

유체저장탱크의 슬로싱 특성 연구

°홍 성 진*, 이 영 신**, 최 명 환***

A Study on the Sloshing Characteristics on the Tank Containing the Fluid

°Song-Jin Hong*, Young-Shin Lee**, Myoung-Hwan Choi***

ABSTRACT

This paper present the results of finite element analysis to examine the sloshing characteristics of the cylindrical and rectangular tank partially fluid-filled. The sloshing characteristic for the existence and the non-existence of the baffle are investigated and the results compared with the references. For the rectangular tank, the vertical displacements are used to study of the sloshing characteristics. But for the cylindrical tank, the damping factors obtained from the vertical displacements of free surface with the depth of ring baffle are used to study of the sloshing characteristics. The adaptive meshing method in the ABAQUS 5.8/Explicit is used for the sloshing analysis.

1. 서론

연료 탱크와 같은 유체 저장 구조물들은 유체와 구조물 사이의 상호 간섭에 의해서 유체가 채워지지 않았을 때와는 다른 동적 특성을 나타내고 있어 오래 전부터 많은 공학자들의 관심의 대상이 되어 왔다. 유체와 구조물 사이의 상호 간섭은 지반 구조물의 경우 지진이나 풍압, 비행체의 경우 비행체 자체의 움직임 등이 유체 저장 구조물에 외력으로 작용을 하게 되면 그 결과로 구조물은 유체에 힘을 전달하고 유체는 다시 구조물에 작용을 하면서 발생하게 된다. 이때 외력을 받는 유체 저장 탱크내의 유체 자유표면의 주기적인 운동 즉 출렁거리는 현상을 슬로싱(sloshing)이라고 하는데 이 슬로싱 주기가 구조물의 고유진동수 부근에서

발생할 경우 슬로싱으로 인하여 발생하는 힘(force) 및 모멘트(moment)가 크게 되어 구조물에 큰 영향을 미치며 심한 경우 구조물 파단의 위험성을 초래할 수도 있다. 더욱이 공학이 발달하면서 구조물의 설계시 경제적인 측면을 고려하여 보수적인 설계에서 탈피하여 더 얇고 가느다란 부재를 사용하는 추세에 있는데, 이러한 경량화된 구조물들은 유체에 의한 불안정성이 더욱 증가하게 된다.

선진국에서는 이미 40여년 전부터 슬로싱 효과를 고려하여 유체저장 탱크 내에 적당한 간격의 격막이나 여러 가지 형태의 배플(baffle)을 설치하는 등의 슬로싱 제어를 위한 노력이 수행되고 있으나, 국내의 경우 이에 대한 체계적인 연구는 전무한 실정이다. 따라서 유체저장 탱크에서 저장 유체의 슬로싱의 영향을 최소화하거나, 이를 방지하기 위한 연구가 필요하다고 할 수 있다.

슬로싱 문제는 항공우주 분야에서 연료탱크 내의 유동 해석을 위해 먼저 시작되었으며, 선박의 대형화 LNG선의 등장 등으로 인해 조선분야에서

* 충남대학교 기계설계공학과 대학원

** 정희원, 충남대학교 기계설계공학과 교수

*** 정희원, 충남대학교 기계설계공학과 Post-Doc

도 슬로싱에 대한 연구가 진행되고 있다. 미국 등의 선진국에서는 1950년대부터 슬로싱에 대한 연구가 시작되어 1960년대 초에 절정을 이루고 집대성되었다. 특히 NASA를[1] 중심으로 항공기, 우주 왕복선 등의 개발과 더불어 연료탱크 적재연료의 슬로싱 현상을 수학적으로 모델링하고, 이의 해석을 통하여 구조 및 조정 안전성을 평가하는 기법에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 우주항공/유도무기 구조물의 설계시 이와 같은 연구를 통하여 얻은 설계기준 및 해석 기법을 적용하여 왔다. 그 이외에도 적재연료의 슬로싱 현상에 의하여 연료탱크에 작용하는 힘과 모멘트를 예측하는 유체역학적 해석[3]과 유체의 슬로싱 현상을 기계역학적으로 해석할 수 있는 기법연구[4]가 수행되었다. 또한 최근에는 유한요소해석[5]을 이용하여 유체와 탱크 구조물을 연계 해석함으로써 슬로싱 현상을 규명하려는 연구가 수행되고 있다.

국내의 경우 최근 윤성기[6]등은 과학로켓 발사체의 동특성 해석에 관한 연구를 수행하였으며, 액체연료의 슬로싱 영향을 평가하기 위하여 동력학적 등가 모델, 슬로싱 억제를 위한 배플 설계 및 발사체의 유한요소 해석을 위한 모델 생성에 대하여 연구하였다. 황성환[7]은 동체의 일부분을 연료탱크로 사용하는 비행체에 대하여 슬로싱의 첫 번째 모드를 나타낼 수 있는 운동방정식을 유도하고 롤 운동 제어기를 설계하였다.

본 연구에서는 유체저장 탱크가 외부로부터의 영향으로 인해 움직임이 있을 때 저장 탱크 내 유체의 거동을 유한요소해석을 통하여 예측해 보았다. 동일한 조건에서 배플이 있는 경우 그리고 배플의 크기에 따른 유체 거동을 유한요소 해석을 통하여 예측해보고 결과들을 Ref. [1]과 비교해 보았다.

2. 유한요소 해석

본 연구에서 고려한 유체 저장 탱크는 사각형과 원형의 단면을 가지는 두 가지 경우 즉, Fig. 1과 Fig. 2에 제시된 것과 같은 형상의 저장 탱크를 고려하였다. 해석 결과들은 각각 Ref. [2], Ref. [1] 비교/검토하였으며 배플이 있는 경우와 없는 경우에 대해서도 각각 비교를 해보았다.

해석 코드는 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS 5.8/Explicit 코드를 이용하였으며, 해석 기법은 adaptive meshing을 사용하였다. Adapti-

meshing 기법은 Lagrangian 과 Eulerian 접근법을 조합한 Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 접근법을 의미한다. Lagrangian 관점에서는 물질은 요소의 변형된 경계 내로 제한되며, Eulerian 관점에서는 메쉬는 공간에 고정이며, 물질은 요소를 통과하여 유동이 가능하다.

유한요소해석에 사용된 요소는 모든 경우에 대하여 저장 탱크에 대해서는 4개의 노드로 이루어진 강체 요소 R3D4요소를 사용하였고, 유체는 8개의 노드로 이루어진 육면체 요소 C3D8R 요소를 사용하였다.

유한요소 해석에 사용되는 저장 유체는 모두 물로 가정하였으며 그 물성 값들을 Table 1에 제시하였다. 일반적으로 사용하는 steel의 경우 유체에 비해서 상당히 큰 강성을 가지므로 본 연구에서는 저장 탱크와 배플을 강체로 가정하여 해석을 수행하였다. 따라서 본 연구에서는 탱크와 배플의 두께나 물성 값들을 고려하지 않았다. 해석 결과들과 참고 문헌의 연구 결과들과의 비교를 위해 부득이하게 사각 단면 저장 탱크는 SI 단위를 원형 단면 저장 탱크는 US 단위를 사용하였다.

Table 1 Material properties of fluid

	Material properties	SI	US
Liquid (water)	Density (ρ)	1000 kg/m ³	0.92×10^{-4} lb s ² /in ⁴
	Wave speed	45.85 m/s	1805.79 in/s
	Shear viscosity	1.131×10^{-5} s ⁻¹	1.5×10^{-8} s ⁻¹
	Bulk modulus (K)	2.07 GPa	300 psi

2.1 사각 단면 저장 탱크

Fig. 1에 제시된 해석 모델은 상부가 개방되어 있는 육면체 형태의 유체 저장 탱크로써 800×400×400mm의 제원을 가지고, 유체는 탱크 높이에 대하여 75%(240mm)가 채워진 상태이며, Ref. [2]의 해석모델과 동일한 형태이다. 설치되는 배플의 폭은 탱크의 폭과 동일하며 탱크 바닥으로부터 120mm 높이에 설치되어 있어 배플이 없는 곳은 유체의 유동이 가능하도록 하였다. 또한 유한요소

해석에서 탱크와 배플을 강체로 가정하여 해석을 수행하기 때문에 탱크 및 배플의 두께는 고려하지 않았다.

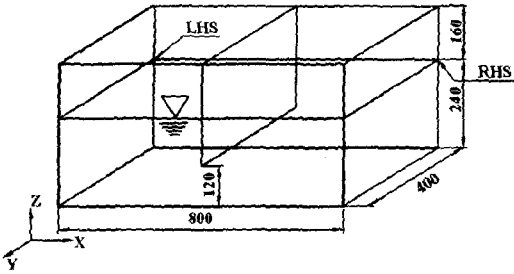


Fig. 1 Configuration of a tank partially fluid-filled

탱크내의 유체가 슬로싱 현상을 일으키기 위한 외력의 작용은 식(1), (2)에 의해서 x, y 방향으로의 변위를 동시에 작용시킴으로써 구현하였다. 외력의 작용은 식 (1), (2)에 보여지는 것처럼 5초 동안 변위를 작용하고 5초 이후에는 외력의 작용이 없는 것으로 가정을 하였고, 총 10초 동안 해석을 수행하였다.

$$x(t) = 0.02 \sin\left(\frac{\pi t}{5}\right) \cos(2\pi t) \text{ for } 0 \leq t \leq 5 \text{ secs} \quad (1)$$

$$x(t) = 0 \text{ for } t > 5 \text{ secs}$$

$$y(t) = 0.005 \sin\left(\frac{\pi t}{5}\right) \cos(2\pi t) \text{ for } 0 \leq t \leq 5 \text{ secs} \quad (2)$$

$$y(t) = 0 \text{ for } t > 5 \text{ secs}$$

Fig. 2는 배플이 없는 경우의 사각 단면 저장 탱크에 대한 유한 요소 모델을 보여주고 있다.

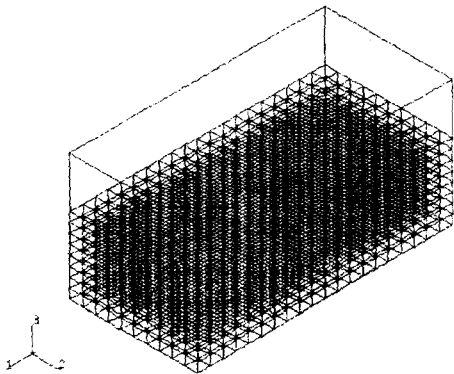


Fig. 2 FE model of rectangular tank partially fluid-filled for sloshing analysis

2.2 원형 단면 저장 탱크

본 연구에서 고려한 원형 단면 저장 탱크의 형상은 Fig. 2에 제시된 것과 같이 상부가 개방되어 있는 실린더 형태의 저장 탱크이다. Table 2에 탱크의 계원들이 제시되어 있고, 유체는 탱크 높이에 대해서 4/5(80%)의 높이 만큼 채워져 있다. 설치되는 배플의 크기 및 위치는 Table 2에 제시된 것과 같이 몇 가지 경우에 대해서 고려하였으며, 탱크와 배플의 두께 및 물성 값들은 유한요소 해석에서 강체로 가정을 하였기 때문에 고려하지 않았다. 원형 단면 저장 탱크의 배플은 사각 단면 저장 탱크의 격막형 배플과는 달리 링 형태의 배플을 고려하여 그 효과를 검증하여 보았다.

링 형태의 배플에 관하여 그 효과를 식으로 나타내려는 노력은 Miles[1]에 의해 최초로 수행되었다. Miles는 이상유체 포텐셜 이론을 이용하여, 에너지 감소율을 구하여 댐핑 계수를 식으로 나타내었고, 그 계수들을 무차원 해석을 통하여 결정하였다. 본 연구에서는 Miles가 제안한 식을 이용하여 링 배플이 슬로싱에 미치는 영향을 연구하였으며, 식 (3)이 Miles가 제안한 댐핑 계수를 구하는 식이다.

$$\delta = 5.66\pi e^{-4.6 \frac{d_s}{R}} \left[\frac{R^2 - (R-w)^2}{R} \right]^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\zeta_w}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

여기서 δ 는 댐핑 계수, d_s 는 유체의 자유표면으로부터 배플까지의 거리, R 은 탱크 반경, w 는 배플 폭, ζ_w 는 탱크 벽면에서 유체의 수직 변위를 의미한다.

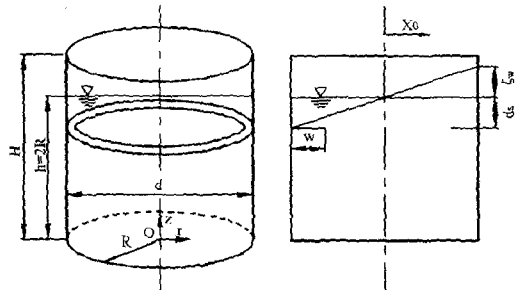


Fig. 3 Configuration of a cylindrical tank partially fluid-filled for sloshing analysis

Table 2 Dimensions of cylindrical tank

	Dimension	Unit	Value
Tank	Radius (R)	in	6
	Height of tank (H)	in	15
	Width of baffle (w)	in	0.738, 1.446
	Depth of baffle (d _b)	in	0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0, 3.6, 4.2
	Height of liquid (h)	in	12

본 연구에서는 배플 폭/반경의 비(w/R)가 각각 0.123, 0.241인 두 경우를 고려하였으며, 또한 정해진 배플 폭에 대해서 유체 자유표면으로부터 배플의 거리 즉 배플의 깊이/반경의 비(d_b/R)가 각각 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7인 경우에 대해 구를 수행하였다. 또한 저장 유체는 물로 가정하였다. 유체의 물성 값은 Table 1에 제시된 것과 동일하다.

탱크내의 유체가 슬로싱 현상을 일으키기 위한 외력의 작용은 식(4)에 의해서 x 방향(반경 방향)으로의 변위가 작용하는 것으로 가정하였다. 외력의 작용은 식(4)에 보여지는 것처럼 2초 동안 변위를 작용하고 2초 이후에는 외력의 작용이 없는 것으로 가정을 하였고, 총 해석 시간은 총 3초이다.

$$x(t) = 0.1 \sin(2\pi t) \quad \text{for } 0 \leq t \leq 2 \text{ secs} \quad (4)$$

$$x(t) = 0 \quad \text{for } t > 2 \text{ secs}$$

3. 결과 및 고찰

부분적으로 유체가 채워진 유체 저장 탱크의 슬로싱 특성을 유한 요소 해석을 통하여 고찰하여 보았다. 본 연구에서 고려한 유체 저장 탱크는 단면 형상이 사각형과 원형인 두 가지 형태의 저장 탱크이며 각각에 대하여 배플이 있는 경우와 없는 경우를 고려하여 해석을 수행하였고, 그 결과들을 비교하여 보았다.

Fig. 4는 사각 탱크 내 유체의 시간에 따른 거동을 보여주고 있다. 시간에 따른 유체의 슬로싱 현상을 확실하게 볼 수 있었으며, Ref. [2]의 결과와 아주 유사한 경향을 보이고 있었다. Fig. 5은 초기에 유체가 저장 탱크와 접하는 두 노드점(RHS,

LHS)의 시간에 따른 수직 방향으로의 변위를 나타낸 것이다. 최대 수직 변위에서는 최대 약 31%의 오차를 보이고 있지만 시간 경과에 따른 자유표면의 거동은 본 연구에서의 해석 결과와 Ref. [2]의 결과가 아주 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 배플이 있는 경우 유체와 저장탱크가 접하는 지점에서의 두 노드점(RHS, LHS)의 시간에 따른 수직 방향으로의 변위를 제시하고 있다. Fig. 5와 6을 비교하였을 때, 배플이 없는 경우는 최대 변위 값이 약 0.12mm인데 반하여 배플이 있는 경우는 최대 변위 값이 약 0.044mm으로 배플에 의해서 상당한 감쇠 효과(약 63.3%의 최대 높이 감소)가 있는 것으로 나타났다. 또한 시간에 따른 변위의 크기도 배플이 없는 경우는 크게 감소하지 않고 일정한 반면 배플이 있는 경우는 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 Fig. 5와 6을 비교해보면 최대 수직 변위 값이 발생하는 시간이 배플이 있을 경우 상당히 앞당겨지는 것을 알 수 있다. 이는 격막형 배플로 인해서 유체가 움직일 수 있는 거리 즉 슬로싱 파장의 감소로 슬로싱 진동 주기가 짧아지기 때문에 발생한다고 판단된다.

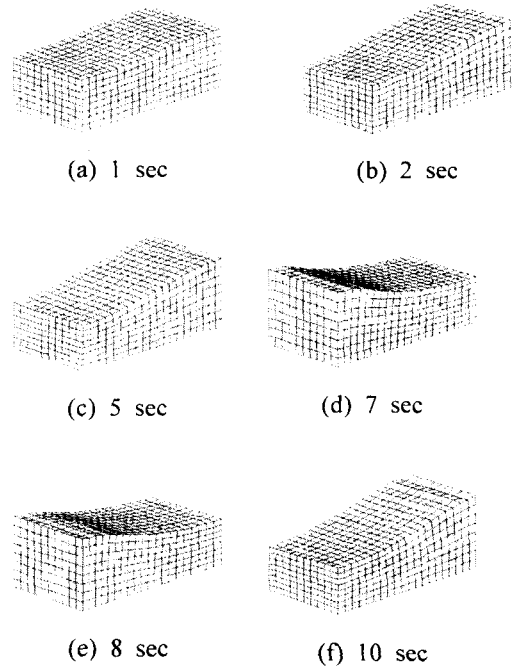


Fig. 4 3D Simulation of rectangular tank sloshing

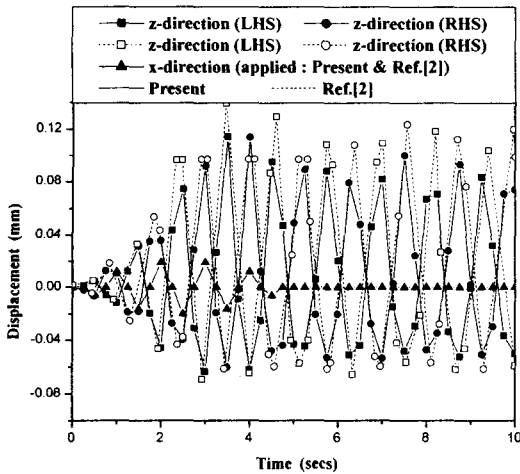


Fig. 5 Displacement of rectangular tank reference node in x and LHS and RHS point in z direction

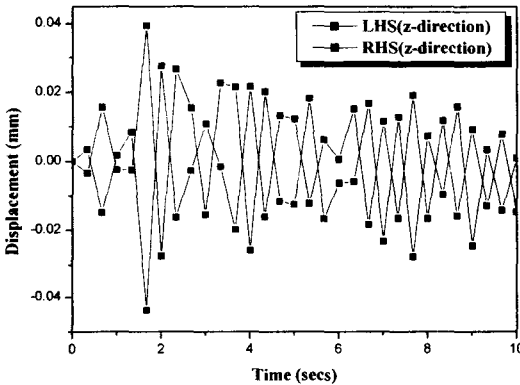


Fig. 6 Displacement of rectangular tank LHS and RHS points in z direction

Fig. 7은 $w/R=0.123$ 일 때 각 배플 깊이에 대해서 동일한 위치에서 유체의 시간 경과에 따른 자유표면의 높이의 변화를 배플이 없는 경우와 함께 나타낸 그림이다. 여기서 유체의 높이 변화를 관찰한 위치는 탱크 벽면과 접하고 있는 자유표면이며, 하중 작용방향(x-방향)과 동일선상에 있다. 자유표면으로부터 배플까지의 거리가 멀어질수록 자유표면의 높이 변화의 값이 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 $ds/R=0.4$ 까지는 ds/R 의 비가 커질수록 높이 변화량도 상대적으로 큰 폭으로 증가하지만 $w/R=0.4$ 이후에는 ds/R 의 비가 커지더라도 높이 변화량은 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다. 또한

$ds/R=0.4$ 이상에서 높이 변화의 최대 값이 배플이 없는 경우의 값과 거의 유사함을 알 수 있다. 이는 슬로싱이 유체의 자유표면의 주기적인 운동이기 때문에 배플이 자유표면 근처에 있을 경우 슬로싱 운동이 배플에 의해서 영향을 받지만, 자유표면으로부터 멀어지게 되면 슬로싱 운동이 배플에 의해서 영향을 받지 않기 때문이다.

Fig. 8은 $w/R=0.241$ 인 경우 각 배플의 위치에 따른 유체 자유표면의 시간에 따른 높이 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 7에서와 마찬가지로 배플의 위치가 유체의 자유표면으로부터 멀어질수록 유체 자유표면에서 높이 변화의 크기가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 $w/R=0.123$ 의 경우와 마찬가지로 배플이 자유표면으로부터 멀어질수록 유체 자유표면의 높이 변화량의 크기는 배플이 없는 경우와 거의 같은 값을 가지는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 각 배플 폭에 대해서 배플 위치에 따른 감쇠계수의 경향을 Ref. [1]의 결과와 비교하여 제시한 것이다. 여기서 감쇠계수는 식(3)에 의해서 구해진 값들이다. 본 연구의 결과들과 Ref. [1]의 결과 사이에서 정량적인 결과를 비교하기에는 다소 무리가 있지만 배플 위치에 따른 감쇠계수의 감소 경향은 Ref. [1]의 결과와 유사하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 또한 배플 폭의 크기가 큰 경우가 작은 경우보다 더 나은 감쇠 효과를 있음을 알 수 있다. 그러나 배플의 위치가 자유표면으로부터 멀어질수록 배플에 의한 감쇠 효과는 두 경우 모두 비슷한 값을 보이고 있다. 이는 Ref. [1]의 결과에서도 일치하고 있다.

앞서 언급하였듯이 배플의 위치 즉 배플 깊이/반경의 비(ds/R)가 커지게 되면 배플에 의한 효과가 많이 줄어들고 있음을 여러 그림들을 통해서 알 수 있다. 배플 폭에 따른 감쇠 효과는 배플 폭의 크기가 큰 경우가 배플 폭이 작은 경우와 비교해서 배플의 위치가 자유표면 근처에 있을 때 더 크게 나타나지만 배플의 위치가 자유표면으로부터 멀어질수록 두 경우 모두 비슷한 값을 보이고 있다. 이렇듯 배플의 위치가 자유표면으로부터 멀어질수록 배플의 영향이 작아지게 되는 것은 슬로싱 운동이 유체 자유표면의 거동에 의해서 일어나는 현상이기 때문에 배플이 자유표면 근처에 위치할 경우에는 슬로싱 운동에 영향을 미치지만 자유표면으로부터 멀어지게 되면 유체의 슬로싱 운동은 큰 영향을 받지 않기 때문이다.

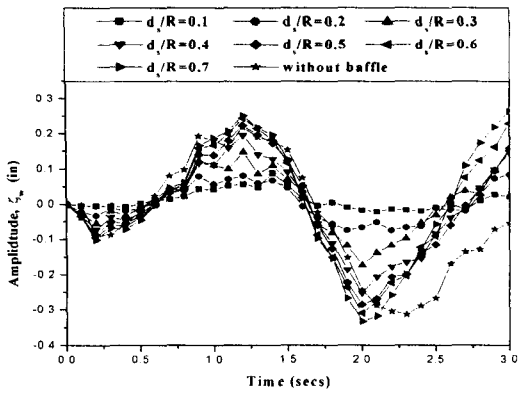


Fig. 7 Vertical fluid displacement of cylindrical tank at free surface (case : $w/R = 0.123$)

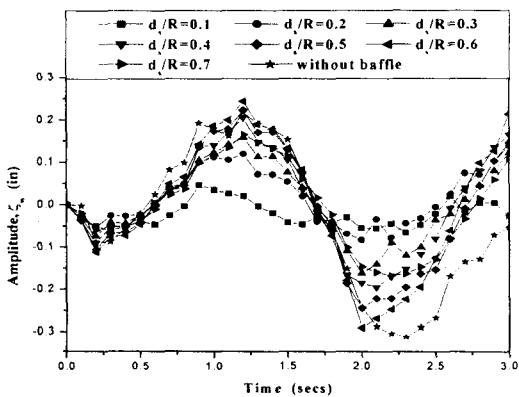


Fig. 8 Vertical fluid displacement of cylindrical tank at free surface (case : $w/R = 0.241$)

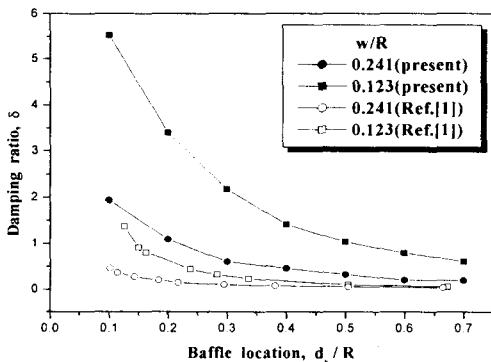


Fig. 9 Variation of damping factor of cylindrical tank with baffle location

4. 결론

부분적으로 유체가 채워진 유체 저장 탱크에 대한 슬로싱 해석을 유한요소법을 이용하여 수행하였다. 배플 폭, 자유 표면으로부터 배플의 거리들

을 변수로 하여 시간 경과에 따른 탱크 벽면에서 자유 표면의 높이 변화를 고찰하였으며, 배플 깊이 에 대한 감쇠 계수 값을 구하였다.

본 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 사각 단면 탱크의 경우 탱크 중간에 격막형 배플을 설치함으로써 탱크 벽면에서 자유 표면의 최대 높이가 약 63.3% 감소하는 효과를 보였다.

(2) 격막형 배플은 슬로싱 진동주기를 짧아지게 한다. 이로 인해서 탱크의 고유치 값 특히 슬로싱 진동수에 많은 변화를 줄 것으로 예상된다.

(3) 배플이 자유표면 근처에 있을 때에는 배플의 위치가 감쇠 계수에 대해서 큰 영향을 주고 있지만, 자유표면으로부터 충분히 멀리 떨어진 경우 감쇠 계수는 배플의 위치에 의해서 많은 영향을 받지 않는다.

(4) 배플 폭이 넓어질수록 배플 폭에 의한 감쇠 계수는 더 커진다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 협동연구과제로 지원받았으며 관계자 여러분에게 깊이 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] J. R. Roberts, E. R. Basurto and P. Chen, "Slosh Design Handbook," NASA CR-406, 1966
- [2] D. C. Webb and K. Kormi, "The Simulation of Fuel Sloshing using Finite Element Methods," 1999 ABAQUS User's Conference, pp. 769-783, 1999
- [3] H. F. Bauer, "Liquid Sloshing in a Cylindrical Quarter Tank," AIAA Journal, Vol. 1, pp. 2601-2602, 1963
- [4] J. S. Mersevole and A. Fortini, "Slosh Dynamics in a Toroidal Tank," J. Spacecraft, Vol. 24, No.6, pp. 523-531, 1987
- [5] S. S. Babu and S. K. Bhattacharyya, "Finite Element Analysis of Fluid-Structure Interaction Effect on Liquid Retaining Structures due to Sloshing," Computers and Structures, Vol. 59, pp. 1165-1171, 1996.
- [6] 윤성기, 윤정흠, 유준태, "3단형 과학로케 개발 사업 (I, II) - 발사체 동특성 해석연구", 한국항공우주연구소, 1998
- [7] 황성환, "유체연료 슬로싱 현상이 있는 비행체의 롤 운동 제어기 설계에 관한 연구", 석사학위논문, 서울대학교 대학원, 1990