

사각형 탱크 내에서의 2차원 슬로싱에 대한 전산유체역학적 연구

곽영균[†] · 고성호^{*}

(2003년 1월 29일 접수, 2003년 5월 9일 심사완료)

Computational Fluid Dynamics Study on Two-Dimensional Sloshing in Rectangular Tank

Youngkyun Kwack and Sungho Ko

Key Words: Sloshing(슬로싱), VOF Method(VOF방법), Baffle(배풀), Sloshing Damping Coefficient
(슬로싱 감쇠 계수), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

Abstract

The present study describes a numerical analysis for simulation of the sloshing of flows with free-surface which contained in a rectangular tank moving in harmonic or pitching motion. The VOF function, representing the volume fraction of a cell occupied by the fluid, is calculated for each cells, which gives the location of the free-surface filling any some fraction of cells with fluid. The time-dependent changes of free-surface height are used for visualization subject to several conditions such as fluid height, horizontal acceleration, sinusoidal motion, and viscosity. The free-surface heights were used for comparing wall-force, which is caused by sloshing of flows. Damping effects by baffles were extensively investigated for various conditions in terms of baffle shape and position.

1. 서 론

항공기, 선박 등의 연료탱크 및 지상에 설치된 각종 저장형 탱크, 반응로 등은 유체를 포함하는 구조물로서 이들의 움직임에 따른 요동 및 지진 등과 같은 외부 가진력으로 인하여 탱크에 포함된 액체연료의 출렁거리는 현상을 슬로싱(sloshing)이라 한다. 액체연료를 적재하는 비행체의 경우, 연료탱크에서의 유체의 슬로싱은 비행 시 적재연료의 요동으로 인하여 발생하며, 이러한 요동이 적재연료의 공진 주파수와 가까워지면 슬로싱 현상은 심화되고, 유체를 포함하는 구조물은 정적인 상태와는 다른 특성을 보이게 된다.

유체의 슬로싱이 심한 경우, 항공기에서는 조종 안정성의 상실은 물론 구조파단 등의 심각한 위험을 초래할 수 있다. 또한 동체의 상당 부분이 연료탱크인 미사일이나 로켓에서는 적재연료의 동적 거동으로 인하여 발생되는 하중과 모멘트가 크고, 이러한 슬로싱은 유체를 담고 있는 연료탱크 구조물에 큰 영향을 미치게된다.

따라서 연료탱크에서 적재연료의 슬로싱의 영향을 최소화하거나, 이의 방지를 위해서는 슬로싱 현상을 물리적으로 올바르게 이해하고 유체역학적으로 유체거동을 정확히 해석하는 것이 무엇보다 필요하다.

슬로싱을 포함하는 유체운동을 전산유체역학적으로 계산함에 있어서 어려운 점은 자유표면의 운동을 정확히 포착하는 것이라 할 수 있다. 이러한 자유표면을 효과적으로 처리할 수 있는 많은 알고리듬들이 개발되어 왔는데 그들은 크게 Eulerian, Lagrangian과 Eulerian-Lagrangian 이렇게 세 가지 알고리듬으로 분류될 수 있다. 이들 중 가장 대표적

† 책임저자, 회원, 충남대학교 대학원

* 회원, 충남대학교 기계설계공학과

E-mail : sunghoko@cnu.ac.kr

TEL : (042)821-6650 FAX : (042)822-7366

인 것에는 1965년에 Harlow & Welch⁽¹⁾가 발표한 MAC(Marker & Cell) 방법, 1974년에 Hirt, Amsden & Cook⁽²⁾의 ALE(Arbitrary-Lagrangian-Eulerian) 방법, 1981년에 Hirt & Nichols⁽³⁾의 VOF(Volume of Fluid) 방법 등이 있다.

VOF 방법은 유체의 유동 뿐 아니라 자유표면의 움직임도 고정된 격자만을 이용하여 Eulerian으로 해석할 수 있게 하여 적은 컴퓨터 기억용량으로 일반적인 슬로싱 뿐만 아니고 복잡한 자유표면의 유동장을 쉽게 처리할 수 있게 한다. 이때 각 격자를 차지하는 유체의 부피를 나타내는 용적함수(VOF 함수 F)를 별도로 계산함으로써 격자의 일부분만을 유체로 채우는 자유표면의 움직임을 감지할 수 있게 한다. 이렇게 자유표면을 표현하는 방법은 Lagrangian 방법에 비해 복잡해 질 수 있지만 겹쳐지고 합쳐지는 커다란 비선형적인 자유표면의 움직임까지도 매우 효과적으로 묘사할 수 있게 한다. 또한 VOF 방법은 2차원뿐만 아니라 3차원 유동까지도 쉽게 확장하여 적용할 수 있다.

본 연구에서는 VOF방법을 사용하여 임의의 움직임을 갖는 사각탱크 내의 슬로싱을 전산유체역학적으로 연구하였다. 물론 이 때의 유동 지배방정식은 비정상 Navier-Stokes 방정식이다. 매 시간 단계별로 구한 해로부터, 슬로싱 운동의 가시화뿐만 아니라 슬로싱에 의해 탱크에 주어지는 힘을 벽면에서 자유표면의 높이를 이용하여 나타내었으며 이를 통하여 배풀에 의한 슬로싱 감쇠효과를 각 조건별로 비교하였다.

2. 지배방정식

Fig. 1과 같이 공간에 고정된 관성좌표계 (X , Y)에 대하여 병진, 피칭 등의 움직임을 갖는 탱크내의 2차원 비압축성 유동의 지배방정식을 탱크에 고정된 좌표계 (x , y)를 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + f_x \quad (2)$$

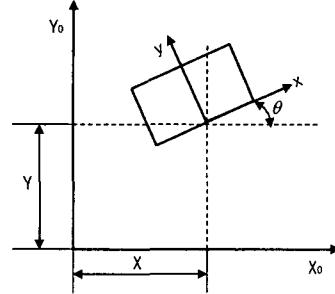


Fig. 1 Moving coordinate system

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + f_y \quad (3)$$

$$f_x = (g_x - \ddot{X}) \cos \theta + (g_y - \ddot{Y}) \sin \theta + \dot{\theta}^2 x + \ddot{\theta} y + 2 \dot{\theta} v \quad (4)$$

$$f_y = -(g_x - \ddot{X}) \sin \theta + (g_y - \ddot{Y}) \cos \theta + \dot{\theta}^2 y + \ddot{\theta} x - 2 \dot{\theta} u \quad (5)$$

위 식에서 u 와 v 는 x 와 y 방향의 속도성분이고, t 는 시간, p 는 압력, ν 는 동점성계수이다. 이 때, 자유표면의 움직임은 주로 중력 g 에 의해 일어나므로 각 변수는 밀도 ρ , 중력 g , 그리고 탱크의 특성길이 l 로 무차원화 된 값들이다. 즉, x 와 y 는 l 로, t 는 $\sqrt{l/g}$ 으로, g_x 와 g_y 는 g 로, u 와 v 는 \sqrt{gl} 로, p 는 ρgl 로, ν 는 $\sqrt{gl^3}$ 으로 무차원화 되었다. f_x 와 f_y 는 탱크의 움직임에 의해 x 와 y 방향으로 가해지는 외력이다. 이때 표면장력의 영향은 매우 작으므로 무시하였다.

VOF 함수 F 는 유체가 격자(cell)를 채우고 있는 체적비를 나타낸다. 즉, F 가 영(zero)의 값을 가지는 격자는 비어있는 것이고 F 가 1의 값을 갖는 격자는 유체로 모두 채워져 있는 상태를 말한다. 자유표면을 나타내는 격자는 영이 아닌 F 값을 가지며 주위의 격자, $(i \pm 1, j)$ 또는 $(i, j \pm 1)$ 중 최소한 하나의 격자가 $F=0$ 이어야 한다. 이러한 F 값은 다음의 방정식의 해를 구함으로써 찾을 수 있다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F u}{\partial x} + \frac{\partial F v}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

식 (6)을 Cartesian 좌표계에 대해 이산화된 형

태로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F^{n+1}_{i,j} &= F^n_{i,j} - \frac{\delta t}{\delta x_i} (u_{i,j} F_{i+\frac{1}{2},j} - \\ &u_{i-1,j} F_{i-\frac{1}{2},j}) - \frac{\delta t}{\delta y_j} (v_{i,j} F_{i+\frac{j+1}{2}} - \\ &v_{i,j-1} F_{i,j-\frac{1}{2}}) \quad (7) \end{aligned}$$

위 식의 좌변의 항들은 격자의 경계를 통과하는 F 의 플렉스를 나타내고 있고 이러한 플렉스의 계산은 Hirt & Nichols⁽³⁾의 donor-acceptor의 개념을 따라 계산되었다.

3. 수치해석

3.1 해석 대상

병진운동(harmonic motion)의 수치해석에 사용된 모델을 Fig. 2에 나타내었다. 오픈형 사각탱크는 좌우로 병진운동을 하게 되며 OA의 거리 X 를 시간에 대해 미분하여 그 속도 및 가속도를 다음과 같이 계산하였다.

$$X = -R \cos \varphi + L \cos \phi \quad (8)$$

$$\dot{X} = R \omega (\sin \omega t - \frac{1}{2n} \sin 2\omega t) \quad (9)$$

$$\ddot{X} = R \omega^2 (\cos \omega t - \frac{1}{n} \cos 2\omega t) \quad (10)$$

여기서,

$$n = \frac{M}{R} \quad (11)$$

식 (10)을 식 (4)에 넣어 다음과 같이 외력으로 주어지게 된다.

$$f_x = g_x - \ddot{X} \quad (12)$$

피칭운동(pitching motion)에서는 Fig. 3에서 O점은 회전축으로 일정 각을 다음 식과 같이 움직이게 된다.

$$\theta = \theta_0 \sin(\omega t^*) \quad (13)$$

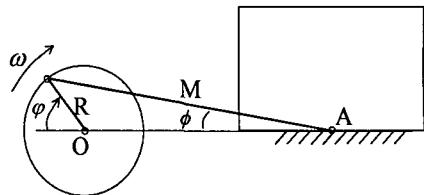


Fig. 2 Apparatus for the tank in harmonic motion

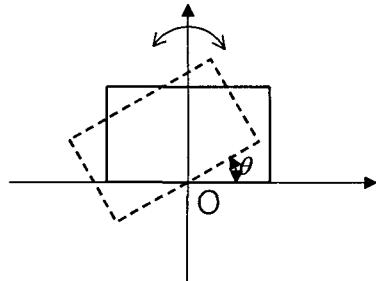


Fig. 3 The tank in pitching motion

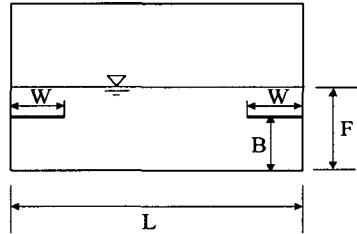


Fig. 4 Fluid-contained rectangular tank with horizontal baffles

Fig. 4와 Fig. 5는 수치해석에 사용된 사각탱크의 파라미터를 보여주고 있다. Fig. 4는 수평배풀이 설치된 사각탱크이다. W 는 배풀의 폭을, B 는 배풀의 설치높이를, F 는 유체의 초기높이를, L 은 사각탱크의 너비를 나타낸다. 유체의 초기높이(F)는 탱크전체 너비(L)에 50%로 설정하였다. 수평배풀이 설치된 사각탱크내의 슬로싱에서는 배풀폭(W/L) 0.15, 0.2, 0.25, 0.3에 대하여 배풀 높이/유체의 초기높이(B/F)를 각각 변화시켰고 B/F 0.6, 0.7, 0.8에 대하여 배풀 폭을 0.05~0.5로 변화시켰다.

Fig. 5는 수직배풀이 설치된 사각탱크이다. H 는 수직배풀의 높이를, F 는 유체의 초기 높이를, L 은 사각탱크의 너비를 나타낸다. 수직배풀이 설치된

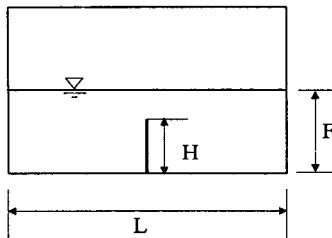


Fig. 5 Fluid-contained rectangular tank with a vertical baffle at the center of the tank

사각탱크내의 슬로싱에서는 배풀 높이(H/L)를 0.1에서 0.6까지 변화시켰다.

각각의 경우에 사각탱크를 병진 또는 피칭운동을 행하였으며 병진운동할 때는 식 (10)에 따라 운동하며 피칭운동할 때는 식 (13)에 따라 운동한다. 이때 $R\omega^2/\sqrt{gL} = 0.086$, $\theta_0 = 5^\circ$, $\omega = \pi$, Fr(Froude number)=108.678로 설정하였으며 이에 따른 각각의 표준편차를 비교해 보았다. 여기서 표준편자는 왼쪽 벽면의 매 시간 유체 높이를 구한 값을 이용하여 10주기까지의 결과를 가지고 구했으며 해석에 사용된 유체는 물로 설정하였다.

3.2 프로그램 검증

VOF 방법을 이용하여 사각탱크내의 슬로싱을 해석함에 앞서 본 연구에서 사용되는 전산유체역학 프로그램의 타당성을 검증하기 위해서 물기둥이 무너지는 현상을 수치적으로 모사하고 Martin & Moyce⁽⁴⁾의 실험측정치와 비교하였다. 이 문제는 간단한 경계조건과 초기 형상 등으로 매우 좋은 테스트용으로 자주 인용되는 문제이며, 자유 표면이 수평으로 그리고 수직으로 있기 때문에 복잡한 자유표면을 처리할 수 있는 능력이 프로그램에 있는지 확인할 수 있어서 더욱 의미가 있다고 할 수 있다. 여기에서 물기둥 너비는 1m이며 초기의 물기둥의 높이는 4m이고 모든 길이는 너비 1m의 20배 길이인 폭 방향 길이 L로 무차원화되어 나타내었다. 또한 시간은 $t = t/\sqrt{L/g}$ 와 같이 무차원화 된 것이며, 이 수치적으로 모사한 것을 실험치와 비교것이 Fig. 6과 Fig. 7이다.

Fig. 6는 무너지는 물기둥에 대하여 x축은 시간을, y축은 wave front를 나타낸다. ave front은

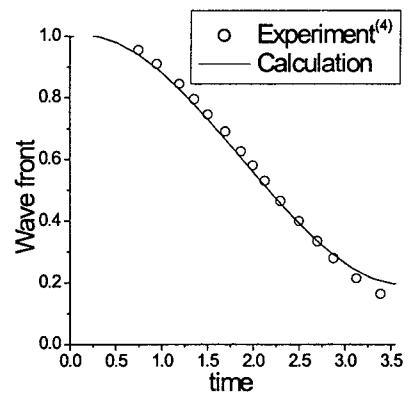


Fig. 6 Progress of the wave front (a/l) vs. time ($t' = t/\sqrt{l/g}$)

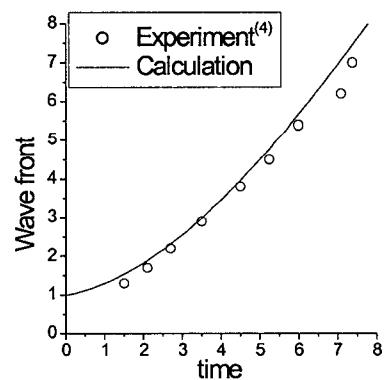


Fig. 7 Change of the column height (ξ/ξ_0) vs. time ($t' = t/\sqrt{l/g}$)

매시간의 물기둥의 너비 a 를 초기 너비 l 로 나눈 값이며 시간은 $t = t/\sqrt{L/g}$ 이다. 여기서 작은 원은 Martin & Moyce의 실험측정치이며, 실선은 수치해석 결과를 나타낸다. 실험치와 비교하였을 때, 초반의 1.5초 동안의 흐름이 앞 선 것보다 빨라지는 않고 같은 크기로 앞서가다가 약 6초 이후 빨라지는 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 7은 시간에 따른 물기둥의 높이 ξ 와 시간과의 관계를 실험치와 비교한 것이다. 여기서 높이는 초기 물기둥 높이인 ξ_0 로 무차원화 된 값이다. 실선으로 나타낸 수치적 계산 결과는 전반적으로 실험치와 잘 일치함을 볼 수 있다.

이로써 본 연구에 사용된 프로그램이 타당함을 검증하였다.

3.3 수치해석 결과

Fig. 8은 사각탱크가 좌우로 병진운동할 때의 사각탱크내의 슬로싱을 속도 벡터를 통하여 보여 주고 있다. 사각탱크에 배플을 설치한 후 병진운동 시킨 것이 Fig. 9이다. 이때 초기 물높이(F)는 0.5이며 배플 폭(W/L)은 0.25, 배플 높이(B/F)는 0.7이다.

Fig. 8은 배플이 없는 사각탱크내의 슬로싱을 보여주는데 양쪽 벽면을 따라 대부분의 큰 유동이 생기는 것을 볼 수 있다. 또한 자유 표면에서 거리가 멀어진 사각탱크의 밀면보다는 자유 표면 근처에서 큰 유동이 생기는 것을 알 수 있다. 이로써 슬로싱의 감쇠효과를 얻기 위해서는 자유

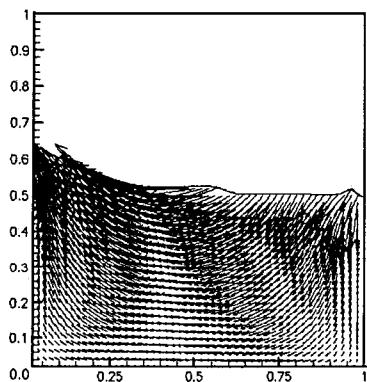


Fig. 8 Velocity vector in flow field of unbaffled-tank in harmonic motion

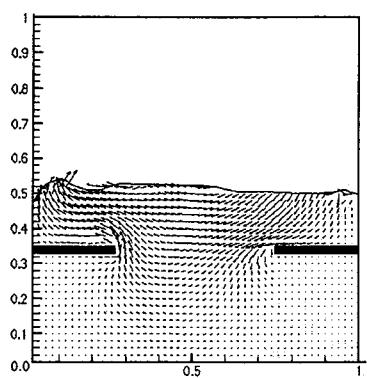


Fig. 9 Velocity vector in flow field of baffled-tank in harmonic motion

표면의 유동속도를 작게 해야 한다.

이를 위해 Fig. 9에서와 같이 벽면 양쪽에 배플을 달아 위 아래로 흐르는 유동에 제약을 주었다. 위 아래로 흐르는 유동이 배플에 의해 차단되어 자유표면에 도달하는 유속이 작아져 결과적으로 슬로싱이 작아졌음을 알 수 있다.

본 연구에서 슬로싱 감소효과를 정량화 하기 위하여 슬로싱 감쇠 계수 β (Sloshing damping coefficient)를 다음과 같이 정의하였다.

$$\beta = \frac{\sigma_{unbaffled} - \sigma_{baffled}}{\sigma_{unbaffled}} \quad (14)$$

where, $\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_N^2}{N}}$ (Standard deviation)

여기서 $\sum d_N^2$ 은 매 시간 측정된 왼쪽 벽의 물 높이의 평균에 대한 편차를 제곱하여 합한 값이며 N은 측정된 횟수이다.

Fig. 10은 사각탱크가 좌우로 병진운동할 때 W/L 의 변화에 따른 β 와 B/F 의 관계를 나타내는 곡선이다. 그라프에서 보면 B/F 가 커짐에 따라 슬로싱 감쇠효과가 증가하다가 0.7부근에서 다시 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 Cho⁽⁵⁾가 연구한 탱크가 수직방향으로 등가속 운동하는 경우와 비슷한 양상을 보인다.

한편, W/L 이 0.15에서 0.3으로 커질수록 배플이 수면에서 멀리 있을 때는 슬로싱 감쇠효과가 조금 증가하나 수면에 가까워질수록 슬로싱 감쇠효과가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 배플에 의해 나눠진 배플 위의 층이 점점 얇아지기 때문으로 보여진다. 이에 대해서는 향후 많은 연

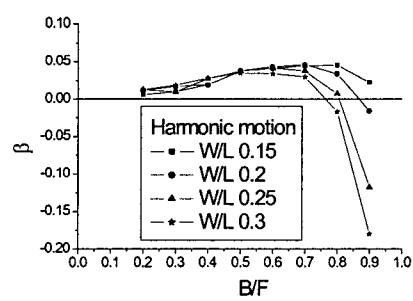


Fig. 10 The effect of baffle location on sloshing damping coefficient β for tank in harmonic motion

구가 필요하다고 본다. 또한 배풀이 수면 가까이 있을 경우에는 W/L 이 0.2 이상에서 배풀에 의한 슬로싱 감쇠효과를 볼 수 없었다. 이는 배풀의 폭이 커짐에 따라 배풀에 의한 슬로싱의 감쇠효과가 감소하는 것으로 보여진다.

Fig. 11은 사각탱크가 좌우로 병진운동을 할 때 B/F 의 변화에 따른 β 와 W/L 의 관계를 나타내는 곡선이다. B/F 가 0.6, 0.7일 경우는 W/L 이 0.5보다 클 때 슬로싱 감쇠효과가 감소하지만 B/F 가 커질수록 즉, 수면에 배풀이 가까워질수록 W/L 이 보다 작을 때부터 슬로싱 감쇠효과가 감소하기 시작하다가 W/L 이 0.25이상에서는 배풀에 의한 슬로싱 감쇠효과가 급격히 감소하여 0.3이상에서는 오히려 수면 상승을 크게 하는 것으로 나타났다.

Fig. 12는 사각탱크가 피칭운동을 할 때 사각탱크내의 슬로싱을 보여주고 있으며 사각탱크가 병

진운동을 할 때와 다른 유동을 보여주고 있다. 이 때 초기 물높이(F)는 0.5이며 배풀 폭(W/L)은 0.2, 배풀 높이(B/F)는 0.7이다. 원쪽 벽 근처의 유동은 내려오고 오른쪽 벽 근처의 유동은 올라가는 상태이며 이때 사각탱크는 중심축을 중심으로 원쪽으로 기울어지는 상태이다. 사각탱크가 병진 운동하는 경우에는 배풀이 유동의 위아래로 움직이는 것을 차단하는 기능이 더 크지만 사각탱크가 피칭운동하는 경우에는 배풀이 위 아래로 움직이는 유동을 차단하는 기능은 작고 Fig. 12처럼 유동의 움직임을 도와주기도 하고 그 반대로 역으로 내려오는 유동을 다시 위로 올리기도 하여 전체적으로 슬로싱을 크게 한다.

본 연구의 조건하의 피칭운동에서는 슬로싱 감쇠효과를 거의 볼 수 없었다.

Fig. 13은 사각탱크가 피칭운동을 할 때 W/L 의 변화에 따른 β 와 B/F 의 관계를 나타내는 곡선이

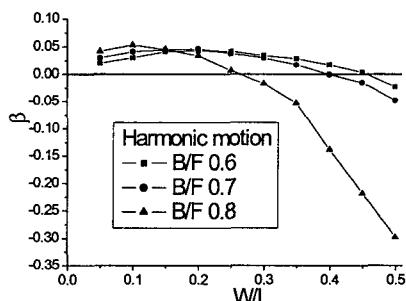


Fig. 11 The effect of the baffle width on sloshing damping coefficient β for tank in harmonic motion

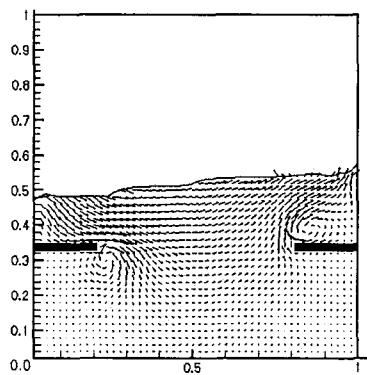


Fig. 12 Velocity vector in flow field of baffled-tank in pitching motion

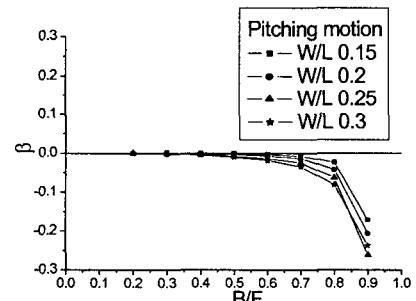


Fig. 13 The effect of the baffle location on sloshing damping coefficient for tank in pitching motion

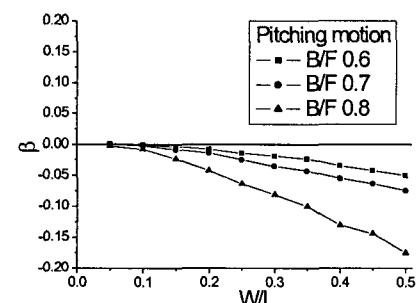


Fig. 14 The effect the baffle width on sloshing damping coefficient for tank in pitching motion

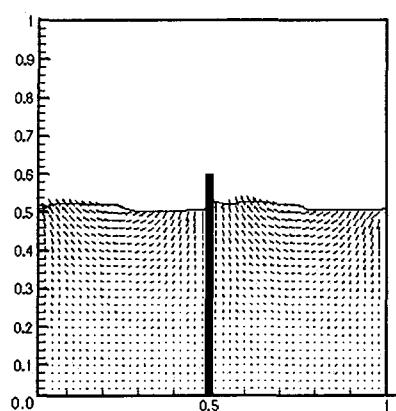


Fig. 15 Velocity vector in flow field of vertical baffled-tank in pitching motion

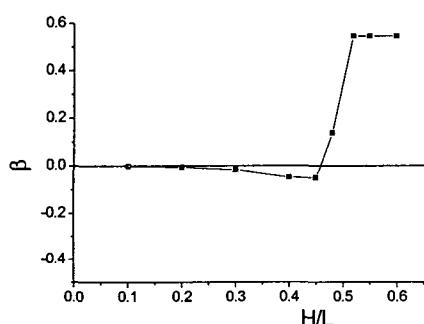


Fig. 16 Variation of β with the height change of a vertical baffle of tank in pitching motion

다. 배풀이 수면에 가까이 위치할수록 β 가 급격히 작아지는 것은 병진운동과 같은 경향을 보였다. 이는 배풀이 수면에 가까이 있을 경우 슬로싱을 증대시키기 때문으로 보인다. 그래서 W/L이 커질수록 슬로싱에 의한 변위가 커지는 것으로 해석된다.

Fig. 14는 사각탱크가 피칭운동을 할 때 B/F의 변화에 따른 β 와 W/L의 관계를 나타내는 곡선이다. 그래프에서 보면 슬로싱에 의한 변위는 W/L이 커질수록 증가되며 B/F가 커질수록 즉, 배풀이 수면 가까이 있을수록 더 크게 증가한다.

사각탱크가 피칭운동을 할 경우 배풀을 수평으로 달 때 슬로싱 감쇠효과를 얻지 못하여 사각탱

크에 배풀을 수직으로 설치하여 보았다.

Fig. 15는 배풀 폭(H/L)이 0.6일 때 사각탱크내의 슬로싱을 보여주고 있다. 사각탱크내의 유체는 수직 배풀에 의해 분리되어 배풀이 없을 때에 비해 작은 유속을 갖는다. 그리고 본 연구의 조건하에서는 수직배풀을 넘는 경우에서 해석이 되나 주기(ω)가 본 연구의 조건보다 크면 유동이 배풀에 의해 뒤게 되어 본 연구에서 사용된 VOF 방법으로 해석을 할 수 없었다.

Fig. 16은 초기 물높이(F)는 0.5이며 수직 배풀 폭(H/L)을 0.1부터 0.6까지 늘렸을 때 각각의 β 를 비교한 그래프이다. 배풀폭이 자유 표면 근처까지 커질 때에는 β 의 변화가 거의 없다. 그 이유는 자유표면 근처의 유동이 슬로싱에 많은 영향을 주는데 H/L이 작을 때는 배풀이 슬로싱에 거의 영향을 주지 않기 때문으로 생각된다. H/L이 0.5이상일 때는 자유표면의 유동의 좌우로 흐르는 것을 막아 슬로싱을 작게 하여 결과적으로 β 가 (+)로 바뀌고 그 이상 커지면서 양쪽을 분리시켜 β 는 급격히 커진다. 즉 슬로싱 감쇠효과가 커진다.

4. 결 론

본 연구에서는 VOF방법을 적용하여 임의의 움직임을 갖는 사각탱크 내의 슬로싱을 전산유체역학적으로 해석하여 배풀에 의한 슬로싱 감쇠효과를 자유표면 높이의 변위에 대한 표준편차를 이용하여 사각탱크가 병진 또는 피칭운동할 때 수평또는 수직 배풀을 설치하여 각 유형별로 비교해보았다.

연구결과를 정리해보면 다음과 같다.

(1) 자유표면 근처의 유동이 슬로싱에 큰 영향을 주며 자유표면에서 먼 유동은 슬로싱에 큰 영향을 주지 않는다.

(2) 사각탱크가 좌우로 병진운동할 경우

배풀 위치가 수면에 가까울수록 슬로싱 감쇠효과가 증가하나 수면과의 높이비가 0.7이상에서는 다시 감소한다. 그리고 배풀 폭이 커질수록 슬로싱 감쇠효과가 증가하지만 배풀 폭이 0.25이상에서 다시 감소한다.

(3) 사각탱크가 피칭운동을 할 경우

본 연구의 조건하에서는 수평 배풀에 의한 슬로싱 감쇠효과를 볼 수 없었으며 다만 경향은 비

슷한 것으로 나타났다. 이 경우 수직 배풀을 사용하여 슬로싱을 작게 할 수 있음을 알 수 있었는데 수직 배풀 폭이 0.48이상에서 슬로싱 감쇠 효과가 있으며 0.5이상에서 사각탱크내의 유체분할로 인하여 슬로싱 감쇠 효과가 크게 증가하며 그 이상에서는 감쇠효과가 더 커지지 않고 일정한 값을 갖는다.

후기

이 논문은 2000년도 충남대학교 자체연구비의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- (1) Harlow, F.H. and Welch, J.E., 1965, "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface," *Phys. Fluid*, Vol. 8, No. 12, pp. 2182~2189.
- (2) Hirt, C.W., Amsden, A.A. and Cook, J.L., 1974, "An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for All Speed," *J. Comput. Phys.*, Vol. 14, pp. 227~253.
- (3) Hirt, C.W. and Nichols, B.D., 1981, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *J. Comput. Phys.*, Vol. 39, pp. 201~225.
- (4) Martin, J.C. and Moyce, W.J., 1952, "Part IV an Experimental Study of the Collapse of Liquid Columns on a Rigid Horizontal Plane," *Phil. Trans. Royal Society*, Vol. 244, pp. 312~324.
- (5) Cho, J.R., Kim, M.J., Lee, S.Y. and Huh, J.W., 2002, "Dynamic Suppression Effects of Liquid Container to the Baffle Number and Hole Diameter," *Computational Structural Engineering*, Vol. 15, No.1, pp. 147~154.