

연직 슬릿 유공벽의 벽두께가 파랑 반사 및 전달에 미치는 영향 Effect of Wall Thickness of Perforated Wall with Vertical Slits on Wave Reflection and Transmission

권갑근* · 이종인** · 윤성범***

Kab Keun Kwon*, Jong In Lee** and Sung Bum Yoon***

요 지 : 유공벽에 의한 파의 반사율과 투과율은 주로 유공벽의 공극률과 벽두께 그리고 입사파의 주기 및 비선형성에 의해 결정된다. 이중에서 벽두께는 유공벽의 수두손실계수와 관성저항길이에 영향을 미치므로 매우 중요하다. 그러나 기존의 연구에서는 예연 오리피스 수두손실계수를 사용함으로써 수두손실계수에 미치는 벽두께 효과를 무시 또는 부정확하게 고려하였거나, 벽두께가 수두손실계수에 미치는 영향은 고려하였더라도 관성저항 길이를 무시함으로써 벽두께가 유공벽의 반사율과 투과율에 미치는 영향이 적절히 고려되지 못 하였다. 따라서 본 연구에서는 다양한 두께의 유공벽을 제작하여 파의 반사율 및 투과율 측정 수리실험을 수행하였으며, 그 결과를 기존의 해석해에 의한 값과 비교하였다. 비교결과 기존의 해석해 등이 벽두께의 효과를 적절히 반영하지 못하고 있음을 확인하였으며, 벽두께 효과를 정도 높게 고려할 수 있는 새로운 수두손실계수 산정식이 필요함을 확인하였다.

핵심용어 : 유공벽, 벽두께, 투과율, 반사율, 수두손실계수, 수리실험

Abstract : The reflection and transmission coefficients of waves due to perforated wall are mainly determined by both the porosity and wall thickness of the perforated wall and the period and nonlinearity of incident waves. Among them the wall thickness is very important because it affects the head loss coefficient and the inertia length of the wall. However, by employing the head loss coefficient derived for sharp crested orifice, the previous researches have neglected, or incorrectly considered the effect of wall thickness on the head loss coefficient. Even though it is considered, the effect of the inertia length is neglected in some empirical formulae. Thus, the effect of wall thickness on the reflection and transmission coefficients of waves is not properly considered. In this study comprehensive experiments are conducted for the perforated walls with various thicknesses, and the results are compared with those predicted by the empirical formulae. As a result it is found that the existing formulae can not properly consider the effect of wall thickness, and it is confirmed that a new formula which can correctly consider the effect of wall thickness on the head loss coefficient is necessary.

Keywords : perforated wall, wall thickness, reflection coefficient, transmission coefficient, head loss coefficient, hydraulic experiment

1. 서 론

유공벽 혹은 슬릿형 소파제는 입사하는 파의 에너지를 유공벽을 통해 소모시켜서 반사파를 저감시키는 항만구조물이다. 외해로 부터 진행된 파가 유공벽에 입사하면 갑작스런 형상의 변화로 인해 제트가 형성되고 이로 인한 흐름저항이 발생하여 파의 에너지는 소모된다. 에너지가 소모된 파의 일부는 항내로 들어오며 일부는 외해로 다시 반사된다. 따라서 유공벽의 공극률이나 슬릿의 두께와 폭등 이른바 유공벽의 형상에 따라 파의 에너지 소모는 변화하며 유공벽의 형상에 따

른 입사파의 에너지 소모를 규명하기 위한 다양한 수리실험 수행 및 해석모형의 개발이 이루어져 왔다.

기존의 연구들은 유공벽의 해석해에 Mei(Mei et al., 1974; Mei, 1989)의 예연오리피스의 수두손실계수를 적용(Kribel, 1992; Kim, 1998; Cho and Kim, 2003)하거나, 일정한 상수를 수두손실계수에 적용(Kakuno and Liu, 1993; Isaacson et al., 1998)하여 유공벽의 벽두께 변화가 파의 에너지 손실에 미치는 영향을 고려하는 데 어려움이 있었다. 실제적으로 유공벽의 벽두께는 유한한 값을 가지므로 벽두께 효과가 배제된 수두손실계수는 정밀도가 낮을 수 밖에 없다. 따라서 벽

*한양대학교 산학협력단 연구원 (Industry-University Cooperation Foundation, ERICA Campus, Hanyang University)

**전남대학교 해양토목공학과 (Department of Marine and Civil Engineering, Chonnam National University)

***한양대학교 건설환경플랜트공학과 (Corresponding author: Dept. of Civil, Env. and Plant Engrg, ERICA Campus, Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan, Gyeonggi-do, 426-791, Korea, Tel: +82-31-400-5144, Fax: +82-31-436-8147, sbyoon@hanyang.ac.kr)

두께 효과가 고려된 수두손실계수의 개발이 필요하며 최근 들어 유공벽의 벽두께 효과가 고려된 수두손실계수의 연구가 진행되고 있는 추세이다(Lie et al., 2006; Yoon et al., 2006; Huang, 2007; Suh et al., 2011).

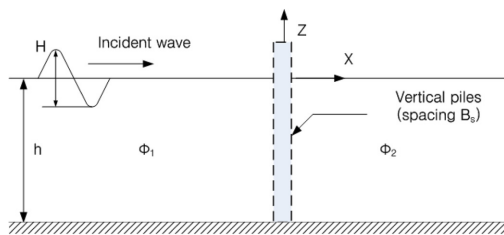
본 연구에서는 유공벽의 벽두께 효과가 고려된 수두손실계수를 규명하기 위해 연직 슬릿 유공벽의 수리실험을 통한 연구를 수행하였다. 공극률 및 벽두께가 다양한 직립 유공벽을 제작하여 규칙과 조건의 수리실험을 수행하고 유공벽에 의한 파의 반사율 및 투과율을 측정하였다. 실험값을 기존의 유공벽 해석모형 중 예연오리피스의 수두손실계수와 Flagg and Newman(1971)이 제안한 관성저항길이를 적용한 Kim(1998)의 해석해, 벽두께 변화에 따른 수두손실계수가 적용되었지만 관성저항길이의 고려가 없는 Huang(2007)의 해석해, 장파 가정 하에서 예연오리피스의 수두손실계수를 적용하고 관성저항길이를 고려하지 않은 Mei(1989)의 해석해, 및 벽두께 효과가 고려된 Huang(2007)의 수두손실계수와 Flagg and Newman(1971)의 관성저항길이를 동시에 고려하여 본 연구에서 제안한 새로운 해석해와 비교하였으며, 이를 통해 기존 수두손실계수의 유효성 및 각 해석해의 정밀도를 검토하였다.

2. 해석모형

기존의 해석모형 중 Kim(1998)의 반사율과 투과율 산정을 위한 해석모형은 Fig. 1과 같이 수심 h 의 정수면 하에서 두께 b , 유공판의 중심과 중심간의 간격 B_s , 공극폭 a 의 연직슬릿 형태의 유공벽을 설정하였다. x 축과 y 축은 유공벽과 직각이거나 평행하게 설정하였으며 z 축은 정수면을 기준으로 윗 방향으로 설정하였다. y 축에 따라 수심이 일정하다고 가정하였고 유체영역을 $x=0$ 을 기준으로 두 개로 나누었다.

비압축성 유체, 비회전 유동이라 가정하고 입사파 파고 H , 각진동수 ω 의 단일주기파가 수심 h 의 정수면에서 전파된다면 입사파의 속도포텐셜 Φ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \frac{gH}{2\omega} \phi(x, y) \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} e^{-i\omega t} \quad (1)$$



g 는 중력가속도, $i = \sqrt{-1}$, k 는 파수이며 분산방정식 $\omega^2 = gk \tanh(kh)$ 을 만족해야 한다. 정수면($z=0$)에서의 속도포텐셜 $\Phi(x, y)$ 을 Laplace 방정식에 적용하여 Helmholtz 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + k^2 \phi = 0 \quad (2)$$

소멸과 성분을 배제하고 각 유체영역에 대한 속도포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_1(x, y) = [e^{ikx \cos \theta} + K_R e^{-ikx \cos \theta}] e^{iky \sin \theta} \quad (3)$$

$$\phi_2(x, y) = K_T e^{iky \cos \theta} e^{iky \sin \theta} \quad (4)$$

K_R 과 K_T 는 각각 반사율과 투과율이고 $K_R = c_0 + d_0 i$, $K_T = a_1 + b_1 i$ 로 나타낼 수 있다. 각 영역에 대한 포텐셜 내에 위치한 유공벽 위치에서 다음과 같은 정합조건식을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \text{ at } x = 0 \quad (5)$$

$$\frac{p_2}{\rho} - \frac{p_1}{\rho} + \frac{\alpha}{2} u|u| + \int \frac{\partial u}{\partial t} dl = 0 \text{ at } x = 0 \quad (6)$$

여기서 p 는 압력, ρ 는 물의 밀도, u 는 유공벽에서 공극률을 고려한 x 방향 평균유속으로 $u = ru_0$ 로 나타낼 수 있다. u_0 는 유공벽 공극에서의 유속이다. α 는 수두손실계수이고 l 은 관성저항길이(jet length)이다. Kim(1998)은 예연오리피스의 단면수축계수 C_c 가 적용된 식 (7)의 수두손실계수 α 를 해석모형에 적용하였다.

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

여기서 r 은 면적공극률, C_c 는 단면수축계수이다. 단면수축계수 C_c 는 Mei(1989)가 예연 오리피스에 대해 산정한 다음의 경험식을 사용하였다.

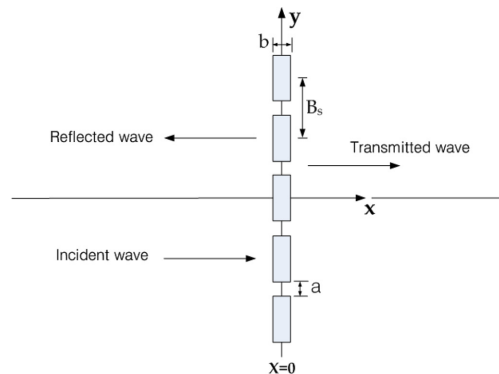


Fig. 1. Schematic diagram for calculation of wave reflection and transmission from vertical cylinders (Kim, 1998): (left) side view; (right) top view.

$$C_c = 0.6 + 0.4r^2 \quad (8)$$

관성저항길이 l 은 Flagg and Newman(1971), Taylor(1973) 및 Kakuno and Liu(1993)가 제안한 차단계수(blockage coefficient) C 를 도입하여 $l = 2C$ (Suh et al., 2002)로 나타내었으며 다음의 식과 같다.

$$\frac{l}{B_s} = \frac{b}{a} \left(1 - \frac{b}{B_s}\right) + \frac{2}{\pi} \left[1 - \ln\left(\frac{4a}{B_s}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{a}{B_s}\right)^2 + \frac{281}{180} \left(\frac{a}{B_s}\right)^4\right] + O\left(\left(\frac{a}{B_s}\right)^6\right) \quad (9)$$

여기서 b, a, B_s 는 Fig. 1과 같다. 식(9)의 우변 첫째 항은 유공벽 기둥자체의 체적에 해당하는 유체의 질량효과이며, 두 번째 항은 기둥의 형상에 따른 부가질량효과를 나타낸다.

식(6)의 비선형 수두 손실항을 환산 손실계수 β 를 적용하여 βu 로 선형화된 항으로 나타내고 $p = \rho(\partial \Phi / \partial t)$, $u = -\partial \Phi / \partial x$ 의 관계를 적용하면 식(6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_2 = \phi_1 + \left(\frac{i\beta}{\omega} + l\right) \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \quad \text{at } x = 0 \quad (10)$$

전술한 $K_R = c_0 + d_0 i$, $K_T = a_1 + b_1 i$ 를 식(3)과 식(4)에 대입하고 식(5), 식(6)의 정합조건식을 사용하면 미지수 a_1, b_1, c_0, d_0 에 대한 방정식을 조합할 수 있으며 이를 이용하여 다음의 반사율 K_R 과 투과율 K_T 에 대한 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$K_R = \frac{R(R+2)+P^2}{(R+2)^2+P^2} - \frac{2P}{(R+2)^2+P^2} i \quad (11)$$

$$K_T = \frac{2(R+2)}{(R+2)^2+P^2} + \frac{2P}{(R+2)^2+P^2} i \quad (12)$$

여기서 $P = lk$, $R = \beta k / \omega$ 이다. β 는 운동방정식을 선형화하기 위한 손실계수로 Lorentz's transformation과 수심방향 적분을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta = \frac{\int_{-h}^0 \frac{1}{2} \alpha u^2 |u| dz}{\int_{-h}^0 u^2 dz} \quad (13)$$

유공벽의 평균유속 $u = Re(\partial \Phi / \partial x)$ 는 식(1), 식(3), 식(12)를 이용하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$u = H\omega \frac{\cosh kh(z+h)}{\sinh kh} \frac{1}{\sqrt{(R+2)^2+P^2}} \cos(\theta_p) \quad (14)$$

$\cos(\theta_p)$ 는 평균유속 u 의 위상이다. 식(14)를 식(13)에 대입하고 Fourier cosine series 근사를 이용하여 $\cos(\theta_p) |\cos(\theta_p)| \approx (8/3\pi) \cos(\theta_p)$ 를 적용하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta = \frac{8\alpha H\omega}{9\pi} \frac{2}{\sqrt{(R+2)^2+P^2}} \left(\frac{\cosh^2(kh)+2}{\sinh 2kh+2kh} \right) \quad (15)$$

Mei(1989)는 파의 분산성을 무시한 장파에 대해 추가로 운동

방정식의 관성항을 배제하여 아래와 같은 해석해를 제안하였다.

$$K_R = 1 - K_T = 1 - \frac{\omega}{gkH/2} U_0 \quad (16)$$

$$K_T = \frac{U_0}{[(H/2)/h] \sqrt{gh}} \quad (17)$$

여기서, U_0 는 식(18)로 나타내며 식(19)의 수두손실계수 α 는 예연오리피스 공식(7)과 같다.

$$U_0 = \frac{H/2}{h} \sqrt{gh} \frac{\sqrt{1+2\varepsilon}-1}{\varepsilon} \quad (18)$$

$$\varepsilon = \frac{4}{3\pi} \frac{\alpha H/2}{h} \quad (19)$$

Huang(2007)은 유공벽의 수리실험을 수행하여 공극률과 벽두께를 고려한 단면수축계수 C_c 를 식(20)과 같이 제안하였으며 식(20)의 δ 는 식(21)과 같다. Huang(2007)은 단면수축계수 C_c 식(20)을 수두손실계수 식(7)의 단면수축계수 C_c 에 적용하였으며 이 수두손실계수를 해석해에 사용하였다. 이 식은 유체역학을 엄밀히 고려하였다거나 수리실험 자료에 의한 실험공식이 아니며, 연구자의 직관에 의한 것이긴 하나 벽두께 효과가 수두손실계수에 미치는 영향을 기존 제안식들 중 가장 실제 현상과 유사하게 수식화 했다고 평가된다.

$$C_c = \delta + [1 - \delta] r^2 \quad (20)$$

$$\delta = 0.6 + 0.4 \tanh \left[\frac{b}{2a} \right] \quad (21)$$

Fig. 2에 Huang(2007)의 단면수축계수와 이를 적용한 수두손실계수의 공극률 및 벽두께에 따른 변화를 도시하였다. 횡축의 b/a 는 Fig. 1과 같이 유공벽의 흐름방향 두께 b 를 공극의 폭 a 로 나눈 상대벽두께를 의미한다. Fig. 2(a)의 종축은 단면수축계수이며, Fig. 2(b)의 횡축은 Huang(2007)의 수두손실계수 α 를 식(7)로 주어지는 예연오리피스의 수두손실계수 α_{sharp} 로 나누어 무차원화 한 값이다. 벽두께의 고려가 없는 예연오리피스의 경우와는 달리 Huang(2007)의 무차원 수두손실계수 α/α_{sharp} 는 지수함수적으로 감소하였으며 공극률이 수두

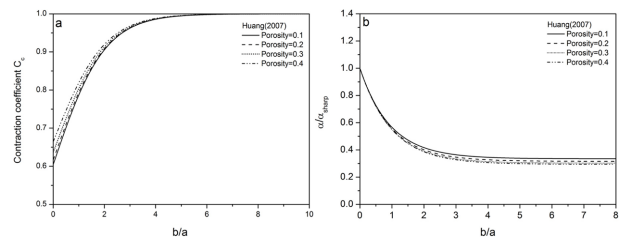


Fig. 2. Variation in contraction coefficient(a) and dimensionless head loss coefficient(b) according to relative wall thickness of perforated wall with varying porosity(Huang, 2007).

Table 1. Specification of perforated wall

Porosity r	$r = 0.1$		$r = 0.2$		$r = 0.3$		$r = 0.4$	
Width of panel (m)	0.09		0.08		0.07		0.06	
Width of spacing, a (m)	0.01		0.02		0.03		0.04	
Thickness of wall, b (m)	0.002	$b/a = 0.2$	0.002	$b/a = 0.1$	0.002	$b/a = 0.067$	0.002	$b/a = 0.05$
	0.005	$b/a = 0.5$	0.01	$b/a = 0.5$				
	0.01	$b/a = 1.0$	0.02	$b/a = 1.0$	0.03	$b/a = 1.0$	0.04	$b/a = 1.0$
	0.02	$b/a = 2.0$	0.04	$b/a = 2.0$	0.06	$b/a = 2.0$	0.08	$b/a = 2.0$
	0.04	$b/a = 4.0$	0.08	$b/a = 4.0$				
	0.07	$b/a = 7.0$						

Table 2. Testing condition of wave periods and wave heights

Wave period, T (s)	1.0	1.2	1.5	2.0	3.0
Wave height, (m)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
		0.10	0.10	0.10	0.10

관성저항길이를 고려하지 않은 Mei(1989)의 해석해, 예연 오리피스 수두손실계수를 적용하고 식(9)의 관성저항길이가 적용된 Kim(1998)의 해석해, 벽두께 효과를 고려한 수두손실계수를 적용하였지만 관성저항길이를 고려하지 않은 Huang(2007)의 해석해, 추가적으로 기존 Kim (1998)의 해석해에 Huang(2007)의 단면수축계수를 적용한 본 연구의 해석해를 실험값과 비교하여 Fig. 5~Fig.7에 나타내었다. 그림에서 횡축은 입사파의 파고 H 와 수심 h 의 비로서 무차원 파고이며, 종축은 반사율 K_R 과 투과율 K_T 이다. 빈 원은 실험값이며, 점선 및 실선으로 각 해석해를 나타내었다.

Fig. 5는 공극률 $r=0.1$, 파 주기 $T=2.0$ s인 경우 다양한 벽두께에 대해 무차원 파고에 따른 파의 반사율 K_R 과 투과율 K_T 의 변화를 비교한 것이다. 전반적으로 입사파의 파고가 증가할수록, 즉 파의 비선형성이 증가할수록 반사율은 증가하고, 투과율은 감소하는 효과가 나타났다. 상대벽두께가 작은 $b/a=0.2$ 의 경우 4개 해석해가 거의 동일한 반사율과 투과율 분포를 보여주며, 실험치와 잘 일치하고 있다. 그러나 벽두께가 증가할수록 수두손실계수에 벽두께 효과가 고려되지 않은 Mei(1989)와 Kim(1998)의 해석해는 실험치보다 반사율이 과대평가되고, 투과율은 과소평가되었다. 벽두께가 고려된 수두손실계수를 사용하는 Huang(2007)과 본 연구의 제안식은 모든 벽 두께에 대해 실험치와 근접한 좋은 결과를 준다. Huang(2007)과 본 연구의 제안식은 벽두께가 두껍고 입사파고가 작을수록 차이를 보이는데 식(9)에 보인 바와 같이 벽두께가 두꺼울수록 관성저항길이가 증가하므로 이를 고려한 본 연구의 제안식이 모든 조건에서 더 좋은 결과를 준다.

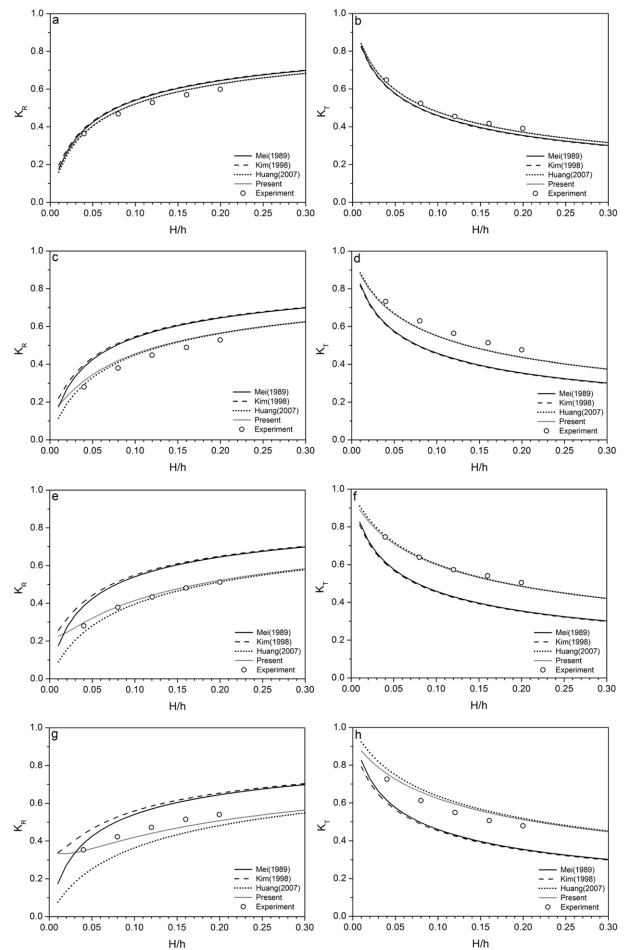
**Fig. 5.** Comparison between measurement and various solutions: reflection (left) and transmission (right) coefficients for $r=0.1$ and $T=2.0$ s: (a, b) $b/a=0.2$; (c, d) $b/a=1.0$; (e, f) $b/a=2.0$; (g, h) $b/a=4.0$.

Fig. 6은 공극률 $r=0.1$, 상대벽두께 $b/a=4.0$ 인 경우 다양한 파 주기에 대해 무차원 파고에 따른 파의 반사율 K_R 과 투과율 K_T 의 변화를 비교한 것이다. 이 경우에도 입사파의 파고가 증가할수록, 즉 파의 비선형성이 증가할수록 반사율은 증가하고, 투과율은 감소하는 효과가 나타났다. 실험치를 살펴보면 파의 주기가 반사율과 투과율에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났으나, 입사파고가 작은 경우 짧은 주기의

파가 긴 주기의 파에 비해 반사율이 증가하는 것으로 나타났다. 해석해의 경우 수두손실계수에 벽두께가 고려되지 않은 Mei(1989)와 Kim(1998)의 해석해는 실험치보다 반사율이 과대평가되고, 투과율은 과소평가되었으며, 이러한 경향은 주기가 길수록 현저하게 나타났다. 반면 Huang(2007)과 본 연구의 제안식은 수두손실계수에 벽두께가 고려되어 파고가 큰 경우 실험치와 잘 일치하였으나, 파고가 작은 경우 관성저항길이 고려된 본 연구의 제안식이 실험치에 더 근접한 결과를 주었다. 이러한 관성저항길이 효과는 주기가 짧을수록 더욱 두드러지게 나타났다.

Fig. 7은 상대벽두께 $b/a=2.0$ 이고, 파 주기 $T=2.0$ s인 경우 다양한 공극률에 대해 무차원 파고에 따른 파의 반사율 K_R 과 투과율 K_T 의 변화를 비교한 것이다. 공극률이 작은 $r=0.1$ 의 경우 수두손실계수에 벽두께 효과가 고려되지 않은 Mei(1989)와 Kim(1998)의 해석해는 실험치보다 반사율이 과대평가되고, 투과율은 과소평가되었다. 그러나 벽두께가 고려된 수두손실계수를 사용하는 Huang(2007)과 본 연구의 제안식은 실험치와 근접한 좋은 결과를 준다. 공극률이 증가할수록 실험치에서 반사율은 감소하고 투과율은 증가하는데, 4가

지 해석해 모두가 실험치와 동일한 경향을 보이지만 해석해의 변화 정도가 실험치보다 더 심하게 나타났다. 결과적으로는 공극률이 가장 큰 $r=0.4$ 에서 관성저항길이가 고려되지 않은 Mei(1989)와 Huang(2007)의 해석해는 실험치에 비해 반사율이 과소평가되었으나 관성저항길이가 고려된 Kim(1998)과 본 연구의 제안식은 반사율에 있어서 실험치와 근접하게 나타났다. 그러나 투과율은 관성저항길이 효과가 나타나지 않고 수두손실계수의 영향이 지배적이어서 Mei(1989)와 Kim(1998)의 해석해는 실험치에 잘 일치하고, Huang(2007)과 본 연구의 제안식은 약간 과대평가의 경향을 보인다. Kim(1998)의 해석해는 공극률이 $r=0.4$ 로 가장 큰 경우에 대해 반사율과 투과율이 모두 실험치와 근접하는 좋은 결과를 주었으나, 공극률이 감소할수록 실험치로부터 차이가 크게 나타났다. 따라서 해석해의 정밀도는 어느 특정 조건보다는 다양한 조건에 대해 전반적으로 좋은 결과를 주는 지의 여부를 판단해야 할 것이다. 따라서 4.3절에 해석해의 전반적인 정밀도 평가를 수행하였다.

Fig. 5~Fig. 7과 같은 무차원 파고비 이외에도 실험값과 해석해의 상대벽두께에 따른 반사율, 투과율 비교결과를 직접

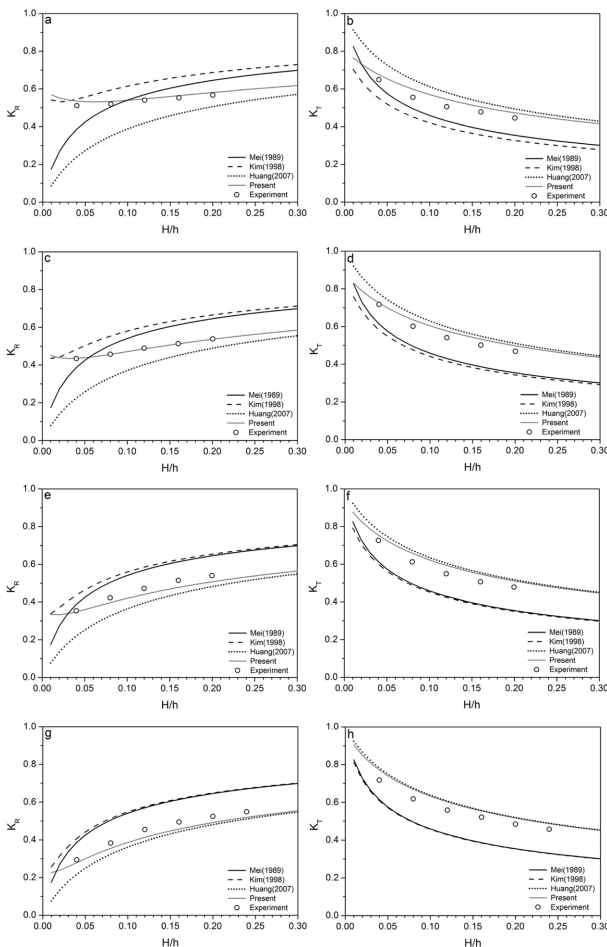


Fig. 6. Comparison between measurement and various solutions: reflection (left) and transmission (right) coefficients for $r=0.1$ and $b/a=4.0$: (a, b) $T=1.2$ s; (c, d) $T=1.5$ s; (e, f) $T=2.0$ s; (g, h) $T=3.0$ s.

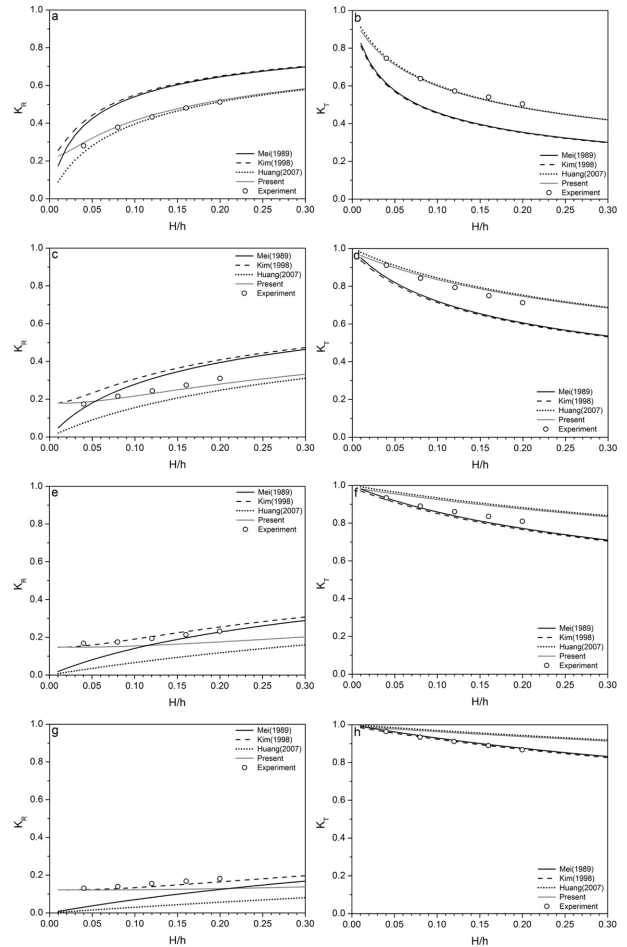


Fig. 7. Comparison between measurement and various solutions: reflection (left) and transmission (right) coefficients for $b/a=2.0$ and $T=2.0$ s: (a, b) $r=0.1$; (c, d) $r=0.2$; (e, f) $r=0.3$; (g, h) $r=0.4$.

비교하였으며 이를 4.2절에 나타내었다. 또한 유공벽에 의해 소산되는 입사파의 에너지 소산율도 무차원 파고 및 상대벽 두께에 따라 같이 비교하였다.

4.2 상대벽두께에 따른 반사율투과율 및 에너지 소산율 비교

유공벽의 상대벽두께에 따라서 실험결과를 전술한 해석해와 비교하였으며 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8의 횡축은 상대벽두께 b/a 이며 종축은 반사율과 투과율을 나타낸다. Fig. 8(a), Fig. 8(b)는 공극률은 0.1, 입사파 주기는 2.0 s이며, 입사파의 파고는 0.02 m로 무차원 파고 H/h 로 계산하면 0.04의 비교결과이다. Fig. 8(c), Fig. 8(d)는 동일한 조건에서 입사파의 무차원 파고 $H/h = 0.12$ 의 비교결과이다. 실험값은 상대벽두께에 따라 커브의 형태로 변화하였으며 실험값의 반사율은 상대벽두께가 약 2.0인 구간에서 최저점을 투과율은 최고점을 나타냈다. 또한 Fig. 5에서 확인한 바와 같이 비선형성의 따라 상대벽두께에 따른 반사율과 투과율은 변화하였다. 실험값은 본 연구의 제안식이 가장 근접하였으며 Huang(2007)의 해석해는 상대벽두께가 증가할수록 상대벽두께에 따른 영향을 잘 고려하지 못하였다. 그리고 앞서 전술한대로 Mei(1989)와 Kim(1998)의 해석해는 상대벽두께에 따라 반사율이 과대평가되고 투과율이 과소평가됨이 나타났다. 비록 본 제안식이 다른 해석해보다 실험값과 근접하였지만 상대벽두께가 증가할수록 실험값과의 차이가 존재하였고 특히 반사율보다 투과율에서 더 큰 차이가 발생하였다. 투과율은 관성저항길이의 영향이 작아 수두손실계수의 영향이 지배적이기 때문에 본 제안식의 수두손실계수에 대한 개선이 필요하다. Fig. 9와 Fig. 10은 유공벽에 의해 소산되는 입사파의 에너지 비율을 상대벽두께에 따라 나타내었다. Fig. 9는 Fig. 5의 상대벽두께에 따른 투과율과 반사율을 에너지 소산율로

나타낸 결과이며 계산에 사용된 입사파의 에너지 소산율은 아래의 식(24)와 같이 나타낸다.

$$K_e = 1 - K_R^2 - K_T^2 \quad (24)$$

여기서 K_e 는 에너지 소산율이며 K_R 는 반사율, K_T 는 투과율이다. Fig. 9는 공극률 0.1, 입사파의 주기 2.0s에서 입사파고에 따른 변화를 상대벽두께 별로 비교한 그림이다. 횡축은 수심에 대한 무차원 파고 H/h 이며 종축은 에너지 소산율이다. 입사파고에 따라 에너지 소산율은 변화하였으며 입사파고가 작을수록 에너지 소산율도 작은 것으로 확인된다. 그러나 입사파고, 즉 파의 비선형성이 증가하여도 에너지 소산율은 크게 증가하지 않으며 $H/h = 0.12$ 인 지점에서 무차원 파고에 따라 약 0.5정도의 일정한 에너지 소산율을 나타냈다. 또한 상대벽두께가 증가할수록 Mei(1989)와 Kim(1998)의 해석해와 Huang(2007)의 해석해와 본 제안식의 차이는 증가하였으며 실험값은 Huang(2007)의 해석해와 본 제안식과 근접하였다. Fig. 9에서의 에너지 소산율은 반사율, 투과율 결과와는 상반되게 본 제안식 보다는 Huang(2007)의 해석해에 더 근접하였으며 이는 Fig. 10에서 확인이 가능하다. Fig. 10은 Fig. 9와 동일한 조건에서 입사파의 무차원 파고 $H/h = 0.04$ 와 $H/h = 0.12$ 에서의 에너지 소산율을 상대벽두께 별로 나타내었다. Fig. 10(a)는 Fig. 9와 공극률 및 상대벽두께가 동일한 조건에서 무차원 파고 $H/h = 0.04$ 의 결과이고 Fig. 10(b)는 무차원 파고 $H/h = 0.12$ 의 결과이다. 상대벽두께가 증가할수록 에너지 소산율도 변화하였으며 비선형성이 작은 구간의 변화량이 크게 나타났다. 또한 상대벽두께가 작은 경우에는 실험값과 본 제안식은 잘 일치하였지만 상대벽두께가 증가할수록 본 제안식 보다는 Huang(2007)의 해석해에 근접하는 것이 나타났다. 이는 Huang(2007)의 해석해가 실험값과 비교시 반사율과 투과율은 일치하지 않지만 반사율의 차이가 큰 만큼 투과율의 차

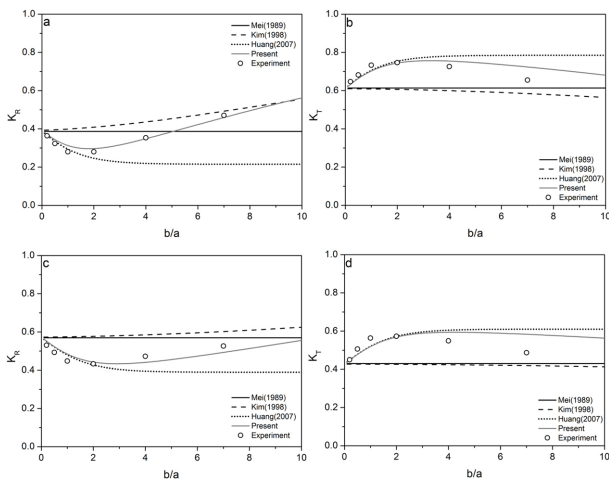


Fig. 8. Comparison between measurement and various solutions according to wall thickness: reflection(left) and transmission(right) coefficients for $r = 0.1$, $T = 2.0$ s: (a,b) $H/h = 0.04$; (c,d) $H/h = 0.12$.

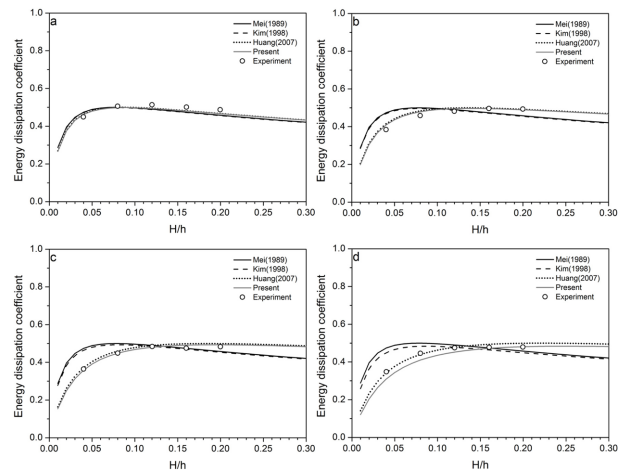


Fig. 9. Comparison of energy dissipation coefficient for $r = 0.1$ and $T = 2.0$ s between measurement and various solutions: (a) $b/a = 0.2$; (b) $b/a = 1.0$; (c) $b/a = 2.0$; (d) $b/a = 4.0$.

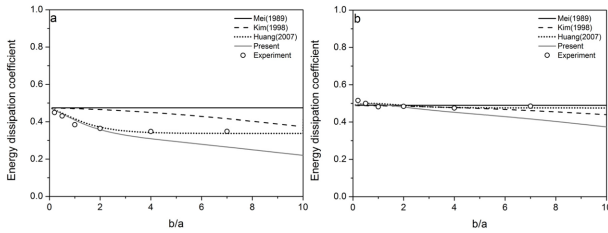


Fig. 10. Comparison of energy dissipation coefficient for $r=0.1$, $T=2.0$ s between measurement and various solutions according to wall thickness: (a) $H/h=0.04$; (b) $H/h=0.12$.

이도 커서 에너지 소산율은 근접하게 계산되기 때문이다. 만약 상대벽두께가 큰 구간에서 반사율과 투과율 값 모두 실험 값과 잘 일치하는 수두손실계수가 적용된다면 에너지 소산율도 잘 일치할 것이다.

4.3 해석해의 전반적인 정밀도 평가

본 연구의 반사율 및 투과율 실험에서 얻은 모든 결과를 전술한 해석해에 의한 값들과 비교하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 각각 반사율과 투과율의 실험값과 여러 해석해 결과를 비교한 것이다. 그래프의 횡축은 실험값, 종축은 해석해의 이론값이다. 동일한 유공벽 제원과 입사파 조건에서 해석해와 실험값이 정확히 일치한다면 그래프의 점들은 45도 경사선에 일치하게 된다.

반사율을 비교한 Fig. 11에서 그림의 좌측에 제시한 Fig. 11(a)와 Fig. 11(c)는 각각 관성저항길이를 무시한 Mei(1989)와 Huang(2007)의 해석해를 이용한 결과로서 많은 점들이 45도 경사선 아래에 위치하여 실험치에 비해 반사율이 과소 평가되었음을 알 수 있다. 그러나 그림의 우측에 제시한 Fig. 11(b)와 Fig. 11(d) 즉 관성저항길이를 고려한 Kim(1998)과 본 연구의 제안식은 이러한 반사율 과소평가 부분이 크게 개선되었으며, 특히 벽두께 효과를 수두손실계수 산정에 고려한 본 연구 제안식은 실험치에 가장 근접한 결과를 보인다.

한편 투과율은 Fig. 12에 보인 바와 같이 관성저항길이 고려 여부에 크게 좌우되지 않았으나, 관성저항길이를 고려한 Kim(1998)과 본 연구의 제안식이 좀 더 개선된 결과를 보이며, 벽두께 효과를 수두손실계수 산정에 고려한 본 연구 제안식이 실험치에 가장 근접한 결과를 보인다.

이상의 전반적인 정밀도 평가에서 관성저항길이와 수두손실계수에 벽두께 효과가 고려된 본 연구의 제안식이 가장 우수한 결과를 주는 것으로 나타났다. 그러나 Huang(2007)이 제안한 수두손실계수에 미치는 벽두께의 효과는 식(20)과 식(21)에 보인 바와 같이 다양한 벽두께를 가지는 실험결과를 바탕으로 실험식을 얻지 않고 경험적이고 직관적인 추론에 의해 얻어진 결과이므로 개선이 필요하다. 이를 위해 다양한 유공벽 및 입사파 제원에 대해 얻어진 반사율 및 투과율 실험 자료는 매우 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

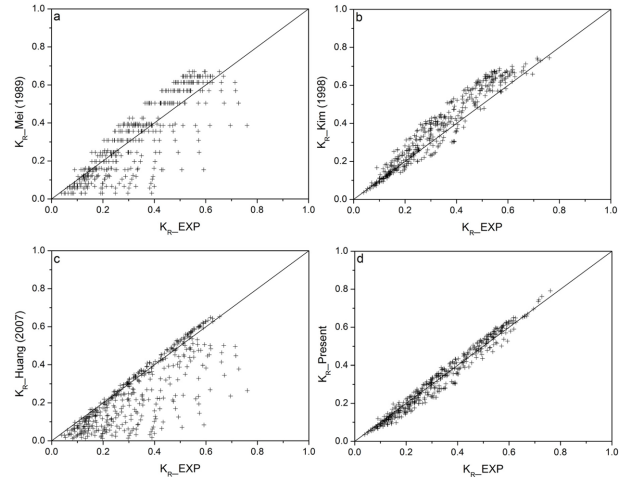


Fig. 11. Comparison of reflection coefficient between the theoretical results and experimental data: (a) Mei's (1989) solution; (b) Kim's (1998) solution; (c) Huang's (2007) solution; (d) present solution.

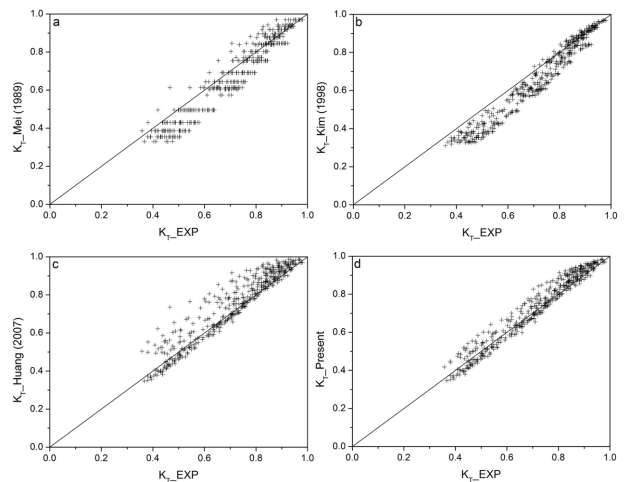


Fig. 12. Comparison of transmission coefficient between the theoretical results and experimental data: (a) Mei's (1989) solution; (b) Kim's (1998) solution; (c) Huang's (2007) solution; (d) present solution.

5. 결 론

본 논문에서는 유공벽의 공극률 및 상대벽두께가 수두손실계수에 미치는 영향을 알아보기 위해 규칙파를 이용한 직립 유공벽의 반사율 및 투과율 측정 수리실험을 수행하였다. 다양한 공극률 및 상대벽두께의 유공벽을 제작하였으며 주기와 파고가 다양한 규칙파를 조파시켜 여러 실험조건에 따른 반사율과 투과율 값을 측정하였다. 본 연구의 반사율과 투과율 실험값을 기존의 여러 해석해 중 장파 가정 하에 예연오리피스의 수두손실계수를 적용하고 관성저항길이를 무시한 Mei(1989)의 해석해, 예연오리피스의 수두손실계수와 관성저항길이를 적용한 Kim(1998)의 해석해, 벽두께에 따른 수두손실계수를 적용하였으나 관성저항길이를 무시한 Huang(2007)의 해석해와 비교하였으며, 추가적으로 Kim(1998)의 해석해

에 Huang(2007)의 벽두께가 고려된 수두손실계수를 적용하여 본 연구에서 제안한 해석해를 실험값과 비교하였다. 이를 통해 각 해석해에 적용된 수두손실계수에 따른 이론값과 실험값의 차이 및 관성저항길이의 적용유무에 따른 영향 등을 파악하였다.

실험값과 해석해의 비교결과, 관성저항길이를 고려하지 않은 Mei(1989) 및 Huang (2007)의 해석해는 실측치에 비해 반사율이 현저히 과소평가됨을 알 수 있었다. 그러나 관성저항길이를 고려한 Kim(1998)의 해석해는 이러한 단점이 크게 개선되었다. 그러나 Kim(1998)의 해석해는 벽두께가 수두손실계수에 미치는 영향을 고려하지 못하여 실측치에 비해 반사율이 전반적으로 약간 크게 나타났다. 한편 투과율은 관성저항길이 고려 여부에 크게 좌우되지 않았으나, 관성저항길이를 고려한 Kim(1998)의 해석식이 좀 더 개선된 결과를 보였으나 전반적으로 실측치에 비해 약간 작게 나타났다. 또한 상대벽두께에 따라 실험값의 반사율과 투과율은 커브 형태의 기울기를 보였으며 본 연구의 제안식은 다른 해석해보다 근접하였지만 상대벽두께가 증가할수록 실험값과의 차이가 증가함이 나타났다. 상대벽두께에 따른 에너지 소산율의 비교 결과에서는 상대벽두께 및 파의 비선형성에 따라 에너지 소산율은 변화하였으며 실험값의 에너지 소산율과 비교시 본 제안식 보다는 Huang(2007)의 해석해와 잘 일치하였다.

마지막으로 벽두께가 관성저항길이 및 손실수두에 미치는 영향을 모두 고려한 본 연구의 제안식은 반사율과 투과율에 있어서 전반적으로 실험치와 잘 일치하는 가장 좋은 결과를 보였다. 그러나 본 연구의 제안식에서 벽두께가 수두손실계수에 미치는 영향은 Huang(2007)의 제안식을 차용한 바, 이식이 엄밀한 유체역학이나 실험식에 근거한 것이 아니므로 향후 본 연구의 다양한 실험 결과를 이용하여 좀 더 현실성 있는 실험식을 얻는 연구가 필요하다.

References

- Cho, I.H. and Kim, N.H. (2002). On an analysis of reflection and transmission coefficients by a vertical slit plate. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 16(3), 1-7 (in Korean).
- Flagg, C.N. and Newman, J.N. (1971). Sway added-mass coefficients for rectangular profiles in shallow water. *Journal of Ship Research*, 15, 257-265.
- Huang, Z. (2007). Wave interaction with one or two rows of closely spaced rectangular cylinders. *Ocean Engineering*, 34, 1584-1591.
- Isaacson, M., Premasiri, S. and Yang, G. (1998). Wave interaction with vertical slotted barrier. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 124(3), 118-126.
- Kakuno, S. and Liu, P.L.-F. (1993). Scattering of water waves by vertical cylinders. *Journal of waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 119(3), 302-322.
- Kim, B.H. (1998). Interactions of waves, seabed and structures. PhD dissertation, Seoul National Univ., Seoul, Korea.
- Kriebel, D.L. (1992). Vertical wave barriers: wave transmission and wave forces. *Proceedings of 23th Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, 1313-1326.
- Li, Y., Liu, Y. and Teng, B. (2006). Porous effect parameter of thin permeable plates. *Coastal Engineering Journal*, 48, 309-336.
- Mei, C.C. (1989). *The applied dynamics of ocean surface waves*. World Scientific, Singapore.
- Mei, C.C., Liu, P.L.-F. and Ippen, A.T. (1974). Quadratic loss and scattering of long waves. *Journal of Waterway, Harbour and Coastal Engineering Division*, ASCE, 100(3), 217-239.
- Suh, K.D., Park, W.S. and Park, B.S. (2001). Separation of incident and reflected waves in wave-current flumes. *Coastal Engineering*, 43, 139-159.
- Suh, K.D., Son, S.Y., Lee, J.I. and Lee, T.H. (2002). Calculation of irregular wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters using a regular wave model. *Proceedings of 28th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Cardiff, 1709-1721.
- Suh, K.D., Ji, C.H. and Kim, B.H. (2011). Closed-form solutions for wave reflection and transmission by vertical slotted barrier. *Coastal Engineering*, 58, 1089-1096.
- Taylor, P.J. (1973). The blockage coefficient for flow about an arbitrary body immersed in a channel. *Journal of Ship Research*, 17(2), 97-105.
- Yoon, S.B., Lee, J.I., Nam, D.H. and Kim, S.H. (2006). Energy loss coefficient of waves considering thickness of perforated wall. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 18(4), 321-328 (in Korean).

Received 11 October, 2014

1st Revised 31 October, 2014

2nd Revised 10 November, 2014

Accepted 19 November, 2014