한 슬로싱을 현상을 보인다. 이러한 극심한 슬로싱을 현상을 억제하기 위하여 일반적으로 배플을 설치하는데, 배플의 높이가 $h_B/h=0.2$ 인 경우(Fig. 4(b))는 배플이 설치되지 않은 경우와 유사하게 액체가 윗 벽면과 부딪힌 후 쇄파가 발생하는 강한 슬로싱 현상을 보인다. 즉, 배플은 높이가 $h_B/h=0.2$ 일 경우에는 액체의 유동에 미치는 간섭이 작으므로 인해 슬로

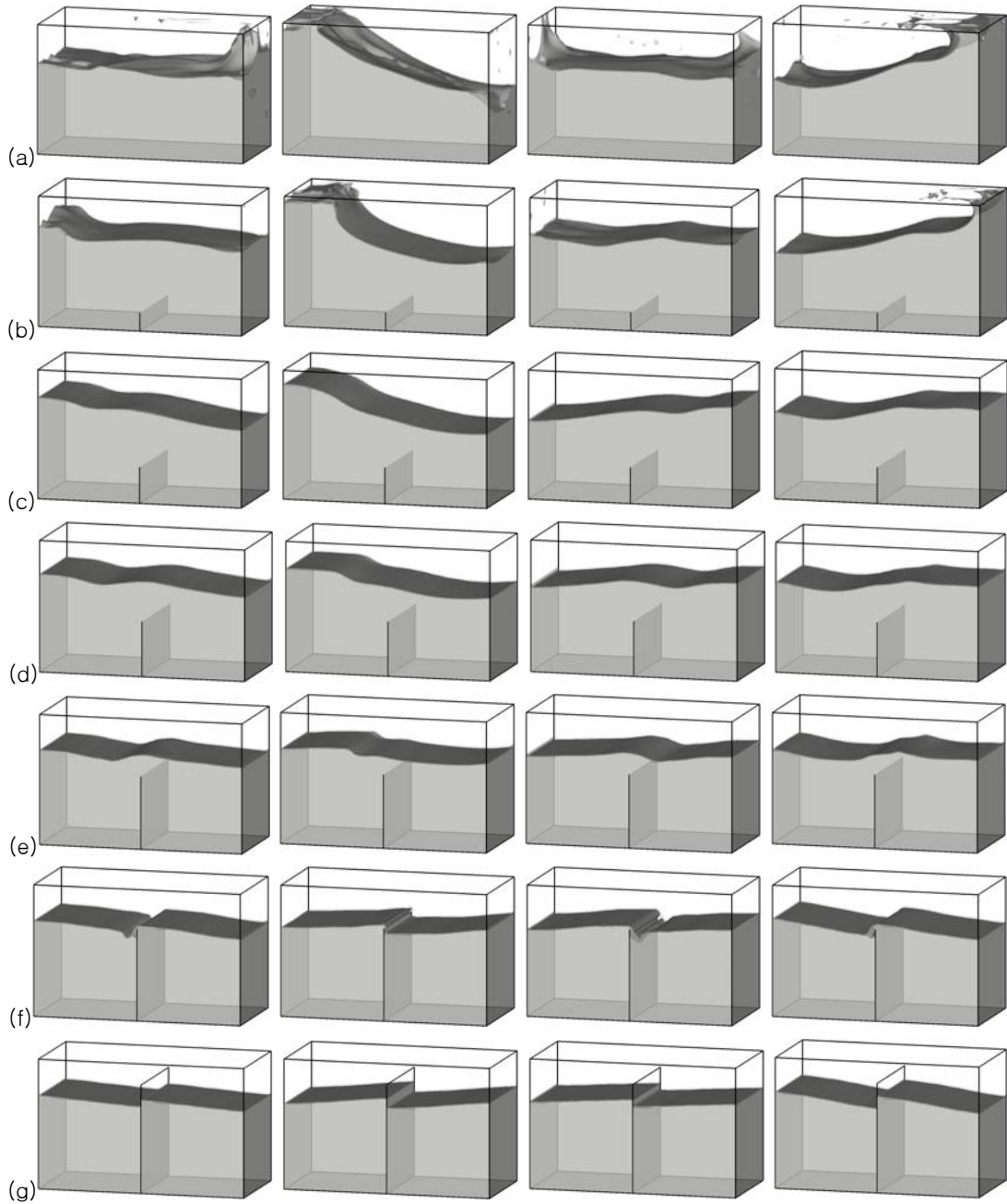


Fig. 4 Time sequences of free surface shape at (a) $h_B/h=0$, (b) $h_B/h=0.2$, (c) $h_B/h=0.4$, (d) $h_B/h=0.6$ (e) $h_B/h=0.8$ (f) $h_B/h=1.0$ and (g) $h_B/h=1.2$ during one period of tank motion.

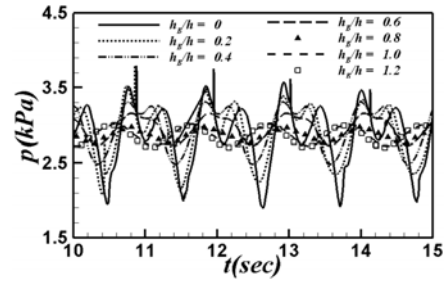
싱을 충분히 억제하지 못하는 것으로 판단되어진다. 배플의 높이가 $h_B/h=0.4$ (Fig. 4(c))가 되면 자유수면거동을 포함한 탱크 내부의 액체의 유동이 배플이 설치되지 않은 경우와 비교하였을 때 안정화되는 것을 Fig. 4(c)와 Fig. 4(a)의 비교를 통해 확인할 수 있다. $h_B/h=0.6$ (Fig. 4(d))와 $h_B/h=0.8$ (Fig. 4(e))로 배플의 높이를 계속 증가시키면 자유수면 아래 내부 유동은 더욱 안정화되며 자유수면의 변형도 더 작아진다.

하지만 배플의 높이가 초기 자유수면의 높이와 같아지는 $h_B/h=1.0$ 인 경우는 한 쪽 방향에서 배플로 접근하는 액체는 배플을 타고 넘어 배플의 반대편 공간으로 자유 낙하하면서 반대편 자유수면에 충돌하여 자유수면의 변형을 일으키는 것을 Fig. 4(f)를 통해 확인할 수 있다.

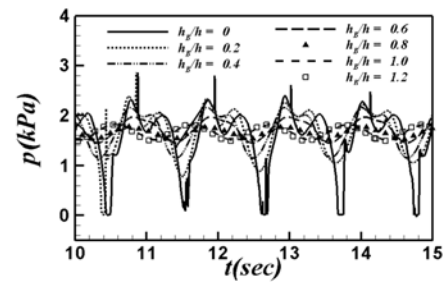
배플의 높이가 $h_B/h=1.2$ 인 즉, 배플의 높이가 초기 자유수면 높이보다 높아질 때 배플에 의해 탱크 내부 액체는 분리되어 폭이 반으로 줄어든 두 개의 탱크가 병진 운동하는 것과 같은 거동을 하는 것을 Fig. 4(g)에서 볼 수 있다. 이와 같이 자유수면의 강한 비선형적인 거동을 억제하여 배플을 기준으로 나누어진 각각의 다른 두 탱크 내 공간에서 자유수면의 거동은 거의 선형적으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 Lee and Hur(2009)가 연구한 결과와 비슷한 양상을 보인다.

Fig. 5 는 액체 슬로싱 현상에 기인되어진 벽면의 충격압력을 Fig. 1(b)에 도시한 Probe 들에서 측정된 값을 나타내었다. 앞서 Figs. 4(a)와 (b)의 자유표면형상 및 액체 거동에서 볼 수 있듯이 배플이 설치되지 않은 경우와 배플의 높이가 $h_B/h=0.2$ 인 경우일 때 강한 슬로싱 현상을 확인하였고, 이로 인해 기인되는 벽면의 충격 압력은 Probe 위치에 관계없이 큰 변동량을 가지는 것을 Fig. 5 에서 확인할 수 있다.

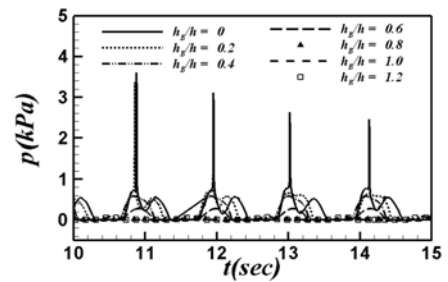
반면 배플의 높이가 $h_B/h=0.4$ 일 때 배플이 액체 거동을 방해하여 Fig. 4(c)에서 확인하였듯이 자유수면을 포함 액체의 거동은 안정화되며, Fig. 5 (a)에서 볼 수 있듯이 배플이 설치되지 않은 경우와 배플 높이가 $h_B/h=0.2$ 인 경우보다 다소 낮은 충격 압력을 가지는 것을 확인할 수 있다.



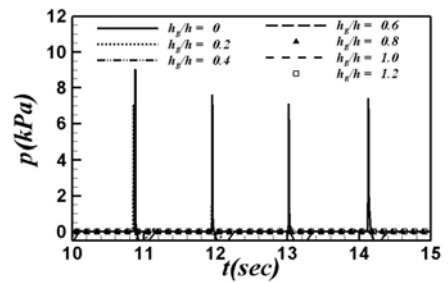
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5 Time histories of pressure under surge motion at (a) P_{T1} , (b) P_{T2} , (c) P_{T3} and (d) P_{T4} .

배플의 높이를 $h_B/h=0.8$ 까지 증가시키면 충격 압력은 계속해서 감소한다. 이는 배플의 높이가 증가하면서 탱크 내부의 자유수면을 포함한 액체의 거동이 감쇄되어 충격 압력의 감소로 나타내는 것을 알 수 있다.

배플의 높이가 $h_B/h=1.0$ 인 경우, Fig. 4 를 통해 설명한 바와 같이 자유수면 근처의 액체는 배플을 타고 넘어 자유낙하하여 반대쪽에 자유수면 충격을 가하게 되어 변형을 일으키며, 이로 인해 기인되는 반대쪽 액체의 슬로싱에 영향을 준다. 이로 인해 P_{T4} 를 제외한 Probe 들에서 배플의 높이가 $h_B/h=0.8$ 인 경우보다 큰 충격 압력을 가지는 것을 Figs 5. (a), (b)와 (c)를 통해 확인 할 수 있다.

배플의 높이가 $h_B/h=1.2$ 에서는 배플에 의해 탱크 내부의 액체는 가로 막혀 반대편으로 흐르지 못하고 독립된 2 개의 탱크가 병진 운동하는 것과 같이 거동하여, 배플의 높이가 $h_B/h=0.8$ 인 경우보다 자유수면의 구배가 더 증가한 것을 Fig. 4(e) 와 Fig. 4 (g)의 비교를 통해 확인할 수 있다. 이로 인해 배플의 높이가 $h_B/h=1.2$ 에서는 $h_B/h=0.8$ 인 경우보다 충격 압력은 더 커진 것으로 판단되어진다. 또한 배플의 높이가 자유수면 높이보다 증가하는 경우인 $h_B/h=1.0$ 과 $h_B/h=1.2$ 에서 유사한 압력을 가지는데, Lee and Hur(2009)가 연구한 결과에서도 슬로싱으로 인한 발생하는 소음이 배플의 높이가 자유수면 높이 이상에서는 유사한 값을 가진다.

Fig. 6 은 Fig. 5 에 나타난 압력 시계열에서 한 주기 동안 발생하는 최대 충격 압력들을 평균한 값을 배플 높이 변화에 따라 나타내었다.

앞서 설명한 Fig. 5 의 벽면에 발생하는 충격 압력과 Fig. 6 에 도시한 최대 충격 압력들을 평균한 값이 배플의 높이 변화에 따라 유사한 경향을 나타낸다.

초기 자유수면 아래에 위치한 P_{T1} 과 P_{T2} 의 최대 충격 압력은 배플이 설치되지 않은 경우와 배플의 높이가 $h_B/h=0.2$ 인 경우는 비슷한 값을 가지며 배플의 높이가 $h_B/h=0.4$ 에서부터 최대 충격 압력은 감소하여 배플의 높이가 $h_B/h=0.8$

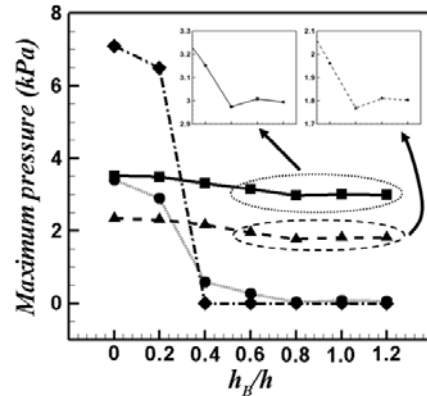


Fig. 6 The variation of maximum pressure with according to h_B/h , where $h_B/h=0$ is no baffle case: \blacksquare , P_{T1} ; \blacktriangle , P_{T2} ; \bullet , P_{T3} ; \blacklozenge , P_{T4} .

일 때 가장 낮은 것을 확인 할 수 있고, 배플의 높이가 초기 자유수면과 같아지는 $h_B/h=1.0$ 에서는 최대 충격 압력은 소폭 증가하여 배플의 높이가 $h_B/h=1.2$ 일 때는 변화가 없다.

초기 자유수면보다 위에 위치한 P_{T3} 과 P_{T4} 에서의 최대 충격 압력은 배플이 설치되지 않은 경우에서 가장 큰 값을 가지고, 배플의 높이가 $h_B/h=0.2$ 일 때 소폭 감소하여 배플 높이가 $h_B/h=0.4$ 에서 급격히 감소한다. 특히, P_{T4} 에서 배플의 높이가 $h_B/h=0.4$ 부터 $h_B/h=1.2$ 까지의 최대 충격 압력은 '0'의 값을 가진다. 이는 P_{T4} 가 위치한 윗 벽면까지 탱크 내부의 액체가 도달하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 7 은 배플에 위치한 Probe 들에서의 시간 변화에 따른 충격 압력을 나타낸 것이다. 배플에 위치한 Probe 들의 충격압력은 Probe 들의 위치에 상관없이 배플 높이가 증가할수록 줄어드는 것을 Fig. 7 을 통해 확인 할 수 있다. 또한 배플의 높이가 초기 자유수면 높이와 같아지거나 높아지는 $h_B/h=1.0$ 와 $h_B/h=1.2$ 의 경우, 앞서 설명하였듯이 자유수면의 선형적인 거동으로 인해 배플에 위치한 Probe 들의 충격 압력은 단일 정점(peak)를 가지고 주기적인 거동을 보인다.

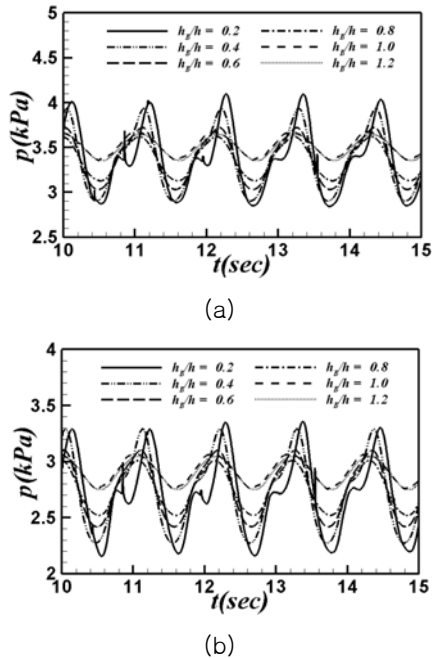


Fig. 7 Time histories of pressure under surge motion at (a) P_{B1} and (b) P_{B2} .

4. 결론

본 연구에서는 3 차원 사각 탱크의 배플의 높이에 따른 슬로싱 특성에 대하여 수치해석을 통하여 연구하였다. 계산결과에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 본 연구의 계산결과를 선행연구 결과와 비교하였으며, 본 연구의 압력값의 크기 및 압력시계열의 주기와 진폭 등이 선행연구 결과와 잘 일치함을 확인하였다.

기존의 논문들은 배플의 높이를 자유수면에 대비하여 제한적으로 적용하여 자유수면 높이에 따른 감쇠계수 및 슬로싱 소음 등을 통해 배플의 영향성을 평가하였다. 따라서 본 연구에서 배플의 높이 변화가 유동과 벽면에 작용하는 충격 압력에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 적재량이 70%일 때 배플의 높이를 액체의 높이에 대한 배플의 높이 비(h_B/h)로 0.2 에서 1.2 까지 0.2 간격으로 변화시켰다. 배플이 설치되지 않은 경우와 서로 다른 높이를 가진 배플이 설치된 경우와의

비교를 통하여 아래의 결론을 도출하였다.

(1) 배플의 높이가 $h_B/h=0.2$ 인 경우, 배플이 설치되지 않은 경우와 비교하였을 때 자유수면을 포함한 액체의 거동과 탱크 벽면의 충격 압력은 유사하며, 이를 통해 초기 액체의 높이 대비 배플의 높이가 일정높이 이하이면 배플이 탱크 내부의 슬로싱 현상에 미치는 영향은 미비하다고 판단되어진다.

(2) 탱크 벽면에서의 충격 압력은 $h_B/h=0.4$ 부터 배플의 높이가 증가할수록 감소하여 배플의 높이가 $h_B/h=0.8$ 일 때 최소값을 가진다. 반면, 배플의 높이가 $h_B/h=1.0$ 와 $h_B/h=1.2$ 인 경우는 $h_B/h=0.8$ 에 비해 충격 압력은 소폭 증가한다.

(3) $h_B/h=1.0$ 와 $h_B/h=1.2$ 인 경우들은 즉, 배플의 높이가 초기 자유수면높이와 같아지거나 더 높아지는 경우들에서는 배플의 의해 액체는 두 개의 독립된 탱크로 나누어져 자유수면은 선형적으로 거동한다.

이상의 결과로부터 탱크의 벽면에 미치는 액체의 충격압력을 최소화하는 임계 배플의 높이가 존재하는 것으로 추정되며, 본 연구에서 고려되었던 배플의 높이들 중에서는 $h_B/h=0.8$ 이 임계높이에 해당된다고 볼 수 있다.

후 기

이 논문은 2007 년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-331-D00559).

참 고 문 헌

- Akyildiz, H. and Ünal, E., 2005, "Experimental Investigation of Pressure Distribution on a Rectangular Tank Due to the Liquid Sloshing," Ocean Engineering Vol. 32 (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.
- Chen, Y.G., Djidjeli, K. and Price, W.G., 2009, " Numerical Simulation of Liquid Sloshing Phenomena in Partially Filled Containers," Computers & Fluids, Vol. 38, pp. 830-842.
 - Fluent 6.3.26 User Guide.
 - Hwang, Y.S., Jung, J.H., Kim, D.W. and Ryu M.C., 2008, "An Experimental Study on Sloshing Impact Pressures with two Identically Shaped Rectangular 2-Dimensional Model Tanks with Different Sizes," Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea, pp. 16-28.
 - Kang, D.H. and Lee, Y.B., 2005, "Summary Report of Sloshing Model Test for Rectangular Model," Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co.,Ltd. South Korea , No. 001
 - Kwack, Y.K. and Ko, S.H., 2003. "Computational Fluid Dynamics Study on Two-dimensional Sloshing in Rectangular Tank," Trans. of the KSME(B), Vol. 27, No. 8, pp. 1142-1149.
 - Lamb, S.M., 1932, "Hydrodynamics," Dover Publications, Inc., New York.
 - Lee, D.Y. and Choi, H.S., 1998, "A Study on the Sloshing of Cargo Tanks Including Hydro Elastic Effects," Journal of the Society of Naval Architects of Korea. Vol. 35, No. 4, pp. 27-37.
 - Lee, S.H. and Hur, N.K., 2009, "A Numerical Study on Flows in a Fuel Tank with Baffles and Porous Media to Reduce Sloshing Noise," Korean Society of Computational Fluids Engineering. Vol. 14, No. 2, pp. 68-76.
 - Lee, Y.S., Kim, H.S., Lee, J.H., Kim, Y.W and Ko, S.H., 2003, "A Study on the Reduction of the Sloshing of Storage Tank Using Wing and Diaphragm Baffle," The Korea Society of Mechanical Engineers A, Vol. 27, No. 12, pp. 2039-2046.
 - Liu, D. and Lin, P., 2009, "Three-dimensional Liquid Sloshing in a Tank with Baffles," Ocean Engineering, Vol. 36, pp. 202-212.
 - Park, J.J., Kim, M.S., Kim, Y.B. and Ha, M.K., 2005, "Numerical Sloshing Analysis of LNG Carriers in Irregular Waves," Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea. pp. 38-43.
 - Silveira, N.A., Stephens, D.G. and Leonard, H.W., 1961, "An Experimental Investigation of the Damping of Liquid Oscillations in Cylindrical Tanks with Various Baffles," NASA TND-715, Langley Research Center.
 - 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 창 열 > < 윤 현 식 > < 정 재 환 >