판형 및 다공형 배플을 포함한 탱크 내 슬로싱에 대한 유동해석

이 상 혁,[1] 허 남 건*[2]

A NUMERICAL ANALYSIS OF THE SLOSHING IN A TANK WITH PLATE/POROUS BAFFLES

Sang Hyuk Lee[1] and Nahmkeon Hur*[2]

In the present study, a numerical analysis on the sloshing in a tank with the harmonic motion was investigated. A VOF method was used for two-phase flows inside the sloshing tank and a source term of the momentum equation was applied for the harmonic motion. This numerical method was verified by comparing its results with the available experimental data. The sloshing in a tank causes the instability of the fluid flows and the fluctuation of the impact pressure on the tank. By these phenomena of the tank sloshing, the sloshing problems such as the failure and the noise of system can be generated. For the reduction of these sloshing problems, the various baffles such as the horizontal/vertical plate baffles and the porous baffles inside the tank are installed. With the installations of these baffles, the characteristics of the liquid behavior in the sloshing tank, the impact pressure on the wall, the amplitude of the free surface near the wall and the sloshing noise were numerically analyzed.

Key Words : 슬로싱(Sloshing), 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics), 이상유동(Two-phase Flow), 자유표면(Free Surface), VOF방법(Volume-Of-Fluid Method), 배플(Baffle), 다공성물질(Porous Medium)

1. 서 론

자동차, 항공기, 우주선의 연료탱크와 선박의 화물저장고 등과 같이 유체를 포함하는 저장 및 운반용기의 거동으로 인한 가진 및 진동과 같은 운동에너지는 내부 유체의 출렁거림 즉 슬로싱(Sloshing) 현상을 가져온다. 이러한 저장 및 운반용기 내 슬로싱은 구조물의 움직임을 제어하기 힘들게 하여 구조물의 전복과 파손 등을 초래할 수 있으며, 시스템에 가해지는 충격력에 의한 진동 및 소음 등을 야기할 수 있다. 이와 같은 슬로싱으로 인한 시스템의 안전과 진동 소음 문제를 해결하기 위하여 다양한 연구들이 진행되고 있다.

슬로싱으로 인한 불안정성을 해소하기 위한 시스템의 전반적인 특성 분석을 위한 연구들이 수행되었다. 박성호 등[1]은 연료탱크의 슬로싱에 의한 진동 및 소음 특성 분석을 위한 실험 및 진동해석을 하였다. 또한, 유준태 등[2]은 연료탱크 시스템에 대해 간단한 질량-스프링 모델로 해석하여 슬로싱의 특성을 분석하고 최적 배플을 설계하였다. 이와 같이 슬로싱으로 인한 시스템에 미치는 영향을 분석하고 있다.

이와 같은 슬로싱으로 인한 문제는 구조물 내 유체의 움직임으로 인한 구조물과의 상호작용에 의해 다양한 동적 특성이 나타나게 된다. 따라서, 구조물 내 유체의 거동에 대한 많은 연구들이 진행되었다. 윤성호 등[3]은 원통 구조물, Hinatsu 등[4]과 Panigrahy 등[5]는 육면체 구조물 내 슬로싱 현상으로 인한 유체의 거동 특성을 분석하였다. 실험적 연구뿐만 아니라 거동 특성 분석을 위한 수치해석적 연구도 수행되었다. 슬로싱 현상에 의한 특성을 수치해석하기 위해서는 유체의 거동으로 인한 자유표면을 포함한 이상유동을 해석하는 방법이 중요하다. 따라서, 다양한 이상유동 해석 방법을 사용한 슬로싱 현상이 해석되었다. 김민수 등[6]과 명현국과 김종은[7], 김윤호 등[8]은 VOF 방법을, 이정민 등[9], 최형권[10]은 Level Set 방법을 사용하였다. 그러나 이러한 연구들은 육면체의 단순한 형태의 구조물 내 특정 슬로싱 조건 및 해당 위치에 배플 설치에 따른 해석 기법의 검증 및 현상 해석이 이루어지고 있으며, 이와 같은 단순한 형태의 구조물뿐만 아니라, Roh 등[11]과 Wiesche[12]는 자동차용 연료탱크를 모델링하여 급제동시 발생하는 슬로싱 현상에 대해 분석하였다. 이로부터, 슬

1 학생회원, 서강대학교 대학원
2 종신회원, 서강대학교 기계공학과
* Corresponding author, E-mail: nhur@sogang.ac.kr

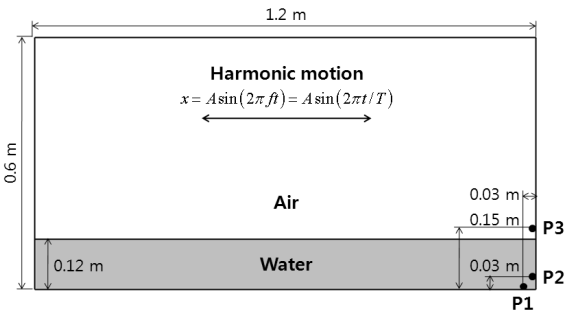


Fig. 1 Geometry of the tank with position for monitoring the impact pressure

로싱을 줄이는 연료탱크 설계에 기본 자료를 구축하였다.

본 연구에서는 육면체 형태의 탱크 내 병진운동으로 인한 슬로싱 현상에 대한 2차원 수치해석을 수행하였다. 기존의 실험 결과와 비교함으로써 해석의 타당성을 검증하였으며, 이를 통해 슬로싱 현상을 감소시키기 위한 판형 및 다공형 배플의 설치될 경우, 탱크 내 상경계면의 거동, 벽면에 충격 압력, 벽면에서 상경계면의 도달 높이 및 슬로싱 소음 특성에 대해 분석하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 탱크 내 슬로싱 현상에 대한 유동 해석을 수행하기 위하여, 상용 CFD 프로그램인 STAR-CD[13]를 사용하였다. 비압축성 유동 해석을 위한 연속 및 운동량 방정식은

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho U_k) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\rho U_i U_k - (\mu+\mu_t)\frac{\partial U_i}{\partial x_k}\right] = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + f_{\sigma,i} + \rho g_i + S_i \tag{2}$$

와 같다. 여기서, U_i는 i방향 속도를, P는 압력, g_i는 중력가속도, $f_{\sigma,i}$는 표면장력, S_i는 운동량 생성항을 나타낸다. 이 때, 이상유동 특성을 갖는 슬로싱 현상을 해석하기 위하여 해석격자 내 유체의 물성치인 밀도ρ와 점성 μ를

$$\rho = \rho_g(1-\alpha) + \rho_l\alpha \tag{3}$$

$$\mu = \mu_g(1-\alpha) + \mu_l\alpha \tag{4}$$

와 같이 구하였다. 이 때, 유체의 물성치는 해당 격자 내 기체와 액체의 체적비 α에 의해 결정된다. 0과 1 사이의 값을 갖는 체적비 α는

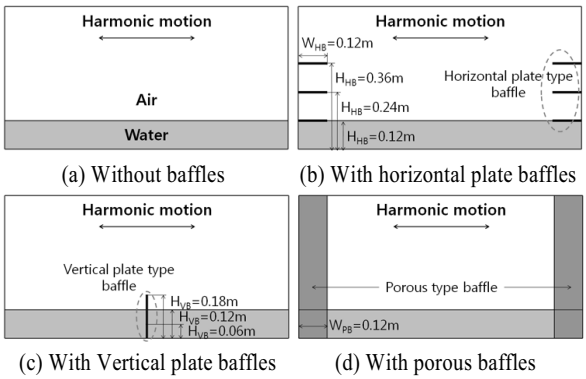


Fig. 2 Geometry of tank with various types of baffles

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\alpha u_k) = 0 \tag{5}$$

와 같은 스칼라 이류방정식 형태의 지배방정식에 의해 결정된다. 체적비에 대한 계산에 있어 본 연구에서 사용한 유동해석 코드는 상경계면의 정확한 예측을 위한 고차 이산화 방법인 CICSAM (Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes) 기법[14]을 사용하고 있다.

2.2 탱크 슬로싱

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 탱크 내 유체의 거동에 대해 2차원 해석을 수행하였다. 탱크의 형상은 가로 L=1.2m, 세로 H=0.6m인 사각 형태이며, 초기의 탱크 내 높이 h=0.2H에 해당하는 위치에 Fig. 1과 같이 액체가 위치하고 있다. 이 때, 기체는 공기, 액체는 물에 대한 물성치를 사용하였다.

초기 탱크 내 물은 중력에 의해 아래쪽에 평형상태로 존재하게 되며, 본 연구에서는 사각탱크가 아래 식과 같은 Sine 함수 형태로 좌우로 병진운동(Harmonic motion)을 하게 된다.

$$x = Asin(2\pi ft) = Asin(2\pi t/T) \tag{6}$$

여기서, A는 병진운동의 진폭, f는 병진운동의 주파수, T는 병진운동의 주기를 나타낸다. 이와 같은 병진운동을 고정격자계를 사용하여 해석하기 위하여, 절대좌표계에 대해 탱크 내부에 위치하는 비관성좌표계가 움직이는 것으로 처리하여 식(2)의 운동량 방정식에 생성항을 추가하였다. 이 때, 운동량 방정식의 생성항은 비관성좌표계의 병진운동에 따른 가속도에 의해

$$\begin{aligned} S_x = \rho a_x &= -\rho A(2\pi f)^2\sin(2\pi ft) \\ &= -\rho A(2\pi/T)^2\sin(2\pi t/T) \end{aligned} \tag{7}$$

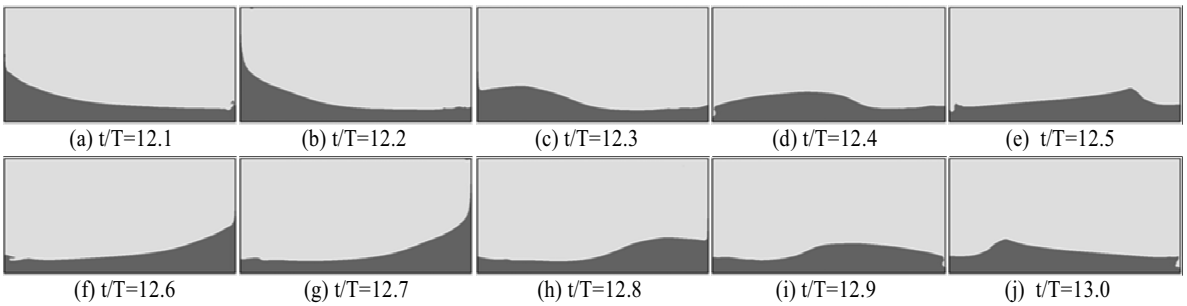


Fig. 3 Fluid behavior inside a tank with the harmonic motion

와 같이 결정된다. 본 연구에서는 기존 실험 결과[4]와의 비교 및 해당 슬로싱 조건에서의 배플의 영향을 검토하기 위하여, 병진운동의 진폭 A=0.06m, 주기 T=1.74sec인 경우를 기본 해석 조건으로 설정하여 연구를 진행하였다.

2.3 탱크 내 배플 설치

병진운동을 하는 사각탱크 내 판형 및 다공형 배플이 설치에 따른 슬로싱 현상에 대한 특성을 분석하기 위해서, 본 연구에서는 Fig. 2(a)과 같은 기본 탱크 형상에 수평 판형, 수직 판형, 다공형 배플이 설치될 경우에 대해 해석을 수행하였다.

판형 배플의 경우, Fig. 2(b)의 수평 판형 및 Fig. 2(c)의 수직 판형 배플을 고려하였다. 판형 배플의 경우, 배플이 설치되는 해당 위치에 배플 격자를 생성함으로써 배플로 인한 슬로싱 특성을 검토하였다. 수평 판형은 탱크의 좌우 벽면에 폭이 W_{HB}=0.12m인 배플이 높이 H_{HB}=0.12, 0.24, 0.36m에 설치된 경우에 대해 해석하였으며, 수직 판형은 탱크 중앙에 배플의 높이 H_{VB}=0.06, 0.12, 0.18m로 설치된 경우에 대해 해석하였다.

다공형 배플의 경우, Fig. 2(d)와 같이 탱크의 좌우 벽면에 폭 W_{PB}=0.12m에 다공성 물질이 존재할 경우에 대해 알아보았다. 이 때, 다공성 물질의 특성은 기존 다공성 물질로 인한 압력 강하 특성을 표현하기 위한

$$\frac{\Delta P}{L}=\frac{150\mu(1-\epsilon)^2 U_s}{D_p^2\epsilon^3}+1.75\frac{1-\epsilon}{\epsilon^3}\frac{\rho U_s^2}{D_p} \tag{8}$$

와 같은 Ergun[15]에 의해 제안된 상관식을 사용하였다. 여기서, ΔP는 압력강하, L은 다공성 물질의 특성 길이, ϵ은 다공도, D_p는 다공성 물질 내 입자의 지름, U_s는 평균 속도를 나타낸다. 그러나 식 (8)의 압력 강하 특성은 단상의 유체가 다공성 물질을 통과할 경우에 대한 것이다. 본 연구에서의 슬로싱으로 인한 다공성 물질 내 유동 특성을 해석하기 위해서는 기체와 액체로 인한 다공성 물질 내 압력강하 특성이 고려되어야 한다. 따라서, 다공성 물질 내 압력강하 특성을 다음과 같이 해당 격자 내 체적비 α를 이용하여

$$\frac{dP}{\partial x_i}=(1-\alpha)\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_g+\alpha\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_l \tag{9}$$

와 같이 얻었다. 본 연구에서는 이와 같은 다공성 물질로 인한 슬로싱 현상을 분석하기 위하여, 다공도 ϵ=0.9인 경우에 입자의 지름 D_p=1mm, 2mm, 4mm일 때 특성을 해석하였다.

2.4 탱크 슬로싱으로 인한 소음

슬로싱으로 인한 탱크 내 유체의 거동은 양벽면에 충격을 가하게 된다. 이 때, 발생하는 충격량의 변화로 인해 소음이 발생하게 되며, 이와 같은 소음의 발생은 탱크 벽면에 작용하는 압력의 변동으로 인해 결정된다. 본 연구에서는 탱크 슬로싱으로 인한 소음의 특성을 분석하기 위하여, 탱크의 양벽면에서 시간에 따른 압력의 변동으로부터 다음과 같은 음압레벨 L_p (SPL, Sound Pressure Level) 값을 얻었다.

$$L_p[dB]=10\log\left(\frac{P^2}{P_{ref}^2}\right)=20\log\left(\frac{P}{P_{ref}}\right) \tag{10}$$

여기서, P는 벽면에서 평균 압력의 변동을 나타내며, P_{ref}는 기준 음압인 $2\times10^{-5}Pa$이다. 이와 같이 얻은 슬로싱에 의한 소음 특성을 주파수별 스펙트럼으로 변환하여 특성을 분석하였다.

3. 수치 해석 결과

3.1 탱크 슬로싱에 대한 특성 및 실험 결과와 비교

본 연구에서 수행한 Fig. 1과 같은 기본 사각탱크 형상 구조물의 병진운동으로 인한 유체의 움직임에 대한 해석을 수행하기 위하여, 160X320개의 격자를 생성하여 병진운동 주기당 4000steps에 해당하는 해석 시간간격을 설정하여 15번의

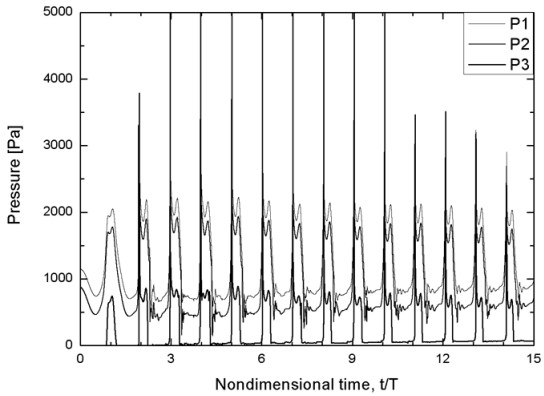


Fig. 4 Impact pressure of the tank sloshing at P1, P2 and P3 monitoring positions

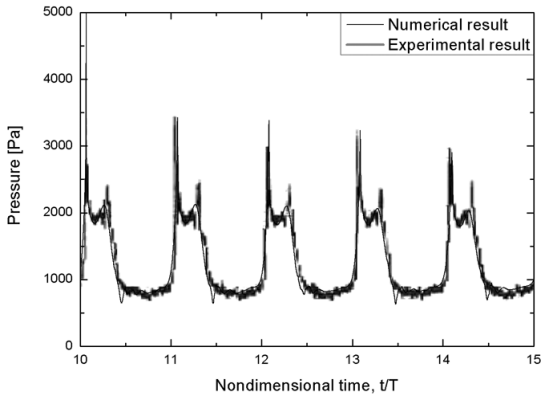


Fig. 5 Comparison of the numerical result with the experimental result[4] of impact pressure at P1 monitoring position

병진운동 주기에 대해 2.4GHz AMD Opteron 64bit 1CPU를 사용하여 약 4일의 계산을 수행하였다. 이와 같은 해석을 통해 Fig. 3과 같은 상경계면의 거동 특성을 얻었다. 탱크 내 상경계면의 거동 특성을 주기시간 T에 대해 무차원한 시간에 대해 표현하였다. 탱크의 병진운동으로 인해 내부 유체에 운동량이 전달되게 되며, 이로 인해 탱크의 주기적인 움직임에 따라 내부 유체도 주기적으로 좌우로 출렁거리게 된다.

탱크 내부 유체의 슬로싱 현상은 구조물의 양 벽면에 충격을 가하게 된다. 탱크에 가해지는 충격량을 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 탱크 내부 3개의 위치에서 압력을 시간에 따라 Fig. 4와 같이 측정하였다. 이를 보면, 위치별로 압력 변화 특성을 비슷하나 압력 값의 크기가 다른 것을 볼 수 있으며, 이는 특정 위치에서 액체의 정수력학적 특성으로 인해 차이가 발생하게 된다. 각각의 측정위치에서의 압력 값은 첫 번째 병진운동 주기에서는 액체의 좌우로 움직임이 충분히 발달하지 않았으며, 두 번째 주기부터는 비슷한 압력 특성을 보이게 된다. 이 때, 압력 값의 최고점은 병진운동이 진행됨에 따라 차

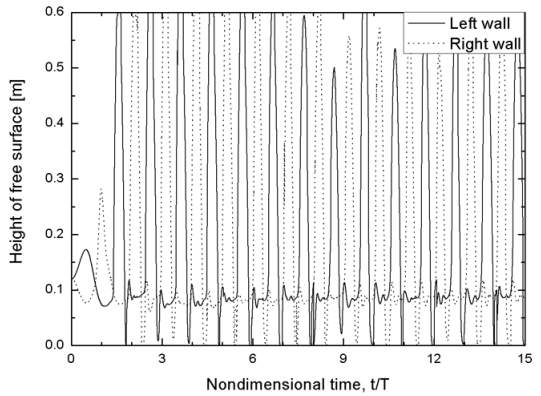


Fig. 6 Height of free surface at the left and right walls

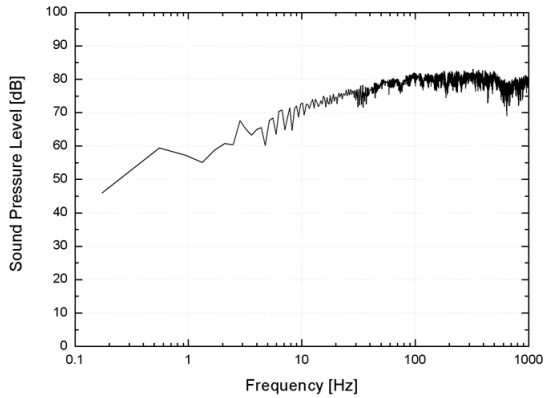


Fig. 7 SPL spectrum for the tank sloshing noise

이가 발생하며 이는 벽면과 충돌시 액체 내 기포 생성이나 출렁거리는 상경계면의 위치에 따라 차이가 발생하게 된다. 그러나 이와 같은 압력 값은 각 주기별로 두 번의 압력 값 상승을 가져온다. 이는 병진운동으로 인해 액체가 벽면에 처음으로 충돌할 때 가장 큰 압력 값 상승을 보이며, 이와 같이 충돌한 액체의 상경계면은 벽면을 타고 상승하고 중력의 영향 및 반대 방향으로 병진운동이 진행됨에 따라 아래 방향으로 내려오면서 바닥면과의 충돌로 인해 압력 값의 상승을 보이게 된다. 이 후, 반대 방향으로 액체가 움직일 때에는 압력이 거의 비슷한 값을 가지며 진동하게 된다.

이와 같은 탱크의 병진운동으로 인한 슬로싱 현상에 대한 해석 결과를 기존 실험 결과[4]와 Fig. 5와 같이 비교하였다. Fig. 1의 탱크 내 압력 측정 위치 중 P1에서 압력 변동이 거의 일정한 값을 가지는 병진운동 주기 10회 이후의 압력 결과를 비교하였다. 이를 보면, 기존 실험 결과와 거의 비슷한 압력 변동 경향 및 압력 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 기본 해석을 위한 해석 조건을 사용하여 다양한 배플 사용에 따른 해석을 수행하였다.

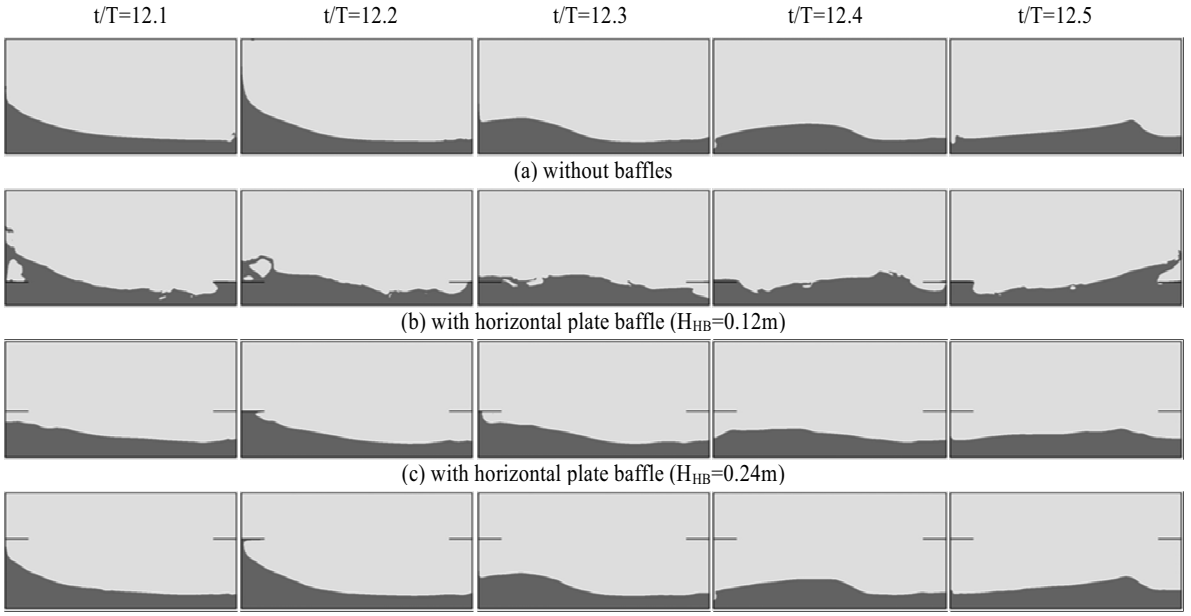
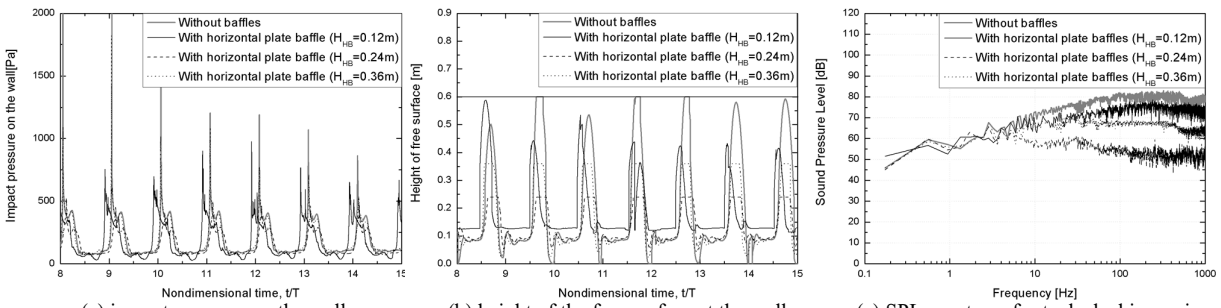


Fig. 8 Effects of the horizontal plate baffle on the fluid behavior inside a tank with the harmonic motion



(a) impact pressure on the wall (b) height of the free surface at the wall (c) SPL spectrum for tank sloshing noise

Fig. 9 Characteristics of tank sloshing with installation of various horizontal plate baffles

본 연구에서는 탱크의 슬로싱으로 인한 벽면에 가하는 압력 값의 변화로부터 슬로싱 소음의 특성을 식(10)과 같이 음압레벨로 환산하여 주파수에 따라 분석하였다. 배플의 사용되지 않은 기본 형상의 탱크의 병진운동에서 슬로싱 소음의 음압레벨 스펙트럼은 Fig. 7과 같이 얻을 수 있었다. 이를 보면, 가청 주파수인 100Hz 이상에서 80dB 정도의 소음이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 슬로싱 소음을 감소시키기 위해서는 100Hz 이상에서의 음압레벨을 감소시킬 필요가 있다.

3.2 수평 판형 배플 설치로 인한 슬로싱 현상

본 연구에서는 탱크의 병진운동에 의한 슬로싱 소음을 감소시키기 위하여 수평수직 판형 배플 및 다공형 배플을 사용하였다. Fig. 2(b)와 같이 폭(W_{HB})이 0.12m인 판형 배플이 높이(H_{HB}) 0.12m, 0.24m, 0.36m에 설치될 경우 탱크 내 액체의 거동에 대해 Fig. 8과 같이 얻을 수 있었다. 기존 해석 결과와 같이 탱크의 병진운동으로 인해 내부 액체는 좌우로 출렁거리게 된다. 그러나 벽면의 특정 위치에 설치된 수평 배플의 영향으로 액체의 거동 특성이 달라지게 된다. 수평 배플이 0.12m에 설치될 경우, 배플로 인해 액체 내 기포의 발생이나 액체 거동 특성의 변화를 초래하지만 기본 해석 결과와 비교하여 벽면에서의 액체 도달 높이가 거의 비슷하며 내부 유체의 유동 불안정성이 큰 것을 볼 수 있다. 그러나 0.24m에 수평 배플이 설치될 경우에는 내부 액체가 충돌 후 상승하려는 것을 방해하는 것을 볼 수 있으며, 0.36m에 수평 배플이 설치될 경우에는 배플의 설치되지 않은 기본 해석 결과에서의 거동과 일치하는 것을 볼 수 있다.

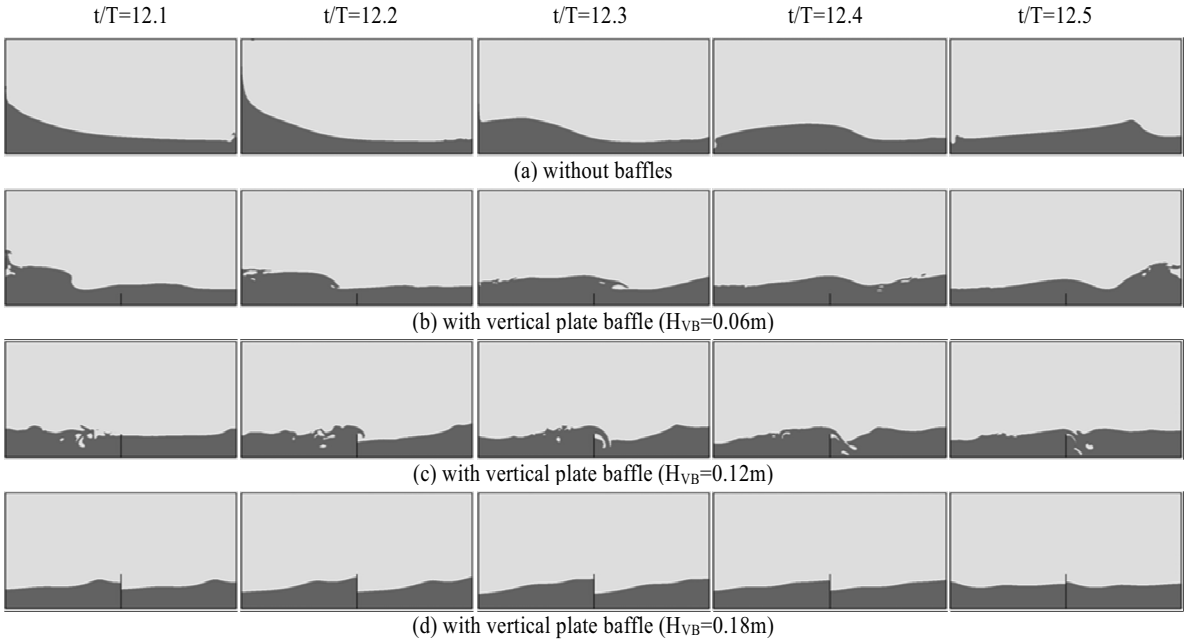
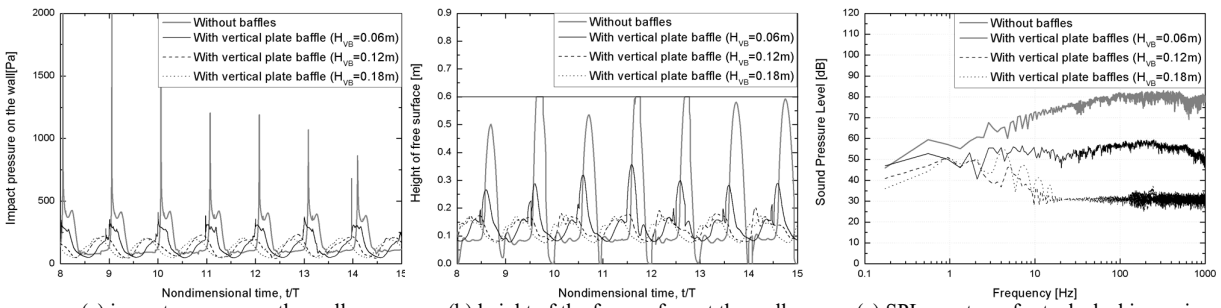


Fig. 10 Effects of the vertical plate baffle on the fluid behavior inside a tank with the harmonic motion



(a) impact pressure on the wall (b) height of the free surface at the wall (c) SPL spectrum for tank sloshing noise

Fig. 11 Characteristics of tank sloshing with installation of various vertical plate baffles

이와 같은 탱크 내 액체의 거동 특성으로 인해 벽면에 가해지는 평균 충돌 압력(Fig. 9(a)) 및 벽면에서 상경계면의 도달 높이(Fig. 9(b))가 결정된다. 수평 배플이 0.12m와 0.36m에 설치될 경우 탱크 내 충돌 압력 및 상경계면의 도달 높이와 같은 슬로싱 특성은 거의 비슷한 것을 볼 수 있으며 0.24m에 설치될 경우 벽면에서 액체의 거동을 방해함으로써 충돌 압력 및 벽면에서 상경계면의 상승을 감소시키는 결과를 보였다. 이와 같은 압력 변동 특성으로부터 Fig. 9(c)와 같은 슬로싱 소음의 음압레벨 특성을 얻을 수 있었다. 이를 보면, 수평 판형 배플의 설치는 기본 형상에서의 슬로싱 소음을 감소시켰으며, 탱크 내 슬로싱을 가장 많이 감소시킨 0.24m에 수평 배플이 설치될 경우 슬로싱 소음의 감소도 가장 많이 일어났으며, 100Hz 이상에서 50dB 정도의 음압레벨 특성을 갖는다.

3.3 수직 판형 배플 설치로 인한 슬로싱 현상

슬로싱 현상을 감소시키기 위한 수평 판형 배플 설치와 더불어, 탱크 중앙에 배플 높이(H_{VB}) 0.06m, 0.12m, 0.18m의 수직 판형 배플 설치에 따른 슬로싱 특성을 분석하였다. Fig. 10은 수직 판형 배플이 설치될 경우에 병진운동하는 탱크 내 액체의 거동을 보여주고 있다. 탱크 중앙에 설치된 수직 판형 배플은 병진운동으로 인해 탱크 내 좌우로 거동하는 액체의 거동을 방해함으로써, 양 벽면에 가해지는 충돌 에너지를 감소시키게 된다. 또한, 수직 판형 배플의 높이가 증가할수록 내부 액체의 거동을 더 많이 방해하게 되어 충돌시 작용하는 압력을 감소시킬 것을 예상할 수 있다. 또한 0.18m의 수직 판형 배플이 설치될 경우, 배플의 양쪽에서 슬로싱 현상이 각각 발생하게 된다.

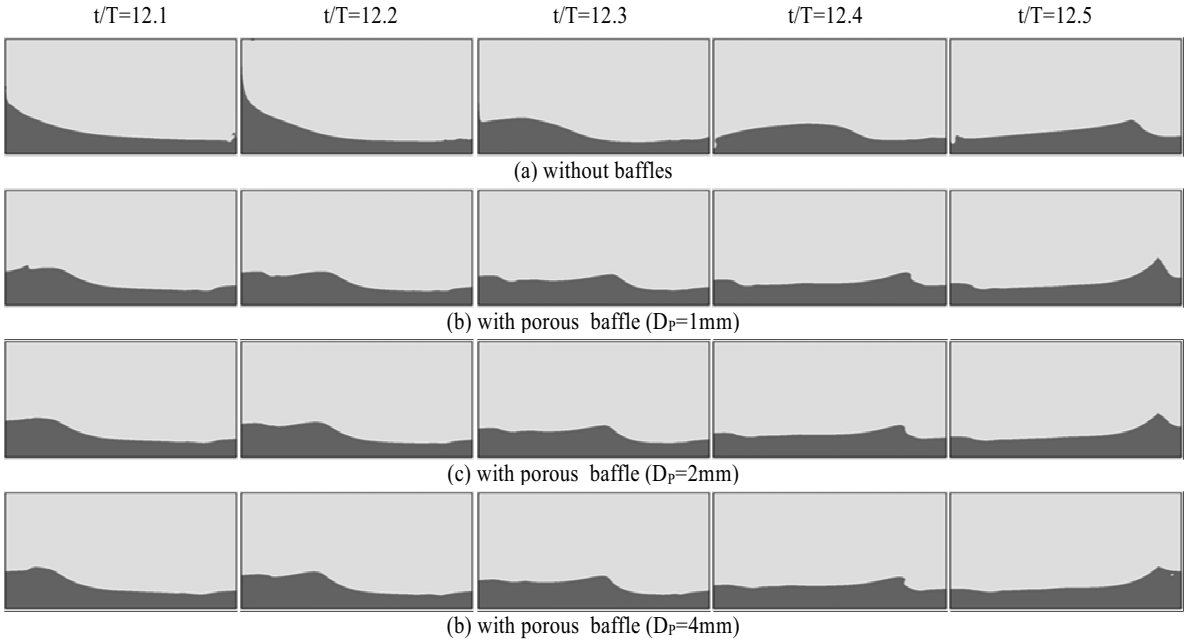
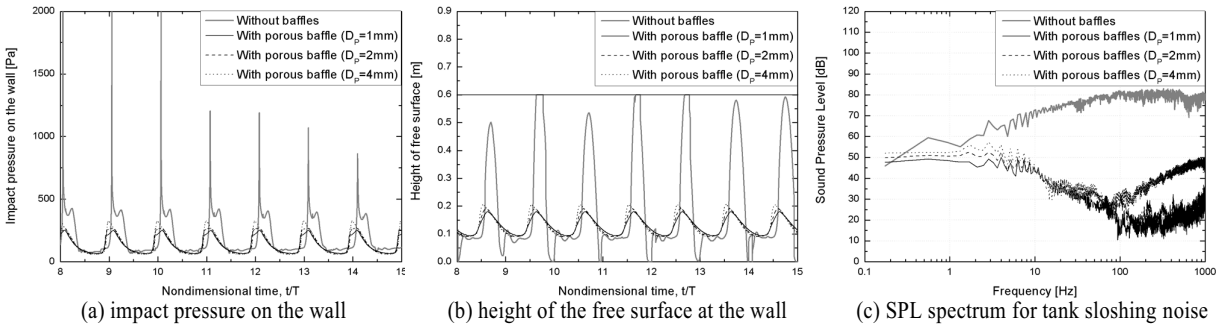


Fig. 12 Effects of the porous baffle on the fluid behavior inside a tank with the harmonic motion



(a) impact pressure on the wall (b) height of the free surface at the wall (c) SPL spectrum for tank sloshing noise

Fig. 13 Characteristics of tank sloshing with installation of various porous baffles

이와 같은 탱크 내 액체의 거동특성으로 인해 Fig. 11과 같은 탱크의 슬로싱 특성을 갖게 된다. 이를 보면, 0.06m 높이의 수직 판형 배플이 설치될 경우에는 탱크 내 액체의 거동을 방해함으로써 양벽면에 가해지는 충돌 에너지의 감소를 가져오게 되어, 벽면에서의 평균 충돌 압력(Fig. 11(a)) 및 상경계면의 도달 높이(Fig. 11(b))를 기본 해석 값보다 감소시킨다. 또한, 수직 판형 배플의 높이를 증가시킨 0.12m와 0.18m의 결과에서는 배플을 중심으로 양쪽에서 슬로싱 현상이 각각 발생하게 되며, 이로 인해 벽면에서 충돌 압력 및 상경계면 높이가 급격히 변화하지 않게 되었다. 이와 같은 슬로싱 현상 특성으로 인해, Fig. 11(c)와 같은 슬로싱 소음의 음압레벨 특성을 얻었다. 이를 보면, 본 연구에서 설치한 수직 배플이 수평 배플 설치보다 더 많은 소음을 감소시키게 되었으며, 높이 0.12m 및 0.18m의 수직 배플의 경우, 100Hz 이상의 주파수에서 30dB 근처로 슬로싱 소음을 감소시켰다.

3.4 다공형 배플 설치로 인한 슬로싱 현상

탱크의 슬로싱 현상 감소를 위해서, 탱크 내부에 판형 배플 뿐만 아니라 다공형 배플을 설치할 수 있다. 본 연구에서는 다공형 배플의 설치로 인한 특성 분석을 위해 식(8)과 (9)와 같은 다공성 물질 해석 방법을 적용하여 해석을 수행하였다. 탱크 양 벽면 근처에 폭(W_{PB}) 0.12m에 해당하는 부분에 입자 지름(D_P)이 1mm, 2mm, 4mm인 다공형 배플을 설치할 경우 슬로싱으로 인한 내부 유체의 거동을 Fig. 12와 같이 얻었다. 이를 보면, 양 벽면 주변에 설치된 다공형 배플이 유동저항으로 작용하여 액체의 거동을 방해하게 되며, 이와 같은

다공형 배플의 설치로 인한 유동 저항은 입자 지름이 작은 경우 더 크게 한다.

이와 같은 다공형 배플 설치로 인한 내부 액체의 거동 특성은 Fig. 13과 같은 슬로싱 특성을 가져온다. 다공형 배플로 인한 액체 거동에 작용하는 유동 저항은 Fig. 13(a)와 같이 액체가 출렁거리면서 벽면에 가하는 평균 충돌 압력의 감소를 가져온다. 또한, Fig. 13(b)와 같이 벽면에서 액체의 상승을 어렵게 하여 도달 높이도 감소시키게 된다. 이와 같은 다공형 배플 설치로 인한 벽면 주변에서의 저항은 Fig. 13(c)와 같이 슬로싱 소음 특성에도 변화를 가져온다. 배플이 설치되지 않은 기본 해석의 소음 특성에 비해100Hz 이상의 주파수 대역에서 급격하게 음압 레벨의 감소를 가져왔으며, 다공형 배플의 입자 지름이 1mm와 2mm의 경우에는 100Hz 이상에서 20dB 정도의 슬로싱 소음을 갖게 되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 탱크 내 슬로싱 현상에 대한 특성을 수치해석하였다. 탱크 내 유체의 이상유동 해석을 위하여 VOF 방법을 사용하였으며, 탱크의 병진운동을 구현하기 위하여 비관성 좌표계에서 가속도로부터 운동량 방정식의 생성항을 추가하였다. 이와 같은 탱크 슬로싱에 대한 해석을 기존 실험 결과와의 비교하여 거의 일치하는 결과를 얻었다. 탱크의 병진운동으로 인한 탱크 내부 액체의 거동은 벽면에 충돌 에너지를 가하게 되어, 탱크의 파손, 전복 및 소음과 같은 문제를 야기한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 탱크 내에 다양한 형상 및 형태의 배플이 설치되고 있다. 본 연구에서는 배플 격자를 생성하여 수평수직 판형 배플 및 다공성 물질 처리 기법을 적용하여 다공형 배플 설치에 따른 특성에 대한 수치해석을 수행하였다. 배플의 설치는 내부 액체의 거동과 더불어 벽면에 충돌 압력, 벽면에서 상경계면 도달 높이, 슬로싱 소음의 음압레벨 특성에 대한 변화를 초래하였다. 유체를 저장하고 이동하는 목적으로 설계되는 구조물에 있어, 이와 같은 탱크 내 판형 및 다공형 배플의 설치는 시스템의 파손, 전복 및 소음과 같은 문제점을 감소시킬 수 있다.

참고문헌

[1] 1998, 박성호, 송재수, 이종철, 고병식, 김성원, “연료탱크의 슬로싱 진동 및 소음에 관한 모델링 및 해석,” *한국자동차공학회 1998년도 춘계학술대회 논문집*, pp.563-568.

[2] 1999, 유준태, 연정흠, 연성기, “액체연료 탱크내부의 연로슬로싱 해석 및 최적 배플설계에 관한 연구,” *한국항공우주학회지*, 제27권, 제5호, pp.60-70.

[3] 2002, 윤성호, 박기진, 심국상, “액체연료탱크의 슬로싱 거동 평가기법,” *한국정밀공학회 2002년도 춘계학술대회 논문집*, pp.314-317.

[4] 2001, Hinatsu, M., Tsukada, Y., Fukusawa, R. and Tanaka, Y., "Experiments of Two-Phase Flows for the Joint Research," *Proceeding of SRI-TUHH Mini-Workshop on Numerical Simulation of Two-Phase Flows*, pp.12-19.

[5] 2009, Panigrahy, P.K., Saha, U.K. and Maity, D., "Experimental Studies on Sloshing Behavior due to Horizontal movement of liquids in baffled tanks," *Ocean Engineering*, Vol.36, No.3-4, pp.213-222.

[6] 2000, 김민수, 박종선, 이우일, “자유 표면이 존재하는 유체 유동 해석을 위한 VOF 방법 기반의 새로운 수치 기법 (II) -캐비티 충전 문제와 슬로싱 문제에의 응용-,” *대한기계학회논문집 B권*, 제24권, 제12호, pp.1570-1579.

[7] 2006, 명현국, 김종은, “경계면포착법에 의한 사각형 탱크 내의 2차원 충돌유동과 슬러싱에 관한 수치적 연구,” *대한기계학회 2006년도 추계학술대회 강연 및 논문 초록집*, pp.1-6.

[8] 2006, 김윤호, 김태균, 이규정, 홍사영, “3차원 저장탱크 내부에서의 슬로싱에 대한 전산해석 연구,” *대한기계학회 2006년도 춘계학술대회 강연 및 논문 초록집*, pp.1564-1569.

[9] 2008, 이정민, 윤현식, 전호환, “레벨셋법을 이용한 2차원 사각 탱크 내부의 슬로싱 충격압력에 관한 수치적 연구,” *한국해양환경공학회 2008년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집*, pp.1456-1156.

[10] 2008, 최형권, “최소자승법과 Level-set 방법을 이용한 3차원 슬로싱 유동의 수치해석” *대한기계학회 2008년도 추계학술대회 강연 및 논문 초록집*, pp.2401-2405.

[11] 2005, Roh, W.-J., Cho, S.-H. and Park, J.I., "Simulation of Sloshing in Fuel Tanks and Parametric Study on Noise Reduction by Decreasing Impact Pressure," *SAE Paper No.2005-01-1913*.

[12] 2006, Wiesche, S.A.D., "Noise due to Sloshing within Automotive Fuel Tanks," *Forsch Ingenieurwes*, Vol.70, pp.13-24.

[13] 2004, *STAR-CD Methodology Version 3.24*, Computational Dynamics Ltd.

[14] 1999, Ubbink, O. and Issa, R.I., "A Method for Capturing Sharp Fluid Interfaces on Arbitrary Meshes," *Journal of Computational Physics*, Vol.153, pp.26-50.

[15] 1952, Ergun, S., "Fluid Flow through Packed Columns," *Chemical Engineering Progress*, Vol.48, pp.89-94.