

날개형 및 격막형 배플을 이용한 유체저장탱크 내부의 슬로싱 저감 연구

이영신[†] · 김현수^{*} · 이재형^{*} · 김영완^{**} · 고성호^{***}
(2003년 2월 11일 접수, 2003년 9월 25일 심사완료)

A Study on the Reduction of the Sloshing of Storage Tank Using Wing and Diaphragm Baffle

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

Key Words: Sloshing(슬로싱), Experimental Device(실험장치), Excitaion Frequency(가진주기), Fourier Transformation(푸리에변환), Translational Motion(병진운동), Wing Baffle(날개형 배플), Diaphragm Baffle(격막형 배플)

Abstract

Storage tank filled with fluid has unique dynamic characteristics compared to general structures, due to the interaction between fluid and structure. The oscillation of the fluid surface caused by external forces is called sloshing, which occurs in moving vehicles with contained liquid masses, such as trucks, railroad cars, aircrafts, and liquid missiles. In this study, the evaluation method for the reduction of sloshing, the optimized size and location of wing and diaphragm baffles are suggested based on the experimental results. The experimental device can simulate the translation motion. A rectangular tank and various baffles are fabricated to study on the sloshing characteristics. The forces measured using the load cell at tank wall and those are compared with each other through the Fourier transformation for various conditions. The study of the sloshing of the rectangular tank equipped with baffles is conducted under the same conditions with non-baffled rectangular tank experiment. From the experimental results, the sloshing reduction effect by the baffles is observed. In conclusion in case of diaphragm baffles, the optimized size ratio of the width of baffle to the water height is 0.44 and the installation location has no effect to the damping of sloshing. In case of wing baffles, the optimized size ratio of the width of baffle to the length of a rectangular tank is 0.1 and the optimized location ratio of the baffle to the water height is 0.9.

1. 서 론

연료탱크와 같은 유체 저장 구조물들은 유체와

구조물 사이의 상호 간섭에 의해서 유체가 채워지지 않았을 때와는 다른 동적 특성을 나타내고 있어 오래 전부터 많은 관심의 대상이 되어 왔다. 유체와 구조물 사이의 상호 간섭현상은 구조물의 움직임이 유체에 힘을 전달하고 유체는 다시 구조물에 영향을 미치면서 발생하게 된다. 이때 외력을 받는 유체 저장 탱크내의 유체 자유표면의 주기적인 운동 즉, 출렁거리는 현상을 슬로싱(sloshing)이라고 하는데 특히 이 슬로싱 현상은 자동차, 비행기, 액체로켓 및 선박산업에서 큰 관심을 가지고 연구되고 있다.

선진국에서는 이미 40년 전부터 슬로싱 효과를

[†] 책임저자, 회원, 충남대학교 기계설계공학과
E-mail : leeys@cnu.ac.kr
TEL : (042)821-6644 FAX : (042)822-7366
^{*} 충남대학교 대학원 기계설계공학과
^{**} 여수대학교 기계설계공학과
^{***} 충남대학교 기계설계공학과

고려하여 유체저장탱크 내에 적당한 간격의 격막이나 여러 형태의 배플(baffle)을 설치하는 등의 슬로싱 제어를 위한 노력이 수행되고 있다. 국내의 경우 관련연구로 염기연, 임정식 및 이영신 등에 의해 유체가 채워진 원통셀 및 외팔형 원통셀의 동특성에 대한 연구^(1~4)가 수행되었으나 슬로싱에 대한 체계적인 연구는 미흡한 실정이다. 지금까지의 슬로싱 연구를 살펴보면 유체의 거동을 예측해내는 실험의 어려움 때문에 미국의 NASA를 제외한 대부분의 슬로싱 연구는 자유표면의 움직임을 포착하기 위한 수치적인 연구^(5~8)가 주를 이루고 있고, 최근까지도 실험보다는 수치해석에 기반을 둔 알고리즘에 관한 연구가 더 활발하다. NASA의 슬로싱 보고서⁽⁹⁾에는 여러 가지 연료탱크 형상에 대하여 동역학적 등가 모델에 대하여 상세하게 기술하고 있다. Silveira 등⁽¹⁰⁾은 배플의 깊이가 주어졌을 때 배플 폭의 변화에 따른 감쇠비와 진동수의 변화에 대해 실험을 수행하였고, Garza 등⁽¹¹⁾은 배플에 구멍을 만든 후 주어진 배플 깊이에 대하여 배플 구멍의 크기나 천공량의 변화에 따른 감쇠비의 변화를 실험을 통해 연구하였다. 국내의 경우 조진래 등^(12,13)은 수치해석을 통해 원통형 액체저장 탱크의 과도응답해석을 수행하였고, 양보석⁽¹⁴⁾ 등이 구형용기를 이용한 자유진동실험과 강제진동실험을 수행하여 액체 슬로싱 감쇠특성을 실험적으로 연구하고, 실제로 간단한 형태의 슬로싱 감쇠기를 평면인삭기에 응용하여 감쇠기의 성능특성 및 적용가능성을 연구한 바 있다.

본 연구에서는 부분적으로 유체가 채워진 사각형 저장탱크가 병진운동을 할 때의 슬로싱 현상을 실험을 통하여 연구하였다. 유체로는 물을 사용하였으며 로드셀(bending type beam load cell)을 사각탱크의 한쪽 벽면에 설치하여 슬로싱에 따른 하중변화를 측정하였다. 슬로싱의 저감 연구를 위해 날개형 배플과 격막형 배플을 고안하여 실험하였으며, 그 결과들은 푸리에 변환(Fourier transformation)을 사용하여 비교하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

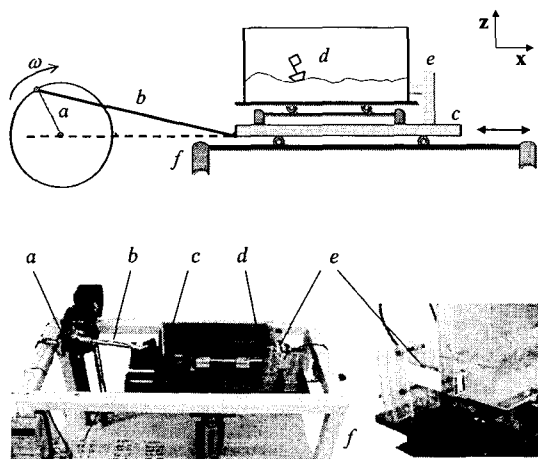
실험장치는 회전운동을 병진운동으로 변환시킬 수 있는 슬라이더 크랭크(sliding-crank)기구를 사용

하여 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 하여 이것을 크랭크의 운동으로 사용하였다.

본 연구에서는 사각탱크의 벽면에서 발생하는 힘을 측정하기 위해 Fig. 1에 설치된 바와 같이 하중센서인 로드셀을 설치하여 슬라이더(sliding)와 함께 병진운동하는 사각탱크의 관성력이 로드셀에 전달되도록 고안하였다. 사용된 로드셀은 최대용량이 25kg인 보(beam)형태를 사용하였으며, AD 변환기를 통해 0.1초 간격으로 데이터를 취득하도록 하였다. 사각탱크는 5 mm 두께의 투명 아크릴과 아크릴 본드를 사용하여 Fig. 2와 같이 제작하였으며, 길이(L) 300 mm, 너비(W) 100 mm, 높이(H) 150 mm로 하였다.

슬로싱으로 인하여 발생하는 힘과 모멘트를 감소시키기 위한 장치로써 물의 높이를 실질적으로 제어할 수 있는 날개형 배플과 사각탱크의 길이를 제어할 수 있는 격막형 배플을 고안하였다. Fig. 4는 본 연구에 사용된 배플의 형상으로 5 mm 두께의 아크릴을 사용하여 크기는 사각탱크의 너비 100 mm에 맞도록 하였고, 너비만을 변수로서 변화시키면서 제작하였다.

격막형 배플과 날개형 배플의 구분은 Fig. 4의 배플을 Fig. 5(a)와 같이 사각탱크의 양쪽 벽면에 옆으로 눕어서 날개형태로 설치되면 날개형 배플이라고 명명하고 Fig. 5(b)와 같이 사각탱크의 바닥면과 수직하도록 세워서 막과 같은 형태로 설치하면 격막형 배플이라고 명명하였다. 날개형 배플 실험을 위해 10, 20, 25, 30, 40 mm인 배플을 제작하였고, 격막형 배플 실험을 위해 너비가 10, 15, 20, 25, 30 mm인 배플을 제작하였다. 실험에 사용된 유체로는 일반적인 물을 사용하였으며 물의 높이는 항상 사각탱크 높이의 1/3인 50 mm로 채운 뒤 실험하였다. Fig. 6은 0.57 Hz로 병진운동하는 길이 300, 너비 100, 높이 150 mm인 사각탱크에 높이 50 mm로 물을 채운 실험에서 3초 간격으로 총 10초간의 시간동안 물의 슬로싱 거동을 나타낸 것이다. 실험에선 슬로싱 현상의 가시효과를 높이기 위해 물에 검정색 염료를 혼합하였다.



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

Fig. 1 Apparatus of sloshing experimental device

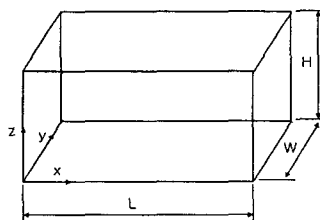


Fig. 2 Coordinate system and shape of rectangular tank

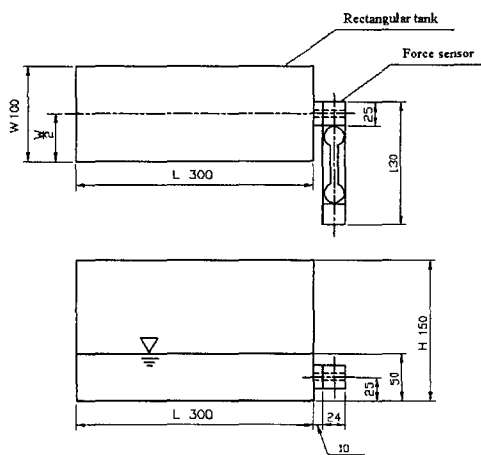


Fig. 3 Location of force sensor

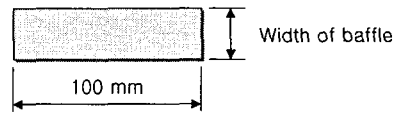
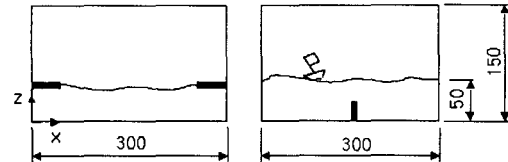


Fig. 4 Shape of baffle



(a) Wing baffle (b) Diaphragm baffle

Fig. 5 Rectangular tank with baffle

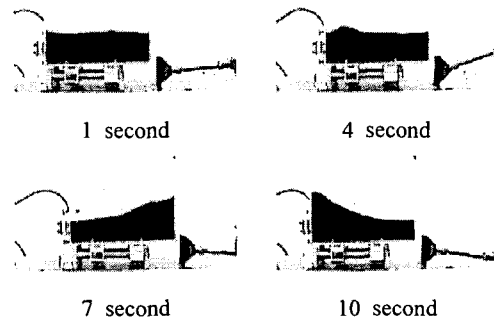


Fig. 6 Changes of water height under 0.57 Hz

3. 하중센서를 이용한 슬로싱 분석

본 연구에선 로드셀을 사용하여 얻어진 하중결과들을 분석하여 슬로싱 현상과 그 감쇠대책을 고찰하였다. 이를 위해 먼저 슬로싱의 영향을 실험적으로 확인하기 위하여 배플이 장착되지 않은 사각탱크에 유체(물)를 채운 뒤 병진운동에 의해 발생하는 힘을 사각탱크 벽면에서 측정하고 물의 무게와 동일한 질량을 갖는 지점토를 사각탱크 안에 채운 뒤 다시 동일한 조건에서 실험을 수행하여 사각탱크 벽면에서의 하중변화를 측정/비교하였다. Fig. 7(a)는 배플이 설치되지 않은 길이 300 mm, 너비 100 mm인 사각탱크에 높이 50 mm로 물을 채운 뒤 0.57 Hz로 가진한 결과로서 탱크벽면에서 발생하는 하중변화를 측정된 것이다. Fig. 7(a)에서 실선은 사각탱크에 유체인 물을 채웠을 경우 슬로싱에 의하여 발생하는 힘이고 점선은 사각탱크 안에 채워진 물의 질량과 동일

한 질량의 지점토일 경우에 의해 발생하는 힘이다. 유체인 물과 고체인 지점토가 동일한 질량과 동일한 조건에서 병진운동을 받을 때 유체의 슬로싱 효과로 인하여 탱크벽면에 더 큰 하중이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그리고, Fig. 7(a)의 하중선도에서 배플의 설치로 인하여 실선부분이 점선에 근접해 갈 때 슬로싱의 감쇠가 이루어지는 것으로 생각할 수 있다.

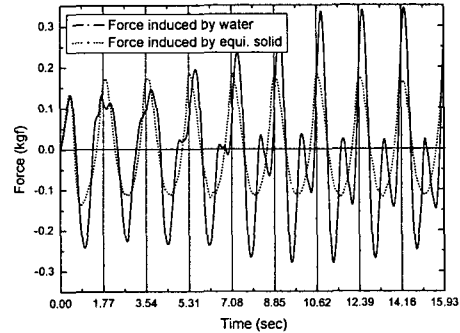
이렇게 얻어진 하중들의 세밀한 분석을 위해 각각의 하중그래프에 FFT변환⁽¹⁵⁾을 수행하였다. 로드셀을 이용하여 사각탱크의 벽면에서 측정된 하중값 $F(t)$ 는 주기가 T 인 주기함수로 식 (1)과 같이 푸리에 급수로 나타낼 수 있다. 이 식을 통하여 하중값은 주기가 T 인 무한히 많은 조화함수의 합으로 표시됨을 알 수 있다. 즉, 하중값들의 FFT 변환을 통하여 병진운동하는 사각탱크에 실질적으로 가진되는 주파수영역을 찾을 수 있다. Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)의 결과들을 FFT변환한 것으로서 실선은 유체인 물을 나타내고 점선은 물과 동일한 질량을 갖는 지점토를 나타낸다. 실험에서 슬라이더의 병진운동 주기는 0.57Hz로 설정하였으나 Fig. 7(b)에서 이의 두 배수 성분인 1.13Hz 또한 발생되는 것을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 사용된 크랭크-슬라이더 시스템의 기구학적 특성에 의한 것으로 결과적으로 300×100×50 mm 용적의 물의 1차 고유진동수인 1.13Hz가 가진되기 때문에 공진이 발생된다.

이상의 실험결과를 통해 로드셀을 사용하여 측정된 사각탱크 벽면에서의 하중값을 FFT 변환하였을 경우, 증폭된 가진 주파수 영역이 등가질량을 갖는 지점토의 FFT 선도에 근접할 때 슬로싱의 감쇠가 이루어졌다고 예측할 수 있고, 이러한 결론은 슬로싱 감쇠장치인 배플의 성능평가 실험에 적용되었다. 즉, 배플이 장착된 실험을 수행한 후 사각탱크 벽면에서 측정된 하중값들의 FFT 선도가 지점토의 FFT 선도에 가장 많이 근접할 경우 가장 좋은 성능으로 평가하였다. Fig. 8은 이와 같은 배플의 성능평가 방법을 도식적으로 나타낸 것이다.

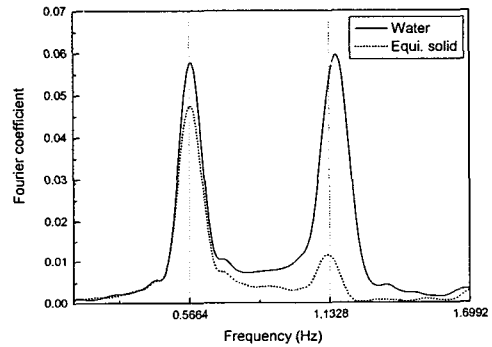
$$F(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in\omega t} \quad (1)$$

where $\omega = 2\pi \frac{1}{T}$,

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^{-\frac{T}{2}} F(t) e^{-in\omega t} dt$$



(a) Forces measured by load cell



(b) Fourier Transformation of forces

Fig. 7 Force comparison between water and the equivalent weight for non-baffled tank under excitation 0.57 Hz

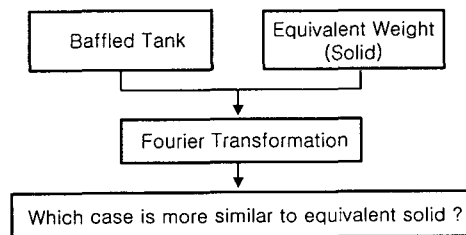


Fig. 8 Procedure to evaluate the baffles

4. 실험결과 및 고찰

날개형 배플과 격막형 배플의 효과를 연구하기 위해 Fig. 4와 같은 배플을 Fig. 5와 같이 장착하여 실험하였다. 각각의 실험결과는 로드셀을 사용하여 측정된 사각탱크의 한쪽 벽면에서의 하중이력에 FFT 변환을 하여 비교하였다.

4.1 날개형 배플

날개형 배플의 효과를 연구하기 위해 Fig. 5(a)와 같이 배플을 사각탱크의 양쪽 벽면에 날개형 태로 설치한 후 배플이 없는 실험에서 물높이변화가 가장 큰 가진주기인 0.57 Hz로 가진 하였다. 날개형 배플의 크기에 대한 영향을 보기 위해 Fig. 4와 같은 배플의 너비를 10, 20, 25, 30, 40 mm로 변화시키면서 실험하였고, 날개형 배플의 위치에 대한 영향을 연구하기 위해 너비 20 mm의 배플이 물높이의 10/10, 9/10, 8/10, 5/10 위치에 있을 경우에 대해서 실험하였다.

Fig. 9는 배플의 크기에 대한 실험결과로서 사각탱크가 0.57 Hz의 가진을 받을 경우 사각탱크의 벽면에서 측정된 하중값들을 각각 FFT변환시켜 나타낸 것이다. 이 그래프에서 배플이 없는 경우를 나타내는 점선부분을 살펴보면 1.14 Hz가 많이 증폭되어 있는 것을 볼 수 있지만 배플을 설치함으로써 물의 무게와 동일하게 등가질량을 채운 지점토에 대한 결과 수준으로 낮출 수 있는 것이 확인된다. 이때 배플의 너비가 30 mm일 때 가장 좋은 효과를 보이고 있다. 주파수 1.14 Hz영역에서 발생되는 이러한 특성을 배플의 크기에 대한 그래프로 나타내면 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 가로축은 배플의 너비를 탱크의 길이로 무차원 하였고 세로축은 푸리에 계수의 크기를 나타낸다. Fig. 10에서 배플의 너비가 사각탱크의 길이에 대하여 그 비율이 0.1일 때부터 슬로싱에 의해 발생되는 힘을 최적으로 안정화시킬 수 있다고 판단된다.

Fig. 11은 날개의 배플의 위치에 대한 실험결과로서 너비 20 mm인 배플을 물높이의 10/10, 9/10, 8/10, 5/10 위치에 설치할 경우에 대한 실험한 결과이다. 이 그래프 또한 1.14 Hz 영역만을 배플의 위치에 대한 푸리에 계수로서 나타낸 것이다. 이 실험결과에서 배플이 유체인 물의 자유표면에 설치될 경우보다 물 속에 약간 잠겨 있을 경우

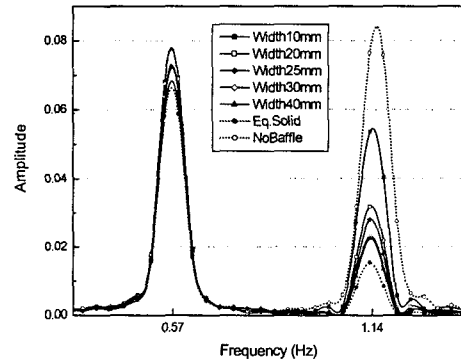


Fig. 9 FFT of force measured at tank wall depending on various wing baffle width under excitation 0.57 Hz

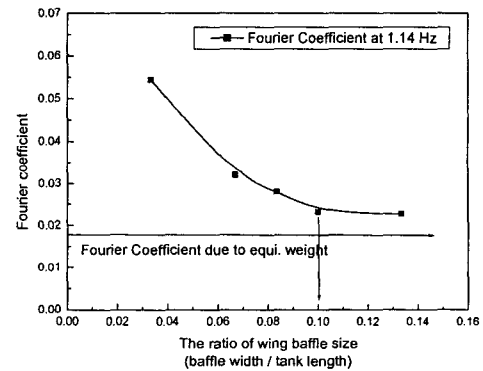


Fig. 10 Finding optimized baffle size for wing baffle under excitation 0.57 Hz

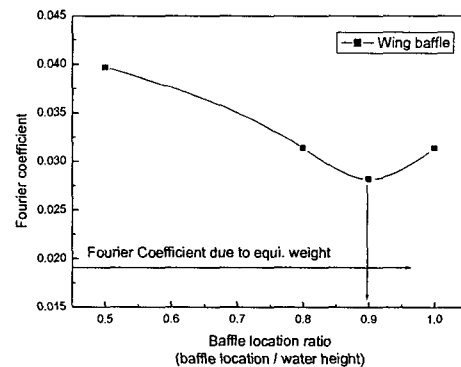


Fig. 11 Finding optimized baffle location for wing baffle under excitation 0.57 Hz

에 더 좋은 효과를 발휘하고 있으며 그 위치는 바닥면으로부터 물높이의 0.9정도 되는 위치이다.

4.2 격막형 배플

격막형 배플의 효과를 연구하기 위해 Fig. 5(b)와 같이 바닥면에 세워져 설치되는 배플의 너비를 10, 15, 20, 25, 30 mm로 변화시키면서 실험을 수행하였고, 격막형 배플의 위치에 대한 영향을 연구하기 위해 너비 25 mm의 배플을 Fig. 12와 같이 사각탱크의 바닥면, 중간위치 그리고 자유표면에 있도록 세워져 설치한 뒤 실험을 수행하였다. 가진주기는 0.57 Hz로 하였다.

Fig. 13은 사각탱크가 0.57 Hz의 가진을 받을 경우, 배플의 너비를 변화시키면서 실험한 하중 결과들을 각각 FFT 변환시켜 나타낸 것이다. 이 그래프의 1.14 Hz영역을 보면 배플의 너비가 15 mm일 때부터 증가의 질량을 갖는 지점토를 채운 결과와 가깝게 되는 것을 알 수 있다. 전체적으로 배플을 설치한 실험결과들은 증가의 질량을 채운 경우의 거동에 보다 유사해지는 것을 볼 수 있고, 배플이 없을 때보다 슬로싱이 크게 안정화되고 있음을 알 수 있다. 날개형 배플의 실험과 마찬가지로 주파수 1.14 Hz영역에서 발생하는 이러한 특성을 배플의 크기에 대한 그래프로 나타내면 Fig. 14과 같다. Fig. 14의 가로축은 배플의 너비를 물의 높이로 나누어준 무차원화된 값으로 나타내었고 세로축은 1.14 Hz영역의 푸리에 계수를 나타낸다. Fig. 14에서 물높이에 대한 배플의 너비 비율이 0.44정도일 때부터 증가의 질량이 나타내는 거동과 비슷해지며 슬로싱이 가장 많이 안정될 것이라고 예측할 수 있다.

격막형 배플의 위치에 대한 영향을 연구하기 위해 Fig. 12와 같이 너비 25 mm를 갖는 배플의 위치를 변화시켜가면서 가진주기 0.57 Hz로 실험하였다. Fig. 15는 측정된 하중값들에 각각 FFT 변환을 하여 표현한 그래프이다. 격막형 배플의 설치위치는 슬로싱현상 억제에 효과가 거의 없음을 확인할 수 있다. 격막형 배플의 위치에 따른 이러한 결과는 가진주기 0.71 Hz하에서 측정된 실제 물의 자유표면 높이변화를 나타낸 Fig. 16을 통해서도 확인할 수 있다. Fig. 16에서 격막형 배플의 설치위치가 자유표면 근처일 때 슬로싱이 가장 안정된 모습을 보이지만, 다른 결과들과 큰 차이를 보이지 않고 있는 것을 알 수 있다. 이러

한 결과들을 바탕으로 격막형 배플은 그 크기가 일정할 때 설치위치에 큰 관계없이 일정한 슬로싱 저감효과를 갖는 것으로 판단된다.

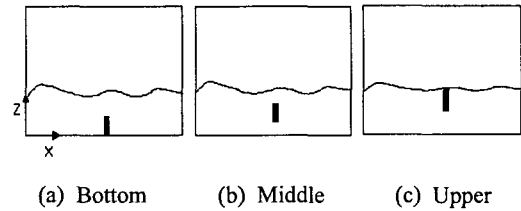


Fig. 12 Various location of the diaphragm baffle

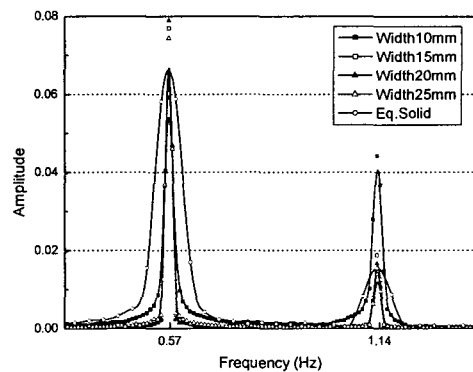


Fig. 13 FFT of force measured at tank wall depending on various diaphragm baffle width under excitation 0.57 Hz

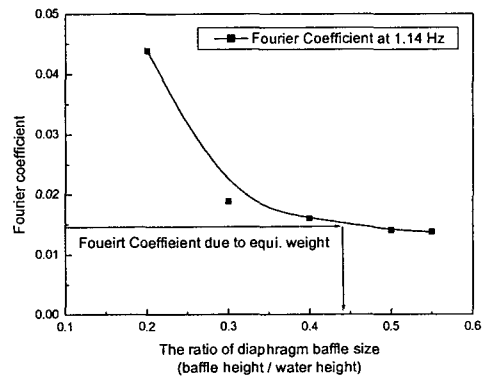


Fig. 14 Finding optimized baffle size for diaphragm baffle under excitation 0.57 Hz

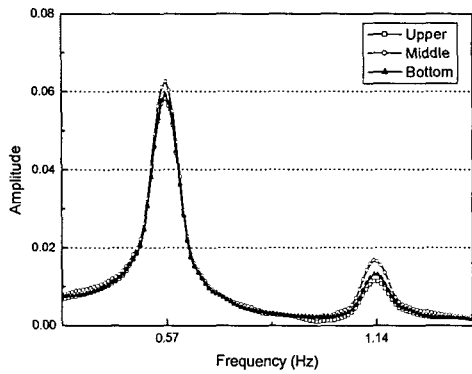


Fig. 15 FFT of force measured at tank wall depending on various diaphragm baffle location under excitation 0.57 Hz

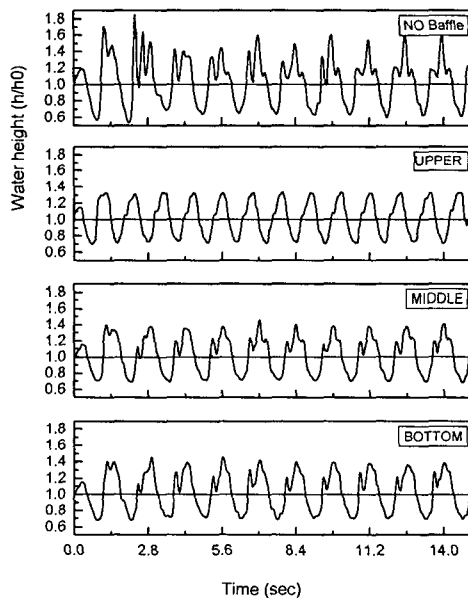


Fig. 16 Water height depending on various diaphragm baffle location under excitation 0.71 Hz

5. 결론

사각탱크 내부의 슬로싱 현상을 연구하기 위해 병진운동을 할 수 있는 실험장치를 제작하고, 사각탱크 내부의 슬로싱을 감소시키기 위하여 날개

형 배플과 격막형 배플을 설치하여 배플의 크기 및 설치위치의 영향을 고찰하였다. 본 연구의 결과들로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 사각형 저장탱크에 유체가 담겨진 경우와 등가의 무게를 갖는 지점토를 설치한 후 벽면에서 발생하는 하중을 측정/비교하여 슬로싱효과를 정량적으로 확인하였다.

(2) 날개형 배플의 설치를 통하여 슬로싱의 감쇠효과를 구현하였으며 실험결과로부터 날개형 배플의 너비가 사각탱크 길이의 0.1일 때부터 일정한 감쇠를 유지하는 것을 알 수 있었다. 날개형 배플의 위치에 따른 실험결과, 배플이 자유표면에 있을 때보다 물속에 약간 잠겼을 경우 더 좋은 슬로싱 감쇠 특성을 보였으며 그 위치는 물 높이의 0.9정도 되는 위치이다.

(3) 격막형 배플의 설치를 통한 슬로싱의 감쇠효과를 구현하였으며 격막형 배플의 너비가 물 높이의 0.44일 때부터 일정한 감쇠를 유지하는 것을 실험으로부터 확인하였다. 격막형 배플의 위치에 따른 실험결과, 물의 높이를 가장 많이 안정시킨 위치는 배플을 자유표면 근처에 설치한 경우이지만 그 차이들은 미소하여 격막형 배플은 설치되는 위치(깊이방향)에 상관없이 일정한 감쇠를 유지하는 것으로 판단된다.

이상의 결론들은 본 연구에서 수행된 탱크형상, 병진방향가진 및 가진력주기의 범위에서 유용한 것으로 사료되며 결과의 일반화를 위해서는 본 연구에서 고려하지 않은 범위의 가진주기 및 다른치수의 저장탱크에 대해서는 더 많은 연구가 수행되어야 한다.

후 기

본 연구는 한국 학술진흥 연구재단의 지원에 의해 수행(과제번호 E00006)된 것으로서, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Youm, K. U., Yoon, K. H., Lee, Y. S., and Kim, J. K., 1996, "Dynamic Behavior Analysis of Stiffened Cylindrical Shell Filled with Fluid," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 20, No. 9, pp. 2875~2886.

- (2) Yim, J. S., Sohn, D. S., and Lee, Y. S., 1998, "Free Vibrations of Clamped-Free Circular Cylindrical Shell with a Plate Attached at an Arbitrary Axial Position," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 213, No. 1, pp. 75~88.
- (3) Lee, Y. S., Moon, H. K., and Yoon, J. H., 1986, "Free Vibration Analysis of Orthotropic Circular Cantilever Cylindrical Shells," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 10, No. 6, pp. 929~936.
- (4) Lee, Y. S., Yang, M. S., Kim, H. S., and Kim J. H., 2002, "A Study on the Free Vibration of the Joined Cylindrical-Spherical Shell Structures," *Computers & Structures*, Vol. 80, pp.2405-2414.
- (5) 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.
- (6) Hirt, C.W. and Nichols, B.D., 1981, "VOF Method for the Dynamics of Boundaries," *Journal of Computational Physics*, Vol 39, pp. 201~225
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Roberts, J.R. Basurto, E.R., and Chen, P., 1966, "Slosh Design Handbook," NASA CR-406.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) Cho, J. R., Kim, M. J., Lee, S. Y., and Huh, J. W., 2002, "Dynamic Suppression Effects of Liquid Container to the Baffle Number and Hole Diameter," *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 15, No. 1, pp. 147~154.
- (13) Cho, J. R., and Lee, S. Y., 2001, "Transient Dynamic-Response Analysis of Liquid-Storage Tanks with Baffles," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol 29, No. 4, pp. 43~50.
- (14) Yang, B. S., Jun, S. K., and Kim, W. C., 1991, "An Experimental Study on the Damping Characteristics of Liquid Sloshing," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 96~104.
- (15) Rao, S., 1992, *Mechanical Vibrations*, Addison Wesley, pp. 725~726.