

## 챔퍼가 3 차원 사각 탱크 내부의 액체 슬로싱에 미치는 영향

정재환\*, 이창열\*, 윤현식†\*\*

부산대학교 조선해양공학과\*  
부산대학교 첨단조선공학연구센터\*\*

### Effect of Chamfering Top Corners on Liquid Sloshing in the Three-dimensional Rectangular Tank

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

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 chamfer 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 effects of the chamfering top corners of the tank on the liquid sloshing characteristics have been investigated. The angle of the chamfering top corners ( $\theta$ ) has been changed in the range of  $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$  ( $\Delta\theta = 15^\circ$ ) to observe the free surface behavior, and the effect on wall impact load. Generally, as the angle of the chamfering top corners increases, the impact pressure on the upper knuckle point decreases. However it seemed that a critical angle of the chamfering top corners exists to reveal the lowest impact pressure on the wall.

※ Keywords: 슬로싱(Sloshing), 챔퍼(Chamfer), 자유표면(free surface), 3 차원 탱크(three-dimensional tank)

## 1. 서론

액체 화물을 포함하는 저장탱크는 선박, 항공 및 철도분야에서 연료탱크와 액체저장고 그리고 지상에 설치된 저장탱크 등에 다양하게 존재한다. 이러한 저장탱크에 외부 가진력이 작용하여 탱크 내부의 액체가 출렁이는 슬로싱 현상(sloshing phenomena)이 발생하게 되면 유체 내부의 유동에 의한 동압이 벽면에 작용하여 구조적인 손상을 입히거나 또는 유체와 구조물 사이의 상호간섭으로 힘과 모멘트가 커짐에 따라 시스템의 조종성을 상실하여 큰 문제를 야기시키기도 한다. 따라서 슬로싱 현상은 여러 과학 및 공학분야에서 오랜 시간 동안 관심의 대상이 되어 왔으며, 슬로싱 현상 자체에 대한 많은 연구가 진행 되어왔다. (Lee and Choi 1998, Bae, S.Y. 2003, Park et al. 2005, Noh, B.J. 2005, Hwang et al. 2008, Yoon et al. 2008).

조선산업에서는 화석 연료의 고갈 및 청정 에너지원 수요 증가로 인해 액화천연가스를 운반하는 LNG 운반선에 대한 수요가 증대되고 대형화 됨에 따라 슬로싱 문제가 크게 대두되고 있으며, 이를 억제하기 위한 방안들이 강구되고 있다. 슬로싱 억제를 위한 방법으로는 일반적으로 잘 알려진 탱크 내부의 액체의 유동을 제한하거나 감쇄효과를 줄 수 있는 격막 즉, 배플을 설치하는 것이다. 하지만 극저온 상태를 유지하여야 하는 LNG 선의 화물창 내부에 배플을 설치하는 것은 구조적으로 큰 어려움이 따른다. 이를 극복하기 위해 LNG 선의 화물창 타입 중 하나인 멤브레인 타입의 경우, 화물창의 상, 하부 모서리에 모따기를 수행하여 형상화 되어진 기울어진 벽면을 통해 벽면을 따라 상승하는 액체의 유동방향을 바꿈으로써 슬로싱으로 인한 충격 하중을 감소시킨다.

이에 관한 선행 연구로는 Arai et al.(1994)이 탱크 상부 좌·우 모서리에 모따기를 수행한 챔퍼형 탱크에 대해서 모형 실험을 수행하였으며, 이 결과를 수치해석 결과와 비교하였다. Kim et al.(2004)은 2차원 및 3차원 팔각기둥 탱크(pris-

matic tank) 내부의 슬로싱 현상을 FDM (finite difference method)을 이용하여 수치해석 기법에 따른 수치결과를 Abramson et al.(1974)의 실험결과를 통해 검증하였으며 탱크 내부에 부재를 설치하여 부재에 따른 탱크 내 벽면에 작용하는 충격 압력의 변화를 관찰하였다. Rhee(2005)는 VOF (volume of fluid) 방법을 이용하여 2차원 및 3차원 사각탱크에 대해서 정렬격자계와 및 비정렬격자계, 층류 및 난류모델, 수치해석방법의 적용에 따른 해석결과를 비교하였다. Chen et al.(2009)는 챔퍼 각도 45° 및 60°에 대해서 레벨셋법(level-set method)을 이용하여 챔퍼에 의한 슬로싱 특성을 파악하기 위해 2차원 챔퍼형 탱크에 대해 수치해석을 수행하여 벽면에 국소적으로 작용하는 압력을 산정하였다.

앞서 언급한 선행 연구들은 챔퍼각도를 고정된 탱크형상 및 모형 실험을 통해 충격 압력을 측정하거나 수치해석방법에만 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. 따라서 본 연구에서는 탱크 상부 모서리에 대해서 모따기를 수행하여 챔퍼 각도( $\theta$ )를 0°에서 60°까지 15°씩 증가시켜 형상변화에 따른 좌, 우 병진운동 하는 탱크의 내부의 액체의 거동과 벽면에서의 충격압력 및 슬로싱 특성을 고찰하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 지배방정식 및 수치해석방법

본 연구에서는 탱크 내 슬로싱 현상에 대한 유동 문제를 수치해석 하기 위하여 유한 체적법에 근거한 범용 프로그램인 FLUENT 6.3.26 를 사용하였다. 본 연구에서 고려되어진 지배방정식은 3 차원 비정상 비압축성으로써 연속(continuity) 방정식은 식(1)과 같으며, 난류유동을 해석하기 위하여 Navier-Stokes 방정식을 레이놀즈 평균한 방정식인 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)방정식은 식(2)와 같다.

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

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

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

탱크에 부분적으로 차있는 유체는 서로 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, 대류항(convection term)은 QUICK(Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics)을 사용하였다. 수렴판정은 연속방정식 및 운동량방정식의 잔류오차(residual) 값이  $10^{-3}$  이하가 되면 수렴한 것으로 판정하였다. 위에서 간략히 언급된 수치해석방법들의 보다 자세한 내용은 Fluent 6.3.26 User Guide 의 Chapter 12. Modeling Turbulence 를 참고할 수 있다.

2.2 해석 모델 및 검증

본 연구에서 고려된 챔퍼형 3 차원 사각 탱크는 Fig. 1(a)에서 보여지는 바와 같이 상부 좌우 모서리들을(C1, C2) 모따기하여 형상화 되어졌다. 사각 탱크의 제원은 너비  $L=0.8$  m, 높이  $H=0.5$  m, 폭  $B=0.4$  m 이다. 동일한 챔퍼의 높이 ( $h_c=0.135$ m)에 대해서 챔퍼각도( $\theta$ )를  $0^\circ$ 에서  $60^\circ$ 까지  $15^\circ$ 씩 간격을 변화시켜가며 서로 다른 5 가지 형상의 탱크들을 고려하였다. 탱크 벽면의 국소 충격압력을 측정하기 위하여 Fig. 1(b)에 도시한 바와 같이 탱크의 폭방향으로 중앙단면에 해당하는 좌측 벽면에 6 개의 압력 측정

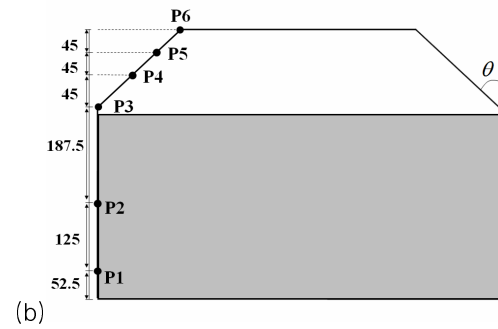
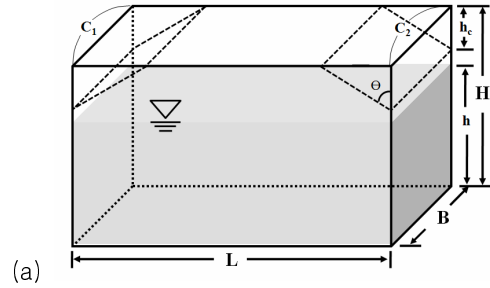


Fig. 1 Schematics of (a) chamfered tank (b) the position of probes (unit:mm)

계들을 좌측 수직면(P1 와 P2)과 사면(P3, P4, P5 와 P6)에 설치하였다. 사면에서 위치한 압력 측정계들은 챔퍼각도가 변화함에 따라 길이 방향에 대한 위치는 변하지만 높이방향에 대해서는 위치를 동일하게 설정 하였으며 탱크의 병진 운동은 (3)와 같이 정의된다.

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

여기서,  $\alpha$  와  $\omega_s$  는 진폭 및 가진 주파수를 각각 나타내며  $\alpha$  는 0.025L(0.02m) 이다. 진동하는 사각 탱크 내부 액체의 고유 진동수(natural frequency)는 식 (4)에 의해 계산되어질 수 있으며(Lamb 1932) 본 연구에서는  $\omega_n$  의 첫번째 모드,  $\omega_1$  에 해당하는 주파수의 크기를 가진주파수  $\omega_s$  에 추가하였다.

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

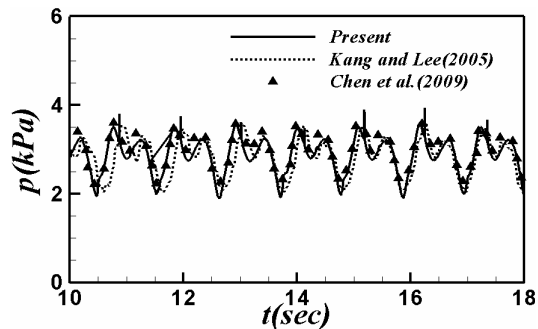


Fig. 2 Comparison of time history of pressure at P1 with references

본 계산의 타당성 검증을 위하여 Fig. 1(b)에 표시되어있는 P1 에서 측정된 압력 시계열을 Kang and 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. 2 에서 확인할 수가 있다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3 은 병진운동 하는 3 차원 사각탱크 및 챔퍼형 탱크가 병진거리의 좌측 최대 변위 부근에 위치할 때, 서로 다른 4 개의 순간에 대한 자유수면 거동변화를 탱크 병진운동의 한주기의 1/8 간격으로 나타내었다. 챔퍼가 존재하지 않는  $\theta = 0^\circ$  일 때 슬로싱에 의해 액체는 좌측 수직면과 충돌한 후 수직방향만으로 유동 함으로써 벽면을 따라 상승한다. 상승한 액체는 탱크 상면에 충돌한 후 다시 자유낙하 하는 것을 Fig. 3(a)에 관찰 할 수 있다.

전반적으로 챔퍼형 탱크( $\theta = 15^\circ \sim 60^\circ$ )의 경우, 액체는 좌측 수직면에 충돌한 후 수직방향으로만 유동하는 사각탱크( $\theta = 0^\circ$ )와는 달리 벽면의 사면화에 기인하여 수직방향뿐만 아니라 수평방향 유동을 병행하며 상승한다. 사면을 따라 상

승한 액체는 탱크상면과 사면의 접합부에 충돌 후 상승하는 수직성분의 운동은 소실되고 반대편 방향으로 수평운동을 하면서 중력에 의해 자유수면에 낙하는 것을 Figs. 3 (b), (c), (d)와 (e)에서 관찰할 수 있다. Figs. 3(b)와 (c)를 통해  $\theta = 15^\circ$  와  $\theta = 30^\circ$  는 유사한 액체거동을 보이지만 챔퍼각도  $\theta = 30^\circ$  부터 각도가 증가할수록 탱크의 사면을 따라 상승하는 액체의 수평운동이 점점 크게 작용하는 것을 Figs. 3(c),(d)와 (e)의 비교를 통해 확인할 수 있다. 특히, 챔퍼각도  $\theta = 60^\circ$  일 때 사면을 따라 상승한 액체는 탱크상면과 사면의 접합부에 충돌한 후 수평운동에 의해서 반대편 벽면 가까이 유동하거나 또는 반대편 벽면에 충돌한다. 이는 전체적인 탱크 내부의 액체 거동의 불안정화 및 탱크의 진동을 유발시킬 가능성이 있을 것으로 판단되어진다.

Fig. 4 는 앞서 Fig. 1(b)에 도시한 P1 과 P2 의 압력 측정계에서의 액체 슬로싱에 기인되어진 충격압력을 나타내었다. Figs. 4(a)와 (b)에서는 앞선 Fig. 3 의 자유수면 거동변화에 대해 설명한 바와 같이 챔퍼형 탱크는 자유수면과 그 근방의 액체의 유동에 큰 영향을 미치지만 자유수면에서 멀리 떨어진 즉, 탱크의 바닥부근의 액체의 유동에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 P1 과 P2 에서 측정된 압력시계열들의 비교를 통해 확인할 수 있다. 즉, 사각탱크 및 챔퍼의 경사각과 관계없이 모든 탱크형상에 대해서 P1 과 P2 에서의 압력시계열의 크기 및 변화양상이 거의 동일한 것을 확인할 수 있다. 하지만 사각탱크의 충격압력이 나머지 챔퍼형 탱크들의 충격압력 보다 다소 낮은 것을 Fig. 4 의 자세한 관찰을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 5 는 액체 슬로싱에 기인되어진 사면의 충격압력을 관찰하기 위해 Fig. 1(b)에 도시한 P3, P4, P5 와 P6 의 압력측정값을 나타내었다.

먼저  $\theta = 0^\circ$  와  $\theta = 15^\circ$  에서 작용하는 압력시계열 양상이 나머지 Case 들과 다른 것을 확인할 수 있다. 특히 탱크상면과 사면의 접합부에 위치한 P6 에 액체의 충격이 가해질 때 동일시간에  $\theta = 0^\circ$  와  $\theta = 15^\circ$  의 P3, P4 와 P5 의 충격압력이 크게 상승하는 것을 Fig. 5 를 통해 확인할 수 있

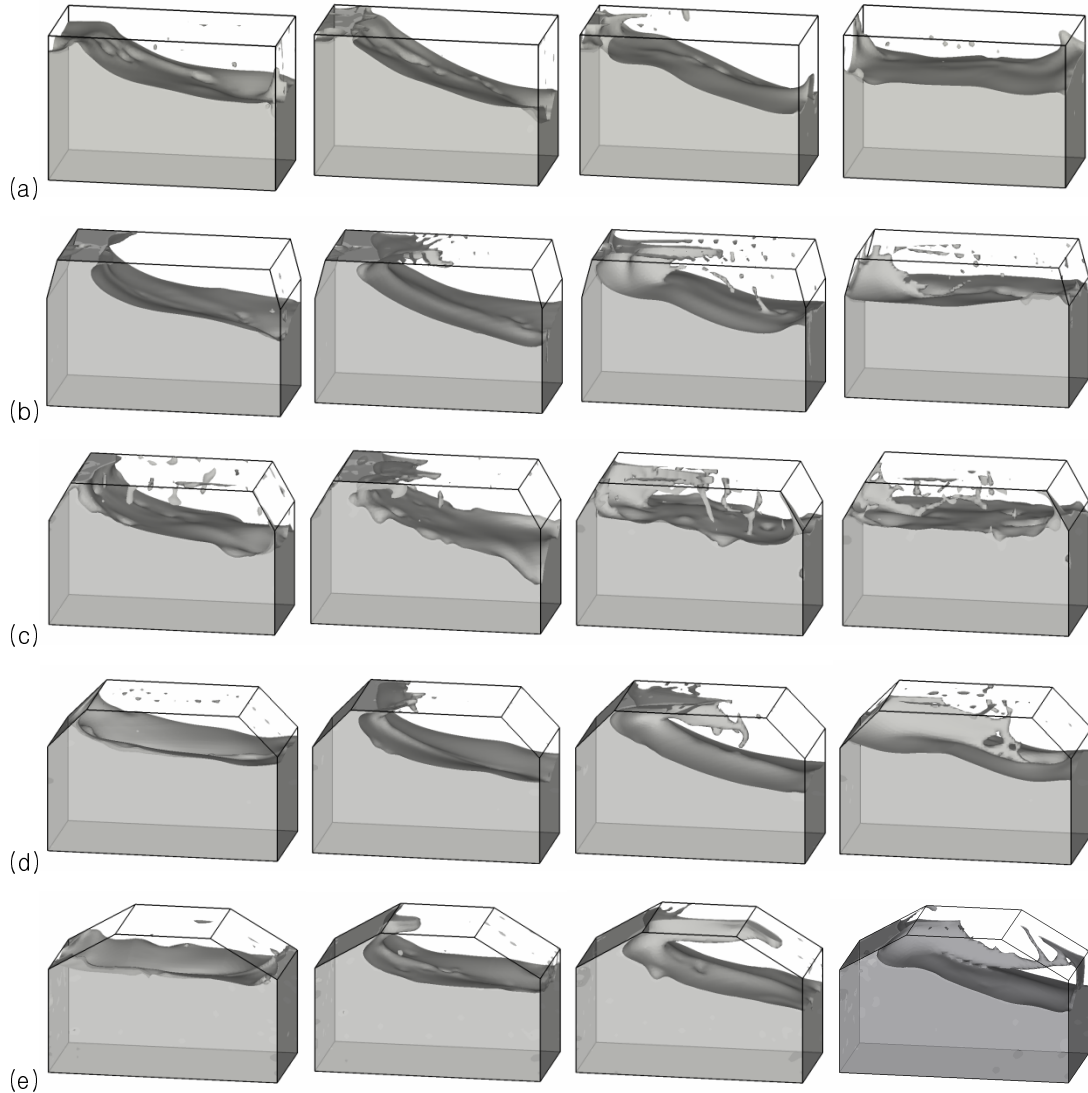


Fig. 3 Effects on the chamfered tank on the fluid behavior inside a tank (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 15^\circ$ , (c)  $\theta = 30^\circ$ , (d)  $\theta = 45^\circ$  and (e)  $\theta = 60^\circ$

으며 압력 측정계의 위치가 탱크상면에 가까울수록 더 높은 충격압력을 가진다. 이것은 수직성분 운동에 큰 제한을 받지 않는 액체가 벽면을 따라 상승하여 탱크 상면과 사면의 접합부에 높은 충격을 가함으로써 사면 전체에 충격하중의 영향을 미치는 것으로 해석되어진다. 그러나  $\theta = 30^\circ$  이상의 case 들에 대해서는 이러한 현상이 관찰되어지지

않는다.

탱크 좌측 수직면과 사면의 접합부에 위치하는 P3 은 앞서 언급되어진  $\theta = 0^\circ$  와  $\theta = 15^\circ$  에서 탱크상면과 사면의 접합부에 위치한 P6 에 액체의 충격이 가해질 때 동일시간에 크게 상승하는 P3 의 충격압력 값을 제외하고 챔퍼각도가 커지면 충격압력은 다소 상승하는 것을 Fig. 5(a)를 통해 확

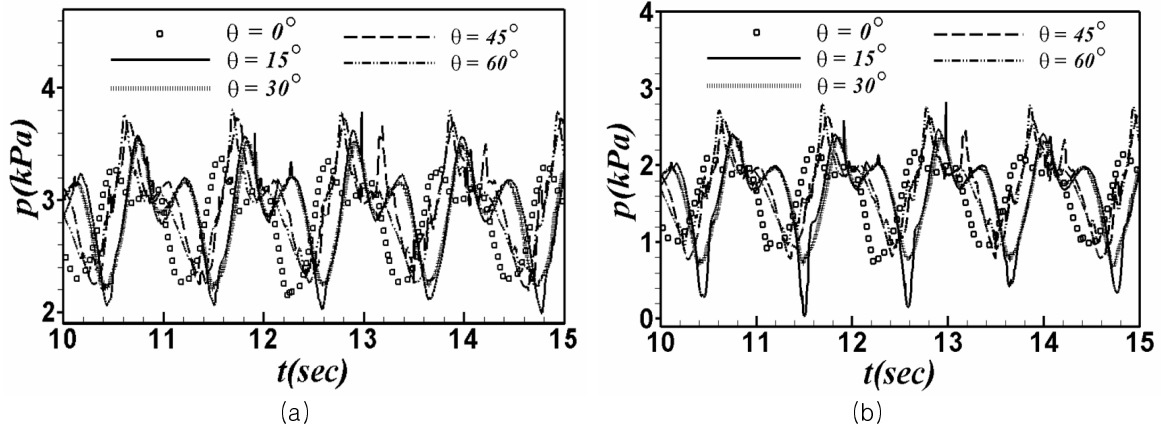


Fig. 4 Time histories of pressure at (a) P1 and (b) P2

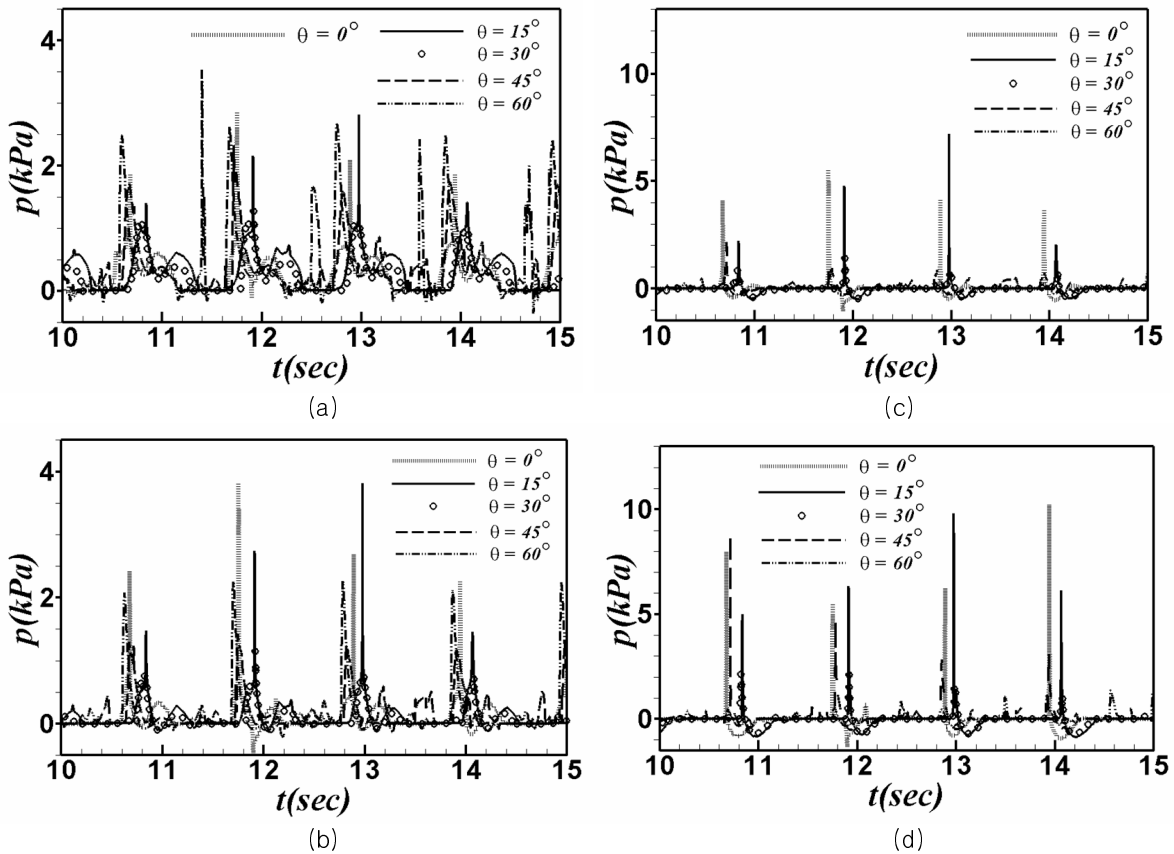


Fig. 5 Time histories of pressure at (a) P3, (b) P4, (c) P5 and (d) P6

인할 수 있다. 이러한 이유로는 챔퍼가 없는 사각 탱크의 경우 탱크의 좌, 우 병진운동이 액체의 좌

우 운동을 유발하게 되고 이로 인해 먼저 액체는 탱크의 좌, 우측 수직면들에 충격하중을 가한 후

좌, 우측 수직면을 따라 수직 상승하여 탱크상면에 큰 충격하중을 가한다. 하지만, 챔퍼각도가 증가할수록, 사면은 더욱 수평방향으로 기울어지기 때문에 액체의 수직방향 운동량은 더욱 더 제한되어진다. 제한되어진 수직방향 운동량은 사면에 충격하중으로 전달되기에 챔퍼각도가 클수록, 좌측 수직면과 탱크의 사면의 접합부에 더 큰 충격하중을 가하는 것으로 해석되어진다.

P4 와 P5 의 충격압력은  $\theta=0^\circ$  와  $\theta=15^\circ$  를 제외하고 P3 의 충격압력보다 전반적으로 낮은 것을 확인할 수 있으며 챔퍼각도가 클수록 사면을 따라 상승하는 액체의 충격압력은 액체가 탱크상면에 가까워질수록 상대적으로 더 크게 감소하는 것을 Figs. 5(a), (b)와 (c)를 통해 관찰할 수 있다. 이러한 이유로는 챔퍼각도가 커질수록 사면이 더욱 수평에 가까워짐에 따라 액체가 벽면에 충격을 가할 때 좌측의 수직면뿐만 아니라 동시에 충격하중을 받는 사면의 영역도 증가하게 된다. 이로 인해, 액체가 좌측 수직면과 사면의 접합부에 가하는 압력은 챔퍼의 각도가 증가할수록 커지는 것을 Fig. 5(a)를 통해 확인할 수가 있다. 즉, 챔퍼의 각도가 클수록, 사면을 따라 액체가 상승하기 시작하는 지점에서부터 이미 액체의 운동량의 손실이 더욱 증가하게 됨을 의미한다. 이러한 압력저항에 의한 운동량의 손실에 추가적으로, 사면과 액체 간의 마찰력 또한 액체의 운동량 손실에 기여하게 된다. 사면을 따라 상승하는 사면 근처 액체의 유동방향은 사면의 접선방향과 거의 동일하다. 이에 따라 액체의 운동량은 사면에 대한 액체의 접선방향의 속도구배에 해당하는 마찰력으로 전달되어 사면의 면적이 넓어질수록 마찰저항은 증가하게 된다. 이것은 Fig. 6 의 사면에 대해 평균화 되어진 전단응력을 통해 확인할 수 있다. 따라서 챔퍼각도가 증가할수록 사면의 수평화에 의한 압력저항 증가와 사면의 면적이 넓어짐에 따른 마찰저항의 증가가 탱크벽면을 따라 상승하는 액체의 운동량 손실을 초래하여 사면을 따라 상승하는 액체의 충격하중이 더 크게 감소하는 것으로 판단되어진다.

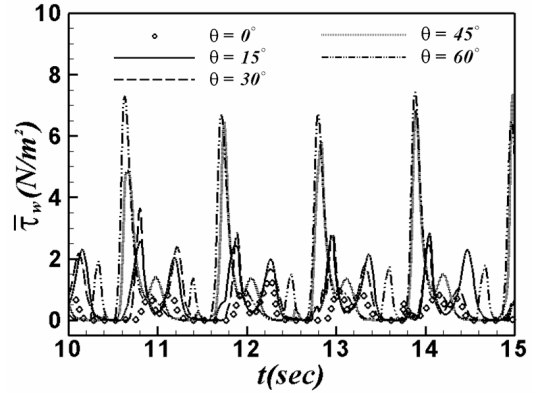


Fig. 6 Variation of averaged shear-stress on chamfered side with according to  $\theta$

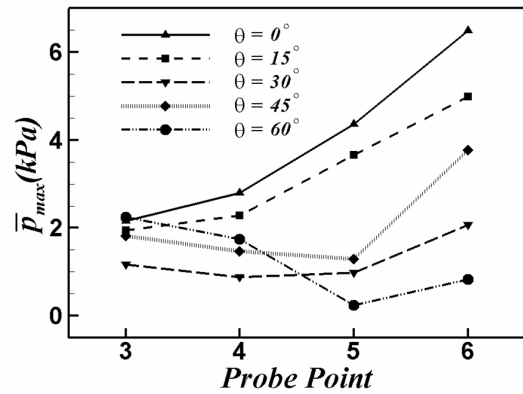


Fig. 7 Variation of averaged maximum pressure on chamfered side with according to  $\theta$

Fig. 5(d)에서는 챔퍼각도에 따른 탱크 상면과 사면의 접합부에 놓여있는 P6 의 충격압력들이 P5 의 충격압력들에 비해 다소 상승한 것을 확인할 수 있다. 이는 탱크상면과 사면의 접합부에 액체가 충돌할 때 사면에 대한 액체의 접선방향 및 법선방향 운동량이 탱크상면에 의해 제한되면서 액체 운동량의 변화량이 증가되어 탱크상면과 사면의 접합부에 작용하는 액체의 충격하중이 상승하는 것으로 해석되어진다.

Fig. 7 은 Fig. 5 에 나타난 압력시계열이 불규칙하므로 통계처리를 통한 정량적인 비교를 위해 압력 측정계의 각 위치별로 한주기 동안 가지는 최대값의 평균 값( $\bar{P}_{max}$ )들을 챔퍼각도 변화에 따라

나타내었다.  $\theta=0^\circ$  일 때 P6 에서 최대  $\bar{P}_{\max}$  값을 보이는 이유는 챔퍼형 탱크의 경우 액체가 사면을 따라 상승할 때 사면화로 인해 수직방향 운동에 제한을 받지만  $\theta=0^\circ$  의 경우 수직방향 운동의 제한을 받지 않으므로 가장 적은 운동량 손실로 P6 에 액체의 충격을 가하기 때문에 최대  $\bar{P}_{\max}$  를 가지는 것으로 해석되어진다.

$\theta=0^\circ$  와  $\theta=15^\circ$  인 경우, Fig. 5 를 통해 설명되어진 바와 같이 P6 에 액체의 충격이 가해질 때 동일시간에 P3, P4 와 P5 의 충격압력이 크게 상승하고 압력 측정계의 위치가 탱크상면에 가까워질수록 더 높은 충격압력을 가지게 되므로 Fig. 7 과 같은 경향을 가지는 것으로 판단되어진다. 그러나  $\theta=30^\circ$  이상부터는 이러한 경향을 가지지 않는 것을 확인할 수 있다.

$\theta=45^\circ$ ,  $\theta=60^\circ$  의 경우 사면을 따라 상승하는 액체의 충격압력이 탱크상면에 가까워질수록 감소하는 것을 확인할 수 있으며 특히  $\theta=60^\circ$  는 다른 챔퍼각도에 비해 큰 폭으로 충격압력이 감소한다. 이는 상대적으로 다른 case 들에 비해 가장 많은 액체의 수직운동의 제한을 가질 뿐만 아니라 가장 넓은 사면의 면적을 가지기 때문에 액체의 운동량 손실이 가장 큰 것으로 판단되어진다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 3 차원 사각 탱크의 챔퍼각도에 따른 슬로싱 특성을 수치해석을 통하여 연구하였다. 계산결과에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 본 연구의 계산결과를 선행연구 결과와 비교하였으며 본 연구의 압력 값의 크기 및 압력시계열의 주기와 진폭 등이 선행연구 결과와 잘 일치함을 확인하였다.

또 챔퍼각도 변화가 슬로싱 저감에 미치는 영향을 관찰하기 위해서 동일한 높이( $h_c=0.135m$ )에서 챔퍼각도( $\theta$ )를  $0^\circ$ 에서  $60^\circ$ 까지  $15^\circ$ 씩 증가시켜 서로 다른 5 가지의 탱크 형상들을 고려하였다. 따라서 3 차원 사각탱크와 챔퍼형 탱크들의 슬로싱 특성을 비교하여 다음과 같은 결론을 도출했다.

(1) 챔퍼형 탱크는 자유수면과 그 근방의 액체의 유동에 큰 영향을 미치지만 자유수면에서 멀리 떨어진 즉, 탱크상면과 먼 탱크의 바닥부근의 액체의 유동에는 큰 영향을 미치지 않는다.

(2) 탱크 좌측 수직면과 사면의 접합부에 위치한 압력 측정계에서 챔퍼각도가 증가하면 충격압력도 전반적으로 다소 증가하는 경향을 보인다.

(3)  $\theta=0^\circ$  와  $\theta=15^\circ$  에서 탱크상면과 사면의 접합부에 액체의 충격이 가해질 때 동일시간에 사면의 충격압력이 전체적으로 상승한다. 그러나  $\theta=30^\circ$  이상부터는 이러한 현상이 관찰되어지지 않는다.

(4) 챔퍼각도가 증가할수록 사면의 수평화에 의한 압력저항 증가와 사면의 면적이 넓어짐에 따른 마찰저항의 증가가 벽면을 따라 상승하는 액체의 운동량 손실을 증가시키게 된다.

(5)  $\theta=60^\circ$  에서 액체가 사면을 따라 상승하여 탱크 상면에 충돌한 후 생성되는 제트유동은 자유낙하를 하면서 자유수면에 충격을 주어 탱크 내부의 액체 거동의 불안정화 및 이로 인한, 탱크의 진동을 유발시킬 가능성이 있을 것으로 판단되어진다.

이상의 결과로부터 챔퍼형 탱크의 경우, 최소의 충격압력을 가지며 액체운동을 안정화시킬 수 있는 임계 챔퍼각도가 존재 할 것으로 추정되어진다. 따라서 임계 챔퍼각도를 추정하기 위해서는 챔퍼각도를 더 세분화 시키고 사면의 기울기와 넓이의 변화에 따른 운동량 변화에 수반되는 압력저항 및 마찰저항의 분석을 통해 슬로싱 특성 연구가 진행되어져야 할 것으로 사료되어진다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- Arai, M, Cheng, L.Y. and Inoue, Y., 1994,



- “ 3D numerical simulation of impact load due to liquid cargo sloshing,” J. of the Society of Naval Architecture of Japan. 171, pp. 177–184.
- 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.
  - 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.
  - 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.
  - 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 hydroelastic effects,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea Vol. 35, No. 4, pp. 27–37.
  - Noh, B. J., 2005, “ Sloshing load analysis in spherical tank of LNG carrier,” Special issue of the Society of Naval Architects of Korea. pp. 22–30.
  - 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.
  - Rhee, S.Y., 2005, “ Unstructured grid based reynolds-averaged navier-stokes method for liquid tank sloshing,” ASME, Vol. 127, pp. 572–582.
  - Kim, Y.H., Shin, Y.S. and Lee, K.H., 2004, “ Numerical study on slosh-induced impact pressures on three-dimensional prismatic tanks,” Applied Ocean Research No. 26 pp. 213–226.
  - 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.
  - Abramson, R.L., Bass. R.L., Faltinsen O.M., and Olsen, H.A., 1974, “ Liquid sloshing in LNG carriers,” Proceedings of the 10th symposium of naval hydrodynamics, pp. 371– 88.
  - Fluent Inc., 2006, Fluent 6.3.26 User Guide Manual , Fluent Inc., Levanon.



&lt;정재환&gt;



&lt;이창열&gt;



&lt;윤현식&gt;