

## 수평형 타공판의 소파특성 Wave Absorbing Characteristics of a Horizontal Submerged Punching Plate

조일형\*  
Il-Hyoung Cho\*

**要 旨** : 본 논문에서는 수면 밑에 잠긴 수평형 타공판의 소파특성을 이론계산과 모형실험을 통하여 살펴보았다. 타공판은 일정한 크기의 구멍이 균일하게 배열된 형태로, 파가 타공판 위를 통과하면서 타공판의 구멍을 통하여 강한 제트 흐름이 형성되면서 파 에너지가 소멸되는 특징을 가지고 있다. 이론해석 방법으로 선형파 이론에 근거한 고유함수전개법을 사용하였다. 타공판을 통과하는 유체의 법선방향속도는 타공판 전후의 압력차에 선형적으로 비례한다는 Darcy의 법칙을 가정하였다. 이때 공극율 계수라 불리는 비례상수는 타공판의 공극율과 밀접한 관계가 있다. 공극율 계수와 공극율사이의 함수 관계식을 얻기 위하여 수직벽 앞에 놓여진 6개의 서로 다른 공극율을 가진 타공판에 대하여 규칙파중에서 반사율을 계측하였다. 해석결과와 모형실험결과를 비교하여 공극율 계수와 타공판의 공극율사이에는 선형관계( $b=57.63P-0.9717$ )가 있음을 밝혔다. 또한 최대 소파성능을 발휘하는 타공판의 공극율은 0.1근방이며, 잠긴깊이의 범위는  $d/h \leq 0.2$ 임을 확인하였다.

**핵심용어** : 소파장치, 타공판, 공극율 계수, 공극율, 반사율, 모형실험, 고유함수전개법

**Abstract** □ In this paper, wave absorbing characteristics of a horizontal submerged punching plate are investigated throughout the calculation and the experiment. The punching plate with the array of circular holes can force the flow to separate and to form eddies of high vorticity and cause significant energy loss. As an analytic tool, the linear water wave theory and the eigenfunction expansion method is applied. Darcy's law that the normal velocity of the fluid passing through the punching plate is linearly proportional to the pressure difference between two sides of the punching plate is assumed. The proportional constant called the porous coefficient is deeply dependent to the porosity. To obtain the relationship between the porosity and the porous coefficient, the systematic model test for the punching plates with 6 different porosities is conducted at 2-dimensional wave tank. It is found that the porous coefficient is linearly proportional to the porosity( $b=57.63P-0.9717$ ). It is also noted that the optimal porosity value is near  $P=0.1$  and the optimal range of submergence depth is  $d/h \leq 0.2$  within entire frequency range.

**Keywords** : wave absorber, punching plate, porous coefficient, porosity, reflection coefficients, model test, eigenfunction expansion method

### 1. 서 론

해양공학에 관련된 문제를 접근하는 방법은 이론해석, 수치해석 및 수리모형실험으로 정리될 수 있다. 최근 컴퓨터의 발달로 수치실험기법이 급격한 발전을 보이고 있으나, 실험역의 복잡한 환경특성을 모두 고려한 수치모델은 아직 개발되지 못한 상태이므로 수리모형실험은 해양환경

특성을 규명하는데 있어 여전히 중요한 기법의 하나로 남아있다. 수리모형실험에서는 원하는 해양환경 특성을 수조 내에서 정확히 재현하는 것이 매우 중요하다. 그러나 수조 크기의 제한으로 조파기(wavemaker)로부터 발생된 파는 수조의 벽들로부터 반사되어, 관측영역에서의 파랑 및 물 입자 운동은 시간이 경과될수록 의도한 파형과는 다른 양상을 보인다. 이는 다방향파(multi-directional waves)

\*제주대학교 해양산업공학부(Faculty of Marine Industrial Engineering, Cheju National University, Ara 1, Jeju 690-756, Korea. cho0904@cheju.ac.kr).

또는 불규칙파(irregular waves)의 경우 더욱 심하게 나타난다. 따라서 실험 결과의 신뢰도를 높이고 가용 영역의 극대화를 위한 효율적인 소파장치의 개발이 절실히 요구된다.

지금까지 침투성판(porous plate)을 이용한 소파장치의 소파성능을 이론적으로 해석한 연구는 많다. 대부분 연구들은 침투성판에서의 속도는 판 전후의 압력차에 선형적으로 비례한다는 Darcy의 법칙을 따른다는 가정으로부터 출발하였다. 이때 비례상수는 복소수 값을 가지며 항력계수(drag coefficient)라 부르는 실수부는 박리(separation)에 의한 에너지 손실을 나타내며, 관성계수(inertial coefficient)라 부르는 허수부는 속도와 압력차의 위상차를 나타낸다. 이때 실수부가 허수부에 비하여 아주 크다면 위상차는 없게 되며, 비례상수는 실수값을 취한다. Darcy의 법칙에 따라 직립형 침투성판에 의한 소파성능을 연구한 논문들은 다음과 같다. 먼저 Tuck(1975)은 침투성판에서의 경계조건으로 Darcy의 법칙을 적용하여, 심해에 설치된 얇은 침투성판에 의한 파의 투과율을 해석하였다. Evans(1990)는 좁은 수조에 설치된 여러 장의 얇은 직립 침투성판들에 의한 파의 반사율을 계산하였다. 그는 공극율이 큰 판을 앞에 두고 뒤로 갈수록 공극율이 작은 판들을 설치했을 때 반사파의 에너지는 최소가 된다는 것을 계산을 통하여 증명하였다. Bennett *et al.*(1992) 등은 직립형 슬릿판(slotted plates)이 놓여 있을 때 반사율과 투과율을 계산하였다. 슬릿판의 외부영역에서는 선형포텐셜 이론을 적용하였고, 슬릿판 내부영역에서는 슬릿판에 적용할 경계조건을 유도하였는데, 슬릿판 전후의 압력차를 속도의 제곱에 비례하는 항력항과 가속도에 비례하는 관성항의 합으로 표현하였다. Isaacson *et al.*(1998)은 얇은 투과성 슬릿판이 놓여 있을 때 고유함수 전개법(eigenfunction expansion method)을 사용하여 반사율과 투과율 계산하였고, 실험결과와 서로 비교하였다.

직립형 침투성판을 사용했을 때의 가장 큰 문제점 중 하나는 원하는 소파효율을 얻기 위해서는 여러장의 침투성판을 배열해야한다는 점이다(Twu and Lin, 1991). 이러한 이유로 소파장치가 차지하는 공간이 커지며 배열된 침투성판들 사이에 공진현상(resonance phenomena)이 발생하여 특정한 주파수에서 소파효율이 급격히 나빠지는 문제점을 가지고 있다. 이와 같은 단점들을 극복하면서, 침투성판을 이용한 소파장치의 소파효율을 극대화시키기 위하여 수평형 소파장치를 또 다른 대안으로 제안할 수 있다. 수평형 소파장치는 파 에너지가 집중된 수면에서 일정한 깊이로 잠기게 설치된다. 수면 밑에 잠긴 수평형 침

투성판과 파랑의 상호작용문제는 직립형 침투성판의 경우보다 더 복잡하다. 이와 관련된 연구로 McIver(1985)는 수면 밑에 놓인 불투과성 수평판에 의한 파의 산란문제를 다루었다. Cho and Kim(1998)은 수면 밑에 수평형 유연막이 놓여 있을 때 유연막에 의한 반사율과 투과율 그리고 막의 거동특성을 이론해와 수치해를 통하여 살펴보았다. Chwang and Wu(1994)는 수평으로 설치된 침투성판에 의한 반사율과 투과율을 경계요소법을 사용하여 수치적으로 구하였다. Wu *et al.*(1998)는 수직벽 앞에 놓인 수평형 침투성판에 의한 파의 반사율을 고유함수전개법을 사용하여 이론적으로 해석하였다. 그는 침투성판에서의 속도는 침투성판 사이의 압력 차에 선형적으로 비례하며, 비례상수는 실수값을 갖는다고 가정하였다. 공극율 계수라 부르는 비례상수는 침투성판의 특성을 나타내는 중요한 변수로 침투성판의 공극율과 밀접한 관련이 있다. 그의 계산결과에 의하면 적절한 공극율 계수를 가진 판은 반사율을 현저히 감소시킬 수 있음을 밝혔다. 그러나 체계적인 수리모형시험을 수행하지 않았기 때문에 공극율 계수와 침투성판의 공극율 사이에 어떠한 관계식이 성립하는가에 대해서는 밝히지 못하였다.

본 연구에서는 최적의 소파효율을 갖는 소파장치를 개발하기 위하여 Wu *et al.*(1998)가 사용한 수직벽 앞에 침투성 수평판이 일정한 깊이에 잠겨있는 해석모델에 대하여 이론해석과 함께 체계적인 모형실험을 수행하였다. 모형실험에서는 일정한 직경의 원형 구멍이 일정한 간격을 갖고 배열된 형태인 타공판(punching plate)을 침투성판으로 사용하였다. 이론해석에서의 공극율 계수와 실제 타공판의 공극율 사이의 관계식을 구하기 위하여 2차원 수조에서 공극율이 서로 다른 6개의 타공판을 가지고 일련의 모형 실험을 수행하였다. 또한 공극율은 같지만 구멍의 크기가 다를 때의 반사율 특성을 모형실험을 통하여 살펴 보았다. 잠긴 깊이와 공극율 그리고 입사파의 주파수를 바꿔가면서 반사율의 특성을 살펴보았고, 이로부터 최대 소파성능을 발휘하는 최적의 공극율과 잠긴 깊이의 범위를 구하였다.

## 2. 이론해석

수직벽 앞에 타공판이 수면 밑 일정한 깊이에 수평으로 잠겨 있을 때 타공판에 의한 소파성능을 이론해석을 통하여 살펴보고자 한다.  $x=0$ 에 불투과성 수직벽이 놓여 있고, 그 앞에 타공판이 수평으로 잠겨있는 모델을 계산

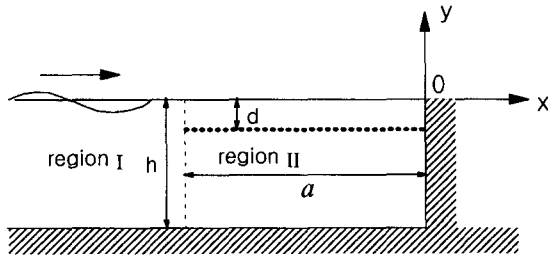


Fig. 1. Definition sketch of a submerged horizontal punching plate with a vertical wall.

모델로 잡았다. 타공판의 길이를  $a$ , 잠긴깊이를  $d$ 라 하였고, 설치수심은  $h$ 이다(Fig. 1). 타공판에서의 유체의 법선 방향 속도는 타공판 사이의 압력차와 선형적으로 비례한다는 Darcy의 법칙을 가정하였다. 파가 주파수  $\omega$ 를 갖고 조화운동을 한다면 속도포텐셜을  $\Phi(x, y, t) = \text{Re}[\phi(x, y)e^{-i\omega t}]$ 로 쓸 수 있다. 공간 함수인 속도포텐셜( $\phi$ )은 아래와 같은 2차원 Laplace 방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \tag{1}$$

경계조건식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} - v\phi = 0 \left( v = \frac{\omega^2}{g} \right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \text{ on } y = -h \tag{3}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \text{ on } x = 0 \tag{4}$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} + ik_1 \phi \right) = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial \phi^+}{\partial y} = \frac{\partial \phi^-}{\partial y} = i\sigma(\phi^- - \phi^+) \text{ on punching plate} \tag{6}$$

식 (6)에서 위첨자  $\pm$ 는 각각 타공판의 윗면과 아랫면을 의미한다.  $\sigma = \frac{\rho b_o \omega}{\mu}$ 는 타공판의 특성을 나타내는 계수로서 타공판의 공극율과 국부형상(local shape)에 밀접한 관련이 있다(Chwang and Wu, 1994). 여기서  $b_o$ 는 길이차원을 갖는 재질 상수(material constant)이며,  $\rho$ 와  $\mu$ 는 각각 유체의 밀도와 동점성 계수를 뜻한다. 실제 계산에서는 아래에 정의된 공극율 계수(porous coefficient)를 사용하였다.

$$b = \frac{2\pi\sigma}{k_1} = \frac{2\pi\rho\omega b_o}{k_1\mu} \tag{7}$$

$b \rightarrow 0$ 는 불투과성 판을 의미하며,  $b \rightarrow \infty$ 는 입사파에 전혀 영향을 주지 않는 가상의 판이 놓여 있는 경우이다. 단위 진폭을 가진 입사파 포텐셜  $\phi_I$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_I(x, y) = -\frac{ig}{\omega} \frac{\cosh k_1(y+h)}{\cosh k_1 h} e^{ik_1 x} \tag{8}$$

여기서  $g$ 는 중력가속도,  $k_1$ 은 입사파의 파수로 아래와 같은 선형 분산식(dispersion relation)을 만족한다.

$$\frac{\omega^2}{g} = k_1 \tanh k_1 h \tag{9}$$

고유함수 전개법을 적용하기 위하여 유체영역을 Fig. 1과 같이 두 개의 영역으로 나눈다. 영역 I은  $x \leq -a, -h < y < 0$ 로 정의되고, 영역 II는  $-a < x < 0, -h < y < 0$ 로 정의된다. Laplace방정식과 경계조건식 식 (2)~식 (5)를 만족하는 각 영역에서의 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\phi^{(1)} = -\frac{ig}{\omega} \left\{ e^{-k_{10}x} f_{10}(y) + \sum_{n=0}^{\infty} a_n e^{k_{1n}(x+a)} f_{1n}(y) \right\} \tag{10}$$

$$\phi^{(2)} = -\frac{ig}{\omega} \sum_{n=0}^{\infty} b_n \cos k_{2n} x f_{2n}(y) \tag{12}$$

여기서,  $k_{10} = -ik_1, k_{20} = -ik_2$  이다.

고유함수  $f_{1n}(y)$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$f_{1n}(y) = \begin{cases} \frac{\cosh k_1(y+h)}{\cosh k_1 h} & n=0 \\ \frac{\cos k_{1n}(y+h)}{\cos k_{1n} h} & n \geq 1 \end{cases} \tag{12}$$

이때 고유치  $k_1$ 과  $k_{1n}$ 은 다음 방정식의 근이다.

$$\begin{cases} k_1 \tanh k_1 h = \frac{\omega^2}{g} & n=0 \\ k_{1n} \tan k_{1n} h = -\frac{\omega^2}{g} & n \geq 1 \end{cases} \tag{13}$$

영역 II에서의 고유함수  $f_{2n}(y)$ 와 고유치  $k_{2n}$ 은 타공판에서의 경계조건식 식 (6)이 추가되므로 좀더 복잡한 고유치 문제를 만족한다.

$$\frac{d^2 \tilde{f}}{dy^2} - \chi^2 \tilde{f} = 0$$

$$\frac{d\tilde{f}}{dy} - v\tilde{f} = 0 \text{ on } y = 0$$

$$\frac{d\tilde{f}}{dy}\Big|_{y=-d+0} = \frac{d\tilde{f}}{dy}\Big|_{y=-d-0} = i\sigma(\tilde{f}|_{y=-d-0} - \tilde{f}|_{y=-d+0})$$

$$\frac{d\tilde{f}}{dy} = 0 \quad \text{on } y = -h \quad (14)$$

여기서  $0 < \sigma < \infty$ 이다. 복소수 값을 갖는 고유치  $\chi$ 은 다음 방정식의 해이다.

$$\chi \sinh \chi(h-d)(v \cosh \chi d - \chi \sinh \chi d) = i\sigma(v \cosh \chi h - \chi \sinh \chi h) \quad (15)$$

식 (15)는 무한개의 복소해(complex roots)를 주며, 복소수  $\chi$ 를  $\chi_1 + i\chi_2$ 로 놓고 식 (15)에 대입한 후 실수부와 허수부로 각각 나누면 두 개의 방정식을 유도할 수 있다. 식 (15)는 비선형 방정식이므로 Newton-Raphson 축차법(iteration method)을 사용하여 수치적으로 해를 구한다. 비선형 방정식을 풀어  $\chi$ , 즉  $k_{2n}$ 을 구하면 고유함수  $f_{2n}(y)$ 는

$$f_{2n}(y) = \begin{cases} \sinh k_{2n}(h-d)(k_{2n} \cosh k_{2n}y + v \sinh k_{2n}y) & -d \leq y \leq 0 \\ (v \cosh k_{2n}d - k_{2n} \sinh k_{2n}d) \cosh k_{2n}(y+h) & -h \leq y \leq -d \end{cases} \quad (16)$$

이다. 간단한 적분과정을 통하여 살펴보면, 고유함수  $f_{2n}(y)$ 는 고유함수의 특징인 직교성(orthogonality)을 가지고 있음을 알 수 있다.

식 (10), 식 (11)의 미지수  $a_n, b_n(n=0,1,2,\dots)$ 는  $x=-a$ 에서 영역 I과 영역 II의 속도포텐셜과 수평방향 속도가 서로 같다는 정합조건식으로부터 구해진다. 미지수  $a_n, b_n(n=0,1,2,\dots)$ 을 구하는 유도과정은 Wu *et al.*(1998)의 논문에 자세히 소개되어 있다.

입사파의 진폭이 A일 때 반사율과 타공판 위의 파형식은 다음 식으로부터 얻어진다.

$$R_f = |a_0 e^{k_{10}a}|, \quad \eta = A \sum_{n=0}^{\infty} b_n \cos k_{2n}x f_{2n}(0) \quad (17)$$

### 3. 모형실험

모형실험은 2차원 조파수조(길이 20 m, 폭 0.6 m, 깊이 1.0 m)에서 수행되었다. 전체적인 실험장치의 구성도는 Fig. 2와 같다. 입사파의 주파수는 0.5 Hz에서 1.4 Hz까지 범위에서 안정적으로 선형과 특성을 보이는 파기울기(wave steepness)를 사용하였다. 정확도  $\pm 0.1$  cm의 저항식 파고계를 통해 파고를 측정하였다. 입사파와 반사파를 분리하기 위하여 Mansard and Funke(1980)가 제안한 최소자승법(least square method)을 사용하였다. 이 방법은 가정된 파형과 계측된 파형의 오차의 제곱의 합이 최소가 되도록 미지수를 구하는 방법으로 최소한 3개의 파고계가 필요하다. 본 실험에서는 타공판 전면에 4개의 파고계를 설치하였다. 설치 위치는 조파기 쪽에 가장 가까운 것을 타공판으로부터 4 m, 나머지 파고계들을 첫 번째 파고계로부터 각각 40 cm, 69.7 cm, 86.4 cm 지점에 위치시켰다.

실험에 사용한 타공판은 일정한 직경을 갖는 원형 구멍이 일정한 간격을 갖고 배열된 형태로 판의 길이는 60 cm, 두께는 1.6 mm이다. 타공판의 공극율은 뿔린 부분의 면적을 전체면적으로 나눈 값으로 정의되며, 6개의 서로 다른 공극율( $P=0.0567, 0.0740, 0.1008, 0.2267, 0.3000, 0.4031$ )에 대하여 실험을 수행하였다. 실험에 이용한 타공판의 제원은 Table 1에 수록하였다. 타공판은 4개의 수직 기둥에 의해 원하는 잠긴깊이에서 고정된다. 타공판 후면에는 수직판을 설치하였다.

공극율 계수는 타공판의 공극율과 국부형상과 밀접한 관련이 있다. 타공판 구멍의 크기가 작고 구멍의 배열이 균일하다면 공극율 계수는 국부형상보다는 공극율에 더욱 관련이 있을 것이다. 실험에서 사용한 타공판의 공극율에 해당되는 공극율 계수를 찾기 위하여 공극율 계수  $b$ 를 바꿔가면서 계측된 반사율과 가장 가까운 반사율 곡선을 찾

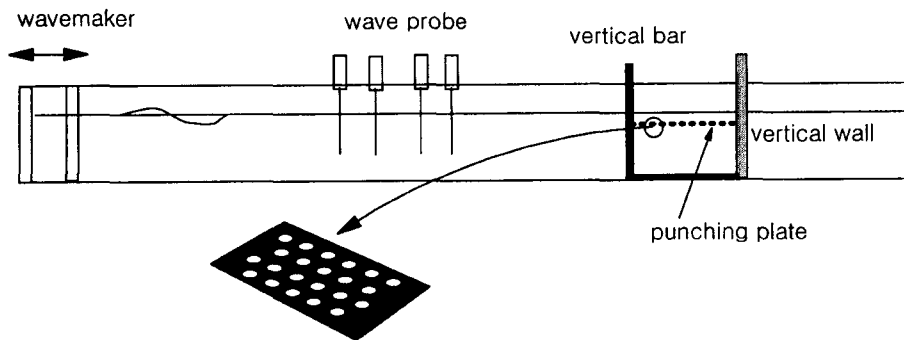


Fig. 2. Experimental set-up for measuring the reflection coefficients.

Table 1. Specification of punching plates used at experiment

	구멍크기	구멍간의 거리
$P=0.0567$	2 mm	8 mm
$P=0.0740$	2 mm	7 mm
$P=0.1008$	2 mm	6 mm
	4 mm	12 mm
	8 mm	24 mm
	12 mm	36 mm
$P=0.2267$	2 mm	4 mm
	5 mm	10 mm
$P=0.2799$	2 mm	3.6 mm
$P=0.3000$	4 mm	7 mm
$P=0.4031$	4 mm	6 mm

았다. 이를 수식으로 설명하면 다음과 같다.

$$S = \sum_{i=1}^M [R(f_i, P) - \bar{R}(f_i, b)]^2 \quad (18)$$

여기서,  $f_i$ 는 실험에서 사용한 주파수를 의미하며,  $M$ 은 주파수의 총 개수이다.  $R(f_i, P)$ 는 실험에서 사용한 공극율( $P$ )에 대한 측정된 반사율이며,  $\bar{R}(f_i, b)$ 는 계산에서 사용한 공극율 계수( $b$ )에 대한 계산된 반사율이다. 위에 주어진 식을 이용하여  $S$ 가 최소가 되는 공극율 계수( $b$ )를 찾는다.

#### 4. 결과 및 해석

Fig. 3은 고유함수의 개수( $N$ )에 따른 반사율 곡선의 수렴도를 보여주고 있다. 타공판은 수평으로 수면 밑에 잠겨있고, 타공판의 길이는 설치 수심과 같다. 여기서  $x$ 축

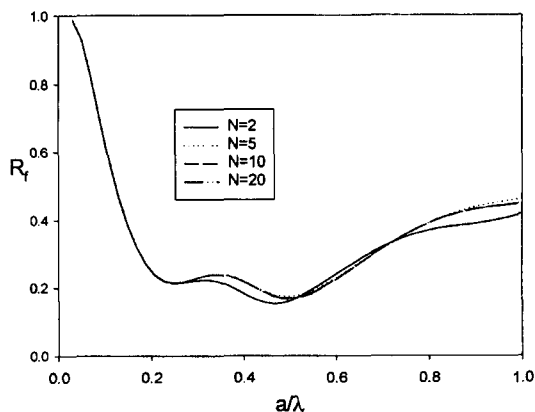
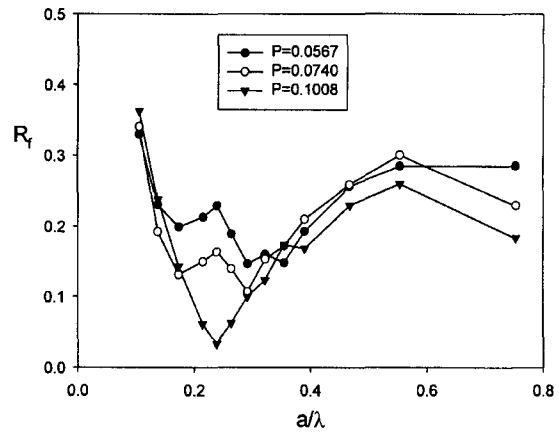
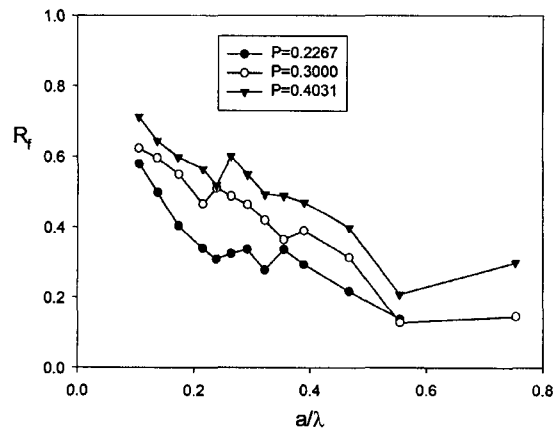


Fig. 3. Convergence of reflection coefficients according to the number of eigenfunctions for the case  $d/h=0.2$ ,  $a/h=1.0$ ,  $b=5.0$ .



(a)



(b)

Fig. 4. Experimental results of reflection coefficients by a submerged horizontal punching plate with different porosities for  $d=1.5$  cm,  $a=60$  cm.

은 타공판의 길이와 입사파의 파장의 비이며,  $y$ 축은 반사율이다. 무차원된 잠긴깊이와 공극율 계수는 각각  $d/h=0.2$ ,  $b=5.0$ 이다. 4개의 고유함수 개수에 대하여 반사율 곡선을 비교하였다. 그림에서  $N=10$ 과  $N=20$ 에 대한 반사율 곡선은 시각적으로 구별할 수 없을 정도로 같다.  $N=10$ 이면 정확한 결과를 준다고 판단되어 앞으로 모든 계산에서의 고유함수의 개수를 10개로 하였다.

Fig. 4는 실험에서 측정된 반사율을 그렸다. 실험은 규칙파중에서 이뤄졌으며 사용한 주파수는 0.4 Hz부터 1.4 Hz까지 총 13개이다. 타공판의 길이는 60 cm, 잠긴 깊이는 1.5 cm, 설치수심은 60 cm이다. 6개의 서로 다른 공극율에 대하여 실험을 수행하였다.  $P=0.0567, 0.0740, 0.1008, 0.2267$ 인 경우 타공판의 구멍의 직경은 2 mm이며, 구멍

의 중심에서 중심까지의 거리는 각각 8, 7, 6, 4 mm이다.  $P=0.30, 0.4031$ 인 타공판의 구멍의 직경은 4 mm이며, 구멍간의 거리는 각각 7 mm, 6 mm이다. Fig. 4(a)는 공극율이 0.0567, 0.7040, 0.1008인 타공판을 설치했을 때의 측정된 반사율을 보여주고 있다.  $a/\lambda$  값이 작은 저주파수 영역에서는 예상대로 큰 반사율을 나타내고 있다. 특히  $P=0.1008$ 인 경우  $a/\lambda=0.24$ 까지 반사율은 급격히 감소하여 0에 가까운 반사율을 보이며, 주파수가 더 커지면서 증가하다가  $a/\lambda=0.6$ 부터 다시 감소하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 4(b)는 공극율이 상대적으로 큰 3가지 타공판( $P=0.2267, 0.3, 0.4031$ )에 대하여 반사율 특성을 살펴본 것이다. 3개의 반사율 곡선 모두 공극율  $P=0.1008$ 인 경우와 같이 특정 주파수에서 반사율이 크게 줄어드는 특징은 나타나지 않았다. 대체적으로 공극율이 증가할수록 반사율이 증가하는 경향이 나타나며 주파수가 증가할수록 반사율이 대체로 감소하는 특징을 가지고 있다. 6개의 공극율을 전체적으로 비교하여 볼 때 공극율 0.1008인 타공판의 소파 성능이 가장 우수함을 알 수 있다. 이는 최대의 소파 성능을 보이는 최적의 공극율이 존재함을 의미한다.

Fig. 5부터 Fig. 7은 모형실험을 통하여 얻은 반사율과 이론계산으로부터 얻은 반사율을 서로 비교한 그림이다. 모형실험에서 사용한 타공판의 공극율에 해당되는 이론계산에서의 공극율 계수를 알아야 한다. 이를 위하여 공극율 계수를 바꿔가면서 실험값에 가장 잘 일치하는 공극율 계수를 식 (18)을 이용하여 찾았다. 모형실험에서 사용한 6개의 공극율에 해당하는 공극율 계수값을 Table 2에 정리하였다. 공극율과 공극율 계수 사이에 어떠한 관계가 있는지를 살펴보기 위하여  $x$ 축을 실험에서 사용한 타공판

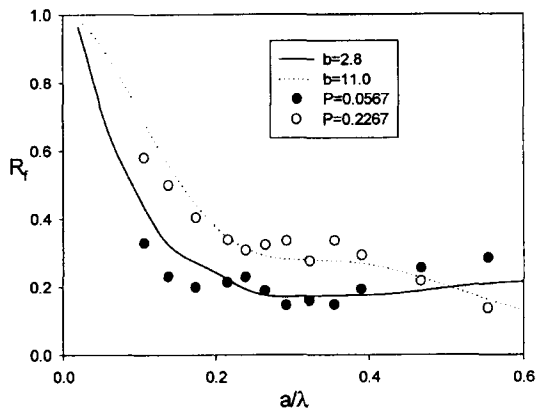


Fig. 5. Comparison of theoretical reflection coefficients with experimental results as a function of for  $a/\lambda$  for  $d=1.5$  cm,  $a=60$  cm.

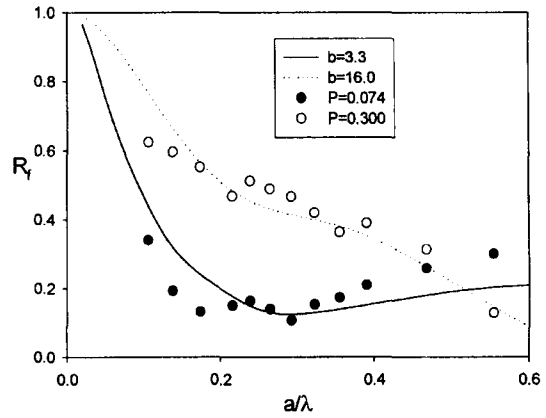


Fig. 6. Comparison of theoretical reflection coefficients with experimental results as a function of for  $a/\lambda$  for  $d=1.5$  cm,  $a=60$  cm.

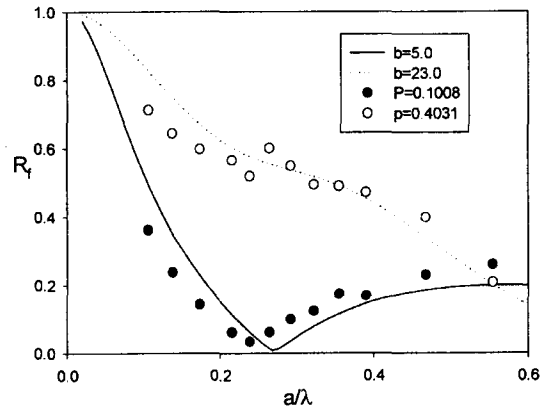


Fig. 7. Comparison of theoretical reflection coefficients with experimental results as a function of for  $a/\lambda$  for  $d=1.5$  cm,  $a=60$  cm.

Table 2. Porous parameters corresponding to given porosities

$P$	$b$
0.0567	2.8
0.0740	3.3
0.1008	5.0
0.2267	11.0
0.3000	16.0
0.4031	23.0

의 공극율로 잡고  $y$ 축을 그에 해당하는 공극율 계수로 잡아 Fig. 8에 그렸다. Fig. 8로부터 공극율과 공극율 계수 사이에는 완벽한 선형 관계가 유지됨을 알 수 있었고, 그 관계식은  $b=57.63P-0.9717$ 이다. 이 관계식으로부터 타공판의 공극율( $P$ )이 알려지면 공극율 계수( $b$ )를 구할 수 있

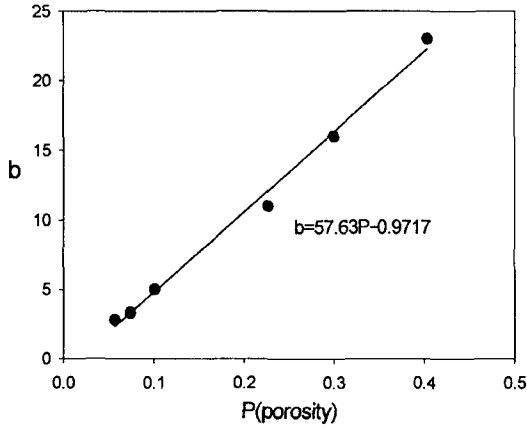


Fig. 8. Relation curve between the porous coefficient and the porosity.

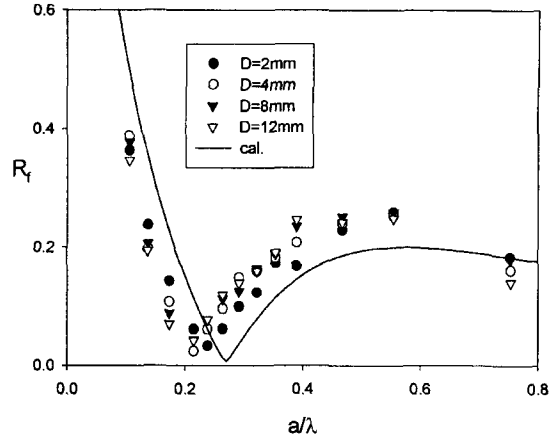


Fig. 10. Comparison of theoretical reflection coefficients with experimental results for a submerged horizontal punching plate with different hole sizes ( $P=0.1008$ ).

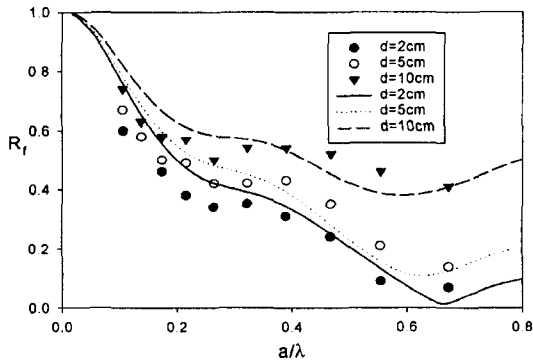


Fig. 9. Comparison of theoretical reflection coefficients with experimental results for a submerged horizontal punching plate with different submerged depths ( $P=0.2799$ ).

기 때문에 임의의 공극율을 가진 타공판에 의한 반사율을 이론적으로 구할 수 있다.

Fig. 9는 앞서 구한 선형관계식( $b=57.63P-0.9717$ )이 타당한가를 살펴보기 위하여 모형실험에서 사용한 6개의 공극율과 다른 공극율( $P=0.2799$ )을 가진 타공판에 대하여 추가적인 모형실험을 수행하였다. 측정된 반사율과 실험에 사용한 공극율에 해당되는 공극율 계수( $b=15.16$ )를 가지고 계산한 반사율을 비교한 그림이다. 추가적으로 잠긴깊이 변화에 따른 반사율 특성을 살펴보기 위하여 잠긴깊이( $d=2\text{ cm}$ ,  $5\text{ cm}$ ,  $10\text{ cm}$ )를 바꿔가면서 계산결과와 실험결과를 비교하였다. 전반적으로 계산결과와 실험결과는 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 잠긴깊이가 얇을수록 반사율이 작아지는 경향을 볼 수 있으며, 감소 폭은 저 주파수 영역에서는 작지만 주파수가 증가할수록 커

지고 있다. 이러한 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다. 파도가 진행함에 따라 물 입자는 단혀진 원 궤적을 따라 이동하며 수심방향으로 지수 함수적으로 감소하여 수면 밑으로 내려갈수록 그 운동반경은 작아진다. 따라서 파 에너지의 대부분은 수면 주위에 존재하기 때문에 파 에너지가 집중된 지역에 타공판을 설치해야 큰 효과가 있다.

Fig. 10은 공극율은 같지만 구멍의 직경( $D$ )이 달라질 때 반사율의 특성이 어떻게 달라지는 가를 실험적으로 보여주는 그림이다. 만약 공극율이 같아도 타공판 구멍의 크기에 따라 소파성능이 달라지면 앞서 구한 공극율과 공극율 계수 사이의 관계식을 사용하는데 있어 제약이 받는다. 여기서 사용한 공극율은 0.1008이며 잠긴 깊이는 1.5 cm이다. 타공판 구멍의 직경은 각각 2 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm이며 공극율 0.1008을 맞추기 위해 구멍간의 간격을 차례로 6 mm, 12 mm, 24 mm, 36 mm로 하였다. 실선은 공극율 0.1008에 해당되는 공극율 계수  $b=5.0$ 을 사용한 해석해의 결과이며, 기호는 실험결과이다. 그림에서 보듯이 비록 구멍의 크기가 달라도 구멍간의 간격을 조정하여 공극율을 같게 맞추면 거의 같은 반사율을 보여주는 것을 볼 수 있다.

Fig. 11에서는 최대 소파성능을 발휘하는 타공판의 공극율과 잠긴깊이를 찾기 위하여 입사파의 파장과 함께 공극율 계수와 무차원된 잠긴깊이를 변화시키면서 반사율에 대한 등고선을 그렸다. Fig. 11(a)는 x축을 공극율 계수로 잡고, y축을 타공판의 길이로 무차원시킨 파장으로 잡아 반사율에 대한 등고선을 그린 그림이다. 여기서  $dh=0.1$ ,

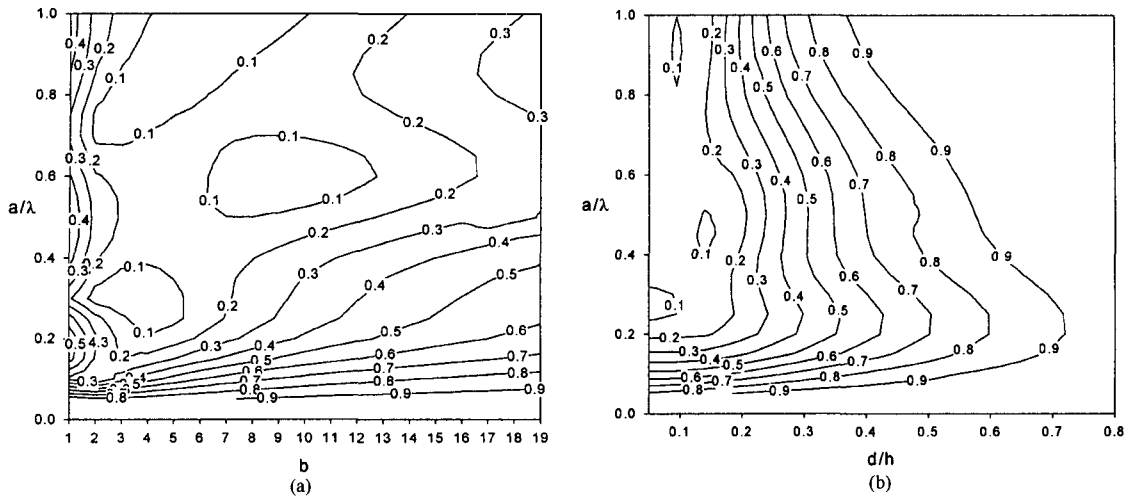


Fig. 11. (a) Contour plots of reflection coefficients as a function of porosity ( $b$ ) and  $a/\lambda$  for  $d/h=0.1$ ,  $a/h=1.0$ , (b) Contour plots of reflection coefficients as a function of  $d/h$  and  $a/\lambda$  for  $b=5.0$ ,  $a/h=1.0$ .

$a/h=1.0$ 이다. 공극율 계수가  $3 \leq b \leq 6$  범위내에서는 장파 영역( $a/\lambda < 0.1$ )을 제외하면 입사파의 파장과 관계없이 반사율이 0.2이하로 유지됨을 볼 수 있다. 공극율 계수를 앞서 구한 선형관계식을 이용하여 공극율로 바꾸면 최대 소파성능을 발휘하는 공극율의 범위는  $0.07 \leq P \leq 0.12$ 이다. 대체적으로 공극율 0.1 근방에서 최대의 소파성능을 발휘한다. Fig. 11(b)는 공극율 계수 대신에 무차원된 잠긴깊이를  $x$ 축으로 잡아 그린 반사율에 대한 등고선을 보여주는 그림이다. 여기서  $b=5.0$ ,  $a/h=1.0$ 이다. 그림에서 확연히 나타나듯이 잠긴깊이가 얕아수록 반사율이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 저주파수영역( $a/\lambda < 0.2$ )을 제외하면  $d/h \leq 0.2$ 범위내에서 반사율이 0.2이하로 유지되는 것을 볼 수 있다.

## 5. 결 론

이상의 이론계산과 모형실험의 결과로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 이론계산에서 사용한 공극율 계수는 타공판의 공극율과 선형적으로 비례하며, 둘 사이에 선형관계식( $b=57.63P-0.9717$ )이 성립함을 일련의 모형실험을 통하여 확인하였다.
- 2) 타공판의 구멍의 크기가 달라도 구멍간의 간격을 조정하여 공극율을 서로 같게 맞추면 거의 같은 반사율을 보여주고 있음을 실험적으로 증명하였다. 그러나 타공판의 구멍 크기가 너무 크거나 배열이 균일하지 못하면 다른 결과를 줄 수 있다.
- 3) 수평형 타공판을 이용한 소파장치의 성능은 타공판

의 공극율과 잠긴깊이에 따라 크게 달라지며, 최대 소파성능을 발휘하는 타공판의 공극율은 0.1이며, 잠긴깊이의 범위는  $d/h \leq 0.2$ 임을 계산을 통하여 밝혔다.

## 감사의 글

본 연구는 2002년에 한국건설기술연구원이 지원하여 수행한 '친수성 항만공간 확보를 위한 해수교환 방파제 설계기술 개발' 사업의 결과중 일부임을 밝히며 연구비 지원에 심심한 감사를 표합니다.

## 참고문헌

- Bennett, G.S., McIver, P. and Smallman, J.V., 1992. A mathematical model of a slotted wavescreen breakwater, *Coastal Engng.*, **18**, pp. 231-249.
- Cho, I.H. and Kim, M.H., 1998. Interactions of a horizontal flexible membrane with oblique waves, *J. Fluid Mech.*, **367**, pp. 139-161.
- Chwang, A. T. and Wu, J., 1994. Wave scattering by submerged porous disk, *J. Engrg. Mech.*, **120**, pp. 2575-2587.
- Evans, D.V., 1990. The use of porous screens as wave dampers in narrow wave tank, *J. Engrg. Math.*, **24**, pp. 203-212.
- Isaacson, M., Premasiri, S. and Yang, G., 1998. Wave interactions with vertical slotted barrier, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg.*, **124**, pp. 118-126.
- Mansard, E.P.D. and Funke, E.R., 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares meth-



- ods, *Proc. Coastal Eng.*, pp. 154-172.
- McIver, M., 1985. Diffraction of water waves by a moored, horizontal, flat plate, *J. Engrg. Math.*, **19**(4), pp. 297-320.
- Tuck, E.O., 1975. Matching problem involving flows through small holes, *Advanced in Appl. Mech.*, **15**, pp. 89-158.
- Twu, S. W. and Lin, D.T., 1991. Wave reflection by a number of thin porous plates fixed in a semi-infinity long flume, *Proc. 22nd Coastal Engrg.*, **15**, pp. 389-405.
- Wu, J., Wan, Z. and Fang, Y., 1998. Wave reflection by a vertical wall with a horizontal submerged porous plate, *J. Ocean Engrg.*, **25**(9), pp. 767-779.
- 
- Received September 9, 2002  
Accepted October 30, 2002