

사각탱크에서의 액체 슬로싱 억제에 관한 실험적 연구 Experimental Study on Suppression of Liquid Sloshing in Rectangular Tanks

*배규현¹, 김동주², 김경진², #홍성욱²

*G. H. Bae¹, D. Kim², K. Kim², #S. W. Hong(swhong@kumoh.ac.kr)²

¹금오공과대학교 대학원 기전공학과, ²금오공과대학교 기계공학부

Key words : Liquid sloshing, Rectangular tank, Input shaping

1. 서론

슬로싱(Sloshing)이란 액체와 액체를 담고 있는 용기 사이에서 발생하는 상대적 운동을 말한다.^(1,2) 액체용기를 이송할 때 윗면이 열려 있는 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 연구에서는 참고문헌⁽¹⁾에서 논의한 사각탱크에서의 액체 슬로싱 억제 방법을 실험적으로 검증하였다. 실험을 통해 위치결정스테이지에 액체가 담긴 사각탱크를 두고 운송과정에서의 속도를 입력성형방법⁽³⁾에 의해 적절히 제어함으로써 슬로싱을 획기적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

2. 사각탱크에서의 슬로싱

입력성형방법을 사용하기 위해서는 슬로싱 고유진동수를 알아야 한다. 본 연구에서는 비점성 비압축성의 2 차원 유동을 가정한 이론식⁽²⁾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 고유진동수이고, L 과 h 는 각각 사각탱크의 폭과 액체의 높이를 나타낸다.

3. 실험장치 및 슬로싱 실험결과

Fig. 1 은 액체(물)가 담긴 용기가 스테이지 위에 설치된 실험장치 사진이다. 액체용기를 이송하기 위해 2 축 이송스테이지를 이용하였고, 이는 속도제어가 가능한 서보모터로 구동된다. 액체용기는 아크릴로 된 사각탱크(200 × 50 × 400mm³)로 하였다. 이송변위, 최대 속도 및 가감속기간은 각각, 250mm, 500mm/s, 100ms 로 하였다. 액체 슬로싱을 측정하기 위해 카메라를 사용하였고 이를 화상처리하여 시간변화를 계산하였다.

사각탱크 내의 물높이를 200, 135, 65mm 로 하여 실험하였다. 이 때의 고유진동수를 Table 1 에서 볼 수 있다. 1 차모드의 경우 물높이에 따른 차이가 보이지만 3 차모드에서는 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다.

Fig. 2 (a)는 단순 이송 시의 슬로싱 실험 결과를 보여주고 있다. 그림은 슬로싱에 의한 매순간의 물기울기를 계산한 결과로서 1 차모드가 주로 반영되고 있다. 1 차모드만 고려한 경우 3 가지 실험에서 대체로 유사한 특성을 보임을 알 수 있다. Fig. 2 (b)는 액체를 2 진화상으로 표현하여 나타내었다. 표면에서 고차모드가 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다.

4. 슬로싱 억제 실험결과

본 연구에서는 슬로싱을 억제하기 위해 입력성형기법을 적용하였다. 입력성형기법은 시스템의 입력을 진동이 상쇄되도록 수정하여 인가함으로써 진동을 제거하는 방법이다.⁽³⁾

본 논문에서는 가장 널리 알려진 ZV 입력성형기와 2 개 이상의 진동모드를 가지는 경우 사용하는 Convolved ZV 다모드 입력성형기를 적용하였다. 2 차모드가 나타나지 않으므로 1 차

와 3 차 모드를 포함한 다모드 입력성형기를 적용하였다. 물높이 200mm 에 대해 적용한 결과가 Fig. 3 로서 입력성형에 의해 슬로싱이 크게 억제되는 것을 볼 수 있다. 다모드 입력성형기를 적용하면 3 차모드의 효과까지 억제하게 되어 더 양호한 결과를 얻을 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 사각탱크에서의 액체 슬로싱을 억제하기 위한 방법으로 입력성형기법을 적용하였고, 이론적으로 계산한 고유진동수 정보를 이용하여 설계한 입력성형기를 적용하여 슬로싱을 획기적으로 제거할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

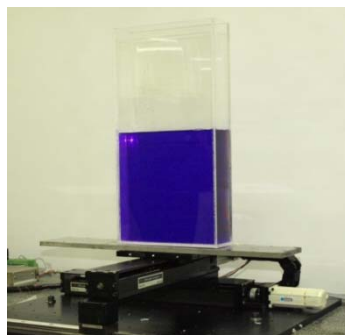
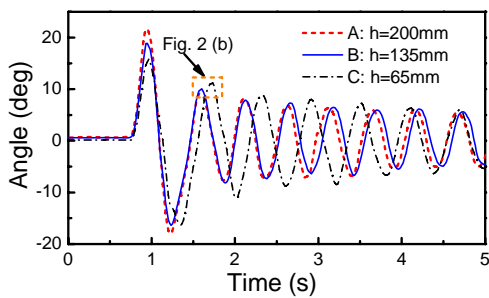
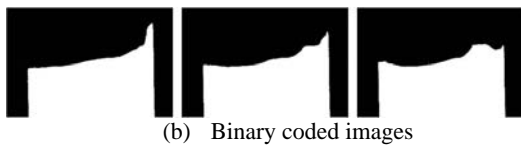


Fig. 1 Experimental setup



(a) Time responses of free surface slope

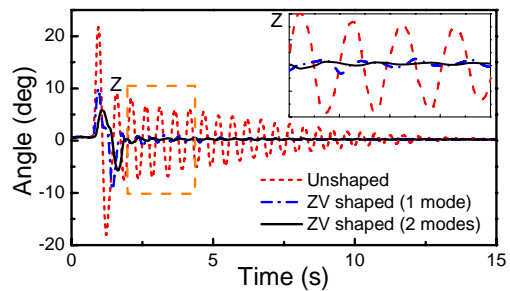


(b) Binary coded images

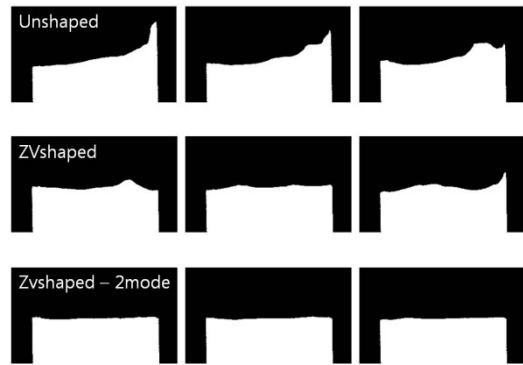
Fig. 2 Comparison of measured sloshing responses with the liquid level changed.

Table 1 Natural frequencies with liquid level varied

Liquid level (mm)	Natural frequency (Hz)		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3
A 200	1.927	2.794	3.422
B 135	1.947	2.793	3.422
C 65	1.734	2.747	3.414



(a) Time responses of free surface slope



(b) Binary coded images

Fig. 3 Comparison of measured sloshing responses with single mode and two modes input shaping and without input shaping.

참고문헌

1. D. Kim, *et al.*, "Numerical study on suppression of liquid sloshing in rectangular tanks," *Proceedings of the 2010 Autumn KSPE Conference, CECO*, 2010.
2. R. A. Ibrahim, *Liquid Sloshing Dynamics*, Cambridge University Press, 2005.
3. W. Singhose and W. Seering, *Command Generation for Dynamic Systems*, Lulu.com, 2007.