

## 연직 슬릿 유공벽의 투수 매개변수의 마찰계수 산정 Estimation of Friction Coefficient in Permeability Parameter of Perforated Wall with Vertical Slits

김열우\* · 서경덕\*\* · 지창환\*\*\*

Yeul Woo Kim\*, Kyung-Duck Suh\*\* and Chang-Hwan Ji\*\*\*

**요 지 :** 연직 슬릿 유공벽에서의 정합조건에는 투수 매개변수가 포함되는데, 보통 투수 매개변수는 두 가지 방법으로 계산이 가능하다. 하나는 투수 매개변수를 유공벽에서의 에너지 소산 계수와 제트의 길이로 나타내는 방법으로서, 관련된 모든 변수를 알고 있다는 점에서 장점을 가지고 있으나, 장파의 영역에서 옳지 않은 결과를 초래하는 단점이 있다. 다른 하나는 투수 매개변수를 마찰계수와 관성계수로 나타내는 방법으로서, 단파부터 장파까지 모든 영역에서 올바른 결과를 나타내지만, 반사계수, 투과계수 등에 대한 관측치와 계산치 사이의 최적적합에 기초하여 마찰계수를 결정해야 한다는 단점이 있다. 본 논문에서는 유공벽의 유공율 및 두께, 수심 등 기지의 변수로 마찰계수에 대한 경험식을 제시하였다. 이렇게 함으로써 최적적합 과정을 거치지 않고 마찰계수를 직접 산정할 수 있도록 한다. 경험식을 구하기 위하여 수리실험을 실시하였으며, 다른 연구자들의 결과를 함께 사용하여 경험식을 제시하였다. 제시된 공식을 이용하여 상부는 커튼월이고 하부는 연직 슬릿 유공벽으로 되어 있는 커튼월-파일 방파제의 반사계수 및 투과계수를 계산하였다. 실험치와 계산치가 잘 일치함을 보임으로써 제시한 경험식의 적합성을 검증하였다.

**핵심용어 :** 마찰계수, 연직 슬릿, 유공벽, 투수 매개변수

**Abstract :** The matching condition at a perforated wall with vertical slits involves the permeability parameter, which can be calculated by two different methods. One expresses the permeability parameter in terms of energy dissipation coefficient and jet length at the perforated wall, being advantageous in that all the related variables are known, but it gives wrong result in the limit of long waves. The other expresses the permeability parameter in terms of friction coefficient and inertia coefficient, giving correct result from short to long waves, but the friction coefficient should be determined on the basis of a best fit between measured and predicted values of such hydrodynamic coefficients as reflection and transmission coefficients. In the present study, an empirical formula for the friction coefficient is proposed in terms of known variables, i.e., the porosity and thickness of the perforated wall and the water depth. This enables direct estimation of the friction coefficient without invoking a best fit procedure. To obtain the empirical formula, hydraulic experiments are carried out, the results of which are used along with other researchers' results. The proposed formula is used to predict the reflection and transmission coefficients of a curtain-wall-pile breakwater, the upper part of which is a curtain wall and the lower part consisting of a perforated wall with vertical slits. The concurrence between the experimental data and calculated results is good, verifying the appropriateness of the proposed formula.

**Keywords :** Friction coefficient, perforated wall, permeability parameter, vertical slit

### 1. 서 론

최근 유공방파제, 커튼월-파일 방파제, 투수식 소파관 방파제 등 연직 슬릿 유공벽을 포함하는 방파 구조물이 많이 이용되고 있다. 투수성 방파제는 해수의 순환과 토사의 이동을 가능하게 하는 등의 다양한 환경적인 문제에 대한 장점을 가지고 있다. 또한 파가 유공벽을 통과하면서 슬릿 주위의 흐름에 의한 에너지 소산이 일어나게 되고, 불투과성 방파제에

비해 유공 방파제에 작용하는 파력이 감소하는 등의 공학적인 장점도 가지게 된다. 이에 따라 유공벽에서의 파의 반사율, 투과율, 파력 등 수리 특성을 계산하기 위한 다양한 수학적 모형들이 개발되어져 왔다(Kakuno and Liu 1993; Hagiwara 1985; Bennett et al. 1992; Park et al. 2000). 유공벽을 통과하는 파의 운동은 에너지 소산과 위상 변화 등을 포함하고 있어 매우 복잡하게 이루어져 있다. 따라서 유공벽을 통과하는 파의 운동을 이론적으로 해석하기 위해서는 몇 가지 가정이

\*건일엔지니어링 기술연구소 사원(R&D Center, Kunil Engineering Co., Ltd.)

\*\*서울대학교 건설환경공학부 교수(Corresponding author : Kyung-Duck Suh, Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea, kdsuh@snu.ac.kr)

\*\*\*서울대학교 건설환경공학부 박사과정(Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University)

필요하게 된다. 대부분의 모형들은 유공벽 전후로 유체 영역을 분리하여 각 영역에서의 해를 가정하고 유공벽에서의 정합조건을 이용하여 해를 구하는 방법을 사용하고 있다. 유공벽에서의 정합조건을 나타내는 매개변수로서 투수 매개변수(permeability parameter)가 사용되는데, 투수 매개변수를 계산하는 방법으로 Mei et al.(1974)의 방법과 Sollitt and Cross (1972)의 방법이 주로 사용된다.

전자의 방법은 관련된 모든 변수들을 알고 있다는 점에서 장점을 가지고 있으나, 장파 영역에서 투과가 일어나지 않고 완전 반사가 일어나는 등의 물리적으로 부적절한 결과를 가져오게 된다. 반면에 후자의 방법은 어떠한 파장에서든 올바른 결과를 가져오게 되나, 투수 매개변수를 찾기 위해 실험을 진행해야 하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 후자의 방법에서의 투수 매개변수에 대하여 실험을 통해, 수리학적 또는 구조물에 관련된 변수로 이루어진 경험식을 제안하고자 한다.

## 2. 수학적 모형

Fig. 1에 나타낸 연직 슬릿 유공벽을 생각한다. 여기서,  $h$ 는 수심,  $b$ 는 유공벽의 두께이다. 방파제로부터 파의 진행방향으로  $x$ 의 양의 방향, 정수면으로부터 연직 상방으로  $z$ 의 양의 방향이 되도록 직교좌표계( $x, z$ )를 잡는다. 두 인접한 부재의 중심 간의 거리를  $2A$ , 슬릿의 폭을  $2a$ 로 하여 유공율이  $r=a/A$ 가 되도록 한다. 파고  $H_i$ 의 규칙파가  $x$ 축의 양의 방향으로 입사한다고 가정하고 유체 영역을 영역 1( $x \leq 0$ )과 영역 2( $x > 0$ )로 나눈다.

비압축성 유체와 비회전성 운동을 가정하면, Laplace 방정식을 만족시키는 속도 포텐셜이 존재한다. 자유수면 경계조건을 선형화 시키면, 속도 포텐셜  $\Phi(x, z, t)$ 에 대한 경계치 문제를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \Phi = 0 \quad \text{at } z=0 \quad (2)$$

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

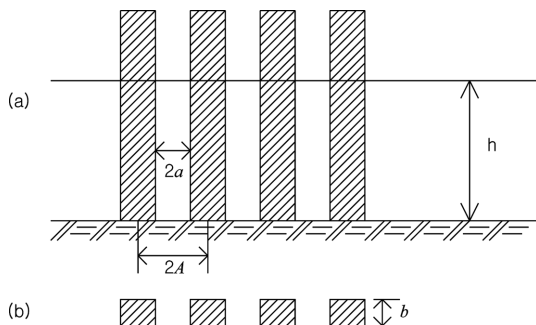


Fig. 1. Definition sketch of a perforated wall with vertical slits: (a) front view; and (b) top view.

여기서  $\omega$ 는 파의 각주파수,  $g$ 는 중력가속도,  $h$ 는 수심이다. 시간  $t$ 에 대한 주기성 운동을 가정하면, 위 문제에 대한 해를 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\Phi(x, z, t) = Re \left\{ \frac{igH_i}{2\omega \cosh(kh)} \phi(x, z) \exp(-i\omega t) \right\} \quad (4)$$

여기서  $i = \sqrt{-1}$ 이며,  $Re$ 는 복소수의 실수부를 나타낸다. 파수  $k$ 는 분산관계식  $\omega^2 = gk \tanh(kh)$ 를 만족시켜야 한다. 다음으로 각 영역에서 속도 포텐셜의 공간적 변화를 나타내는  $\phi(x, z)$ 를 계산해야 한다. 유공벽 근처에서의 유체 운동의 길이 스케일이 파장으로 나타내지는 원역에서의 길이 스케일에 비해 훨씬 작다고 가정하면, 수학적으로 유공벽의 두께를 영이라고 가정할 수 있다. 그러면  $\phi_1(x, z)$ 와  $\phi_2(x, z)$ 는  $x=0$ 에서 다음의 정합조건을 만족시켜야 한다.

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

여기서, 아래 첨자는 유체 영역을 나타낸다. 이 정합조건은 두 영역에서의 수평 질량 플럭스(또는 수평 유속)가 유공벽의 위치에서 같아져야 함을 나타내며, 또한 슬릿에서의 수평 유속이 유공벽 양쪽의 속도 포텐셜의 차이, 즉 압력차에 비례한다는 것을 나타낸다. 투수 매개변수라 불리는 비례상수  $G$ 는 일반적으로 복소수이다. 경계치 문제 (1)-(3)은 각 영역에서의 해를 다음과 같이 무한급수해로 표시하여 고유함수전개법을 이용하여 풀 수 있다(예로서 Isaacson et al. 1998).

$$\phi_1 = \phi_i - \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos[\mu_m(h+z)] \exp(\mu_m x) \quad (6)$$

$$\phi_2 = \phi_t + \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos[\mu_m(h+z)] \exp(-\mu_m x) \quad (7)$$

파수  $\mu_m$ 는 분산관계식  $\omega^2 = g\mu_m \tanh(\mu_m h)$ 의 해이며,  $\phi_i = \cosh[k(h+z)] \exp(ikx)$ 는 입사파 속도 포텐셜이다. 식 (6)과 (7)은 자유수면 경계조건 (2)와 바닥 경계조건 (3)을 만족시킨다. 식 (6)과 (7)을 정합조건 (5)에 대입하고 수심 적분하면 계수  $A_m$ 에 대한 행렬 방정식을 얻을 수 있다. 이 행렬식을 풀면 반사율과 투과율은 다음과 같이 주어진다:

$$C_r = |A_0| \quad (8)$$

$$C_t = |1 + A_0| \quad (9)$$

에너지 손실율은 다음과 같이 나타내지며

$$C_l = 1 - C_r^2 - C_t^2 \quad (10)$$

이는 입사파 에너지 중 유공벽에 의해 소산되는 에너지의 비율을 나타낸다.

## 3. 투수 매개변수

### 3.1 투수 매개변수의 계산방법

식 (5)는 유공벽에 직각 방향의 유속이 복소수 비례상수에

의해 유공벽 양쪽의 압력차에 비례한다는 것을 나타낸다. 투수 매개변수  $G$ 의 물리적 의미를 설명하기 위하여 식 (5)를 다음과 같이 나타낸다.

$$\phi_2 = \phi_1 + \frac{i}{G} \frac{\partial \phi_1}{\partial x}, \frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \text{ at } x=0 \quad (11)$$

그러면,  $i/G$ 의 실수부는 관성 효과에 의한 유속과 압력 사이의 위상 차와 관계되며, 허수부는 유공벽에서의 저항에 해당된다.

투수 매개변수를 계산하는 방법은 몇 가지가 있다(Isaacson et al. 1998 참조). Mei et al.(1974)는 저항과 관성 효과를 각각 수두손실계수 및 유효 오리피스 길이로 나타내었다. 한편, Sollitt and Cross(1972)는 이들을 마찰계수 및 부가질량계수로 각각 나타내었다. Mei et al.(1974)에 기초한 투수 매개변수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = \frac{1}{\frac{\beta}{\omega} - il} \quad (12)$$

여기서,  $\beta$ 는 운동방정식의 비선형 이류가속도 항을 선형화하여 유도되는 에너지 소산 계수이며,  $l$ 은 유효 오리피스 길이로서 유공벽의 슬릿을 통해 발생하는 제트의 길이이다.

연직 슬릿 유공벽에 대한 에너지 소산 계수는 Kim(1998)에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\beta = \frac{8\alpha H_i \omega}{9\pi} \frac{1}{\sqrt{(R+2)^2 + P^2}} \frac{5 + \cosh(2kh)}{2kh + \sinh(2kh)} \quad (13)$$

여기서,  $P=lk$ ,  $R=\beta k/\omega$ 이며,  $\alpha$ 는 수두손실계수이다. 위 식을 다시 정리하면  $\beta$ 에 대한 5차 방정식이 되며, eigenvalue 방법으로 풀 수 있다(Press et al. 1992). Suh et al.(2002)은 유효 오리피스 길이  $l$ 이 차단계수  $C$ 와

$$l = 2C \quad (14)$$

의 관계가 있음을 보였으며, Kakuno and Liu(1993)은 다음과 같은 차단계수 식을 제안하였다:

$$C = \frac{b}{2} \left( \frac{1}{r} - 1 \right) + \frac{2A}{\pi} \left[ 1 - \log(4r) + \frac{1}{3}r^2 + \frac{281}{180}r^4 \right] \quad (15)$$

수두손실계수  $\alpha$ 는 평균 오리피스 공식(Mei, 1983)에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha = \left( \frac{1}{rC_c} - 1 \right)^2 \quad (16)$$

여기서,  $C_c$ 는 경험 수축계수로서, Mei et al.(1974)은 다음 공식을 사용할 것을 제안하였다.

$$C_c = 0.6 + 0.4r^2 \quad (17)$$

Sollitt and Cross(1972)에 기초한 투수계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = \frac{r}{b(f-is)} \quad (18)$$

여기서,  $f$ 는 마찰계수이며,  $s$ 는 관성계수로서

$$s = 1 + C_m \frac{1-r}{r} \quad (19)$$

로 주어지며,  $C_m$ 은 부가질량계수이다.

### 3.2 투수 매개변수 계산방법의 비교

식 (12)-(17)로 나타내지는 Mei et al.(1974)의 방법은 입사파의 파고, 주기, 유공벽의 기하학적 변수 등 투수 매개변수 계산에 필요한 모든 관련 변수들을 알고 있다는 점에서 유리하다. 하지만 Mei et al.(1974)의 방법은 장파에 대하여 틀린 결과를 나타낸다. 식 (13)에서 보듯이,  $kh$ 가 0으로 접근함에 따라,  $\beta$ 가 무한대가 되어, 장파의 에너지가 완전히 반사됨을 나타낸다. 이는 장파의 경우 파의 투과가 전혀 발생하지 않음을 의미하는데, 물리적으로 장파는 방파제를 전혀 감지하지 못하고 완전 투과가 발생하게 되므로, 이는 절대적으로 틀린 결과이다. 한편, 유공벽 케이스 방파제로부터의 파의 반사를 계산하는 경우에는 Mei et al.(1974)의 방법이 장파에 대해서도 올바른 결과를 나타낸다. 이 경우 일반적으로 반사율을  $B/L$ ( $B$ =유수실 폭,  $L$ = 파장)의 함수로 나타내는데,  $B/L$ 이 0으로 접근함에 따라 반사율은 1.0이 된다. 따라서 장파의 에너지가 완전히 반사됨을 나타내는 Mei et al.(1974)의 방법이 올바른 결과를 나타낸다.

반면에 Sollitt and Cross(1972)의 방법에서는, 마찰계수와 부가질량계수를 사전에 알 수 없기 때문에 실험을 수행하여 반사율과 투과율을 측정하여 관측치와 계산치를 가장 잘 일치시키는 값들을 찾아내야 한다. Sollitt and Cross(1972), Losada et al.(1993), Yu(1995), Isaacson et al.(1998), Zhu and Chwang (2001), Hossain et al.(2001) 등의 많은 연구자들은 투과성 구조물의 반사율 및 투과율에 대한 실험치와 계산치의 비교를 통하여  $C_m=0$ , 즉  $s=1$ 의 값을 사용할 것을 제안하였다. 하지만 마찰계수의 경우에는 수학적 모형과 실험의 결과를 일치지수(index of agreement)를 통하여 구해야 한다. Willmott(1981)에 의해 제안된 일치지수는 아래와 같이 주어진다.

$$I_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (20)$$

여기서,  $O_i$ 는 관측치,  $P_i$ 는 수학적 모형의 예측치, 그리고  $\bar{O}$ 는 관측치의 평균을 나타낸다. 일치지수는 0과 1 사이의 값을 가지며, 일치지수가 1에 가까울수록 관측치와 예측치가 잘 일치함을 나타낸다. 위의 일치지수를 구해서 그 중 가장 큰 값을 가지게 될 때의  $f$ 값을 이용하게 된다.

최근에 Li et al.(2006)은 마찰계수가 유공벽의 두께와 수심에 관련이 있음을 제안하였다. Li et al.(2006)은 여러 연구

자들의 실험 결과와 직접 수행한 실험결과를 종합하여 상대 두께  $b/h$ 와 마찰계수  $f$ 의 관계를 나타내었다. 또한 실험결과 중에서 비교적 좋은 결과를 도출할 수 있는 구간 내에서 마찰 계수  $f$ 가 다음과 같은 식을 따른다고 제안하였다.

$$f = -3338.7\left(\frac{b}{h}\right)^2 + 82.769\left(\frac{b}{h}\right) + 8.711$$

at  $0.0094 \leq b/h \leq 0.05$  (21)

반면에 서경덕 등(2008)은 Mei et al.(1974)의 방법과 Sollitt and Cross(1972)의 방법을 사용하여 반사율, 투과율, 에너지 손실율을 계산하고, 두 방법을 사용한 결과가 근접하도록 하는 마찰계수를 구하여 마찰계수가 유공벽의 상대 두께와 유공율이 커짐에 따라 작아지는 경향을 고찰하였다.

본 논문에서는 다양한 조건을 가진 연직 슬릿 유공벽에서 실험을 실시하여, 광범위한 조건에 만족하는 경험식을 제시하며, 슬릿 벽을 포함하는 유공 구조물의 정합조건에 사용되는 투수 매개변수에 적용 가능하게 하고자 한다.

### 4. 수리모형실험

연직 슬릿 유공벽에서의 투수 매개변수를 산정하기 위한 수리모형실험을 서울대학교(Seoul National University, 이하 SNU)와 한국해양연구원(Korea Ocean Research & Development Institute, 이하 KORDI)의 2차원 조파수조를 이용하여 각각 수행하였다.

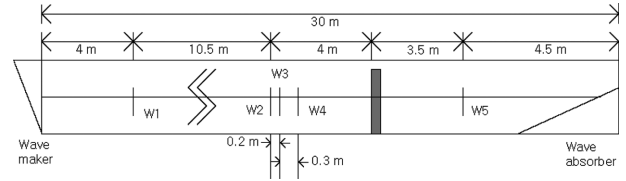
#### 4.1 서울대학교 실험

서울대학교의 수조는 길이 30 m, 폭 0.6 m, 높이 1 m의 크기로서, 피스톤 타입의 조파기와 다른 한 쪽의 경사식 소파제로 구성되어 있다. 구조물은 유공율 0.1을 가지는 두 가지 정사각형 파일로 제작되었으며, 조파기로부터 18.5 m 떨어져 설치되었다. 조파수조의 수심은 0.3 m부터 5 cm 간격으로 증가하여 0.7 m까지 변화시켜 실험하였다. 파의 주기는 1.0초에서 2.0초까지 0.2초 간격으로 증가시켜 총 6가지 주기에 대해 실험을 실시하였다. 유공벽 구조물은 주로 풍파의 침입을 막기 위해 사용되므로, 각각의 주기에 대하여 전형적인 풍파의 파형경사  $H/L=0.03$ 이 되도록 하는 파고를 사용하였다. 자세한 구조물 모형과 실험 조건은 Table 1에 제시되었다.

파고계는 총 5개가 사용되었으며, 입사파를 측정하기 위하여 조파기에서 4 m 떨어진 곳에 한 개, 반사파를 측정하기

**Table 1.** Geometrical parameters and test conditions of experiment in SNU

Width×Thickness of Piles(cm)	2×2	3×3
Porosity	0.1	
Structure Type	Vertical slit wall	
Water Depth(cm)	30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70	
Period(s)	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0	
H/L	0.03	



**Fig. 2.** Sketch of wave flume and experimental setup in SNU: (a) top view; (b) side view. W=wave gauge.

위하여 구조물 전면에 총 3개, 그리고 투과파를 측정하기 위하여 구조물의 후면으로부터 3.5 m 떨어진 곳에 한 개를 설치하였다. 반사파 측정을 위한 파고계 사이의 간격은 W2와 W3가 0.2 m, W3와 W4가 0.3 m 떨어지도록 파고계를 설치하였다. 이는 최소자승법에 기초한 3점분리법(Suh et al. 2001)을 이용하기 위한 것으로 입·반사파를 분리하여 반사율을 산정할 때 모든 실험파랑조건에 대해 적용이 가능하고 정확도 면에서도 타당한 결과를 줄 수 있도록 설정한 것이다. 실험을 수행한 서울대학교 해안공학연구실의 2차원 조파수조의 모형도는 Fig. 2에 나타나 있다.

#### 4.2 한국해양연구원 실험

서울대학교 실험에서는 하나의 유공율을 사용하였으며, 정사각형 파일만을 사용하였다. 좀 더 다양한 유공율과 정사각형 및 직사각형 파일에 대한 실험을 한국해양연구원에서 수행하였다. 한국해양연구원의 수조는 길이 53.15 m, 폭 1.0 m, 높이 1.25 m의 크기로서, 수조의 상류 쪽 13 m와 하류 쪽 7 m 구간은 양측 벽이 철재로 되어 있으며, 나머지 중앙 부분 33.15 m의 양측 벽은 강화유리로 되어 있어 거의 모든 실험구간에서 관찰이 가능하다. 연직 슬릿 유공벽의 수리특성을 효과적으로 평가하기 위하여 수조의 종방향으로 연직분할판을 설치하여 수조를 폭 0.4 m의 협수로와 폭 0.6 m의 광수로로 분리하여 유공벽은 폭 0.6 m의 광수로에 설치하였다. 협수로에는 후면 소파제 및 수로 중간 부분에 테트라포드로 사면이 완만한 소파공을 설치하였다. 해저면 경사는 조파기 전면에서는 수평이며 조파기와 모형 사이에서는 수평구간 및 경사가 완만한 구간이 있으며 구조물 전후면의 해저면은 수평이다. 구조물에 도달하는 입사파는 측면 협수로에서 관측하였으며 구조물에 의한 반사파와 투과파는 모형이 설치된 광수로에서 관측하였다.

유공벽 모형은 그 두께와 유공율을 각기 달리하여 총 15가지가 제작되었으며, 조파기로부터 40 m 떨어진 곳에 위치

**Table 2.** Geometrical parameters and test conditions of experiment in KORDI

Width×Thickness of Piles(cm)	2×2	2×4	3×1	3×3	3×5
Porosity	0.2, 0.3, 0.4				
Structure Type	Vertical slit wall				
Water Depth(cm)	40, 50, 60				
Period(s)	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0				
H/L	0.03				

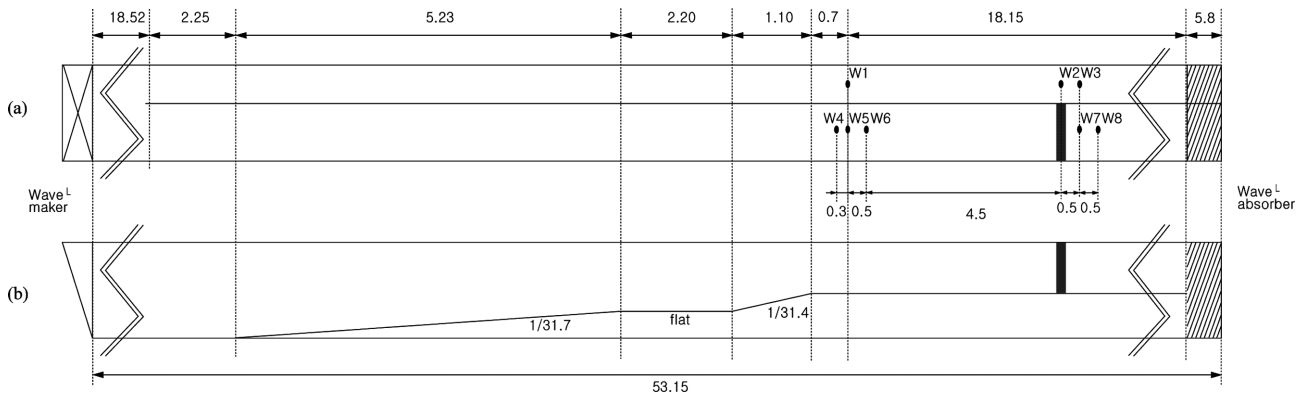


Fig. 3. Sketch of wave flume and experimental setup in KORDI: (a) top view; (b) side view. W=wave gauge.

하도록 설치하였다. 유공벽이 설치된 위치에서의 수심은 0.4 m, 0.5 m, 0.6 m로 세 가지 조건하에서 실행하였으며, 규칙 파를 조파하되 월파 및 쇄파가 발생하지 않도록 하였다. 파의 주기와 파형경사는 서울대학교의 실험과 동일하다. 한국해양연구원에서 실시한 구조물 모형과 실험의 자세한 조건은 Table 2에 제시하였다. 이 표에서 pile 이라 함은 유공벽을 구성하는 각 부재를 의미하며 pile의 폭은  $2(A-a)$ , 두께는  $b$ 를 나타낸다(Fig. 1 참조).

파고계는 총 8개를 설치하였는데, 입사파를 측정하기 위하여 협수로에 조파관에서 35, 40, 40.5 m 떨어진 곳에 1개씩 총 3개를 설치하였다. 조파관으로부터 35 m 떨어진 곳에 설치된 파고계에서는 구조물 설치 전 예비실험에서 협수로와 광수로의 파고가 동일하지 확인하기 위하여 설치하였다. 40 m와 40.5 m에 설치된 파고계는 실제 실험에서 구조물 위치의 입사파를 측정하기 위해 설치하였으며, 두 파고계에서 구한 파고를 평균하여 입사파고를 결정하였다. 또한 반사파를 측정하기 위하여 소멸파의 영향을 거의 받지 않는 위치인 방파제 전면으로부터 4.5 m 이상 떨어진 위치에 총 3개, 그리고 투과파를 측정하기 위하여 방파제의 후면으로부터 0.5, 1.0 m 떨어진 곳에 1개씩 총 2개를 설치하였다. 투과파의 측정은 두 파고계에서 구한 값을 평균하여 사용하였다. 반사파 측정을 위한 파고계 사이의 간격은 순서대로 0.3, 0.5 m가 떨어지도록 파고계를 설치하였다. 실험을 실시한 한국해양연구원 수조의 모형도는 Fig. 3에 나타나 있다.

## 5. 결과분석

각 실험 조건에서 반사율과 투과율을 측정하였고, 마찰계수를 0.1부터 0.1 간격으로 10까지 증가시키면서 얻은 수학적 모형의 결과와 측정치 사이에 가장 큰 일치지수를 보이는 마찰계수 값을 구한 결과가 Table 3에 주어졌다. 일치지수의 평균은 0.63이며, Fig. 4에 일치지수의 분포를 히스토그램으로 제시하였다.

실험 결과 중 일치지수가 가장 큰 값을 가지는 그래프를 Fig. 5에, 그리고 일치지수가 가장 작은 값을 가지는 그래프

Table 3. Summary of experimental results

$2(A-a)$ (m)	$b$ (m)	$h$ (m)	$r$	$I_a$	$f$
0.02	0.02	0.40	0.2	0.46	2.5
0.02	0.02	0.50	0.2	0.30	2.8
0.02	0.02	0.60	0.2	0.47	3.6
0.02	0.02	0.40	0.3	0.46	0.1
0.02	0.02	0.50	0.3	0.67	1.9
0.02	0.02	0.60	0.3	0.58	1.2
0.02	0.02	0.40	0.4	0.63	1.3
0.02	0.02	0.50	0.4	0.80	1.6
0.02	0.02	0.60	0.4	0.52	1.8
0.02	0.04	0.40	0.2	0.59	1.5
0.02	0.04	0.50	0.2	0.67	1.6
0.02	0.04	0.60	0.2	0.53	1.5
0.02	0.04	0.40	0.3	0.82	0.7
0.02	0.04	0.50	0.3	0.86	0.5
0.02	0.04	0.60	0.3	0.59	1.0
0.02	0.04	0.40	0.4	0.50	1.2
0.02	0.04	0.50	0.4	0.92	0.6
0.02	0.04	0.60	0.4	0.65	1.0
0.03	0.01	0.40	0.2	0.37	3.1
0.03	0.01	0.50	0.2	0.22	3.9
0.03	0.01	0.60	0.2	0.40	3.4
0.03	0.01	0.40	0.3	0.59	3.1
0.03	0.01	0.50	0.3	0.58	2.9
0.03	0.01	0.60	0.3	0.39	3.4
0.03	0.01	0.40	0.4	0.82	3.3
0.03	0.01	0.50	0.4	0.76	3.4
0.03	0.01	0.60	0.4	0.88	4.1
0.03	0.03	0.40	0.2	0.60	1.5
0.03	0.03	0.50	0.2	0.71	1.7
0.03	0.03	0.60	0.2	0.67	1.5
0.03	0.03	0.40	0.3	0.68	1.0
0.03	0.03	0.50	0.3	0.68	0.8
0.03	0.03	0.60	0.3	0.69	0.9
0.03	0.03	0.40	0.4	0.71	0.7
0.03	0.03	0.50	0.4	0.68	0.7
0.03	0.03	0.60	0.4	0.62	0.8
0.03	0.05	0.40	0.2	0.76	1.1
0.03	0.05	0.50	0.2	0.83	1.0
0.03	0.05	0.60	0.2	0.88	1.1
0.03	0.05	0.40	0.3	0.79	0.4
0.03	0.05	0.50	0.3	0.82	0.3

Table 3. (Continued)

$2(A-a)$ (m)	$b$ (m)	$h$ (m)	$r$	$I_a$	$f$
0.03	0.05	0.60	0.3	0.78	0.8
0.03	0.05	0.40	0.4	0.92	0.6
0.03	0.05	0.50	0.4	0.92	0.3
0.03	0.05	0.60	0.4	0.66	0.4
0.02	0.02	0.30	0.1	0.61	3.7
0.02	0.02	0.35	0.1	0.61	3.1
0.02	0.02	0.40	0.1	0.66	3.0
0.02	0.02	0.45	0.1	0.47	3.1
0.02	0.02	0.50	0.1	0.56	4.0
0.02	0.02	0.55	0.1	0.55	4.2
0.02	0.02	0.60	0.1	0.56	3.5
0.02	0.02	0.65	0.1	0.50	4.7
0.02	0.02	0.70	0.1	0.34	3.8
0.03	0.03	0.30	0.1	0.57	2.5
0.03	0.03	0.35	0.1	0.60	2.4
0.03	0.03	0.40	0.1	0.77	3.3
0.03	0.03	0.45	0.1	0.27	5.0
0.03	0.03	0.50	0.1	0.63	2.6
0.03	0.03	0.55	0.1	0.53	2.7
0.03	0.03	0.60	0.1	0.57	2.6
0.03	0.03	0.65	0.1	0.72	2.8
0.03	0.03	0.70	0.1	0.79	2.9

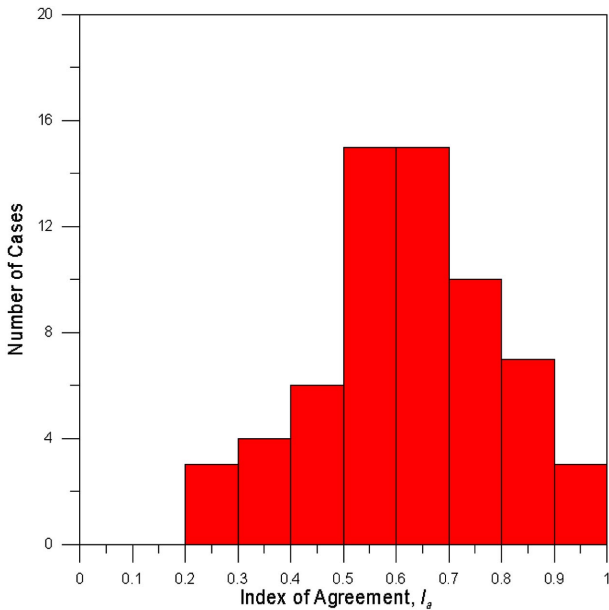


Fig. 4. Histogram of index of agreement.

를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 일치지수가 큰 값을 가질수록 수학적 모형과 실험의 결과 값이 잘 일치함을 알 수 있다.

또한 앞에서 언급한 바와 같이 Mei et al.(1974)의 투수 매개변수 계산방법은 장파로 갈수록(즉,  $kh$ 가 영에 가까이 갈수록) 투과율은 작아지고 반사율은 증가하는 틀린 결과를 나타낸다.

Fig. 7과 Fig. 8은 마찰계수  $f$ 를 상대두께  $b/h$  또는 유공율  $r$ 의 함수로 나타낸 것이다.  $b/h$ 와  $r$ 이 증가함에 따라서 마찰

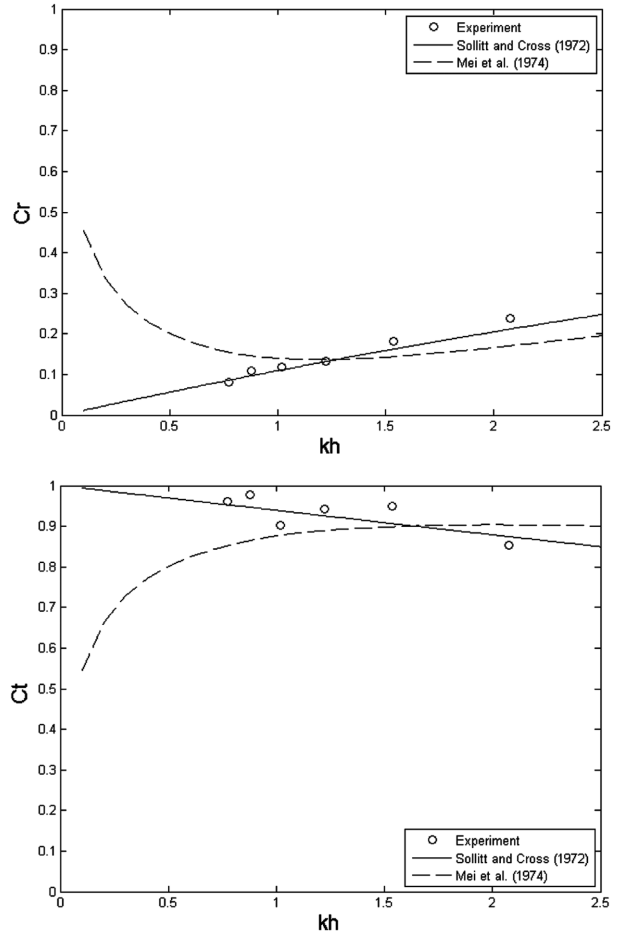


Fig. 5. Comparison of predicted hydrodynamic coefficients with experimental results as function of  $kh$  for pile width = 2 cm, pile thickness = 4 cm, porosity = 0.4, water depth = 50 cm, and index of agreement = 0.92.

계수  $f$ 는 작아지는 경향을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 마찰계수와  $b/h$ 와  $r$ 의 함수적인 관계를 이끌어 내기에는 무리가 있다.

Fig. 9은 마찰계수  $f$ 를  $b/h$ 와  $r$ 의 곱 형태인  $br/h$ 의 함수로 나타낸 것이며  $br/h$ 가 증가함에 따라서 마찰계수가 작아지는 경향을 가지고 있다. 위의 Fig. 6과 Fig. 7에 비해서 보다 일정한 경향성을 가지고 있으며, 추세선과 잘 일치하고 있다. 추세선과 같이 마찰계수  $f$ 를  $br/h$ 의 거듭제곱의 함수로 표현하면, 경험식은 아래와 같다.

$$f = 0.029 \times (br/h)^{-0.88} \text{ at } 0.0029 \leq br/h \leq 0.05 \quad (22)$$

상관계수는  $R^2=0.70$ 로 주어진다.

또한 다른 연구자들의 실험 결과도 참고하여 조일형과 김남형(2002), Issacson et al.(1998), Kakuno and Liu(1993), Li et al.(2006) 등의 논문에서 구한 반사율과 투과율을 사용하여, 마찰계수를 구하였다. 각 연구자들의 실험조건과 결과는 Table 4에 제시하였다.

Fig. 10에는 주어진 모든 실험 결과를 종합하여 마찰계수  $f$ 와  $br/h$ 의 관계를 나타내었다. Fig. 9에서와 같이 마찰계수

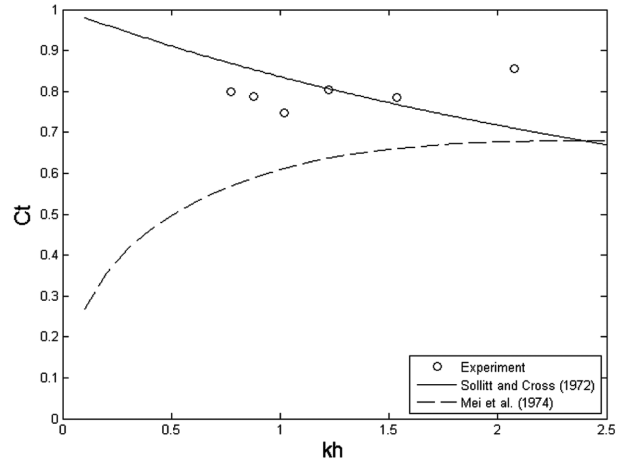
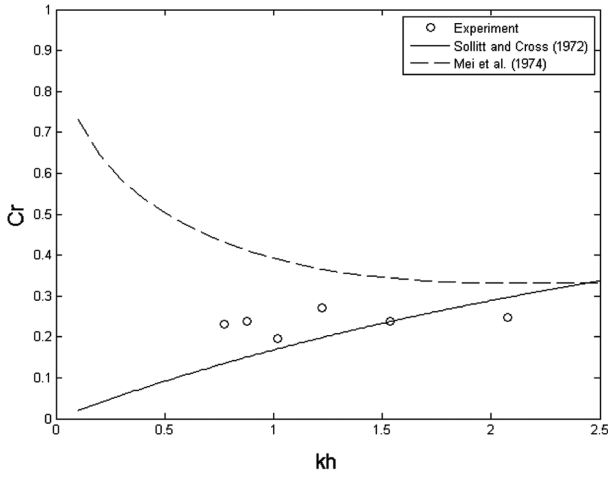


Fig. 6. Comparison of predicted hydrodynamic coefficients with experimental results as function of  $kh$  for pile width = 3 cm, pile thickness 1 cm, porosity = 0.2, water depth = 50 cm, and index of agreement = 0.22.

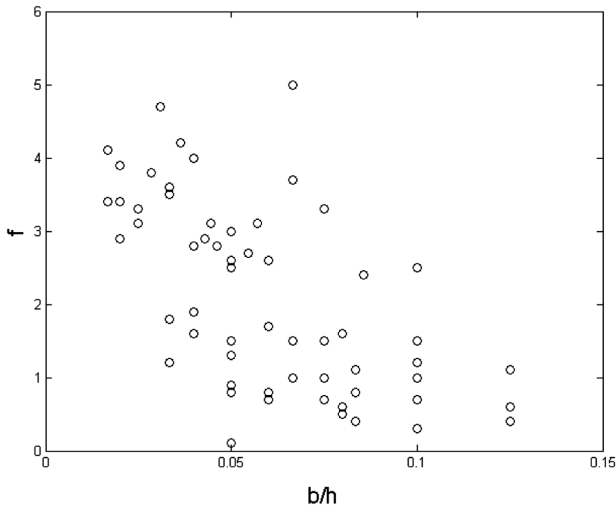


Fig. 7. Relationship between  $b/h$  and  $f$ .

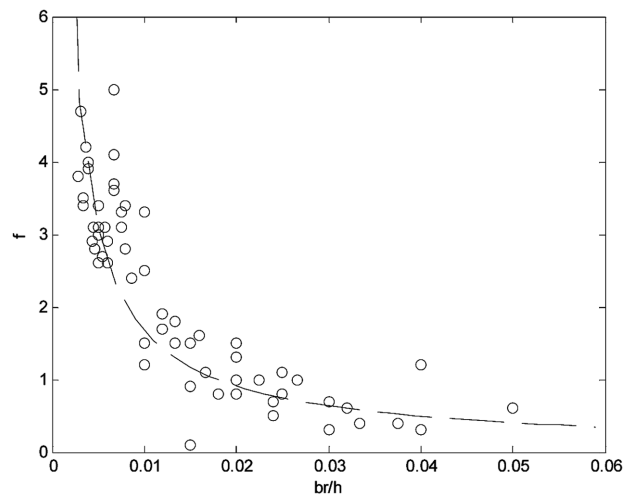


Fig. 9. Relationship between  $br/h$  and  $f$ .

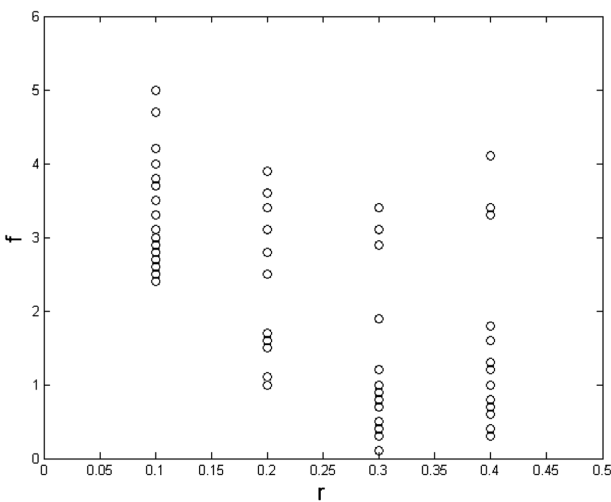


Fig. 8. Relationship between  $r$  and  $f$ .

$f$ 를  $br/h$ 의 거듭제곱의 함수로 표현하면, 경험식은 아래와 같다.

$$f = 0.037 \times (br/h)^{-0.84} \text{ at } 0.0015 \leq br/h \leq 0.075 \quad (23)$$

Table 4. Summary of experimental results of other researchers

Researchers	$b$ (m)	$h$ (m)	$r$	$I_a$	$f$
Kakuno and Liu (1993)	0.05	0.5	0.05	0.89	3.4
	0.05	0.5	0.1	0.93	0.4
	0.05	0.5	0.15	0.93	0.5
	0.05	0.5	0.25	0.95	0.4
	0.15	0.5	0.1	0.81	0.6
	0.15	0.5	0.15	0.80	0.7
Isaacson et al. (1998)	0.013	0.45	0.05	0.96	2.5
	0.013	0.45	0.2	0.70	3.4
Cho and Kim (2002)	0.019	0.6	0.286	0.57	1.6
Li et al. (2006)	0.01	0.35	0.1	0.89	9.1
	0.01	0.35	0.2	0.88	8.9
	0.01	0.35	0.3	0.81	8.2
	0.01	0.35	0.4	0.89	7.6

상관계수는  $R^2=0.60$ 로 주어진다. 앞에서 구한 식 (21)과 약간의 차이를 보이고 있으나, 대체적으로 비슷한 경향성을 가짐을 확인할 수 있다.

위의 경험식 (23)을 이용하여 Fig. 11에 주어진 모양의 커

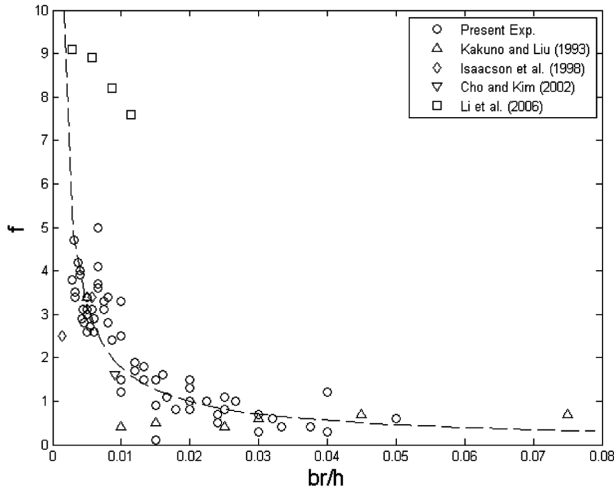


Fig. 10. Comparison of predicted  $f$  with experimental results as function of  $br/h$ .

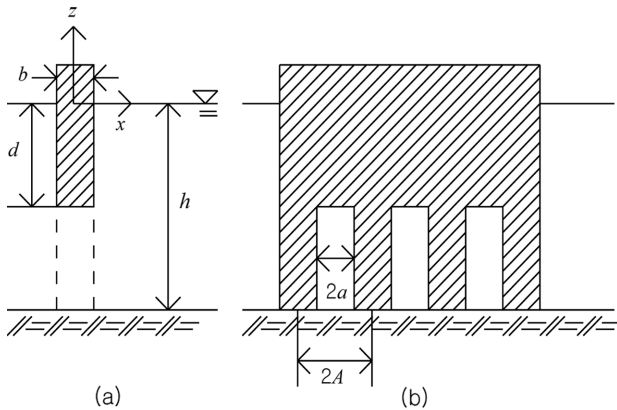


Fig. 11. Definition sketch of curtain-wall pile breakwater: (a) side view; and (b) front view.

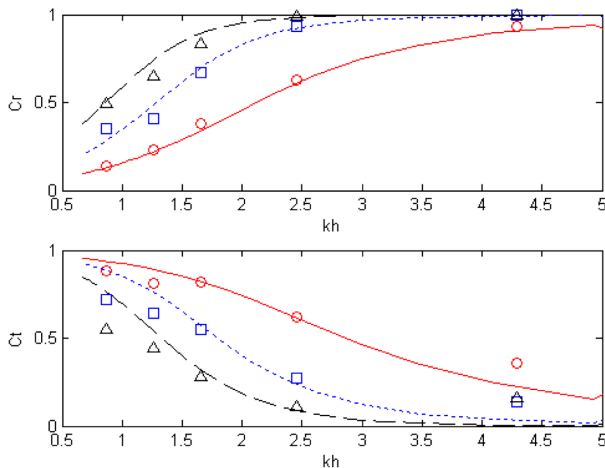


Fig. 12. Comparison of predicted hydrodynamic coefficients with experimental results as function of  $kh$  for various drafts of upper wall;  $f=0.7$ : predicted: (—)  $d/h=0.2$ , (---)  $d/h=0.4$ , (---)  $d/h=0.6$ . Measured: (○)  $d/h=0.2$ , (□)  $d/h=0.4$ , (△)  $d/h=0.6$ .

튼월-파일 방파제에 적용하였다. 커튼월-파일 방파제의 실험 데이터는 Suh et al.(2006)을 인용하였다. Suh et al.(2006)의 실험은 길이 104 m, 폭 3.7 m, 높이는 4.6 m를 가지는 조파

수조에서 수행되었으며, 실험 수심은 2.4 m, 방파제의 두께는 0.143 m, 파일 부분의 유공율은 0.5로 주어지므로,  $f$  값은 0.7로 계산된다. Fig. 12에는 위의 마찰계수를 사용하여 계산한 결과와 실험결과를 비교하였다. 계산에 사용된 수학적 모형은 Suh et al.(2006)의 논문에 설명되어 있으며, 이는 위쪽의 커튼월에서의 추가적인 정합조건(즉,  $\partial\phi_1/\partial x = \partial\phi_2/\partial x = 0$  for  $-d \leq z \leq 0, x=0$ )만 빼고 나머지는 2절에 설명한 모형과 동일하다. Fig. 12에서 보듯이 커튼월-파일 방파제와 같은 연직 슬릿을 포함하는 형태의 구조물에서도 본 연구에서 주어진 경험식을 사용하였을 때 그 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

## 6. 결 론

유공벽에서의 투수 매개변수를 계산하기 위해 Sollitt and Cross(1972)에 의해 제안된 방법이 많이 쓰이고 있다. 하지만 마찰계수  $f$  값은, 실험치와 예측치와의 비교를 통해 결정해야 한다. 따라서 본 연구에서는 다양한 구조적 또는 수리적 조건하에서 실험을 수행하여 다른 연구자들의 실험 결과를 종합하여 마찰계수와 무차원 변수  $br/h$ 와의 관계를 고찰하고, 다음과 같은 경험식을 제시 하였다:  $f=0.037 \times (br/h)^{-0.84}$ . 이 식을 이용하여 커튼월-파일 방파제에서의 파의 반사율 및 투과율 계산에 적용한 결과, 계산치와 실험치가 잘 일치함을 보였다. 또한 제안된 경험식은 Li et al.(2006)의 식보다 적용 범위가 넓다.

## 감사의 글

본 논문은 해양수산부에서 시행한 “해양한국발전프로그램(KSGP) 연구개발사업”과 서울대학교 BK21 안전하고 지속가능한 사회기반건설 사업단의 지원을 받았습니다. 본 연구는 서울대학교 공학연구소에서 수행하였습니다. 본 연구의 실험을 위한 한국해양연구소의 지원에 감사를 드립니다. 특히 실험을 도와준 장세철 씨에게 감사합니다.

## 참고문헌

서경덕, 지창환, 김열우 (2008). 연직 슬릿 유공벽의 투수계수 계산 방법의 비교. 제 5회 한국유체공학술대회 논문집, 제주, 506-509.

조일형, 김남형 (2002). 직접 슬릿판에 의한 반사율과 투과율 해석. 한국해양해양공학회지, 16(3), 1-7.

Bennett, G.S., McIver, P. and Smallman, J.V. (1992). A mathematical model of a slotted wavescreen breakwater. Coastal Eng., 18, 231-249.

Hagiwara, K. (1985). Analysis of upright structure for wave dissipation using integral equation. Proc., 19th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, 3, 2810-2826.

Hossain, A., Kioka, W. and Kitano, T. (2001). Transmission of long waves induced by short-wave groups through a composite



- breakwater. *Coastal Eng. J.*, 43, 83-97.
- Isaacson, M., Premasiri, S. and Yang, G. (1998). Wave interactions with vertical slotted barrier. *J. Waterw., Port, Coastal, and Ocean Eng.*, 124, 118-126.
- Kakuno, S. and Liu, P.L.-F. (1993). Scattering of water waves by vertical cylinders. *J. Waterw., Port, Coastal, and Ocean Eng.*, 119(3), 302-322.
- Kim, B.H. (1998). Interaction of waves, seabed and structures. PhD dissertation, Seoul National Univ., Seoul. Korea., 5, 142-146.
- Li, Y., Liu, Y. and Teng, B. (2006). Porous effect parameter of thin permeable plates. *Coastal Eng. J.*, 48, 309-336.
- Losada, I.J., Losada, M.A. and Baquerize, A. (1993). An analytical method to evaluate the efficiency of porous screens as wave dampers. *Applied Ocean Research*, 15, 207-215.
- Mei, C.C., Liu, P.L.-F. and Ippen, A.T. (1974). Quadratic loss and scattering of long waves. *J. Waterw., Harbors Coastal Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 100, 217-239.
- Mei, C.C. (1983). *The applied dynamics of ocean surface waves*, Wiley, Newyork.
- Park, W.S., Kim, B.H., Suh, K.D. and Lee, K.S. (2000). Scattering of irregular waves by vertical cylinders. *Coastal Eng. J.*, 42, 253-271.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. and Flannery, B.P. (1992). *Numerical recipes in FORTRAN: The art of scientific computing*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Sollitt, C.K. and Cross, R.H. (1972). Wave transmission through permeable breakwaters. *Proc., 13th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE*, 3, 1827-1846.
- Suh, K.D., Park, W.S. and Park, B.S. (2001). Separation of incident and reflected waves in wave-current flumes. *Coastal Eng.*, 43, 149-159.
- 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. *Proc. 28th Conf. on Coastal Eng.*, 3, 1709-1721.
- Suh, K.D., Shin, S. and Cox, D.T. (2006). Hydrodynamic characteristics of pile-supported vertical wall breakwaters. *J. Waterw., Port, Coastal, and Ocean Eng.*, 133(3), 118-126.
- Willmott, C.J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2, 184-194.
- Yu, X. (1995). Diffraction of water waves by porous breakwaters. *J. Waterw., Port, Coastal, and Ocean Eng.*, 121, 275-282.
- Zhu, S. and Chwang, A.T. (2001). Analytical study of porous wave absorber. *J. Eng. Mech.*, 127, 326-332.

---

원고접수일: 2009년 8월 4일

수정본채택: 2010년 1월 18일

게재확정일: 2010년 1월 20일