

유체 저장 용기 내에서의 슬로싱 현상에 관한 매개변수 연구

Parametric Study on Sloshing Phenomena of Fluid Storage Tank

고병한* · 임승호* · 박노철* · 박영필* · 박경수 †

Byunghan Ko, Seungho Lim, Kyoung-Su Park, No-Cheol Park, and Young-Pil Park

1. 서론

주변에서 흔히 볼 수 있는 물컵이나 작은 수조에 서부터 LNG 운반선, 원자로 등 거대한 구조물에 이르기까지 유체가 담겨있는 구조물들은 유체가 담겨 있지 않을 때와는 다른 동적 특성을 나타내게 된다. 특히 유체의 자유표면에서 외력에 의해 출렁거림이 발생하는 현상을 슬로싱 현상이라고 하는데, 슬로싱 현상은 고유진동수와 모드형상을 가지며 외부 가진 진동수가 슬로싱 현상의 고유진동수와 일치하게 되면 유체의 변형이 크게 일어난다. 거대한 유체 저장 구조물의 경우, 외력이 가해지면 변형되는 유체량이 많으므로 발생하는 하중이 크게 나타나기 때문에 측벽에 손상이 가해질 수 있는 위험이 있다. 또한 로켓 등 비행체에서 연료탱크 내부의 슬로싱 현상에 의해 하중 및 모멘트가 발생하게 되면 안정성을 상실하여 위험할 수 있다. 따라서 유체 저장 용기 설계 시, 구조물의 동특성 뿐만 아니라 유체의 슬로싱 현상에 대한 분석도 필요하다.

간단한 모델에서의 슬로싱 고유진동수는 이론적으로 구하는 방법이 많이 연구되었고, 최근에는 유한요소법을 이용하여 해석하는 연구가 진행되었지만, 복잡한 형상에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 이전의 연구결과들과 비교하여 검증된 유한요소 모델을 구축하고, 나아가서 내부에 장애물이 있는 용기에 대한 유한요소 모델을 구축하여 모드 형상을 살펴보고, 용기 형상의 매개변수 변화에 따른 슬로싱 고유진동수의 변화를 분석해 보았다.

2. 유한요소 모델

2.1 유한요소 모델 검증

해석 모델을 구축하기에 앞서 유한요소 해석을 검증하기 위하여 간단한 원통 형상의 유체 저장 용기를 모델링하고, 이전 연구들의 고유진동수 결과와

유한요소 모델의 결과를 비교하였다. 해석에는 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS 11을 사용하였고, 용기는 SHELL63, 유체는 FLUID80 요소로 모델링하였다. 유체와 용기가 만나는 부분은 면에 수직방향의 변위 자유도를 연성하였고 용기의 바닥은 고정하였으며, 중력가속도 효과를 적용하였다. Figure 1은 유한요소 모델의 연성상태 및 경계조건을 보여준다. Table 1은 유한요소 모델의 유체높이 변화에 따른 1차 고유진동수가 이전의 연구결과들과 잘 일치하는 것을 보여준다.

2.2 해석 모델 구축

매개변수 변화에 따른 고유진동수의 변화를 알아보기 위해 Figure 2와 같이 중앙에 장애물이 있는 육면체 모양의 유체 저장 용기 모델을 구축하였다. 용기의 재질은 아크릴, 유체는 물로 설정하였으며, 해석에 사용한 물성값은 Table 2와 같다. 형상 변화에 따른 슬로싱 고유진동수의 경향성을 알아보기 위하여 장애물의 형상 및 유체의 높이 등은 매개변수화하였다. 해석은 각 매개변수의 비율을 변화시키며 수행하였다. 매개변수 외 용기 제원은 가로 50mm, 세로 50mm, 높이 60mm로 고정하였다.

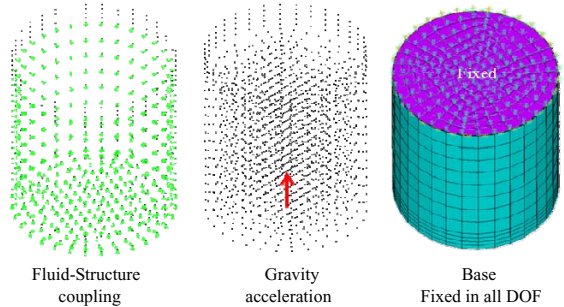


Fig. 1 FE model boundary condition & coupling state

Table 1 Finite element model verification

Fluid height (mm)	Analytical[1] (Hz)	Experimental[2] (Hz)	FE model (Hz)
50	2.066	2.07	2.072
100	2.289	2.30	2.290
150	2.316	2.33	2.317
200	2.319	2.33	2.319

† 박경수; 연세대학교 기계공학과
E-mail : pks6348@yonsei.ac.kr
Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460
* 연세대학교 기계공학과

Table 2 Finite element model material properties

Shell63	Density (kg/m ³)	Young's modulus(GPa)	Poisson's ratio
	1150	2.00	0.37
Fluid80	Density (kg/m ³)	Bulk Modulus(GPa)	-
	1000	2.18	-

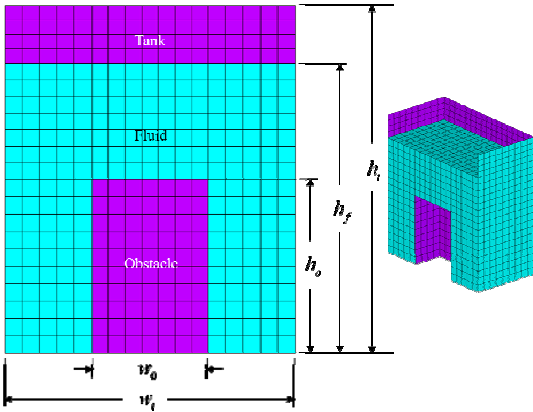


Fig. 2 Hexahedron shape tank parameters

3. 해석 결과 분석

먼저 장애물이 없는 용기의 수평방향 1 차, 3 차 고유진동수와 모드형상을 Figure 3 과 같이 추출하였다. 1 차 고유진동수는 이전 연구의 이론식을 통해 도출된 값과 오차가 1% 미만이므로 해석결과가 타당하다고 판단할 수 있다. 모드 형상은 1 차 모드에서 절선이 1 개, 3 차 모드에서 절선이 3 개 나타나는 것을 확인할 수 있다. 장애물의 매개변수를 변화시켜도 각 고유진동수에 대응되는 모드형상은 같으므로 매개변수 변화 시 해석결과에서 나타나는 모드형상을 통해 그에 대응되는 고유진동수를 추출하였다.

장애물 높이의 변화에 따른 수평방향 1 차 고유진동수의 변화는 Figure 4 와 같다. 장애물의 넓이가 작을 때는 장애물 높이 변화에 따른 고유진동수 감소폭이 크지 않지만, 장애물 넓이가 큰 경우에는 감소폭이 큰 것을 알 수 있다. 특히 장애물 높이와 유체 높이의 비가 0.6 이상부터 고유진동수가 크게 감소하는데, 이는 슬로싱 현상이 일어나는 자유표면에 장애물의 높이가 가까워질수록 효과가 커진다는 것을 의미한다. 다음으로 수평방향 3 차 고유진동수의 변화는 Figure 5 와 같다. 1 차 고유진동수는 큰 변화폭을 보였던 반면, 3 차 고유진동수는 변화폭이 거의 없음을 관찰할 수 있다. 이는 1 차 고유진동수에 해당하는 모드형상이 3 차 고유진동수에 해당하는 모드형상에 비하여 자유표면에서 먼 장애물에도 민감하

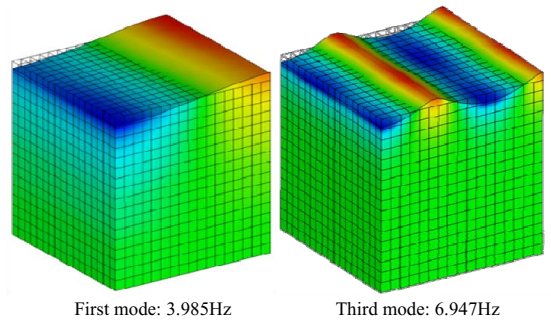


Fig. 3 Sloshing natural frequencies and mode shapes

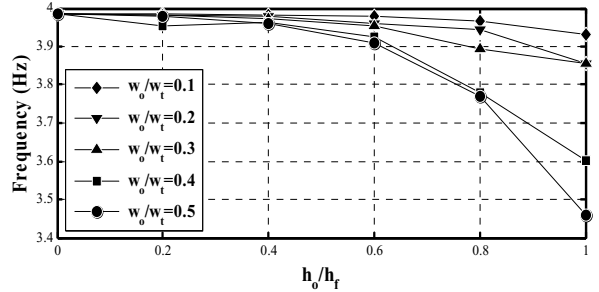


Fig. 4 First natural frequencies variation w.r.t obstacle

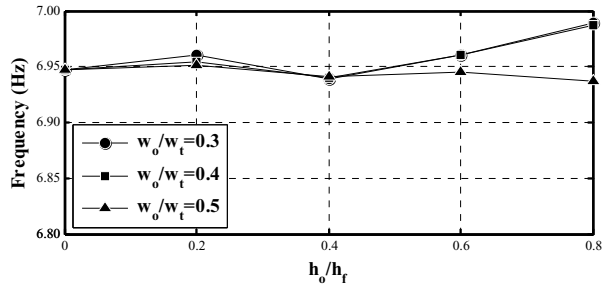


Fig. 5 Third natural frequencies variation w.r.t obstacle

게 영향을 받는다는 것을 의미하며, 이를 통해 고차 모드가 될수록 장애물의 높이에 대한 영향을 적게 받을 것이라고 예측할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 장애물의 매개변수 변화에 따른 슬로싱 고유진동수의 경향성을 알아보았다. 추후 유체 저장 용기의 설계 시 내부 장애물에 의한 고유진동수의 변화를 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] G. W. Housner, "Dynamic pressures on accelerated fluid containers," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 47, No. 1, 1957, pp. 15-35
- [2] O R Jaiswal, Shradha Kulkarni, and Pavan Pathak, "A study on sloshing frequencies of fluid-tank system," World Conference on Earthquake Engineering, 2008