

용기안에서 액체출렁임현상의 고유진동수결정을 위한 한가지 수치모의방법

서금혁, 한의철

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《우리는 과학기술을 발전시켜도 남들이 걸은 길을 따라만 갈것이 아니라 우리 과학자들의 애국충정과 우리 인민의 슬기와 민족적자존심을 폭발시켜 년대와 년대를 뛰어넘으며 비약해나가야 합니다.》

용기안에서의 류체운동은 류체와 용기사이의 호상작용을 고려하는 류체동력학문제로서 오래전부터 많이 연구되어왔다. 선행연구[1]에서는 연료탱크안에서의 2상(액체-기체) 흐름해석의 정확성을 높이기 위한 한가지 방법으로서 자동그물적합방법을 제기하였다. 액체-고체접촉면의 복잡한 궤적을 추적하기 위하여 논문에서는 CFD의 VOF모형을 리용하였는데 VOF모형은 계산오차를 줄이기 위하여 매 접촉면위치에서의 그물분할을 세밀히 할것을 요구한다.

선행연구[1]에서는 가로진동하는 간단한 용기와 경기용자동차의 윤활유탱크에서의 출렁임문제에 대한 해석에 자동그물적합방법을 적용하여 계산정확도를 높이였다. 선행연구[2]에서는 2차원 및 3차원 CFD해석을 통하여 각이한 형태의 연료탱크들에서의 연료출렁임과 출렁임방지판을 리용한 출렁임감소문제에 대하여 연구하였다.

우리는 액체-기체 2상흐름의 CFD적해석방법을 리용하여 탱크안에서의 액체출렁임의 고유진동수를 결정하기 위한 한가지 수치모의방법에 대하여 연구하고 해석결과와의 비교속에서 그 타당성을 검증하였다.

1. 문 제 설 정

출렁임은 파동현상으로서 중력과 겹면장력 그리고 표면운동학에 의하여 일어난다. 우리는 용기안에서의 액체출렁임을 해석하기 위하여 한가지 원기둥형용기안에서 초기에 자유표면이 일정한 각도로 경사져있던 액체의 출렁임의 고유진동수를 결정하는 문제를 설정하였다.

용기안에서의 액체의 출렁임은 액체-기체 2상의 호상작용을 포함하며 VOF모형을 리용하여 모의할수 있다. 두 상사이의 경계면은 상들의 체적비에 관한련속방정식풀이를 통하여 얻을수 있다. q^{th} 상에 관해서 이 방정식은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (1)$$

여기서 \dot{m}_{qp} 는 상 q 로부터 p 상에서의 질량수송이고 \dot{m}_{pq} 는 상 p 로부터 상 q 로의 질량수송이다. 오른변의 원천항 S_{α_q} 는 령이다. 만일 매 상에 대하여 어떠한 질량원천이 있

으면 설정할수 있다. 매 상들의 체적비들사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

체적비방정식은 음적이나 양적인 시간리산화를 통하여 풀수 있다.

수송방정식들에서 나타나는 속성들은 매 조종체적에서 구성성분상들의 존재에 의하여 결정할수 있다. 실험로 2상문제의 경우 매 세포에서의 밀도는 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (3)$$

일반적으로 n 상문제에서는 $\rho = \sum \alpha_q \rho_q$ 로 된다. 점성과 같은 다른 속성들도 이와 같이 계산할수 있다.

2. 수치모의방법

우리는 용기안에서의 출렁임을 해석하기 위하여 그물작성을 다음과 같이 하였다.

용기의 직경은 $D=15.24\text{cm}$ 이고 용기의 높이는 $H=27.94\text{cm}$ 이며 액체는 초기에 xy 평면상에서 일정하게 경사져있었다고 가정하고 계산그물수의 견지에서 흐름의 z 축상에서의 대칭성을 고려하여 원기둥용기의 반모형을 반영하였다. 또한 x 축상에서 그물의 대칭성을 보장하도록 용기의 바닥면의 그물을 작성하고 계산결과에 미치는 그물분할의 영향을 고려하여 전체 그물분할을 3mm 크기의 6면체요소그물(대략 10만개)로 작성하였다.[2]

용기안에서의 출렁임해석을 위하여 류체전용해석프로그램 FLUENT의 다상매질흐름 해석모형인 VOF모형을 리용하였다. 용기의 윗면은 열려져있으며 이로부터 VOF의 개수로 흐름모형(중력가속도 $g=9.8\text{m/s}^2$)을 리용하였다.

매질들의 특성량들은 표 1과 같다.

표 1. 매질들의 특성량

매 질	밀도 $/(kg \cdot m^{-3})$	점성계수 $/(kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$
액체(연료)	618	0.000 248 8
기체(공기)	1.225	0.000 017 894

용기의 옆면과 바닥에서는 벽조건으로서 비미끄럼조건을 설정하고 용기윗면은 압력출구조건으로서 대기압이 작용하도록 하였다.

그림 1에서 초기조건과 경계조건을 제시하였다.

계산에서는 용기안에서의 류체운동을 층류로 가정하고 압력-속도련결도식으로서 SIMPLE도식을 리용하였으며 모든 계산오차들을 10^{-4} 이하로 수렴시켰다. 이때 매 시간걸음에서의 반복수는 40~60정도였다.

비정상계산에서 류체의 질량중심의 자리표를 계산하기 위한 UDF를 작성하고 매 시간걸음에서의 질량중심을 계산하

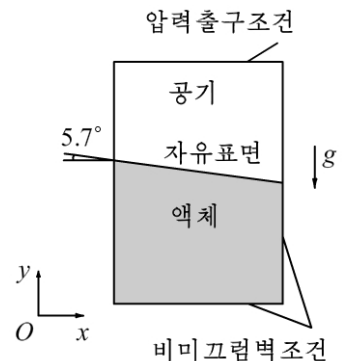


그림 1. 초기조건과 경계조건

여 출렁임의 고유진동수를 결정하였다.

일반적으로 요소들로 이루어진 계의 질량중심의 자리표는 다음과 같이 계산할수 있다.

$$r_c = \frac{\sum_i \rho_i V_i r_i}{\sum_i \rho_i V_i}$$

여기서 ρ_i , V_i , r_i 는 각각 i 번째 요소의 밀도와 체적, 요소중심의 자리표벡터이고 r_c 는 질량중심의 자리표벡터이다.

UDF에서는 매 시간결음의 계산이 끝난 후 매 그물요소에서의 밀도와 체적, 자리표를 얻어내어 용기안의 류체의 질량중심을 계산하였다.

3. 계산결과와 분석

원기둥용기안에서의 출렁임의 고유진동수는 해석적으로 다음과 같이 계산할수 있다.[3]

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1.841g}{R} \operatorname{th}\left(\frac{1.841h}{R}\right)}$$

여기서 h 는 액체의 높이이고 R 는 용기의 밀면반경이다.

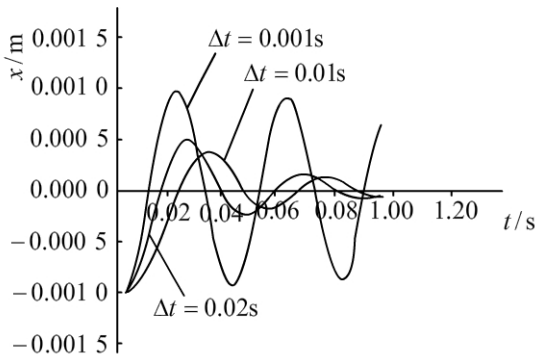


그림 2. 시간에 따르는 류체질량중심의 위치변화

계산에서는 먼저 시간결음의 크기에 따르는 계산정확도를 평가하기 위하여 $h/R=1.8$ 인 경우 시간결음의 크기를 0.02, 0.01, 0.001s로 변화시키면서 계산을 진행하여 해석결과와 비교하였다. 결과 시간결음을 $\Delta t=0.001s$ 로 할 때 시간결음크기의 영향을 무시할수 있다는것을 알수 있었다.

그림 2에서는 시간에 따르는 류체질량중심의 위치변화를 보여주었다.

다음은 용기안에서 액체의 높이에 따르는 출렁임의 고유진동수를 계산하였다. 표 2에서는 각이한 액체높이에 따르는 출렁임의 고유진동수계산결과를 해석결과와 비교분석하였다.

표 2. 각이한 액체높이에 따르는 출렁임의 고유진동수계산결과

액체 높이	$h/R=1.8$	$h/R=1.0$	$h/R=0.5$
해석결과	2.446Hz	2.388Hz	2.087Hz
수치결과	2.433 Hz	2.312Hz	2.044Hz
오차	0.5%	1.3%	2.1%

그림 3에서는 시간에 따르는 질량중심의 위치변화를 보여준다. 해석결과와의 비교를 통하여 우리가 논문에서 연구한 용기안에서의 액체출렁임에 대한 수치계산방법이 아주 높은 정확도로 해석결과와 일치한다는것을 알수 있다.

이와 같이 용기안의 액체높이에 따르는 액체출렁임의 고유진동수를 결정할수 있는

한가지 수치계산방법을 연구하고 그 타당성을 검증하였다. 본문의 방법은 용기의 가속과 회전을 비롯한 여러가지 운동으로 인한 액체충돌임의 해석에 리용할수 있다.

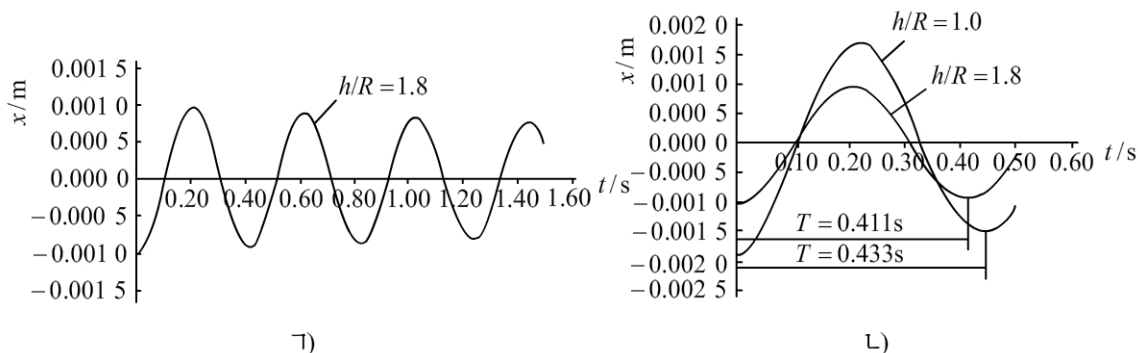


그림 3. 시간에 따르는 질량중심의 위치변화

1) $h/R=1.8$ 인 경우, 2) $h/R=1.0$ 과 $h/R=1.8$ 인 경우의 비교

참 고 문 헌

- [1] S. Fontanesi et al.; Energy Procedia, 81, 856, 2015.
- [2] J. Hall et al.; Journal of Fluids and Structures, 56, 11, 2005.
- [3] R. A. Ibrahim; Liquid Sloshing Dynamics, Theory and Applications, Cambridge University Press, 56~134, 2005.

주제108(2019)년 6월 10일 원고접수

A Numerical Simulation Method for Prediction of the Natural Frequency of Liquid Sloshing in a Container

So Kum Hyok, Han Ui Chol

In this paper, we study a numerical simulation method to determine the natural frequency of liquid sloshing in a container. We illuminate that the result of the unsteady solutions of CFD analysis of liquid-gas multiphase flow depends greatly on the size of time step and that the natural frequency considerably agrees with the analytical solutions.

Key words: sloshing, natural frequency