

## 수평형 타공판에 의한 소파성능 연구 A Study on Wave Absorbing Performance by a Horizontal Punching Plate

조일형<sup>1</sup> · 홍석원<sup>2</sup>

Il-Hyoung Cho<sup>1</sup> and Seok-Won Hong<sup>2</sup>

### 1. 서 론

해양공학에 관련된 문제를 접근하는 방법은 이론 해석, 수치해석, 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 것은 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) 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 plates)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 실

수부가 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 침투성 수직판에 의한 파의 투과율을 해석하였다. Macaskill(1979)은 이 문제를 유한수심으로 확장하였다. Evans(1990)는 좁은 수조에 설치된 여러 장의 얇은 직립 침투성판들에 의한 파의 반사율을 계산하였다. 그는 공극율이 큰판을 앞에 두고 뒤로 갈수록 공극율이 작은판들을 설치했을 때 반사파의 에너지는 최소가 된다는 것을 계산을 통하여 증명하였다. Bennett 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(1998)은 얇은 투과성 슬릿판이 놓여 있을 때 고유함수전개법(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 주파수에

<sup>1</sup> 제주대학교 해양산업공학부 (Department of Marine Industrial Engineering, Cheju National University, Ara 1, Jeju 690-756, Korea)

<sup>2</sup> 한국해양연구원 해양시스템 안전연구소 (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Yousung P.O Box 23, Taejon 305-600, Korea)

서 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 침투성판과 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. Yu and Chwang(1994)는 수평으로 설치된 침투성판에 의한 반사율과 투과율을 경계요소법을 사용하여 수치적으로 구하였다. Wu(1998)는 수직벽 앞에 놓인 수평형 침투성판에 의한 파의 반사율을 고유함수 전개법을 사용하여 이론적으로 해석하였다. 그는 침투성판에서의 속도는 침투성판 사이의 압력 차에 선형적으로 비례하며, 비례상수는 실수값을 갖는다고 가정하였다. 공극을 계수라 부르는 비례상수는 침투성판의 특성을 나타내는 중요한 변수로 침투성판의 공극율과 밀접한 관련이 있다. 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 관계식에 성립하는가에 대해서는 밝히지 못하였다.

본 연구에서는 최적의 소파효율을 갖는 소파장치를 개발하기 위하여 Wu(1998)가 사용한 수직벽 앞에 구멍이 뚫린 수평판이 일정한 깊이에 잠겨있는 모델에 대하여 체계적인 계산과 실험을 수행하였다. 계산과 실험에 사용한 침투성판은 일정한 직경의 원형 구멍이 일정한 간격을 갖고 배열된 형태인 타공판(punching plates)이다. 이론해석방법으로 고유함수 전개법(eigenfunction expansion method)을 사용하였다. 타공판에서의 속도는 타공판 사이의 압력차에 비례하며, 그들 사이에는 위상차가 없다고 가정하였다. 이론계산에서 나타난 공극율 계수와 실제 타공판의 공극율 사이의 관계식을 구하기 위하여 2차원 수조에서 공극율이 서로 다른 6개의 타공판을 가지고 일련의 모형 실험을 수행하였다. 해석결과와 모형실험 결과를 비교한 결과 공극율 계수와 타공판의 공극율은 선형적인 비례관계를 갖고 있음을 밝혔다. 또한 같은 공극율에서 구멍의 크기가 다를 때의 반사율 특

성을 모형실험을 통하여 살펴보았다. 개발된 해석 프로그램을 이용하여 타공판의 길이, 잠긴깊이, 공극율 그리고 입사파의 주파수를 바꿔가면서 수평형 타공판에 의한 반사율과 타공판에 작용하는 수직방향의 하중을 계산하였다

## 2. 이론해석

수직벽 앞에 타공판이 수면 밑 일정한 깊이에 수평으로 잠겨 있을 때 타공판에 의한 소파성능을 이론계산을 통하여 살펴보려고 한다.  $x=0$  에 불투과성 수직벽이 놓여 있고, 그 앞에 타공판이 수평으로 잠겨있는 모델을 계산모델로 잡았다. 타공판의 길이를  $a$ , 잠긴깊이를  $d$  라 하였고, 설치수심은  $h$  이다(Fig. 1). 타공판에서의 속도는 타공판 사이의 압력차와 선형적으로 비례하며, 비례상수는 실수라 가정하였다. 파가 주파수  $\omega$  을 갖고 조화운동을 한다고 가정하면 속도포텐셜을  $\Phi(x, y, t) = \Re[\phi(x, y)e^{-i\omega t}]$  로 쓸 수 있다. 공간함수인 속도포텐셜( $\phi$ )은 아래와 같은 2차원 Laplace 방정식을 만족한다.

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

경계조건식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} - v\phi = 0. (v = \frac{\omega^2}{g}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \text{ on } y = -h. \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \text{ on } x = 0. \quad (4)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} (\frac{\partial \phi}{\partial x} + ik_x \phi) = 0. \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi^*}{\partial y} = \frac{\partial \phi^-}{\partial y} = i\sigma(\phi^- - \phi^*) \text{ on porous plate} \quad (6)$$

식 (6)에서 위첨자  $\pm$ 는 각각 타공판의 윗면과 아랫면을 의미한다.  $\sigma(= \frac{\rho b_o \omega}{\mu})$  는 타공판의 특성을 나타내는 변수로 타공판의 공극율과 국부형상(local shape)에 밀접한 관련이 있다(Chwang, 1983). 실제 계산에서는 아래에 정의된 새로운 무차원 공극율 계수  $b$  를 사용하였다.

$$b = \frac{2\pi\sigma}{k_1} = \frac{2\pi\rho\omega b_0}{k_1\mu} \quad (7)$$

$b \rightarrow 0$  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.

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

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

$$\frac{\omega^2}{g} = k_1 \tanh k_1 h \quad (9)$$

고유함수 전개법을 사용하기 위하여 유체장을 Fig. 1 과 같이 두 개의 영역으로 나눈다. 영역 I 은  $x \leq -a, -h < y < 0$  로 정의되고, 영역 II 는  $-a < x < 0, -h < y < 0$  으로 정의된다. Laplace 방정식과 경계조건 식 (2)-(5)를 만족하는 각 영역의 속도포텐셜은 다음과 같다.

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

$$\phi^{(2)} = -\frac{ig}{\omega} \sum_{n=0}^{\infty} b_n \cos k_{2n} x f_{2n}(y) \quad (11)$$

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

고유함수(Eigenfunction) 은 다음과 같이 주어진다.

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

이때 고유치(Eigenvalue)은 다음 방정식의 근이다.

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

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

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \tilde{f}}{dy^2} - \kappa_2 \tilde{f} &= 0 \\ \frac{d\tilde{f}}{dy} - \nu \tilde{f} &= 0 \text{ on } y=0 \\ \frac{d\tilde{f}}{dy} \Big|_{y=-d+0} &= \frac{d\tilde{f}}{dy} \Big|_{y=-d-0} = i\sigma(\tilde{f} \Big|_{y=-d-0} - \tilde{f} \Big|_{y=-d+0}) \\ \frac{d\tilde{f}}{dy} &= 0 \text{ on } y=-h \end{aligned} \quad (14)$$

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

$$\begin{aligned} \kappa \sinh \kappa(h-d)(\nu \cosh \kappa d - \kappa \sinh \kappa d) \\ = i\sigma(\nu \cosh \kappa h - \kappa \sinh \kappa h) \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)는 무한개의 복소해(complex roots)를 주며, 복소수  $\kappa$  를  $\kappa_1 + i\kappa_2$  로 놓고 식 (15)에 대입한 후 실수부와 허수부로 각각 나누면 두 개의 방정식을 유도할 수 있다. 식 (15)는 비선형 방정식이므로 Newton-Raphson 반복법(iteration method)을 사용하여 수치적으로 해를 구한다. 비선형 방정식을 풀어  $\kappa$ , 즉  $k_{2n}$  을 구하면 고유함수  $f_{2n}(y)$  는

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

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

식 (10), (11)의 미지수  $a_n, b_n (n=0,1,2,\dots)$  는  $x=-a$  에서 영역 I 과 영역 II 의 속도포텐셜과 수평방향 속도가 서로 같다는 정합조건식으로부터 구해진다.  $x=-a$  에서 두 영역의 속도포텐셜이 서로 같다는 정합조건식으로부터 아래와 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$e^{k_0 a} f_{10}(y) + \sum_{n=1}^{\infty} a_n f_{1n}(y) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n \cos k_{2n} a f_{2n}(y) \quad (17)$$

윗식의 양변에  $f_{2m}(y)$ 를 곱하고  $-h$  부터  $0$  까지  $y$  대하여 적분하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$b_m \cos k_{2m} a N_m^{(2)} = e^{k_0 a} C_{m0} + \sum_{n=0}^{\infty} a_n C_{mn} \quad (18)$$

여기서

$$C_{mn} = \int_{-h}^0 f_{1n}(y) f_{2m}(y) dy$$

$$\int_{-h}^0 f_{2n}(y) f_{2m}(y) dy = \begin{cases} N_m^{(2)} & m = n \\ 0 & m \neq n \end{cases} \quad (19)$$

한편,  $x = -a$ 에서 두 영역의 수평방향 속도가 서로 같다는 정합조건식은

$$-k_{10} e^{k_0 a} f_{10}(y) + \sum_{n=1}^{\infty} k_{1n} a_n f_{1n}(y) = \sum_{n=0}^{\infty} k_{2n} b_n \sin k_{2n} a f_{2n}(y) \quad (20)$$

이다. 윗식의 양변에  $f_{1m}(y)$ 를 곱하고  $y$ 에 대해  $-h$ 에서  $0$ 까지 적분하면 다음식을 얻는다.

$m = 0$ :

$$k_{10} (a_0 - e^{k_0 a}) N_0^{(1)} = \sum_{n=0}^{\infty} k_{2n} b_n \sin k_{2n} a C_{n0}, \quad (21)$$

$m \neq 0$

$$k_{1m} a_m N_m^{(1)} = \sum_{n=0}^{\infty} k_{2n} b_n \sin k_{2n} a C_{nm}.$$

여기서

$$\int_{-h}^0 f_{1n}(y) f_{1m}(y) dy = \begin{cases} N_m^{(1)} & m = n \\ 0 & m \neq n \end{cases}$$

식 (18)을 식 (21)에 대입함으로써 미지수  $a_m$ 에 대한 대수방정식을 구할 수 있다.

$$a_0 + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{F_{0k}}{k_{10} N_0^{(1)}} a_k = e^{k_0 a} \left( 1 - \frac{F_{00}}{k_{10} N_0^{(1)}} \right) \quad m = 0$$

$$a_m + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{F_{mk}}{k_{1m} N_m^{(1)}} a_k = -e^{k_0 a} \frac{F_{m0}}{k_{1m} N_m^{(1)}} \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (22)$$

여기서

$$F_{mk} = - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k_{2n} \tan k_{2n} a C_{nm} C_{nk}}{N_n^{(2)}} \quad (23)$$

위의 대수방정식을 풀어 미지수  $a_n$ 을 구한다. 식 (18)로부터 나머지 미지수  $b_n$ 도 계산된다.

$$b_n = \frac{e^{k_0 a} C_{n0} + \sum_{k=0}^{\infty} a_k C_{nk}}{\cos k_{2n} a N_n^{(2)}} \quad n \geq 0, \quad (24)$$

반사율과 타공판 위의 파형식은 다음식으로부터 얻어진다.

$$R_f = |a_0 e^{k_0 a}|, \quad \eta = \sum_{n=0}^{\infty} b_n \cos k_{2n} x f_{2n}(0) \quad (25)$$

수평형 타공판에 작용하는 수직방향의 유체력을 구하는 식은 다음과 같다.

$$F = -i\omega\rho \int_{-a}^0 [\phi^{(2)}(x, -d) - \phi^{(2)}(x, -d_*)] dx \quad (26)$$

### 3. 모형실험

모형실험은 2차원 조파수조(길이 20m, 폭 0.6m, 깊이 1.0m)에서 수행되었다. 전체적인 실험장치의 구성도는 Fig. 2와 같다. 입사파의 주파수는 0.4 Hz에서 1.4 Hz까지 범위에서 안정적으로 선형파 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 최소사승법(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 4m, 나머지 파고계들을 첫 번째 파고계로부터 각각 40cm, 69.7cm, 86.4cm 지점에 위치시켰다.

실험에 사용한 타공판의 모양은 일정한 직경을 갖는 원형 구멍이 일정한 간격을 갖고 배열된 형태로 판의 길이는 60cm, 두께는 1.6mm이다. 타공판의 공극율은 뚫린 부분의 면적을 전체면적으로 나눈 값으

로 정의되며, 6 개의 서로 다른 공극율 ( $P=0.0567, 0.0740, 0.1008, 0.2267, 0.3000, 0.4031$ )에 대하여 실험을 수행하였다. 실험조건은 Table 1에 정리하였고, 실험에 이용한 타공판의 제원은 Table 2에 수록하였다. 타공판은 4 개의 수직 기둥에 의해 원하는 잠긴 깊이에서 고정된다. 타공판 후면에는 수직판을 설치하였다.

계산결과와 실험결과를 비교하기 위해서는 실험에 사용한 타공판에 해당되는 공극율 계수( $b$ )를 알아야 한다. 공극율 계수는 타공판의 공극율과 국부형상과 밀접한 관련이 있다. 타공판 구멍의 크기가 작고 구멍의 배열이 균일하다면 타공판의 특성은 국부형상보다는 공극율에 더욱 관련이 있을 것이다. 실험에서 사용한 타공판의 공극율에 해당되는 공극율 계수를 찾기 위하여 공극율 계수를 바꿔가면서 계측된 반사율과 가장 가까운 반사율 곡선을 찾았다. 이를 수식으로 설명하면 다음과 같다.

$$S = \sum_{i=1}^M [R_f(f_i, P) - \bar{R}_f(f_i, P)]^2 \quad (27)$$

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

#### 4. 결 과

Fig. 4는 고유함수의 개수( $N$ )에 따른 반사율 곡선의 수렴도를 보여주고 있다. 타공판은 수평으로 수면 밑에 잠겨있고, 타공판의 길이는 설치 수심과 같다. 여기서  $x$  축은 타공판의 길이와 입사파의 파장의 비 ( $= a/\lambda$ )이며,  $y$  축은 반사율이다. 무차원된 잠긴 깊이와 공극율 계수는 각각  $d/h = 0.2, b = 5.0$ 이다. 4 개의 고유함수 개수에 대하여 반사율 곡선을 그렸다.  $N=10$  과  $N=20$ 에 대한 반사율 곡선은 시각적으로 구별할 수 없을 정도로 같다. 따라서  $N=10$ 이면 정확한 결과를 주므로 앞으로 고유함수의 개수는 10으로 고정하겠다.

Fig. 5a,b는 실험에서 계측된 반사율을 그렸다. 실험에서 사용한 주파수는 0.4Hz 부터 1.4Hz 까지 총 13 개이다. 타공판의 길이는 60cm, 잠긴깊이는 1.5cm, 설

치수심은 60cm이다. 6 개의 서로 다른 공극율에 대하여 실험을 수행하였다.  $P=0.0567, 0.0740, 0.1008, 0.2267$ 인 경우 타공판의 구멍의 직경은 2mm이며, 구멍의 중심에서 중심까지의 거리는 각각 8, 7, 6, 4mm이다.  $P=0.30, 0.4031$ 인 타공판의 구멍의 직경은 4mm이며, 구멍간의 거리는 각각 7mm, 6mm이다. Fig. 5a는 공극율이 0.0567, 0.0740, 0.1008인 타공판을 설치했을 때 측정된 반사율을 보여주고 있다.  $a/\lambda$  값이 작은 저주파수 영역에서는 예상대로 큰 반사율을 나타내고 있다.  $P=0.1008$ 인 경우  $a/\lambda = 0.24$ 까지 급격히 감소하여  $a/\lambda = 0.24$ 에서 가장 작은 반사율을 보인다. 주파수가 더 커지면서 반사율은 서서히 증가하다가  $a/\lambda = 0.6$ 부터 다시 감소하는 경향을 보여주고 있다. 전반적으로 짧은 설치길이에 비하여 우수한 소파 성능을 보여 주고 있음을 알 수 있다. 서로 다른 공극율을 갖는 3 개의 반사율 곡선들을 비교하면 공극율이 클 때 반사율이 상대적으로 작음을 보여주고 있으며, 특히  $0.2 < a/\lambda < 0.3$  주파수 영역에서 감소 폭이 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 5b는 공극율이 큰 3 가지 타공판( $P=0.2267, 0.3, 0.4031$ )에 대하여 주파수변화에 따른 반사율 특성을 살펴본 것이다. 3 개의 반사율 곡선 모두 공극율  $P=0.1008$ 인 경우와 같이 특정 주파수에서 반사율이 갑작스럽게 줄어드는 특징은 나타나지 않으며, 공극율이 증가할수록 반사율이 증가하는 경향이 나타나며 주파수가 증가할수록 반사율이 대체로 감소하는 특징을 가지고 있다. 6 개의 서로 다른 공극율을 가진 타공판을 가지고 실험한 결과 공극율  $P=0.1008$ 인 타공판의 소파 성능이 가장 우수함을 알 수 있다. 이는 최대의 소파 성능을 보이는 최적의 공극율이 존재함을 의미한다.

Table 3은 식 (27)을 사용하여 실험에서 사용한 타공판의 공극율에 해당하는 공극율 계수값을 정리하였다. 공극율과 공극율 계수와의 관계식을 구하기 위하여  $x$  축을 실험에서 사용한 타공판의 공극율로 잡고  $y$  축을 그에 해당하는 공극율 계수로 잡아 그리면 Fig. 6과 같다. 공극율과 공극율 계수 사이에는 완벽한 선형 관계가 유지됨을 알 수 있다. 선형 관계식은  $b = 57.63P - 0.9717$ 이다. 이 관계식을 사용하면 임의의 공극율을 가진 타공판에 해당되는 공극율 계수  $b$ 를 구할 수 있기 때문에 어떤 종류의 타공판에 대하여 계산이 가능하다.

Fig. 7부터 Fig. 12는 실험을 통하여 구한 수평형 타공판의 반사율과 이론계산으로부터 얻은 반사율을 서로 비교한 그림이다. 계산결과와 실험결과는 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 같은 잠긴깊이에서

공극율 변화에 따른 반사율 특성을 고찰한 결과 입사 파 파장에 대한 반사율 특성은 각각의 타공판의 공극율에 따라 다르나 공극율이 0.1008 일 때 평균적으로 최대의 소파성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 이를 종합해 보면 최적의 소파성능을 얻기 위해서는 다시 말하여 최소의 반사율을 갖기 위해서는 공극율이 너무 크거나 너무 작지 않는 적절한 값을 가져야 한다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 13 은 타공판의 공극율과 공극율 계수사이의 선형관계식이 타당한가를 조사하기 위하여 앞에서 사용한 6 개의 타공판과 다른 공극율이 0.2799 인 타공판에 대하여 얻은 모형실험 결과와 선형관계식으로 부터 공극율 0.2799 에 해당되는 공극율 계수를 이론 계산에 적용하여 얻은 계산결과와 비교한 그림이다.  $P=0.2799$  에 해당되는 공극율 계수  $b$  는 15.16 이다. 또한 잠긴깊이 변화에 따른 반사율 변화의 특성을 살펴보기 위하여 잠긴깊이( $d=2\text{cm}, 5\text{cm}, 10\text{cm}$ )를 바꿔가면서 계산결과와 실험결과를 비교하였다. 계산결과와 실험결과는 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 잠긴깊이가 얇을수록 반사율이 작아지는 것을 볼 수 있다. 감소 폭은 저 주파수 영역에서는 작지만 주파수가 증가할수록 커지고 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. 14 는 공극율은 같지만 구멍의 직경이 달라질 때 반사율의 특성이 어떻게 달라지는가를 실험적으로 보여주는 그림이다. 만약 공극율이 같아도 타공판 구멍의 크기에 따라 소파성능이 달라지면 앞서 구한 공극율과 공극율 계수 사이의 관계식을 사용하는데 있어 제약을 받는다. 여기서 사용한 공극율은 0.1008 이며 잠긴 깊이는 1.5cm 이다. 타공판 구멍의 직경은 각각 2mm, 4mm, 8mm, 12mm 이며 공극율 0.1008 을 맞추기 위해 구멍간의 간격을 차례로 6mm, 12mm, 24mm, 36mm 로 하였다. 실선은 공극율 0.1008 에 해당되는 공극율 계수  $b=5$  을 사용한 해석해의 결과이다. 그림에서 보듯이 비록 서로 다른 크기의 구멍을 갖는 타공판이지만 공극율이 서로 같으면 거의 같은 반사율을 보여주는 것을 볼 수 있다.

Fig. 15 는 무차원 공극율 계수  $b$  에 따른 반사율과 타공판에 작용하는 수직방향의 유체력을 그렸다. 여기서  $d/h=0.1, a/h=1.0$  이다.  $b$  가 클수록 공극율

이 커짐을 의미하고,  $b$  가 작을수록 공극율이 작아짐을 의미한다. 전 주파수에서 걸쳐 가장 작은 반사율을 보이는 공극율 계수는 5.0 이다. 이 값을 기준으로 하여 공극율 계수가 커지고 작아짐에 따라 반사율은 점점 커진다. 다시 말하여 최대 소파성능을 보이는 최적의 공극율 값이 존재한다. 특히 공극율 계수가 작을 때 반사율 곡선의 변동이 커짐을 알 수 있다. Fig. 15b 에 나타난 수직방향 유체력을 살펴보면 예상한 바와 같이 공극율이 작을수록 수직방향 유체력이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 16은 무차원 공극율 계수  $b$  가 5.0 일 때 4가지 잠긴깊이에 따른 타공판에 의한 소파성능을 보여주고 있다. 타공판의 길이는 설치 수심과 같다. 잠긴 깊이의 변화에 따라 반사율이 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 4개의 잠긴 깊이만을 비교한다면  $d/h=0.1$  에서 가장 작은 반사율을 준다. 즉, 소파효과가 가장 크게 나타남을 의미한다. 전반적으로 타공판의 잠긴 깊이가 클수록 반사율이 커짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 물입자의 운동에서 알 수 있듯이 수면에서 에너지가 가장 많이 밀집되어 있고 깊어질수록 감소하는 특성으로 설명될 수 있다. 그러나  $d/h=0.05$  와  $d/h=0.1$  을 비교하면 오히려  $d/h=0.1$  일 때의 소파성능이 우수함을 볼 수 있다. 타공판의 잠긴깊이가 얇아질수록 소파성능이 반듯이 향상되지는 않고 최대 소파성능을 주는 적절한 잠긴깊이가 존재한다. 가장 우수한 소파성능을 보이는  $d/h=0.1$  을 살펴보면  $a/\lambda$  가 0.2보다 큰 범위에서는 반사율 0.2이하의 좋은 소파성능을 보이고 있다.

## 5. 결 론

이상의 이론계산과 모형실험의 결과로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 기존의 개발된 직립형이나 비치형 소파장치와는 다른 수평형 타공판을 사용한 소파장치는 짧은 설치 길이에도 불구하고 우수한 성능을 보여줌을 계산과 실험을 통하여 밝혔다.
- 2) 계산은 관성항을 무시한 Darcy 법칙을 따랐으며, 계산에 사용한 공극율 계수는 타공판의 공극율만의 함수로 가정하였다. 이때 공극율 계수는 타공판의 공극율과 선형적으로 비례하며, 둘 사이의 관계식 ( $b=57.63P-0.9717$ )을 일련의 실험을 통하여 얻었다.
- 3) 수평형 타공판을 이용한 소파장치의 성능은 타공판의 공극율과 잠긴깊이에 따라 크게 달라짐을 밝혔

다. 대체적으로 잠진 깊이가 얇을수록 공극율이 작을수록 소파성능은 향상되나 너무 작은 공극율을 가진 타공판을 사용하면 오히려 소파성능이 떨어진다. 다시 말해서 최대 소파성능을 갖는 최적의 공극율 값이 존재한다.

4) 타공판의 구멍의 크기가 달라도 구멍간의 간격을 조정하여 공극율을 서로 같게 맞추면 거의 같은 반사율을 보여주고 있음을 실험적으로 증명하였다. 그러나 타공판의 구멍의 크기가 너무 크거나 배열이 균일하지 못하면 다른 결과를 줄 수 있다.

## 사 사

본 연구는 2001년에 한국건설기술연구원이 지원하여 수행한 "친수성 항만공간 확보를 위한 해수교환형 방파제 설계기술 개발" 사업의 결과중 일부를 발췌하여 수록한 것임을 밝히며 연구비의 지원에 심심한 감사를 표합니다.

## 참고문헌

Bennett, G.S., McIver, P. and Smallman, J.V., 1992. A mathematical model of a slotted wavescreeen breakwater. *Coastal Engrg.*, 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., 1983. A porous wavemaker theory, *J. Fluid Mech.*, 132, pp. 395-406.

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.

Madsen, P.A., 1983. Wave reflection from a vertical permeable wave absorber. *Coastal Engrg.*, 7, pp. 381-396.

Mansard, E.P.D. and Funke, E.R., 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares methods. *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.

Mei, C.C., Liu, P.L.F. and Ippen, A.T., 1974. Quadratic loss and scattering of long waves. *J. Waterways, Harbors, Coastal Engrg.*, 100, pp. 217-239.

Siew, P.F. and Hurley, D.G., 1977. Long surface waves

incident on a submerged horizontal plate. *J. Fluid Mech.*, 83, pp. 141-151.

Tuck, E.O., 1975. Matching problem involving flows through small holes. *Advanced in Appl. Mech.*, 15, pp. 89-158.

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.

Yu, X. and Chwang, A.T., 1993. Analysis of wave scattering by submerged disk. *J. Engrg. Mech.*, 119, pp. 1804-1817.

**Table 1.** Experimental conditions with a vertical wall

Length of Porous Plate	60cm
Width of Porous plate	60cm
Submergence Depth	1.5cm
Water Depth	60cm
Porosity	0.0567 0.0740 0.1008 0.2267 0.3000 0.4030
Wave Frequency Range	0.4 ~ 1.4Hz
Wave Steepness	0.00512-0.0133

**Table 2.** Specification of porous plates used at experiment

	Diameter of hole	Center to center distance of hole
P=0.0567	2mm	8mm
P=0.0740	2mm	7mm
P=0.1008	2mm	6mm
	4mm	12mm
	8mm	24mm
	12mm	36mm
P=0.2267	2mm	4mm
	5mm	10mm
P=0.3000	4mm	7mm
P=0.4031	4mm	6mm
P=0.4700	5mm	7mm

**Table 3.** 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

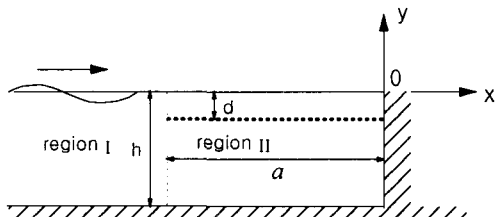


Fig. 1. Definition sketch of a submerged horizontal porous plate with a vertical wall.

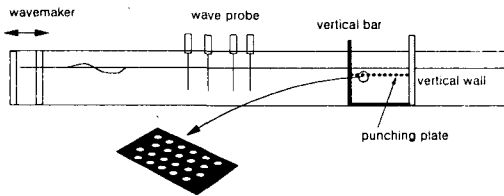


Fig. 2. Experimental set-up for measuring the reflection coefficients with a vertical wall.

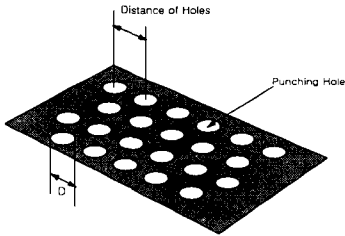


Fig.3. Zoom in of punching plate.

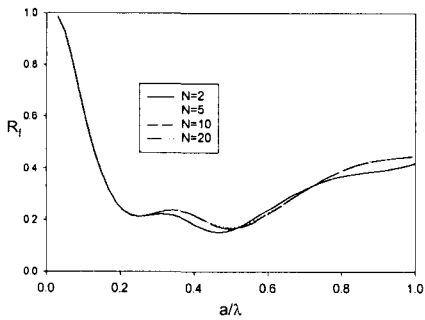
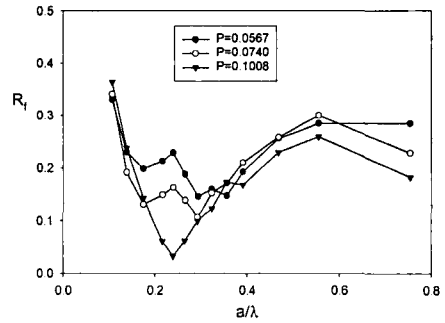
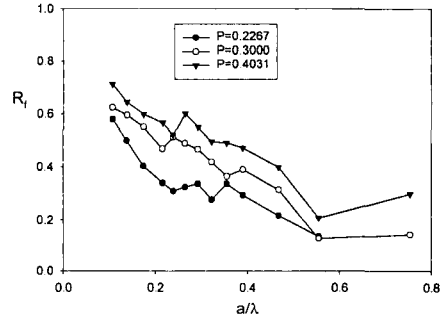


Fig. 4. Convergence of reflection coefficient of with the number of eigenfunctions for the case  $d/h = 0.2, a/h = 1.0, b = 5.0$ .



(a)



(b)

Fig. 5. Comparison of analytic and experimental results for a submerged horizontal porous plate with a vertical wall as function of porous parameter  $b$  and  $a/\lambda$  for  $d = 1.5cm, a = 60cm$ .

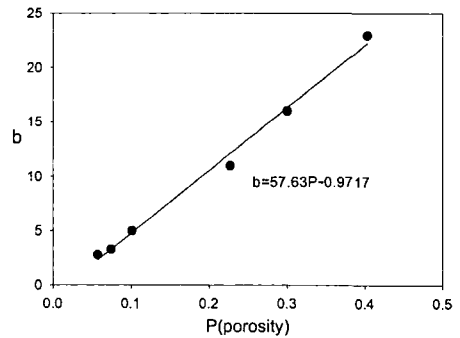
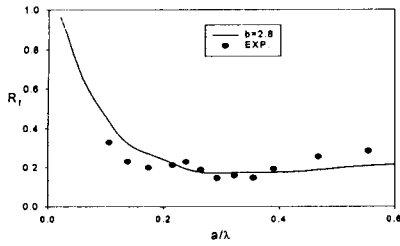
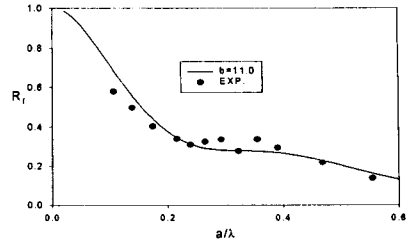


Fig. 6. Relation curve between porous effect parameter and porosity.

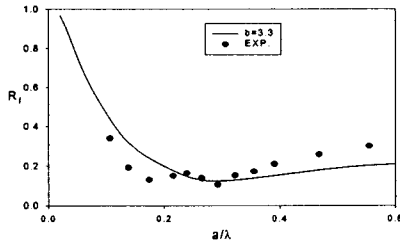




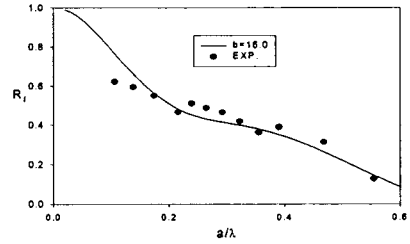
**Fig. 7.** Comparison of analytic and experimental results for a submerged horizontal porous plate with a vertical wall as function of  $a/\lambda$  for  $P = 0.0567, d = 1.5cm, a = 60cm$ .



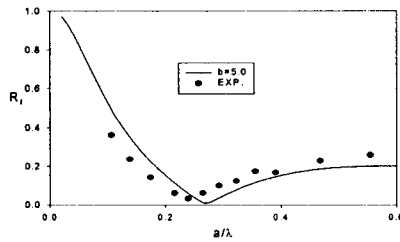
**Fig. 10.** Comparison of analytic and experimental results for a submerged horizontal porous plate with a vertical wall as function of  $a/\lambda$  for  $P = 0.2267, d = 1.5cm, a = 60cm$ .



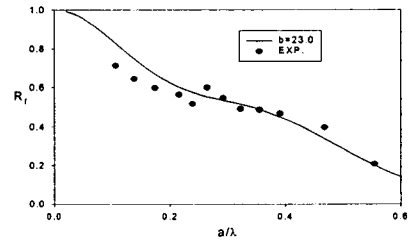
**Fig. 8.** Comparison of analytic and experimental results for a submerged horizontal porous plate with a vertical wall as function of  $a/\lambda$  for  $P = 0.0740, d = 1.5cm, a = 60cm$ .



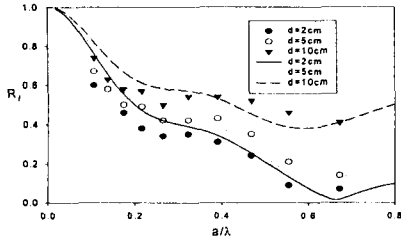
**Fig. 11.** Comparison of analytic and experimental results for a submerged horizontal porous plate with a vertical wall as function of  $a/\lambda$  for  $P = 0.3000, d = 1.5cm, a = 60cm$ .



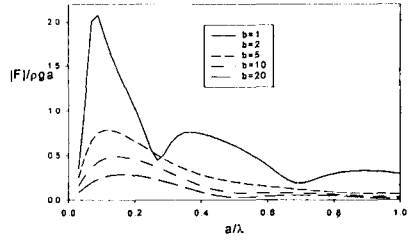
**Fig. 9.** Comparison of analytic and experimental results for a submerged horizontal porous plate with a vertical wall as function of  $a/\lambda$  for  $P = 0.1008, d = 1.5cm, a = 60cm$ .



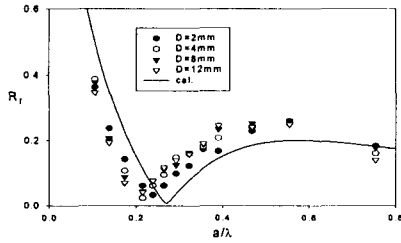
**Fig. 12.** Comparison of analytic and experimental results for a submerged horizontal porous plate with a vertical wall as function of  $a/\lambda$  for  $P = 0.4031, d = 1.5cm, a = 60cm$ .



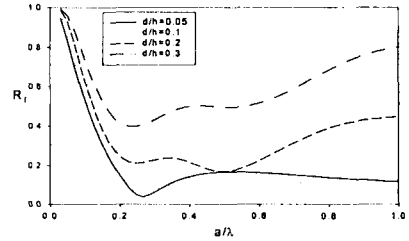
**Fig. 13.** Comparison of reflection coefficients for horizontal punching plate with different submerged depths ( $P=0.2799$ ).



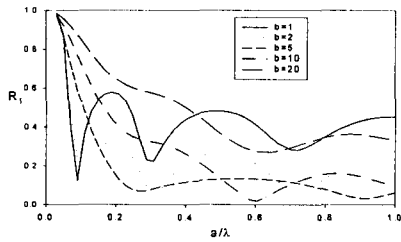
**Fig. 15b.** Hydrodynamic forces of a submerged horizontal porous plate with a vertical wall as function of porosity and  $a/\lambda$  for  $d/h = 0.1, a/h = 1.0$ .



**Fig. 14.** Comparison of reflection coefficients for horizontal punching plate with different hole sizes ( $P=0.1008$ ).



**Fig. 16.** Reflection coefficients of a submerged horizontal porous plate with a vertical wall as function of submergence depth  $d/h$  and  $a/\lambda$  for  $a/h = 1.0, b = 5.0$ .



**Fig. 15a.** Reflection coefficient of a submerged horizontal porous plate with a vertical wall as function of porosity and  $a/\lambda$  for  $d/h = 0.1, a/h = 1.0$ .