

배플개수 및 내경변화에 따른 액체 저장탱크의 동역제 효과

Dynamic Suppression Effects of Liquid Container to the Baffle Number and Hole Diameter

조진래* 김민정* 이상영* 허진욱*
Cho, Jin-Rae Kim, Min-Jung Lee, Sang-Young Huh, Jin-Wook
(논문접수일 : 2001년 9월 1일 ; 심사종료일 : 2002년 2월 14일)

요지

수직방향 가속도를 받는 원통형 액체 저장탱크는 내부유체의 슬로싱(sloshing)에 의한 동하중에 의하여 구조 및 제어 성능 안정성에 심각한 영향을 받을 수 있다. 더욱이 유체의 슬로싱 진동수가 제어계 혹은 탱크구조물의 고유진동수 근처에 있게되면 발사체에 큰 동하중과 모멘트를 유발하게 된다. 이와 같은 유체의 동적 효과를 억제하기 위하여 일반적으로 링형 탄성체 배플(baffle)을 채용하고 있다. 본 논문에서는 배플의 개수와 내경을 변수로 설정하여 배플의 동적 억제효과를 평가 및 분석하기 위한 수치해석을 수행한다. 배플내경에 따른 파라메트릭 해석과, 탱크높이 및 유체높이를 각각 균등 분할하여 설치된 배플에 대한 동역제 효과를 분석한다. 유체와 구조물 사이의 정확하고 효과적인 연계해석을 위하여 ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian) 수치해석 기법을 적용한다.

핵심용어 : 유체-구조물 연계, ALE 수치기법, 링형 배플, 충격하중, 액체 저장탱크

Abstract

The dynamic load caused by sloshing of internal fluid severely affects the structural and control stabilities of cylindrical liquid containers accelerating vertically. If the sloshing frequency of fluid is near the frequency of control system or the tank structure, large dynamic force and moment act on launching vehicles. For the suppression of such dynamic effects, generally flexible ring-type baffles are employed. In this paper, we perform the numerical analysis to evaluate the dynamic suppression effects of baffle. The parametric analysis is performed with respect to the baffle inner-hole diameter and two different baffle spacing types : equal spacing with respect to the tank and one with respect to the fluid height. The ALE (arbitrary Lagrangian-Eulerian) numerical method is adopted for the accurate and effective simulation of the hydrodynamic interaction between fluid and elastic structure.

Keywords : Fluid-Structure Interaction, ALE Numerical Method, Ring-Type Baffle, Impact Load, Liquid Container

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

• 이 논문에 대한 토론을 2002년 6월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

오늘날 우주항공산업 분야에서 활용되고 있는 발사체는 거의 대부분 액체상태의 연료를 사용하고 있다. 이러한 액체연료를 저장하는 탱크는 초기 발사시의 짧은 시간동안 막대한 가속도를 겪게되고, 이러한 운동은 액체연료의 동관성력에 의한 충격하중의 형태로 액체연료저장탱크에 직접적으로 작용한다. 이러한 충격하중은 연료 저장탱크의 구조적인 안정성을 위협하게될 뿐만 아니라, 유체 표면 출렁임과 셀 탱크의 탄성으로 인해 복잡한 형태의 진동을 유발하게 된다. 아울러, 급작스런 동하중은 급유관의 파손 또는 급유압의 진동과 급유시스템의 공진에 의한 비행 불안정이나 비행불능의 심각한 문제를 초래할 수도 있다. 이러한 액체 연료에 의한 동적 효과를 억제하고 연료탱크의 구조적 안정성을 높이기 위하여, 연료탱크를 분할하거나 배플 등의 억제장치를 설치하는 등의 연구가 지속적으로 추진되어 왔다. 그 중 배플을 이용한 방법이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다.^{1),2)}

초기 대부분의 연구는 주로 실험적 방법, 혹은 스프링-질량-감쇠로 구성된 기본적 등가모델을 이용한 이론적 방법을 통하여 이루어졌으며, 그 결과 기본적이고 단순한 형상에 대한 실험 및 이론분석만이 가능하였다. 특히 급격한 과도운동시 탱크에 작용하는 충격하중에 관해서는 실험적 방법만이 가능하였다.³⁾

이후 컴퓨터와 수치해석 기법의 발전에 따라 수치해석적 방법이 광범위하게 확산되었다. 연료탱크와 같이 유체의 자유표면이 존재하고 유체와 구조물이 연계된 문제의 수치해석에는, 유체의 유동성과 비선형성 때문에 주로 FEM, BEM 등의 연계 수치해석 방법이 주로 적용되었으며, 부가질량법⁴⁾과 Euler 및 Lagrange법,⁵⁾ 그리고 ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian) 기법⁶⁾⁻⁸⁾ 등의 여러 가지 수치해석 기법들이 제안되었다.

그 중에서 ALE기법은 효과적이고도 정확한 유체-구조물 연계기법으로 알려져 있다. ALE기법은 Eulerian 기법과 Lagrange기법의 장점들만을 채용하여 유체영역과 구조물영역의 경계를 쉽게 표현할 수 있을 뿐만 아니라, 유체요소의 심한 찌그러짐을 조절하여 수치해석상의 효율성과 정확성을 높일 수 있는 연계기법이다. 물질속도와 무관하게 임의로 운동이 가능한 격자재구성 알고리즘(remeshing algorithm)¹⁰⁾에 의해, 이동경계/영역 문제, 자유표면 유동, 그리고 대변형 문제

등에 적절하게 적용할 수 있다.

해석대상인 발사체 내부의 액체연료 저장탱크는 정지상태에서 수직 방향으로 등가속 운동을 한다. 본 논문에서는 이 때의 과도응답 특성에 대한 배플개수 및 내경의 영향을 분석하기 위하여 유한요소해석을 수행한다. 급작스런 가속운동으로 인해 발생하는 유체의 동하중을 최소화하여, 액체연료 저장탱크의 구조적 안정성을 높이고, 진동에 의한 구조적 파손 등을 방지하기 위해 탄성의 링형 평판 배플을 설치하였다. 배플의 두께는 일정하게 유지하는 반면 설치된 개수와 내경을 변수로 하여, 배플의 개수 및 내경이 액체연료의 동적효과를 억제하는데 미치는 영향과 감쇠 정도를 다양한 기준으로 평가 및 분석한다.

2. 이론적 배경

2.1 ALE 기술법

유체-구조물 연계시스템의 유한요소 해석은 전통적으로 Eulerian 또는 Lagrangian 기술법으로 크게 구분할 수 있다. 하지만 두 기법은 수치해석상 서로 상반되는 특징을 가지고 있다. 하지만, 최근들어 이를 두 기법들의 장점만을 채용한 효과적인 ALE 기법이 광범위하게 적용되고 있는 실정이다.

Fig. 1을 참고하면 ALE 기술법에 사용되는 좌표계는 물질좌표계(혹은 Lagrange coordinates, \mathbf{X}), 공간좌표계 (혹은 Euler coordinates, x) 그리고 참고좌표계(reference coordinates, $\hat{\mathbf{X}}$)의 총 세 가지이다.

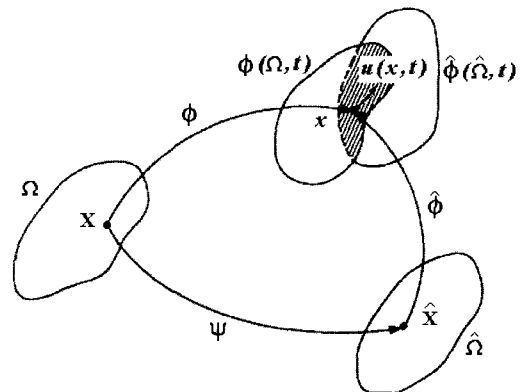


Fig. 1 Three different coordinates

공간좌표 x 와 물질좌표 X 와의 관계를 다음과 같이 표현한다.

$$x = \phi(X, t) \quad (1)$$

따라서, ϕ 는 연속체 Ω 상의 임의 질점의 시간에 따른 공간상의 위치를 나타내는 x 와 X 사이의 사상함수(mapping function)이다.

한편, 참고좌표계 $\hat{\Omega}$ 상의 좌표 \hat{X} 와 공간상의 좌표 x 와의 관계를 다음과 같이 표현한다.

$$x = \hat{\phi}(\hat{X}, t) \quad (2)$$

그러면, $\hat{\phi}$ 는 참고좌표상의 임의 점의 시간에 따른 운동을 나타내는 사상함수가 된다. 이러한 참조좌표 점의 운동은 임의이며, 물질좌표계의 운동과 일치할 필요는 없다. 하지만 세 좌표들은 상호간의 변환상 반드시 일대일(one-to-one) 관계가 성립해야 한다.

ALE 기법에서 임의함수 $f(\cdot, t)$ 의 시간미분은 세 좌표계에서 정의가능하다. 물질좌표계에서의 시간미분(즉, material derivative)과 참고좌표계에서의 시간미분은 다음의 관계가 성립한다.

$$\frac{\partial f}{\partial t} \Big|_X = \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_{\hat{X}} + c_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$c_i = v_i - \hat{v}_i \quad (4)$$

여기서 c 는 물질의 속도 v 와 참고좌표의 속도 \hat{v} 간의 상대속도, 즉 대류속도(convective velocity)를 의미한다. 따라서 식(3)의 우측 두 번째 항은 물질과 참고좌표계의 상대운동에 의한 대류효과를 나타낸다. ALE 기법에서 참고좌표계의 속도(\hat{v})는 임의의 값을 가질 수 있고, 이에 따라 다음 세 가지 기술법으로 구별된다. 첫째로, $\hat{v}=0$ 인 경우는 참고좌표계는 공간상에 고정되어 Euler 기술법으로 되고, 둘째로 $\hat{v}=v$ 인 경우는 참고좌표계와 물질좌표계가 동일하게 운동하여, Lagrange 기술법에 해당한다. 마지막으로 $\hat{v}=v \neq 0$ 인 경우가 일반적인 ALE 기술법에 해당한다.

Lagrange기술법에 따라 연료 저장탱크의 동응답특성을 수치해석할 경우, 유체격자는 과도하게 변형된다.

이 경우, 시간이산화를 위한 time-step 크기가 현저히 작아져야 원하는 정확도의 수치해석 결과를 구할 수 있다. 하지만 이렇게 되면 해석을 위한 CPU시간이 현저히 증가하여 비현실적으로 되기가 쉽다. ALE 기법에서 이를 보완하기 위해 참고좌표계에 해당하는 유한요소 격자에 임의의 속도를 부여하여, 유체격자의 과도한 찌그러짐을 방지한다. 따라서, 수치해석상의 CPU시간 최소화와 해석결과의 정확도를 동시에 확보할 수 있다.

2.2 ALE 수치해법

아래 식(5)와 식(6)은 비압축성, 점성 유체에 대한 Navier-Stokes 방정식을 ALE 기술법으로 표현한 운동방정식과 연속방정식을 나타낸다. 해당 응력텐서는 식(7)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + c_j v_{i,j} = \frac{1}{\rho_F} \sigma_{ij,j} + f_i, \quad \text{in } \Omega_F \times (0, T] \quad (5)$$

$$v_{i,i} = 0, \quad \text{in } \Omega_F \times (0, T] \quad (6)$$

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \mu(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (7)$$

여기서 ρ_F 는 유체의 밀도, f_i 는 중력, p 는 압력, 그리고 μ 는 점성계수이다. 경계조건은 아래와 같다.

$$v_i = \bar{v}_i, \quad \text{on } \partial\Omega_j \times (0, T] \quad (8)$$

$$\sigma_{ij} n_j = \bar{t}_i, \quad \text{on } \partial\Omega_F^S \times (0, T] \quad (9)$$

식(8)과 식(9)에서 유체영역은 Ω_F 로 나타내고, 유체 자유표면 경계는 $\partial\Omega_F^S$ 로, 구조물과 접하는 유체-구조물 연계면은 $\partial\Omega_j$ 로 표현하였다. 그리고 유체속도는 v_i 로 그리고 표면력은 t_i 로 표시한다. 여기서 “-”는 경계에서 주어진 값을 나타내고, n_j 는 경계면에서의 단위 법선 벡터 성분을 나타낸다.

초기 시점에서의 속도와 압력의 초기조건은 다음과 같이 주어진다.

$$v_i(x_i, 0) = v_i^0(x_i) \quad (10)$$

$$p_i(x_i, 0) = p_i^0(x_i) \quad (11)$$

그리고 초기 속도조건은 다음의 비압축성 조건을 만족한다.

$$v_{i,i}^0 = 0 \quad (12)$$

식(5)의 운동방정식에 대한 시간적분을 고려할 때, 대류항의 존재는 수치해석상 많은 어려움을 야기한다. 본 연구에서는 이 단계 분리기법(two-phase splitting method)^{(10),(11)}을 적용하는데, 이 방법은 효과적이며 적용성이 뛰어나 현재 광범위하게 채용되고 있다. 이 단계 분리해석법에서는 먼저 라그랑지 단계가 수행된다. 이 단계에서는 참고좌표계와 물질좌표계가 일치하여, 식(5)에서의 상대속도 c 는 0이 되어 다음으로 귀착된다.

$$\frac{\partial v_i^t}{\partial t} = \frac{1}{\rho_F} \sigma_{i,i} + f_i \quad (13)$$

라그랑지 단계 후 먼저 유한요소 격자의 찌그러짐 정도를 판별한다. 형상이 과도하게 변형된 경우, 적절한 격자 균등화 알고리즘(smoothing algorithm)에 따라 격자 remeshing이 수행되고, 이에 따라 격자속도가 결정된다. 그 다음, 대류속도 c 에 의한 대류항을 고려하여 라그랑지 계산결과를 새로운 격자계로 변환하는 오일러 단계가 식(14)와 같이 수행된다. 격자 균등화가 필요치 않은 경우, 이 단계는 필요없다.

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + c_j v_{i,j}^t = 0 \quad (14)$$

3. 수치해석 및 결과

3.1 해석 대상

배플개수 및 내경에 따른 동적 억제효과를 분석하기 위하여 사용된 원통형 액체 저장탱크의 모델을 Fig. 2에 나타내고 있다. 배플개수에 따른 파라메트릭 해석에서는 배플의 내경 및 두께를 일정하게 하고, 탱크높이(H)를 균등하게 분할한 경우(BST)와 유체높이(H_F)를 균등하게 분할한 경우(BSF)에 대하여 배플개수의 영향을 살펴보았다. Fig. 3과 Fig. 4에 두 배열방식에 각각 다섯 case, 즉 총 10 case의 배플의 위치를 나타

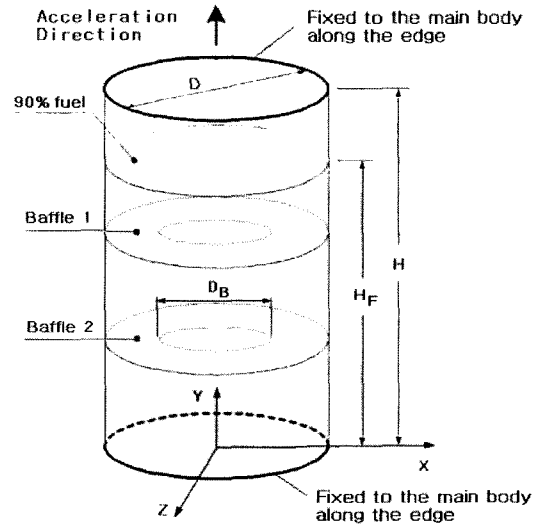


Fig. 2 Closed cylindrical fuel-storage tank

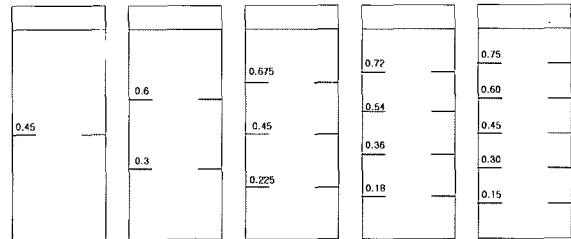


Fig. 3 Uniform baffle spacing with respect to the fluid height(BSF)

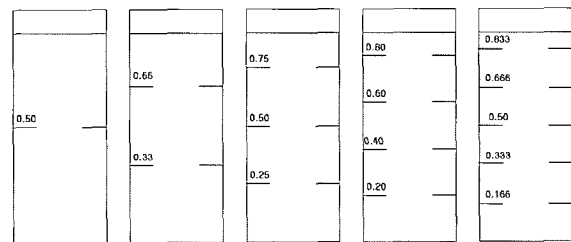


Fig. 4 Uniform baffle spacing with respect to the tank height(BST)

내고 있다. 내경변화에 따른 해석에서는 하나의 배플을 바닥 면으로부터 0.7m 위치에 설치하여 해석하였다. 이 경우에도 배플의 두께는 일정하다. 해석에 사용된 액체연료와 탱크 그리고 배플의 물성치와 형상자료를 Table 1에 나타내었다. 연료탱크는 수직방향으로 10G ($1G=9.8m/sec^2$)의 등가속 운동을 하며, 연료는 90% 채워져 있다.

Table 1 Material and geometry data

material data			
구조물	밀도	$2.78 \times 10^3 (\text{kg/m}^3)$	
	영률	$7.24 \times 10^{10} (\text{N/m}^2)$	
	푸와송비	0.33	
유체	항복강도	$4.85 \times 10^8 (\text{N/m}^2)$	
	밀도	$8.15 \times 10^2 (\text{kg/m}^3)$	
	체적탄성계수	$2.2 \times 10^9 (\text{N/m}^2)$	
geometry data (unit : m)			
탱크직경(D)	0.4	유체높이(H_f)	0.9
탱크높이(H)	1.0	탱크두께(t)	0.00254
배플두께(t_b)	0.003		

총 해석시간은 연료탱크의 가장 심한 과도응답이 발생하는 150msec 까지로 설정하였다. 급격한 가속운동에 의하여 유체의 관성력은 탱크의 바닥 면에 집중하게 되고 그로 인하여 바닥 면에서 최대 동압력 및 최대 변위가 발생한다. 따라서 탱크바닥 중심에서의 변위에 대한 시간응답을 중심으로 배플의 영향을 분석하였다. 해석은 상용 소프트웨어인 MSC/Dytran⁹⁾을 이용하여 수행되었다.

3.2 수치해석 결과

3.2.1 개수변화에 따른 해석

Figs. 5와 6은 탱크높이를 균등분할한 경우에 대하여 그리고 Figs. 7과 8은 유체높이를 균등분할한 경우

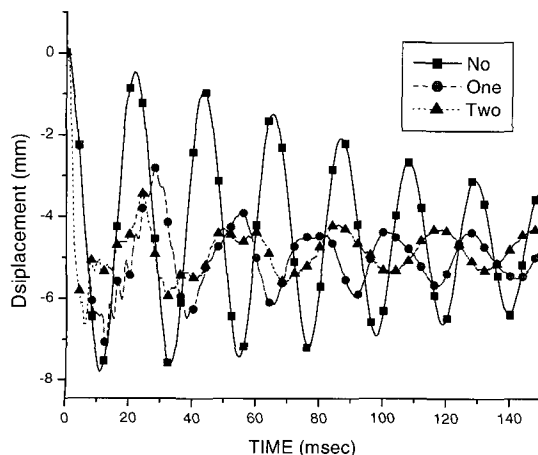


Fig. 5 Time-history responses of the bottom center displacement(BST)

에 있어, 배플개수에 따른 탱크 바닥면 중심변위의 시간응답 곡선이다.

Figs. 5~8을 통해 배플이 없는 경우에 비해, 배플형 탱크의 동응답이 보다 빠르게 안정되며 변위의 최대값 및 진폭의 감소율도 향상된 결과를 보여준다. 이것은 배플의 동적 억제효과를 잘 나타내고 있다고 볼 수 있다. 한편, Fig. 9에 비교한 것과 같이 탱크높이를 균등분할한 경우에 있어서의 배플의 동적 억제효과가 유체높이를 균등분할한 경우보다 더 높다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 탱크높이를 균등분할한 경우(BST)와 유체높이를 균등분할한 경우(BSF)에 있어, 배플개수에

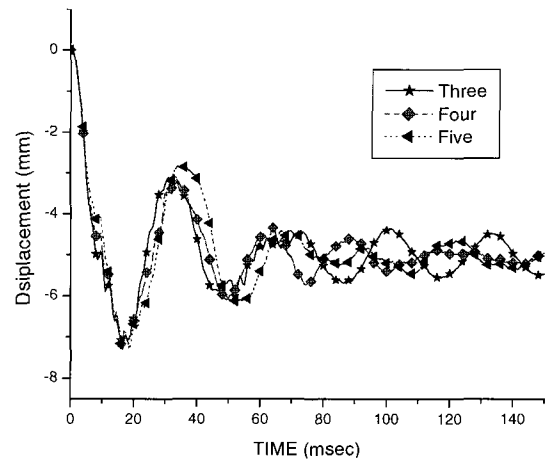


Fig. 6 Time-history responses of the bottom center displacement(BST)

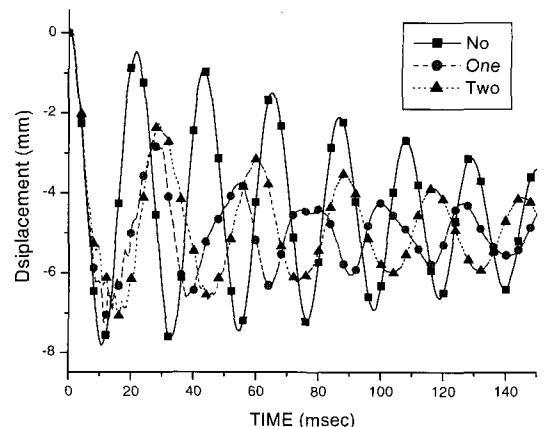


Fig. 7 Time-history responses of the bottom center displacement(BSF)

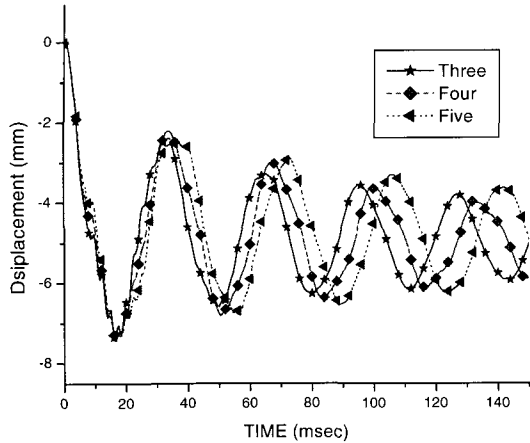


Fig. 8 Time-history responses of the bottom center displacement(BSF)

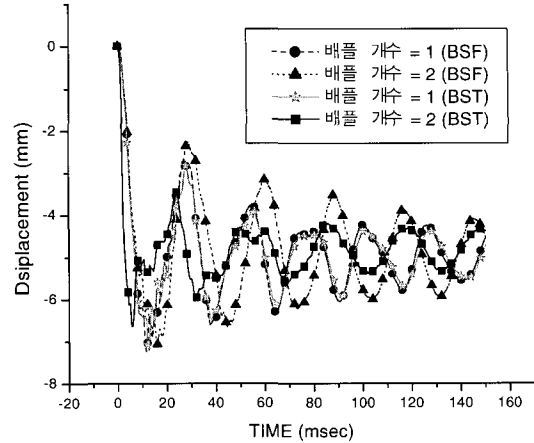


Fig. 9 Comparison of two cases according to baffle spacing(baffle number=1, 2)

다른 바다중심의 최대변위와 최대응력의 변화를 보여 준다. 배플개수가 두 개일 경우에 최소값을 보이며, 이후로 완만히 증가한다. 유체높이에 대해 균등하게 설치된 경우의 결과가 탱크높이에 대해 균등하게 설치된 경우에 비해서 전체적으로 약간 높음을 알 수 있다.

Fig. 11은 응답곡선으로부터 구한 지배적 응답주파수(response frequency)와 대수감소율(logarithmic decrement)을 보여준다. 응답주파수는 분할 방법에 따른 차이가 거의 없으며, 배플개수가 많아질수록 완만하게 감소한 후 수렴하는 특성을 보여주고 있다. 그러나 탱크높이를 균등분할하여 배플을 설치한 경우

배플의 개수가 많을수록 대수감소율이 증가하는 반면에, 유체높이를 균등분할한 경우에는 큰 감쇠효과를 나타내지 못함을 알 수 있다. 선행연구¹⁰⁾에 의하면 배플의 상대위치가 0.7 부근에서 최대의 감쇠효과를 보이며, 그 대수감소율은 Fig. 11에 나타난 값들에 비해 월등히 높다. 균등분할로 인해 배플에 의해 구분되는 각 유체영역이 균등화되고, 이로 인해 유체 구획과 구획 사이의 공진효과가 하나의 배플이 최적의 위치에 존재하는 경우보다 감쇠효과가 감소하는 중요원인으로 고려된다. 이러한 현상은 유체 높이를 균등하게 분할하는 경우에 더욱 명확하게 나타난다.

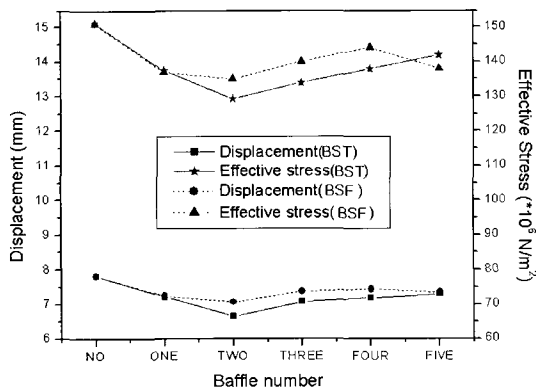


Fig. 10 Comparison of maximum displacement and effective stress

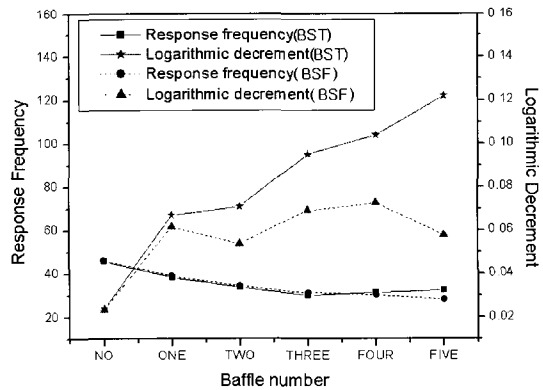


Fig. 11 Comparison of response frequency and logarithmic decrement

3.2.2 내경변화에 따른 해석(BST)

먼저 Figs. 12와 13에는 배플내경에 따른 탱크 바닥면 중심변위의 시간응답 곡선이 나타나있다.

차이가 그리 현저하지는 않지만 배플내경이 80mm에서 60mm, 그리고 40mm가 되면서 진폭이 감소하지 않고 거의 일정하게 진동하는 경향을 보인다. 그러나 배플의 내경이 아주 작은 20mm의 경우와 배플이 유체영역을 완전히 분리시키는 0mm인 경우에는 진동의 크기가 줄어들며 비교적 빠르게 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 14에서 보듯이 탱크바닥 면에서의 최대변위나

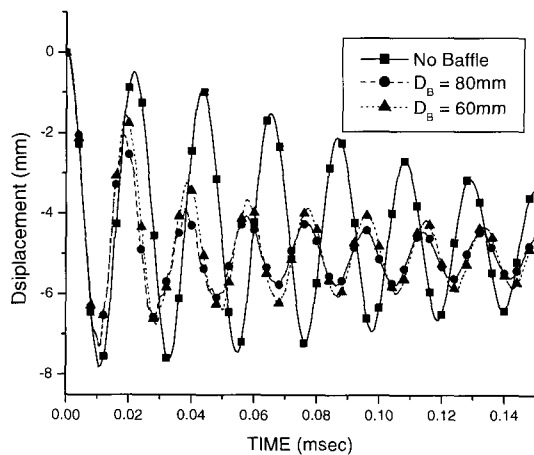


Fig. 12 Time-history responses of the bottom center displacement

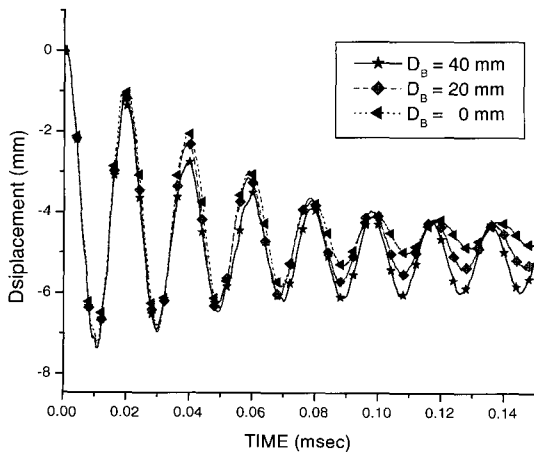


Fig. 13 Time-history responses of the bottom center displacement

최대 유효응력이 배플내경의 감소에 따라 증가하는 양상을 보인다. 그러나 유체가 완전히 분리되는 배플내경이 0mm인 경우에는 최대변위나 최대 유효응력 모두 감소한다. 그리고 Fig. 15의 지배적 응답주파수의 경우, 배플내경의 감소에 따라 현저하지는 않으나 감소하는 경향을 나타내고, 대수감소율의 측면에서는 배플내경이 40mm일 때까지는 감소하고 20mm와 0mm인 경우에는 다시 증가하고 있다. Figs. 12~15의 결과로부터 배플의 동적 억제효과는 배플내경이 감소함에 따라 감소하지만, 내경이 아주 작거나 완전히 막힌 경우에는 다시 증가하는 것을 확인하였다. 이것은 배플의 내경이 200mm보다 작아질 때 동적 억제효과는 감소한다는 선행연구의 결과와 일치한다. 하지만, 배플의 내경이 극히 작을 경우나 완전히 막혔을 경우의 동적

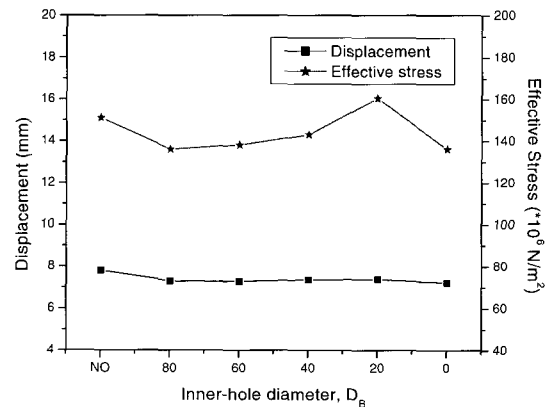


Fig. 14 Maximum displacement and effective stress to the hole diameter

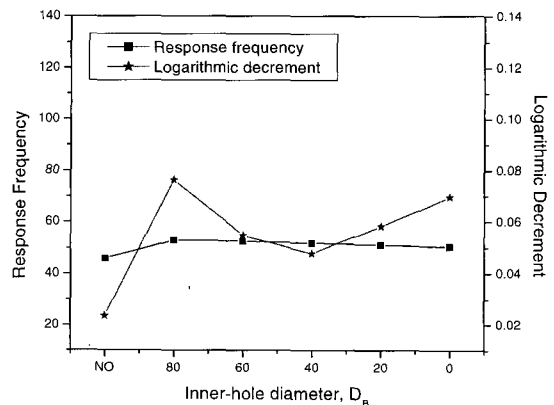


Fig. 15 Response frequency and logarithmic decrement to the hole diameter

억제효과 증가의 원인은 배플에 의한 유체영역 분리의 영향으로 보인다.

4. 결 론

본 논문에서는 ALE 수치해석 기법을 적용하여, 수직가속하는 연료탱크의 동역제 효과를 파라메트릭하게 분석하였다. 배플개수 및 내경변화에 따른 연구에서 동일하게, 배플의 동적 억제효과를 바닥면 중심의 시간응답을 중심으로 평가 및 분석하였다. 배플의 동역제 효과를 종합적으로 판단하기 위해 최대변위와 최대응력 그리고 응답주파수와 대수감소를 등 다양한 측면에서 분석하였다. 먼저 배플개수에 관한 해석에서, 탱크높이를 균등분할한 경우나 유체높이를 균등분할한 경우 모두, 배플 하나만을 최적의 위치에 설치한 경우보다 동적 억제효과가 저하하는 결과를 보여주었다. 그리고 탱크높이를 균등분할한 경우에 있어 동적 억제효과는 배플개수에 따라 증가하지만, 유체 높이를 균등분할한 경우에는 배플개수의 증가에 따른 일률적인 감소효과를 기대할 수 없었다. 그리고, 배플내경이 작아질 경우, 배플의 동적 억제효과는 감소하지만 거의 막힐 정도로 완전히 막았을 경우에는 유체영역의 분리현상으로 배플의 동역제 효과가 다소 증가하는 것을 알 수 있었다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. H. N. Abramson, L. R. Gsrza, "Some measurements of the effects of ring baffles in cylindrical tanks", *J. Spacecraft Rockets*, Vol. 1, No. 5, 1964, pp.560~564
2. D. G. Stephens, "Flexible baffles for slosh damping", *Spacecraft Rockets*, Vol. 3, No. 5, 1966, pp.765~766
3. "Slosh Suppression", SP-8031, NASA, 1969
4. J. R. Cho, J. M. Song and J. K. Lee, "Finite Element Techniques for the Free-Vibration and Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 37, No. 6-7, 2001, pp.467~483
5. K. Yamamoto, M. Kawahara, "Structural Oscillation Control using Tuned Liquid Damper", *Computers and Structures*, Vol. 71, 1999, pp.435~446
6. C. W. Hirt, A. A. Amsden, J. L. Cook, "An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds", *J. Comput. Phys*, Vol. 14, 1974, pp.227~253
7. T. Belytschko, J. M. Kennedy, "Computer models for subassembly simulation", *Nucl. Engrg. Des*, Vol. 49, 1978, pp.17~38
8. T. J. R. Hughes, W. K. Liu, T. K. Zimmerman, "Lagrangian-Eulerian finite element formulation for incompressible viscous flows", *Comput. Methods. Appl. Mech Engrg*, Vol. 29, 1981, pp.329~349
9. "Dytran User's Manual", MSC. Software Ver. 4.7
10. M. Souli, A. Ouahsine and L. Lewin, "ALE formulation for fluid-structure interaction problems", *Comput. Methods. Appl. Mech Engrg*, Vol. 190, 2000, pp.659~675
11. S. Y. Lee and J. R. Cho, "Baffled fuel-storage container: Parametric study on transient dynamic characteristics", *Structural Engineering and Mechanics*(in review)