

병진운동하는 사각형 유체저장탱크 내부의 슬로싱 특성 연구

A Study on the Sloshing of the Rectangular Tank Partially Filled with Fluid Under Translational Motion

이 영 신[†] · 김 현 수* · 이 재 형** · 고 성 호***

Young-Shin Lee, Hyun-Soo Kim, Jae-Hyung Lee and Sung-Ho Ko

(2003년 3월 5일 접수 : 2003년 7월 26일 심사완료)

Key Words : Sloshing(슬로싱), Experimental Device(실험장치), Translational Motion(병진운동), Rectangular Tank(사각형 저장탱크), Water Height(물높이), Excitation Frequency(가진주기)

ABSTRACT

The oscillation of the fluid caused by external motions is called sloshing, which occurs in moving vehicles with contained fluid masses, such as the oil tankers, railroad cars, aircraft and rockets. Natural frequencies of fluid are much lower than that of solid structures, and the deformation caused by the excitation that is less than 1st natural frequency of fluid is very large. For the reason of that, sloshing characteristics under the excitation that is less than the 1st natural frequency must be studied prior to the consideration of natural frequencies of fluid. The experimental devices are constructed to simulate the translation motion. The rectangular tanks are made to study the sloshing characteristics under external excitation. The changes of water height are measured using an analogue camcorder and MPEG board, and those are compared to each other through a standard deviation. From the results of experiments, the sloshing is greatly influenced by the length of the rectangular tank than the width of that under the periodic translational motion in the length direction. The rapid amplification of sloshing by resonance is also confirmed experimentally.

1. 서론

외력에 의한 유체의 출렁임 현상을 슬로싱(sloshing)이라 하며, 일반적으로 유체와 고체 구조물 사이의 상호 간섭에 의해 유체가 채워지지 않았을 때와는 다른 동적 특성을 갖게 된다. 일반적으로 구조물에 담겨있는 유체는 고체구조물에 비해 그 고유진동수가 대단히 낮고, 고유진동수 이하의 가진에서도 과

도하게 변형되기 때문에 유체자체 고유진동수의 계산과 측정도 중요하지만 외부가진에 의한 거동의 연구도 반드시 필요하다.

지금까지의 슬로싱 연구를 살펴보면, 유체의 거동을 정량적으로 측정하기 위한 실험의 어려움 때문에 미국의 NASA를 제외한 대부분의 슬로싱 연구는 유체 수면의 움직임을 예측하기 위한 수치적인 연구^(1~4)가 주를 이루고 있고, 최근까지도 실험보다는 전산 해석을 이용한 연구가 더 활발히 수행되고 있다. NASA의 슬로싱 보고서⁽⁵⁾에서는 여러 가지 연료탱크 형상에 대하여 동역학적 등가 모델링에 관한 연구가 상세히 기술되어 있다. Silveira 등⁽⁶⁾은 배플의 깊이가 주어졌을 때 배플폭의 변화에 따른 댐핑비와 진동수의 변화에 대해서 실험을 통하여 연구하였고, Garza 등⁽⁷⁾은 배플에 구멍을 만든 후 주어진 배플깊이에 대

[†] 책임저자, 정회원, 충남대학교 기계설계공학과
E-mail : leeys@cnu.ac.kr

Tel : (042) 821-6644, Fax : (042) 822-7366

* 충남대학교 대학원 기계설계공학과

** 충남대학교 대학원 기계설계공학과

*** 충남대학교 기계설계공학과

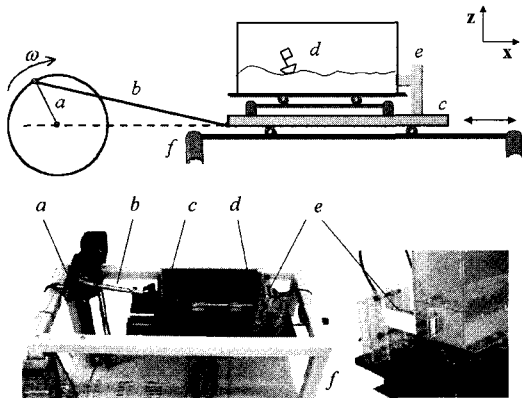
하여 배플 구멍의 크기나 천공량의 변화에 따른 댐핑비의 변화를 실험을 통해 연구하였다. 국내의 경우 조진래 등^(8,9)이 수치해석을 통하여 원통형 액체저장탱크의 과도응답 해석을 수행하였고, 박장호 등⁽¹⁰⁾은 직사각형 단면 수조구조물의 동적 해석을 수행하였으며 지용관 등⁽¹¹⁾이 유체가 채워진 삼중원통셀의 진동특성을 해석적으로 연구하였다. 실험적인 연구로는 로드셀을 이용한 유체-고체 연성력의 실험적 측정에 관한 이영신 등⁽¹²⁾의 연구가 있다.

본 연구에서는 부분적으로 유체가 채워진 사각형 저장탱크에 대해, 병진운동을 할 때 발생하는 슬로싱현상에 따른 수면높이변화를 실험을 통하여 측정하는 방법을 제안하고, 가진수의 증가 및 공진점에서의 그 특성에 대하여 실험적으로 연구하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

실험장치는 회전운동을 병진운동으로 변환시킬 수 있는 슬라이더 크랭크(sliding-crank)기구를 사용하여 Fig. 1과 같은 병진운동 실험장치를 제작하였다. 크랭크의 회전반경은 38.2 mm, 슬라이더와 크랭크 사이에 연결된 링크(link)의 길이는 220 mm로 제작하였고, 최대 1800 rpm까지 출력되는 직류모터에 감속기를 달아 최대 45 rpm(0.75 Hz)까지 출력되도록 하고



- a* : crank (38 mm)
- b* : link between crank and slider (220 mm)
- c* : slider (translational distance = 2*a*)
- d* : rectangular tank
- e* : force sensor
- f* : frame

Fig. 1 Apparatus of sloshing experimental device

이것을 크랭크의 운동으로 사용하였다. 사각탱크는 5 mm 두께의 투명 아크릴과 아크릴 본드를 사용하여 Fig. 2와 같이 제작하였으며, 사각탱크의 높이 H 는 150 mm로 모두 일정하게 고정시키고 길이 L 과 너비 W 를 변화시키면서 사각탱크의 크기에 따른 실험을 수행하였다. 이를 위해 총 5개의 사각탱크를 제작하였으며 각각의 크기는 Table 1에 제시하였다. 편리성과 사용된 사각탱크의 구분을 위해서 Table 2처럼 길이 L 과 너비 W 에 따라 사각탱크의 이름을 명명하여 사용하였다. 즉, 사각탱크 이름이 L300W100이면 길이 L 이 300 mm이고 너비 W 가 100 mm인 사각탱크를 의미한다. 실험에 사용된 유체로는 물을 사용하였으며 물의 높이는 모든 실험에 대하여 항상 사각탱크 높이의 1/3인 50 mm로 채운 뒤 실험을 수행하였다.

2.2 유체의 높이변화 측정방법

초기 실험에서는 슬로싱에 의해 발생하는 유체의

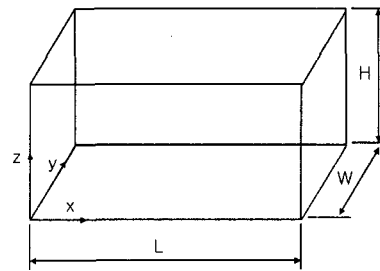


Fig. 2 Coordinate system and shape of rectangular tank

Table 1 Rectangular tank size for experiment

Rectangular tank size (unit : mm)		Width		
		50	100	150
Length	200		○	
	250		○	
	300	○	○	○

Table 2 Designation for various rectangular tank size

Tank name	Description (unit : mm)
L200W100	Length 200, Width 100
L250W100	Length 250, Width 100
L300W100	Length 300, Width 100
L300W50	Length 300, Width 50
L300W150	Length 300, Width 150

수면 높이변화를 측정하기 위하여 초음파 센서를 이용하여 수면변화를 직접 측정하는 방법과 부표형태의 미터계를 이용하는 방법을 고려했었다. 하지만, 이러한 방법들은 근본적으로 큰 오차를 포함하여 데이터의 정확성이 떨어지고 제작상의 어려움 때문에 쉽게 구할 수 있는 캠코더를 사용하여 수면변화를 측정하였다.

촬영은 고정된 위치에서 수행되었으며, 촬영된 영상을 컴퓨터의 MPEG board에 연결하여 디지털 동영상 파일(.avi)로 변환시킨 뒤 동영상 편집 프로그램인 Adobe Premiere를 사용해 매 초당 24 또는 30 장씩의 일정한 그림 화일로 저장한다. 이렇게 생성된 그림화일들과 화면상의 궤적을 찾아주는 프로그램인 Tracer를 이용하여 물의 높이변화를 측정하였다.

이러한 물의 높이 변화 측정과정은 Fig. 3에 요약되어 있다. Fig. 4는 0.65 Hz로 병진운동하는 사각탱

크 L250W100의 슬로싱 현상을 2초 간격으로 출력한 것이다. 0초는 사각탱크가 정지해 있는 상태로 물의 출렁임 현상이 발생되지 않고 있으며, 병진운동이 진행됨에 따라 유체의 출렁임이 다양한 형태로 발생됨을 확인할 수 있다. 이때 슬로싱으로 인한 물의 출렁임을 보다 명확히 보이기 위하여 검정색 염료를 혼합하여 사용하였다.

3. 고유진동해석

슬로싱 실험시 외부가진과 내부유체의 공진여부를 확인하기 위해서 사각 탱크에 담겨진 물의 고유진동 해석을 ANSYS 상용 유한요소코드를 이용하여 수행하였다. 유한요소 해석의 타당성 검증을 위해 해석결과들은 사각탱크안에 담겨진 유체의 고유진동수계산식 (1)과 비교하였다.⁽¹³⁾

$$f_{ij} = \frac{\sqrt{g}}{2\sqrt{\pi}} \left[\sqrt{\frac{i^2}{L^2} + \frac{j^2}{W^2}} \tanh \left\{ \pi(h) \sqrt{\frac{i^2}{L^2} + \frac{j^2}{W^2}} \right\} \right]^{1/2} \quad (1)$$

where, $0.1 < h \left\{ \frac{i^2}{L^2} + \frac{j^2}{W^2} \right\}^{1/2} < 1$
 ($i=0, 1, 2, 3, \dots$ $j=0, 1, 2, 3, \dots$)
 L : Length of rectangular tank
 W : Width of rectangular tank
 g : Acceleration due to gravity
 h : Depth of liquid

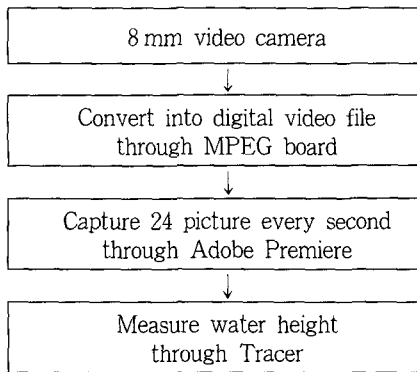


Fig. 3 Procedure to measure water height variation

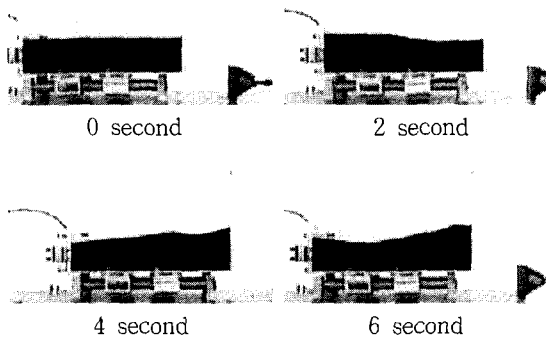


Fig. 4 Changes of water height for the tank L250 W100 under 0.65 Hz

식 (1)에서는 유체가 비점성 및 비압축성 특성을 갖는 것으로 가정하였고 사각탱크는 강체로 가정하였으며 유체의 표면장력은 무시하였다. 유한요소해석을 통한 진동해석에 사용된 요소는 사각탱크에 대해서 Shell63을 사용하여 모델링하였고, 물에 대해서는 Fluid80을 적용하였으며, 보다 정확한 해석을 위해 중력가속도 효과를 적용하였다. 해석에서 물의 자유표면이 x-y 평면, 즉 z=0에 위치하도록 하였고, 물과 사각탱크의 경계면에 있는 유체요소에는 no slip 조건에 의해서 모든 방향의 변위가 고체 구조물과 동일하도록 자유도에 대하여 연성조건을 지정해 주었다. 해석에 사용된 재료의 기계적 물성값들은 Table 3에 정리하였다. 유체로 사용된 물의 물성값은 ANSYS 메뉴얼⁽¹⁴⁾을 참고하여 적용하였고 사각탱크로 사용된 아

크릴의 물성값은 인장실험을 통하여 획득하였다.

진동해석을 수행한 결과들을 Table 4에 정리하였고, 결과들 중 슬로싱 모드형상에 대한 한 예를 Fig. 5에 나타내었다. 실험장치의 가진 범위와 사각탱크들에 채워지는 물의 고유진동수 범위를 고찰하기 위한 해석이기 때문에 진동해석 결과들은 물의 슬로싱 모드⁽¹⁵⁾중에서 1차 고유진동수만을 정리하였다. 저장탱크의 길이가 증가함에 따라 물의 고유진동수가 감소되는 것을 알 수 있으면, 본 연구에서 고려한 탱크 크기들에 대해 1.16 Hz~1.63 Hz의 범위에 존재함을 알 수 있다.

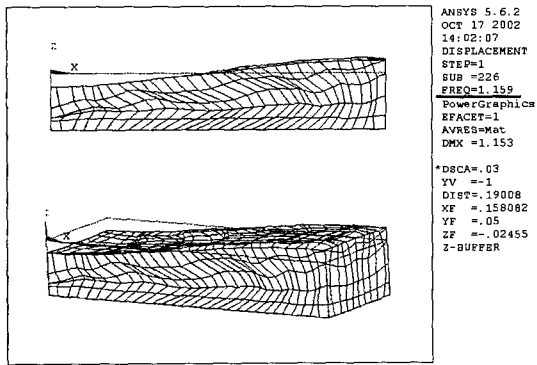


Fig. 5 1st sloshing mode of water on the inside of tank L300W100

Table 3 Material properties of acrylic tank and water

Material	Material properties	Unit	Value
Acrylic	Young's modulus (E)	GPa	3.003
	Poisson's ratio (ν)	-	0.36
	Density (ρ)	kg/m ³	1170
Water	Bulk modulus (K)	GPa	2.07
	Shear viscosity	s ⁻¹	1.131×10 ⁻³
	Density (ρ)	kg/m ³	1000

Table 4 1st natural frequency of water by FEM and theoretical method

Tank size (unit mm)		1st natural frequency(Hz)		
		ANSYS	Theory	
H 150	W 100	L 200	1.63	1.61
		L 250	1.35	1.33
		L 300	1.16	1.13
L 300, W 50		1.16	1.13	

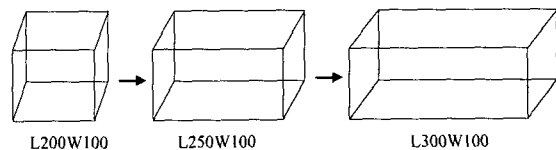
4. 실험결과 및 고찰

4.1 사각탱크의 크기에 따른 슬로싱 특성

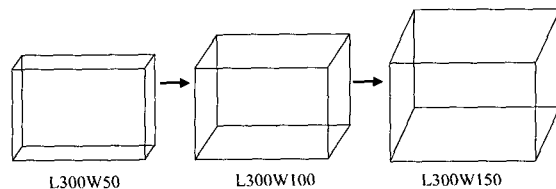
사각탱크의 크기에 따른 슬로싱 특성을 연구하기 위하여 길이와 너비를 변화시키면서 실험을 수행하였다.

먼저, 사각탱크의 길이에 대한 영향을 살펴보기 위해 Fig. 6(a)처럼 탱크의 너비와 높이를 각각 100 mm와 150 mm로 동일하게 설정한 뒤 병진운동 방향에 평행한 길이를 200, 250, 300 mm로 변화시키면서 실험하였고, 사각탱크의 너비에 대한 영향을 알아보기 위해 Fig. 6(b)처럼 탱크의 길이와 높이를 각각 300 mm와 150 mm로 고정한 뒤 너비를 50, 100, 150 mm로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 가진 되는 병진 주기는 0.51 Hz로 하였고 유체는 물을 사용하였으며 사각탱크 안에 채워지는 물의 높이는 모두 50 mm로 하였다. 물의 높이변화는 사각탱크의 왼쪽 벽면에서 측정하였으며 최초 자유표면을 1로 기준으로 한 경우에 대해 상대적인 이동값으로 표현하였다.

Fig. 7은 사각탱크의 길이만을 200, 250, 300 mm로 변화시킨 경우에 대하여 병진주기 0.51 Hz로 가진될 때 사각탱크 왼쪽벽면에서의 물높이 변화 측정 결과들이고, Fig. 8은 사각탱크의 너비만을 50, 10, 150 mm로 변화시킨 경우 병진주기 0.51 Hz로 가진될 때 사각탱크 왼쪽벽면에서의 물높이변화이다. Fig. 7에서 동일한 조건 하에서 사각탱크의 길이가 증가될수록 물의 높이변화가 증가됨을 확인할 수 있으나,



(a) Various length at width 100 and height 150



(b) Various width at length 300 and height 150

Fig. 6 Rectangular tanks for experiment depending on tank size(unit : mm)

Fig. 8에서는 길이방향 병진가진하에서 사각탱크의 너비변화가 슬로싱에 큰 영향을 미치지 못한다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7과 8의 결과들을 표준편차를 사용하여 정량적인 값으로 표현한 Table 5를 통해서도 사각탱크의 길이에 의한 영향이 너비에 의한 영향보다 더 큰 것을 확인할 수 있다. Table에서 표준

편차의 값이 클수록 슬로싱 현상, 즉 물의 출렁임 폭이 더 크다는 것을 의미한다.

길이방향 가진하에서 슬러싱에 대한 사각탱크 길이와 너비의 영향에 관한 이러한 실험결과는 슬로싱 저감을 위한 배플의 최적화 연구를 수행할 때 참고자료로서 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

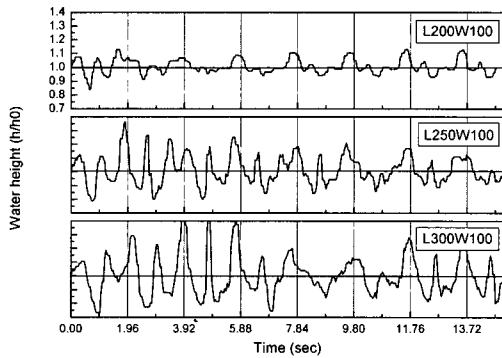


Fig. 7 Time history of water height depending on the length of rectangular tanks under excitation 0.51 Hz

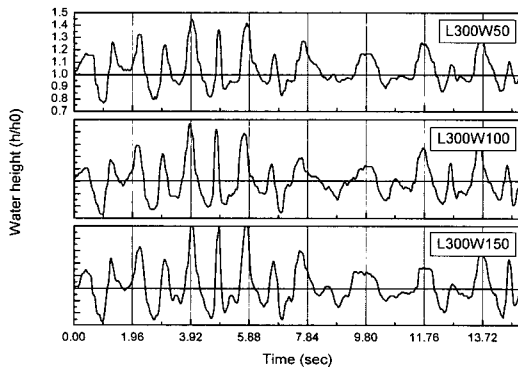


Fig. 8 Time history of water height depending on the width of rectangular tanks under excitation 0.51 Hz

Table 5 Standard deviation of water height variation for the various tank size

Rectangular tank name		Standard deviation
Various length	L200W100	0.0522
	L250W100	0.1071
	L300W100	0.1475
Various width	L300W50	0.1398
	L300W100	0.1425
	L300W150	0.1456

4.2 가진주기에 따른 슬로싱 특성

가진주기에 따른 슬로싱 특성을 연구하기 위해 사각탱크의 너비와 높이를 각각 100 mm와 150 mm로 고정된 뒤 길이 250 mm와 300 mm에 대하여 물을 사각탱크 높이의 1/3씩 채우고 가진 주파수 영역을 변화시키면서 슬로싱 실험을 수행하였다. 실험에 앞서 먼저, 병진방향 가진력의 정확한 분석을 위해 물이 채워진 양과 동일한 무게만큼 찰흙을 채우고 병진운동시 발생하는 길이방향 하중의 측정 및 FFT 변환을 통하여 가진력의 진동수성분을 확인해 보았다. 가진력 분석에서 이처럼 물을 사용하지 않은 이유는 물의 슬로싱 및 공진효과를 방지하여 순수한 실험기의 특성을 확인하기 위함이다. Fig. 9는 L300W100의 크기를 갖는 탱크가 병진방향으로 0.57 Hz의 주기를 갖는 가진을 받을때 하중의 FFT변환선도이다. 이 그림으로부터 모터구동에 의한 가진력은 0.57 Hz 성분으로 가진이 되지만 정확히 2배 성분인 1.13 Hz의 진동수를 갖는 가진력이 동시에 발생된다는 것을 알 수 있다. 즉, L300W100의 탱크에 물이 담겨진 경우 0.57 Hz 성분으로 가진하면 1.13 Hz의 진동수성분 또한 가진되기 때문에 공진이 발생되어 과도한 슬로싱 현상을 보인다. 이는 Fig. 10을 통해서도 확인할 수 있다.

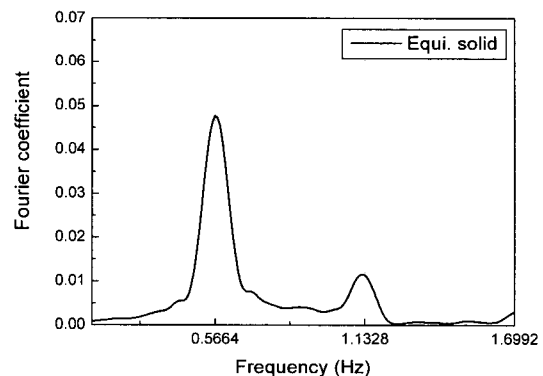


Fig. 9 FFT of the force measured at the tank wall for equivalent weight under excitation 0.57 Hz

Fig. 10은 길이 300 mm, 너비 100 mm인 사각탱크에 높이 50 mm의 물을 채운 뒤 병진방향 가진 주기를 0.51 Hz부터 0.71 Hz까지 변화시킬 경우 탱크벽면에서의 물높이변화이고, Fig. 11은 길이 250 mm, 너비 100 mm인 사각탱크에 높이 50 mm 만큼의 물을 채운 뒤 가진 주기를 0.51 Hz부터 0.71 Hz까지 변화시킬 경우 탱크벽면에서의 물높이변화이다. Table

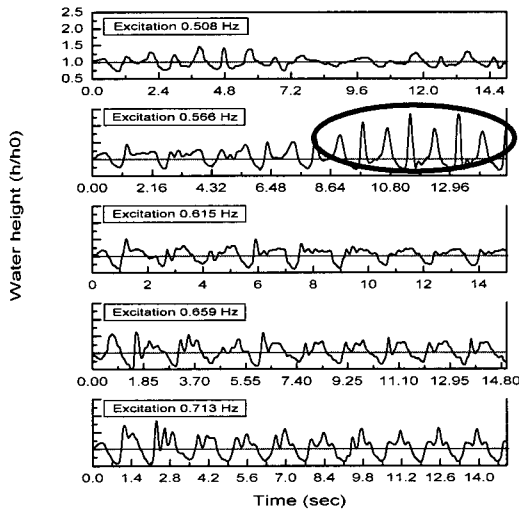


Fig. 10 Time history of water height depending on various excitation conditions for tank L300W100

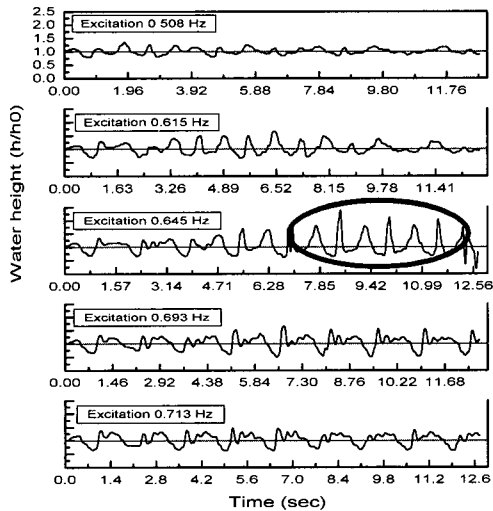


Fig. 11 Time history of water height depending on various excitation conditions for tank L250W100

6은 이 두 가지 경우에 대하여 물높이변화를 표준편차로서 나타낸 것이고, Fig. 12는 Table 6의 표준편차들을 가진 주파수에 대한 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 10에서 가진 주파수가 증가될수록 물의 높이 변화가 점점 커지고 가진 주기 0.56 Hz에서 슬로싱이 가장 크게 발생하는 것을 볼 수 있는데 이는 가진 주기의 2배수 성분에 의한 물의 공진현상 때문이다. 하지만, 가진주기가 더욱 증가되어 공진영역을 벗어나게 되면 슬로싱 현상이 감소되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11 또한 이러한 현상이 물의 1차 고유진동수의 1/2인 0.645 Hz에서 발생하는 것을 확인할 수 있다.

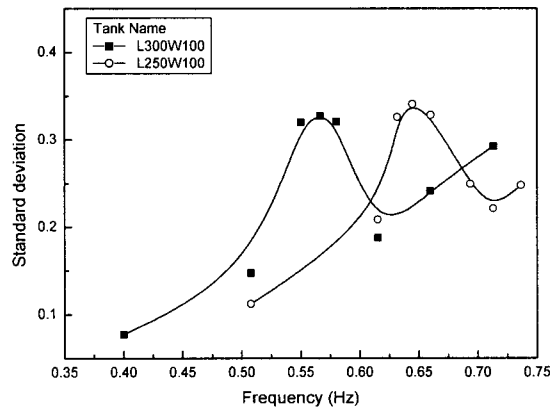


Fig. 12 Standard deviation of water height variation depending on various excitation conditions

Table 6 Standard deviation of water height variation for the various excitation conditions

Tank name	Excitation frequency (Hz)	Standard deviation
L300W100	0.508 (25.0 rpm)	0.1473
	0.566 (27.7 rpm)	0.3273
	0.615 (30.0 rpm)	0.1875
	0.659 (32.5 rpm)	0.2414
	0.713 (35.0 rpm)	0.2925
L250W100	0.508 (25.0 rpm)	0.1120
	0.615 (30.0 rpm)	0.2084
	0.645 (31.8 rpm)	0.3404
	0.713 (35.0 rpm)	0.2213

5. 결 론

사각탱크 내부의 슬로싱 현상을 연구하기 위해 병진운동을 할 수 있는 실험장치를 제작하고, 물높이 변화를 측정할 수 있는 방법을 고안하였다. 고안된 방법을 이용하여 다양한 주파수성분을 갖는 가진하에서의 물의 슬로싱 특성을 연구하였다. 본 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 물의 수면높이변화를 비디오 카메라를 사용하여 측정하였고 최초 자유표면을 기준으로 상대적인 변화값으로 나타내었다.

(2) 실험결과 사각탱크가 길이방향으로 일정한 병진운동을 할 때 발생하는 슬로싱은 사각탱크의 너비에 대한 영향보다는 길이에 대한 영향을 더 크게 받음을 확인하였다.

(3) 또한 유체의 1차 고유진동수로 가진될 때 발생하는 슬로싱 공진현상 및 가진주파수가 증가함에 따라 슬로싱 진폭이 증가됨을 실험적으로 확인하였다.

(4) 본 실험을 통하여 연구된 유체 슬로싱 특성 및 실험기법들은 향후 슬로싱 특성 연구 및 슬로싱 감쇠를 위한 배플 최적화 설계 등에 유용한 참고자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥연구재단의 지원에 의해 수행(과제번호 E00006)되었으며, 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

(1) Armenio, V., 1997, "An Improved MAC Method (SIMAC) for Unsteady High-reynolds Free Surface Flows," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 24, pp. 185~214.

(2) Hirt, C. W. and Nichols, B. D., 1981, "VOF Method for the Dynamics of Boundaries," *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201~225.

(3) Souli, M., Ouahsine, A. and Lewin, L., 2000, "ALE Formulation for Fluid-structure Interaction Problems," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 190, pp. 659~675.

(4) Zhang, Q. and Hisada, T., 2001, "Analysis of Fluid-structure Interaction Problems with Structural Buckling and Large Domain Changes by ALE Finite Element method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 190, pp. 6341~6357.

(5) Roberts, J. R., Basurto, E. R. and Chen, P., 1966, *Slosh Design Handbook*, NASA CR-406.

(6) Silveira, N. A., Stephens, D. G. and Leonard, H. W., 1961, *An Experimental Investigation of the Damping of Liquid Oscillations in Cylindrical Tanks with Various Baffles*, NASA TND-715, Langley Research Center.

(7) Garza, L. R. and Abramson, N. H., 1959, *Measurements of Liquid Damping Provided by Ring Baffles in Cylindrical Tanks*, SWRI, Technical Report No. 5, Contract No. NAS8-1666, Project No. 6-1072-2.

(8) 조진래, 김민정, 이상영, 허진욱, 2002, "배플 개수 및 내경변화에 따른 액체 저장탱크의 동역제 효과," *한국전산구조공학회지*, 제 15 권, 제 1 호, pp. 147~154.

(9) 조진래, 이상영, 2001, "격막(baffle)을 갖는 유체 저장탱크의 과도응답 해석," *한국항공우주학회지*, 제 29 권, 제 4 호, pp. 43~50.

(10) 박장호, 권기준, 2000, "유체-구조물 상호작용 효과를 고려한 직사각형 단면의 수조구조물의 동적 해석," *한국산업안전학회지*, 제 15 권, 제 3 호, pp. 96~101.

(11) 지용관, 이영신, 2002, "유체로 채워진 삼중원통셀의 해석적 진동특성평가," *한국소음진동공학회 논문집*, 제 12 권, 제 2 호, pp. 150~160.

(12) 이영신, 고성호, 김현수, 이재형, 2001, "날개형 및 격막형배플을 이용한 유체저장탱크 내부의 슬로싱 감쇠 연구," *대한기계학회논문집*, 심사중.

(13) Blevins, R.D., 1979, *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*, Van Nostrand Reinhold Company, pp. 364~372.

(14) Swanson Analysis Systems Inc., 1999, *ANSYS Elements Manual*.

(15) 홍성진, 2001, *유체 저장 탱크의 슬로싱 특성 연구*, 석사학위논문, 충남대학교.