

경사형 타공판을 이용한 소파장치 개발

조일형* · 홍석원**

*제주대학교 해양산업공학부

**한국해양연구원 해양시스템 안전연구소

Development of a Wave Absorbing System Using an Inclined Punching Plate

IL-HYOUNG CHO* AND SEOK-WON HONG**

*Faculty of Marine Industrial Engineering, Cheju National University, Jeju, Korea

**Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Wave Absorber 소파장치, Punching Plate 타공판, Porosity 공극율, Reflection Coefficient 반사율, Inclined Plate 경사판, Boundary Element Method 경계요소법, Model Test 모형실험

ABSTRACT: In this paper, the performance of a wave absorbing system using an inclined punching plate, was investigated. Using the multi-domain boundary element method (BEM), the reflection coefficients of an inclined punching plate were tested with various design parameters, such as inclined angle, porosity, and wave frequencies. To confirm the numerical solutions, the systematic model test was conducted at 2-D tank and square tank. The numerical results were in good agreement with the experimental results within the entire frequency range. It was found that an inclined punching plate had an excellent wave absorbing efficiency, compared to a horizontal one. Also, the optimal range of an inclined angle had an excellent wave absorbing efficiency, compared to a horizontal one the optimal range of the inclined angle is $10^\circ < \beta < 20^\circ$. The developed wave absorber was installed at KRISO's square basin, and is working effectively for various model tests.

1. 서 론

소파장치는 조파수조(wave tank)의 중요설비로서 크게 2가지 목적으로 설치된다. 첫째는 조파장치에 의해 생성된 파가 수조의 반대쪽 끝에서 반사하여 생기는 반사파를 감소시켜 파의 왜곡을 방지하는 것이고, 둘째는 모형실험 종료 후의 수면의 교란을 짧은 시간 내에 소멸시켜 실험의 능률을 높이는 것이다. 조파수조에서 사용되는 소파장치의 제작에는 매우 다양한 형태와 재료가 사용되고 있다. Ouellet and Datta(1986)는 세계각지에 분포되어 있는 58개소의 조파수조를 대상으로 소파장치 현황을 조사한 바 있다. 소파장치의 형식은 크게 경사형과 직립형으로 나눌 수 있다. 경사형은 수조바닥까지 일정한 경사를 이루게 한 것이 가장 많이 쓰이나 경사면 하단을 개방시키거나 경사면을 곡선형 또는 다중 경사면으로 구성하는 경우도 많다. 경사형 소파장치의 소파성능은 입사파의 파장 및 파고에 따라 크게 달라지며 경사각, 길이, 표면의 거칠기 등도 중요한 설계 인자가 된다. 경사각도는 매우 완만해야 하는데, 일반적으로 높이 대 밑변의 길이비가 1:10보다 작아야 좋은 에너지 손실 효과를 얻을 수 있다고 보고되고 있다. 경사판 위에 와이어나 격자를 붙여 표면을 거칠게 하여 파를 좀더 교란시

킴으로써 파 에너지 소멸을 촉진시키는 방법이나 투과성 판을 사용하여 소파효율을 증가시키는 방법들도 시도되고 있다.

직립형 투과성 판을 이용한 소파장치는 주로 실험목적에 따라 다양한 수심을 요구하는 조파수조에 사용되고 있다. 직립형 투과성 판을 가지고 원하는 소파성능을 얻기 위해서는 여러개의 투과성 판을 파의 진행방향에 따라 적절히 배열해야 하는데 보통 공극율이 큰 것에서부터 작은 것으로 순차적으로 배열해야 우수한 소파효율을 얻을 수 있다. 직립형 투과성 판에 의한 반사율과 투과율은 Chwang(1983)에 의하여 계산된 바 있다. 그는 직립벽 앞에 직립형 투과성 판이 설치되어 있을 때 투과성 판에 의한 반사율을 계산하였다. Madsen(1983)는 공극율이 다른 여러 개의 직립형 투과성 판을 설치했을 때의 배열에 따른 반사율의 차이를 실험을 통하여 구하였다. 실험에 의하면 공극율이 다른 투과성 판을 효과적으로 배치하면 반사율을 5%이내로 유지할 수 있음을 밝혔다. Twu and Lin(1990)은 여러 개의 직립형 타공판이 놓여있을 때의 반사율 특성을 해석적으로 살펴보고 실험결과와 비교하였다. 이러한 방식의 소파장치는 캐나다 NRC와 미국의 OTRC 등 세계각지에서 현재 사용 중에 있다. 조일형(2002)은 직립벽 앞에 타공판이 수평으로 잠겨있는 모델에 대하여 이론 계산과 체계적인 실험을 수행하였다. 이론해석방법으로 Wu et al.(1998)이 사용한 고유함수전개법(eigenfunction expansion method)을 사용하였다.

제1저자 조일형 연락처: 제주도 제주시 아라동 1번지

064-754-3482 cho0904@cheju.ac.kr

타공판에서의 속도는 타공판 전후의 압력차에 비례하며 그들 사이에는 위상차가 없다고 가정하였다. 이때 실수값을 갖는 비례상수인 공극율 계수(porosity coefficient)는 타공판의 공극율과 밀접한 관련이 있다고 보았다. 공극율 계수와 공극율과의 관계를 얻기 위하여 2차원 수조에서 공극율이 서로 다른 타공판을 가지고 일련의 모형 실험을 수행하였다. 해석결과와 모형 실험결과를 비교한 결과 공극율 계수와 공극율은 선형적인 비례관계를 갖고 있음을 밝혔고, 선형관계식을 제시하였다.

본 연구에서는 최적의 소파효율을 갖는 소파장치를 개발하기 위하여 직립벽 앞에 경사지게 놓인 타공판에 의한 반사율 특성을 수치계산과 모형실험을 통하여 살펴보았다. 수치계산에서 공극율 계수값을 주기 위해 조일형(2002)이 구한 공극율 계수와 공극율 사이의 선형관계식을 이용하였다. 다영역 경계요소법(BEM)을 이용하여 수평형과 경사형 타공판에 의한 반사율을 수치계산하였다. 다영역 경계요소법을 적용하기 위하여 계산영역을 크게 내부영역과 외부영역으로 나누고, 내부영역에서는 경계면에 특이점을 분포시켰고, 외부영역에서의 해를 고유함수의 전개식으로 표현하였다. 두 영역이 만나는 정합 경계면에서 압력과 수평방향 속도가 서로 같다는 정합조건을 적용하여 완전한 해를 구하였다. 수치계산의 타당성을 검증하기 위하여 2차원 수조와 사각형 수조에서 모형실험을 수행하였다. 2차원 수조에서 사용한 타공판의 길이는 0.6m이며, 사각형 수조에서 사용한 타공판의 길이는 3m이다. 모형실험에 사용한 타공판의 공극율은 0.1이며, 경사각도(2차원 수조: 2.8°, 4.7°, 7.6°, 16.5° 사각형 수조: 5°, 10°, 15°)와 입사파의 주파수를 바꿔가면서 반사율을 계측하였다. 수치계산결과와 모형실험결과는 잘 일치하였고, 타공판을 경사지게 설치하는 것이 수평으로 설치하는 것보다 더 우수한 소파성능을 보임을 확인하였다. 개발된 소파장치는 타공판 5개가 상하로 평행하게 설치된 복층(cascade)구조로 현재 한국해양연구원의 사각형 수조의 남측(50m)과 서측(30m)에 설치되어 운용중에 있다.

2. 수치해석

수치계산모델은 $x=0$ 에 직립벽이 있고, 그 앞에 타공판이 경사지게 잠겨있는 형태이다. 설치수심은 h , 타공판의 길이는 a , 경사각도는 β 이다(Fig. 1). 타공판에서의 유체속도는 타공판 사이의 압력차와 선형적으로 비례한다고 가정한다. 선형 포텐셜이론을 도입하여 파가 주파수 ω 를 갖고 조화운동을 한다고 가정하면 속도포텐셜은 $\phi(x, y, t) = Re[\phi(x, y)e^{-i\omega t}]$ 이다. 속도포텐셜(ϕ)은 아래와 같은 2차원 Laplace 방정식을 만족한다.

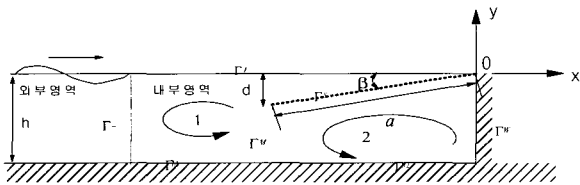


Fig. 1 Integration domains for a numerical solutions (inclined punching plate)

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

경계조건식들은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} - \nu \phi = 0, \quad (\nu = \frac{\omega^2}{g}) \tag{2}$$

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

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

$$\frac{\partial \phi^+}{\partial y} = -\frac{\partial \phi^-}{\partial y} = i\sigma(\phi^- - \phi^+) \text{ on porous plate} \tag{5}$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} (-\frac{\partial \phi}{\partial x} + ik\phi) = 0. \tag{6}$$

식(5)에서 위첨자 ±는 각각 타공판의 윗면과 아랫면을 의미한다. σ 는 타공판의 특성을 나타내는 변수로 타공판의 공극율과 밀접한 관련이 있다. 공극율 계수라 부르는 무차원 계수 $b(=2\pi\sigma/k)$ 를 새롭게 정의하자. $b \rightarrow 0$ 는 불투과성 판을 의미하며, $b \rightarrow \infty$ 는 입사파에 전혀 영향을 주지 않는 가상의 판이 놓여 있는 경우이다. 조일형(2002)은 공극율 계수 (b)와 공극율 (P)사이에는 선형관계($b=57.63P-0.9717$)가 성립함을 이론 해석과 모형실험을 통하여 밝혔다.

위에 주어진 경계치 문제를 효과적으로 풀기 위하여 다영역 경계요소법을 적용하였다. 유체 영역은 Fig.1에서 보듯이 외부영역과 내부영역으로 나누어진다. 외부영역의 해는 Laplace 방정식과 자유표면, 바닥면, 방사 경계조건을 만족하며 고유함수의 전개식으로 표현된다. 내부영역은 편의상 2개의 영역(1,2)으로 다시 나뉜다. 내부영역의 해는 지배방정식과 함께 식(2)-(5)에서 주어진 경계조건들을 만족한다.

내부영역의 속도포텐셜과 Green함수에 대하여 Green의 정리를 적용하면 아래와 같은 적분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} -\phi(x, y) \\ -\frac{1}{2}\phi(x, y) \end{aligned} \right\} = \int_r (\phi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi}{\partial n}) dS \quad \left\{ \begin{array}{l} (x, y) \text{ 영역 내부} \\ (x, y) \text{ 경계면 상} \end{array} \right. \tag{7}$$

여기서 G 는 $\nabla^2 G = -\delta(x-x_0)\delta(y-y_0)$ 을 만족하는 기본해이며, 다음과 같이 주어진다.

$$G(x, y; x_0, y_0) = \frac{1}{2\pi} \log(\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}), \tag{8}$$

위에 주어진 적분방정식을 대수방정식으로 바꾸기 위하여, 내부영역의 경계면을 여러개의 요소들로 분할하고, 각 요소에서 ϕ 와 $\partial\phi/\partial n$ 가 일정하다고 가정한다. 내부영역1의 경계조건들을 식(7)에 대입하여 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sum (H^{\ddot{u}} - \frac{\omega^2}{g} G^{\ddot{u}}) \phi_j^{(1)}|_{\Gamma_f} + \sum H^{\ddot{u}} \phi_j^{(1)}|_{\Gamma_r} + \sum H^{\ddot{u}} \phi_j^{(1)}|_{\Gamma_n} \\ & + \sum H^{\ddot{u}} \phi_j^{(1)}|_{\Gamma_m} + \sum (H^{\ddot{u}} - i\sigma G^{\ddot{u}}) \phi_j^{(1)}|_{\Gamma_s} + \sum i\sigma G^{\ddot{u}} \phi_j^{(2)}|_{\Gamma_s} \quad (9) \\ & = \sum G^{\ddot{u}} \frac{\partial \phi_j^{(1)}}{\partial n}|_{\Gamma_r} + \sum G^{\ddot{u}} \frac{\partial \phi_j^{(1)}}{\partial n}|_{\Gamma_m} \end{aligned}$$

여기서 $\Gamma_f, \Gamma_r, \Gamma_n, \Gamma_m, \Gamma_s$ 은 각각 자유표면, 정합 경계면 (외부영역), 바닥면, 정합 경계면(내부영역2), 물체 경계면을 나타낸다. 영향 계수(influence coefficient) H 와 G 는 다음과 같이 정의된다.

$$H^{\ddot{u}} = \int_{\Gamma_r} \frac{\partial G}{\partial n} dS, \quad G^{\ddot{u}} = \int_{\Gamma_r} G dS \quad (10)$$

같은 방법으로 내부영역2에 해당하는 경계조건들을 식(7)에 적용하면, 다음식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sum i\sigma G^{\ddot{u}} \phi_j^{(1)}|_{\Gamma_s} + \sum (H^{\ddot{u}} - i\sigma G^{\ddot{u}}) \phi_j^{(2)}|_{\Gamma_s} + \sum H^{\ddot{u}} \phi_j^{(2)}|_{\Gamma_m} \\ & + \sum H^{\ddot{u}} \phi_j^{(2)}|_{\Gamma_w} + \sum H^{\ddot{u}} \phi_j^{(2)}|_{\Gamma_w} = \sum G^{\ddot{u}} \frac{\partial \phi_j^{(2)}}{\partial n}|_{\Gamma_w} \quad (11) \end{aligned}$$

내부영역의 정합경계면(Γ_M)에서, 압력과 법선방향 속도는 정합조건식을 만족한다.

$$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial n} = \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n} = -\frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial n}, \quad \bar{\phi} = \phi^{(1)} = \phi^{(2)} \quad \text{at } \Gamma_M \quad (12)$$

여기서 위첨자 $\bar{}$ 는 정합 경계면(Γ_M)에서 새롭게 정의된 값을 뜻한다.

식(12)을 식(9)와 식(11)에 대입하여 정리하면 다음의 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & ([H] - \frac{\omega^2}{g} [G])[\phi^{(1)}]|_{\Gamma_f} + [H][\phi^{(1)}]|_{\Gamma_r} + [H][\phi^{(1)}]|_{\Gamma_n} \\ & + [H][\bar{\phi}]|_{\Gamma_m} + ([H] - i\sigma [G])[\phi^{(1)}]|_{\Gamma_s} + i\sigma [G][\phi^{(2)}]|_{\Gamma_s} \quad (13) \\ & - [G][\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial n}]|_{\Gamma_w} - [G][\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n}]|_{\Gamma_r} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & i\sigma [G][\phi^{(1)}]|_{\Gamma_s} + [H][\bar{\phi}]|_{\Gamma_m} + ([H] - i\sigma [G])[\phi^{(2)}]|_{\Gamma_s} \\ & + [H][\phi^{(2)}]|_{\Gamma_w} + [H][\phi^{(2)}]|_{\Gamma_w} + [G][\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial n}]|_{\Gamma_w} = 0 \quad (14) \end{aligned}$$

또 다른 정합경계면(Γ_n)에서 외부영역의 해와 내부영역1의 해가 서로 연속이라는 정합조건을 적용함으로써, 최종적인 대수방정식이 만들어지고, 이를 풀어 각 영역에서의 미지수를 구한다(Cho and Kim, 1998).

3. 모형시험

모형실험은 2차원 수조(길이 20m, 폭 0.6m, 깊이 1.0m)에서 수행되었다. 전체적인 실험장치의 구성도는 Fig.2와 같다. 규칙

파는 조파기 서보모터에 입력되는 주파수와 전압의 입력신호에 의해 발생된다. 입사파의 주파수는 0.5Hz에서 1.4Hz까지 범위에서 안정적으로 선형파 특성을 보이는 파기울기(wave steepness)범위의 것을 사용하였다. 정확도 $\pm 0.1\text{cm}$ 의 저항식 파고계를 통해 파고를 측정하였고, 타공판 전면에 4개의 파고계를 설치하여 Mansard and Funke(1980)가 제안한 최소자승법(least square method)을 사용하여 입사파와 반사파를 분리하였다. 실험에 사용한 타공판은 공극율이 0.1으로 구멍의 직경이 8mm, 구멍간의 거리는 24mm이다. 타공판의 길이와 폭은 60cm, 두께는 1.6mm이다. 타공판의 한 끝단을 정수면에 일치시키고 다른 끝단을 수면하 3cm, 5cm, 8cm, 17cm 위치에 잠기도록 설치하여 4개의 경사각도($\beta = 2.8^\circ, 4.7^\circ, 7.6^\circ, 16.5^\circ$)에 대하여 실험을 수행하였다. 타공판은 4개의 수직 기둥에 의해 원하는 경사각도에 고정된다.

개발된 소파장치를 한국해양연구원 사각형 수조(길이 50m, 폭 30m, 깊이 4.0m)에 설치하기에 앞서 실물 크기인 길이 3m, 공극율 0.1인 타공판을 일부분(8m)제작하였다. 제작된 타공판을 사각형 수조에 설치하여 규칙파중 반사율을 측정하였다. 이때 설치수심은 1.5m로 고정하였다. 2차원 수조에서와 마찬가지로 타공판의 한 끝단을 정수면에 일치시키고 다른 끝단을 수면하 26cm, 52cm, 78cm 위치에 잠기게 하여 경사각도($\beta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$)와 입사파의 주파수를 바꿔가면서 반사율을 측정하였다.

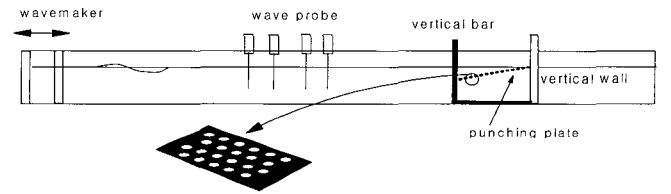


Fig. 2 Experimental set-up for measuring the reflection coefficients at 2-D tank

Table 1 Experimental conditions at model test

basin	2D tank		square tank		
type	inclined		horizontal	inclined	
length of plate	0.6m		3m		
water depth	0.6m		1.5m		
porosity	0.1		0.1		
submerged depth	front	rear	15cm	front	rear
	3cm	0cm		26cm	0cm
	5cm	0cm		52cm	0cm
	8cm	0cm		78cm	0cm
	17m	0cm			
inclined angle	2.8 degree		0 degree	5 degree	
	4.7 degree			10 degree	
	7.6 degree			15 degree	
	16.5 degree				
wavelength	0.8m - 5.6m		1.0m - 10.0m		
wave slope (H/λ)	0.0051-0.0133		0.02~0.04		

4. 결과 및 해석

Fig. 3은 타공판이 직립벽 앞에 수면과 평행하게 잠겨있는 모델에 대하여 BEM을 사용한 수치계산결과와 고유함수전개법을 사용한 해석결과를 비교한 그림이다. 수치계산에서 사용한 특이점의 총개수는 270개이다. 계산에서 $b = 57.63P - 0.9717$ 을 이용하여 공극율이 0.1에 해당하는 공극율 계수($b=5$)를 사용하였다. 무차원화된 잠긴깊이와 타공판의 길이는 각각 $d/h=0.1, a/h=0.5$ 이다. 그림에서 x 축은 타공판의 길이와 입사파의 파장의 비($=a/\lambda$)이며, y 축은 반사율이다. 실선은 해석결과이며 점선은 수치계산결과이다. $0.3 < a/\lambda < 0.5$ 의 일부 영역에서의 미세한 차이를 제외하곤 수치계산결과와 해석결과는 서로 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 4는 직립벽 앞에 타공판이 수면과 평행하게 잠겨 있을 때($d/h=0.1$)와 경사지게 잠겨 있을 때($\beta=5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$)의 반사율의 특성을 살펴보았다. 공극율은 0.1이며, 무차원화된 타공판의 길이는 $a/h=0.5$ 이다. 경사형이 수평형에 비해 $a/\lambda > 0.5$ 인 고주파수 영역에서 우수한 소파효율을 보임을 알 수 있다. 경사진 경우에 3개의 각도($\beta=5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$)만을 살펴볼 때 경사각도가 증가할수록 고주파수 영역에서의 반사율은 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그러나 경사각도가 너무 커져 $\beta=30^\circ$ 가 되면 전 주파수에 걸쳐 반사율이 상대적으로 커지는 것을 볼 수 있다. 다시 말하여 최적의 소파효율을 주는 경사각도 범위가 존재하며 본 계산에 의하면 최적의 경사각도 범위는 $10^\circ < \beta < 20^\circ$ 이다.

Fig. 5는 타공판이 경사지게 놓여 있을 때($\beta=10^\circ$), 공극율 계수(b) 변화에 따른 반사율을 그렸다. 여기서 무차원화된 타공판의 길이는 $a/h=0.5$ 이다. 계산에서 공극율 계수 $b=2, 5, 10, 16$ 에 대응되는 공극율은 대략 $P=0.05, 0.1, 0.2, 0.3$ 이다. 전 주파수에서 걸쳐 가장 작은 반사율을 보이는 공극율 계수는 $b=5.0$ 이다. 최적의 소파효율을 주는 $b=5.0$ 을 기준으로 하여 공극율 계수가 커지고 작아짐에 따라 반사율은 커진다. 다시 말하여 조일형(2002)에서도 밝혔듯이 최대 소파성능을 보이는 최적의 공극율은 $P=0.1$ 임을 알 수 있다.

Fig. 6은 타공판의 길이를 변화시켰을 때 반사율의 변화를 살펴보았다. x 축은 수심과 파장의 비로 잡았다. 공극율은 0.1이고 경사각도는 10° 이다. 예상대로 타공판의 길이가 증가할수록 반사율이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그러나 타공판 길이증가에 따른 반사율의 변동폭은 작기 때문에 실제로 소파장치를 설계할 때 소파효율을 다소간 손해보더라도 수조의 가용면적을 늘린다는 측면에서 타공판의 길이를 줄이는 것이 바람직하다고 판단된다.

Fig.7-10에서는 최대의 소파성능을 나타내는 공극율 0.1인 타공판을 경사지게 설치하여 계측된 반사율과 수치계산에서 얻은 반사율을 서로 비교하였다. 타공판의 뒤끝은 수면에 놓이게 설치하고 앞쪽 끝을 수면하 3cm, 5cm, 8cm, 17cm에 잠기도록 하여 타공판의 경사각도를 $\beta=2.8^\circ, 4.7^\circ, 7.6^\circ, 16.5^\circ$ 로 하였다. 여기서 실선은 수치계산결과이며 동그라미는 실험결과이다. 경사각도가 $\beta=2.8^\circ$ 인 경우 파장이 무한대 일 때 완전반사에서 출발

하여 파장이 짧아짐에 따라 반사율이 급격히 감소하여 $a/\lambda=0.25$ 에서 최소값을 나타낸다. $a/\lambda=0.5$ 보다 큰 주파수 영역에서는 반사율 0.2를 유지하고 있음을 볼 수 있다. 경사각도가 증가할수록 고주파수 영역에서의 반사율은 줄어드나 $0.2 < a/\lambda < 0.4$ 인 영역에서의 반사율은 오히려 증가하는 경향을 볼 수 있다. 전반적으로 수치계산결과가 실험결과보다 약간 크게 평가된 경향이 있지만 두 결과는 잘 일치하고 있다. 이러한 사실은 조일형(2002)이 제시한 공극율과 공극율 계수사이의 선형 관계식 $b = 57.63P - 0.9717$ 이 타당하다는 것을 의미한다.

Fig. 11은 길이 3m의 타공판을 한국해양연구원 사각형수조의 일부구간(8m)에 설치하여 계측된 모형실험결과와 수치계산결과를 비교한 그림이다. 타공판의 공극율은 0.1이며, 경사각도는 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ 이다. 경사각도 15° 의 결과는 경사각도 10° 와 큰 차이가 없어 그림에서 제외시켰다. 수평형과 경사형을 비교하기 위하여 잠긴깊이 15cm의 수평형의 결과를 함께 그렸다. $a/\lambda > 0.4$ 영역에서 경사형과 수평형을 비교한다면 경사형 타공판에서 낮은 반사율이 나타난다. 그리고 경사각도가 커짐에 따라 반사율이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그러나 $a/\lambda < 0.4$ 인 저주파수 영역에서는 작지만 반대의 결과가 나타난다.

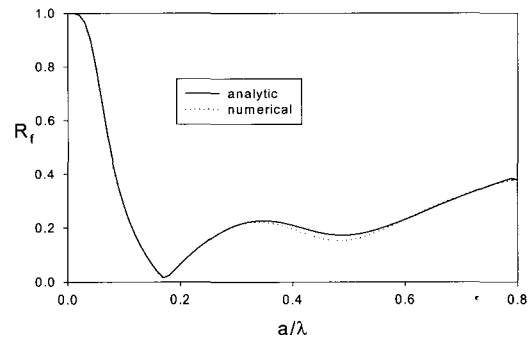


Fig. 3 Comparison of analytic reflection coefficients with numerical results for a submerged horizontal punching plate as function of a/λ for $P=0.1, d/h=0.1, a/h=0.5$

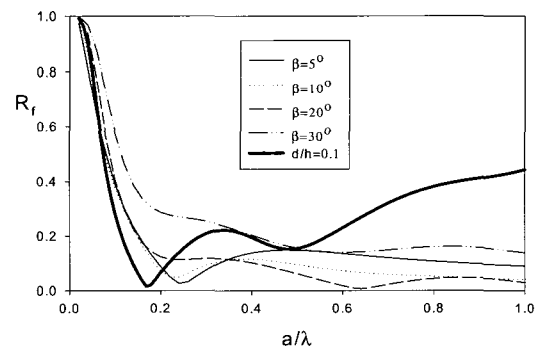


Fig. 4 Reflection coefficients for an inclined punching plate with different inclined angles as function of a/λ for $P=0.1, a/h=0.5$

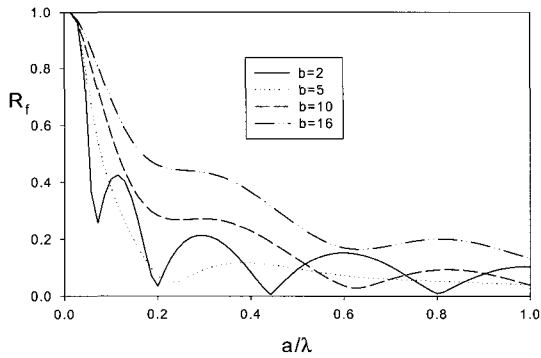


Fig. 5 Reflection coefficients for an inclined punching plate with different porous coefficients as function of a/λ for $\beta = 10^\circ, a/h = 0.5$

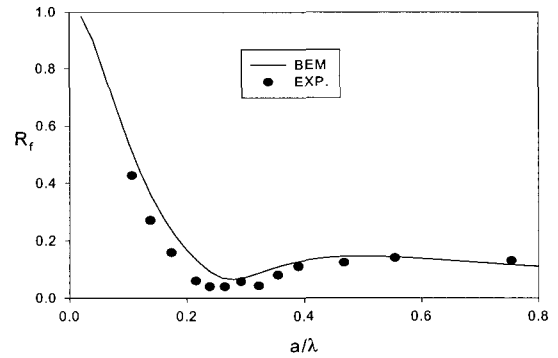


Fig. 8 Comparison of numerical (BEM) and experimental results for an inclined punching plate as function of a/λ for $P = 0.1, \beta = 4.7^\circ, a = 60\text{cm}$

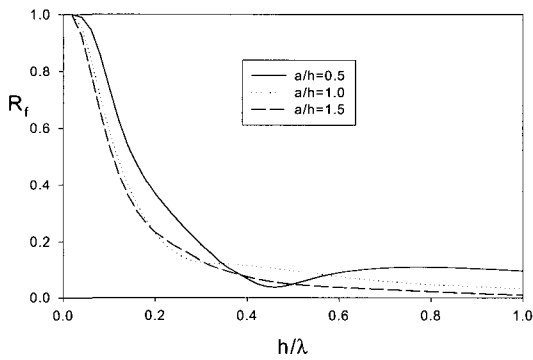


Fig. 6 Reflection coefficients for an inclined punching plate with different non-dimensional lengths as function of a/λ for $P = 0.1, \beta = 10^\circ$

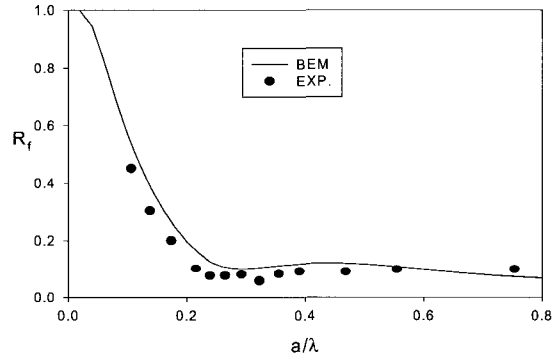


Fig. 9 Comparison of numerical (BEM) and experimental results for an inclined punching plate as function of a/λ for $P = 0.1, \beta = 7.6^\circ, a = 60\text{cm}$

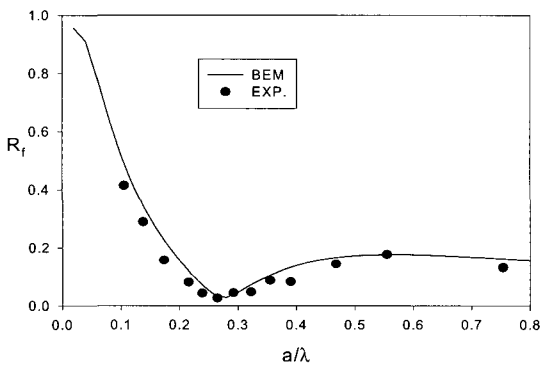


Fig. 7 Comparison of numerical (BEM) and experimental results for an inclined punching plate as function of a/λ for $P = 0.1, \beta = 2.8^\circ, a = 60\text{cm}$

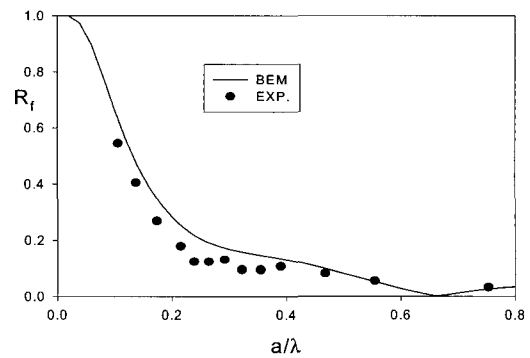


Fig. 10 Comparison of numerical (BEM) and experimental results for an inclined punching plate as function of a/λ for $P = 0.1, \beta = 16.5^\circ, a = 60\text{cm}$

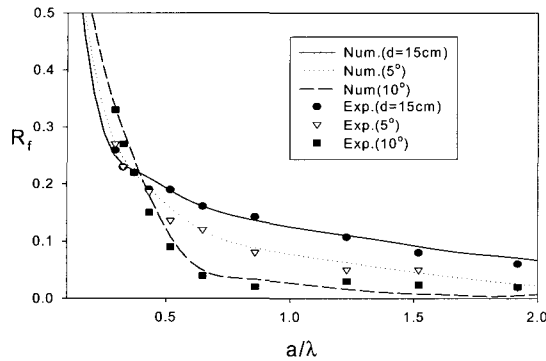


Fig. 11 Comparison of numerical (BEM) and experimental results for a punching plate as function of a/λ for $P=0.1, h=1.5m, a=3m$

5. 결 론

이상의 수치계산과 모형실험의 결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 경사지게 설치한 타공판은 수평으로 설치한 타공판에 비해 고주파수 영역에서 우수한 소파성능이 나타남을 수치계산과 모형실험을 통하여 확인하였다.
- 2) 경사각도 변화에 따른 소파성능을 검토한 결과 최적의 소파 효율을 주는 공극율은 0.1이며 경사각도 범위는 $10^\circ < \beta < 20^\circ$ 이다. 타공판의 길이가 증가함에 따라 반사율은 줄어드나 변화 폭은 작다.
- 3) 전반적으로 수치계산결과와 2차원 수조와 사각형 수조에서 수행한 실험결과가 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 이러한 사실은 조일형(2002)가 제시한 공극율과 공극율 계수사이의 선형 관계식 ($b = 57.63P - 0.9717$)이 타당하다는 것을 의미한다.
- 4) 개발된 소파장치는 한국해양연구원 수조동의 남측(50m)과 서측(30m)에 설치되었다. 타공판의 재원은 공극율 0.1, 두께 2.5mm, 길이 3m이며, 수면에서 11.5도의 경사각도를 가지고 설치하였다. 사각형수조(최대깊이 4m)는 모형실험의 종류에 따라 다양한 수심을 요구하므로 소파장치는 타공판 5개가 상하로 평행하게 설치된 복층(cascade)구조로 설계되었다.

후 기

본 연구는 2002년에 한국건설기술연구원이 지원하여 수행한 "친수성 항만공간 확보를 위한 해수교환형 방파제 설계기술 개발 사업"의 결과중 일부를 발췌하여 수록한 것임을 밝히며 연구비의 지원에 감사를 포함합니다.

참 고 문 헌

- 조일형 (2002). "수평형 타공판의 소파특성", 한국해양·해양공학회지, 제14권, 제5호, pp 265-273.
- Cho, I.H. and Kim, M.H. (1998). "Interactions of a Horizontal Flexible Membrane with Oblique Waves", J. Fluid Mech., Vol 367, pp 139-161.
- Chwang, A.T. (1983). "A Porous Wavemaker Theory", J. Fluid Mech., Vol 132, pp 395-406.
- Madsen, P.A. (1983). "Wave Reflection from a Vertical Permeable Wave Absorber", Coastal Engrg., Vol 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 Engrg., pp 154-172.
- Ouellet, Y. and Datta, I. (1986). "A Survey of Wave Absorbers", J. Hydraulic Research, Vol 24, pp 265-280.
- Wu, J., Wan, Z. and Fang, Y. (1998). "Wave Reflection by a Vertical Wall with a Horizontal Submerged Porous Plate", J. Ocean Engrg., Vol 25, pp 767-779.
- Twu, S.W. and Lin, D.T. (1990). "Wave Reflection by a Number of Thin Porous Plates Fixed in a Semi-infinity Long Flume", Proc. 22nd Coastal Engrg., Vol 15, Elsevier, pp 389-405.

2003년 10월 10일 원고 접수

2004년 1월 29일 최종 수정본 채택