

수평으로 놓인 배플형 연료탱크의 슬로싱 고유진동에 관한 유한요소 해석

Finite Element Analysis of Sloshing Eigen Behavior in Horizontal Baffled Fuel Tank

조진래* 하세윤* 이홍우* 박태학** 이우용**
Cho, Jin-Rae Ha, Se-Yoon Lee, Hong-Woo Park, Tae-Hak Lee, Woo-Yong
(논문접수일 : 2002년 4월 29일 ; 심사종료일 : 2002년 12월 3일)

요 지

본 논문은 배플을 설치한 수평으로 놓인 원통형 탱크내 슬로싱 고유진동에 대한 유한요소 해석을 다룬다. 지배방정식으로 포텐셜 이론을 기반으로 한 라플라스 방정식을 적용한다. 이 문제를 선형의 등매개 요소를 적용한 유한요소법을 이용해 해석한다. 탱크와 배플은 강체로 가정하였으며, 배플의 효과 구현은 배플의 설치 위치에 절점을 두 개로 분리함으로써 얻을 수 있다. 고유주파수와 고유모드의 추출을 위하여 Lanczos 변환법 및 Jacobi 반복법을 도입하였다. 종진동과 횡진동 모드에 대한 수치 해석결과가 참고 문헌과 비교해 볼 때 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 유체 높이, 배플 개수, 내공 크기, 배플 위치 등의 파라메트릭 해석을 통하여 슬로싱 특성 및 링형 배플의 영향을 고찰하였다.

핵심용어 : 슬로싱, 격막, 유한요소, 고유주파수, 모드 형상, 종동요, 횡동요

Abstract

This paper deals with the FE analysis for the free vibration of sloshing in horizontal cylindrical tank with baffles. We use Laplace equation based on potential theory as governing equation. This problem is solved by FEM using linear isoparametric elements. We assume that the tank as well as baffles is rigid body and by separating nodes into two at the baffle location, baffle effect is obtained by separating nodes into two at the baffle location. For the calculation of natural frequencies and mode shapes, we introduce Lanczos transformation and Jacobi iteration methods. Numerical results of the first longitudinal and transverse modes, while comparing with literature cited, are very good. In order for the baffle effects on the free vibration of sloshing, various combinations of baffle parameters, which are location, inner diameter and number, are examined.

Keywords : *Sloshing, Baffle, Finite element, Natural frequency, Mode shape, Longitudinal mode, Transverse mode*

* 책임저자, 정회원 · 부산대학교 기계기술연구소
전화: 051-510-2467; Fax: 051-514-7640
E-mail: jrcho@pusan.ac.kr

* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

** 국방과학연구소

• 이 논문에 대한 토론을 2003년 3월 31일까지 본 학회에
보내주시면 2003년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

슬로싱(sloshing)은 용기가 움직일 때 그 속에 있는 액체의 자유표면의 움직임에 의미한다.¹⁾ 이러한 슬로싱은 공진이 일어날 경우 자유표면의 움직임이 매우 커지게 되며, 그에 따라 높은 충격압을 용기벽에 가할 수 있고 운반체의 안정성(stability)에도 많은 영향을 주게된다.

실제로, 슬로싱은 미사일이나 우주선의 상승 단계(ascend phase)에서 연료탱크의 과도한 처짐이나 파괴와 같은 구조적 손상을 초래하였다.²⁾ 따라서, 운반체의 안전성을 확보하기 위하여 슬로싱 억제대책이 필요하게 되며, 일반적으로 링형 배플 설치에 가장 쉽고 널리 이용되고 있다.

기본형상에 대한 슬로싱 해석은 많은 연구자들에 의해 이론 및 실험적 방법으로 수행되어왔다.^{3)~5)} 반면, 복잡한 형상이나 배플이 설치된 경우의 슬로싱 해석은 이론적 접근이 용이하지 않으며 대부분의 경우 실험에 의한 경험식과 수치해석을 통해 결과를 예측하게 된다. 한편, 수직 원통형 탱크에 대해서는 1950년대 이후 활발하게 연구되어 왔지만, 수평상태의 원통형 탱크에 대한 연구는 몇몇 연구자들만이 결과를 발표하였다. 대표적으로 McIver⁶⁾는 수평상태의 원통형 탱크에 대해 횡진동만을 고려한 고유주파수를 산정하였고, 신장용 등⁷⁾은 슬로싱 고유주파수에 대해 이론해와 실험자료를 비교, 분석하여 간단한 경험식으로 나타내었다. 하지만, 이러한 연구들은 배플의 설치에 따른 슬로싱 변동은 고려하지 않았다.

본 논문에서는 배플을 설치한 수평상태의 원통형 탱크 내 유체의 슬로싱 고유진동에 대해 유한요소 해석을 수행하였다. 유체의 Sloshing은 공진이 일어날 경우 대변형이 일어나므로 Nonlinear문제이지만 본 논문에서는 유체 움직임에 대한 관심보다 고유주파수 및 고유모드에 대한 연구가 목적이므로 비점성, 비압축성 및 비회전성 유체에 대한 선형방정식인 포텐셜 이론을 기반으로 한 라플라스 방정식을 적용하였다. 고유주파수와 고유모드 산출을 위해 Lancos변환법과 Jacobi반복법을 이용하였다.⁸⁾ 다른 문헌과의 비교를 통하여 프로그램의 타당성을 검토하였다. 또한, 파라메트릭 해석을 통하여 슬로싱 특성 및 링형 배플의 영향을 고찰하였다.

2. 유한요소 근사화

Fig. 1과 같이 수평으로 놓인 원통형 탱크 내 유체

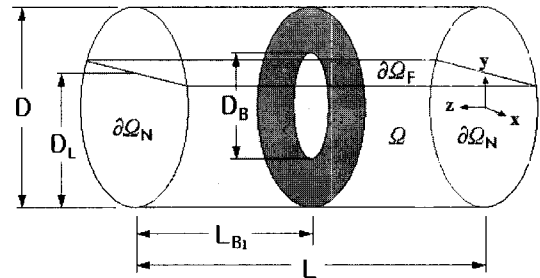


Fig. 1 Parametric variables in horizontal tank

영역을 Ω 으로 나타내고 유체와 탱크와의 경계면을 $\partial\Omega_N$ 그리고, 자유표면을 $\partial\Omega_F$ 나타낸다. 그리고, 좌표계의 원점을 아래 그림과 같이 탱크의 오른쪽 측면 원통의 중앙에 xyz좌표계를 나타내었다.

2.1 수학적 모델링

유체는 비점성, 비압축성 그리고 비회전성의 이상유체로 가정한다. 따라서, 지배방정식은 속도포텐셜 ϕ 에 의해 표현되어지고 라플라스 방정식(Laplace equation)으로 표현된다.⁹⁾

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

액체의 자유 표면에서 선형화된 경계조건은 식(2)와 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad \text{on } \partial\Omega_F \quad (2)$$

여기서, g 는 중력가속도를 나타낸다. 액체와 강체탱크의 경계에서 탱크벽에 수직인 방향의 속도가 '0'이 되므로 이때의 선형화된 경계조건은 식(3)과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on } \partial\Omega_N \quad (3)$$

여기서, $\partial/\partial n$ 은 경계에서 수직 방향성분에 대한 편미분을 의미한다.

2.2 유한요소정식화

식(1)의 라플라스 방정식을 변분화하기 위해, 시험함수(test function) ϕ 를 곱하여 변분정식화하면 다

음의 식(4)를 얻을 수 있다.

$$\int_{\Omega} \nabla \phi \cdot \nabla \phi d\Omega = -\frac{1}{g} \int_{\partial\Omega} \phi \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} dS \quad (4)$$

유한요소 이산화를 위해 속도포텐셜 ϕ 와 시험함수 ϕ 를 각각 다음과 같이 정의한다.

$$\phi = \sum_{i=1}^8 N_i \bar{\phi}_i = \mathbf{N} \bar{\phi} \quad (5)$$

$$\dot{\phi} = \sum_{i=1}^8 N_i \dot{\bar{\phi}}_i = \mathbf{N} \dot{\bar{\phi}} \quad (6)$$

여기서, N_i 는 형상함수(shape function)이고, $\bar{\phi}_i$ 와 $\dot{\bar{\phi}}_i$ 는 요소내의 절점값을 나타낸다. 식(4)은 식(5)와 식(6)을 이용하여 식(7)의 유한요소 행렬 방정식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{K} \bar{\phi} + \mathbf{M} \ddot{\bar{\phi}} = 0 \quad (7)$$

여기서, $\ddot{\bar{\phi}} = d^2 \bar{\phi} / dt^2$ 이며, \mathbf{K} 와 \mathbf{M} 행렬은 다음의 적분식으로 표현되어 진다.

$$\mathbf{K} = \int_{\Omega} (\mathbf{D}\mathbf{M})^T \mathbf{D}\mathbf{N} d\Omega \quad (8)$$

$$\mathbf{M} = \frac{1}{g} \int_{\partial\Omega} \mathbf{N}^T \mathbf{N} dS \quad (9)$$

여기서, \mathbf{D} 는 선형 미분 연산자를 의미한다. 고유저동 해석을 위해 절점벡터 $\bar{\phi}$ 를 단순조화운동(simple harmonic motion)으로 가정하면, $\bar{\phi} = \bar{\phi}_i e^{i\omega t}$ 가 되고, ω 는 시스템의 고유주파수를 나타낸다. 이를 식(7)에 대입하여 정리하면 다음의 유한요소 행렬 방정식이 된다.

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \bar{\phi} = 0 \quad (10)$$

여기서, ω^2 은 특성방정식의 근으로 정의되므로 행렬의 크기($\mathbf{N} \times \mathbf{N}$)가 증가하면 일반적인 직접법(direct

method)으로는 불가능하다. 아울러 고유치 해석에 있어서 공학적인 관심은 모든 주기에 있지 않고 최저차의 몇 개에만 한정되어 있다. 따라서, 대표적인 Lanczos 변환기법을 사용하여 식(10)에 표시된 ($\mathbf{N} \times \mathbf{N}$)행렬의 시스템을 원하는 저차주파수의 개수 n ($n < \mathbf{N}$)에 해당하는 축소된 ($n \times n$)행렬의 시스템을 만든다. 축소화된 행렬의 시스템은 Jacobi 기법으로 불리는 반복기법으로 고유주파수 및 고유모드를 계산한다.

3. 수치해석결과

앞절에서 전개된 이론 전개를 바탕으로 유한요소 해석을 위한 전처리기(pre-processor)와 해석기(processor)를 포함한 시험 프로그램을 작성하였다.

프로그램은 포트란 언어를 이용하여 구현하였으며 Pentium PC 환경에서 수행할 수 있다.

Fig. 2는 전처리기를 이용하여 생성된 유체의 실제 유한요소 격자를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 강제배플 효과를 구현하기 위하여 배플 설치위치에 유체 절점을 두 개로 분리하였으며, 실제 두 절점사이의 틈은 존재하지 않는다. 즉, 배플의 두께는 무시하였다. 한편, 해석기는 Sky-Line 법을 적용한 가우스 소거법을 사용하였으며, 생성된 격자 및 결과의 가시화는 범용 유한요소 전·후 처리기인 MSC/PATRAN에서 제공하는 PCL(Patran Command Language)함수를 이용하였다.

먼저, 시험 프로그램의 검증을 위해 종진동과 횡진동에 대한 기본주파수 변동을 참고문헌의 결과와 비교하였다. 다음으로 액체채움높이(D_L/D), 배플 위치(L_B/L), 내경(D_B/D) 및 배플 수에 따른 고유주파수 변동 및 모드 형상을 분석해 보았다. 각 해석 모델의 해석 정보는 표 1에 자세히 나타내었다.

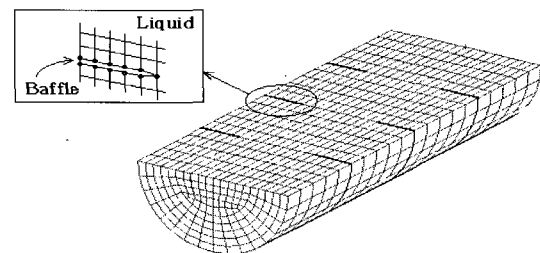


Fig. 2 Mesh generation of tank with three baffles

Table 1 Analysis model data for simulation

Tank Diameter(D)	0.4m
Tank Length(L/D)	2.5
Fluid Height(D_L/D)	0.3~0.7(variable)
Baffle Location(L_B/L)	0.1~0.5(variable)
Baffle Diameter(D_B/D)	0.5~1.0(variable)
Number of Baffle	0~3(variable)
Acceleration of Gravity(g)	9.8m/s ²

3.1 유한프로그램 검증 실험

본 논문의 수치결과의 검증을 위하여 McIver⁷⁾에 의해 계산된 횡진동 고유주파수를 사용하였다. 이 논문은 원통형 탱크에서 2차원 원형단면에서 발생하는 횡진동 주파수만을 계산하였으며, 종진동 주파수는 고려하지 않았다. 횡진동 주파수는 탱크의 길이에 영향을 받지 않으며, 유체채움높이에만 의존한다. 이는 3.2절의 수치결과에서도 확인할 수 있다. 길이방향 격자수를 줄이고 횡진동 모드를 쉽게 추출하기 위해 탱크길이를 0.2로 하였다. 해석 결과로 저차 4개의 횡진동 모드를 추출하였으며, 각각의 고유주파수를 Table 2에 정리하였다. 유한요소 결과와 McIver의 결과는 오차가 1% 미만으로 매우 정확하게 일치하는 것을 알 수 있다.

Table 2 Comparison with McIver's solution and FE solution in transverse motion

$\frac{D_L}{D}$		Transverse Mode(rad/s)			
		1st	2nd	3rd	4th
0.3	McIver	7.548	11.898	15.173	17.792
	FEM	7.538	11.870	15.104	17.659
	err(%)	-0.129	-0.238	-0.455	-0.752
0.4	McIver	7.814	11.987	15.024	17.481
	FEM	7.807	11.977	15.006	17.442
	err(%)	-0.082	-0.087	-0.124	-0.221
0.5	McIver	8.151	12.191	15.096	17.485
	FEM	8.144	12.164	15.025	17.341
	err(%)	-0.086	-0.225	-0.475	-0.823
0.6	McIver	8.595	12.554	15.417	17.802
	FEM	8.586	12.524	15.354	17.697
	err(%)	-0.098	-0.236	-0.413	-0.587
0.7	McIver	9.219	13.166	16.080	18.520
	FEM	9.212	13.143	16.039	18.466
	err(%)	-0.081	-0.171	-0.257	-0.291

다음으로, 신장용 등⁷⁾이 계산한 경험식을 이용하여 최저차 종진동 및 횡진동 주파수를 비교하였다. 참고문헌에서 제시한 경험식은 NASA의 실험자료¹⁰⁾와 Budianski의 이론해¹¹⁾를 바탕으로 각각의 기본주파수 계산식을 유도한 것이다. Fig. 3은 종진동 및 횡진동 기본주파수에 대하여 본 논문의 유한요소해와 경험식의 상대차이 η 를 식(11)에 의해 백분율로 환산하여 나타낸 그림이다.

$$\eta = \frac{\omega^{FEM} - \omega^{EXP}}{\omega^{EXP}} \times 100(\%) \quad (11)$$

여기서, 상첨자 FEM과 EXP는 각각 유한요소해와 경험식에 의한 해를 의미한다. 종진동주파수에 대한 일

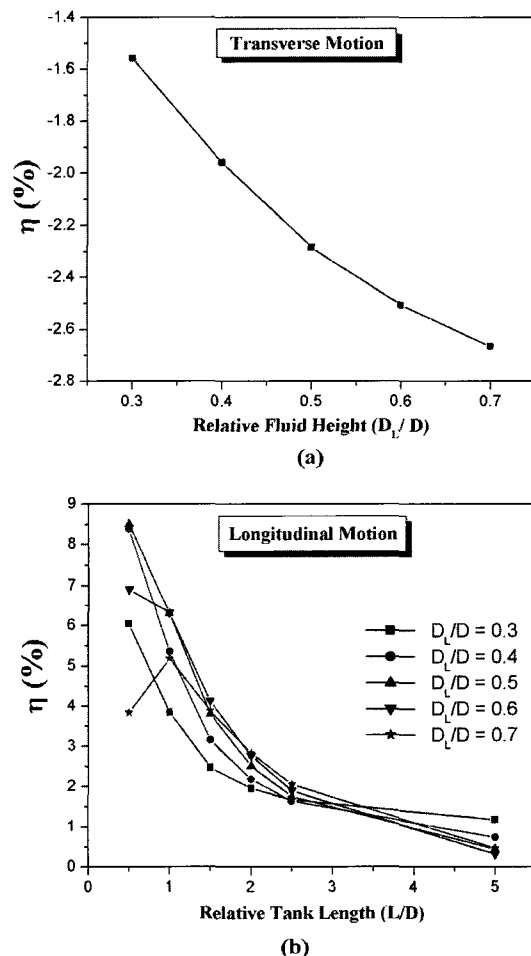


Fig. 3 Comparison with analytic solution and FE solution in longitudinal and transverse motion

반적인 비교를 위하여 탱크길이 L/D 를 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 및 5.0로 변화시켜가며 해석하였다. 그림에서 알 수 있듯이 횡진동 주파수는 최대 3%정도의 차이를 보인다. 이는 McIver의 해와의 차이가 최대 1% 미만인 것을 고려할 때 다소 큰 차이를 나타낸다고 볼 수 있다. 한편, 종진동 주파수에 있어서 유한요소해와 경험식은 탱크길이가 길어질수록 어느 정도 일치하지만, 탱크길이가 짧을 경우 최대 9%정도의 차이를 보인다. 따라서, 경험식은 탱크길이가 상대적으로 긴 경우에 대하여만 비교적 정확한 종진동주파수를 제공함을 알 수 있다. 즉, 탱크길이 L/D 가 1이하인 경우에 대해서는 상대차이가 3%이상으로 정확한 주파수를 예측할 수 없다.

3.2 유체채움높이에 따른 슬로싱 특성

유체의 슬로싱 특성은 탱크형상 및 유체채움량에 크게 의존한다. 일반적으로 직경에 비하여 길이가 상대적으로 긴 저장탱크를 많이 사용하므로 본 논문에서는 탱크길이 L/D 를 2.5로 고정하였다. 따라서, 유체채움높이만 해석 변수로 사용되었으며, 이를 위해 D_L/D 를 0.3 ~ 0.7까지 0.1 간격으로 변화시켰다. 각 유한요소 해석결과로부터 10개의 고유주파수 및 모드를 추출하여 비교 분석하였다.

Table 3에 각 모델에 대한 10개의 저차 고유주파수를 정리하였다. 유체채움높이에 따른 주파수 변동은 매우 단순한 관계를 보인다. 즉, 유체량이 증가할수록 각 모드에 대한 고유주파수는 상승하게 된다. 이는 Fig. 1에 나타난 자유표면의 면적에 대한 체적의 변동을 살펴봄으로써 설명할 수 있다. 슬로싱 운동은 크게 질량과 강성에 의한 운동에너지와 위치에너지의 교환에 의해 발생한다고 볼 수 있다. 이러한 슬로싱 질량은 자유표면의 면적과 관련이 있으며, 강성은 전체 유체의 체적과 관련이 있다. 그림에서 알 수 있듯이 유체량이 증가하게 되면 면적에 대한 체적비가 지속적으로 증가하게 된다. 따라서, 유체채움높이가 증가할수록 슬로싱 주파수도 역시 상승하게 된다고 볼 수 있다.

한편, 각각의 모드형상은 크게 3가지로 분류할 수 있다. 즉, 횡진동이 지배적인 모드 TMD(transverse motion dominated), 종진동이 지배적인 모드 LMD(longitudinal motion dominated)와 두 모드 형상의 혼합으로 나타나는 MIX로 구분 가능하다. 이러한 모드형상의 구분은 모든 경우에 대하여 뚜렷이 나타나

Table 3 The low 10th natural frequency on fluid height

Mode	Relative liquid fill height(D_L/D)				
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
1	2.837 (LMD)	3.302 (LMD)	3.723 (LMD)	4.134 (LMD)	4.553 (LMD)
2	5.403 (LMD)	6.125 (LMD)	6.699 (LMD)	7.186 (LMD)	7.612 (LMD)
3	7.538 (TMD)	7.807 (TMD)	8.144 (TMD)	8.595 (TMD)	9.212 (TMD)
4	7.552 (LMD)	8.089 (MIX)	8.460 (MIX)	8.918 (MIX)	9.533 (MIX)
5	7.770 (MIX)	8.328 (LMD)	8.867 (LMD)	9.269 (LMD)	9.585 (LMD)
6	8.412 (MIX)	8.845 (MIX)	9.279 (MIX)	9.752 (MIX)	10.331 (MIX)
7	9.276 (LMD)	9.832 (MIX)	10.310 (MIX)	10.772 (MIX)	11.019 (LMD)
8	9.287 (MIX)	10.014 (LMD)	10.473 (LMD)	10.788 (LMD)	11.290 (MIX)
9	10.236 (MIX)	10.858 (MIX)	11.349 (MIX)	11.778 (MIX)	12.151 (LMD)
10	10.638 (LMD)	11.327 (LMD)	11.722 (LMD)	11.974 (LMD)	12.226 (MIX)

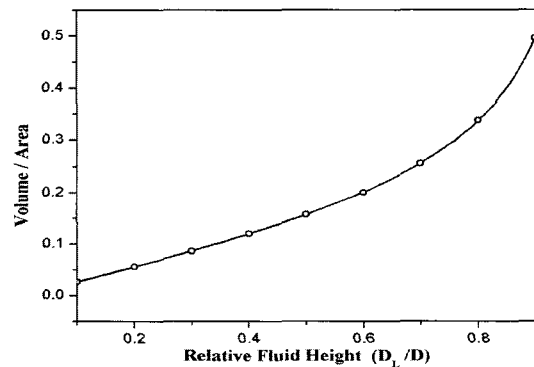


Fig. 4 Volume ratio to free surface area

는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5에 분류된 3가지 모드에 대한 최저차 모드형상을 나타내었다. 모드형상의 정확한 관찰을 위해 그림과 같이 자유표면의 운동만을 분리해서 볼 수 있도록 하였다.

Table 3으로부터 유체채움높이에 상관없이 LMD 모드가 최저차에서 나타나며, TMD모드는 3차에서 동일하게 발생하는 것을 알 수 있다. TMD가 나타난 후

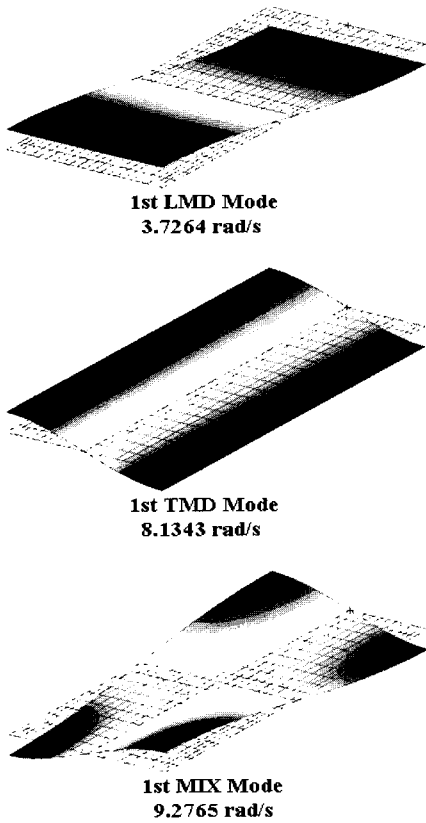


Fig. 5 Mode shapes of three types

이전에 보였던 LMD와 TMD의 혼합으로 MIX 모드가 나타난다. 10개의 모드 중 TMD는 1번 밖에 보이지 않으며, MIX도 역시 횡방향으로 1차 TMD와의 혼합만이 나타난다. 한편, TMD 모드 주파수는 탱크길이에 상관없이 일정한 값을 유지하는 것을 수치결과를 통해 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 TMD 모드는 길이방향 유체량에 영향을 받지 않으며, 원통형 탱크의 2차원 단면 특성에만 관련이 있다는 것을 알 수 있다. 참고로 탱크길이가 짧아질수록 전체적으로 주파수는 증가한다. 따라서, L/D 가 1미만인 경우 LMD 모드 주파수가 TMD 모드보다 커지게 되며 TMD 모드가 최저차에서 나타나게 된다. Fig. 6에 유체채움높이 D_L/D 가 0.5인 경우에 대하여 최저차 9개의 모드형상을 도시하였다.

3.3 배플설치에 따른 슬로싱 특성

원통형 탱크는 미사일 등의 비행체 연료탱크로 많이

Table 4 Simulation data with respect to the number of baffle

배플개수	L_{B1}/L	L_{B2}/L	L_{B3}/L	D_L/D	D_B/D
1	0.5	-	-	0.5	0.5
2	0.33	0.67	-	0.5	0.5
3	0.25	0.5	0.75	0.5	0.5

사용되고 있다. 특히, 순항 중 연료탱크는 수평상태에 놓여 있으며, 비행체의 가·감속, 선회 또는 자세제어 등의 상황에서 내부연료는 가진에 의해 유체의 슬로싱이 발생할 수 있다. 이러한 슬로싱은 비행체의 안정성 및 연료탱크의 구조손상에 큰 영향을 끼칠 수 있으므로, 다양한 방법으로 슬로싱 억제 대책을 마련하게 된다. 그 중 가장 쉽고 널리 사용되는 피동적(passive) 억제 대책으로 링형 배플을 설치하는 것이다. 따라서, 링형 배플 설치에 따른 슬로싱 특성을 분석할 필요가 있으며, 본 논문에서는 배플위치, 배플내경 및 배플 개수에 대하여 고유주파수와 모드형상의 변동을 고찰하였다. 먼저, 배플 개수에 대한 고유주파수 변동을 관찰하였다. 이를 위해 배플을 최대 3개까지 설치하여 주파수 및 모드형상의 변동을 분석하였다. 각 배플은 탱크 길이에 대하여 균등분할하였다. Table 4에 배플 개수에 따른 형상정보를 나타내었다.

Table 5에 배플개수에 따른 저차 10개의 주파수 변동을 정리하였다. 배플개수가 증가함에 따라 전체적으로 고유주파수는 감소한다. 특히, 첫 번째 모드 즉, 최저차 LMD 모드의 경우 배플의 개수가 증가할수록 지속적으로 주파수가 감소하는 특성을 보인다. 반면, TMD 모드의 경우 배플 수에 상관없이 동일한 주파수를 가진다. 이러한 현상은 배플이 슬로싱 운동방향과

Table 5 The low 10th natural frequency along baffle number

Mode	Baffle number			
	0	1	2	3
1	3.723	3.233	3.060	2.921
2	6.699	6.699	5.614	5.429
3	8.144 ^{TMD}	8.144 ^{TMD}	8.144 ^{TMD}	7.281
4	8.460	8.192	8.305	8.144 ^{TMD}
5	8.867	8.333	8.711	8.283
6	9.279	9.279	8.867	8.661
7	10.310	9.733	9.697	9.098
8	10.473	10.473	10.310	10.473
9	11.349	11.087	10.624	10.885
10	11.722	11.349	10.649	11.349

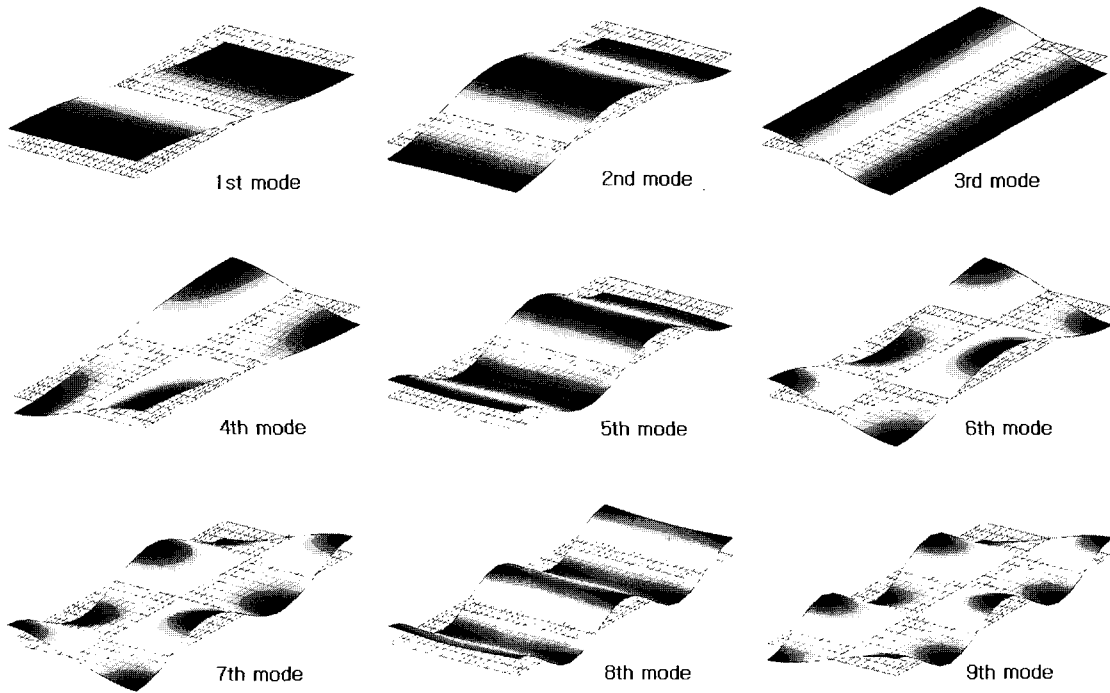


Fig. 6 Sloshing mode shape without baffle

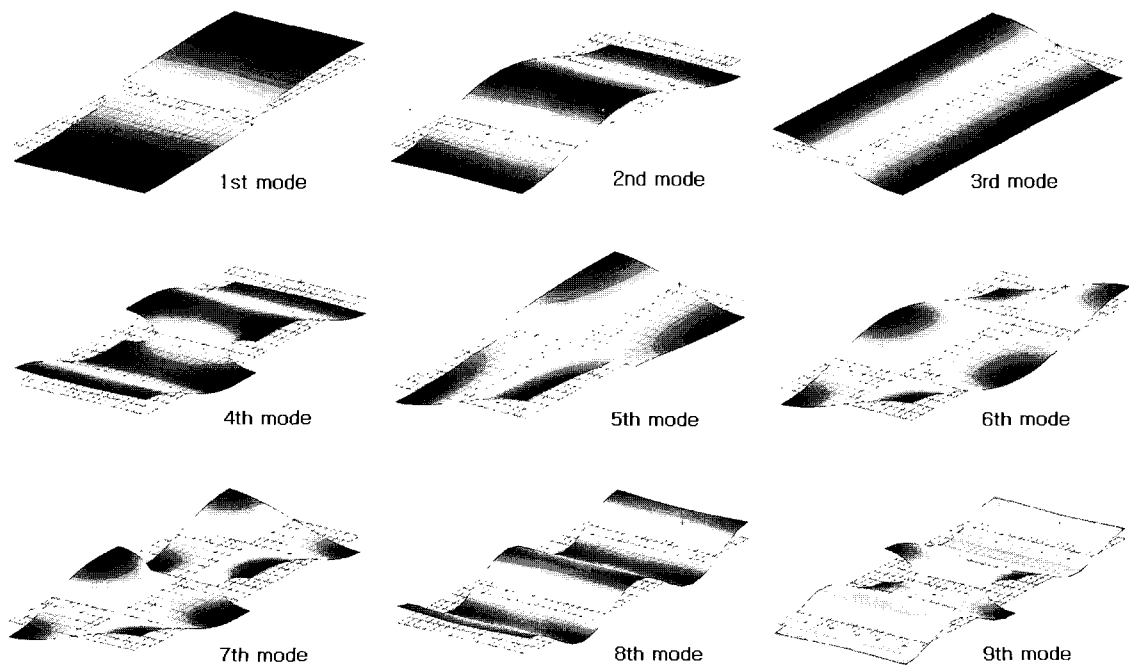


Fig. 7 Sloshing mode shape with one baffle

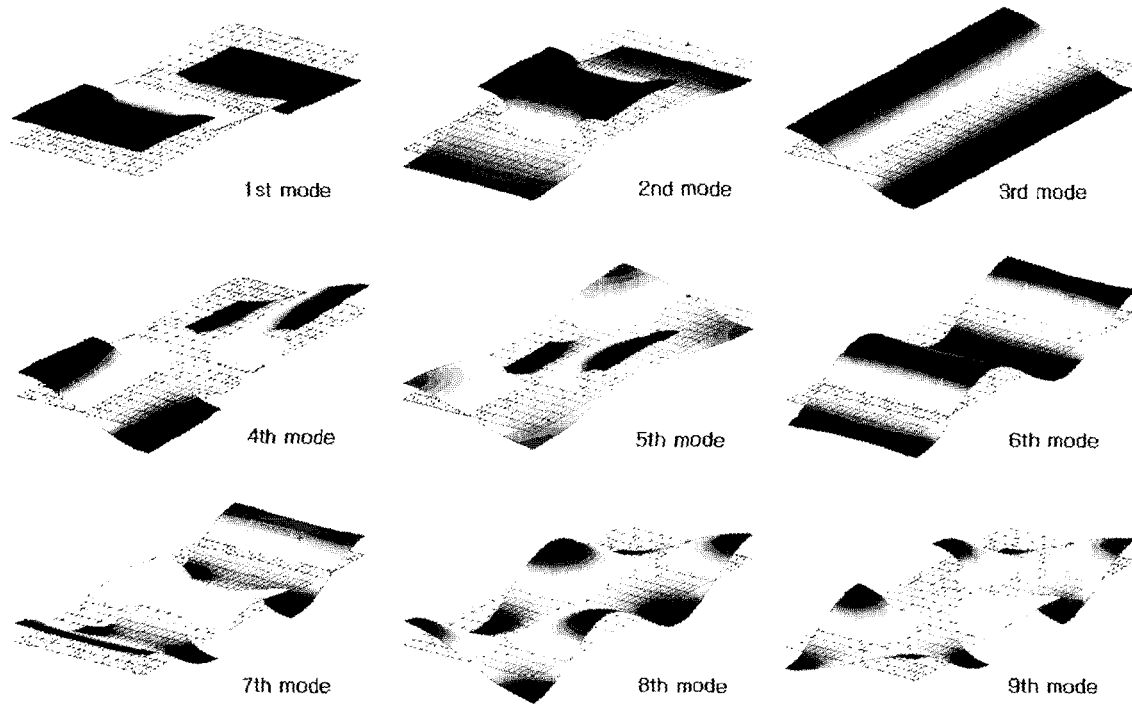


Fig. 8 Sloshing mode shape with two baffle

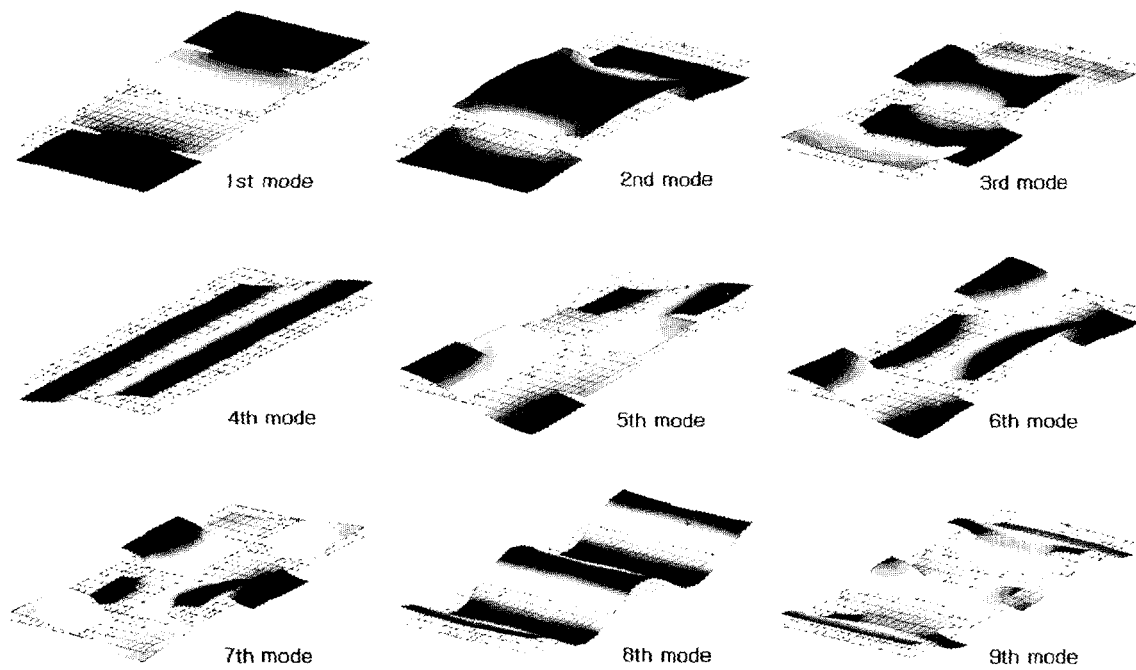


Fig. 9 Sloshing mode shape with three baffle

무관하게 설치되었기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6 ~9에 배플 개수에 따른 저차 9개의 모드형상을 도시하였다. 표와 그림으로부터 배플에 영향을 받지 않는 모드를 발견할 수 있다.

이런 모드들의 공통점은 배플이 설치된 위치를 기준으로 모드형상이 대칭이라는 점이다. 즉, 특정 모드에 대하여 대칭인 위치에 배플을 설치할 경우 해당 모드의 주파수 및 모드 형상은 변하지 않는다. 대표적으로 TMD 모드는 배플이 어디에 설치되더라도 그 위치를 기준으로 대칭의 형상을 띄고 있으므로 배플에 영향을 받지 않는다. 배플이 1개일 경우 2, 3, 6 및 8차 모드, 2개일 경우 3, 6 및 8차 모드, 3개일 경우 4, 8차 모드가 이러한 특징을 보이고 있다.

다음으로, 배플내공과 배플위치에 따른 슬로싱 주파수 변동을 살펴보았다. 이를 위해 각 유체높이($D_L/D=0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$)에 대하여 배플내공($D_B/D=0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$)과배플위치($L_B/L=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$)를 변화시키며 총 125가지의 유한요소 해석을 수행하였다.

Fig. 10에 배플내공 및 배플위치에 따른 기본주파수 변동을 각각 나타내었다. 그림으로부터 배플이 탱크 중앙에 가까이 설치될수록 배플내공이 작아질수록 주파수가 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

이러한 주파수 변동은 유체채움높이의 증가에 따라 변화가 거의 보이지 않으므로 D_L/D 가 0.5인 경우만 도시하였다. 일반적으로 배플이 유체의 유동을 완전히 분리할 경우, 즉 유체를 독립적인 두 부분으로 나누게 되면 탱크의 길이가 짧아지므로 슬로싱 주파수는 증가

하게 된다. 링형 배플의 설치는 탱크를 분리하는 경우와는 달리 배플에 의한 유동억제가 증가할수록 주파수는 감소하게 되는 특성을 보이고 있다. 이와 같은 주파수 감소는 D_B/D 가 0.5~0.7, L_B/L 이 0.2~0.4에서 가장 큰 변동을 보이고 있다.

4. 결 론

본 논문을 통해 수평으로 놓인 원통형 탱크내 유체 슬로싱의 고유진동 특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 먼저, 유한요소 프로그램의 타당성을 검증하기 위해 McIver의 결과와 신장용등의 경험식과 비교해 볼 때 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 다음으로 유체채움높이, 배플 개수, 내공크기, 배플위치 등의 파라메트릭 해석을 통하여 슬로싱 특성 및 링형 배플의 영향을 고찰하였다. 유체채움높이가 증가할수록 고유주파수는 상승하게되며, 이때, 각각의 모드형상은 LMD, TMD 및 MIX모드의 3가지로 분류할 수 있었다. 배플개수가 증가할 수록 전체적으로 고유주파수가 감소하지만, TMD 모드는 배플개수에 영향을 받지 않았다. 이는 모드에 대하여 대칭인 위치에 배플을 설치할 경우 해당 모드의 주파수 및 모드 형상은 변하지 않음을 알 수 있었다. 또한, 배플위치가 탱크 중앙쪽으로 설치될 수록, 배플내공이 작아질수록 기본주파수가 크게 감소하는 특성을 보였다. 이러한 주파수 감소는 D_B/D 가 0.5~0.7, L_B/L 이 0.2~0.4에서 그 변동량이 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

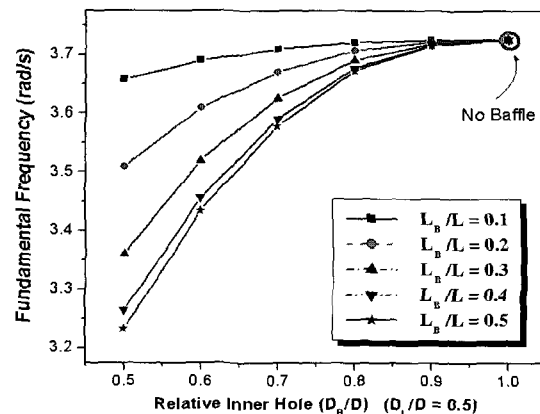
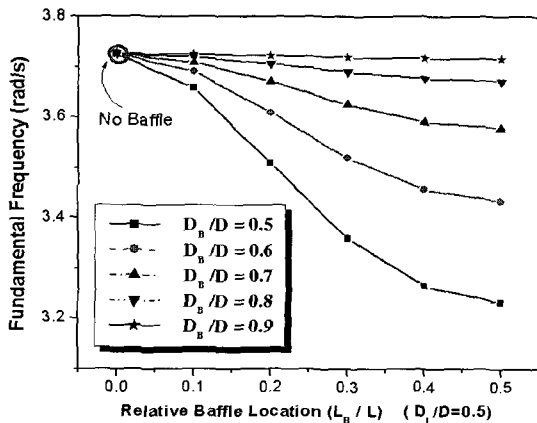


Fig. 10 Natural frequency of inner hole and location

후 기

본 연구는 국방과학연구소 연구비 지원(ADD-00-5-6)으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Wu, G. X., Ma, Q. W. and Eatock Taylor, R., "Numerical simulation of sloshing waves in a 3D tank based on a finite element method," *Applied Ocean Research*, Vol. 20, 1998, pp.337~355
2. Bauer, H. F., Eidel, E., "Frictionless liquid sloshing in circular cylindrical container configurations," *Aero Science and Technology*, No. 5, 1999, pp.301~311
3. Riley, J. D., Trembath, N. W., "Sloshing of liquids in spherical tanks," *Journal of the Aero/Space Sciences*, Vol. 26, 1961, pp.245~246
4. Chu, W.-H., "Sloshing of liquids in cylindrical tanks of elliptical cross section," *ARS J*, Vol. 30, 1960, pp.360~363
5. Siekmann, J., Schilling, U., "Calculation of the free oscillations of a liquid in motionless axisymmetric containers of arbitrary shape," *Z. Flugwiss. Weltraum*, Vol. 22, 1974, pp.168~173
6. McIver, P., "Sloshing frequencies for cylindrical and spherical containers filled to arbitrary depth," *J. Fluid Mech.*, Vol. 201, 1988, pp.243~257
7. Shin, J. R., Choi, K. S., Kang, S. Y and Kim, H. S., "Estimation of Sloshing Natural Periods in Liquid Cargo Tanks," *한국해양공학회지* 제8권, 제2호, 1994, pp.93~104
8. Jeong, K. H., Kim, K. S. and Park, K. B., "Natural Frequency Characteristics of a Cylindrical Tank Filled with Bounded Compressible Fluid", *Computers and Structures*, Vol. 10, No. 4, 1997, pp.291~302
9. Cook, R. D., Malkus, D. S. and Plesha, M. E., *Concepts and applications of finite element analysis*, John Wiley & Sons, New York, 1989
10. Su, T. C., Kang, S. Y., "Analysis and Testing of the Large Amplitude Liquid Sloshing in Rectangular Containers," *ASME PVP Conference*, Vol. 108, 1986, pp.145~154
11. Budiansky, B., "Sloshing of Liquids in Circular Canals and Spherical Tanks," *Journal of the Aero/Space Sciences*, Vol. 27, 1960, pp.161~173