

원통형 액체 연료탱크의 초기 가속에 따른 과도응답 해석

이상영* · 주영신* · 김기환* · 조진래**

Transient Response Analysis of Cylindrical Liquid Fuel-Storage Tank subject to Initial Acceleration

S. Y. Lee, Y. S. Joo, K. W. Kim and J. R. Cho

Key Words: Transient response analysis(과도응답해석), Fuel-storage tank(연료탱크), ALE coupling method(ALE 연계기법), Fluid-structure interaction(유체-구조물 상호연계), Finite element analysis(유한요소 해석)

Abstract

The transient dynamic-response analysis of fuel-storage tanks of flying vehicles accelerating in the vertical direction is achieved with finite element method. A fuel-storage tank is a representative example of the fluid-structure interaction problem, in which structure and fluid media interact strongly. For the accurate analysis of this complicated fluid-structure system, we employed ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian) coupling method. Two types of fuel-storage tanks, one with two baffles and the other without baffle, are considered to examine the effect of baffles. The fuel-storage tank with baffles shows more uniform hydrodynamic pressure distribution, resulting effective stress in structural region and faster convergence from transient to steady states. MSC/Dytran, a commercial FEM software for the 3D coupled dynamic analysis, is used for this analysis..

1. 서 론

유체 매체와 접촉하고 있는 탄성체의 동특성은 탄성체만의 해석과 근본적인 차이가 있다. 유체에 의한 동압이 구조물에 작용하고 그로 인해 구조물이 연계적으로 변형하게 된다. 이러한 구조물의 변형은 다시 유체 영역의 흐름과 압력을 변화시킨다. 따라서 구조물과 유체는 하나의 연계시스템으로 간주되어야 한다. 이러한 유체-구조물 연계 문제는 비행체나 자동차의 연료탱크, 액체 연료 저장 탱크, 댐, 조선 등 여러 분야에서

발생하며, 단일 연계 시스템(single coupled system)으로 해석적인 방법으로 처리하기가 매우 어렵다. 따라서 유한요소법에 기초한 수치해석 해법이 여러 연구가들에 의해 개발·적용되고 있다. 이러한 유체-구조물 연계시스템의 수치해석 방법에는 부가질량 처리기법, Eulerian 기법, Lagrangian 기법, 그리고 ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian) 기법 등이 대표적인 기법으로 분류되고 있다.

본 논문은 비행체가 초기 가속 시, 내부의 원통형 액체 연료 탱크의 과도응답규명을 위한 유한요소 해석에 관한 것이다. 비행체의 연료 탱크는 두께가 매우 얇은 셸(shell) 구조로 이루어져 있는 대표적인 유체-구조물 상호작용 시스템이다. 비행체의 다양한 운항에 따라 연료탱크 내의 유체는 슬로싱(sloshing)이라는 출렁임 운동을 하게 되고, 이는 탱크 벽에 동압력으로 작용한다. 유

* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

** 회원, 부산대학교 기계기술 연구소

Email : jrcho@hywon.pusan.ac.kr

Tel : (051)510-2467 FAX : (051)514-7640

체와 구조물의 상호작용의 영향은 ALE 기법으로 처리되었다. ALE 기법은 자유표면 유동과 대변형 문제 등의 유체영역과 고체영역의 자유경계 문제를 수치해석하기에 매우 적절한 기법이다.

유체-구조물 전체의 고유주파수 보다 현저히 낮은 주파수를 지닌 유체의 sloshing과 같은 동적 특성은 탱크 벽면의 압력과, bending, torsion 등의 파괴현상을 초래할 수 있으며, 이를 최소화하기 위한 수동적 제어방법 중 하나가 격막(baffle)과 같은 sloshing damper를 사용하는 것이다. 이 기법은 탱크 내부에 격막을 설치함으로써, 저주파대의 유체 동특성을 연료탱크 전체의 고유주파수 범위로 조율하여 sloshing의 영향을 감소시켜 구조물의 동적 신뢰성을 향상시키고자 하는 것이다.

비행체가 초기 정지상태에서 짧은 시간 동안에 일정 가속도로 수직발사 될 때, 연료탱크의 바닥면에 발생하는 응력의 변화를 시뮬레이션 하였다. 또한 유체 동압의 영향을 줄이기 위해 격막이 있는 경우에 대해서도 동일한 해석을 수행하여 결과를 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 ALE 기법

잘 알려진 바와 같이, ALE 기법에 있어서 유체의 mesh는 ALE coupling surface를 통해 구조물을 변형시키고, 변형된 구조물은 다시 유체 영역의 경계조건의 역할을 한다. 유체 영역은 ALE 알고리즘에 의해 mesh grid point가 일정한 속도로 구조물의 거동을 따라 움직이게 된다.

구조물 영역에 대해서는 선형 탄성이론을 적용하고, 유체 영역에 대해서는 압축성, 비점성 유체에 대한 Navier-Stokes 방정식을 적용한다. ALE 격자의 운동은 pseudo-material 모델을 적용한다.

구조물 영역과 유체 영역에 대한 물리량을 각각 아래 첨자 s와 f로 표현하고, ALE 격자와 관계 있는 물리량은 (^)으로 구분한다.

체적력 b 가 작용하는 구조물의 운동 방정식은

$$\nabla \sigma + \rho_s b - \rho_s \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = 0$$

가 되고, 이에 대한 유한요소 행렬식은 다음과 같다.

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{U}}_s + \mathbf{K}_s \mathbf{U}_s = \mathbf{F}_s$$

$$\mathbf{M}_s = \int_{\Omega} \mathbf{N}_s^T \rho_s \mathbf{N}_s d\Omega$$

$$\mathbf{K}_s = \int_{\Omega} \mathbf{B}_s^T \mathbf{D}_s \mathbf{B}_s d\Omega$$

$$\mathbf{F}_s = \int_{\Omega} \mathbf{N}_s^T \rho_s \mathbf{b}_s d\Omega$$

$$\mathbf{B}_s = \mathbf{S} \mathbf{N}_s$$

또한 ALE 기법에 따른 비점성 유체의 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + [(\mathbf{u} - \mathbf{w}) \cdot \nabla] \mathbf{u} - \mathbf{f} = 0$$

$$\mathbf{u}^T = \{\rho, \rho u_1, \rho u_2, \rho u_3\}$$

$$\mathbf{f}^T = \{0, -\rho f_x, -\rho f_y, -\rho f_z\}$$

$$\mathbf{w} \sim \text{ALE grid의 속도}$$

이를 변분정식화와 이산화을 거쳐 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{U}}_f + \mathbf{K}_f \mathbf{U}_f = \mathbf{F}_f$$

$$\mathbf{M}_f = \int_{\Omega} \mathbf{N}_f^T \mathbf{N}_f d\Omega,$$

$$\mathbf{K}_f = \int_{\Omega} \mathbf{N}_f^T \overline{\mathbf{C}}_f \mathbf{S} \mathbf{N}_f d\Omega,$$

$$\mathbf{F}_f = \int_{\Omega} \mathbf{N}_f^T \mathbf{f}_f d\Omega$$

여기서 $\overline{\mathbf{C}}$ 는 유체의 ALE 격자에 대한 상대속도로 $\overline{\mathbf{C}} = \mathbf{u} - \mathbf{w}$ 이다.

ALE 격자는 유체가 위치할 수 있는 구조물 내의 공간에서 생성되며, 구조물의 변형에 따라 변형되지만 구조물과 독립된 운동을 하며, 격자 조건(mesh regularity)을 유지해야 한다.

ALE 격자의 운동은 구조물과 비슷하게 운동하는 pseudo-material 모델을 구성하여 다음과 같이 표현된다. 경계 조건은 $n-1$ 번째 time step에서의 구조물의 변형이 적용된다.

$$\hat{\mathbf{M}} \ddot{\hat{\mathbf{x}}} + \hat{\mathbf{C}} \dot{\hat{\mathbf{x}}} + \hat{\mathbf{K}} \hat{\mathbf{x}} = 0$$

2.2 Explicit 시간 적분법

Explicit 시간 근사화는 짧은 transient 해석에 적합하며, 물성 비선형, 거대 형상 비선형, 응력과 영향 등과 같은 문제에서 수치해의 정확성과 안정성을 확보하기 위해 small time step이 요구되는 경우에 사용된다.

n 번째 time step에 있어서 각 영역은 다음과 같이 이산화 된다.

[구조물 영역]

$$M_s^n \ddot{U}_s^n + K_s^n U_s^n = F_s^n$$

$$\ddot{U}_s^n = \frac{U_s^{n+1} - 2U_s^n + U_s^{n-1}}{(t^{n+1} - t^n)(t^n - t^{n-1})}$$

$$\dot{U}_s^n = \frac{U_s^{n+1} - U_s^{n-1}}{(t^{n+1} - t^{n-1})}$$

[유체 영역]

$$M_f^n \ddot{U}_f^n + K_f^n U_f^n = F_f^n$$

$$\ddot{U}_f^n = \frac{U_f^{n+1} - U_f^{n-1}}{(t^{n+1} - t^{n-1})}$$

[ALE 격자]

$$\hat{M}^n \ddot{\hat{x}}^n + \hat{C}^n \dot{\hat{x}}^n + \hat{K}^n \hat{x}^n = 0$$

$$\ddot{\hat{x}}^n = \frac{\hat{x}^{n+1} - 2\hat{x}^n + \hat{x}^{n-1}}{(t^{n+1} - t^n)(t^n - t^{n-1})}$$

$$\dot{\hat{x}}^n = \frac{\hat{x}^{n+1} - \hat{x}^{n-1}}{(t^{n+1} - t^{n-1})}$$

$$w = (\hat{x}^{n+1} - \hat{x}^n) / \Delta t$$

안정적인 수치해석을 위해 다음과 같은 시간 간격의 제한을 적용한다. 보통 격자의 크기는 매우 작고, 유체를 지나는 음속은 비교적 크므로, 시간 간격은 매우 작아지게 된다.

$$\Delta t < L / (c + u)$$

여기서, L 은 요소의 최소 간격, c 는 acoustic velocity, u 는 격자를 지나는 유체의 속도이다.

3. Numerical experiment

3.1 해석 모델

해석 대상인 원통형 액체 연료탱크의 개략적인 형상은 Fig. 1과 같다. 내부 직경이 $D/2$ 인 두 개의 baffle이 있고, 액체 연료가 80% 채워진 상태이다. 주어진 치수와 물성치는 임의의 값을 사용하였다.

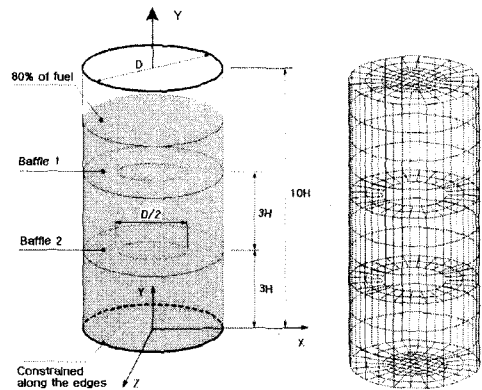


Fig. 1 Cylindrical fuel-storage tank with two baffles and its FEM model

중력은 $-Y$ 방향으로 작용하며, $+Y$ 방향으로 일정한 가속도로 운동한다. 해석시간은 출발에서부터 1초까지이다. 경계조건으로는 연료탱크가 비행체에 고정되는 상·하면의 테두리(edge)에 clamp 상태로 처리하였다.

탱크는 shell 요소로 모델링되었고, 액체 연료는 Eulerian 요소로 이루어져 있으며, 20%의 빈 공간은 void 요소로 지정되었다. 구조물과 액체가 접하는 경계는 ALE surface가 지정되어 이를 통하여 유체의 압력이 구조물에, 구조물의 변형이 유체에 미치는 영향이 정확하게 계산된다.

3.2 해석 결과

3.2.1 탱크벽면에 작용하는 Effective stress

Fig. 2 Fig. 3 simulation 결과를 상용 전,후 처리 프로그램인 MSC/Patran을 이용하여 연료탱크의 outer layer의 Effective stress 분포를 cylinder의 측면과 밑면에서 몇 개의 time step 별로 나타낸 것이다.

아래 그림에서 각 time step에서의 최고 유효 응력값은 baffle이 있는 경우가 더 낮게 나오는 것을 알 수 있다. 또한 baffle이 있는 탱크의 경우 초기에 바닥중심부에 순간적으로 높은 유효 응력 분포를 보인다. 이는 baffle의 중심부가 비어 있기 때문으로 생각된다. 하지만 시간이 지날수록 점차 초기 상태와 비슷한 유효 응력분포를 보이는 것을 확인 할 수 있다.

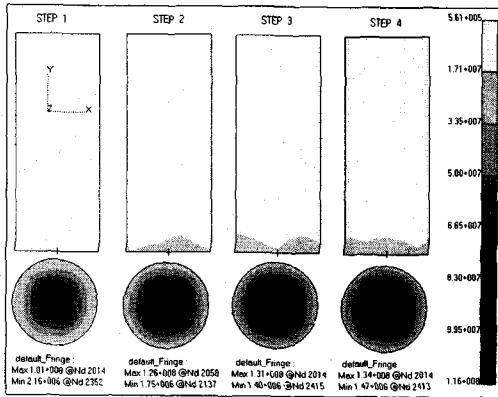


Fig. 2 Variation of effective stress(outer-layer) with respect to time (without baffles)

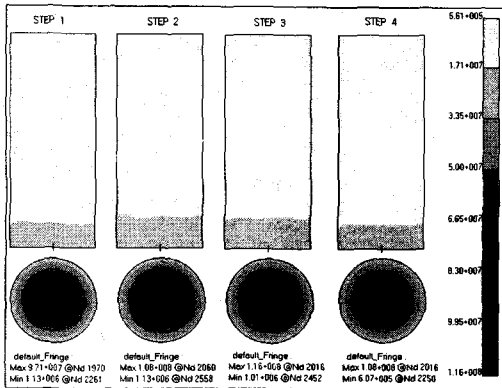


Fig. 3 Variation of effective stress(outer-layer) with respect to time (with baffles)

측면에서의 유효 응력값 분포를 살펴보면, 두 경우 모두 축에 수직인 방향으로의 변화가 그다지 크지 않다. 그러나 baffle이 있을 경우의 측벽 하단부에 작용하는 압력이 분포가 더 넓으며 시간에 대해 변화가 적음을 볼 수 있다. 반면 baffle이 없는 경우는 바닥면의 응력이 시간과 더불어 점점 커지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 정상상태에 도달하기까지 더 많은 시간이 소요되리라는 것을 예상할 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 밑면의 중심에서 반경방향으로 R에 대한 상대거리가 각각 0, 1/2, 3/4, 1 되는 지점에서의 유효응력의 시간 응답 곡선을 두 경우에 대해 나타낸 그래프이다.

Baffle이 있는 경우, 초기에 급격한 증가를 보이다가 그 이후로는 일정 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 중심부(R=0)에서 멀리 떨어진 지점(R=1)에서 가정 현저한 수렴성을 보이며, baffle이 유체의 유동을 막아주지 못하는 R<1/2 영역의 두 점 R=0, 1/2의 발생 응력값이 나머지 두 지점(R=3/4, 1)보다 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Baffle이 없는 탱크의 경우에는 유효응력값의 진동(oscillation)이 심하다는 것을 확인할 수 있다. 아울러, 이 경우 역시 중심부(R<1/2)에서의 유효응력값이 보다 더 크다는 것을 알 수 있다.

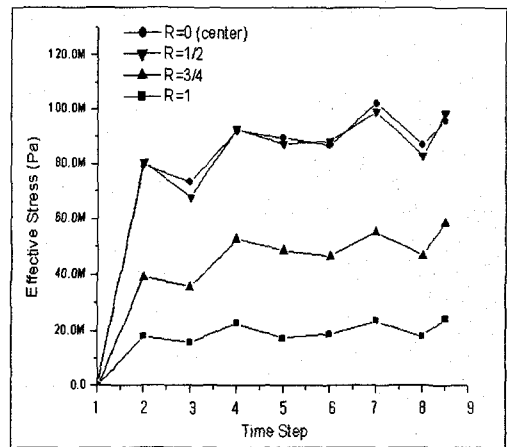


Fig. 5 Variation of effective stress(outer-layer) at four sampling positions along time (without baffles)

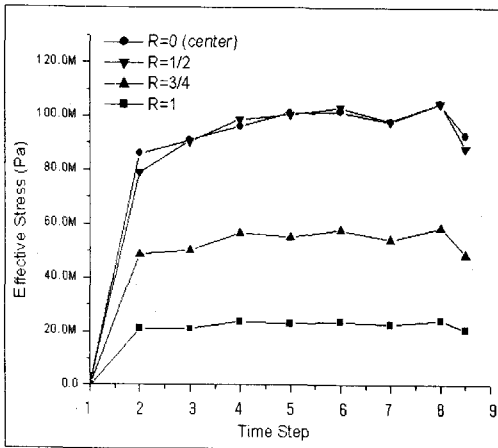


Fig. 5 Variation of effective stress(outer-layer) at four sampling positions along time (with baffles)

3.2.2 탱크벽면에 작용하는 hydrodynamic pressure

Fig. 6과 Fig. 7은 유체에 의해 탱크의 측면과 밑면에 작용하는 압력분포를 각 time step 별로 나타낸 것이다.

여기서도 앞에서의 유효응력 경우와 마찬가지로 각 time step에서 최대 압력 값이 baffle이 있는 경우가 더 작게 나오는 것을 확인 할 수 있다. 또한 baffle이 없는 경우, 옆면과 밑면에서 baffle이 있는 경우보다 훨씬 더 복잡한 압력분포를 보인다. Baffle이 있는 경우, 시간경과와 더불어 오히려 보다 안정적인 압력 분포를 보여준다. 이는 baffle이 있는 경우 액체연료의 내부유동의 동적 영향이 적어짐을 말하며, 이로 인해 과도상태(transient stat)에서 정상상태(steady state)로의 안정화가 빠름을 보여준다.

3.2.3 Baffle의 변형

수직 상승하는 액체 저장탱크는 내부 유체의 유동으로 인해 baffle이 변형을 받게 된다. Fig. 8은 각 time step에서의 baffle의 유체의 유동에 의한 움직임을 확대하여 나타낸 것이다.

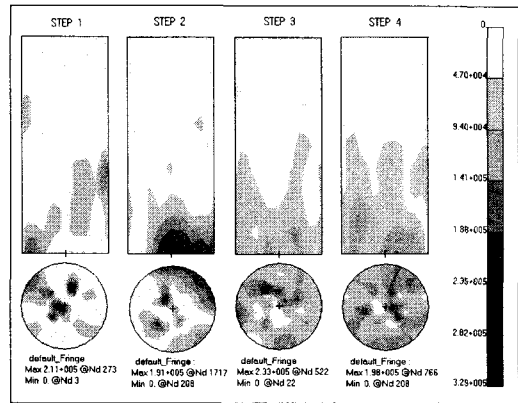


Fig. 6 Time-history response of hydrodynamic pressure (without baffle)

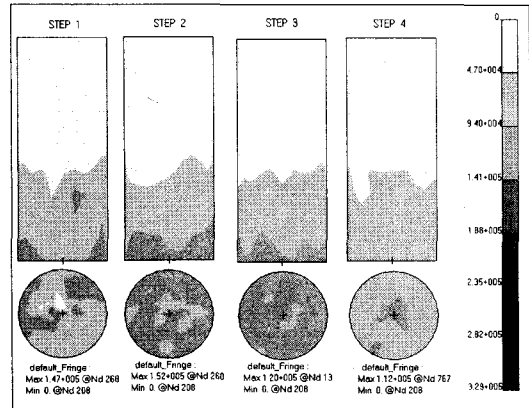


Fig. 7 Time-history response of hydrodynamic pressure (with baffles)

밑면이 유체의 압력에 의하여 볼록해지는 현상을 확인할 수 있다. 초기 변형 상태에는 관성력에 의해서 baffle이 탱크 진행 방향의 뒤쪽으로 변형하지만 시간이 지나면서 그 변형 양상이 다양하다. 이러한 다양한 baffle의 변형 양상을 통해 유체의 내부 유동이 심함을 확인할 수 있고, baffle은 이러한 유체의 내부유동에 대한 감쇠 역할을 하며 운동에너지를 소모함으로써 정상상태(steady state)로의 천이(transition)를 빠르게 한다.

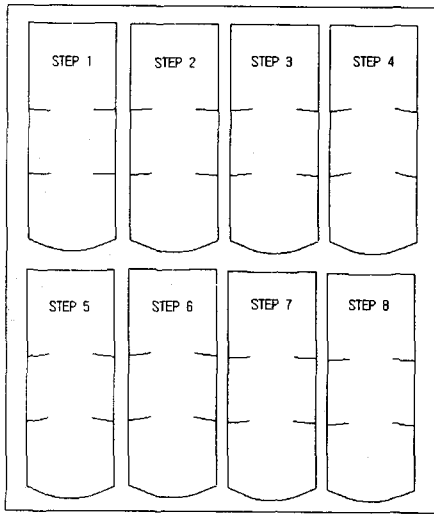


Fig. 8 Deformation variations of baffles along time step

4. 결론

수직 발사되는 비행체의 연료탱크의 초기 가속 시의 짧은 시간동안 과도응답을 유한요소해석을 통해 분석하였다.

Baffle이 없는 경우와 두 개의 baffle이 있는 경우에 대해 각각 탱크의 바닥 면과 측면에 작용하는 유체의 압력과 탱크 shell에 발생하는 유효 응력을 비교·검토하였다. Baffle의 영향에 의해 해석대상은 보다 빨리 정상상태에 도달하게 되며 유체의 압력과 구조물의 발생 응력도 안정된 분포를 보여준다. 가속에 의해 액체 연료는 내부 유동을 심하게 하며, 이는 baffle의 불규칙한 변형 모습을 통해 가시화 되었다. Baffle은 이러한 유체의 내부유동을 감소시켜 비행안정성을 증가시킬 수 있다.

참고문헌

- (1) J.R. Cho, J.K. Lee, J.M. Song, S.H. Park, and J.N. Lee, "Free vibration analysis of above ground LNG-storage tanks by the finite element method", *KSME international Journal*,

Vol. 14, No. 6, pp. 633~644, 2000.

- (2) A. Gedikli, M. E. Ergüven, "Seismic analysis of a liquid storage tank with a baffle", *Journal of Sound and Vibration* 223(1), pp. 141-155, 1999.
- (3) R.D. Young, M.P. Nemeth, T.J. Collins, J.H. Starnes Jr., "Nonlinear analysis of the space shuttle superlightweight LO2 tank : Part 1-Behavior under booster ascent loads", 39th AIAA/ASME /ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Long Beach, California, AIAA 98-1838, April 20-23, 1998.
- (4) E.Lefrancois, G.Hatt and D. Vandromme, "Fluid-structural interaction with application to rocket engines", *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 30, pp. 865-895, 1999.
- (5) A. Soulaïmani, Y. Saad, "An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for solving three-dimensional free surface flows", *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering* 162, pp. 79-106, 1998.
- (6) L.E. Malvern, "Introduction to the mechanics of a continuous medium", Prentice-Hall Inc, 1969.
- (7) O.C.Zienkiewicz and R.L.Taylor, "The finite element method vol.II ", 4th ed., McGraw-Hill book company, 1991.