

투과성 내부재가 설치된 사각형 탱크내의 슬로싱 해석

조일형*

*제주대학교 해양시스템공학과

Sloshing Analysis in Rectangular Tank with Porous Baffle

IL-Hyoung Cho*

*Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Ara 1, Jeju 690-756, Korea

KEY WORDS: Porous Baffle 투과성 차단재, Energy Loss 에너지 손실, Drag Coefficient 항력계수, Sloshing 슬로싱, Resonant Frequency 공진주파수, Added Mass 부가질량

ABSTRACT: An analytical model of liquid sloshing is developed to consider the energy-loss effect through a partially submerged porous baffle in a horizontally oscillating rectangular tank. The nonlinear boundary condition at the porous baffle is derived to accurately capture both the added inertia effects and the energy-loss effects from an equivalent non-linear drag law. Using the eigenfunction expansion method, the horizontal hydrodynamic force (added mass, damping coefficient) on both the wall and baffle induced by the fluid motion is assessed for various combinations of porosity, submergence depth, and the tank's motion amplitude. It is found that a negative value for the added mass and a sharp peak in the damping curve occur near the resonant frequencies. In particular, the hydrodynamic force and free surface amplitude can be largely reduced by installing the proper porous baffle in a tank. The optimal porosity of a porous baffle is near $P=0.1$.

1. 서 론

선박이나 항공기 내부에 탑재된 탱크내의 액체화물의 급격한 운동은 선박이나 항공기의 안정성에 미치는 영향으로 오랜 기간 동안 중요한 연구과제로 자리를 잡아왔다. 특히, 탱크내와 같이 제한된 유체영역내에서는 여러 개의 고유주파수들이 존재하는데 이때 탱크의 운동 주파수가 고유주파수와 일치될 때 공진현상으로 탱크내의 유체운동은 급격히 커지며 이는 탱크 벽에 큰 충격력으로 작용한다. 이를 슬로싱(Sloshing) 현상이라 부른다.

탱크내의 슬로싱 현상을 줄이고 탱크내에 존재하는 고유주파수를 변경시키는 목적으로 여러 종류의 불투과성 또는 투과성 내부재(Baffle)를 사용한다. Fediw et al.(1995)는 격자형 투과성 직립 내부재가 탱크내의 감쇠력을 증가시키는데 효과적임을 밝혔다. Warnitchai and Pinkaew(1998)는 불투과성 내부재와 함께 투과성 내부재로 와이어 망(Wire mesh)과 원형 구멍이 균일하게 배열된 판을 탱크내에 설치하여 에너지 감쇠 효과의 차이를 실험을 통하여 비교하였다. 와이어 망으로 이루어진 투과성 내부재가 탱크 내 슬로싱 현상을 줄이는데 가장 효과적임을 밝혔다. 유체가 투과성 내부재를 통과할 때 갑작스런 형상의 변화

로 인해 제트가 형성되고 이로 인한 흐름저항이 발생하여 에너지 손실이 발생한다. 투과성 내부재를 통하여 반사 또는 투과된 파 에너지는 탱크의 벽으로부터 재 반사되어 반복적인 에너지 소멸과정을 거쳐 탱크내의 수면 운동은 줄어들게 된다. 투과성 내부재를 통과하면서 생기는 에너지 손실효과는 투과성 판의 공극율(Porosity)과 설치 위치, 그리고 잠긴 깊이에 밀접한 관련이 있다.

투과성 구조물을 통한 에너지 손실에 대한 대표적인 연구로 Sollitt and Cross(1972)는 일정한 폭을 갖는 투과성 사석 방파제에 의한 반사율과 투과율을 해석하였다. 그들은 층류 유동일 때는 투과성 구조물 전후의 압력차는 속도에 선형적으로 비례하나 난류 유동인 경우, 압력차는 속도의 제곱에 비례한다고 하였다. 특히 투과성 판 전후의 압력차와 투과성 판에서의 속도가 선형관계를 이룰 때 이를 Darcy의 법칙이라 부른다(Wu, et al. 1998; Yu 1995; Chwang and Chan 1998). Darcy의 법칙에서 비례상수는 일반적으로 복소수 값을 가지며 실수부를 차단계수(Blockage coefficient), 허수부를 에너지 손실과 밀접한 관련된 항력계수(Drag coefficient)라 부른다. Cho and Kim(2008)는 직립벽 앞에 놓인 수평형 투과성 판에 의한 반사율을 고유함수전개법(Eigenfunction expansion method)을 사용하여 구하였다.

Received 13 November 2014, revised 27 December 2014, accepted 9 February 2015

Corresponding author IL-Hyoung Cho: +82-064-754-3482, cho0904@jejunu.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Ocean Engineers

투과성 판에서의 경계조건식으로 Darcy의 법칙을 적용하였는데 항력계수와 같은 개념으로 공극율의 함수인 공극율 계수(Porous parameter)를 도입하였다. 적절한 공극율 계수를 가진 투과성 판은 파랑하중 뿐만 아니라 반사율도 현저히 감소시킬 수 있음을 밝혔다. 그들의 연구결과는 KRISO(한국해양과학기술원)의 해양공학수조내의 반사파를 줄이는 소파제(Wave absorber)에 적용되어 실험 결과의 신뢰도를 높이고 수조운용의 효율성을 향상시켰다(Cho and Hong, 2004). Cho(2013)는 수평형 투과성 판이 수면위에 놓여 있을 때 반사율과 투과율 그리고 파랑하중을 구하였다. 적절한 공극율 계수를 가질 때 투과율이 크게 줄어드는 것을 확인하였다.

Faltinsen et al.(2011)은 사각형 탱크 중앙에 투과성 내부재를 설치한 해석모델에 대하여 탱크내의 유체 거동을 해석하였다. 그들은 관성력의 영향을 무시하였고 속도 제곱에 비례하는 항력항을 포함시켜 에너지 손실효과를 고려하였다. Crowley and Porter(2012)는 직립 방파제, 조파장치, 탱크내 슬로싱 등과 같이 투과성 판이 포함된 다양한 유체역학 문제를 다루었다. 그들은 투과성 판을 통과하면서 발생하는 에너지 손실 모델을 등가 선형과 비선형 문제로 나누어 취급하고 둘 사이의 정량적인 값 차이를 비교하였다.

본 연구에서는 투과성 판 전후의 압력차가 투과성 판에서의 유체 속도의 제곱으로 표현되는 항력항에 비례한다고 가정한 비선형 에너지 손실모델을 사각형 탱크내의 중앙에 설치된 투과성 내부재에 적용하였다. 탱크의 운동 진폭, 주파수와 함께 투과성 내부재의 공극율과 잠긴 깊이를 변화시켜가면서 수평방향 동유체력(부가질량, 감쇠계수)과 탱크내 수면 변위를 살펴보았다. 부가질량과 감쇠계수는 탱크내의 공진주파수에서 특이한 거동을 보여주었다. 즉, 탱크내의 공진주파수에서 부가질량은 음의 값을 갖으며 이때 감쇠계수는 피크값을 갖는다. 투과성 내부재의 공극율에 따라 동유체력과 수면 변위는 크게 달라진다. 투과성 내부재가 공극율 0.1 주위의 값을 가질 때 탱크내의 슬로싱 현상을 줄이는데 가장 효과적임을 밝혔다.

2. 문제의 정식화

폭 $2a$, 수심 h 인 사각형 탱크의 중앙에 잠긴 깊이 d 인 투과성 내부재가 놓여 있다고 생각하자(Fig. 1 참조). 탱크내의 유체는

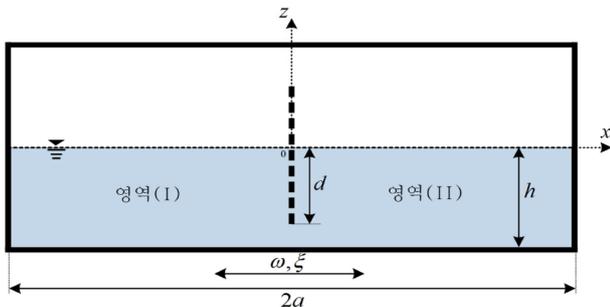


Fig. 1 Definition sketch of a rectangular tank with a porous baffle placed at center

비점성, 비압축성이며 비회전성 유동을 가정한다. 이러한 가정 아래에서 속도포텐셜을 도입하고 이를 가지고 경계치 문제를 구성하면 아래와 같다.

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (1)$$

$$g \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \Phi_{tt} = 0, \quad \text{on } z=0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad \text{on } z=-h \quad (3)$$

$$\Phi_x = \xi \omega \cos \omega t, \quad \text{on } x=\pm a \quad (4)$$

여기서 ω 는 탱크의 운동 주파수이며, ξ 는 탱크의 수평방향 운동진폭이다.

투과성 내부재가 $x=0$ 에 놓여 있다고 할 때 투과성 내부재에서의 정합조건식(Bennett, et al., 1992; Mei, et al., 1974)은 다음과 같다.

$$[\Phi_x]_{x=0^-}^{x=0^+} = 0 \quad \text{on } -h \leq z \leq 0 \quad (5)$$

$$\left[\frac{\partial \Phi(x, z, t)}{\partial t} \right]_{x=0^-}^{x=0^+} = \begin{cases} \frac{\alpha}{2} U(z, t) |U(z, t)| + 2C \frac{\partial U(z, t)}{\partial t} & -d \leq z \leq 0 \\ 0 & -h \leq z \leq -d \end{cases} \quad (6)$$

여기서 $U(z, t)$ 는 투과성 내부재에서의 수평방향 유체속도이다. α 와 C 은 각각 투과성 내부재를 통과하면서 발생하는 에너지 손실효과를 나타내는 항력계수(Drag coefficient)와 투과성 내부재 주변에 부가된 관성력 효과를 나타내는 차단계수(Blockage coefficient)이다. Mei(1989)는 예연 오리피스(Sharp-edged orifice)의 단면수축계수(Discharge coefficient) C_c 를 가지고 아래 식과 같이 항력계수 α 에 대한 식을 제시하였다.

$$\alpha = \left(\frac{1}{PC_c} - 1 \right)^2 \quad (7)$$

여기서 P 은 투과성 내부재의 공극율이다. 단면수축계수 C_c 에 대하여 Mei(1989)는 예연 오리피스를 가정하여 다음의 경험식을 사용하였다.

$$C_c = 0.6 + 0.4 P^3 \quad (8)$$

속도포텐셜과 투과성 내부재에서의 유체속도를 시간과 공간 함수로 분리하면

$$\Phi(x, z, t) = \text{Re} \{ \omega \xi \phi(x, z) e^{-i\omega t} \} \quad (9)$$

$$U(z, t) = \text{Re} \{ u(z) e^{-i\omega t} \}$$

이다. 이때 $U(z,t)$ 는 유체와 탱크의 상대속도로 $\phi_x(0,z,t) - \omega\xi \cos \omega t$ 이다. 고유함수전개법을 적용하기 위하여 투과성 내부재가 놓인 $x=0$ 을 기준으로 유체영역을 영역(I)과 영역(II)로 나눈다. 식 (1),(2),(3)을 만족하는 각 영역의 속도포텐셜을 쓰면 다음과 같다.

$$\phi^{(1)}(x,z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{k_n} [A_n^{(1)} e^{k_n x} - B_n^{(1)} e^{-k_n(x+a)}] f_n(z) \quad (10)$$

$$\phi^{(2)}(x,z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{k_n} [A_n^{(2)} e^{k_n x} - B_n^{(2)} e^{-k_n(x-a)}] f_n(z)$$

여기서 $k_0 (= -ik)$ 는 진행파(Propagating wave) 성분의 고유값이며, $k_n, (n=1,2,\dots)$ 는 비진행파(Non-propagating wave) 성분의 고유값들을 나타낸다. 고유값 k_n 은 분산식($\omega^2/g = -k_n \tan k_n h$)을 만족한다.

고유함수 $f_n(z)$ 는 다음과 같다.

$$f_n(z) = N_n^{-1} \cos k_n(z+h) \quad (11)$$

여기서 $(N_n)^2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sin 2k_n h}{2k_n h} \right)$ 이다.

고유함수는 직교성($\frac{1}{h} \int_{-h}^0 f_m(z) f_n(z) dz = \delta_{mn}$)을 만족한다. 여기서 δ_{mn} 은 $m=n$ 일 때 1이고, $m \neq n$ 일 때 0의 값을 갖는 Kronecker-Delta 함수이다.

탱크가 수평방향으로 주파수 ω , 진폭 ξ 을 가지고 조화운동을 한다. 따라서 탱크 벽에서의 경계조건식($\phi_x(\pm a, z) = 1$)으로부터 아래와 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$B_n^{(1)} = \gamma_n - A_n^{(1)} e^{-k_n a} \quad (12)$$

$$B_n^{(2)} = \gamma_n - A_n^{(2)} e^{k_n a}$$

여기서 $\gamma_n, (n=0,1,2,\dots)$ 는 다음과 같다.

$$\gamma_n = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 f_n(z) dz = N_n^{-1} \frac{\sin k_n h}{k_n h} \quad (13)$$

식 (10)에 나타난 미지수인 $A_n^{(1)}, A_n^{(2)}, B_n^{(1)}, B_n^{(2)}$ 을 구하기 위하여 두 영역이 만나는 정합면에서 정합조건식을 적용하여야 한다. 먼저 $x=0$ 에서 두 영역의 수평방향 속도가 서로 같다는 연속방정식(식 5)을 적용하면 아래와 같다. 이때 투과성 내부재에서의 유체속도 $u(z)$ 를 z 방향의 고유함수식으로 전개한다.

$$\phi_x^{(1)}(0,z) = \phi_x^{(2)}(0,z) = u(z) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n f_n(z) \quad (14)$$

두 번째 정합조건식인 식 (6)안에 속도 제곱에 비례하는 비선

형 항으로 인해 입력 주파수 ω 에 대해 여러 개의 주파수 성분 ($\omega, 2\omega, 3\omega, \dots$)들이 생성된다. 따라서 속도포텐셜을 주파수 ω 의 배수로 나타내는 Fourier 급수식으로 표현하고 첫 번째항인 ω 성분만을 취하고 나머지는 작다고 가정하여 무시한다. 이때 첫 번째항의 Fourier계수는 $8/3\pi$ 이다. 이러한 등가선형화(Equivalent linearization) 과정을 통하여 식 (6)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$[\phi(x,z)]_{x=0^+} = \begin{cases} \left(\frac{i\beta}{\omega} + 2C \right) [\phi_x(0,z) - 1] & -d \leq z \leq 0 \\ 0 & -h \leq z \leq -d \end{cases} \quad (15)$$

여기서 $\beta = \frac{4\alpha\xi\omega}{3\pi} |\phi_x(0,z) - 1|$ 이다.

식 (10)을 식 (14)에 대입하고 식 (12)을 이용하면 $A_n^{(1)}, A_n^{(2)}, B_n^{(1)}, B_n^{(2)}$ 을 하나의 미지수 u_n 로 나타낼 수 있다.

$$A_n^{(1)} = \frac{u_n - \gamma_n e^{-k_n a}}{1 - e^{-2k_n a}}, \quad A_n^{(2)} = \frac{u_n - \gamma_n e^{k_n a}}{1 - e^{-2k_n a}} \quad (16)$$

$$B_n^{(1)} = \frac{\gamma_n - u_n e^{-k_n a}}{1 - e^{-2k_n a}}, \quad B_n^{(2)} = \frac{\gamma_n - u_n e^{k_n a}}{1 - e^{-2k_n a}}$$

식 (16)을 식 (10)에 대입하면 각 영역의 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\phi^{(1)} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f_n(z)}{k_n \sinh k_n a} [u_n \cosh k_n(x+a) - \gamma_n \cosh k_n x] \quad (17)$$

$$\phi^{(2)} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-f_n(z)}{k_n \sinh k_n a} [u_n \cosh k_n(x-a) - \gamma_n \cosh k_n x]$$

식 (17)을 두 번째 정합조건식 식 (15)에 대입하면 다음과 같다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{u_n}{k_n \tanh k_n a} - \frac{\gamma_n}{k_n \sinh k_n a} \right\} f_n(z) \quad (18)$$

$$= \begin{cases} - \left(\frac{i\beta}{2\omega} + C \right) \sum_{n=0}^{\infty} (u_n - \gamma_n) f_n(z), & -d \leq z \leq 0 \\ 0, & -h \leq z \leq -d \end{cases}$$

여기서 $\beta = \frac{4\alpha\xi\omega}{3\pi} \left| \sum_{l=0}^{\infty} \frac{u_n - \gamma_n}{d} \int_{-d}^0 f_n(z) dz \right|$.

식 (18)의 양변에 $f_m(z), m=0,1,2,\dots$ 를 곱하고 $-h$ 부터 0까지 z 에 대하여 적분하면 u_n 에 대한 대수방정식을 유도할 수 있다. 이때 고유함수의 개수를 유한개(N)로 잡는다.

$$\frac{u_m}{k_m \tanh k_m a} + \left(\frac{i\beta}{2\omega} + C \right) \sum_{n=0}^N G_{mn} u_n \quad (19)$$

$$= \frac{\gamma_m}{k_m \sinh k_m a} + \left(\frac{i\beta}{2\omega} + C \right) \sum_{n=0}^N G_{mn} \gamma_n$$

여기서 $G_{mn} = \frac{1}{h} \int_{-d}^0 f_n(z) f_m(z) dz$.

투과성 내부재가 없을 때($\beta=0, C=0$), 식 (19)로부터 $u_n = \gamma_n / \cosh k_n a$ 이다. 그 결과 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\phi^{(1)}(x, z) = \phi^{(2)}(x, z) = \sum_{n=0}^N \frac{\gamma_n \sinh k_n x}{k_n \cosh k_n a} f_n(z) \quad (20)$$

식 (20)은 투과성 내부재가 없는 순수한 탱크의 슬로싱 해석 결과이다.

투과성 내부재가 탱크의 바닥까지 놓여 있다면($h=d$), 식 (19)에서 $G_{mn} = \delta_{mn}$ 이다. 따라서 u_n 은 아래와 같이 간단히 구할 수 있다.

$$u_n = \gamma_n \frac{\left[\frac{1}{k_n \sinh k_n a} + \left(\frac{i\beta}{2\omega} + C \right) \right]}{\left[\frac{1}{k_n \tanh k_n a} + \left(\frac{i\beta}{2\omega} + C \right) \right]} \quad (21)$$

식 (19)에 주어진 대수방정식을 풀어 미지수 u_n 을 얻기 위해서는 먼저 손실계수 β 를 알아야 한다. 그러나 손실계수 β 는 해(u_n)을 알아야 정의된다. 따라서 이러한 형태의 대수방정식을 안정적으로 풀기 위하여 손실계수를 0부터 β 까지 점진적으로 증가시켜가면서 수치계산을 수행한다. β 가 일정한 값을 갖는 각 단계마다 축차법(Iteration method)을 사용하여 해(u_n)를 구하는데 오차범위 $|(u_n)^{l+1} - (u_n)^l| \leq 10^{-6}$ 을 만족하도록 한다. 여기서 l 는 축차수이다. 이렇게 구한 u_n 가지고 β 를 구하고 이 값은 다음 단계의 대수방정식을 푸는데 초기 값으로 활용된다.

탱크의 수평운동에 의한 x 방향의 동유체력($F_x = \text{Re}\{f_x e^{-i\omega t}\}$)은 탱크 벽과 내부재에서의 압력을 적분하여 구할 수 있다.

$$f_x = 2\rho\omega^2\xi \left[\int_{-d}^0 \phi^{(1)}(0, z) dz - \int_{-h}^0 \phi^{(1)}(-a, z) dz \right] \quad (22)$$

동유체력 f_x 를 실수부와 허수부로 나누면 다음과 같다.

$$f_x = (\omega^2\mu + i\omega\nu)\xi \quad (23)$$

여기서 μ 는 부가질량이며, ν 는 감쇠계수이다.

탱크내의 수면변위($\zeta(x, t) = \text{Re}\{\eta(x)e^{-i\omega t}\}$)는 속도포텐셜을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\eta(x) = \frac{\omega^2\xi}{g} \phi(x, 0) \quad (24)$$

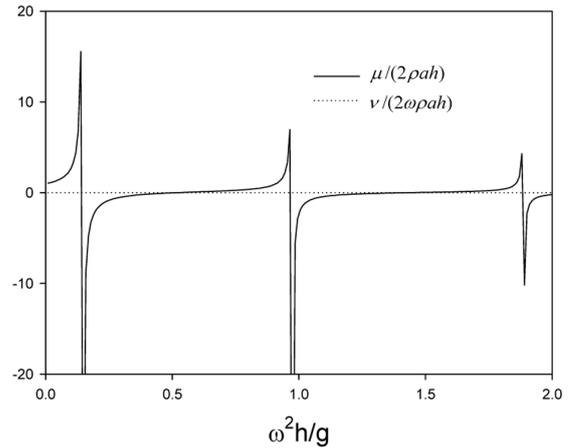
3. 계산결과 및 고찰

고유함수전개법을 사용하여 얻은 해석해의 수렴도를 살펴보

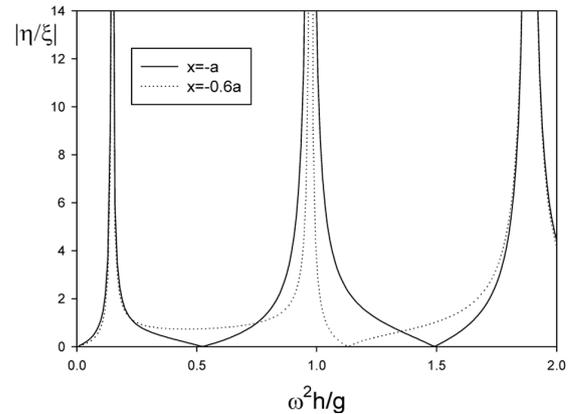
Table 1 Convergence test of $(\bar{\mu}, \bar{\nu})$ with the number of eigenfunctions (N) for $a/h=4.0$, $d/h=1.0$, $P=0.25$, $\xi/h=0.025$

N	$\omega^2 h/g = 0.5$		$\omega^2 h/g = 1.0$	
	$\bar{\mu}$	$\bar{\nu}$	$\bar{\mu}$	$\bar{\nu}$
5	-0.01221	0.32894	-0.44647	0.39344
10	-0.01221	0.32893	-0.44647	0.39345
20	-0.01221	0.32892	-0.44647	0.39345
30	-0.01221	0.32892	-0.44647	0.39345

기 위하여 고유함수의 개수(N)에 따른 무차원화 된 부가질량($\bar{\mu} = \mu/2\rho ah$)과 감쇠계수($\bar{\nu} = \nu/2\omega\rho ah$)의 수렴도를 $\omega^2 h/g = 0.5, 1.0$ 에 대하여 살펴보았다. 본 연구에서는 Table 1을 참조하여 소수점 이하 5자리까지 정확도가 보장되도록 고유함수의 개수를 30개로 잡았다. 본 연구에서는 탱크 내 투과성 차단재의 에너지 손실효과에 주된 관심이 있기 때문에 차단재 주변의 관성력 효과는 고려하지 않았다. 따라서 모든 계산에서 $C=0$ 로 하였다.



(a) hydrodynamic forces



(b) amplification factor($|\eta/\xi|$)

Fig. 2 Hydrodynamic forces(a) and magnitude of free surface(b) by sway motion of a rectangular tank without a porous baffle for $a/h=4$

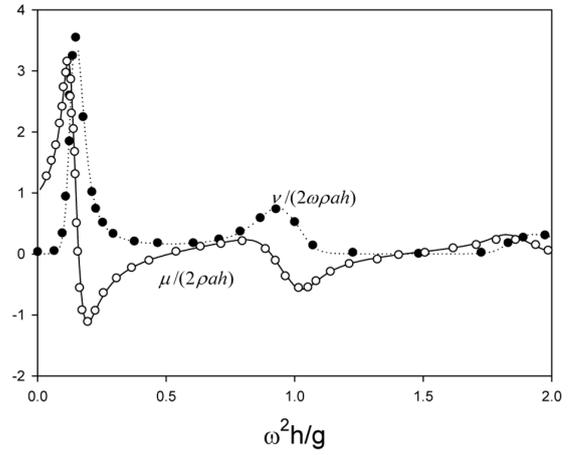
Fig. 2a는 차단재가 없는 순수한 탱크($a/h=4$)가 수평 운동을 할 때 탱크 벽에 작용하는 동유체력인 부가질량과 감쇠계수를 무차원화 된 주파수 $\omega^2 h/g$ 에 따라 그렸다. 탱크 벽에서의 점성에 의한 마찰력을 무시하였고 차단재를 통한 에너지 손실도 없기 때문에 점선으로 표시된 감쇠계수는 0으로 나타났다. 한편 부가질량 곡선은 3개의 특정 주파수에서 양에서 음으로 값이 갑자기 변하는 현상이 일어났다. 이 특정 주파수가 사각형 탱크내의 고유주파수와 같은지 여부를 알기 위하여 x 축 방향으로 형성된 정지파(Standing wave)의 형태로 나타나는 슬로싱 모드(Sloshing mode)의 고유주파수를 살펴보았다. Ibrahim(2005)는 탱크내의 수심의 영향을 고려하여 슬로싱 모드의 고유주파수를 구하는 식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{n\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{n\pi h}{2a}\right)}, n=1,2,3,\dots \quad (25)$$

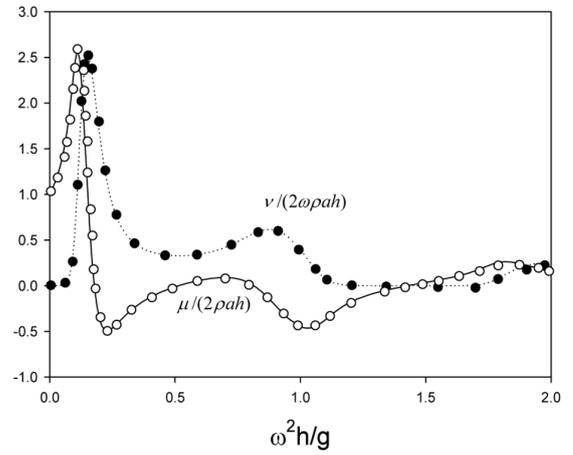
식 (25)을 이용하여 무차원화된 공진주파수 $\omega_n^2 h/g$ 을 구하면 Fig. 2a에 나타난 3개의 특정 주파수는 1차, 3차, 5차 공진모드에 해당하는 고유주파수($\omega_n^2 h/g=0.1467, 0.9741, 1.8876$)와 일치한다. Fig. 2b는 탱크 내 2지점($x=-a, -0.6a$)에서의 탱크의 운동진폭으로 나눈 수면 변위의 절대값을 보여주고 있다. 탱크내의 공진주파수에서 수면 변위가 크게 일어나는 것을 볼 수 있다. 앞에서 설명하였듯이 특히 이 경우 감쇠력이 존재하지 않기 때문에 공진주파수에서 수면 변위는 무한대 값을 갖는다.

Fig. 3은 $a/h=4$ 인 사각형 탱크 내의 중앙에 공극을 0.25인 투과성 내부재를 탱크 바닥까지 설치하였을 때 무차원화 된 부가질량과 감쇠계수를 살펴보았다. 공진주파수에서 부가질량은 음의 값을 갖으며 감쇠계수는 피크값을 갖는다. 이러한 현상은 탱크의 운동진폭(ξ/h)이 작을수록 저차 공진모드에서 더욱 뚜렷이 나타난다. 또한 투과성 차단재를 통하여 소멸되는 에너지 손실 효과로 인해 차단재가 없는 Fig. 2a와 비교하면 부가질량의 크기도 줄어들고 곡선도 완만히 변하는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서는 에너지 손실효과를 고려하기 위하여 비선형 항력모델을 사용하였기 때문에 순수한 선형이론에서는 볼 수 없는 탱크의 운동진폭이 부가질량과 감쇠계수의 정량적인 값에 영향을 준다. 예상대로 탱크의 운동진폭이 클수록 투과성 차단재를 통하여 소멸되는 에너지 감쇠효과가 크므로 탱크의 벽과 투과성 차단재에 작용하는 동유체력이 줄어드는 경향을 보여주고 있다. Fig. 3의 계산결과는 동그라미 기호로 나타난 Crowley and Porter(2012)의 해석결과와 정확히 일치한다.

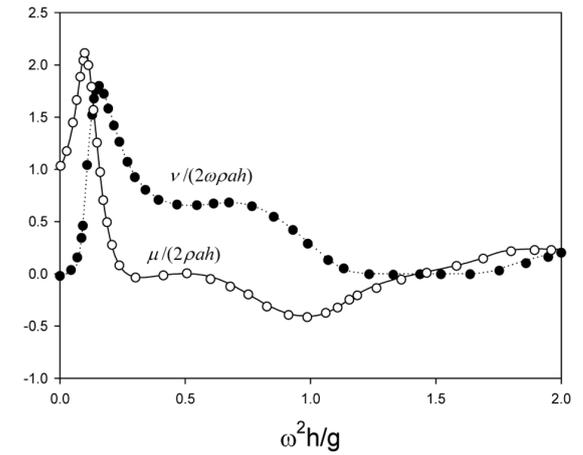
탱크의 운동진폭이 증가할수록 동유체력과 같이 탱크내의 수면 변위도 줄어드는 것을 살펴보기 위하여 Fig. 4를 그렸다. Fig. 4는 Fig. 3과 같은 계산조건에 대하여 $x=-a$ 에서의 수면 변위를 보여주고 있다. 탱크 내에 존재하는 여러 개의 공진주파수들에서 수면 변위가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히 1차 공진모드에서의 감쇠계수가 다른 모드에 비하여 크므로 1차 모드의 수면 변위는 상대적으로 작은 값을 보이고 있다. 또한 공진주파수에서의 수면 변위는 탱크내의 운동진폭이 증가할수록 탱크내의 감쇠력 증가로 줄어드는 경향을 보여주고 있다.



(a) $\xi/h = 0.0125$



(b) $\xi/h = 0.025$



(c) $\xi/h = 0.05$

Fig. 3 Non-dimensional added mass($\bar{\mu}$) and damping coefficients($\bar{\nu}$) as function of sway motion amplitude(ξ/h) of a rectangular tank with a centrally placed porous baffle for $a/h=4, d/h=1, P=0.25$: lines: present solutions, symbols: Crowley and Porter(2012)

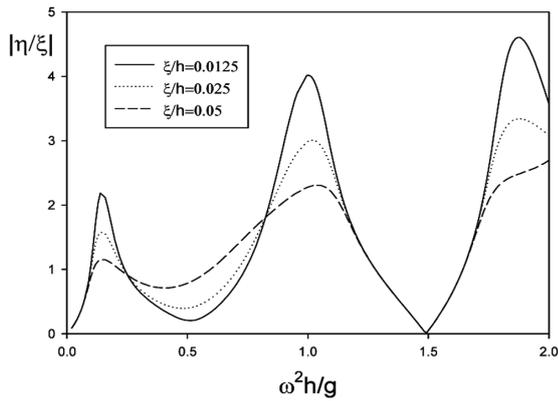
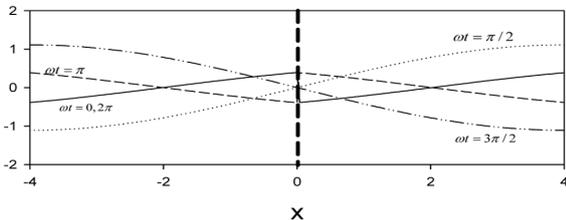
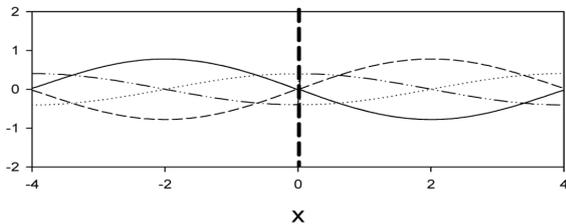


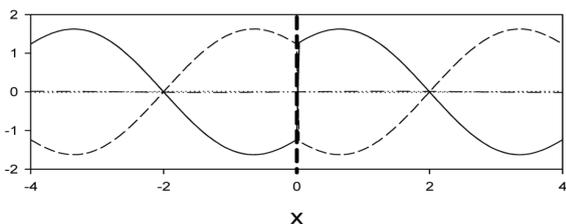
Fig. 4 Magnitude of free surface ($|\eta/\xi|$) at $x=-a$ as function of sway motion amplitude (ξ/h) of a rectangular tank with a centrally placed porous baffle for $a/h = 4$, $d/h = 1$, $P = 0.25$



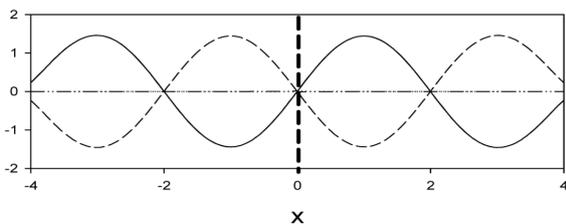
(a) 1st resonant mode ($\omega_1^2 h/g = 0.1467$)



(b) 2nd resonant mode ($\omega_2^2 h/g = 0.5151$)



(c) 3rd resonant mode ($\omega_3^2 h/g = 0.9741$)



(d) 4th resonant mode ($\omega_4^2 h/g = 1.4407$)

Fig. 5 Snapshot of wave profiles $\zeta(x,t)/\xi$ at four resonant frequencies for $a/h = 4$, $d/h = 1$, $P = 0.25$, $\xi/h = 0.025$

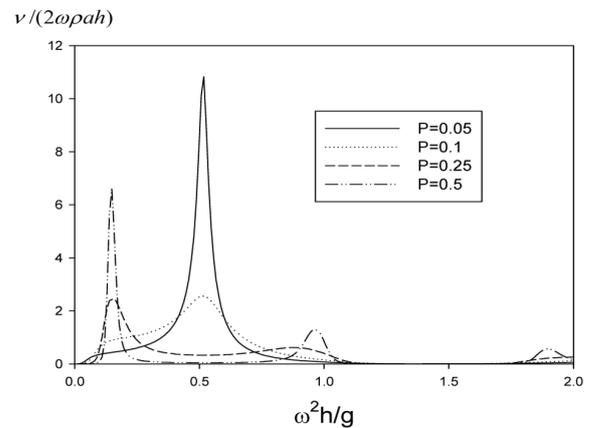
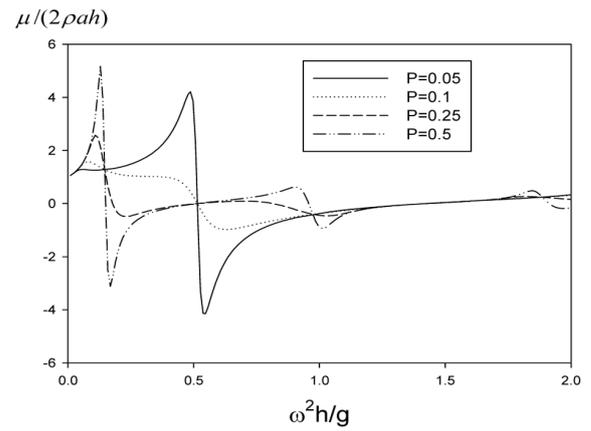


Fig. 6 Non-dimensional added mass ($\bar{\mu}$) and damping coefficients ($\bar{\nu}$) by sway motion of a rectangular tank with a centrally placed porous baffle as function of porosity P for $a/h = 4$, $d/h = 1$, $\xi/h = 0.025$

Fig. 5는 투과성 내부재가 탱크 중앙에 놓여 있을 때 4개의 공진주파수에서 탱크 내 수면 변화를 스냅샷(Snapshot)으로 나타내었다. 순간 포착 시간은 한 주기를 4등분한 $\omega t = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$ 이다. 여기서 보여주고 있는 수면 변화가 각 공진모드에서의 고유함수와 같다. 투과성 차단재를 전후로 수위차(압력차)가 형성됨을 볼 수 있다.

Fig. 6은 투과성 내부재의 공극율 변화($P=0.05, 0.1, 0.25, 0.5$)에 따른 무차원화된 부가질량과 감쇠계수를 보여주고 있다. 여기서 $a/h = 4$, $d/h = 1$, $\xi/h = 0.025$ 이다. 불투과성 차단재의 특성을 갖는 공극율이 작은 $P=0.05, 0.1$ 에서는 사각형 탱크의 2차 공진 모드인 $\omega_n^2 h/g = 0.5151$ 에서 부가질량이 음의 값을 갖고 감쇠계수가 피크값을 갖는 공진현상을 뚜렷이 보인 반면에 공극율이 상대적으로 큰 $P=0.25, 0.5$ 에서는 2차 공진모드는 사라지고 1,3,5차 공진모드에서 공진현상이 발생하였다. 이러한 결과는 공극율이 작은($P=0.05, 0.1$) 차단재는 불투과성 차단재의 특성을 갖기 때문에 마치 길이가 반으로 준 2개의 분리된 탱크에서 발생하는 공진현상과 유사하기 때문으로 이해할 수 있다.

Fig. 7은 투과성 내부재의 공극율 변화($P=0.05, 0.1, 0.25, 0.5$)에 따른 탱크 벽($x=-a$)에서의 수면 변위를 살펴보았다. 탱크의

운동 주파수에 따라 다소 차이는 있지만 전반적으로 공극율이 0.1일 때 탱크 벽면에서의 수면 변위가 가장 작게 나타남을 보

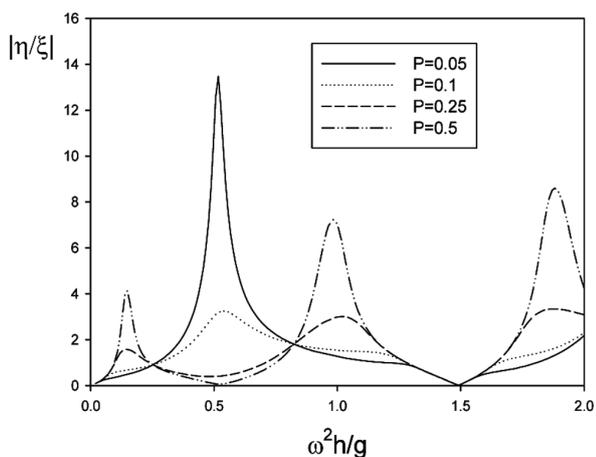
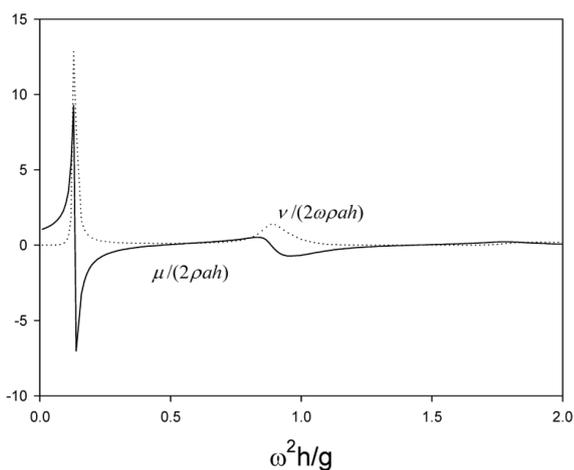
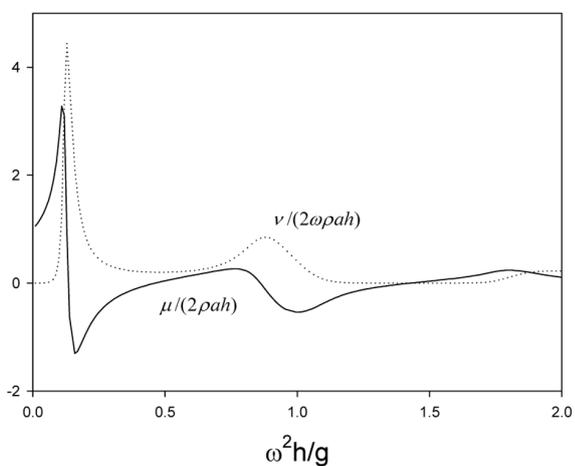


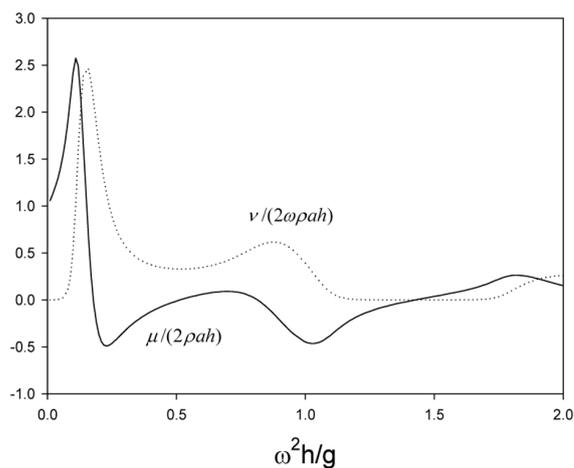
Fig. 7 Magnitude of free surface($|\eta/\xi|$) at position $x=-a$ in a rectangular tank with a centrally placed porous baffle as function of porosity P for $a/h=4, d/h=1, \xi/h=0.025$



(a) $d/h=0.5$



(b) $d/h=0.75$



(c) $d/h=1.0$

Fig. 8 Non-dimensional added mass($\bar{\mu}$) and damping coefficients ($\bar{\nu}$) by sway motion of a rectangular tank with a centrally placed porous baffle as function of submergence depth d/h for $a/h=4, P=0.25, \xi/h=0.025$

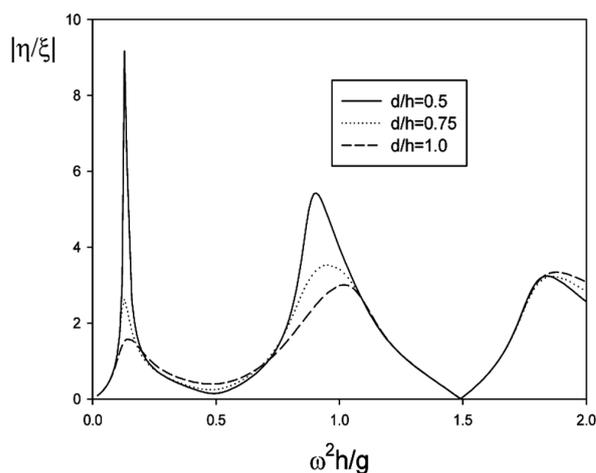


Fig. 9 Magnitude of free surface($|\eta/\xi|$) at position $x=-a$ in a rectangular tank with a centrally placed porous baffle as function of submergence depth d/h for $a/h=4, P=0.25, \xi/h=0.025$

여주고 있다. 즉, 공극율 $P=0.1$ 인 투과성 차단재를 설치하는 것이 탱크내의 슬로싱을 줄이기에 최적임을 의미한다.

끝으로 투과성 내부재의 잠긴 깊이 변화($d/h=0.5, 0.75, 1.0$)에 따른 탱크에 작용하는 수평방향 동유체력과 탱크내의 수면변위를 Fig. 8과 Fig. 9에 그렸다. 잠긴 깊이를 제외한 나머지 계산조건은 $a/h=4, P=0.25, \xi/h=0.025$ 이다. 잠긴 깊이가 가장 얇은 $d/h=0.5$ 일 때 투과성 차단재에 의한 에너지 손실 효과가 가장 낮기 때문에 동유체력과 수면 변위가 가장 크게 나타난 반면에 투과성 내부재의 잠긴 깊이를 증가시키에 따라 동유체력과 수면변위는 투과성 차단재의 늘어난 깊이에 비례하여 줄어드는 경향을 보여주고 있다.

4. 결 론

사각형 탱크 중앙에 투과성 차단재가 수직으로 놓여 있을 때 탱크의 운동 특성과 함께 차단재의 공극율과 잠긴 깊이를 바꿔 가면서 탱크 벽과 차단재에 작용하는 동유체력(부가질량, 감쇠 계수)과 탱크 내 수면 변위를 살펴보았다. 탱크 내에 차단재가 없는 경우 탱크 내에 감쇠 기구가 없기 때문에 감쇠계수는 0이며 부가질량은 탱크 내의 슬로싱 모드 공진주파수에서 부가질량은 양에서 음의 값으로 갑자기 변하는 현상이 일어났다.

탱크 내에 투과성 차단재를 설치한 경우 차단재를 통하여 에너지 손실이 발생하므로 동유체력과 수면 변위는 줄어든다. 앞서 설명한 공진주파수에서 음의 부가질량이 나타나는 현상과 함께 공진주파수에서 감쇠계수는 피크값을 갖는다. 이러한 현상은 운동하는 물체 주변에 공진을 유발하는 제한 유체영역을 가진 문제에서 주로 발생하며, 대표적인 예로는 Moon-pool을 가진 해양구조물, 쌍동선, 안벽에 계류된 선박 등이다.

탱크 내에 설치한 투과성 차단재의 영향을 고려하기 위하여 본 연구에서는 비선형 에너지 손실모델을 사용하였다. 따라서 선형 이론에서는 나타나지 않는 탱크의 운동진폭이 클수록 투과성 차단재를 통하여 소멸되는 에너지 손실량이 크게 나타났다. 그 결과 동유체력과 탱크내의 수면 변위가 낮아졌다.

공극율이 작은 차단재를 사용할 경우에는 사각형 탱크가 마치 차단재로 분리되어 길이가 반으로 준 2개의 탱크내의 유체 운동 특성이 일어나므로 공극율이 큰 투과성 차단재를 설치하였을 때 보이지 않았던 2차 공진 모드에서 동유체력과 수면 변위가 크게 일어났다. 전반적으로 $P=0.1$ 인 투과성 차단재를 설치하였을 때 동유체력과 탱크 내 수면 변위가 가장 크게 줄어드는 것을 확인하였다. 이는 투과성 차단재의 공극율이 $P=0.1$ 일 때 탱크내의 에너지를 줄이는데 최적임을 의미한다.

감사의 글

이 논문은 “2014학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음” 밝히며 연구비의 지원에 감사를 표합니다.

References

- Cho, I.H., 2013. Reflection and Transmission Coefficients by a Surface-Mounted Horizontal Porous Plate. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineering*, 25(5), 327-334.
- Cho, I.H., Hong, S.W., 2004. Development of a Wave Absorbing System Using an Inclined Punching Plate. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 18(1), 1-6.
- Bennett, G.S., McIver, P., Smallman, J.V., 1992. A Mathematical Model of a Slotted Wavescreen Breakwater. *Coastal Engineering*, 18, 231-249.
- Cho, I.H., Kim, M.H., 2008. Wave Absorbing System Using Inclined Perforated Plates. *Journal of Fluid Mechanics*, 608, 1-20.
- Chwang, A.T., Chan, A.T., 1998. Interaction between Porous Media and Wave Motion. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 30, 53-84.
- Crowley, S., Porter, R., 2012. The Effect of Slatted Screens on Waves. *Journal of Engineering Mathematics*, 76, 53-76.
- Faltinsen, O.M., Firoozkoobi, 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, 93-109.
- Fediw, A., Isyumov, N., Vickery, B., 1995. Performance of a Tuned Sloshing Water Damper. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 57, 237-247.
- Ibrahim, R.A., 2005. *Liquid Sloshing Dynamics, (Theory and Applications)*. Cambridge University Press.
- Mei, C.C., 1989. *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*. Advanced Series on Ocean Engineering. 1, World Scientific, Singapore.
- Mei, C.C., Liu, P.L. F., Ippen, A.T., 1974. Quadratic Head Loss and Scattering of Long Waves. *Journal of Waterway, Harbour and Coastal Engineering Division*, 99, 209-229.
- Sollitt, C.K., Cross, R.H., 1972. Wave Transmission through Permeable Breakwaters. *Proceedings of the 13th Conference on Coastal Engineering*. ASCE, Vancouver, Canada, 1827-1846.
- Wamitchai, P., Pinkaew, T., 1998. Modelling of Liquid Sloshing in Rectangular Tanks with Flow-Dampening Devices. *Engineering Structure*, 20, 593-600.
- Wu, J., Wan, Z., Fang, Y., 1998. Wave Reflection by a Vertical Wall with an Horizontal Submerged Porous Plate. *Ocean Engineering*, 25(9), 767-779.
- Yu, X., 1995. Diffraction of Water Waves by Porous Breakwaters. *Journal of Waterway Port, Coastal, Ocean Engineering*, 121, 275-282.