한국해양공학회지 제18권 제5호, pp 7~14, 2004 (ISSN 1225-0767)

투과성 이중 원통구조물 배열에 의한 파랑제어

조일형*
*제주대학교 해양산업공학부

Wave Control by an Array of Porous Dual Cylindrical Structures

IL-HYOUNG CHO*
*Faculty of Marine Industrial Engineering, Cheju National University, Jeju, Korea

KEY WORDS: Porous Cylindrical Structure 투과성 원통구조물, Wave Control 파랑제어, Seawater Exchanging Breakwater 해수교환 방파제, Eigenfunction Expansion Method 고유함수 전개법, Porous Coefficient 공극율 계수, Wave Run-up 파 처올림.

ABSTRACT: *The interaction of incident monochromatic waves with an array of N surface-piercing porous dual cylindrical structures is investigated in the frame of three-dimensional linear potential theory. The dual cylindrical structure is composed of concentric two cylinders. The exterior cylinder is porous and the interior cylinder is impermeable. The fluid domain is divided into N+1 regions i.e. a single exterior region and N interior regions. The diffraction potentials in each region representing the scattering of incident waves by an array of porous cylindrical structures are expressed by the Fourier Bessel series. The unknown coefficients in each region are determined by applying the porous boundary condition and continuity of mass flux at the matching boundary. It is found that an array of porous cylindrical structures reduces both the wave forces and the wave run-up, and shows the excellent performance of wave blocking. The results show that various types of breakwater exchanging seawater are prospective by controlling the porosity and the configuration of cylindrical structures.*

1. 서 론

기존의 불투과성 중력식 방파제는 파랑뿐만 아니라 해수의 흐름을 완전히 차단하여 항만내의 해양생태계 파괴와 연안내의 물의 오염을 가속시켰다. 항만내 수질환경을 개선하기 위해서는 항만주변의 오염원을 원천적으로 방지하거나 새로운 개념의 방파제를 도입하여 항내·외 해수교환을 증진시키는 방법이 있다. 오염원을 원천적으로 방지하기에는 막대한 자금과 시간이 요구되므로 새로운 개념의 방파제 개발을 통한 항내·외 해수교환을 높이는 방법이 항만오염을 해결할 수 있는 보다 현실적인 대책이라 볼 수 있다. 항내·외 해수교환이 가능한 투과성 방파제는 구조형식별로 유공식, 부유식, 특수식 방파제로 크게 분류할 수 있다.

유공식 방파제는 기존의 불투과성 중력식 방파제를 개량한 형태로 구조물내부에 유공 또는 슬릿을 설치한 형태이다. 유공케이슨 방파제는 케이슨 전 후면에 유공벽을 설치하고 벽 사이에 유수실을 두어 파가 유공벽을 통과할 때 발생되는 제트류와 유수실 내부에서의 난류에 의해 입사파의 에너지를 소멸시키는 형태이다. 기존의 불투과성 중력식 케이슨에 비하여 공사비가 적게 들어 경제적이기는 하나 가볍기 때문에 활동과 전도에 취약한 면을 지니고 있어 비교적 파랑이 잔잔한 해역에 적합하다. 이중 원통 케이슨 방파제는 일본 항만기술연구소에서 개발되어 몇 개의 항에 시공된 방파제로서 2개의 원기둥을 동심원 상에 배치한 형태이다. 외부원기둥은 투과성 벽으로, 내부원기둥은 불투과성 벽으로 제작하여 입사파의 에너지를 소멸시키는 동시에 항내·외로 해수교환이 가능케 한 형태이다. 이러한 형태는 곡면구조이므로 비교적 작은 단면으로 큰 외력을 지지할 수 있으며 중력식 방파제에 비하여 가볍기 때문에 대수심 연약지반에 적합한 형태이다.

원기둥에 의한 파의 산란문제는 해양공학 분야에서 해석해가 존재하는 대표적인 문제로 McCamy and Fucks(1954)에 의해 해석해가 구해진 이후로 수치해석 방법의 검증용으로 널리 이용되어 왔다. 이후에 여러 개의 불투과성 원기둥이 배열되어 있을 때 파랑과 원기둥들 사이의 상호작용 문제를 해석하는 많은 연구들이 있었다(McIver, 2002; Maniar and Newman, 1997; Ohkusu, 1974; Linton and Evans, 1990; Kim, 1993).

투과성 원기둥에 의한 파랑변형문제를 다룬 논문들로는 Wang and Ren(1994), Williams and Li(2000), 조일형(2003)의 연구논문들을 들 수 있다. Wang and Ren(1994)은 2개의 원기둥이 동심원상에 위치한 1개의 원통구조물에 의한 파랑변형을 다뤘는데, 내부원기둥은 불투과성이고 외부원기둥은 일정한 공극율을 가진 투과성 벽으로 취급하였다. 투과성 벽의 효과를 수학적으로 고려하기 위하여 투과성 벽 전후의 압력차는 벽을 통과하는 물입자의 속도에 선형적으로 비례한다는 Darcy법칙을 적용하였다. Williams and Li(2000)은 일정한 직경을 가진 여러개의 투과성 원기둥들이 해저면 바닥에 놓여있을 때 파랑과 투과성 원기둥들 사이의 상호작용문제를 해석하였다. 그들

제1저자 조일형 연락처: 제주시 아라동 1번지
064-754-3482 cho0904@cheju.ac.kr

은 원기둥의 벽에 투과성 경계조건식을 도입하여 Linton and Evans(1990)의 불투과성 원기둥들과 파의 상호작용 문제를 투과성 원기둥들과 파의 상호작용 문제로 확장하였다. 유체영역을 1개의 외부영역과 N개의 내부영역으로 나누어 각 영역에서 해를 독립적으로 구한 뒤 외부영역과 내부영역이 만나는 경계면에서 정합조건식을 적용하여 완전한 해를 구하는 고유함수전개법을 사용하였다. 이때 N개의 원기둥들 사이의 상호작용을 고려하기 위하여 Linton and Evans(1990)가 사용한 Bessel 함수의 덧셈정리(addition theorem)를 적용하였다.

본 연구에서는 투과성 외부원기둥과 불투과성 내부원기둥을 동심원 상에 위치시킨 원통구조물을 일렬로 배열하여 만든 구조물에 의한 파랑제어성능을 수치계산을 통하여 살펴보았다. 이러한 형태의 방파제는 입사파의 에너지를 부분적으로 투과시키면서 반사파의 에너지를 줄일 수 있는 해수교환방파제의 한 종류라 할 수 있다. 입사파의 주파수와 원통구조물의 공극율 그리고 배열형태를 바꿔가면서 파랑제어효과와 원통구조물에 작용하는 파력 그리고 처올림(wave run-up) 파형을 살펴보았다.

2. 문제의 정식화

수심이 h인 해저면 바닥에 고정된 N개의 원통구조물들과 파의 상호작용 문제를 살펴본다. 원통구조물은 2개의 원기둥이 동심원상에 놓인 형태이다. 내부원기둥은 불투과성 재질로 반지름이 a_j이며, 외부원기둥은 일정한 공극율을 가진 투과성 재질로 만들어지며 반지름이 b_j이다. 해석의 편의를 위하여 Fig. 1과 같이 공간상에 고정된 좌표계 (x, y, z)와 N개의 원통구조물의 중심에 고정된 좌표계 $(r_j, \theta_j, z), j=1,2,\ldots,N$를 도입한다. j번째 원통구조물의 중심의 좌표는 (x_j, y_j)이다. j번째 원통구조물 중심에 대한 k번째 원통구조물 중심의 상대 위치는 (R_{jk}, α_{jk})로 표현할 수 있다(Fig. 1 참조). 입사파는 규칙파로 진폭은 A이며, 주파수 ω를 가지고 x축의 양의 방향과 β의 각도를 이루면서 들어온다고 가정한다. 유체를 비압축성, 비점성으로 가정하고, 유체운동을 비회전성으로 가정하면 유체입자의 운동은 속도포텐셜로 표현이 가능하다. 유체입자의 운동이 주파수 ω를 갖고 조화운동을 한다면 속도포텐셜을 $\Phi(r,\theta,z,t)=Re\{\phi(r,\theta,z)e^{-i\omega t}\}$로 쓸 수 있다. 또한 일정한 수심에 원통구조물이 바닥으로부터 직립으로 수면까지 놓여있기 때문에 3차원 속도포텐셜을 $\phi(r,\theta,z)=-\frac{ig}{\omega}A\eta(r,\theta)f(z)$라 쓸 수 있다. 여기서 $f(z)=\frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh}$이며, k는 파수(wavenumber)로 분산식 $\omega^2=gk\tanh kh$을 만족한다. N개의 원통구조물이 일직선상에 배열되어 있을 때 유체영역을 Fig. 1과 같이 외부원기둥의 바깥영역인 외부영역과 외부원기둥과 내부원기둥으로 둘러싸인 N개의 내부영역으로 나눈다. 입사파의 진폭으로 무차원화된 파형식 $\eta(r,\theta)$을 외부영역에서는 윗첨자 (O), 내부영역에서는 윗첨자 (I)로 구분한다. 외부영역에서의 파형식은 입사파와 N개의 원통구조물들에 의한 산란파의 합으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\eta^{(O)}=\eta_I+\sum_{j=1}^{N}\eta_s^j \tag{1}$$

입사파가 x축의 양의 방향으로 β의 각도를 이루면서 들어올 때 식 (1)에서 입사파는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\eta_I=e^{ikr\cos(\theta-\beta)}=\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}(i)^nJ_n(kr)e^{in(\theta-\beta)} \tag{2}$$

여기서 J_n는 제 1종 Bessel 함수이다. 식 (2)를 j번째 원통구조물의 중심에 고정된 좌표계에서 표현하면 아래와 같다.

$$\eta_I=I_j\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}(i)^nJ_n(kr_j)e^{in(\theta_j-\beta)} \tag{3}$$

여기서 $I_j(=e^{ik(x_j\cos\beta+y_j\sin\beta)})$는 공간상에 고정된 좌표계의 원점과 j번째 원통구조물의 중심간의 위상차이를 나타내는 함수이다. j번째 원통구조물로부터 발생하는 산란파는 2차원 Helmholtz 방정식과 무한원방에서의 방사조건식(radiation condition)을 만족해야한다.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial\theta^2}+k^2\right)\eta_s^j=0 \tag{4}$$

$$(kr)^{1/2}\left(\frac{\partial}{\partial r}-ik\right)\eta_s^j\to 0 \quad as\ kr\to\infty \tag{5}$$

위에 주어진 경계치 문제의 해는 아래와 같다.

$$\eta_s^j=\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}e^{in\theta_j}A_n^jZ_n^jH_n(kr_j) \tag{6}$$

여기서 H_n는 제1종 Hankel 함수이다. $Z_n^j=J_n'(kb_j)/H_n'(kb_j)$로 정의되며, 윗첨자 '는 함수의 미분을 뜻한다. 외부영역에서의 파형식을 식(1),(3),(6)를 이용하면 다음과 같다.

$$\eta^{(O)}=I_j\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}(i)^nJ_n(kr_j)e^{in(\theta_j-\beta)}+\sum_{j=1}^{N}\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}e^{in\theta_j}A_n^jZ_n^jH_n(kr_j) \tag{7}$$

N개의 원통구조물들 사이의 상호작용을 고려하기 위하여 j번째 원통구조물 주위의 파형을 살펴보자. j번째 원통구조물 주위의 파형은 입사파에 의한 파형과 j번째 원통구조물에 의하여 산란된 파형 그리고 주위의 나머지 원통구조물 $(k=1,2,\ldots,N, k\neq j)$에 의하여 산란된 파형들의 합으로 구성되어 있다. 이러한 물리적 현상을 수학적으로 표현하기 위하여 Graf의 Bessel함수 덧셈정리(additional theorem)를 사용한다(Linton and Evans, 1990; Maniar and Newman, 1997; Kim, 1993).

덧셈정리를 이용하면 외부영역에서의 파형식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\eta^{(O)}(r_j,\theta_j)=\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}\{I_j(i)^n e^{-in\beta}J_n(kr_j)+A_n^j Z_n^j H_n(kr_j) + \sum_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{N}\sum_{m=-\infty}^{m=\infty}A_m^k Z_m^k H_{m-n}(kR_{kj})e^{i(m-n)\alpha_{kj}}J_n(kr_j)\}e^{in\theta_j} \quad (8)$$

윗식은 $r_j<R_{kj}$일 때 성립하는 식이다. 식 (8)에서 우변의 첫 번째 항은 순수한 입사파를 뜻하며, 두번째 항은 j번째 원통구조물 자체에 의한 산란파를 나타내며, 세번째 항은 j번째 원통구조물을 제외한 인접한 원통구조물 군에 의해 산란된 파가 j번째 원통구조물에 미치는 영향을 나타낸다.

N개의 내부영역에서의 파형식은 2차원 Helmholtz방정식을 만족하므로 다음과 같이 표현된다.

$$\eta^{(I)}(r_j,\theta_j)=\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}[B_n^j J_n(kr_j)+C_n^j Y_n(kr_j)]e^{in\theta_j}\quad j=1,..,N \quad (9)$$

원통구조물의 내부원기둥 벽면($r_j=a_j$)에서 $\frac{\partial\eta^{(I)}}{\partial r}=0$이므로 $C_n=-\frac{J_n'(ka_j)}{Y_n'(ka_j)}B_n^j$이다. 이 값을 식 (9)에 대입하여 정리하면 내부영역에서의 파형식은 다음과 같다.

$$\eta^{(I)}(r_j,\theta_j)=\sum_{n=-\infty}^{n=\infty}B_n^j[J_n(kr_j)-\frac{J_n'(ka_j)}{Y_n'(ka_j)}Y_n(kr_j)]e^{in\theta_j} \quad (10)$$

식 (8)과 (10)에 주어진 미지수 $A_n^j, B_n^j (j=1,2,..,N)$는 외부영역과 내부영역이 만나는 경계면에서 적용될 정합조건식으로부터 구해진다. 외부영역과 내부영역이 만나는 투과성 경계면에서 법선 방향의 속도가 서로 같다는 정합조건식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial\eta^{(O)}}{\partial r}=\frac{\partial\eta^{(I)}}{\partial r}\quad on\ r_j=b_j\quad j=1,2,....,N \quad (11)$$

식 (8), (10)을 윗식에 대입하여 정리하며 아래와 같은 대수방정식을 유도할 수 있다.

$$I_j(i)^n e^{-in\beta}+\sum_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{N}\sum_{m=-\infty}^{m=\infty}A_m^k Z_m^k H_{m-n}(kR_{kj})e^{i(m-n)\alpha_{kj}} =-\frac{s_n}{Y_n'(ka_j)J_n'(kb_j)}B_n^j-A_n^j \quad (12)$$

여기서 $s_n=J_n'(ka_j)Y_n'(kb_j)-J_n'(kb_j)Y_n'(ka_j)$이다.

투과성 경계면인 외부원기둥에서의 유체입자의 법선방향 속도는 투과성 경계면 전후의 압력차와 선형적으로 비례한다는 Darcy의 법칙으로부터 나머지 경계조건식을 얻을 수 있다. (Isaacson, 1998; Yu, 1995).

$$\frac{\partial\eta^{(O)}}{\partial r}=\frac{\partial\eta^{(I)}}{\partial r}=ikG(\eta^{(I)}-\eta^{(O)})\ on\ r_j=b_j\ j=1,2,...N \quad (13)$$

여기서 $G=G_r+iG_i$는 공극율 계수(porous parameter)로 복소수 값을 가지며 아래와 같이 정의된다(Issacson,1998).

$$G=G_r+iG_i=\frac{P(f+iS)}{kt(f^2+S^2)} \quad (14)$$

여기서 P는 공극율, f는 마찰계수, S는 관성력계수, t는 벽의 두께를 나타낸다. 실수부 G_r은 박리에 의한 에너지 손실효과를 나타내며, 허수부 G_i는 속도와 압력사이의 위상차와 밀접한 관련이 있는 유체의 관성효과를 나타낸다. 본 연구에서는 실수부가 허수부보다 크다고 가정하여 G는 실수값을 갖는다고 하였다. 앞서 유도한 외부영역과 내부영역의 해를 식 (13)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}&I_j(i)^n e^{-in\beta}J_n(kb_j)+A_n^j Z_n^j H_n(kb_j)\\&+\sum_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{N}\sum_{m=-\infty}^{m=\infty}A_m^k Z_m^k H_{m-n}(kR_{kj})e^{i(m-n)\alpha_{kj}}J_n(kb_j)\\&=B_n^j\{[J_n(kb_j)-\frac{J_n'(ka_j)}{Y_n'(ka_j)}Y_n(kb_j)]\\&+\frac{i}{G}[J_n'(kb_j)-\frac{J_n'(ka_j)}{Y_n'(ka_j)}Y_n'(kb_j)]\}\quad j=1,2,..,N\end{aligned} \quad (15)$$

식 (12)와 (15)에서 미지수 B_n^j를 소거하면 미지수 A_n^j에 대한 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}&A_n^j Z_n^j \Gamma_n^j+\sum_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{N}\sum_{m=-\infty}^{m=\infty}A_m^k Z_m^k H_{m-n}(kR_{kj})e^{i(m-n)\alpha_{kj}}\\&=-I_j(i)^n e^{-in\beta}\quad j=1,...,N,\ -\infty<n<\infty\end{aligned} \quad (16)$$

여기서 $\Gamma_n^j=\frac{H_n'(kb_j)s_n+\frac{2iG}{\pi kb_j}H_n'(ka_j)}{J_n'(kb_j)s_n+\frac{2iG}{\pi kb_j}J_n'(ka_j)}$이다.

식 (16)에 주어진 대수방정식을 풀어 A_n^j을 구하면 내부영역에서의 미지수 B_n^j는 식 (12)와 (16)으로부터 아래와 같이 주어진다.

$$B_n^j=\frac{Z_n^j\frac{2G}{\pi kb_j}Y_n'(ka_j)}{J_n'(kb_j)s_n+\frac{2iG}{\pi kb_j}J_n'(ka_j)}A_n^j \quad (17)$$

극한값 $G\to 0$는 N개의 불투과성 원기둥에 의한 산란문제를 뜻하며, 식 (16)은 아래와 같이 바뀐다(Linton and Evans, 1990; Kim,1993).

$$A_n^j+\sum_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{N}\sum_{m=-\infty}^{m=\infty}A_m^k Z_m^k H_{m-n}(kR_{kj})e^{i(m-n)\alpha_{kj}}=-I_j(i)^n e^{-in\beta}\quad j=1,....,N,\ -\infty<n<\infty \quad (18)$$

식 (16)에 주어진 대수방정식을 수치적으로 풀기 위하여 고유함수의 개수 m을 $-M$부터 M까지 $2M+1$개를 취한다. 따라서 대수방정식의 미지수의 개수는 $N\times(2M+1)$이다. 식 (16)을 풀어 미지수 $A_m^j(j=1,2,\ldots,N, m=-M,\ldots,M)$을 수치적으로 구할 수 있다.

j번째 원통구조물의 외부원기둥 벽면에서의 처올림(run-up) 파형은 외부영역에서의 파형식과 내부영역에서의 파형식으로부터 각각 구해지며, 원통구조물의 내부원기둥 벽면에서의 처올림 파형은 내부영역에서의 파형식으로부터 얻어지는데 결과는 아래와 같다.

$$\eta^{(O)}(b_j,\theta_j)=\sum_{n=-M}^{n=M}A_n^jZ_n^j[H_n(kb_j)-\Gamma_n^jJ_n(kb_j)]e^{in\theta_j}$$
$$\eta^{(I)}(b_j,\theta_j)=\sum_{n=-M}^{n=M}B_n^j[J_n(kb_j)-\frac{J_n'(ka_j)}{Y_n'(ka_j)}Y_n(kb_j)]e^{in\theta_j} \quad (19)$$
$$\eta^{(I)}(a_j,\theta_j)=\sum_{n=-M}^{n=M}\frac{2B_n^je^{in\theta_j}}{\pi ka_jY_n'(ka_j)}$$

j번째 원통구조물의 외부원기둥에 작용하는 파력은 다음과 같다.

$$\frac{F^j}{X_1^j}=-\frac{1}{2}\begin{bmatrix}i\\1\end{bmatrix}\frac{J_1'(kb_j)s_1}{J_1'(kb_j)s_1+\frac{2iG}{\pi kb_j}J_1'(ka_j)}\left(A^j{}_{-1}\begin{bmatrix}-\\+\end{bmatrix}A_1^j\right) \quad (20)$$

여기서 $X_1^j(=\frac{4\rho gA\tanh kh}{k^2H_1'(kb_j)})$는 반지름이 b_j인 1개의 불투과성 원기둥에 작용하는 파 진행방향의 파력이다. 식 (20)에서 상단은 x방향의 파력을, 하단은 y방향의 파력을 나타낸다. j번째 원통구조물의 내부원기둥에 작용하는 파력은 다음과 같다.

$$\frac{F^j}{X_2^j}=-\frac{1}{2}\begin{bmatrix}1\\i\end{bmatrix}\left(B^j{}_{-1}\begin{bmatrix}-\\+\end{bmatrix}B_1^j\right) \quad (21)$$

여기서 $X_2^j(=\frac{4\rho gA\tanh kh}{k^2Y_1'(ka_j)})$이다.

입사파가 x축의 양의 방향으로 들어오고 ($\beta=0$), 원통구조물이 1개 놓여있는 경우($N=1$)에 대한 해석해는 식 (16)과 (17)로부터 구해지며 Wang and Ren (1994)의 결과와 동일하다.

$$A_n^1=-(i)^n\frac{J_n'(kb)s_n+\frac{2iG}{\pi kb}J_n'(ka)}{Z_n^1[H_n'(kb)s_n+\frac{2iG}{\pi kb}H_n'(ka)]}$$
$$B_n^1=-(i)^n\frac{\frac{2G}{\pi kb}Y_n'(ka)}{H_n'(kb)s_n+\frac{2iG}{\pi kb}H_n'(ka)} \quad (22)$$

식 (22)에서 외부원기둥이 불투과성 ($G\to0$) 재질로 바뀌면, $A_n^1=-(i)^n, B_n^1=0$로 잘 알려진 MacCamy and Fuchs(1954)의 해석해를 얻을 수 있다.

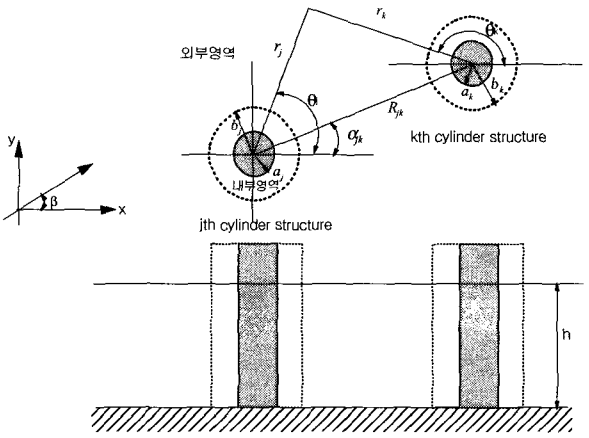


Fig. 1 Definition sketch of array of porous cylindrical structures

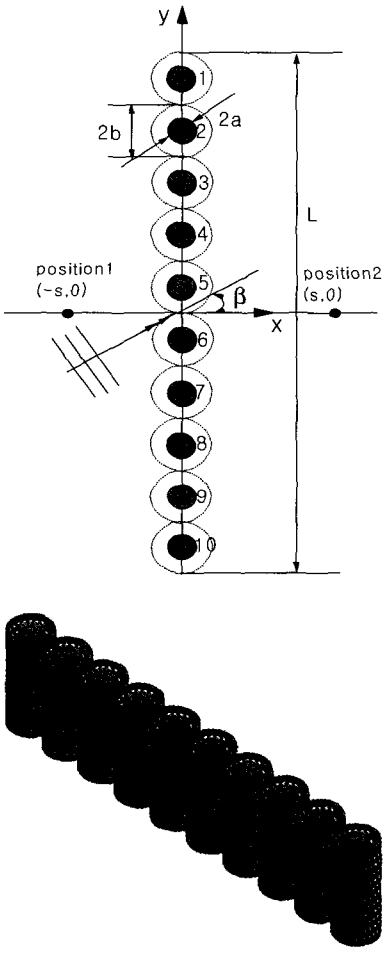
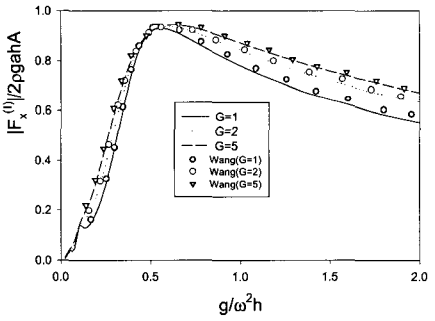


Fig. 2 Numerical model configuration

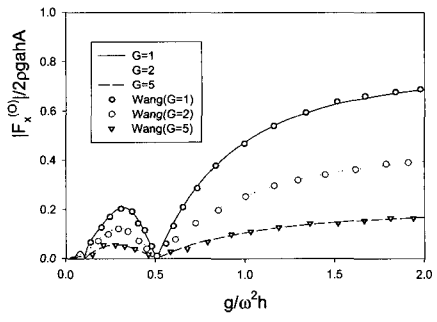
3. 계산결과 및 고찰

Fig. 3에서는 원통구조물이 1개 놓여있는 경우에 대하여 원통구조물에 작용하는 파력을 살펴보았다. 계산결과는 Wang and

Ren (1994)의 해석해와 비교하였다. 계산에서 내부와 외부원기둥의 반지름의 비(a/b)는 0.5이며, 고유모드의 개수 (M)는 10으로 고정하였다. x축은 수심으로 무차원화시킨 주파수인 $g/\omega^2 h$로 잡았고, y축은 $2\rho gahA$으로 무차원화된 파력을 나타낸다. (a)는 내부원기둥에 작용하는 파력을 (b)는 외부원기둥에 작용하는 파력을 나타낸다. 내부원기둥에 작용하는 파력은 G가 커짐에 약간 증가하나 외부원기둥에 작용하는 파력은 G가 커짐에 따라 큰 폭으로 줄어드는 것을 볼 수 있다. G가 커진다는 것은 공극율의 증가를 의미하므로 외부원기둥의 공극율이 커지면 내부영역내로 파의 침투가 용이하므로 내부원기둥에 작용하는 파력은 커진다. 그러나 외부원기둥에 작용하는 파력은 공극율이 커질수록 줄어든다. 계산결과는 Wang and Ren (1994)의 해석결과와 잘 일치한다. Fig. 4는 $g/\omega^2 h=1$에서 투과성 외부원기둥 ($G=1$)에서의 처올림 파형비($|\eta/2A|$)를 보여주고 있다. x축은 원주각도이다. (a)는 외부원기둥의 외벽, (b)는 외부원기둥의 내벽에서의 처올림 파형비이다. 외부원기둥의 외벽에서의 처올림 파의 최대값은 a/b와 관계없이 $\theta=180°$(원기둥 전면)에서 발생하며, 최소값은 $a/b=0.8$을 제외하면 $\theta=0°, 360°$(원기둥 후면)에서 발생한다. a/b가 커짐에 따라 원기둥 전면과 후면에서의 처올림 파형비가 커지는 것을 볼 수 있다. 외부원기둥의 내벽에서의 처올림 파형비의 최대값은 $a/b=0.2, 0.5$일 때 원기둥 후면에서 발생하며 $a/b=0.8$일 때는 원기둥 전면에서 발생한다.

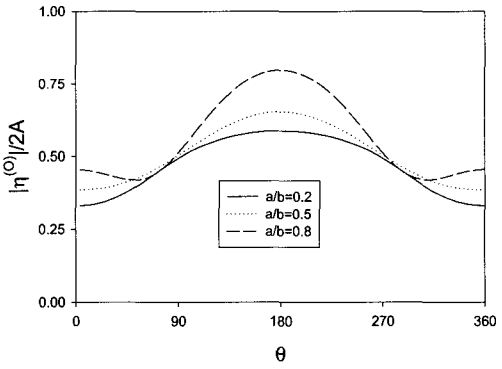


(a) on the interior cylinder

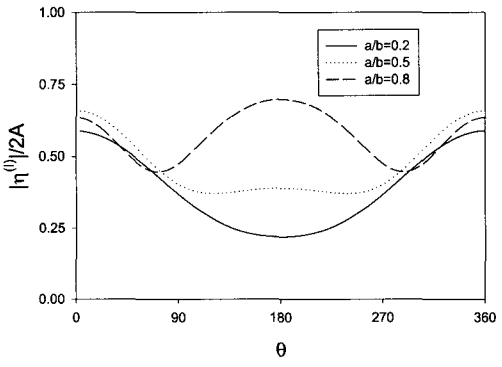


(b) on the exterior cylinder

Fig. 3 Non-dimensional wave forces on the cylindrical structure for different G at $a/b=0.5$



(a) on outer wall



(b) on inner wall

Fig. 4 Maximum wave run-up on the exterior cylinder for different a/b at $G=1.0$ and $g/\omega^2 h=1.0$

Fig. 5는 원통구조물 10개를 일렬로 배열하였을 때의 x방향의 무차원된 파력을 kb에따라 그린 그림이다. $h/b=5.0$, $\beta=0°$이며, 원통구조물을 구성하는 내부과 외부원기둥의 반지름의 비(a/b)는 0.5이다. Fig. 5a는 외부원기둥이 불투과성일 때 외부원기둥에 작용하는 파력을, Fig. 5b,c는 각각 외부원기둥이 투과성 ($G=1$)일 때 외부원기둥과 내부원기둥에 작용하는 파력을 보여주고 있다. 입사각이 $\beta=0°$이므로 원통구조물 ①~⑤의 결과는 원통구조물 ⑥~⑩의 결과와 서로 같기 때문에 그림에서는 원통구조물 ①~⑤의 결과만 그렸다. 먼저 외부원기둥에 작용하는 파력만을 살펴본다면, ⑤번 원기둥에서의 파력이 가장 크며 중심축으로부터 멀어질수록 파력이 줄어드는 경향을 보여주고 있다. 또한 외부원기둥에 작용하는 파력은 장파영역에서는 크게 나타나며 원통구조물의 위치에 따른 변화가 심하지만 단파영역에서는 파력도 줄어들며 원통구조물의 위치와 관계없이 일정한 파력을 주는 것을 볼 수 있다. 또한 투과성 원기둥에 작용하는 파력이 불투과성 원기둥에 비하여

큰 폭으로 줄어든 것을 볼 수 있다. 내부원기둥에 작용하는 파력은 원통구조물의 위치에 관계없이 입사파의 주파수에 따라 일정한 분포곡선을 보이고 있다.

Fig. 6은 position 1,2에서 계산된 진폭을 입사파의 파고로 나눈 진폭비를 kb에 따라 그린 그림이다. position 1,2의 위치는 $s=4b$이다(Fig. 2 참조). position 1에서는 입사파와 원통구조물로부터의 회절파의 중첩으로 진폭비가 특정 주파수에서는 크게(증폭) 또는 작게(상쇄) 나타난다. 이러한 경향은 외부원기둥이 불투과성 일 때 더욱 뚜렷이 나타난다. 배열된 원통구조물을 통과한 투과영역에 설치된 position 2에서의 진폭비는 파차단효과로 인해 position 1과 비교하여 크게 줄어들며 특정 주파수에서 파고가 갑자기 커지거나 작아지는 현상이 사라지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 position 1,2에서의 진폭비를 내부원기둥이 없는 경우($a/b=0$)와 내부원기둥이 있는 경우($a/b=0.5$)에 대하여 kb에 따라 그린 그림이다. 배열된 원통구조물 전면에서의 진폭비는 파장에 따라 심하게 변동하는 것을 볼 수 있다. 그러나 원통구조물 후면에 놓인 position 2에서의 진폭비는 장파일 때 0.5에서 출발하여 0.3 전후의 값을 유지하고 있음을 볼 수 있다. 내부원기둥 유무에 관계없이 모두 우수한 방파성능을 보이고 있다. 원통구조물 내부에 불투과성 원기둥을 삽입하는 것은 방파성능에 큰 도움을 주지 않음을 알 수 있다.

Fig. 8은 특정 주파수 ($kb=\pi/2$)에서 원통구조물 주변에서의 파고분포를 그렸다. 외부원기둥이 투과성일 때 파가 원기둥을 통과할 때 발생하는 에너지 감소효과로 원통구조물에 의한 반사파가 크게 감소된다. 따라서 파형의 왜곡이 크지 않다. 반면에 외부원기둥이 불투과성일 때는 원통구조물에 의한 반사파로 인하여 진폭비도 커지며 파형의 왜곡도 심하다. 특히 원기둥과 원기둥사이에서의 처올림 파형비가 크게 일어남을 볼 수 있다.

4. 결 론

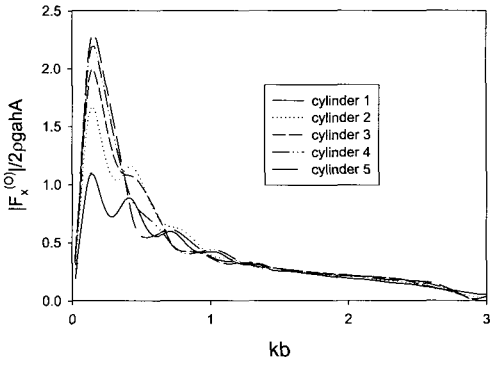
이상의 해석결과를 토대로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 원통구조물의 외부원기둥이 투과성일 때 원통구조물 사이에서의 처올림 현상이 사라지며 파력도 크게 줄어드는 것을 확인하였다. 또한 원통구조물 주변에서의 파고분포도 크게 줄어든다.

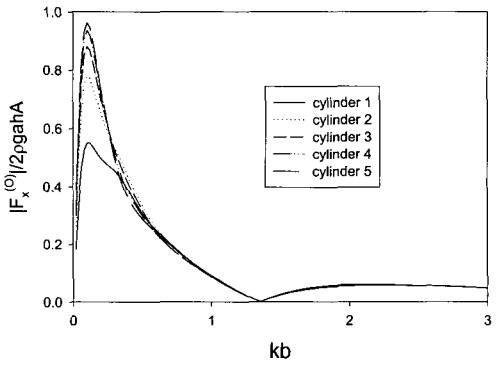
(2) 원통구조물을 일렬로 배열하였을 때 외부원기둥에 작용하는 파력은 중심부에 위치한 원기둥에서 가장 높게 나타나며 중심부에서 멀어질수록 파력은 줄어든다. 또한 장파영역에서는 파력이 크며 원통구조물의 위치에 따른 변화가 심하지만 단파영역에서는 파력도 줄어들며 원통구조물의 위치와 관계없이 일정한 파력을 주는 것을 볼 수 있다.

(3) 투과성 외부원기둥 내부에 불투과성 원기둥을 삽입하는 것은 소파성능에 큰 변화를 주지 않는 것으로 나타났다. 그러나 내부원기둥의 삽입은 원통구조물의 구조적인 안정성에는 도움을 줄 것으로 판단된다.

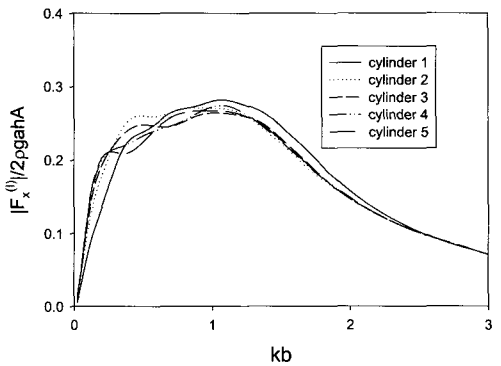
(4) 본 연구에서 살펴본 원통구조물을 배열하여 만든 방파제는 해수교환이 가능하다는 장점 외에 우수한 방파성능을 지니고 있어 대수심 연약지반용 방파제로 무한한 잠재력을 지니고 있다.



(a) on the impermeable exterior cylinder (G=0)

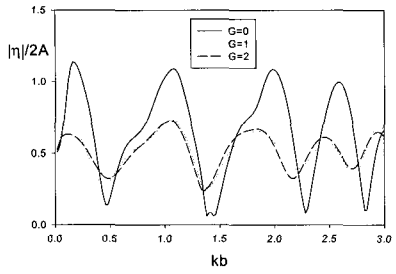


(b) on the permeable exterior cylinder (G=1.0)

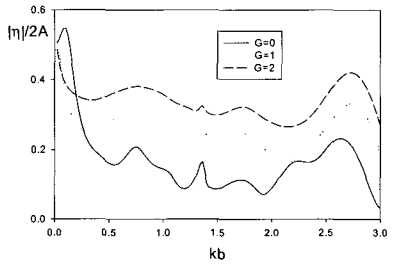


(c) on the impermeable interior cylinder (G=1.0)

Fig. 5 Non-dimensional wave forces on in-line ten-cylinder array with $h/b=5.0, a/b=0.5, \beta=0^\circ$

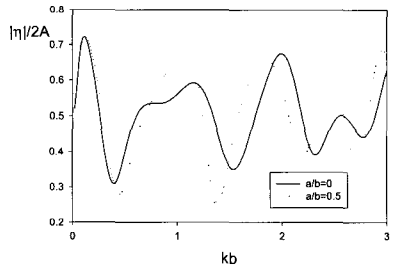


(a) (x,y)=(-4b,0)

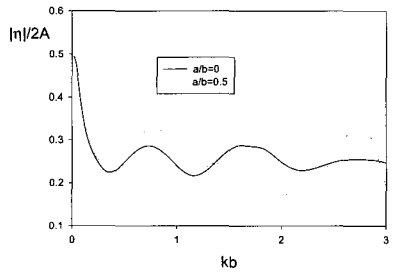


(b) (x,y)=(4b,0)

Fig. 6 Free surface records at position 1 and position 2 ($h/b=5.0, a/b=0.5, \beta=0^{o}$)

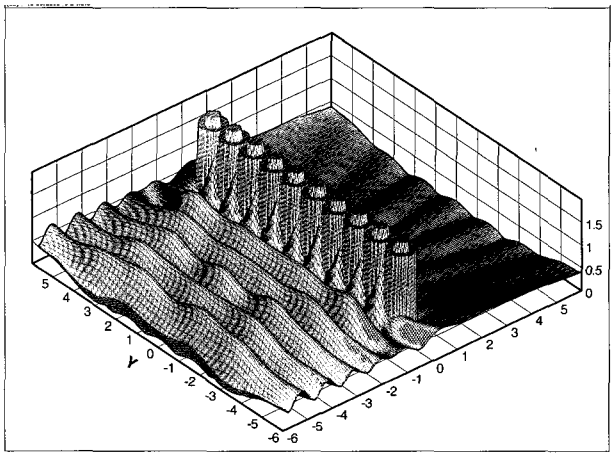


(a) (x,y)=(-4b,0)

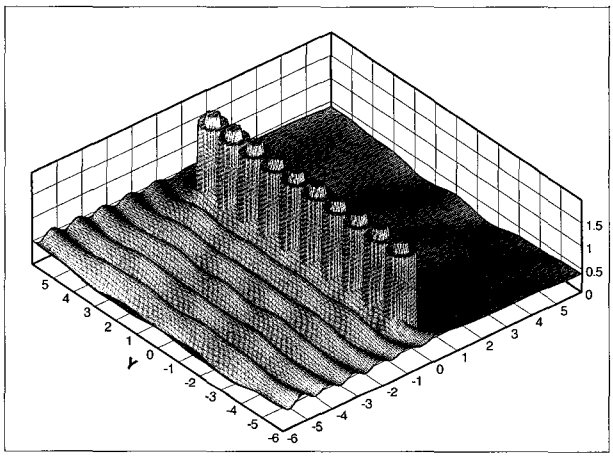


(b) (x,y)=(4b,0)

Fig. 7 Free surface records at position 1 and position 2 ($h/b=5.0, G=1, \beta=0^{o}$)



(a) impermeable exterior cylinder



(b) permeable exterior cylinder (G=1)

Fig. 8 Free surface elevation($|\eta|/2A$) in the vicinity of in-line ten-cylinder array for $h/b=5.0, a/b=0.5, kb=\pi/2, \beta=0^{o}$

참 고 문 헌

조일형 (2003). "N개의 투과성 원기둥 배열에 의한 파랑제어", 한국해안 · 해양공학회지, 제15권, 제4호, pp 232-241.

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.

Kim, M.H. (1993). "Interaction of Waves with N Vertical Circular Cylinders", J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng. ASCE, Vol 119, pp 671-689.

Linton, C.M. and Evans, D.V. (1990). "The Interaction of Waves with Arrays of Vertical Circular Cylinders", J. of Fluid Mech., Vol 215, pp 549-569.

MacCamy, R.C. and Fuchs, R.A. (1954). "Wave Forces on

PPiles: A Diffraction Theory", Tech. Memo No 69, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board.

Maniar, H.D. and Newman. J.N. (1997). "Wave Diffraction by a Long Array of Cylinders", J. Fluid Mech., Vol 339, pp 309-330.

McIver, P. (2002). "Wave Interaction with Arrays of Structure", Applied Ocean Research, Vol 24, pp 121-126.

Ohkusu, M. (1974). "Hydrodynamic Forces on Multiple Cylinders in Waves", Intl. Symp. on Dynamics of Marine Vehicles and Ocean Structures in Waves.

Yu, X. (1995). "Diffraction of Water Waves by Porous Breakwaters", J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng. ASCE, Vol 121, pp 275-282.

Wang, K.H. and Ren, X. (1994). "Wave Interaction Woth a Concentric Porous Cylinder System", Ocean Engineering Vol 21, pp 343-360.

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.

2003년 10월 22일 원고 접수
2004년 4월 1일 최종 수정본 채택