

사각탱크에서의 액체 슬로싱 억제 방법에 관한 해석적 연구

Numerical Study on Suppression of Liquid Sloshing in Rectangular Tanks

*김동주¹, 홍성욱¹, #김경진¹

* D. Kim¹, S. W. Hong¹, #K. Kim (kimkj@kumoh.ac.kr)¹

¹금오공과대학교 기계공학부

Key words : Liquid sloshing, Rectangular tank, Input shaping

1. 서론

슬로싱(Sloshing)이란 액체와 액체를 담고 있는 용기 사이에서 발생하는 상대적 운동을 말한다.⁽¹⁾ 액체용기를 이송할 때 윗면이 열려있는 용기에 담겨있는 액체는 슬로싱에 의해 용기 밖으로 넘칠 수 있으며, 밀폐된 운반용기의 경우에도 내부에서 발생하는 액체의 슬로싱이 운반용기에 충격을 주어 구조물의 파손을 초래할 수도 있다.

본 논문에서는 사각탱크를 이송할 때 발생하는 액체 슬로싱을 억제하기 위한 방법을 수치해석적으로 연구하였다. 연구의 주된 목적은 고체구조물 진동제어 분야에 주로 사용되는 입력성형방법⁽²⁾을 유체 슬로싱 억제 방법으로 적용 가능한지 확인하는 것이다. 또한, 탱크의 이송 가속도에 따른 슬로싱 현상의 차이를 파악하고, 두 가지 입력성형기에 따른 슬로싱 억제 효과를 비교하고자 한다. 이 방법의 큰 장점은 배플(baffle)처럼 사각탱크의 구조를 변화시킬 필요 없이 시스템의 입력을 약간 조정하는 것으로 슬로싱을 제어할 수 있다는 점이다.

2. 해석 방법

슬로싱 현상과 같이 액체의 자유표면이 움직이는 유동현상을 해석하기 위하여 많은 연구자들이 VOF(Volume of Fluid) 모델을 사용하였고, 본 연구에서도 상용 소프트웨어인 Fluent 의 VOF 모델을 사용하여 해석을 수행하였다. 2 차원 탱크의 윗면은 대기 중에 개방되어 있고, 탱크에는 물의 밀도를 갖는 비점성 유체가 채워져 있다고 가정하였다.

사각탱크의 폭 L 은 0.5 m, 액체의 높이 h 는 0.3 m 로 정하였고, 액체 탱크의 가속도는 0.4 및 2.0 m/s^2 두 가지 경우를 고려하였다. 탱크의 이송은 순차적으로 각 3 초간의 가속, 등속 및 감속을 한 후에 정지하는 경우를 해석하였다.

슬로싱을 억제하기 위해 사용한 입력성형 방법은 시스템의 입력을 진동이 상쇄되도록 수정하여 인가함으로써 진동을 제거하는 방법이다.⁽²⁾ 여기서 탱크의 가속도(또는 속도)가 시스템의 입력에 해당한다. 본 연구에서는 가장 널리 알려진 ZV 입력성형기와 2 개 이상의 진동모드가 있을 때 사용하는 Convolved ZV 다모드 입력성형기를 적용하였다.

입력성형방법을 사용하기 위해서는 슬로싱 고유진동수를 알아야 한다. 본 연구에서는 비점성 비압축성의 2 차원 유동을 가정한 이론식⁽¹⁾을 사용하였다. 모드 별 고유진동수는 다음과 같은 식으로부터 계산할 수 있다.

$$\omega_n^2 = gk_n \tanh(k_n h), k_n = \frac{n\pi}{L} \quad (1)$$

여기서, ω_n 은 모드수 n 에서의 고유진동수를 나타낸다. Table 1 은 식 (1)을 이용하여 구한 고유진동수를 1 차에서 3 차 모드까지 정리한 표이다.

Table 1 Natural frequency for the first three modes

Liquid level (m)	Natural frequency (Hz)		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3
0.3	1.221	1.766	2.164

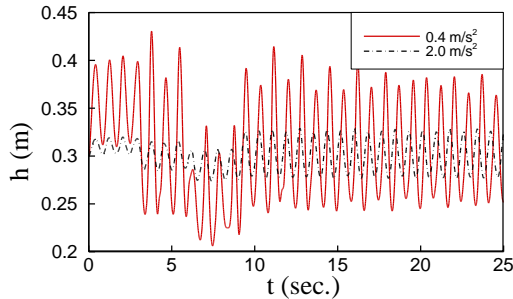


Fig. 1 Time history of liquid depth at the left side of the tank for the unshaped case.

3. 해석 결과

우선, 입력성형을 적용하지 않은 경우를 해석해 보았다. Fig. 1 은 탱크의 왼쪽 면에서의 액체 높이를 시간의 함수로 나타낸 것이다. 탱크가 정지한 9 초 이후에도 액체는 계속해서 출렁거리는 것을 알 수 있다. 이러한 슬로싱 현상이 가속도가 클수록 더욱 심해짐이 명백하다. FFT 를 이용하여 Fig. 1 의 결과에 대한 주파수 분석을 해 보면, Table 1 의 1 차 모드가 관찰되며 다른 모드에 비해 가장 높은 에너지를 가지고 있다. 두 번째로 높은 에너지를 가지고 있는 모드는 3 차 모드로 나타났다.

슬로싱 현상이 보다 심한 가속도 2.0 m/s^2 인 경우에 대해 입력성형방법을 적용해 보았다. Fig. 2 에서는 제어하지 않은 경우와 ZV 입력성형기를 사용한 경우에 대해 자유표면 높이의 시간적 변화를 비교하였다. 슬로싱이 ZV 입력성형기를 사용함으로써 상당히 억제되었음을 알 수 있다. 이는 정지 후 3 초 후의 자유표면을 나타낸 Fig. 3 에서도 확인할 수 있다.

ZV 입력성형기를 사용하더라도 슬로싱을 완전히 제거할 수 없기 때문에, 1 차와 3 차 모드를 고려한 Convolved ZV 다모드 입력성형기를 적용해 보았다. 그 결과, 1 차 모드만을 고려한 ZV 입력성형기와 비교할 때 슬로싱이 거의 제거됐음을 알 수 있다. 이는 여러 개의 진동 모드가 공존하는 경우에 다모드 입력성형기가 보다 효과적임을 의미한다. 본 연구에 대한 실험적 검증은 참고문헌⁽³⁾에서 확인할 수 있다.

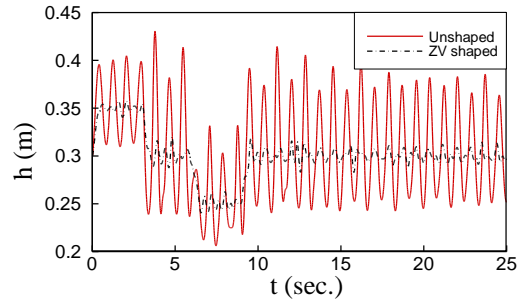


Fig. 2 Comparison of liquid depth between unshaped and ZV shaped cases for $a = 2.0 \text{ m/s}^2$.

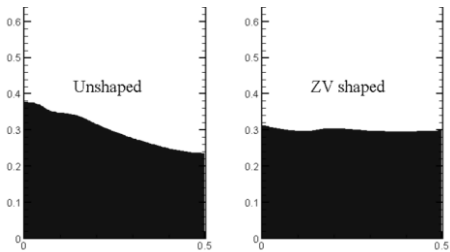


Fig. 3 Free surface at $t = 12 \text{ s}$ (dark: liquid, white: air).

5. 결론

이송되는 사각탱크에서의 액체 슬로싱을 억제하기 위하여 구조진동 제어에 주로 사용되는 입력성형방법을 적용하였다. 입력성형기를 적용한 결과, 탱크 내 슬로싱을 효과적으로 억제할 수 있음을 전산해석으로 검증할 수 있었다.

참고문헌

1. R. A. Ibrahim, Liquid sloshing dynamics, Cambridge University Press, 2005.
2. W. Singhose and W. Seering, Command generation for dynamic systems, Lulu.com, 2007.
3. G. H. Bae, et al., "Experimental study on suppression of liquid sloshing in rectangular tanks," Proceedings of the 2010 Autumn KSPE Conference, CECO, 2010.