

투과성 내부재가 설치된 사각형 탱크내의 슬로싱 현상에 대한 실험적 연구

현종우* · 조일형*

*제주대학교 해양시스템공학과

Experimental Study on Sloshing in Rectangular Tank with Vertical Porous Baffle

Jong-Wu Hyeon* and IL-Hyoung Cho*

*Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea

KEY WORDS: Sloshing 슬로싱, Image processing technique 영상처리기법, Porous baffle 투과성 내부재, Model test 모형실험

ABSTRACT: A variety of inner baffles are often installed to reduce liquid sloshing and prevent tank damage. In particular, a porous baffle has a distinct advantage in reducing sloshing by changing the natural periods and dissipating the wave energy in a tank. In model tests, porous baffles with five different porosities were installed vertically in a liquid tank under sway motion. The free surface elevations and pressures were measured using an image processing technique and a pressure gage for various combinations of baffle's porosity and submergence depth, and tank's amplitude and period. The experimental results were in good agreement with the analytic solutions (Cho, 2015), with the exception of a quantitative difference at resonant periods. The experimental results showed that the sloshing characteristics in a tank were closely dependent on both the porosity and submergence depth of the baffle, and the optimal porosity existed near $P = 0.1275$.

1. 서 론

바람이나 파도와 같은 외력에 의해 항해중인 선박이 운동을 하면 선체 내 액체 탱크 내에 채워진 유체도 그에 따라 운동을 한다. 이러한 현상을 슬로싱(Sloshing)이라 한다. 특히, 슬로싱 현상은 평상시에는 큰 문제가 되지 않지만 외력의 주파수와 탱크내 유체의 고유주파수가 일치하는 공진조건을 만족하게 되면 탱크 내의 유체의 운동이 급격히 커져 탱크 내부 벽면에 큰 충격력이 작용한다. 그 결과 탱크 벽면에 구조적인 변형이 일어나거나 장시간 영향을 받게 되는 경우에는 누적에 의한 피로파괴 등 심각한 문제점이 유발될 뿐만 아니라 선박의 안전한 항해에 악영향을 주게 된다. 탱크 내 슬로싱 현상에 관한 대표적인 연구들로는 Faltinsen(1978), Bridges(1982), Mikelis et al.(1984), Wu et al.(1998), Kim(2001) 등이 있다.

다양한 주파수를 갖는 해양파의 특성을 고려할 때 공진을 회피하는 것은 쉽지 않으므로 공진발생시 탱크내 슬로싱을 줄이는 다양한 장치들에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 탱크

내부에 불투과성 격벽을 설치하여 탱크내 유체의 고유주기를 변경하여 공진을 회피하는 방법이나 투과성 내부재(그물형, 슬릿형, 타공형)를 설치하여 유체가 구멍을 통과하면서 발생하는 강한 와류 발생으로 에너지 손실을 일으켜 슬로싱을 줄이는 방법 등이 있다. 또한 탱크 내 수면 위에 작은 부유 입자들을 분포시켜 탱크내에서 발생한 쇄파가 탱크벽과 충돌시 충격을 완화시키는 방법 등이 있다.

투과성 내부재가 포함된 탱크내 슬로싱 문제에 대한 해석해의 정확성은 투과성 내부재에 적용하는 에너지 손실 모델에 따라 달라진다. 많은 연구자들에 의해 투과성 판에서의 선형 또는 비선형 에너지 손실 모델을 제안하였고 모형실험 결과와 비교를 통해서 해석 방법을 검증하였다(Evans and Mciver, 1987; Crowley and Porter, 2012; Faltinsen et al., 2011; Faltinsen and Timokha, 2011; Cho, 2015). 최근에는 탱크내 비선형 자유표면 특성을 고려한 수치해석 방법이 등장하면서 탱크의 대진폭 운동 시 발생하는 비선형 유동을 다루는 연구가 주목을 받고 있다(Cho et al., 2005; Akyildiz, 2012; Xue et al., 2012; Wu et al.,

Received 9 July 2015, revised 3 August 2015, accepted 19 August 2015

Corresponding author IL-Hyoung Cho: +82-64-754-3482, cho0904@jejunu.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

2013). Shin et al.(2005)은 선형포텐셜 이론에 기반을 둔 변수분리법을 이용하여 내부재 설치 유무와 유체의 적재 깊이에 따른 고유주기를 구하는 간략식을 제안하고 Lloyd 선급에서 제안한 고유주기 산정식과 비교하여 내부재 설치가 탱크내의 고유주기 변화에 미치는 영향을 살펴보았다.

슬로싱 현상에 관한 많은 실험 논문들이 발표되었음에도 불구하고 축척비의 영향, 실험장치 구성, 계측센서의 종류 등에 따른 많은 불확실성이 내포되어 있다. Sawada et al.(1996)는 초음파 센서를 이용하여 자성유체의 속도를 측정하는 UVP (Ultrasonic velocity profile)기법을 도입하여 탱크 내 유동을 정확하게 측정하는 실험 방법을 제시하였다. Kim et al.(2009)와 Yang et al.(2015)는 탱크 내 유체에 미세한 알루미늄 입자를 섞어 레이저를 이용하여 입자의 유동을 추적하여 유속을 측정하는 PIV (Particle image velocimetry)기법을 사용하였다. Jin et al.(2014)는 탱크 내에 투과성 내부재를 수면 아래 수평으로 설치하여 탱크 벽면에서의 수위와 압력을 측정하는 실험연구를 수행하여 수평으로 설치한 내부재가 공진 시 발생하는 과도한 슬로싱을 줄일 수 있음을 밝혔다. Kim et al.(2015)는 슬로싱에 의해 발생한 탱크벽의 충격 압력을 측정하기 위하여 4종류의 압력계를 사용하여 각 압력계의 특성을 조사하였다.

본 연구에서는 2차원 슬로싱 문제를 다루기 위하여 탱크 길이에 비해 상대적으로 폭이 좁은 사각 탱크 모형을 수평방향(Sway)으로 움직일 때 발생하는 탱크 내 슬로싱 현상과 투과성 직립 내부재를 설치할 경우의 슬로싱 억제 효과를 모형실험에서 측정된 수위와 압력 데이터를 통하여 살펴보고, Cho(2015)의 해석결과와 비교하였다. Cho(2015)는 투과성 판 전후의 압력차가 투과성 판에서의 유체 속도의 제곱으로 표현되는 항력항에 비례한다고 가정한 비선형 에너지 손실모델을 투과성 내부재에 적용하였다. 사각형 탱크 내의 슬로싱 문제를 구현하는 비선형 경계치 문제를 풀기 위하여 고유함수전개법(Eigenfunction expansion method)과 함께 축차법(Iteration method)을 사용하였다. 그는 투과성 내부재의 공극율이 0.1 주변의 값을 가질 때 탱크내의 슬로싱을 효과적으로 줄일 수 있음을 밝혔다. 투과성 내부재 설치는 탱크 내 유체영역을 나눠 고유주기를 변경시키고 동시에 내부재 구멍을 통과하면서 발생하는 강한 와류로 인한 에너지 손실을 일으켜 슬로싱을 저감하는 기능을 동시에 수행한다. 최적의 투과성 내부재를 설계하기 위한 기초 자료를 얻

기 위하여 투과성 내부재의 공극율, 잠긴 깊이, 탱크의 운동특성 등과 같은 여러 설계변수들에 따른 탱크 내의 수위와 압력을 측정하였다. 이러한 주요 설계변수들에 따른 탱크내의 슬로싱 특성의 변화와 슬로싱 저감 효과를 해석해와 비교해 가면서 살펴보았다.

2. 모형실험

Fig. 1에 나타난 길이 2a, 수심 h인 사각 탱크내 유체의 고유주기를 산정하는 식은 아래와 같다(Shin et al., 2005).

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{gn\pi}{2a} \tanh\left(\frac{n\pi h}{2a}\right)}}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

여기서 g는 중력가속도, n=1,2,3...은 슬로싱 고유모드를 나타낸다.

모형실험에 사용한 사각 탱크의 제원은 길이 50cm, 높이 50cm, 폭 12cm, 두께 1.2cm이다. 탱크내 유동의 변화를 밖에서 확인할 수 있도록 투명한 아크릴로 모형을 제작하였다. 모형실험에 사용한 탱크 모형 제원을 식 (1)에 대입하여 1차, 2차, 3차 고유주기를 구하면 1.07s, 0.61s, 0.47s이다. 1차, 2차, 3차 고유주기를 모두 포함하도록 탱크의 운동주기의 범위를 $0.25s \leq T \leq 1.4s$ 로 정하였다. 서론에서 언급했듯이 투과성 내부재는 탱크내

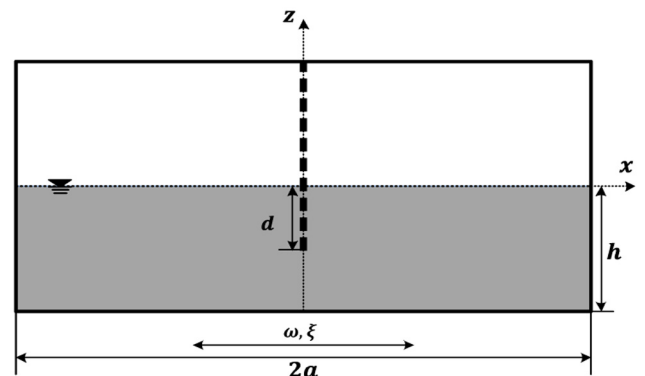


Fig. 1 Definition sketch of a rectangular tank with vertical porous baffle



Fig. 2 Actuator, rectangular tank, and porous baffles used in model test

유체의 고유주기를 변경시킴과 동시에 유체가 내부재 구멍을 통과하면서 발생하는 와류로 인한 에너지 손실 효과를 준다. 이때 에너지 손실의 특성은 투과성 내부재의 곡부형상보다는 공극율에 큰 영향을 받는다. 따라서 구멍의 직경을 0.3cm로 고정하고 구멍의 간격을 조절하여 5종류의 서로 다른 공극율을 갖는 내부재를 만들어 모형실험을 수행하였다. 내부재의 두께를 무시한 Cho(2015)의 해석결과와 비교하기 위하여 실험에 사용한 내부재는 두께 2mm의 얇은 철판으로 제작되었다. Fig. 2는 모형 실험에 사용한 탱크 구동장치, 탱크 모형, 투과성 내부재의 사진을 보여주고 있다.

2.1 측정 장비

일정한 주파수와 진폭을 가지고 수평 운동하는 탱크내의 수위 변화를 실시간으로 측정하기 위하여 촬영된 실험 동영상을 분석하여 결과를 얻는 영상처리기법(Image processing)을 사용하였다. 본 연구에서는 iPhone6에 내장된 캠코더를 사용하였고 내부재를 기준으로 수위 변동이 비대칭적으로 일어나기 때문에 탱크의 좌측 영역을 확대하여 촬영하였다. 해상도는 1280×720 이고 초당 240프레임으로 약 10초간 촬영한 실험 동영상을 분석하여 탱크내 수위의 시계열 자료를 얻었다. 슬로싱 현상으로 탱크 벽에 작용하는 유체의 압력을 측정하기 위하여 초소형 방수용 압력계인 P310-02S를 사용하였다. 압력계에서 측정된 신호는 증폭기(Amplifier)와 AD변환기를 거쳐 100Hz의 샘플링 주파수로 컴퓨터에 저장된다. 공기에 노출되지 않도록 압력계를 탱크 바닥으로부터 2cm 떨어진 탱크 벽면에 설치하였다. Fig. 3은 탱크내 수위변화를 측정하는 영상처리과정과 탱크 벽면에 설치된 압력계 사진이다. 영상처리기법을 통해 탱크내 수위를 측정하기 위하여 탱크 하단 모서리에 일정한 간격(24cm)을 두어 정사각형 모양의 파란색 표시지 2개를 붙여 픽셀과 변위 사이의 관계를 제공하였다. 또한 탱크내 수위 추적을 용이하게 하기 위하여 빨간색 물감을 섞은 물을 사용하였다.

2.2 실험 조건

모형실험은 먼저 내부재가 없는 순수한 사각 탱크가 수평 운동할 때 탱크의 운동주기를 바꿔가면서 특정 두 지점에서의 수위와 벽면에 작용하는 압력을 측정하였다. 이후 내부재의 공극율, 잠긴 깊이를 바꿔가면서 동일한 실험을 수행하였다. 끝으로 공극율을 고정하고 탱크의 운동 진폭(0.1, 0.2, 0.3, 0.4cm)을 변경하면서 같은 실험을 반복하였다. 탱크의 운동진폭을 쉽게 조

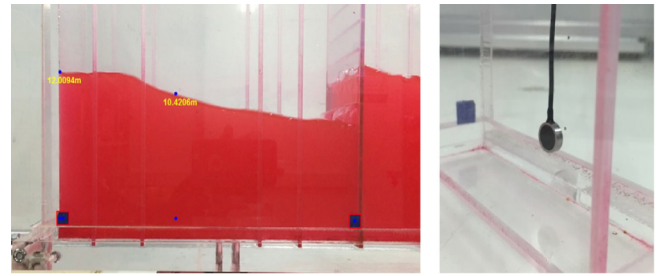


Fig. 3 Measurement of wave elevation using the image processing technique and installed pressure gage

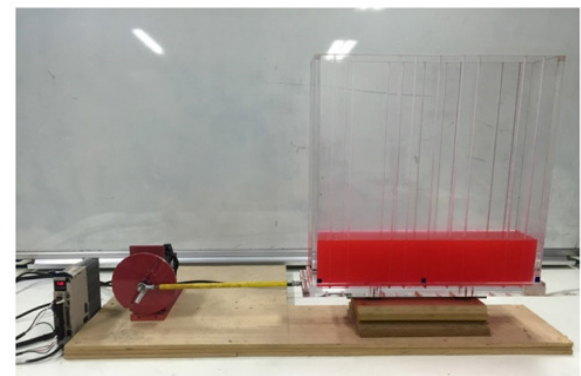
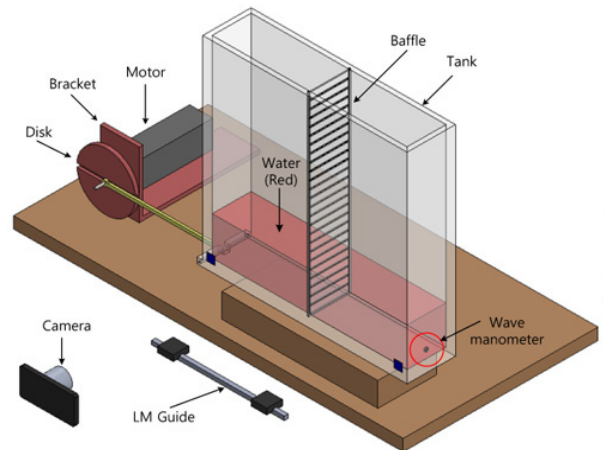


Fig. 4 3D sketch and photograph of experimental set-up

절할 수 있도록 직경 20cm인 원판 가운데에 일자로 홈을 내어 설정된 진폭에 맞는 위치에 길이 30cm인 연결 봉의 한 끝을 고

Table 1 Experimental conditions

	Exp. #1	Exp.#2	Exp.#3	Exp.#4
number of baffles	0	1	1	1
submergence depth [d / h]	0	1	0.5	1
Porosity	0	0.0567 0.0816 0.1275 0.2267 0.3265		0.1275
wave period range [sec]	0.25 - 1.4	0.25 - 1.4		0.25 - 1.4
motion amplitude of tank [cm]	0.3	0.3		0.1 - 0.4

정하고 다른 한 끝을 탱크에 연결하였다. 모형실험에 사용한 실험 장치의 전체 구성도를 Fig. 4에 나타내었고 실험 조건은 Table 1에 정리하였다.

3. 결과 및 해석

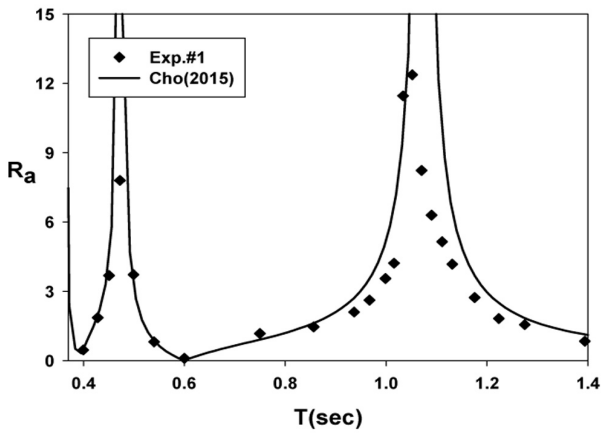
3.1 순수한 탱크내 슬로싱

Fig. 5는 내부재가 없는 순수한 사각 탱크내(Exp.#1)의 수위와 압력에 대한 해석과 실험 결과를 비교한 그림이다. x 축은 탱크의 운동주기이고, Fig. 5a,b의 y 축은 탱크 벽면과 벽면에서 10cm 떨어진 지점에서의 증폭비(Amplification ratio)이며 수위의 진폭을 탱크의 운동진폭으로 나눈 값($R_a = (\eta_{max} - \eta_{min}) / 2\xi$)으로 정의하였다. Fig. 5c의 y 축은 탱크 바닥에서 2cm 떨어진 벽면에서 측정된 압력값($P_d = P_{max} - P_{min}$)이다. 여기서 실선은 Cho(2015)의 해석 결과이며, 기호(◆)는 모형실험 결과이다. Cho(2015)의 해석하는 선형포텐셜이론에 기반을 두고 있기 때문에 탱크 벽면에서의 점성에 의한 마찰력과 비선형 현상을 규명하는데 한계가 있다. 이러한 이유로 공진주기에서 해석결과는 실험결과보다 과대 평가되었다. 그러나 공진주기를 제외한

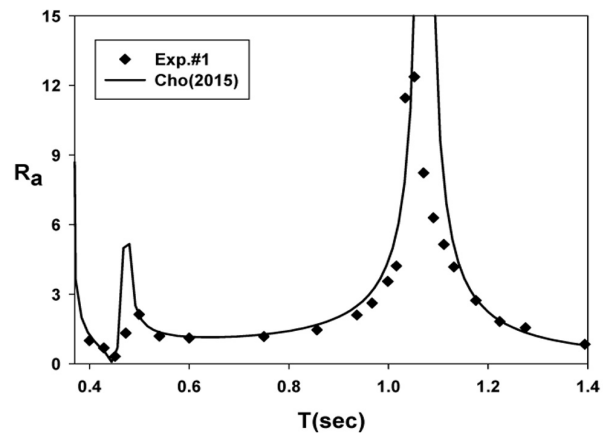
나머지 주기에서는 두 결과가 서로 잘 일치하는 것을 보여주고 있다. 1차와 3차 고유주기(1.07s, 0.47s)에서 공진현상으로 증폭비가 크게 나타났지만 2차 고유주기(0.61s)에서는 증폭비가 작게 나타났다. 이는 2차 고유모드에서의 고유함수는 탱크 벽에서 노드(Node)점을 갖기 때문이다. 특히 1차 공진모드에서의 증폭비와 압력값이 다른 공진모드보다 상대적으로 크게 나타났고 공진폭도 가장 넓었다. 1차 공진주기에서 얇은 유체 층이 탱크 벽을 따라 오르는 처오름(Run-up) 현상이 실험에서 목격되었다. 탱크의 운동주기 변화에 따른 압력 곡선(Fig. 5c)은 전반적으로 증폭비 곡선(Fig. 5a)과 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 같은 위치에서의 압력은 수위 변화에 크게 영향을 받으며 특히 공진으로 크게 증폭된 수위 변화는 압력을 증폭시키며 이는 탱크 벽면에 큰 하중으로 작용된다.

3.2 내부재 공극율 변화

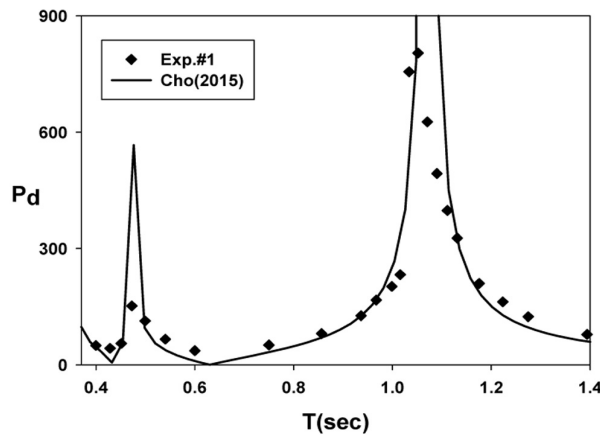
Fig. 6은 공극율이 다른 5종류의 투과성 내부재를 탱크 중앙에 수직으로 바닥까지 잠기도록 설치하였을 때(Exp.#2) 벽면에서 측정된 증폭비에 대해 해석(실선)과 실험(▲)을 비교한 그림이다. 점선과 기호(●)로 구분한 불투과성 내부재($P=0$)를 중앙



(a) Amplification ratio(at $x = -a$)



(b) Amplification ratio(at $x = -0.6a$)



(c) Pressure(at $x = -a$)

Fig. 5 Comparison of amplification ratio and pressure between the analytic and experimental results for Exp.#1

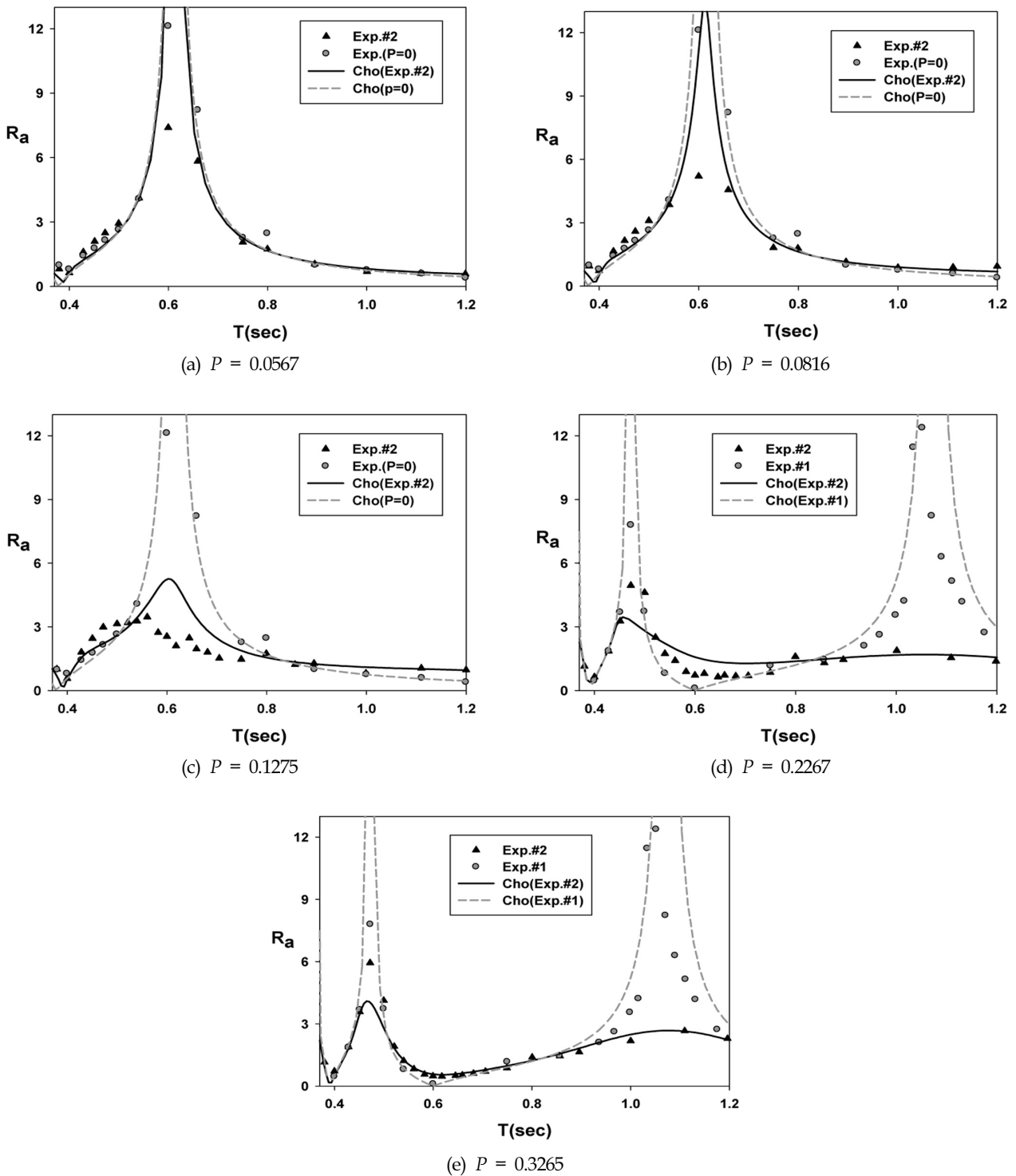


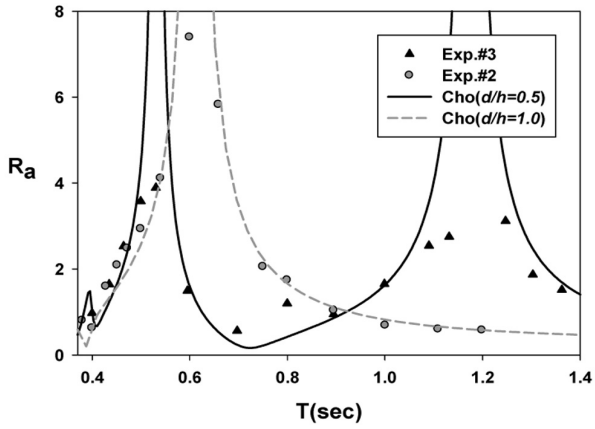
Fig. 6 Comparison of amplification ratio($x=-a$) between the analytic and experimental results as a function of period and porosity

에 설치하였을 때 탱크내 유체는 2개의 영역으로 완전히 구분되어 1차 고유주기는 1.07s에서 0.61s로 짧아진다. Fig. 6a,b,c를 살펴보면 공극율이 작은 내부재($P=0.0567, 0.0816, 0.1275$)를 설치한 경우 불투과성 내부재를 설치하였을 때와 동일한 1차 공진모드(0.61s)에서 큰 증폭비를 보인다. 그러나 Fig. 6d,e에 실선과 기호(\blacktriangle)로 표시된 공극율이 큰 내부재($P=0.2267, 0.3265$)를

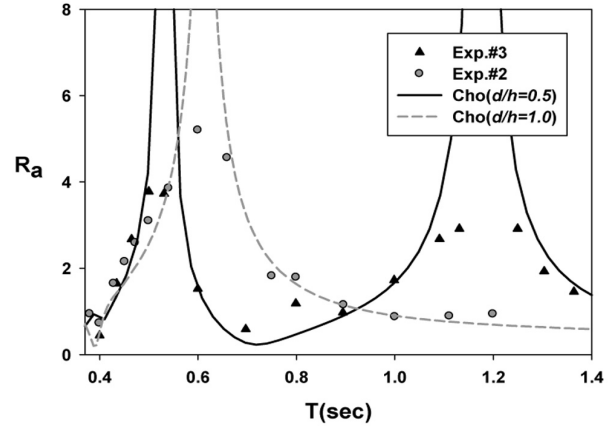
설치하였을 때 점선과 기호(\bullet)로 나타낸 내부재가 없는 순수한 탱크 (Exp.#1)와 동일한 공진주기(1.07s, 0.47s)에서 벽면에서의 증폭비가 크게 커짐을 볼 수 있다. 즉, 내부재의 공극율 변화에 따라 탱크내 유체의 고유주기가 변경되며 본 실험결과에 의하면 공극율이 0.12와 0.2 사이에서 고유주기가 바뀌어 탱크내 유체의 운동특성이 크게 달라졌다. 해석결과와 실험결과는 공진

주기를 제외한 나머지 주기에서는 서로 잘 일치하였다. 공진주기에서의 두 결과의 정량적인 값 차이는 공극율에 따라 달라지는데 공극율이 작은 내부재($P=0.0567, 0.0816, 0.1275$)를 설치하였을 때는 해석결과가 실험결과보다 과대평가된 반면에 공극율이 큰 내부재($P=0.2267, 0.3265$)를 설치하였을 때는 반대의 특

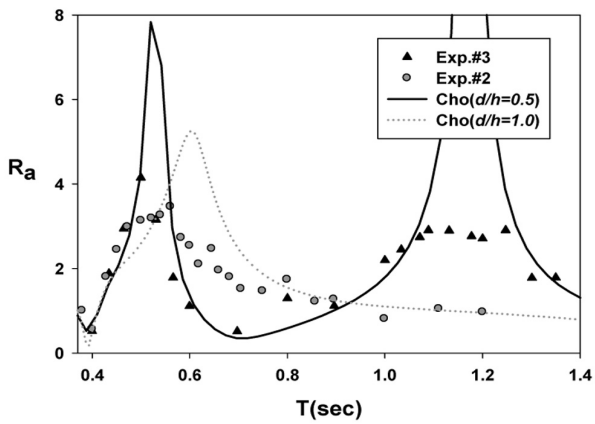
성이 나타남을 볼 수 있다. 이는 Cho(2015)의 해석해에서 사용한 투과성 내부재를 통과하면서 발생한 에너지 손실모델의 활용 가능성과 함께 해석해에서 다루지 못하는 비선형성과 점성의 영향으로 사료된다. 실험을 통하여 공극율이 0.1275인 경우 탱크 벽면에서의 증폭비가 전 주기범위에 걸쳐 가장 낮게 나타



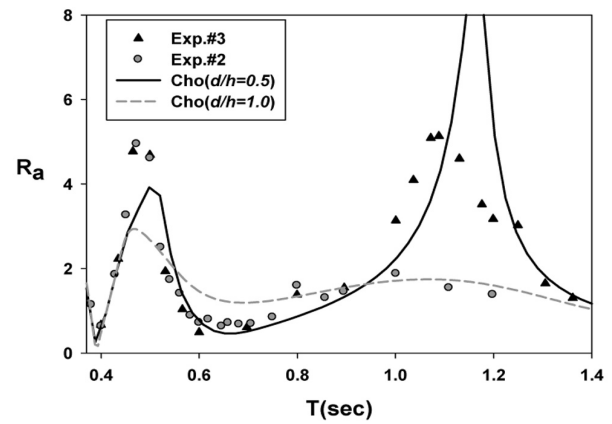
(a) $P = 0.0567$



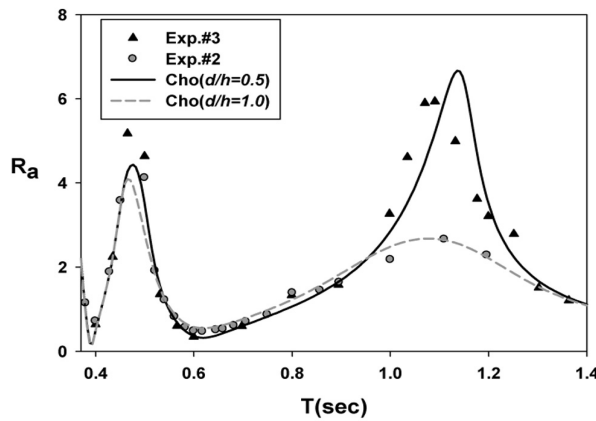
(b) $P = 0.0816$



(c) $P = 0.1275$



(d) $P = 0.2267$



(e) $P = 0.3265$

Fig. 7 Comparison of amplification ratio($x=-a$) between the analytic and experimental results as a function of period and porosity for $d/h = 0.5, 1.0$

나는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 모형실험에 사용한 5개의 공극율 중에서 공극율 0.1275에서 에너지 소멸효과가 가장 우수하였다. 이는 0.1275 주변에 최적의 공극율이 존재함을 의미한다.

3.3 내부재 잠긴 깊이 변화

내부재를 수심의 1/2만큼 잠기게 설치하여(Exp.#3) 3.2결과 동일한 실험을 실시하였다. Fig. 7은 공극율 변화에 따른 탱크 벽면에서의 증폭비를 나타내는 그래프이다. 여기서 실선과 기호(▲)는 $d/h = 0.5$ 인 경우에 대한 해석결과와 실험결과이고 점선과 기호(●)는 $d/h = 1.0$ (Exp.#2)인 경우에 대한 해석결과와 실험결과이다. $d/h = 0.5$ 인 경우 $d/h = 1.0$ 과 달리 공극율이 작은 내부재($P = 0.0567, 0.0816, 0.1275$)에서도 운동주기 0.47s와 1.07s에서 공진이 일어나는 것을 볼 수 있다. 즉, 모든 공극율에서 내부재가 없는 순수한 탱크에서 나타나는 슬로싱 특성을 보인다. 이는 내부재 하부를 통하여 유체가 자유롭게 이동하기 때문에 5개의 공극율에서 모두 비슷한 슬로싱 특성을 보인다.

3.4 탱크 운동진폭 변화

탱크의 운동진폭이 커지면 탱크내 유체의 비선형성은 더욱 커진다. 따라서 탱크의 수평운동 진폭이 증가함에 따라 내부재를 설치한 탱크내의 유동 특성을 살펴볼 필요가 있다. 여기서는

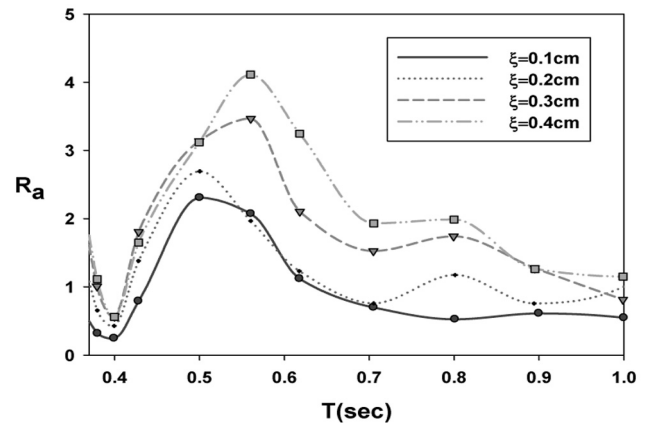


Fig. 8 Amplification ratio($x = -a$) as a function of period and motion amplitude of a tank for Exp.#4 ($P = 0.1275, d/h = 1.0$)

공극율이 0.1275인 내부재 1개를 탱크 중앙에 바닥($d/h = 1.0$)까지 설치한 경우(Exp.#4), 탱크의 운동진폭을 0.1cm부터 0.4cm까지 0.1cm씩 증가시키면서 벽면($x = -a$)에서의 증폭비를 비교하였다. Fig. 8은 탱크의 운동진폭에 따른 벽면에서의 증폭비 결과이다. 탱크의 운동진폭이 증가할수록 벽면에서의 증폭비는 증

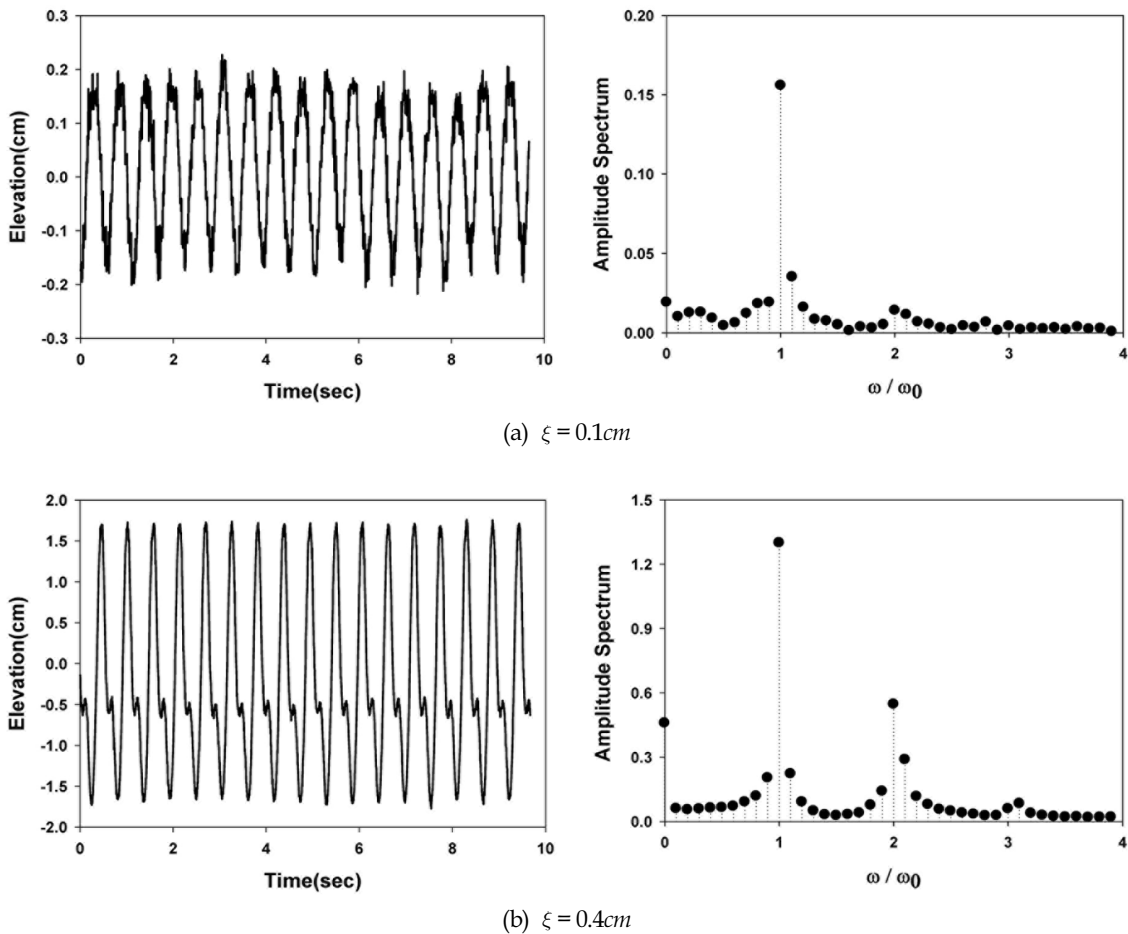


Fig. 9 Time series of wave elevation at $x = -a$ and corresponding amplitude spectrum for $T = 0.56$ s, $P = 0.1275, d/h = 1.0$.

가하며 공진주기는 점차적으로 장주기 영역으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 탱크의 운동주기를 0.56s로 고정하고 운동진폭을 0.1cm와 0.4cm로 탱크를 수평운동시켰을 때의 벽면에서 측정된 수위의 시계열 데이터와 이를 FFT(Fast Fourier Transform)를 통하여 얻은 진폭 스펙트럼이다. 먼저, Fig. 9a는 탱크의 운동진폭이 0.1cm인 경우에 대한 결과이다. 미소 운동진폭을 가지고 탱크가 움직이기 때문에 수위변화 또한 작은 범위내에서 이루어지며 FFT를 통한 진폭 스펙트럼을 분석한 결과 ω 항에 크게 의존적이라는 것을 알 수 있다. 반면 탱크의 운동진폭을 0.4cm로 증가한 경우 수위의 시계열 데이터내에 고주파수 성분인 비선형항이 포함된 것을 알 수 있다. 이는 진폭 스펙트럼에서 ω 항 외에 2ω 항에서 진폭 스펙트럼이 크게 나타난 것으로 설명할 수 있다. 위 결과를 통하여 탱크의 운동진폭이 클수록 비선형성은 더욱 커진다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 투과성 내부재의 설치에 따른 탱크내 슬로싱 특성 변화와 슬로싱 저감효과를 확인하기 위하여 내부재의 공극율과 잠긴 깊이, 그리고 탱크의 운동특성(주기, 진폭)을 바꿔가면서 탱크 벽면에서의 수위와 압력을 측정하였다. 측정된 실험결과는 Cho(2015)의 해석결과와 비교하였다. 해석결과와 모형실험결과는 공진주기에서 정량적인 값 차이를 보였지만 나머지 주기에서 서로 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

내부재가 없는 순수한 탱크의 벽면에서의 증폭비는 1차와 3차 고유주기에서 피크값을 보였으나 2차 고유주기에서는 낮게 나타났다. 이는 2차 고유주기에 해당하는 고유함수가 탱크 벽에서 노드점을 갖기 때문이다. 특히 1차 고유모드에서의 수위와 압력은 다른 고유모드에서보다 상대적으로 크게 나타났다.

공극율이 작은 내부재 1개를 탱크 중앙에 설치하였을 때, 주기 0.61s에서 큰 증폭비를 보인 반면에 공극율이 큰 내부재를 설치하였을 때는 주기 1.07s, 0.47s에서 증폭비가 커짐을 확인하였다. 이는 어떤 특정 공극율을 전후하여 공진주기가 바뀌어 이에 따라 탱크내 유체의 운동 특성이 크게 달라짐을 의미한다. 본 실험결과에 의하면 대략 0.12-0.2사이의 특정 공극율에서 탱크내의 공진주기는 변경되었다. 특히 실험에 사용한 5개의 공극율 중에서 0.1275일 때 가장 우수한 슬로싱 억제 성능을 보였다. 이는 최적의 슬로싱 억제 성능을 가진 내부재의 공극율이 0.1275 주변에 있다는 것을 의미한다. 이는 에너지 소멸효과가 가장 높아 반사율이 최소가 되는 최적의 소파장치의 공극율이 0.1임을 밝힌 Cho and Kim(2008)의 결론과 일치한다.

내부재가 수심의 1/2 잠긴 실험에서 공극율과 관계없이 주기 0.47s와 1.07s에서 공진이 일어났다. 이는 내부재 하부를 통하여 유체가 서로 자유롭게 이동하기 때문에 내부재가 없는 순수한 탱크에서 나타나는 탱크내 슬로싱 특성을 보였다.

마지막으로 탱크의 운동진폭이 커질수록 탱크내 유동의 비선형성이 증가하여 그 결과 증폭비는 증가하고 공진주기가 장주기 영역으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 탱크의 운

동진폭(0.1cm, 0.4cm)에 대하여 벽면에서 측정된 수위의 시계열 데이터와 이를 FFT통하여 얻은 진폭 스펙트럼을 비교하였다. 진폭 스펙트럼에서 탱크의 운동진폭이 작은 경우에는 ω 성분만 주로 나타나나 운동진폭이 0.4cm인 경우에는 ω 항 뿐만 아니라 비선형항인 2ω 항 성분도 함께 나타나는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2015년도 제주 씨그랜트 사업의 지원금에 의해 수행되었음을 밝히며, 연구지원에 감사드립니다.

References

- Akyildiz, H., 2012. A Numerical Study of the Effects of the Vertical Baffle on Liquid Sloshing in Two-Dimensional Rectangular Tank. *Journal of Sound and Vibration*, 331, 41-52.
- Bridges, T.J., 1982. Numerical Simulation of Large Amplitude Sloshing. *Proceedings of the Third International Numerical Ship Hydrodynamics*, 269-281.
- Cho, I.H., 2015. Sloshing Analysis in Rectangular Tank with Porous Baffle. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(1), 1-8.
- Cho, I.H., Kim, M.H., 2008. Wave Absorbing System Using Inclined Perforated Plates. *Journal of Fluid Mechanics*, 608, 1-20.
- Cho, J.R., Lee, H.W., Ha, S.Y., 2005. Finite Element Analysis of Resonant Sloshing Response in 2D Baffled Tank. *Journal of Sound Vibration*, 228(4-5), 829-845.
- Crowley, S., Porter, R., 2012. The Effect of Slatted Screens on Waves. *Journal of Engineering Mathematics*, 76, 33-57.
- Evans, D.V., Mciver, P., 1987. Resonant Frequencies in a Container with a Vertical Baffle. *Journal of Fluid Mechanics*, 175, 295-307.
- Faltinsen, O.M., 1978. A Numerical Non-linear Method of Sloshing in Tanks with Two-Dimensional Flow. *Journal of Ship Research*, 22(3), 193-202.
- Faltinsen, O.M., Firoozkoochi, R., Timokha, A.N., 2011. Analytical Modeling of Liquid Sloshing in a Two-Dimensional Rectangular Tank with a Slat Screen. *Journal of Engineering Mathematics*, 70(1-3), 93-109.
- Faltinsen, O.M., Timokha, A.N., 2011. Natural Sloshing Frequencies and Modes in a Rectangular Tank with a Slat-Type Screen. *Journal of Sound and Vibration*, 330(7), 1490-1503.
- Jin, H., Liu, Y., Li, H.J., 2014. Experimental Study on Sloshing in a Tank with an Inner Horizontal Perforated Plate. *Ocean Engineering*, 82, 75-84.
- Kim, K.S., Cho, D.H., Choi, J.Y., 2009. A Study on Application of PIV to Sloshing Phenomenon Inside

- Rectangular Tank. Proceedings of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 85-86.
- Kim, Y., 2001. Numerical Simulation of Sloshing Flows with Impact Load. Applied Ocean Research, 23(1), 53-62.
- Kim, S.Y., Kim, K.H., Kim, Y.H., 2015. Comparative Study on Pressure Sensors for Sloshing Experiment. Ocean Engineering, 94(15), 199-212.
- Mikelis, N.E., Miller, J.K., Taylor, K.V., 1984. Sloshing in Partially Filled Liquid Tanks and its Effect on Ship Motions: Numerical Simulations and Experimental Verification. Lloyd's Register of Shipping, United Kingdom.
- Sawada, T., Kikura, H., Takeda, Y., Tanahashi, T., 1996. UVP Measurement on Magnetic Fluid Sloshing. Proceedings of International Symposium of Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, Villigen Switzerland, 67-70.
- Shin, J.R., Choi, K.S., Kang, S.Y., 2005. An Analytic Solution to Sloshing Natural Periods for a Prismatic Liquid Cargo Tank with Baffles. Journal of Ocean Engineering and Technology, 19(6), 16-21.
- Wu, C.H., Faltinsen, O.M., Chen, B.F., 2013. Time-Independent Finite Difference and Ghost Cell Method to Study Sloshing Liquid in 2D and 3D Tanks with Internal Structures. Communications in Computational Physics, 13(3), 780-800.
- Wu, G.X., Ma, Q.W., Taylor, R.E., 1998. Numerical Simulation of Sloshing Waves in a 3D Tank Based on a Finite Element Method. Applied Ocean Research, 20(6), 337-355.
- Xue, M.A., Zheng, J.H., Lin, P.Z., 2012. Numerical Simulation of Sloshing Phenomena in Cubic Tank with Multiple Baffles. Journal of Applied Mathematics, [Online] Available at: <<http://dx.doi.org/10.1155/2012/245702>> [Accessed 7 July 2015].
- Yang, K.K., Kim, J.E., Kim, S.Y., Kim, Y.H., 2015. Comparative Study on Sloshing Impact Flows between PIV and CFD. Journal of Ocean Engineering and Technology, 29(2), 154-162.