연료탱크 슬로싱 소음 저감을 위한 배플 및 다공성 물질 설치에 따른 유동해석 연구

이 상 혁,[1] 허 남 건[*2]

A NUMERICAL STUDY ON FLOWS IN A FUEL TANK WITH BAFFLES AND POROUS MEDIA TO REDUCE SLOSHING NOISE

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

The sloshing tank causes the instability of the fluid flows and the fluctuation of the impact pressure by the liquid on the tank. These flow characteristics inside the sloshing tank can generate the uncomfortable sloshing noise. In the present study, a numerical analysis for the reduction of a fuel tank sloshing noise was performed. To simulate the flow characteristics in a sloshing tank with partially filled liquid, a VOF method was used for interfacial flows by applying a momentum source term for the sloshing motion in a non-inertial reference frame. This numerical method was verified by comparing its results with the available experimental data. For the reduction of the sloshing noise, the horizontal and vertical baffles and porous media inside a sloshing tank were considered and numerically analyzed in the present study. For various installations of these baffles and porous media, the characteristics of the liquid behavior in the sloshing tank were obtained along with the impact pressure on the wall and the height of the free surface along the wall. These basic results can be used for the design of the actual vehicular fuel tank with the reduced sloshing noise.

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 구조물 내 슬로싱 현상은 시스템의 불안전성을 발생시킴으로써, 구조물의 소음, 전복, 파손 등의 문제를 초래하게 된다. 특히, 슬로싱으로 인한 구조물의 소음은 편안하고 쾌적한 환경을 저해하기 때문에 이를 해결하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다.

접수일: 2009년 5월 13일, 수정일: 2009년 6월 16일,
게재확정일: 2009년 6월 19일
1 학생회원, 서강대학교 대학원
2 종신회원, 서강대학교 기계공학과
* Corresponding author, E-mail: nhur@sogang.ac.kr

구조물의 슬로싱 소음의 해결을 위해서는 시스템 전반의 특성을 분석하고 이를 통해 소음을 감소시킬 수 있다. 박성호 등[1]은 연료탱크의 슬로싱에 의한 소음 및 진동 특성 분석을 위한 실험 및 진동해석을 하였다. 또한, 채경훈과 김영림[2]은 연료탱크 시스템에서 발생하는 소음 특성 분석을 위해 차량 시스템 전반에 대해 실험 및 해석을 수행하였다. 유준태 등[3]은 연료탱크 시스템을 질량-스프링 모델로 가정하여 슬로싱 특성을 분석함으로써 충돌압력을 감소하는 배플을 설계하였다. 그러나 이와 같은 시스템 전반에 걸친 연구는 근본적인 슬로싱 발생 원인에 대한 분석이 이루어지지 않아, 슬로싱 소음 특성을 분석하고 해결 대책을 수립하는데 한계가 있다.

이와 같은 슬로싱 소음에 대한 시스템 특성은 구조물 내 유체의 움직임으로 인한 구조물과의 상호작용에 의해 결정된다. 따라서, 구조물 내 유체의 거동 분석을 통해 슬로싱 소음에 대한 많은 연구들이 진행되었다. 윤성호 등[4]은 원통 구조물, Hinatsu 등[5]과 Panigrahy 등[6]는 육면체 구조물 내 슬

로싱 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[7]과 명현국과 김종은[8], 김윤호 등[9], Rhee[10]는 VOF 방법을, 이정민 등[11], 최형권[12]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 이상유동 특성에 대한 해석이 주를 이루고 있다. 또한, 단순한 형태의 구조물뿐만 아니라, Roh 등[13]과 Wiesche[14]는 자동차용 연료탱크를 모델링하여 급제동시 슬로싱으로 인해 연료탱크에 가해지는 충격 압력과 이로 인한 슬로싱 소음에 대해 분석하였다. 이와 같은 다양한 슬로싱 현상에 대한 연구 결과는 슬로싱 소음을 줄이기 위한 기본 자료로 활용되고 있다. 그러나 소음 감소를 위해 사용되는 다공성 물질의 설치에 따른 연구는 거의 진행되지 않았으며, 다양한 배플 및 다공성 물질의 설치에 따른 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 병진운동하는 육면체 형태의 연료탱크에서 발생하는 슬로싱 소음을 감소시키기 위한, 탱크 내 배플 및 다공성 물질의 설치에 따른 현상에 대해 2차원 수치해석을 수행하였다. 슬로싱 현상에 대한 기존의 실험 결과와 비교함으로써 해석의 타당성을 검증하였으며, 이를 통해 슬로싱 소음을 감소시키기 위한 수직/수평 배플 및 다공성 물질이 설치될 경우, 탱크 내 상경계면의 거동, 벽면에 충격 압력, 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[15]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 밀도 ρ와 점성 μ를

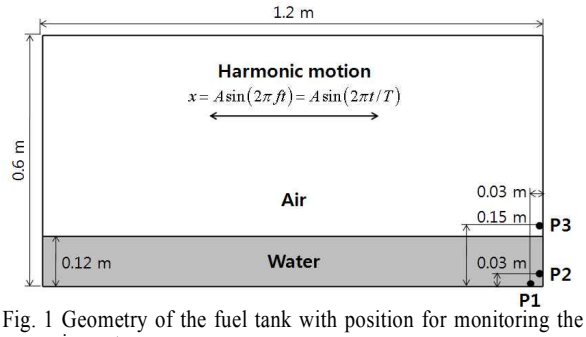


Fig. 1 Geometry of the fuel tank with position for monitoring the impact pressure

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

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

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

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

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[16]을 사용하고 있다.

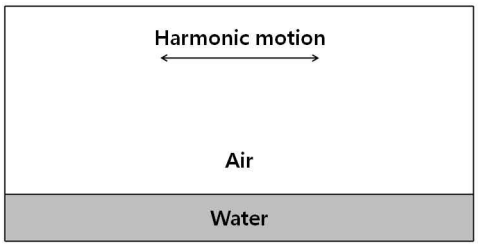
2.2 연료탱크 슬로싱

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 연료탱크 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.

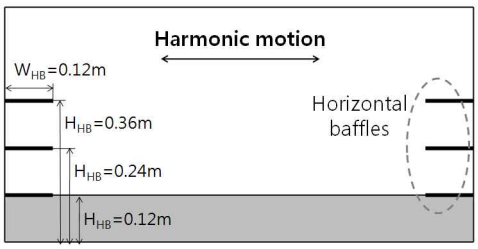
초기 탱크 내 물은 중력에 의해 아래쪽에 평형상태로 존재하게 되며, 본 연구에서는 사각탱크가 아래 식과 같은 Sine 함수 형태로 좌우로 병진운동(Harmonic motion)을 하게 된다.

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

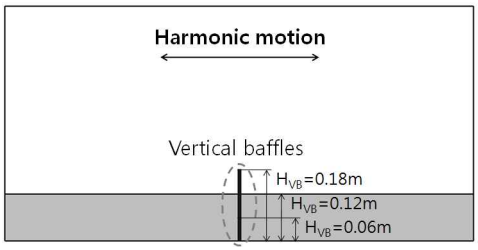
여기서, A는 병진운동의 진폭, f는 병진운동의 주파수, T는 병진운동의 주기를 나타낸다. 이와 같은 병진운동을 고정격자계를 사용하여 해석하기 위하여, 절대좌표계에 대해 탱크 내부에 위치하는 비관성좌표계가 움직이는 것으로 처리하여 식 (2)의 운동량 방정식에 생성항을 추가하였다. 이 때, 운동량



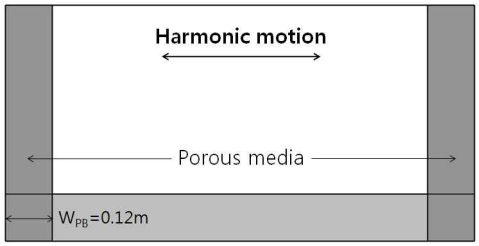
(a) without baffles and porous media



(b) with horizontal baffles



(c) with vertical baffles



(d) with porous media

Fig. 2 Geometry of the fuel tank with baffles and porous media to reduce the sloshing noise

방정식의 생성항은 비관성좌표계의 병진운동에 따른 가속도에 의해

$$S_x = \rho a_x = -\rho A(2\pi f)^2 \sin(2\pi f t) = -\rho A(2\pi/T)^2 \sin(2\pi t/T) \quad (7)$$

와 같이 결정된다. 본 연구에서는 기존 실험 결과[5]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 연료탱크 내 배플 및 다공성 물질 설치

병진운동을 하는 사각탱크 내 배플 및 다공성 물질 설치에 따른 슬로싱 현상에 대한 특성을 분석하기 위해서, 본 연구에서는 Fig. 2(a)과 같은 기본 탱크 형상에 배플과 다공성 물질이 설치될 경우에 대해 해석을 수행하였다.

배플의 경우, Fig. 2(b)의 수평 배플 및 Fig. 2(c)의 수직 배플을 고려하였다. 이에 대한 해석을 위해 배플이 설치되는 위치에 배플 격자를 생성함으로써 배플로 인한 슬로싱 특성을 검토하였다. 이 때, 수평 배플의 경우는 탱크의 좌우 벽면에 폭이 W_{HB}=0.12m인 배플을 높이 H_{HB}=0.12, 0.24, 0.36m에 설치하였으며, 수직 배플의 경우는 탱크 중앙에 높이 H_{VB}=0.06, 0.12, 0.18m인 배플을 설치하였다.

다공성 물질의 경우, Fig. 2(d)와 같이 탱크의 좌우 벽면에 폭 W_{PB}=0.12m에 다공성 물질이 존재할 경우에 대해 알아보았다. 이 때, 다공성 물질로 인한 압력 강하 특성을 Ergun[17]에 의해 제안된 상관식을 기반으로 등방성 다공성 물질에 적용하기 위한 벡터 형태[18]로

$$\left(\frac{dP}{dx_i}\right)_g = \frac{150\mu_g(1-\epsilon)^2 u_i}{D_p^2\epsilon^3} + 1.75\frac{1-\epsilon}{\epsilon^3}\frac{\rho_g|u_i|u_i}{D_p} \quad (8)$$

$$\left(\frac{dP}{dx_i}\right)_l = \frac{150\mu_l(1-\epsilon)^2 u_i}{D_p^2\epsilon^3} + 1.75\frac{1-\epsilon}{\epsilon^3}\frac{\rho_l|u_i|u_i}{D_p} \quad (9)$$

와 같은 사용하였다. 여기서, dP는 압력강하, ϵ은 다공도, D_p는 다공성 물질 내 입자의 지름, u_i는 다공성 물질 내 속도를 나타낸다. 이 때, 다공성 물질의 압력 강하 특성을 기체에 대한 식 (8)과 액체에 대한 식 (9)를 밀도 ρ와 점도 μ를 고려하여 구하였다. 이와 같이 기체와 액체의 단상 유체가 다공성 물질을 통과할 경우의 압력강하 특성으로부터 해당 격자 내 체적비 α를 이용하고[19], 모세관(Capillary) 현상이 크게 작용하지 않는다고 가정하여 다공성 물질 내 기체와 액체의 이상유동에 대한 압력강하 특성을

$$\frac{\partial P}{\partial x_i} = (1-\alpha)\left(\frac{dP}{dx_i}\right)_g + \alpha\left(\frac{dP}{dx_i}\right)_l \quad (10)$$

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.

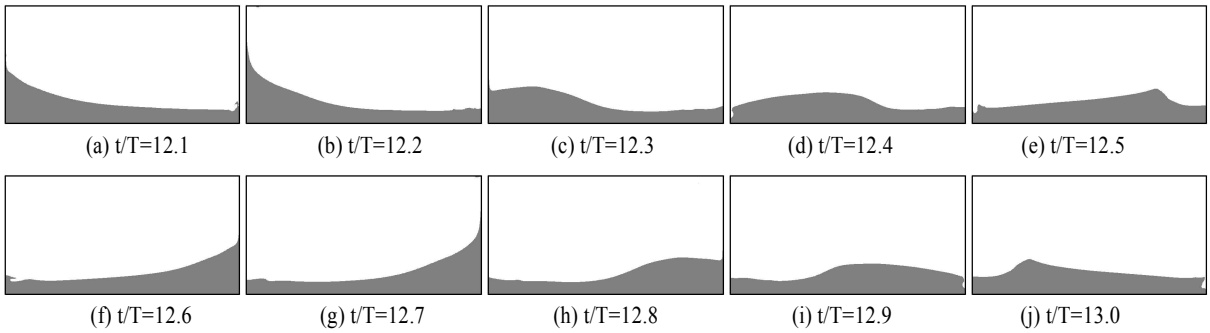


Fig. 3 Fluid behavior inside a tank with the harmonic motion

2.4 연료탱크 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 충격에 의한 힘의 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 병진운동으로 인해 충돌 압력이 크게 변화하는 한쪽 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 연료탱크 슬로싱 특성 및 실험 결과와 비교

본 연구에서 수행한 Fig. 1과 같은 기본 사각탱크 형상 구조물의 병진운동으로 인한 유체의 움직임에 대한 해석을 수행하기 전에, 다양한 격자밀도 및 시간간격에 대한 수치해석을 수행하여 측정위치 별 평균압력을 Table 1과 같이 얻었다. 이를 통해, 160×320개의 격자로 병진운동 주기당 4000steps에 해당하는 해석 시간간격을 설정하여 15번의 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 특성은 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.

Table 1 Sensibility test for grid density and time interval

grid density	P1 [kPa]	P2 [kPa]	P3 [kPa]	steps/ cycle	P1 [kPa]	P2 [kPa]	P3 [kPa]
80×160	1.239	0.976	0.248	**300**	1.256	0.976	0.263
120×240	1.243	0.971	0.244	**400**	1.244	0.969	0.242
160×320	1.244	0.969	0.242	**500**	1.241	0.967	0.238
200×400	1.244	0.967	0.241	**600**	1.239	0.966	0.236

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 차이가 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 인한 탱크 내 유체의 거동으로 인해 발생하며, 벽면에서 상경계면의 거동을 보여주는 Fig. 5를 보면 주기별로 좌우의 벽면에서 상경계면이 번갈아서 상승하고 하강하는 것을 볼 수 있다. 이 때, 병진운동으로 인해 액체가 벽면에 처음으로 충돌할 때 가장 큰 압력 값 상승을 가지며, 충돌한 액체의 상경계면이 벽면을 타고 상승한 후 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[5]와 Fig. 6와 같이 비교하였다.

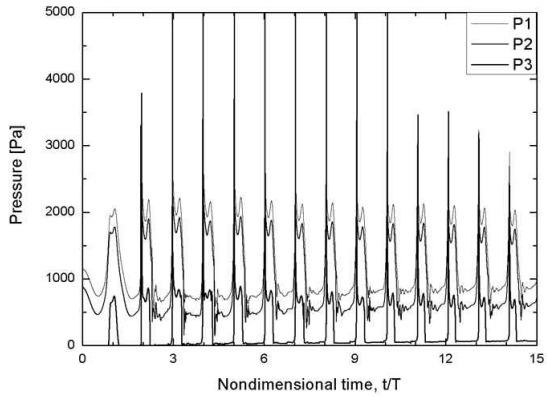


Fig. 4 Impact pressure of the tank sloshing at P1, P2 and P3 monitoring positions

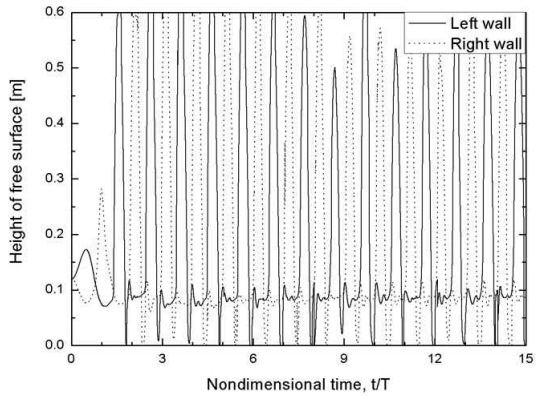


Fig. 5 Height of free surface at the left and right walls

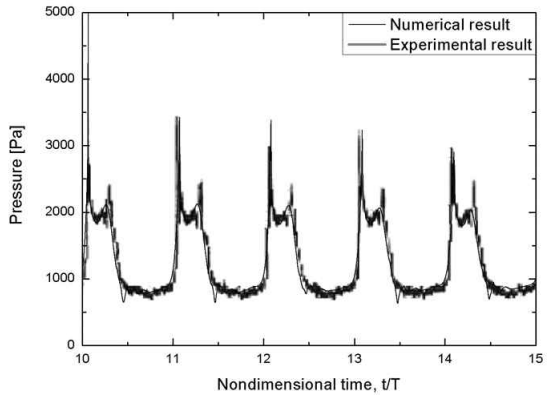


Fig. 6 Comparison of the numerical result with the experimental result[5] of impact pressure at P1 monitoring position

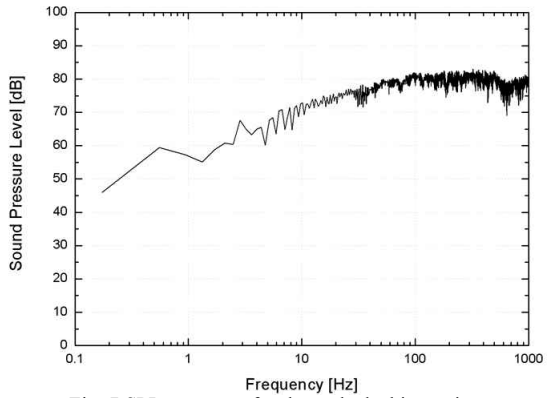


Fig. 7 SPL spectrum for the tank sloshing noise

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 및 다공성 물질 설치에 따른 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 탱크의 슬로싱으로 인한 벽면에 가하는 압력 값의 변화로부터 슬로싱 소음의 특성을 식 (10)과 같이 음압레벨로 환산하여 주파수에 따라 분석하였다. 기본 형상 탱크의 병진운동으로 인한 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 배플 설치로 인한 슬로싱 현상

본 연구에서는 탱크의 병진운동에 의한 슬로싱 소음을 감소시키기 위하여 수평/수직 배플 및 다공성 물질을 설치하였다. Fig. 2(b)와 같이 폭(W_{HB})이 0.12m인 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.

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

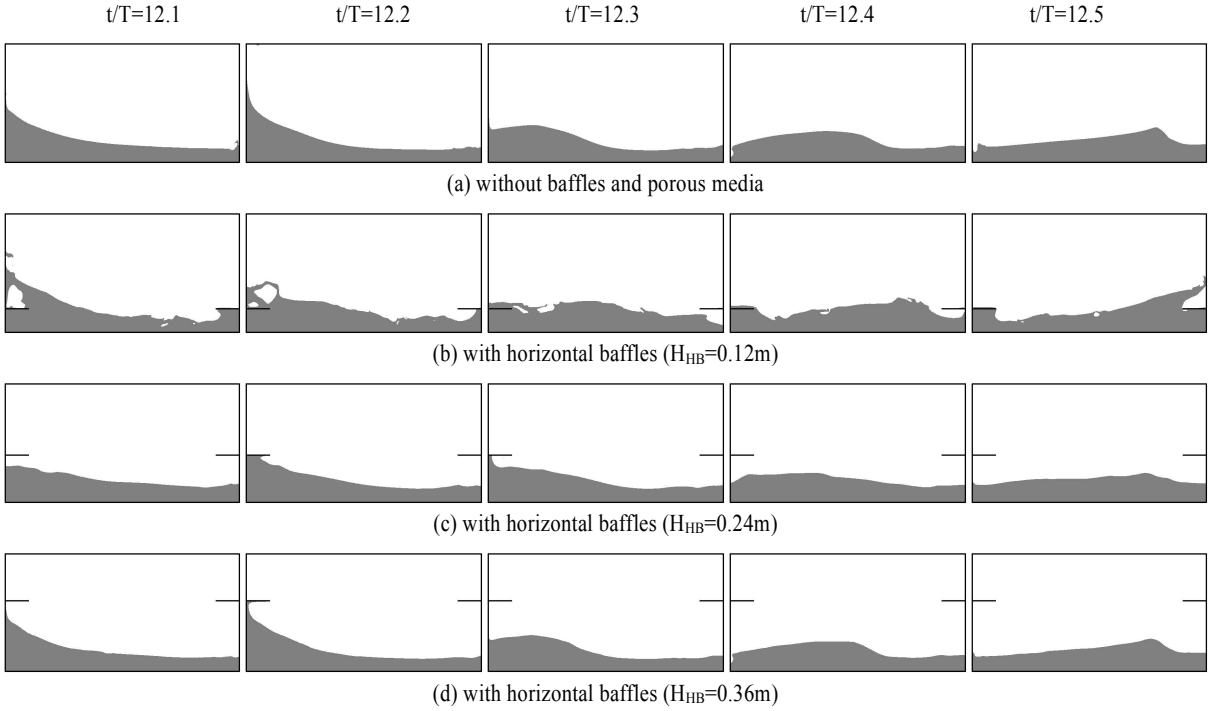
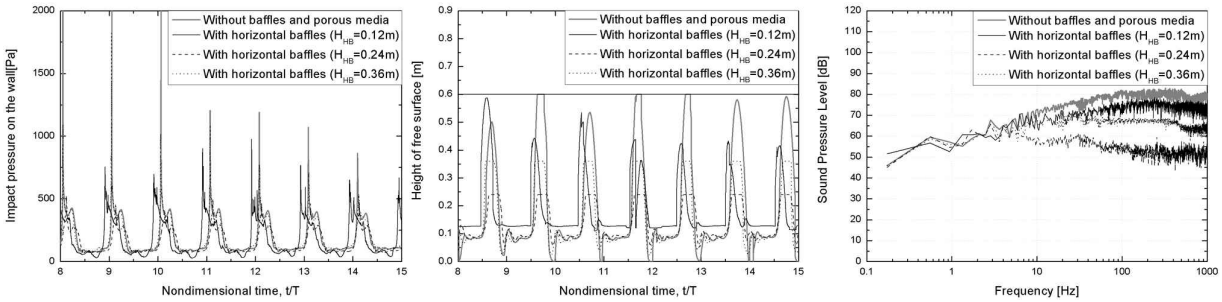


Fig. 8 Effects of the horizontal baffles on the fluid behavior inside a tank with the harmonic motion



(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 baffles

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 배플의 설치는 벽면에 충돌 압력을 감소시켜 기본 형상에서 발생하는 슬로싱 소음을 감소시켰다. 특히, 충돌 압력을 가장 많이 감소시킨 0.24m에 수평 배플이 설치된 경우 슬로싱 소음도 가장 많이 감소하였으며, 100Hz 이상에서 50dB 정도의 음압레벨 특성을 보였다.

3.3 수직 배플 설치로 인한 슬로싱 현상

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

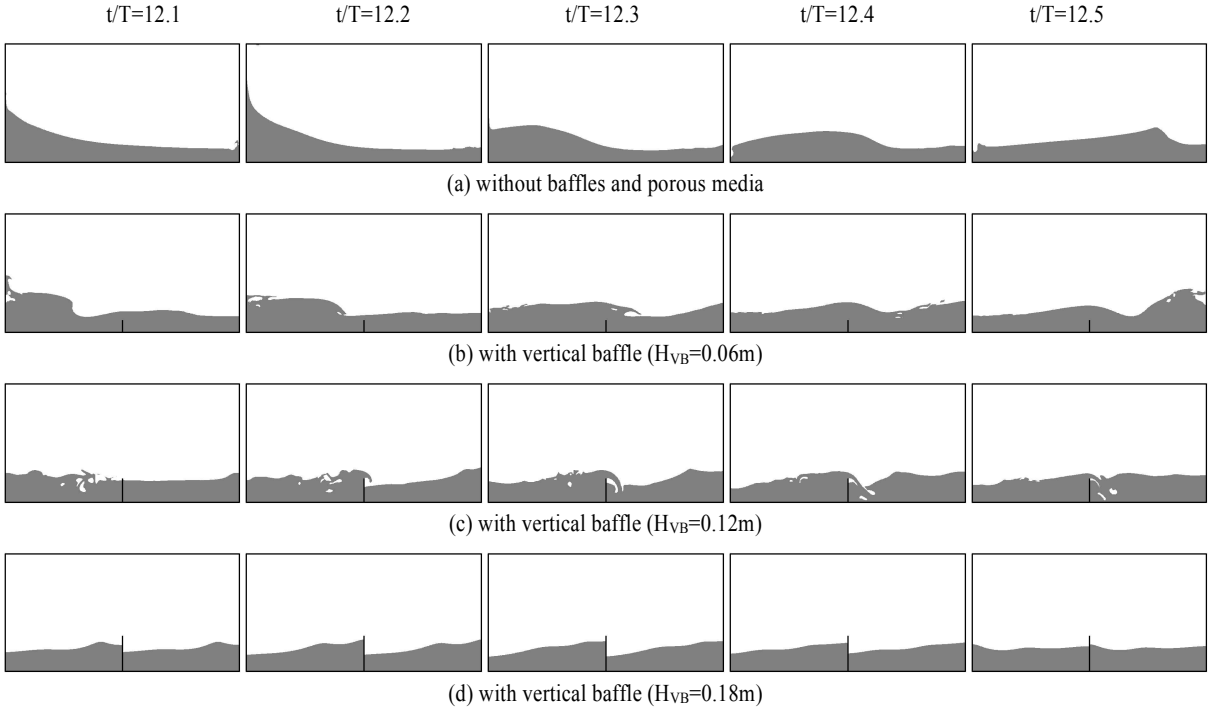
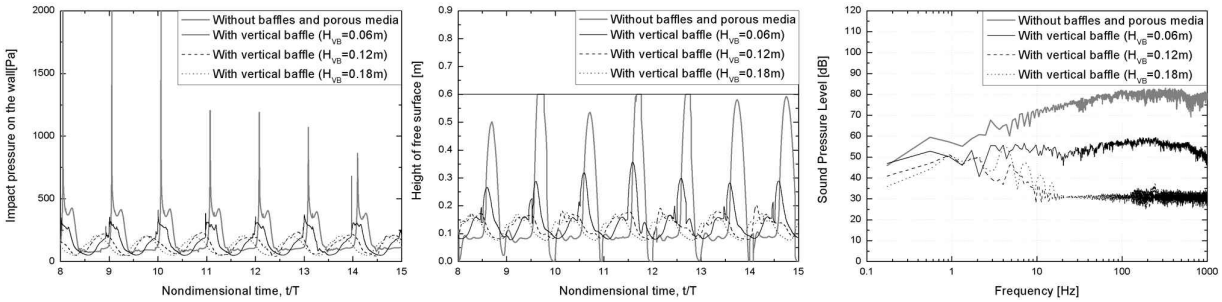


Fig. 10 Effects of the vertical baffles on the fluid behavior inside a tank with the harmonic motion



(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 baffles

상할 수 있다. 또한 0.18m의 수직 배플이 설치될 경우, 배플을 중심으로 양쪽에서 슬로싱 현상이 개별적으로 발생하였다.

이와 같은 탱크 내 액체의 거동특성으로 인해 Fig. 11과 같은 탱크의 슬로싱 특성을 갖게 된다. 이를 보면, 0.06m 높이의 수직 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 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, 수직 배플이 높게 설치될 경우 더 많은 소음을 감소시켰으며, 일정 높이 이상에서는 배플의 양쪽에서 슬로싱 유동이 각각 발생하게 되어 소음 특성도 비슷하게 나타났다. 높이 0.12m 및 0.18m의 수직 배플의 경우, 100Hz 이상의 주파수에서 30dB 근처로 슬로싱 소음을 감소시켰다.

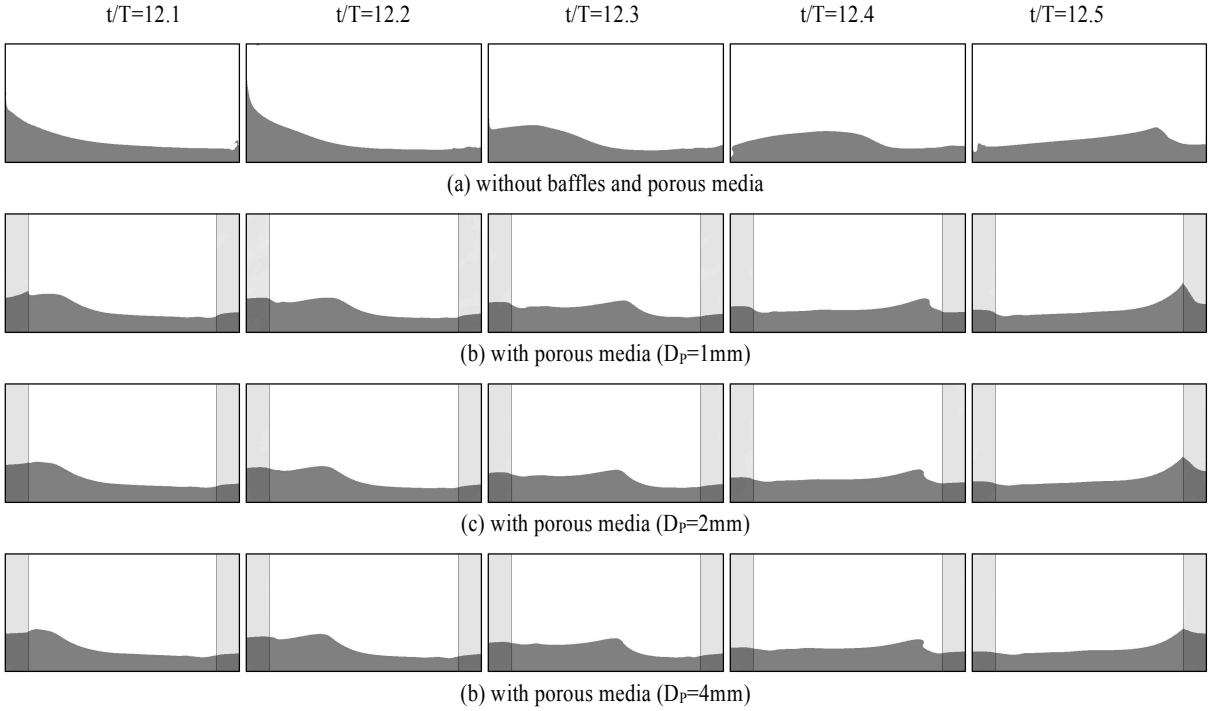
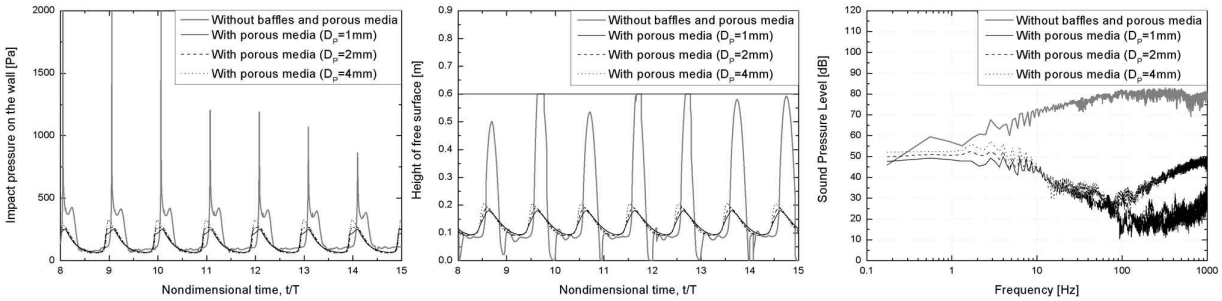


Fig. 12 Effects of the porous media on the fluid behavior inside a tank with the harmonic motion



(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 media

3.4 다공성 물질 설치로 인한 슬로싱 현상

탱크의 슬로싱 현상 감소를 위해서, 탱크 내부에 배플 뿐만 아니라 다공성 물질을 설치할 수 있다. 본 연구에서는 다공성 물질의 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 다공성 물질을 설치할 경우 슬로싱으로 인한 내부 유체의 거동을 Fig. 12와 같이 얻었다. 이를 보면, 양 벽면 주변에 설치된 다공성 물질이 유동 저항으로 작용하여 액체의 거동을 방해하게 되며, 이와 같은 다공성 물질의 설치로 인한 유동 저항은 입자 지름이 작은 경우 더 커지게 된다.

이와 같은 다공성 물질 설치로 인한 내부 액체의 거동 특성은 Fig. 13과 같은 슬로싱 특성을 가져온다. 다공성 물질로 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 다공성 물질의 설치로 인한 벽면 주변에서의 저항은 Fig. 13(c)와 같이 슬로싱 소음 특성에도 변화를 가져온다. 다공성 물질이 설치되지 않은 기본 해석의 소음 특성에 비해 100Hz 이상의 주파수 대역에서 급격하게 음압 레벨의 감소를 가져왔으며, 다

공성 물질의 입자 지름이 1mm와 2mm의 경우에는 100Hz 이상에서 20dB 정도의 슬로싱 소음을 갖게 되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 연료탱크 슬로싱 소음의 근본적인 원인인 탱크 내 유동 특성을 분석함으로써 소음 저감을 위한 방법에 대해 수치해석적 연구를 수행하였다. 탱크 내 유체의 이상유동 해석을 위하여 VOF 방법을 사용하였으며, 탱크의 병진운동을 구현하기 위하여 비관성좌표계에서 가속도로부터 운동량 방정식의 생성항을 추가하였다. 이와 같은 해석 기법을 사용하여 탱크 슬로싱 특성에 대한 해석을 수행함으로써, 기존 실험 결과와의 비교하여 거의 일치하는 결과를 얻었다. 탱크 슬로싱으로 인한 내부 액체가 벽면에 가하는 충돌 에너지의 변화로부터 소음이 발생되며, 이를 해소하기 위하여 본 연구에서는 수평/수직 배플 및 다공성 물질 설치에 따른 특성에 대한 수치해석을 수행하였다. 배플 및 다공성 물질의 설치는 내부 액체의 거동과 더불어 벽면에 충돌 압력, 벽면에서 상경계면 도달 높이에 대한 변화를 초래함으로써, 슬로싱 소음을 감소시키는 특성을 보였다. 이와 같은 연료탱크의 슬로싱 소음 특성 분석을 통해, 배플 및 다공성 물질의 설치를 통해 시스템의 소음 문제를 해소할 수 있음을 알았다.

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] 2007, 채경훈, 김영림, “연료 유동음 개선에 관한 연구,” *한국자동차공학회 2007년도 춘계학술대회 논문집*, pp.971-976.

[3] 1999, 유준태, 연정흠, 연성기, “액체연료 탱크내부의 연료슬로쉥 해석 및 최적 배플설계에 관한 연구,” *한국항공우주학회지*, 제27권, 제5호, pp.60-70.

[4] 2002, 윤성호, 박기진, 심국상, “액체연료탱크의 슬로싱 거동 평가기법,” *한국정밀공학회 2002년도 춘계학술대회 논문집*, pp.314-317.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 2006, 명현국, 김종은, “경계면포착법에 의한 사각형 탱크 내의 2차원 충돌유동과 슬러싱에 관한 수치적 연구,” *대한기계학회 2006년도 추계학술대회 강연 및 논문 초록집*, pp.1-6.

[9] 2006, 김윤호, 김태균, 이규정, 홍사영, “3차원 저장탱크 내부에서의 슬로싱에 대한 전산해석 연구,” *대한기계학회 2006년도 춘계학술대회 강연 및 논문 초록집*, pp.1564-1569.

[10] 2005, Rhee, S.H., "Unstructured Grid Based Reynolds-Averaged Navier-Stokes Method for Liquid Tank Sloshing," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.127, pp.572-581.

[11] 2008, 이정민, 윤현식, 전호환, “레벨셋법을 이용한 2차원 사각 탱크 내부의 슬로싱 충격압력에 관한 수치적 연구,” *한국해양환경공학회 2008년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집*, pp.1456-1156.

[12] 2008, 최형권, “최소자승법과 Level-set 방법을 이용한 3차원 슬로싱 유동의 수치해석,” *대한기계학회 2008년도 추계학술대회 강연 및 논문 초록집*, pp.2401-2405.

[13] 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*.

[14] 2006, Wiesche, S.A.D., "Noise due to Sloshing within Automotive Fuel Tanks," *Forsch Ingenieurwes*, Vol.70, pp.13-24.

[15] 2004, *STAR-CD Methodology Version 3.24*, Computational Dynamics Ltd.

[16] 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.

[17] 1952, Ergun, S., "Fluid Flow through Packed Columns," *Chemical Engineering Progress*, Vol.48, pp.89-94.

[18] 2000, Teng, H. and Zhao, T.S., "An Extension of Darcy's Law to Non-Stokes Flow in Pours Media," *Chemical Engineering Science*, Vol.55, pp.2727-2735.

[19] 2007, Schmidt, W., "Interfacial Drag of Two-phase flow in Porous Media," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.33, pp.638-657.