

선회운동에 따른 배플형 연료탱크의 동응답 해석

Dynamic Response Analysis of Baffled Fuel-Storage Tank in Turnaround Motion

조진래† 홍상일* 김민정*

Cho, Jin Rae Hong, Sang Il Kim, Min Jung

(논문접수일 : 2002년 7월 26일 ; 심사종료일 : 2003년 3월 17일)

요지

비행체의 선회운동 시 액체연료 저장탱크의 동응답을 ALE(arbitrary Lagrangian Eulerian) 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 연료탱크는 선회운동 시 내부 연료의 관성력에 의해 상당한 양의 충격하중을 받게 된다. 또한, 이로 인해 유발된 큰 동 하중과 모멘트는 구조물의 안정성과 제어시스템에 영향을 미친다. 본 논문에서는 내부연료의 동적 영향력을 억제하기 위하여 링형 배플을 채용하였다. 배플개수와 배플위치에 따른 연료탱크의 파라메트릭 해석을 통하여 연료탱크의 동응답 특성에 미치는 배플의 영향을 분석하였다. 유체와 구조물 사이의 연계는 ALE 유한요소법을 통하여 정확하고 효과적으로 처리되었다.

핵심용어 : ALE 유한요소법, 링형 배플, 충격하중, 연료 저장탱크, 선회운동

Abstract

Dynamic response of baffled fuel-storage tank in turnaround motion is simulated using the ALE finite element method. Fuel-storage tank undergoes abrupt impact load caused by inertia force of internal fuel in turnaround motion. Also, large dynamic force and moment caused by this load influence structural stability and control system. In this paper, ring type baffles are adopted to suppress the dynamic influence. Through the parametric analysis with respect to the baffle number and location, the effects of baffle on the dynamic response of baffled fuel storage tank is analyzed. The ALE finite element method is adopted for the accurate and effective simulation of the hydrodynamic interaction between fluid and structure.

Keywords : ALE finite element method, ring type baffle, impact load, fuel storage tank, turnaround motion

1. 서론

로켓, 항공기 및 선박 등의 액체연료 저장탱크와 같이 유체와 구조물이 상호 작용하는 시스템의 동특성 해석은 구조물 또는 유체 자체만의 해석으로는 동응답 거동을 정확히 분석하기가 매우 어렵다. 유체의 관성에 의한 동하중은 구조물에 작용하여 구조물을 변형시키고 이 구조물의 변형은 다시 유체의 유동을 변화시킨다. 이러한 유체-구조물 연계 해석의 어려움으로 인해 FEM 이나 BEM 등의 연계 수치해석 기법을 개발·적용하고 있다.^{1)~4)} 본 논문에서는 Eulerian 기법과 Lagrange 기법의⁵⁾ 수치해석상의 장점들을 결합하여 유동경계를 쉽게 표현할 수 있고, 요소

격자의 변형을 적절하게 조절할 수 있는 ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian) 유한요소법을 적용하였다.^{6)~8)} 비행체의 선회운동 시, 유체의 현저한 유동으로 인하여 탱크는 막대한 충격하중을 받게되고, 이로 인해 탱크의 벽면에는 힘과 모멘트가 유발되어 구조물의 안정성 및 비행체의 제어성에 악영향을 미칠 우려가 있다. 본 논문에서는 이러한 유체의 충격하중과 표면출렁임과 같은 동적 효과들을 억제하기 위해 링형 배플을 채용하였다.

동일한 내공과 두께를 가진 링형 배플의 설치개수와 설치위치에 따른 내부유체의 유동형태 및 연료탱크에 작용하는 충격하중과 모멘트의 시간응답에 대한 비교해석을 수행하여 선회운동 시 액체 저장탱크의 동응답 특성에 미치는

† 책임저자, 정희원 · 부산대학교 기계공학과 부교수
전화: 051-510-2467; Fax: 051-514-7640
E-mail: jrcho@pusan.ac.kr

* 부산대학교 대학원

• 이 논문에 대한 토론회를 2003년 6월 30일까지 본 학회에 보내 주시면 2003년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

배플의 영향을 분석하였다. ALE 유한요소법의 적용을 위하여 상용 FEM 소프트웨어인 MSC/Dytran⁹⁾을 이용하여 수치해석을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 ALE 기술법

자유표면 유동, 유체-구조물 연계, 대변형 등의 문제에 대한 수치해석 접근방법에는 Lagrange기법과 Eulerian 기법, ALE기법 등이 있다. Lagrange기법에서 운동 경계는 절점의 운동과 정확히 일치하여 운동경계의 표현에 적합하다. 그러나 이러한 경계의 운동은 유체격자의 변형의 표현과 요소 재생성 등에 어려움이 있다. 반면에 Eulerian 기법에서는 격자영역이 공간상에 고정되며, 요소를 지나는 유량과 내부에너지 등을 계산한다. 따라서 변형이 심한 유체의 해석에 효율적이거나 정확한 유동경계의 적용이 어렵다. ALE기법은 이들 두 기법의 단점을 보완한 것으로 요소격자에 독립적인 운동을 부여함으로써 유체영역과 구조물영역의 경계를 쉽게 표현할 수 있을 뿐만 아니라, 요소격자의 심한 찌그러짐을 적절하게 조절하여 수치해석상의 효율성과 정확성을 높일 수 있는 유체-구조물 연계기법이다.^{10),11)}

ALE기법에 있어서 유체 격자와 구조물 사이의 ALE 연계면(coupling surface)을 Fig. 1에 나타내었다. 유체와 구조물은 이 연계면을 통해 상호작용한다. 즉, 유체격자는 ALE 연계면을 통해 구조물을 변형시키고, 변형된 구조물은 이 연계면을 통해 다시 유체 영역의 경계 역할을 한다. 한편, ALE 알고리즘에 있어 유체 격자의 격자점은 변형 후에도 균일 형상의 격자를 유지하기 위해 일정한 속도로

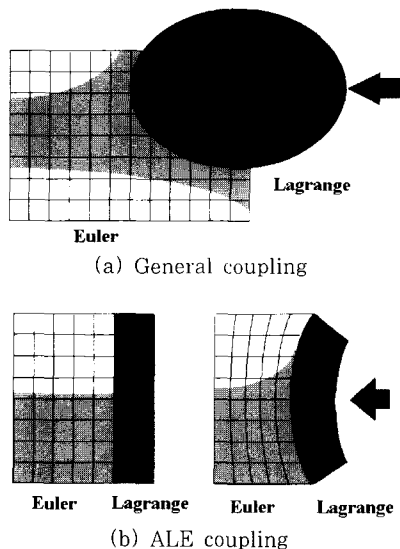


Fig. 1 General and ALE coupling

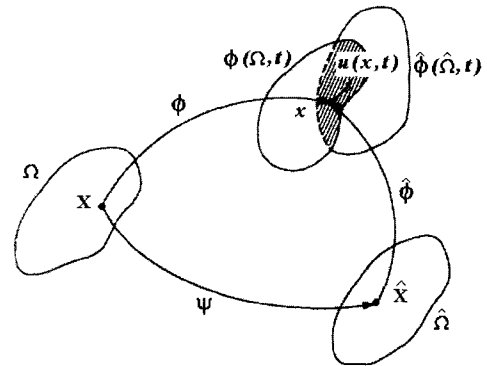


Fig. 2 Configuration of coordinates

구조물의 변형을 따라 움직인다.

Fig. 2에서와 같이 ALE 기술법을 정의하기 위해서 다음의 좌표계를 도입한다. 물질좌표계(혹은 Lagrange coordinates, X)와 공간좌표계(혹은 Euler coordinates, x) 그리고 참조좌표계(reference coordinates, \hat{X})의 총 세 가지이다.

물질좌표(material coordinate)는 다음과 같이 X 와 t 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$x = \phi(X, t) \tag{1}$$

여기서 x 는 공간좌표(spatial coordinate)로 X 로 정의된 절점의 현재 위치이며, ϕ 는 시간에 대한 절점의 운동, x 와 X 간의 사상함수(mapping function)이다.

또한 연속체의 거동은 참조좌표(referential coordinate) \hat{X} 를 통하여 표현할 수 있다.

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

여기서 $\hat{\phi}$ 는 참조좌표점의 운동, 혹은 x 와 \hat{X} 사이의 사상함수이다. 이러한 참조좌표점의 거동은 임의적이므로 물질좌표계와 일치할 필요는 없다. 그러나 세 개의 좌표계들은 반드시 일대일 관계가 성립되어야 한다.

ALE 기법에서는 각각 비독립적인 함수와 그 시간미분을 세 좌표계에서 정의된다. 식(3)은 물질좌표계에서의 시간미분과 참조좌표계에서의 시간미분의 관계를 나타낸다.

$$\frac{\partial f(X, t)}{\partial t} = \frac{\partial f(\hat{X}, t)}{\partial t} + c \cdot \nabla f \tag{3}$$

식(3)에서 $c \cdot \nabla f$ 항은 물질좌표와 참조좌표간의 상대운동에 의한 대류효과를 나타낸다. c 는 물질좌표 속도(v)와 참조좌표 속도(\hat{v})의 상대속도, 혹은 대류(convective) 속도이다.

$$c = v - \hat{v} \quad (4)$$

여기서 \hat{v} 의 선택에 따라 기술방법이 분류된다. 우선 $\hat{v}=0$ 이면 참조좌표는 공간에 고정되며, 이는 Euler 기술법에 해당되고, $\hat{v}=v$ 일 경우는 참조좌표와 물질좌표가 일치하는 Lagrange 기술법에 상응한다. $\hat{v} \neq v \neq 0$ 인 경우에는 참조좌표는 공간상에서 임의의 속도를 가지게되고 일반적인 경우의 ALE 수치기법이 된다. ALE 기법에서 참조좌표계는 대부분 유한요소 격자에 해당하며, 변형된 격자에 임의의 속도를 부여함으로써 균일하고 일정한 격자를 유지해 나갈 수 있으며, 해석의 효율성과 해의 정확성을 높일 수 있다.

2.2 ALE 수치해석 기법

점성·비압축성 유체에 대한 Navier-Stokes 방정식을 ALE 기술법을 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + c_j v_{i,j} = -\frac{1}{\rho} \sigma_{ij,j} + g_i \quad (5)$$

$$v_{i,i} = 0 \quad (6)$$

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

여기서 v 는 절점의 속도이며, ρ 는 밀도, μ 는 점성계수, g 는 중력, 그리고 p 는 압력을 나타낸다.

Explicit 시간 이산화는 비선형, 대변형 등의 문제에서 수치해의 정확성과 안정성을 확보하기 위해 미소 시간 간격이 요구되는 경우에 적합하다. 동응답 해석을 위한 2차의 중앙차분법(central difference scheme)에 따라 가속도와 속도항은 n 번째 시간단계에서 다음과 같이 시간 이산화된다.

$$\dot{v}^n = (v^{n+1} - 2v^n + v^{n-1})/\Delta t^2 \quad (8)$$

$$v^n = (v^{n+1} - v^{n-1})/2\Delta t \quad (9)$$

한편, FEM 해석에 있어 안정적인 해의 수렴을 위해 격자의 크기와 시간 간격(Δt)은 다음의 조건식을 만족해야 한다.⁹⁾

$$(\Delta t)_{crit} \leq h/(c+v) \quad (10)$$

여기서, h 는 인접한 절점간의 최소거리, c 는 음속, 그리고 v 는 격자를 통과하는 유체의 절대속도이다.

3. 수치해석 및 결과

3.1 해석 모델

해석 대상인 축대칭 원통형 강체탱크의 개략적인 형상과 속도조건을 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 선회 중심은 탱크의 무게중심(CG)으로부터 6,800m의 위치에 있으며 680m/s의 초기속도와 선회의 중심을 기준으로 0.1rad/s의 각속도를 부여하였다.

연료탱크는 강체로 가정하였으며 해석에 사용된 탱크 및 내부연료의 물성치와 형상치수를 Table 1에 나타내었다. 수직가속 후 내부 유체는 안정화되었으며 부스팅 과정에서 일정량의 연료소모를 고려하여 잔존 연료량을 50%로 가정하였다.

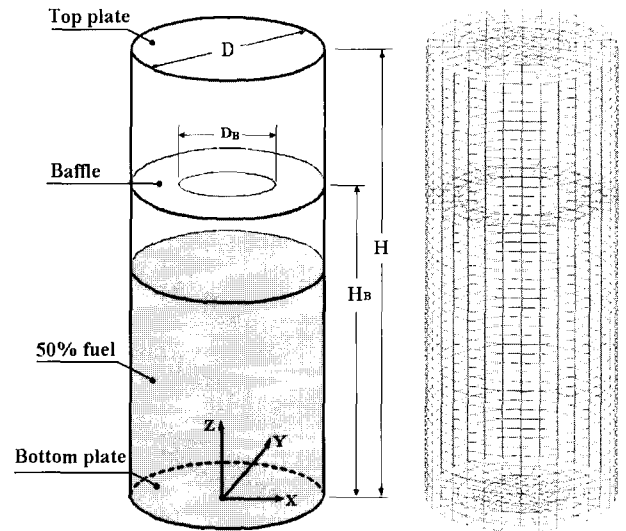


Fig. 3 Cylindrical fuel-storage tank

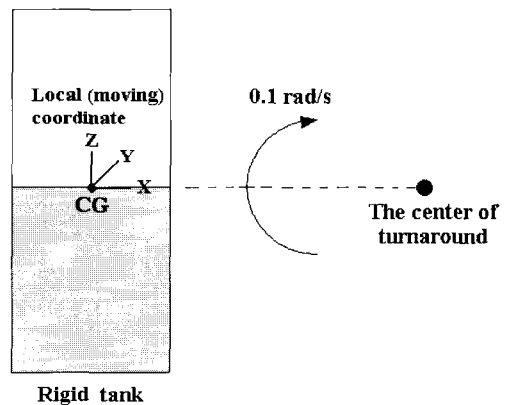


Fig. 4 Analysis model and velocity condition

Table 1 Material and geometry data

Material data		
Structure	Rigid body	
Fluid	Density	$8.15 \times 10^2 (\text{kg/m}^3)$
	Bulk modulus	$2.2 \times 10^9 (\text{N/m}^2)$
Geometry data		
Diameter of tank (D)		0.4(m)
Height of tank (H)		1.0(m)
Height of fluid (H_f)		0.5(m)
Inside diameter of baffle (D_B)		0.2(m)
Thickness of tank (t)		0.00254(m)
Thickness of baffle (t_B)		0.00254(m)

부스팅 후 안정화된 탱크 내부의 유체는 선회가 시작되면서 선회중심의 반대방향으로 급격한 원심가속도의 영향을 받게되어 선회중심의 반대쪽으로 이동한다. 이러한 급격한 유동의 변화는 탱크의 벽면에 상당한 충격하중으로 작용한다. 따라서 이러한 충격하중을 감소시키기 위하여 링형 배플을 이용하였다.

본 논문에서는 동일한 크기의 배플을 설치개수 변화에 따른 해석과 설치위치 변화에 따른 해석을 수행하였으며, 내부유체의 유동형태와 강제탱크에 작용하는 힘, 그리고 탱크의 무게중심(CG)에서 모멘트의 시간응답을 통하여 비행 안정성에 영향을 미치는 피칭(pitching)운동을 고찰하였다.

3.2 배플의 개수변화에 따른 해석

배플을 Fig. 5와 같이 탱크 높이를 균등 분할하여 0~4개 설치한 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

Fig. 7에 도시한 모멘트의 시간응답에서 모멘트 변화가 큰 시간영역(region 1~3)에서의 내부유체의 거동을 살펴보기 위해 유체의 중심단면에서 material fraction을 Fig. 6에 나타내었다. Material fraction은 요소 내에서 물질이 차지하는 비를 나타내는 것으로 내부유체의 유동 형태를 보여준다.

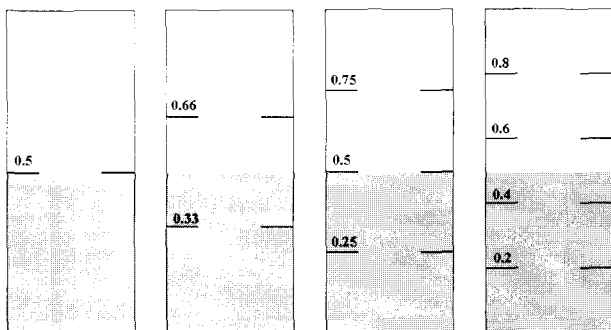
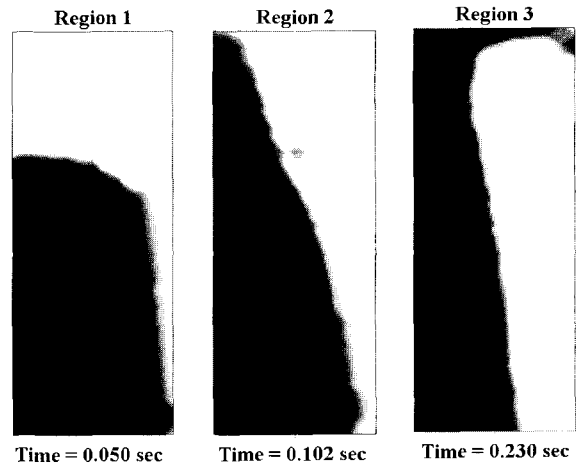
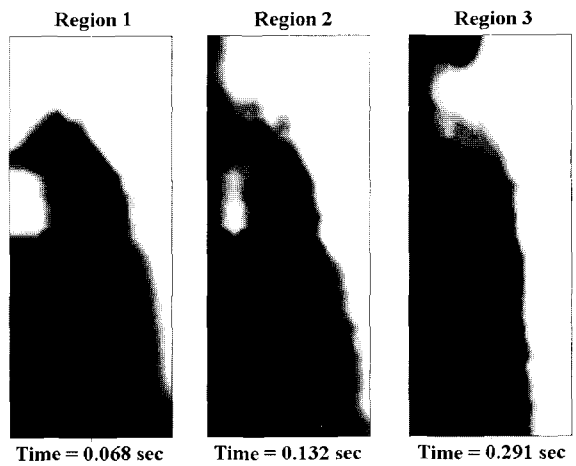


Fig. 5 Baffle location with respect to baffle number

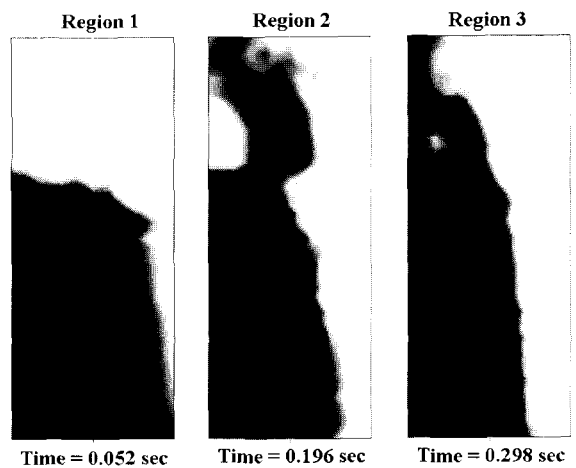
배플이 없는 경우 유체는 원심력으로 인해 선회 중심에서 먼 왼쪽 벽면을 타고 빠르게 상승하여 탱크의 윗면에 부딪치며 탱크에 큰 충격하중을 가한다. 그 후 유체는 윗면을 타고 오른쪽 위의 벽면에 부딪치고, 원심력에 의해서 다시 왼쪽 벽면으로 쏠리면서 안정화되는 유동특성을 나타낸다.



(a) No baffle



(b) One baffle



(c) Two baffles

Fig. 6 Material fractions of inner fluid

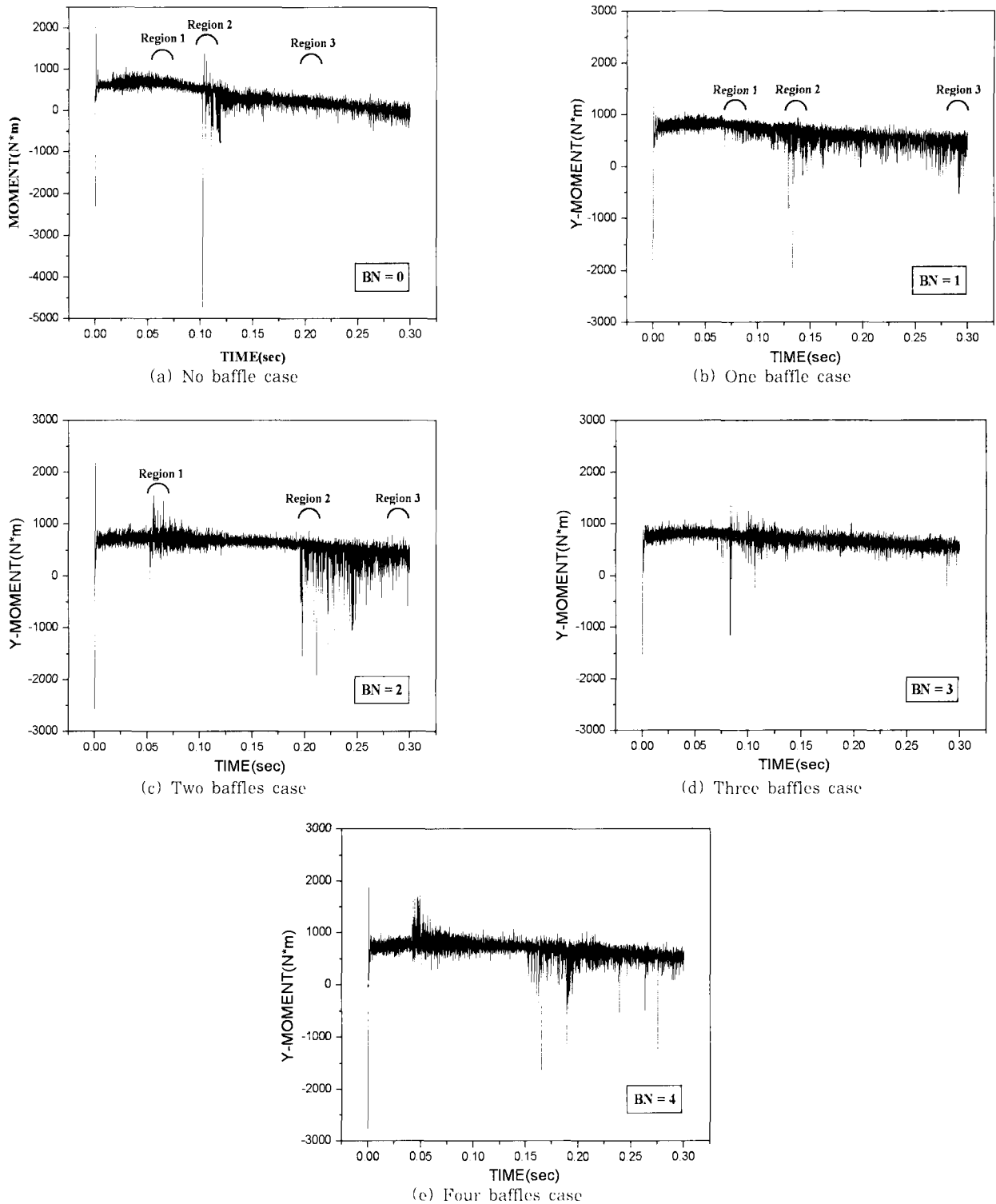


Fig. 7 Time-history responses of Y-moment according to the baffle number

배플이 한 개인 경우 유체의 자유표면과 배플이 같은 위치에 존재하게 되어 유체의 유동이 배플에 의하여 방해받게 된다. 따라서, 유체는 탱크 벽면을 따라 상승할 수 없으며, 배플내공을 통과하여 수직 상승한 후 원심력에 의해 왼쪽 벽에 부딪힌다. 그 후 배플이 없는 경우와 유사한 유동

형태를 보인다.

한편, 배플이 두개인 경우 유체가 벽면을 타고 상승하는 중에 배플에 부딪치게 되고 이 때 배플에 충격하중을 전달하게 된다. 배플내공을 통과한 유체는 왼쪽 벽면을 따라 상승하게 된다.

선회운동 시 비행안정성에 큰 영향을 미치는 피칭(pitching) 운동에 대한 배플의 영향을 분석하기 위하여 탱크의 무게 중심에 설정된 moving local coordinate에서의 모멘트(Y-moment)의 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

유체의 충격하중은 탱크의 벽면이나 윗면, 또는 배플에 부딪칠 때 발생하며 이때 매우 큰 모멘트 변동(moment fluctuation)을 보여준다. 그리고 배플을 설치함에 따라 모멘트의 최대값이 감소함을 확인할 수 있다.

배플 배열의 유사성으로 인해 배플이 세 개인 경우와 네 개인 경우는 각각 한 개와 두 개인 경우와 비슷한 유동형태를 보이며, 탱크 상부에 위치하는 배플에 유체의 유동에 의한 충격하중이 크게 작용함을 알 수 있다.

배플이 두 개와 네 개가 설치된 경우 모멘트 변동이 더 크고 더 자주 발생함을 볼 수 있다. 이는 배플의 수가 한 개 또는 세 개인 경우 배플이 유체의 자유표면과 같은 위치에 존재하여 선회 초기에 자유표면유동을 억제하는 효과가 있기 때문이다. 탱크의 윗면에 부딪치기 전 배플에 의한 2차 억제효과가 있는 세 개의 배플을 설치한 경우에 모멘트 변동의 최대치는 가장 작다.

3.3 배플의 위치변화에 따른 해석

배플의 설치 위치에 따른 시스템의 시간응답 특성을 통하여 배플의 영향을 분석하였다. 한 개의 배플을 각각 탱크의 하부($H_B/H=0.3$), 중앙($H_B/H=0.5$), 상부($H_B/H=0.7$)에 설치한 경우에 대하여 해석을 수행하였으며, 탱크의 벽면에 작용하는 힘(X-force), 탱크의 윗면 또는 배플에 작용하는 힘(Z-force), 그리고 탱크의 피칭운동에 영향을 미치는 모멘트(Y-moment)를 고찰하였다.

선회운동 시 유체의 유동형태와 충격하중이 작용하는 지점을 알기 위해 유체의 중심단면에서 속도벡터와 압력분포를 가시화 하여 Fig. 8과 Fig. 9에 도시하였다. 여기서 속도벡터는 탱크에 대한 유체의 상대속도이며 그 크기를 화살표의 길이로 나타내었다.

배플 아래부분의 유체는 혼합 또는 회전유동을 하며, 비교적 느린 유동속도를 보인다. 이에 반해 배플 윗부분의 유체는 탱크의 왼쪽 상단부를 향한 빠른 속도분포를 보인다. 그리고 윗면에 부딪친 후 시간이 지남에 따라 유속이 느려지며 유체는 안정화된다.

배플이 탱크의 하부에 위치한 경우 유체는 매우 빠른 속도로 탱크의 상단에 부딪치며 이 부분에 큰 압력분포를 보인다. 이에 반해 배플이 중앙에 있는 경우는 배플을 통과한 유체가 탱크의 벽면과 탱크 상단에 부딪칠 때 압력이 커지며, 배플이 상부에 위치한 경우 유체가 배플과 탱크의 상단에 부딪칠 때 압력분포가 크게 나타난다. 따라서 선회 시

유체가 탱크에 미치는 힘은 탱크의 상부와 상부에 존재하는 배플에 발생함을 알 수 있다. 또한 배플이 탱크의 상부

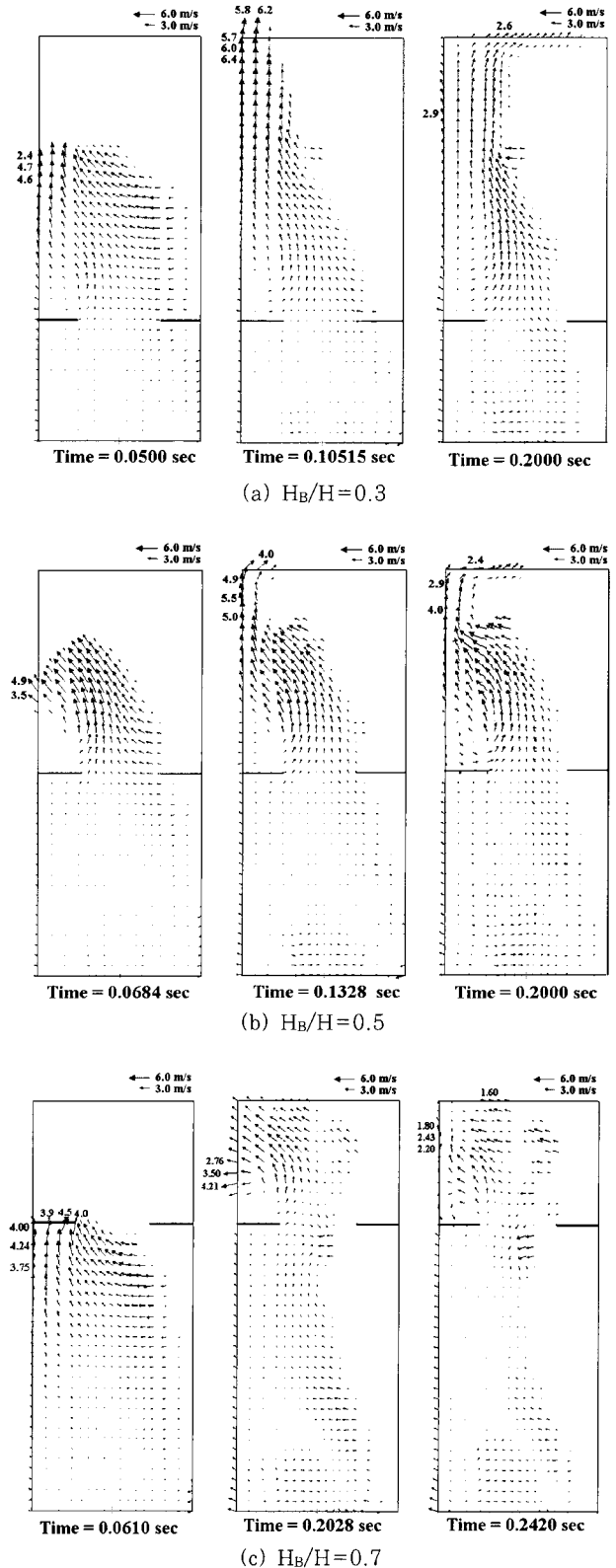


Fig. 8 Velocity vector of inner fluid with respect to the baffle location

에 위치하는 경우 하부에 위치한 경우와 달리 유체는 탱크의 상부에 지속적으로 힘을 가함을 볼 수 있다.

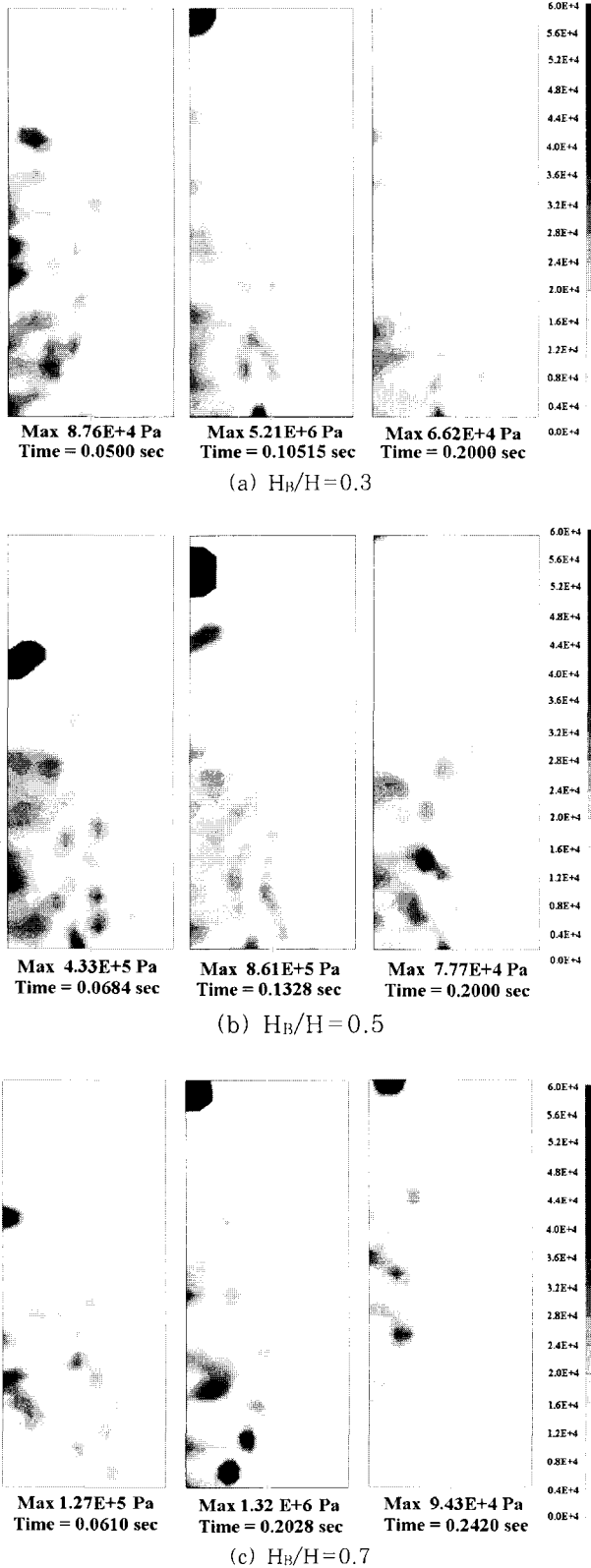


Fig. 9 Pressure distributions of inner fluid with respect to the baffle location

Fig. 11~13은 배플의 설치위치를 달리하였을 때 탱크에 작용하는 힘과 모멘트의 시간응답이다.

배플이 탱크의 하부에 설치된 경우, 유체가 탱크의 상단에 부딪칠 때 모멘트 변동이 매우 크게 나타나며 그 이외의 시간대의 모멘트 변동은 작다. 이때 탱크의 벽면에 미치는 힘이 윗면에 작용하는 힘보다 더 크며 모멘트 중심(탱크의 무게중심)과의 거리가 더 길기 때문에 모멘트 변화에 더 큰 영향을 준다.

배플이 유체의 자유표면과 배플이 같은 위치에 존재하는 경우, 유체는 큰 힘으로 탱크의 벽면에 부딪힌다. 그러나 이 경우는 모멘트 중심과의 거리가 짧아 모멘트 변동에는 큰 영향을 미치지 못하고 탱크의 상단에 부딪치는 시점에서 큰 모멘트 변동이 발생한다.

상부에 배플이 위치한 경우, 유체가 배플에 부딪칠 때 큰 충격하중을 전달하게 되어 큰 모멘트 변동이 발생한다. 또한 탱크의 상단에 부딪칠 때의 모멘트 최대치는 배플이 하부에 설치된 경우보다 작으나 부딪친 이후에도 다소 큰 모멘트 변동이 지속된다.

배플의 위치에 따른 모멘트 변동의 최대치는 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 배플이 $H_B/H=0.6$ 부근에 설치된 경우에 가장 작은 값을 나타낸다. 그러나 이 경우는 배플이 유체 표면보다 위에 있는 경우로 유체가 탱크의 윗면에 부딪친 후 다소 큰 모멘트 변동이 지속되는 단점이 있다.

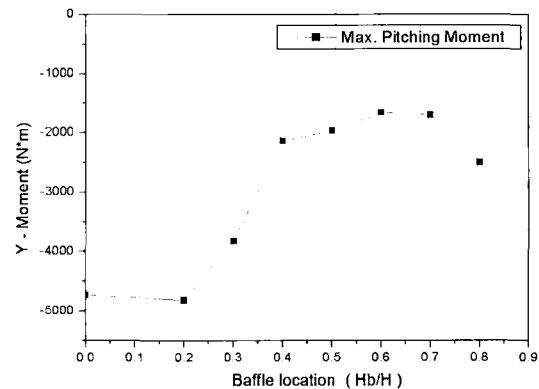


Fig. 10 Maximum Y-moment according to the ratio H_B/H

4. 결 론

본 논문에서는 선회운동을 하는 원통형 액체연료 저장탱크에 설치된 배플에 대한 영향을 평가하기 위하여 배플개수 및 배플위치에 따른 연료탱크의 수치해석을 수행하였다. 유체와 구조물의 정확한 연계해석과 수치해석상의 효율성을 위해 ALE 유한요소법을 적용하였다.

먼저 배플개수에 따른 해석에서 배플이 유체의 자유표면과

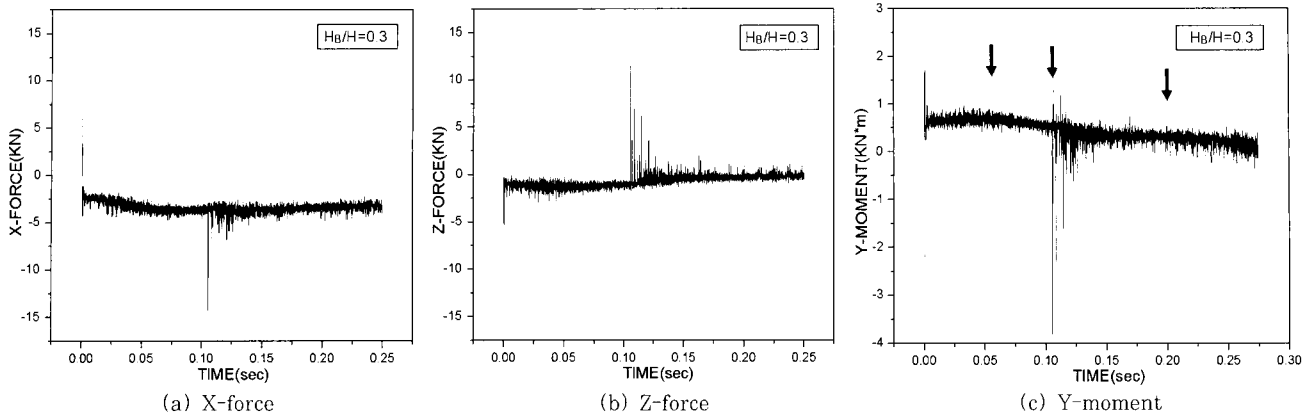


Fig.11 Time-history responses of force and moment($H_B/H=0.3$)

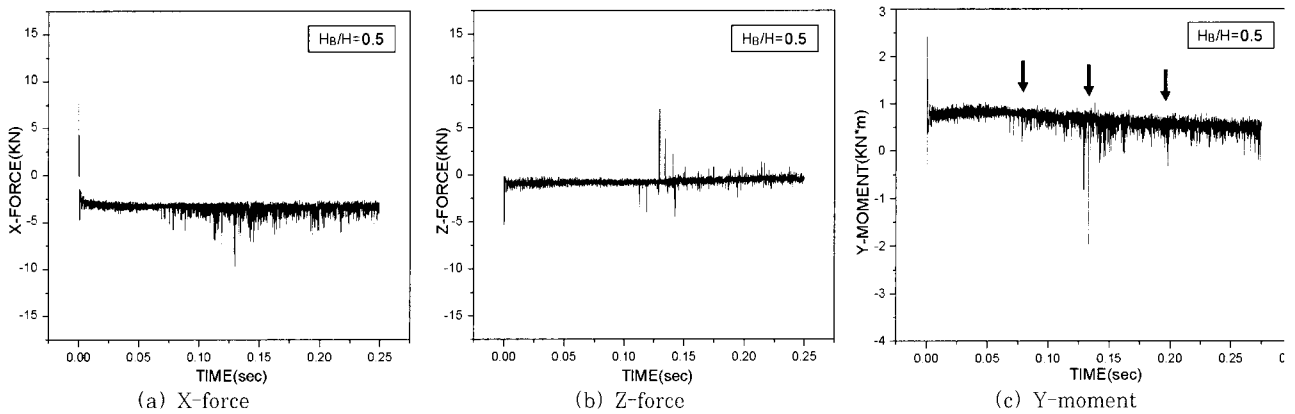


Fig. 12 Time-history responses of force and moment($H_B/H=0.5$)

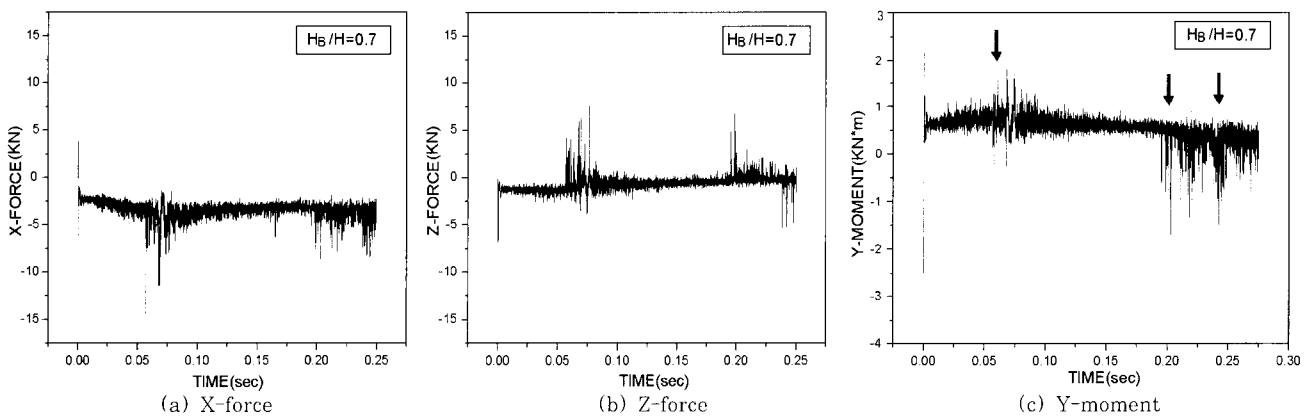


Fig. 13 Time-history responses of force and moment($H_B/H=0.7$)

같은 위치에 존재하여 선회 초기에 자유표면유동을 억제하는 효과가 있는 한 개 또는 세 개의 배플의 경우에 모멘트 변동이 작게 나타난다. 특히 탱크의 윗면에 부딪히기 전 배플에 의한 2차 억제효과가 있는 세 개의 배플을 설치한 경우 모멘트 변동이 가장 작다.

배플의 설치위치에 따른 해석에서는 배플 아랫부분의 유체는 느린 유동속도를 보이며 탱크 벽면에 미치는 힘은 적

다. 이에 반해 배플 윗부분의 유체는 빠른 속도로 탱크의 상단에 부딪치며 탱크에 큰 충격하중을 전달한다. 이러한 동하중은 모멘트 변화에 큰 영향을 준다.

회전운동에 영향을 미치는 Y-moment는 배플의 위치가 $H_B/H=0.6$ 부근에서 가장 작은 값을 나타낸다. 그러나 이 경우는 탱크의 윗면에 부딪친 후 다소 큰 모멘트변동이 지속되는 단점이 있다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. H. J. P. Morand and R. Ohayon, "Fluid Structure Interaction: Applied Numerical Method", Wiley & Sons, 1995
2. C. A. Brebbia, J. C. Telles, and L. C. Wrobel, "Boundary Element Techniques: Theory and Applications in Engineering", Springer-Verlag, 1984
3. 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
4. D. G. Stephens, "Flexible baffles for slosh damping", *Spacecraft Rockets*, Vol. 3, No. 5, 1966, pp.765~766
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. S. Y. Lee, and J. R. Cho, "Baffled fuel-storage container: Parametric study on transient dynamic characteristics", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 13, 2002, pp.653~670
11. 이희남, 신태명, "유체-구조물 상호작용을 고려한 실린더형 수중 구조물의 유한요소모델링 및 동적 응답 스펙트럼 해석", 한국전산구조공학회 논문집, 제14권, 제1호, 2001, pp.1~9