

비 균일한 공극율을 갖는 투과성 원기둥과 파의 상호작용

조일형*

*제주대학교 해양시스템공학과

Wave Interaction with a Porous Circular Cylinder of Non-Uniform Porosity

Il-Hyoung Cho*

*Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea

KEY WORDS: Porous circular cylinder 투과성 원기둥, Wave deformation 파랑변형, Breakwater 방파제, Eigenfunction expansion method 고유함수전개법, Wave force 파랑하중

ABSTRACT: The interaction of incident monochromatic waves with a bottom-mounted vertical porous circular cylinder is investigated using the framework of the three-dimensional linear potential theory. The porosity of the circular cylinder is uniform vertically but varies in the circumferential direction. By adjusting the porosities of the circular cylinder, both the wave blocking performance of a porous semi-circular breakwater and the wave responses inside a circular harbor with an entrance are applied as calculation examples. It is found that the reflected waves, wave run-up, and wave forces are significantly reduced due to wall porosity, which are positive factors for a breakwater, and the amplification factor of a circular harbor at resonant frequencies is greatly reduced by a porous sidewall.

1. 서 론

투과성 방파제는 투과파를 줄여 항내 정온도를 유지시킬 뿐만 아니라 반사파의 에너지도 줄일 수 있어 방파제 주위를 운항하는 선박의 안정성 측면에서 유리하며 항만내 하역활동에 지장을 주지 않는 범위 내에서 파와 흐름의 일부를 통과시켜 항만내 해수의 순환을 허용하므로 항만내 수질개선에 효과적이다. 또한 가볍기 때문에 연약지반위에 설치가 가능하며 수면위로 띄울 수 있어 신속설치용 부유식 방파제로 활용이 가능하다.

투과성 방파제는 Jarlan(1961)이 해양구조물에 작용하는 파랑하중을 줄이기 위하여 유공방파제를 처음으로 제안한 이후 많은 이론적인 연구와 실험적인 연구가 수행되었다. Dalrymple et al.(1991)은 무한히 긴 투과성 방파제에 의한 경사 입사파의 반사율과 투과율을 연구하였다. Yu and Chwang(1994)은 투과성 방파제를 가진 반원형 항만 내에 공진문제를 다루었는데 투과성 방파제에 의한 에너지 손실효과가 공진으로 크게 증폭된 항만내 파도응답을 줄일 수 있음을 밝혔다. Issacson et al.(1998)은 투과성 판에서의 속도는 판 전후의 압력차에 선형적으로 비례한다는 Darcy의 법칙을 투과성 수직판의 경계조건에 적용하여 투과성 판에 의한 반사율과 투과율을 고유함수전개법(Eigenfunction expansion method)을 사용하여 해석하였고, 2차원 수조에서 수행한 실험값과 비교하였다. Cho and Kim(2008)은 수평형 타공판을 이용한 소파장치를 개발하여 MOERI 해양공학수조에 설치하여 실험 결과의 신뢰도를 높이고 수조운용의

효율성을 향상시켰다. Williams and Li(2000), 조일형(2003; 2004), Sankarbaru et al.(2008)는 Bessel 함수의 덧셈정리(Addition theorem)를 적용한 고유함수전개법을 사용하여 임의의 개수의 투과성 원기둥들을 배열하여 만든 방파제에 의한 파랑변형문제를 살펴보았다. 이상에 소개한 투과성 구조물과 관련된 대부분 연구들은 투과성 벽에서의 속도는 벽 전후의 압력차에 선형적으로 비례한다는 Darcy의 법칙을 투과성 벽에서의 경계조건으로 사용한다. 이때 공극율 계수라 불리는 비례상수는 복소수 값을 가지며 실수부는 박리에 의한 에너지 손실효과를, 허수부는 유체의 관성효과를 나타낸다.

본 연구에서는 원주방향을 따라 공극율이 변하는 비 균일한 공극율을 가진 투과성 원기둥과 입사파의 상호작용 문제를 살펴보았다. 유체영역을 원기둥 외부영역과 내부영역으로 나누어 각 영역에서 해를 독립적으로 구한 뒤 두 영역이 만나는 경계면에서 정합조건식을 적용하여 완전한 해를 구하는 고유함수전개법을 사용하였다. 원주방향의 공극율의 분포를 조절하여 첫 번째 계산예로 반원형 투과성 방파제에 의한 파의 차단성능, 파처울림, 그리고 파랑하중을 살펴보았다. 이러한 형태의 방파제는 입사파의 에너지를 부분적으로 투과시키면서 반사파의 에너지를 줄일 수 있는 해수교환 방파제의 한 종류라 할 수 있다. 또 다른 계산예로 항만 입구와 투과성 안벽으로 구성된 원형 항만내의 파도응답을 살펴보았다. 입사파의 주파수가 닫혀진 원기둥의 고유주파수들과 일치할 때 발생하는 공진점에서의 파도응답을 투과성 안벽의 공극율 계수를 바꿔가면서 살펴보았다.

교신저자 조일형: 제주시 제주대학로 66, 064-754-3482, cho0904@jejunu.ac.kr

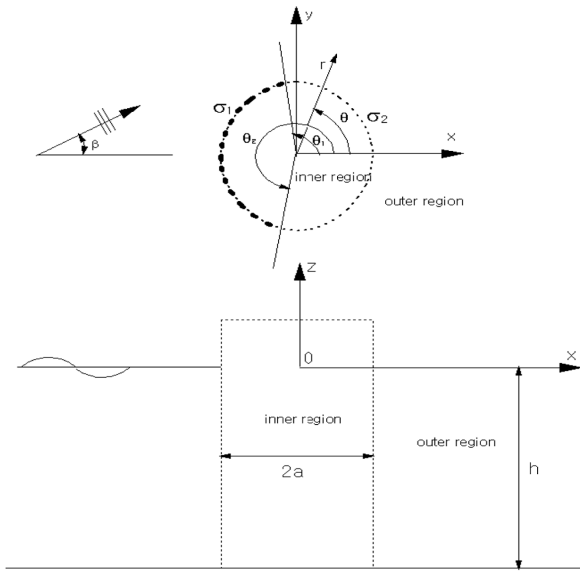


Fig. 1 Definition sketch of a porous circular cylinder with non-uniform porosities

2. 문제의 정식화

수심이 h 인 해저면 바닥에 고정된 투과성 원기둥과 파의 상호작용 문제를 살펴본다. 원기둥의 벽은 수직방향으로 일정한 공극율을 갖지만 원주방향으로 공극율이 변하는 투과성 재질로 만들어지며 벽의 두께는 무시하였다. Fig. 1과 같이 원기둥 중심에 고정된 좌표계 (r, θ, z) 를 도입한다. 원기둥의 반지름은 a 이다. 입사파는 규칙파로 진폭은 A 이며, 주파수 ω 를 가지고 x 축과 β 의 입사각을 가지고 들어온다고 가정한다. 유체를 비압축성, 비점성으로 가정하고, 유체운동을 비회전성으로 가정하면 유체입자의 운동은 속도포텐셜로 표현이 가능하다. 유체입자의 운동이 주파수 ω 를 갖고 조화운동을 한다면 시간과 공간을 분리하여 속도포텐셜을 $\phi(r, \theta, z, t) = \text{Re}\{\phi(r, \theta, z)e^{-i\omega t}\}$ 로 쓸 수 있다. 또한 일정한 수심에 원기둥이 수면으로부터 수직으로 해저면까지 놓여있기 때문에 3차원 속도포텐셜을 $\phi(r, \theta, z) = -\frac{ig}{\omega} \eta(r, \theta)\phi(z) \rightarrow \eta(r, \theta)f(z)$ 라 쓸 수 있다. 여기서 $\eta(r, \theta)$ 는 파형식을 나타내며, $f(z) = \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh}$ 이다. k 는 파수(Wavenumber)로 분산식 $\omega^2 = gk \tanh kh$ 를 만족한다.

유체영역을 Fig. 1과 같이 원기둥의 외부영역과 내부영역으로 나누고 외부영역은 윗침자(O), 내부영역은 윗침자(I)로 구분한다. 원기둥 외부영역에서의 파형식은 입사파와 원기둥에 의한 산란파의 합으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\eta^{(O)}(r, \theta) = \eta(r, \theta) + \eta_S(r, \theta). \quad (1)$$

식 (1)에서 입사파는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\eta_I(r, \theta) = Ae^{ikr \cos(\theta - \beta)} = A \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n(i)^n \cos n(\theta - \beta) J_n(kr), \quad (2)$$

여기서 J_n 는 Bessel 함수이며, ϵ_n 은 Jacobi 기호로 $\epsilon_0 = 1$, $\epsilon_n = 2(n = 1, 2, \dots)$ 이다.

투과성 원기둥에 의해 산란된 파는 Helmholtz 방정식과 무한 원방에서의 방사조건식(Radiation condition)을 만족해야한다.

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + k^2 \right) \eta_S = 0, \\ (kr)^{1/2} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \eta_S \rightarrow 0 \quad \text{as } kr \rightarrow \infty. \end{cases} \quad (3)$$

위에 주어진 경계치 문제의 해는 아래와 같다.

$$\eta_S = A \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} A_n H_n(kr) \cos n\theta + \sum_{n=1}^{\infty} B_n H_n(kr) \sin n\theta \right\}, \quad (4)$$

여기서 A_n, B_n 은 미지수이며, H_n 는 제 1종 Hankel 함수이다. 따라서 외부영역에서의 파형식은 다음과 같다.

$$\eta^{(O)} = A \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} [\epsilon_n(i)^n \cos n\beta J_n(kr) + A_n H_n(kr)] \cos n\theta + \sum_{n=1}^{\infty} [\epsilon_n(i)^n \sin n\beta J_n(kr) + B_n H_n(kr)] \sin n\theta \right\}. \quad (5)$$

원기둥의 내부영역에서의 파형식은 Helmholtz 방정식을 만족하며 $r=0$ 에서 유한한 값을 가져야 하므로 아래와 같다.

$$\eta^{(I)} = A \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} C_n J_n(kr) \cos n\theta + \sum_{n=1}^{\infty} D_n J_n(kr) \sin n\theta \right\}, \quad (6)$$

여기서 C_n, D_n 는 내부영역에서의 미지수들이다.

식 (4)와 (6)에 주어진 미지수 $A_n, C_n(n=0, 1, \dots), B_n, D_n(n=1, 2, \dots)$ 는 외부영역과 내부영역이 만나는 경계면에서 정합조건식을 적용하여 구해진다. 먼저 경계면에서 법선 방향의 속도는 서로 같다는 정합조건식을 적용한다.

$$\frac{\partial \eta^{(O)}}{\partial r} = \frac{\partial \eta^{(I)}}{\partial r} \quad \text{on } r = a. \quad (7)$$

식 (5)와 (6)을 윗식에 대입하여 정리하며 아래와 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_n &= \epsilon_n(i)^n \cos n\beta + \frac{H'_n(ka)}{J'_n(ka)} A_n, \quad (n=0, 1, 2, \dots) \\ D_n &= \epsilon_n(i)^n \sin n\beta + \frac{H'_n(ka)}{J'_n(ka)} B_n, \quad (n=1, 2, \dots). \end{aligned} \quad (8)$$

윗식을 식 (6)에 대입하여 내부영역의 해를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\eta^{(I)} = A \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} [\epsilon_n(i)^n \cos n\beta + \frac{H'_n(ka)}{J'_n(ka)} A_n] J_n(kr) \cos n\theta + \sum_{n=1}^{\infty} [\epsilon_n(i)^n \sin n\beta + \frac{H'_n(ka)}{J'_n(ka)} B_n] J_n(kr) \sin n\theta \right\}. \quad (9)$$

투과성 경계면에서의 유체입자의 법선방향 속도는 투과성 경

계면 전후의 압력의 차와 선형적으로 비례하다는 Darcy의 법칙으로부터 나머지 정합조건식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \eta^{(O)}}{\partial r} = \frac{\partial \eta^{(I)}}{\partial r} = i\sigma(\theta)[\eta^{(I)} - \eta^{(O)}], \quad \text{on } r = a, \quad (10)$$

여기서 투과성 원기둥 원주방향에 따라 변하는 $\alpha(\theta) = \alpha_r(\theta) + i\sigma(\theta)$ 는 공극율 계수(Porous parameter)로 복소수 값을 가지며, 실수부 $\alpha_r(\theta)$ 은 박리에 의한 에너지 손실효과를 나타내며, 허수부 $\sigma(\theta)$ 는 속도와 압력사이의 위상차와 밀접한 관련이 있는 유체의 관성효과를 나타낸다. 본 연구에서는 실수부가 허수부보다 크다고 가정하여 $\alpha(\theta)$ 는 실수값을 갖는다고 가정하였다. 실수값 $\alpha(\theta)$ 는 투과벽의 특성을 나타내는 변수로 투과벽의 공극율과 국부형상에 밀접한 관련이 있다. 실제 계산에서는 $\alpha(\theta)$ 대신에 무차원화된 공극율 계수 $b(\theta) (= \frac{2\pi\sigma(\theta)}{k})$ 를 사용하였다. $b(\theta) \rightarrow 0$ 는 불투과성 벽을 의미하며, $b(\theta) \rightarrow \infty$ 는 입사파에 전혀 영향을 주지 않는 가상의 벽이 놓여 있는 경우이다. 투과벽이 구멍의 크기가 일정하며 균일하게 배열된 타공 구조물인 경우에 공극율 계수와 투과벽의 공극율 사이에는 $b = 5763P - 0.9717$ 인 선형관계가 유지됨을 Cho and Kim(2008)는 밝혔다.

앞서 유도한 외부영역과 내부영역의 해를 식 (10)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{2\sigma(\theta)}{\pi k^2 a J_n'(ka)} + H_n'(ka) \right) \cos n\theta A_n \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2\sigma(\theta)}{\pi k^2 a J_n'(ka)} + H_n'(ka) \right) \sin n\theta B_n \\ & = - \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n(i)^n \cos n\beta J_n'(ka) \cos n\theta \\ & - \sum_{n=1}^{\infty} \epsilon_n(i)^n \sin n\beta J_n'(ka) \sin n\theta. \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)에 $\cos m\theta$, ($m=0, 1, \dots$)와 $\sin m\theta$, ($m=1, 2, \dots$)를 곱하고 원주방향을 따라 0부터 2π 까지 적분한 뒤 삼각함수의 직교성(Orthogonality)을 이용하면 아래와 같은 대수 방정식을 얻을 수 있다. 아래 주어진 대수방정식을 수치적으로 풀기 위하여 고유함수의 개수를 $\cos n\theta$ 에 대해서는 $L+1$ 개, $\sin n\theta$ 에 대해서는 L 개를 취한다. 따라서 대수방정식의 미지수의 개수는 $2L+1$ 이다.

$$(SG+QH)A = -QK, \quad (12)$$

여기서

$$\begin{aligned} A &= [A_0, A_1, \dots, A_L, B_1, B_2, \dots, B_L]^T, \\ Q &= \text{diag}[2\pi, \pi, \pi, \dots, \pi], \\ G &= 2/(\pi k^2 a) \text{diag}[1/J_0'(ka), 1/J_1'(ka), \dots, \\ & 1/J_L'(ka), 1/J_1'(ka), 1/J_2'(ka), \dots, 1/J_L'(ka)], \\ H &= \text{diag}[H_0'(ka), H_1'(ka), \dots, H_L'(ka), H_1'(ka), H_2'(ka), \dots, H_L'(ka)], \\ K &= \text{diag}[\epsilon_0(i)^0 J_0'(ka), \dots, \epsilon_L(i)^L \cos L\beta J_L'(ka), \end{aligned}$$

$$\epsilon_1(i)^1 \sin \beta J_1'(ka), \dots, \epsilon_L(i)^L \sin L\beta J_L'(ka)]$$

이며, 윗첨자 T 는 전치행렬을 나타내며, 행렬 S 는 아래와 같이 정의된다.

$$S_{mn} = \begin{cases} \int_0^{2\pi} \sigma(\theta) \cos n\theta \cos m\theta d\theta, & 0 \leq m \leq L, 0 \leq n \leq L \\ \int_0^{2\pi} \sigma(\theta) \sin(n-L)\theta \cos m\theta d\theta & 0 \leq m \leq L, L+1 \leq n \leq 2L+1 \\ \int_0^{2\pi} \sigma(\theta) \cos n\theta \sin(m-L)\theta d\theta & L+1 \leq m \leq 2L+1, 0 \leq n \leq L \\ \int_0^{2\pi} \sigma(\theta) \sin(n-L)\theta \sin(m-L)\theta d\theta & L+1 \leq m \leq 2L+1, L+1 \leq n \leq 2L+1, \end{cases}$$

식 (12)에 주어진 대수방정식을 풀어 A_m, B_n 을 구하면 내부영역에서의 미지수 C_m, D_n 는 식 (8)로부터 얻어진다.

투과성 원기둥에 작용하는 파랑하중은 내부영역과 외부영역의 압력의 차를 원기둥 표면에 따라 적분하여 얻어진다.

$$F = -\frac{\rho g A a}{k} \tanh kh \int_0^{2\pi} [\eta^{(O)}(a, \theta) - \eta^{(I)}(a, \theta)] \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} d\theta, \quad (13)$$

여기서 상단은 x 방향의 파랑하중을, 하단은 y 방향의 파랑하중을 나타낸다. 내부영역의 파형식의 제곱을 원형실린더 내부 전 영역에 걸쳐 평균을 취한 평균 제곱 변위(Mean-square elevation)는 다음과 같다.

$$\overline{|\eta^{(I)}|^2} = \frac{1}{\pi a^2} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^a r dr |\eta^{(I)}|^2. \quad (14)$$

공극율 계수가 원기둥의 원주방향을 따라 일정하다면($\alpha(\theta) = \alpha$) 공극율이 일정한 투과성 원기둥에 의한 산란문제와 같다. 이때 행렬 $S (= \sigma \times \text{diag}[2\pi, \pi, \pi, \dots, \pi])$ 는 대각행렬로 바뀌어 식 (12)로부터 간단하게 외부영역과 내부영역에서의 미지수들을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} A_n &= -\frac{\epsilon_n(i)^n \cos n\beta J_n'^2(ka)}{\left\{ \frac{2\sigma}{\pi k^2 a} + J_n'(ka) H_n'(ka) \right\}}, \\ B_n &= -\frac{\epsilon_n(i)^n \sin n\beta J_n'^2(ka)}{\left\{ \frac{2\sigma}{\pi k^2 a} + J_n'(ka) H_n'(ka) \right\}}, \\ C_n &= \frac{2\sigma \epsilon_n(i)^n \cos n\beta}{\left\{ 2\sigma + \pi k^2 a J_n'(ka) H_n'(ka) \right\}}, \\ D_n &= \frac{2\sigma \epsilon_n(i)^n \sin n\beta}{\left\{ 2\sigma + \pi k^2 a J_n'(ka) H_n'(ka) \right\}}. \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에서 극한값 $\sigma \rightarrow 0$ 는 불투과성 원통구조물에 의한 산란문제를 뜻하며, $\beta = 0^\circ$ 일 때 $A_n = -\epsilon_n(i)^n \frac{J_n'(ka)}{H_n'(ka)}$, $B_n = -\epsilon_n(i)^n$

로 잘 알려진 MacCamy and Fuchs(1954)의 해석해를

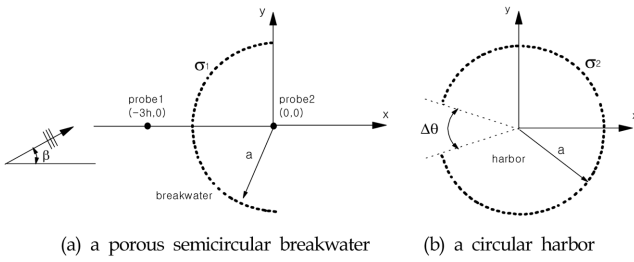


Fig. 2 Numerical models

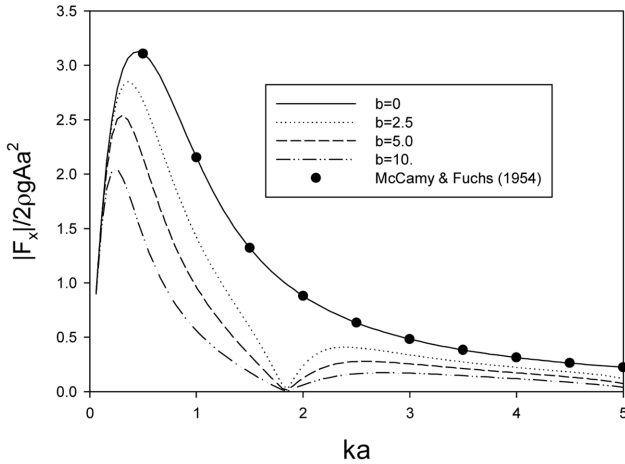


Fig. 3 Non-dimensional wave forces in x-direction acting on a porous circular cylinder for $h/a = 5, \beta = 0^\circ$

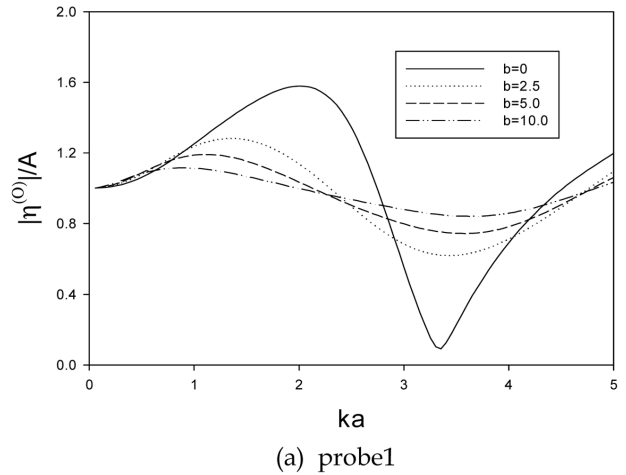
얻을 수 있다.

3. 계산결과 및 고찰

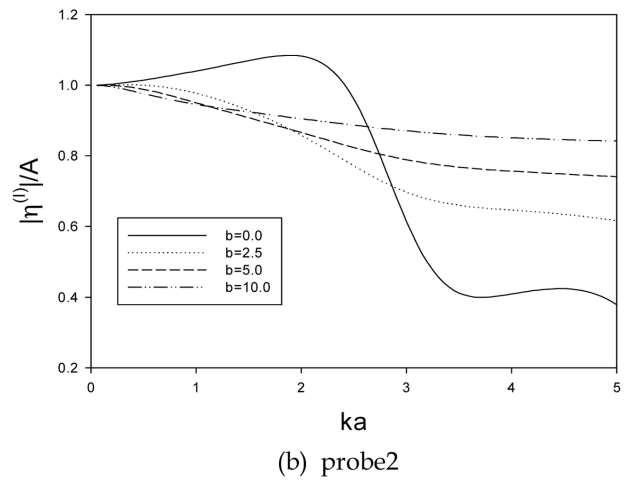
3.1 투과성 반원형 방파제

Fig. 3은 공극율이 일정한 투과성 원기둥에 작용하는 무차원화된 x 방향의 파랑하중을 무차원화된 파장(ka)에 대하여 그린 그림이다. 여기서 입사각 $\beta = 0^\circ$ 이고 수심과 원기둥 반지름과의 비는 $h/a = 5$ 이다. 실선은 불투과성 원기둥을 뜻하며 나머지 곡선은 투과성 원기둥을 뜻한다. 무차원화된 공극율 계수(b)가 증가할수록 즉, 공극율이 커질수록 파랑하중이 계산영역내의 모든 ka 에 걸쳐 줄어드는 것을 볼 수 있다. 특히 투과성 원기둥인 경우에 $ka = 1.8$ 에서 x 방향의 파랑하중이 사라지는 불투과성 원기둥에서는 볼 수 없는 특징이 나타난다. 이 값은 닫혀진 원기둥 내부의 고유주파수들 중 하나와 일치한다. 원기둥 벽에서의 경계조건식 $J'_m(ka) = 0$ 를 만족하는 n 번째 해를 $k_{nm}a$ 라 할 때 $k_{nm}a = 1.84118$ 는 $(m, n) = (1, 1)$ 일 때의 고유주파수이다.

Fig. 4는 반원형 투과성 방파제가 설치되었을 때 방파제 전후 두 지점(Probe1, 2)에서의 진폭을 입사파의 진폭으로 나눈 진폭비($|\eta|/A$)를 ka 에 대하여 그린 그림이다. Fig. 1의 계산모델에서 반원형 투과성 방파제를 만들기 위하여 $\theta_1 = 90^\circ$ 부터 $\theta_2 = 270^\circ$ 까지 전면의 벽에 일정한 공극율 계수(σ)를 주었고, 후면의 벽을 완전 투과벽으로 만들기 위하여 공극율 계수(σ_2)에 큰 값



(a) probe1



(b) probe2

Fig. 4 Amplification factor at probe1 and probe2 by a porous semicircular breakwater as function of porous parameter b and ka for $h/a = 0.5, \beta = 0^\circ$

을 부여하였다(Fig. 2 참조). 수심과 원기둥의 반지름의 비(h/a)는 0.5이다. 완전히 막힌 불투과성 방파제가 설치된 경우($b = 0$)에 방파제 전면에서의 진폭비는 방파제로부터의 반사파와 입사파의 위상차에 의하여 ka 값에 따라 최대 1.6에서 최소 0.2 사이의 값을 갖는다. 투과성 방파제를 설치한 경우에는 투과성 벽을 통과하면서 발생하는 에너지 손실효과로 인한 반사파의 감소로 전반적으로 Probe1에서의 진폭비는 불투과성 방파제에 비하여 파장에 따른 변화폭이 크지 않은 완만한 곡선을 보여주고 있다. 방파제를 통과하는 지점(Probe2)에서의 투과파의 진폭비를 살펴보면 투과성 방파제는 $ka = 2.5$ 보다 작은 장파영역에서는 불투과성 방파제에 비하여 효과적으로 파를 차단하나 $ka = 2.5$ 이상인 단파영역에서는 불투과성 방파제에 비하여 진폭비가 오히려 커지는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 5는 반원형 방파제에 작용하는 무차원화된 x 방향의 파랑하중을 보여주고 있다. 실선으로 표시된 불투과성 방파제에 비하여 점선으로 표시된 투과성 방파제에 작용하는 파랑하중이 크게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이러한 사실은 투과성 방파제의 큰 장점이다. 그러나 파랑하중을 줄이기 위하여 공극율이 너

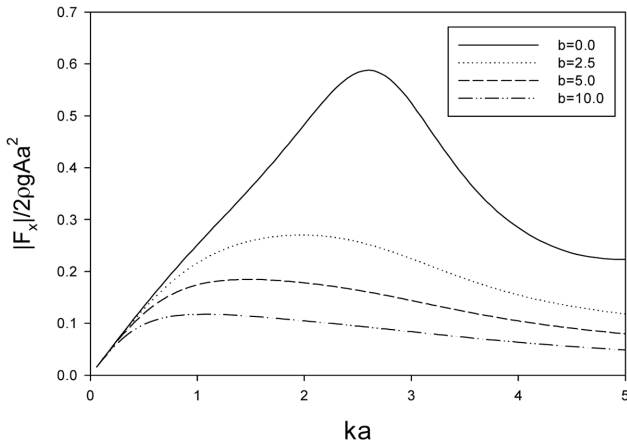
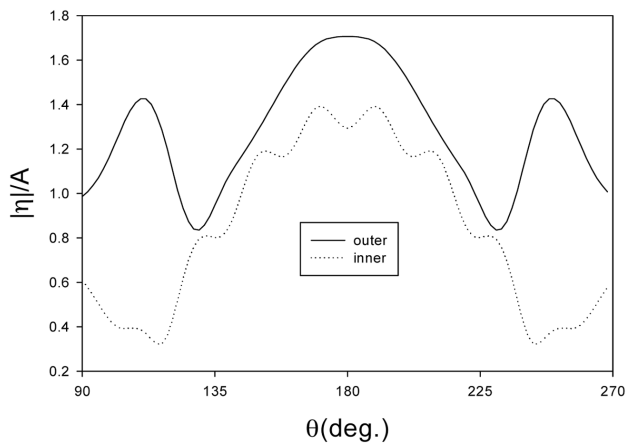
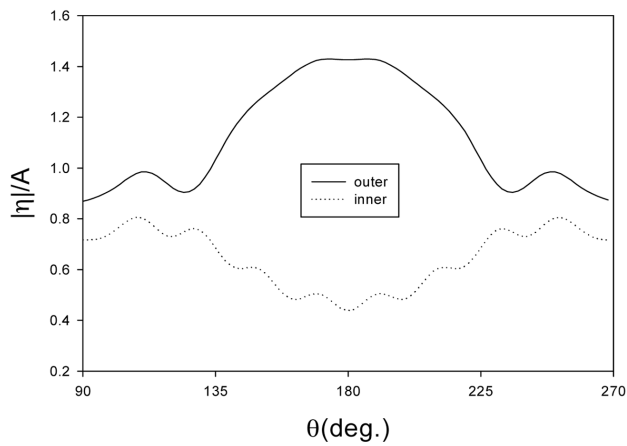


Fig. 5 Non-dimensional wave forces in x-direction on a porous semicircular breakwater as function of porous parameter b and ka for $h/a=0.5$, $\beta=0^\circ$



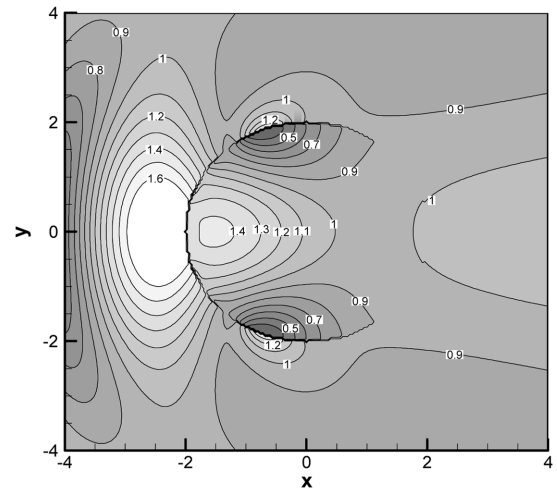
(a) $b=0.0$



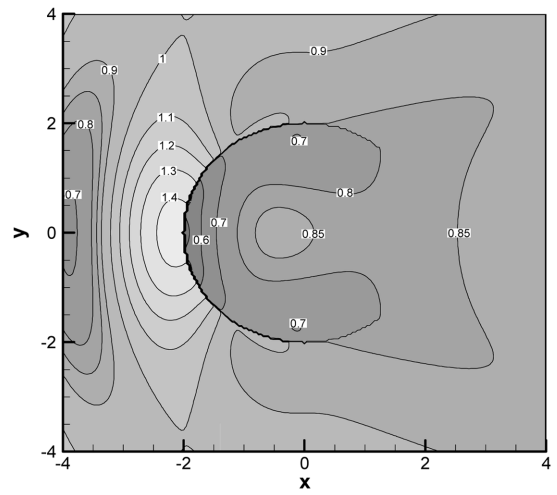
(b) $b=2.5$

Fig. 6 Wave run-up on outer and inner wall of a porous semicircular breakwater for $ka=2.0$, $h/a=0.5$, $\beta=0^\circ$

무 큰 투과벽을 사용하면 특정한 주파수 범위에서 파 차단효과가 떨어지므로 공극율에 대한 적절한 선택이 필요하다.



(a) $b=0.0$

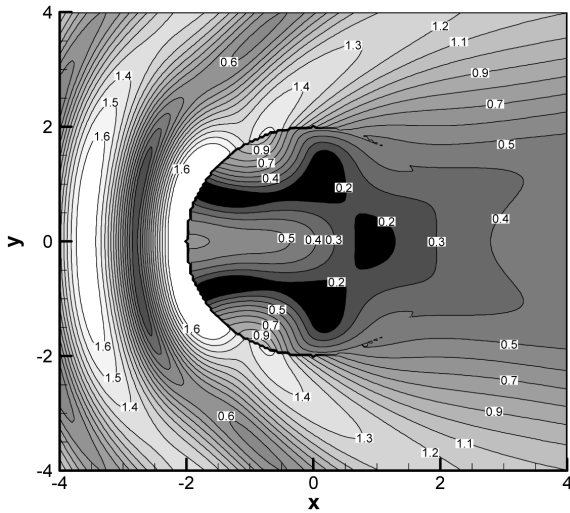


(b) $b=2.5$

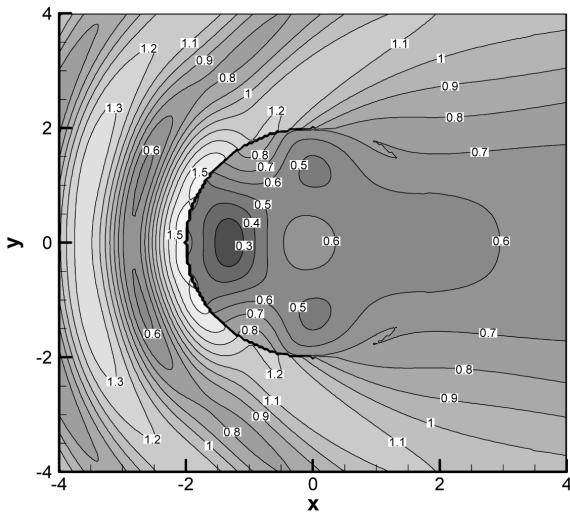
Fig. 7 Contour plot of free-surface elevation ($|\eta|/A$) around a porous semicircular breakwater for $ka=2.0$, $h/a=0.5$, $\beta=0^\circ$

Fig. 6은 $ka=2.0$ 에서 쳐올림 파(Run-up wave)의 진폭비 ($|\eta(a, \theta)|/A$)를 방파제가 위치한 $\theta_1=90^\circ$ 로부터 $\theta_2=270^\circ$ 까지 원주방향에 따라 그린 그림이다. 여기서 실선과 점선은 각각 외벽과 내벽의 쳐올림 파의 진폭비를 나타낸다. 불투과성 반원 방파제를 설치한 경우, 원기둥 외벽과 내벽에서의 쳐올림 파의 진폭비의 최대값은 $\theta=180^\circ$ 에서 일어난다. 투과성 방파제를 설치하였을 때는 쳐올림 파의 진폭비가 불투과성 방파제에 비하여 전반적으로 감소됨을 볼 수 있다. 특히 내벽에서의 쳐올림 파의 진폭비가 크게 줄어들어 불투과성 방파제와 달리 $\theta=180^\circ$ 에서 쳐올림 파의 진폭비는 최소값을 갖는다.

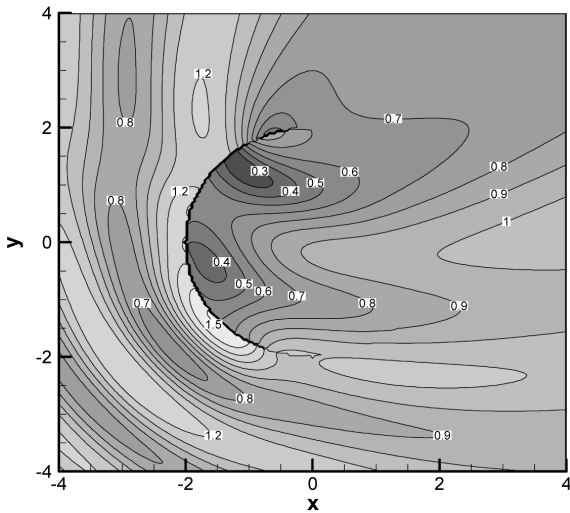
Fig. 7은 무차원화된 파장(ka)이 2.0일 때 불투과성($b=0.0$)과 투과성($b=2.5$) 반원형 방파제 주위의 파도응답을 등고선으로 나타내었다. 불투과성 반원형 방파제가 놓인 경우에 벽에서의 완전반사로 방파제 전면에서의 파고분포가 상대적으로 높게 나타났다. 그러나 투과성 방파제는 파가 투과성 벽을 통과하면서 발생하는 에너지 감소의 영향으로 방파제 전면뿐 아니라 후면



(a) $b = 0, \beta = 0^\circ$



(b) $b = 2.5, \beta = 0^\circ$



(c) $b = 2.5, \beta = 45^\circ$

Fig. 8 Contour plot of free-surface elevation ($|\eta|/A$) around a porous semicircular breakwater for $ka = 4.0$, $h/a = 0.5$

에서의 파도응답이 불투과성에 비하여 오히려 낮게 나타났다. 투과성 방파제는 불투과성 방파제와 비교하여 파랑하중을 줄이면서 파를 효과적으로 차단할 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 8은 무차원화된 파장(ka)이 4.0일 때의 계산결과이다. Fig. 7과 달리 불투과성 방파제 후면의 파고분포가 투과성 방파제를 설치하였을 때보다 전반적으로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 즉, Fig. 4와 연계하여 생각해 보면 ka 가 2.5보다 큰 단파영역인 경우 불투과성 방파제의 파 차단성능이 우수하나 ka 가 2.5보다 작은 장파영역에서는 투과벽을 통과하면서 발생하는 에너지 손실 효과가 상대적으로 증가하여 투과성 방파제가 입사파를 차단하는데 효과적이다. 입사각 변화에 따른 반원형 방파제 주변에서의 파도응답을 Fig. 8c에 그렸다. 입사각이 커지면 방파제 끝단에서 회절되어 들어오는 파가 증가하여 방파제 후면에서 파고분포가 높게 나타나 방파제로서의 기능이 상실된다. 따라서 반원형 방파제는 가능한 한 입사파의 진행방향에 대칭으로 설치해야 효과적이다.

3.2 원형 항만내 공진현상

현재의 비균일한 공극율을 갖는 원기둥의 해석모델을 이용하여 투과성 안벽으로 구성된 원형 항만내의 파고분포를 살펴본다(Fig. 2b참조). 원형 항만의 입구를 구현하기 위하여 Fig. 1에서 $\theta_1 = 175^\circ$, $\theta_2 = 185^\circ$ 로 잡아 이들 사이각($\Delta\theta = 10^\circ$)에 완전투과가 가능하도록 공극율 계수(σ_1)에 큰 값을 주었고 나머지 경계면에서는 불투과성 또는 투과성 벽을 구현하기 위하여 공극율 계수(σ_2)에 0 또는 일정한 값을 주었다. Fig. 9는 $h/a = 0.5$ 일 때 원형 항만내의 안벽($r = a$, $\theta = 0^\circ$)에서의 증폭비(Amplification factor)를 보여주고 있다. 여기서 실선은 $b (= \frac{2\pi\sigma}{k})$ 는 0으로 불투과성 안벽을 나타내며 $b = 1.0, 2.0$ 은 투과성 안벽을 나타낸다. 그림에서 보듯이 ka 가 0부터 5까지 변할 때 5개의 공진점들이 존재함을 알 수 있다. 입사파의 주파수와 항만내 고유주파수가 일치 될 때 나타나는 공진점들의 위치가 타당항가를 조사하기 위해 단차진 원형항만의 고유주파수를 구하였다. 경계조건식

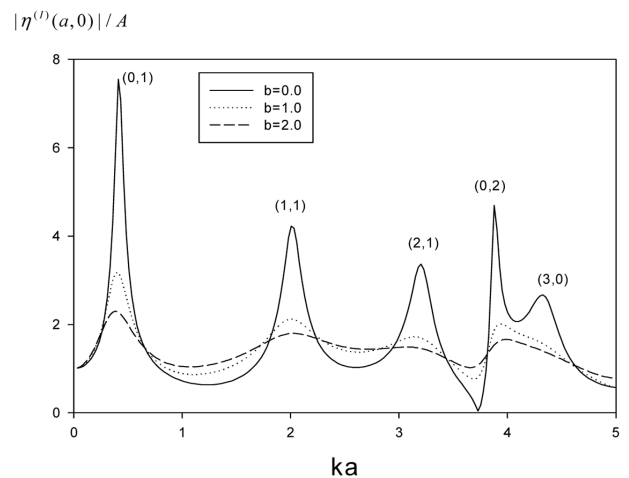


Fig. 9 Amplification factor at $r = a$, $\theta = 0^\circ$ of a circular harbor as function of porous parameter b and ka for $h/a = 0.5$, $\beta = 0^\circ$

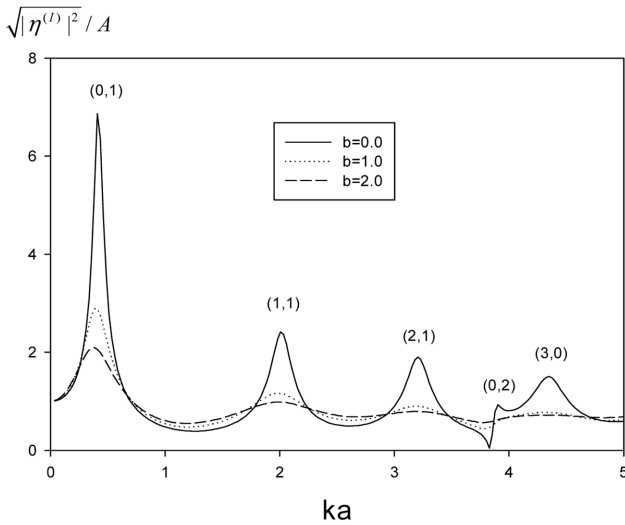


Fig. 10 RMS. wave amplitude of a circular harbor as function of porous parameter b and ka for $h/a=0.5$, $\beta=0^\circ$

$(\frac{\partial \eta^{(n)}}{\partial r}=0)$ 으로부터 나오는 식 $J_m'(ka)=0$ 을 만족하는 고유주파수는 무한개 존재한다. $J_m'(ka)$ 이 0이 되는 n 번째 근을 $k_{mn}a$ 이라 할 때 계산 범위내에 존재하는 고유주파수들은 $k_{01}a=0.0$, $k_{11}a=1.8412$, $k_{21}a=3.0542$, $k_{02}a=3.8317$, $k_{30}a=4.2012$ 이다. 그림에서 나타난 5개의 공진점들의 위치는 대체로 원형항만의 고유주파수와 일치하고 있는데, 고주파수 영역으로 다소 이동한 것은 항만입구를 통하여 빠져나가는 방사감쇠(Radiation damping)에 기인한다.

항만내 특정한 지점이 아닌 항만내부 전체 파도응답 특성을 살펴보기 위하여 항만 내부 전 영역에 걸쳐 수면 변위를 평균을 취한 R.M.S.(Root mean square)을 Fig. 10과 11에 그렸다. 앞선 그림과 같이 투과성 안벽과 불투과성 안벽이 항만내 R.M.S. 값에 미치는 영향을 Fig. 10에서 살펴보았다. b 가 0보다 큰 투과

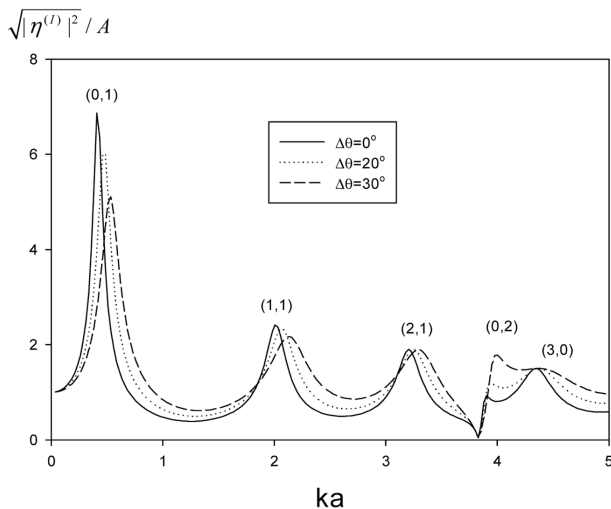


Fig. 11 RMS. wave amplitude of a circular harbor as function of an opening $\Delta\theta$ and ka for $h/a=0.5$, $\beta=0^\circ$

성 안벽일 때는 에너지 감쇠효과로 공진점에서의 증폭비가 크게 줄어드는 것을 볼 수 있으며 공진점을 제외한 주파수에서는 오히려 R.M.S.값은 커져 완만한 응답곡선을 보여주고 있다. $(m, n)=(0, 1)$ 인 Helmholtz 공진모드에서의 R.M.S.값이 다른 공진 모드들에 비해 2배 이상 크며 고차 공진모드로 이동할수록 R.M.S.값은 점차 줄어든다. Fig. 11은 항만입구의 크기변화($\Delta\theta=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$)에 따른 R.M.S.값을 보여주고 있다. 항만입구가 커질수록 입구를 통하여 빠져나가는 에너지가 증가하여 공진점에서의 증폭비는 줄어들며 방사감쇠(Radiation damping)의 영향으로 공진점의 위치가 고주파수영역으로 이동한다.

Fig. 12는 2개의 공진주파수($ka=2.0, 3.25$)에서의 원형 항만내 파도응답 분포를 등고선으로 나타내었다. $ka=2.0$ 은 공진모드 $(m, n)=(1, 1)$ 과 일치하며, $ka=3.25$ 는 공진모드 $(m, n)=(2, 1)$ 에 해당한다. Fig. 12a는 무차원화된 공극율 계수(b)가 0인 불투과성 안벽이 설치되었을 때의 파도응답을 나타내며, Fig. 12b는 공극율 계수(b)가 2.5인 투과성 안벽을 설치한 경우이다. 항만입구의 크기는 $\Delta\theta=10^\circ$ 이다. 불투과성 안벽을 가진 항만의 경우 주파수 $ka=2.0$ 에서의 파도응답 분포는 항만입구와 반대편 안벽에서 큰 값을 갖고 항만 중앙부로 접근함에 따라 값이 줄어드는 특징을 보여주고 있다. 반면에 $ka=3.25$ 에서의 파도응답 분포는 원형 항만을 십자로 나누었을 때 각 모서리에서 큰 값을 갖고 $(x, y)=(0, 0)$ 에 접근함에 따라 줄어든다. 공진주파수($ka=2.0, 3.25$)에서 나타난 파도응답의 등고선 형태는 닫혀진 항만내의 고유함수인 $J_1(k_{11}r)\cos\theta$, $J_2(k_{21}r)\cos 2\theta$ 의 형태와 거의 유사하다. 그러나 투과성 안벽을 가진 항만내 파도응답은 불투과성 안벽과 비교하여 파가 투과성 벽을 통과하면서 발생하는 에너지 감쇠의 영향으로 크게 줄어든다. 전체적인 모양은 Fig. 12a와 유사하나 다소 왜곡된 형상을 보여주고 있다.

4. 결 론

원주방향으로 변하는 공극율을 가진 투과성 원기둥과 파와의 상호작용문제에 대한 해석해를 구하고 계산으로 반원형 투과성 방파제의 파 차단성능과 투과성 안벽으로 이루어진 원형 항만내의 공진문제를 살펴보았다. 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 투과성 반원형 방파제는 불투과성 반원형 방파제와 비교하여 반사파와 파랑하중 그리고 파 쳐올림 현상을 크게 줄일 수 있는 장점을 지니고 있으며 파 차단성능도 ka 가 2.5보다 작은 저 주파수영역에서는 오히려 우수함을 밝혔다.
- (2) 입사각이 커지면 방파제 한 끝단에서 회절되어 들어오는 파 에너지의 증가로 방파제 후면에서 파고분포가 높게 나타났다. 따라서 반원형 방파제의 파 차단성능을 높이기 위해서는 가능한 한 입사파의 진행방향에 대칭으로 설치해야한다.
- (3) 불투과성 안벽으로 구성된 항만은 입사파의 주파수가 원형 항만의 고유주파수와 일치될 때 항만내 증폭비는 입사파고보다 몇 배 이상 커지는 항만공진 현상이 나타났다. 그러나 투과성 안벽으로 이루어진 항만은 공진주파수에서 증폭비가 크게 줄어들며 공진주파수에서 벗어난 주파수에서는 증폭비가 다소

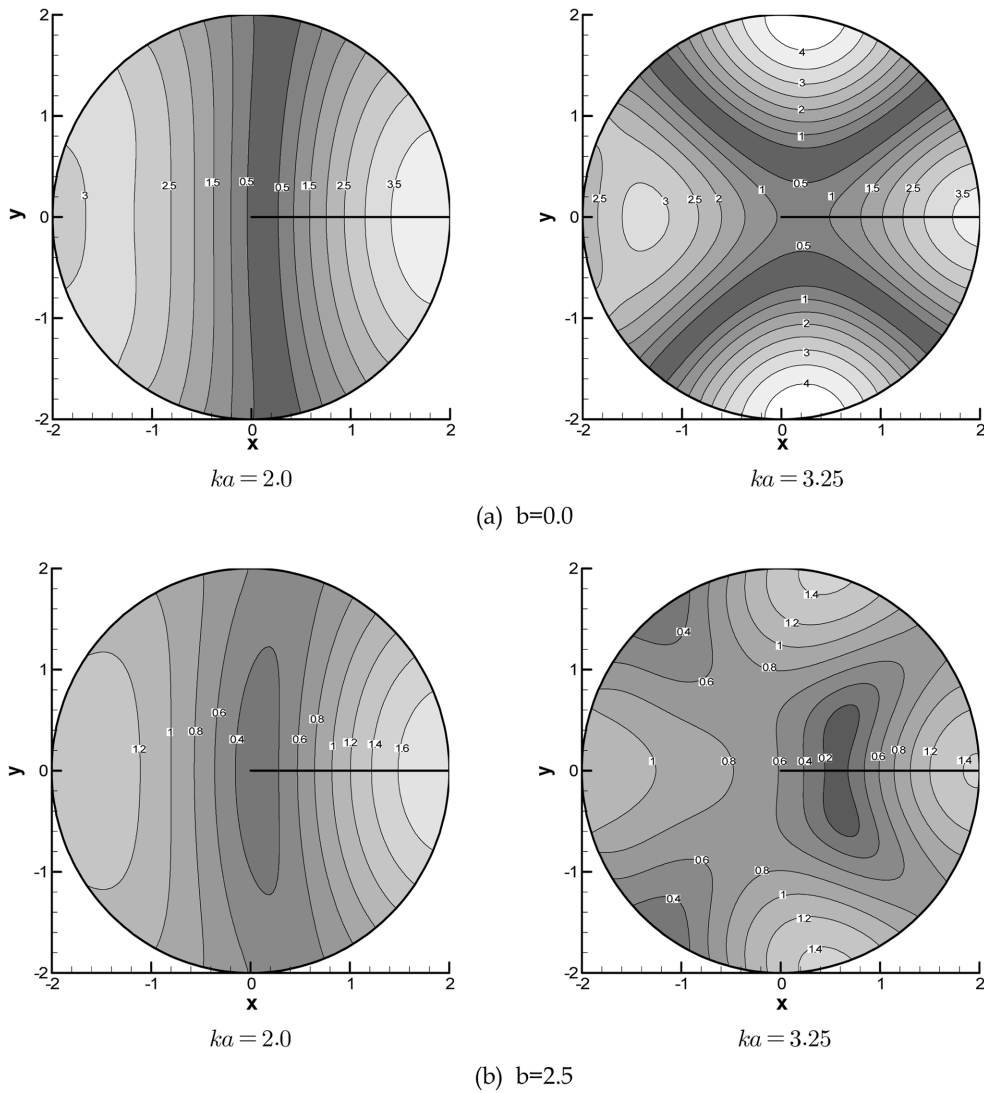


Fig. 12 Contour lines of $|\eta^{(i)}|/A$ at two natural modes $(m, n) = (1, 1), (2, 1)$ in a circular harbor for $h/a = 0.5, \Delta\theta = 10^\circ, \beta = 0^\circ$

커져 완만한 파도응답 곡선을 보여주었다.

(4) 항만입구가 커질수록 항만입구를 통하여 빠져나가는 에너지가 증가하여 공진점에서의 증폭비는 줄어들며 공진점의 위치가 고주파수영역으로 이동함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2009년에 한국과학기술원이 지원하여 수행한 "모바일 하버의 하역능률 향상을 위한 신속설치용 투과성 방파제 설계기술 개발" 사업의 결과중 일부를 발췌하여 수록한 것임을 밝히며 연구비의 지원에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

조일형 (2003). "N개의 투과성 원기둥 배열에 의한 파랑제어",

한국해양·해양공학회지, 제15권, 제4호, pp 232-241.
 조일형 (2004). "투과성 이중 원통구조물 배열에 의한 파랑제어", 한국해양공학회지, 제18권, 제5호, pp 7-14.
 Cho, I.H. and Kim, M.H. (2008). "Wave Absorbing System Using Inclined Perforated Plates", J. Fluid Mech., Vol 608, pp 1-20.
 Dalrymple, R.A., Losada, M.A. and Martin P.A. (1991). "Reflection and Transmission from Porous Structure Under Oblique Wave Attack", J. Fluid Mech., Vol 224, pp 625-644.
 Isaacson, M., Premasiri, S. and Yang, G. (1998). "Wave Interactions with Vertical Slotted Barrier", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg., Vol 124, pp 118-126.
 Jarlan, G.E. (1961). "A Perforated Vertical Wall Breakwater", Dock Harbour Auth. XII, Vol 486, pp 394-398.
 Sankarbaru, K., Sannasiraj, S.A. and Sundar, V. (2008).

- "Hydrodynamic Performance of a Dual Cylindrical Caisson Breakwater", *Ocean Engineering*, Vol 55, pp 431-446.
- MacCamy, R.C. and Fuchs, R.A. (1954). "Wave Forces on Piles: A Diffraction Theory", Tech. Memo No.69, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board.
- Yu, X. and Chwang, A.T. (1994). "Wave-induced Oscillation in Harbor with Porous Breakwaters", *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg.*, Vol 120, pp 125-144.
- Williams, A.N. and Li, W. (2000). "Water Wave Interaction with an Array of Bottom-mounted Surface-piercing Porous Cylinders", *Ocean Engineering*, Vol 27, pp 841-866.
-
- 2009년 8월 19일 원고 접수
2009년 12월 8일 심사 완료
2009년 12월 21일 게재 확정