

원통형 양식시설물에 작용하는 파랑하중 Wave Forces Acting on a Cylindrical Aquaculture Fish Cage

조일형*
Il-Hyoung Cho*

요 지 : 본 연구에서는 일정한 공극율을 갖는 투과성 그물망으로 이루어진 원통형 양식시설물에 작용하는 파랑하중을 고유함수전개법을 사용하여 해석하였다. 그물망에서의 경계조건식으로 그물망을 통과하는 속도값은 그물망 전후의 압력차에 선형적으로 비례한다는 Darcy의 법칙을 적용하였다. 그물망의 공극율 계수와 양식시설물의 잠긴 위치(부상식, 착저식)를 변화시키면서 양식시설물에 작용하는 파랑하중과 파도응답을 살펴보았다. 착저식 양식시설물에 작용하는 파랑하중이 부상식과 비교하여 크게 감소하며, 그물망의 공극율이 양식시설물의 파랑하중과 양식시설물 주변의 파형을 줄이는데 중요한 역할을 함을 밝혔다.

핵심용어 : 양식시설물, 그물망, 공극율 계수, 고유함수전개법, 파랑하중

Abstract : In this paper, the wave forces on a cylindrical aquaculture fish cage, which consists of the porous mesh with the uniform porosity, are analyzed using matched eigenfunction expansion method. The boundary condition on the porous net is derived based on the Darcy's law, which implies that the velocity of the fluid passing through the net is linearly proportional to the pressure difference between two sides of the net. The wave forces and wave responses are investigated by changing the porous parameter of porous net as well as the submerged position (floating type, bottom-mounted type) of an aquaculture fish cage. It is found that the wave forces on a bottom-mounted type are largely decreased compared with that on a floating type. Also, the porosity of the netting structure plays an important role in reducing the wave forces and the wave elevation in the vicinity of an aquaculture fish cage.

Keywords : aquaculture fish cage, net, porous parameter, eigenfunction expansion method, wave force

1. 서 론

국내에 시설된 양식시설물은 높은 파도에 대한 안정성을 확보하기 어려워 주로 내만이나 육상 수조에 집중됨으로써 연안 환경 오염의 주범으로 인식되고 있다. 국민들에게 안정적인 수산물 공급과 풍요로운 어촌개발을 위해서 양식산업은 쉽게 포기할 수 없기 때문에 환경친화적이고 경쟁력 있는 산업으로 발전시켜야 한다. 따라서 태풍이나 기상이변 등에 견디면서 고급 해산어류를 양식할 수 있는 내파성 외해 양식시설물의 개발·보급이 시급히 필요하며 이를 위한 핵심 요소기술로 양식시설물에 작용하는 파랑하중에 대한 폭넓은 연구가 요구된다.

가두리 양식시설물은 직육면체 또는 원통형 형상의 그물망 안에서 어류를 양식하는 시설물이다. 부력을 주는 부력재와 양식어류를 가두는 그물망 그리고 그물망의 형태를 잡아줘 내부 공간을 확보하기 위한 테(rim)로 구성되어 있다. 또한 양식시설물의 위치유지를 위하여 계류로프와 앵커는 필수적이다. 설치지점에 따라 분류하면 수면위에 떠 있는 부상식

(floating type), 수면 아래 설치하는 수중식(submerged type), 해저면 위에 고정시키는 착저식(bottom-mounted type), 필요에 따라 상하로 위치이동이 가능한 승강식(elevating type)으로 나눌 수 있다. 그물망은 나일론과 합성섬유로 만든 일정한 공극율을 갖는 투과성 재질이다.

양식시설물의 그물망과 같은 투과성 구조물과 파도와의 상호작용문제에 대하여 많은 연구들이 수행되어왔다. Chang(1983)은 왕복 운동하는 투과성 조파판에 의하여 발생하는 파를 연구하였고, 이를 확장하여 일정한 수심위에 고정된 투과성 수직판에 의한 파의 반사율과 투과율을 해석하였다. Wang and Ren(1994)는 2개의 원통 구조물이 동심원상위에 위치하며 내부 원통 구조물은 불투과성이며 외부 원통 구조물이 투과성 구조물일 때 구조물에 작용하는 파랑하중에 대한 해석해를 제시하였다. 조(2002,2010)와 Cho and Kim(2008)은 투과성 판을 통과하는 속도는 투과판 전후의 압력차에 선형적으로 비례한다는 Darcy의 법칙을 이용하여 수평형과 경사형 타공판을 배열한 소파장치를 개발하였다. Lader et. al(2007)은 그물망을

*제주대학교 해양시스템공학과(Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Ara 1, Jeju 690-756, Korea, cho0904@jejunu.ac.kr)

입사파의 진행방향과 수직으로 고정시켰을 때 그물망 전후의 파고값과 파랑하중을 모형실험을 통하여 구하였다. Lee *et al.* (2008)은 그물망으로 구성된 양식시설물을 질량-스프링 모델로 형상화하여 흐름과 파도중 그물망의 형상과 양식시설물의 항력을 수치적으로 구하고 실험값과 비교하였다. Zhao *et al.* (2010)은 측면 그물망은 투과성 재질이며 바닥면 그물망은 불투과성인 원통형 구조물에 대한 파랑하중과 동유체력을 해석하였고, 모형실험결과와 비교하였다.

본 연구에서는 일정한 공극율을 가진 그물망으로 둘러싸인 원통형 양식시설물에 작용하는 파랑하중과 주변해역의 파도 응답을 고유함수전개법(eigenfunction expansion method)을 사용하여 해석하였다. 선형포텐셜이론 아래에서 유체영역을 원통형 그물망을 경계로 2개의 영역으로 나누고, 각 영역에서 해를 독립적으로 구한 뒤, 두 영역이 만나는 정합면에서 법선 방향 속도값이 서로 같다는 정합조건식과 함께 투과성 그물망에 의한 압력차를 나타내는 정합조건식을 적용하여 완전한 해를 구하였다. 그물망의 공극율에 비례하는 공극율 계수와 양식시설물의 잠긴 위치 그리고 파랑 조건 등을 바꿔가면서 원통 양식시설물에 작용하는 파랑하중과 파도응답을 살펴보았다.

2. 문제의 정식화

수심이 일정한 해역에 고정된 원통형 양식시설물(반지름: a , 잠긴깊이: d)에 의한 파의 회절문제를 선형 포텐셜이론을 사용하여 해석하였다(Fig. 1 참조). 양식시설물의 측면과 바닥면은 일정한 공극율을 갖는 투과성 그물망이며 그물망의 두께는 무시하였다. 그물망은 파도에 의하여 변형되지 않는다고 가정하였다. 유체를 비압축성, 비점성으로 가정하고, 유체 운동을 비회전성으로 가정하면 유체입자의 운동은 속도포텐셜로 표현이 가능하다. 입사파가 진폭(A)과 주파수(ω)를 가지고 x 축의 양의 방향으로 진행한다면 시간함수와 공간함수를 분리하여 속도포텐셜을 $\phi(r, \theta, z, t) = Re \{ (-ig/\omega) A \phi(r, \theta, z) e^{i\omega t} \}$ 로 쓸 수 있다. 이때 파형식은 $\eta(r, \theta) = \phi(r, \theta, 0)$ 이다. 복소함수인 속도포텐셜(ϕ)은 아래 주어진 경계치문제의 해이다.

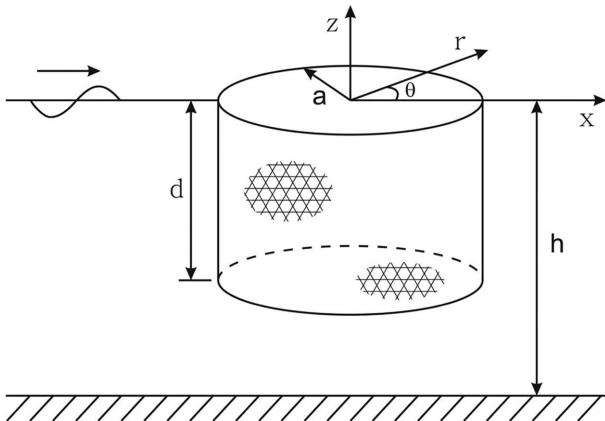


Fig. 1. Definition sketch of a cylindrical aquaculture fish cage.

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi = 0, \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} - v\phi = 0, & z = 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, & \text{on } z = -h \\ (k_1 r)^{1/2} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik_1 \right) \phi \rightarrow 0, & \text{as } k_1 r \rightarrow \infty, \end{cases} \quad (1)$$

여기서 k_1 은 입사파의 파수이며, $v = \omega^2/g$ 이다. 양식시설물의 측면과 바닥면 그물망에 적용되는 경계조건식은 Darcy의 법칙에 기초하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial \phi^+}{\partial r} = \frac{\partial \phi^-}{\partial r} = i\sigma_1(\phi - \phi^+), \quad \text{at } r = a, -d \leq z \leq 0. \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi^+}{\partial z} = \frac{\partial \phi^-}{\partial z} = i\sigma_2(\phi - \phi^+), \quad \text{at } z = -d, r \leq a. \quad (3)$$

식 (2)에서 위첨자 +, -는 각각 측면 그물망의 전후면을 의미하며, 식 (3)에서의 위첨자 +, -는 바닥면 그물망의 상하면을 의미한다. σ 는 투과성 재질의 특성을 나타내는 공극율 계수로서 재질의 공극율과 국부형상(local shape)에 밀접한 관련이 있다(Chwang and Wu, 1994, Cho and Kim, 2008). 실제계산에서는 무차원화시킨 공극율 계수 $b(=2\pi\sigma/k_1)$ 를 사용하였다. $b \rightarrow 0$ 는 불투과성 그물망을 의미하며, $b \rightarrow \infty$ 는 입사파에 전혀 영향을 주지 않는 가상의 그물망이 놓여 있는 경우이다.

유체영역을 Fig. 1과 같이 영역 1($r \geq a, -h \leq z \leq 0$)과 영역 2($r \leq a, -h \leq z \leq 0$)로 나누고 각 영역에 해당되는 속도포텐셜을 위첨자 (1),(2)로 구분하였다. 식 (1)에 주어진 경계치문제를 풀면 영역 1에서의 속도포텐셜을 입사파와 회절파의 합으로 아래와 같이 Bessel 함수의 전개식으로 쓸 수 있다.

$$\phi^{(1)}(r, \theta, z) = \sum_{p=0}^{\infty} \left[\left[\beta_p J_p(k_1 r) + a_{p0} \frac{H_p(k_1 r)}{H_p(k_1 a)} \right] f_{10}(z) + \sum_{n=1}^{\infty} a_{pn} \frac{K_p(k_1 r)}{K_p(k_1 a)} f_{1n}(z) \right] \cos p\theta, \quad (4)$$

여기서 $p=0$ 일 때 $\beta_p = 1$ 이며, $p \geq 1$ 일 때 $\beta_p = 2(i)^p$ 이다. J_p 와 H_p 는 각각 제 1종 Bessel 함수와 Hankel 함수이며, K_p 는 변형된 제 2종 Bessel 함수이다. 위첨자 '는 $\partial/\partial r$ 를 뜻한다.

영역 1에서의 고유값은 선형분산식($k_1 \tanh k_1 h = \omega^2/g$, $k_{1n} \tanh k_{1n} h = -\omega^2/g$, $n \geq 1$)을 만족하며, 고유함수 $f_{1n}(z)$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$f_{1n}(z) = \begin{cases} \frac{\cosh k_1(z+h)}{\cosh k_1 h}, & n = 0, \\ \frac{\cos k_{1n}(z+h)}{\cos k_{1n} h}, & n \geq 1. \end{cases} \quad (5)$$

같은 방법으로 영역 2에서의 속도포텐셜을 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\phi^{(2)}(r, \theta, z) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} b_{pn} \frac{J_p(k_{2n}r)}{J'_p(k_{2n}a)} f_{2n}(z) \cos p\theta \quad (6)$$

영역 2에서의 고유함수 $f_{2n}(z)$ 와 고유값 k_{2n} 은 바닥면 그물망에서의 경계조건식 (3)을 만족해야 하므로 다소 복잡한 형태의 분산식과 고유함수를 갖는다. 영역 2의 고유함수와 고유값을 구하기 위해서는 아래 주어진 고유치 문제를 풀어야 한다.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 \tilde{f}}{dz^2} - \kappa^2 \tilde{f} = 0, \\ \frac{\partial \tilde{f}}{\partial z} - v \tilde{f} = 0, \quad \text{on } z = 0 \\ \frac{\partial \tilde{f}}{\partial z} \Big|_{z=-d+0} = \frac{\partial \tilde{f}}{\partial z} \Big|_{z=-d-0} = i\sigma_2 (\tilde{f} \Big|_{z=-d-0} - \tilde{f} \Big|_{z=-d+0}), \quad \text{on } z = -d, \\ \frac{\partial \tilde{f}}{\partial z} = 0, \quad \text{on } z = -h, \end{array} \right. \quad (7)$$

여기서 복소수 값을 갖는 고유값 $\kappa(\kappa = k_{2n})$ 은 아래 주어진 분산식의 해이다.

$$D(\omega, \kappa) = \kappa \sinh \kappa(h-d)(v \cosh \kappa d - \kappa \sinh \kappa d) - i\sigma_2(v \cosh \kappa h - \kappa \sinh \kappa h) = 0 \quad (8)$$

비선형 방정식 (8)은 무한개의 복소해($k_{2n}, n = 0, 1, 2, \dots$)를 갖는다. 복소해를 구하기 위하여 k_{2n} 를 $k_{2n}^R + ik_{2n}^I$ 로 놓고, 식 (8)에 대입한 후, 실수부와 허수부로 각각 나누면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D(\omega, k_{2n}^R) = H(\omega, k_{2n}^R, k_{2n}^I) + iG(\omega, k_{2n}^R, k_{2n}^I) = 0, \\ \therefore H(\omega, k_{2n}^R, k_{2n}^I) = 0, \quad G(\omega, k_{2n}^R, k_{2n}^I) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)는 비선형 방정식이므로 초기값을 주고 Newton-Raphson 반복법을 사용하여 해를 구한다.

영역 2에서의 고유함수는 다음과 같다.

$$f_{2n}(z) = \begin{cases} \sinh k_{2n}(h-d)(k_{2n} \cosh k_{2n}z + v \sinh k_{2n}z), & -d \leq z \leq 0 \\ (v \cosh k_{2n}d - k_{2n} \sinh k_{2n}d) \cosh k_{2n}(z+h), & -h \leq z \leq -d. \end{cases} \quad (10)$$

식 (4)와 (6)에 주어진 미지수(a_{pm}, b_{pm})는 두 영역이 만나는 정합면($r=a$)에서 두 영역의 해를 정합하여 구해진다. 먼저 법선방향의 속도가 서로 같다는 정합조건식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi^{(1)}(a, \theta, z)}{\partial r} = \frac{\partial \phi^{(2)}(a, \theta, z)}{\partial r}, \quad -h \leq z \leq 0 \quad (11)$$

식 (4)와 식 (6)을 윗식에 대입한 뒤, 식 (10)에 주어진 고유함수(f_{2n})의 직교성(orthogonality)을 이용하기 위하여 윗식의 양변에 $f_{2n}(z)$ 를 곱하고 $-h$ 부터 0 까지 적분하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$k_1 [\beta_p J'_p(k_1 a) + a_{p0}] C_{0m} + \sum_{n=1}^{\infty} a_{pn} k_{1n} C_{mn} = b_{pm} k_{2m} N_m^{(2)}, \quad m = 1, 2, \dots, p = 0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

여기서

$$C_{mn} = \int_{-h}^0 f_{1m}(z) f_{2n}(z) dz,$$

$$\int_{-h}^0 f_{2m}(z) f_{2n}(z) dz = \begin{cases} N_m^{(2)}, & \text{if } m = n, \\ 0, & \text{if } m \neq n, \end{cases}$$

이다. 식 (12)로부터 b_{pm} 는 다음과 같다.

$$b_{pm} = \frac{k_1 [\beta_p J'_p(k_1 a) + a_{p0}] C_{0m} + \sum_{n=1}^{\infty} a_{pn} k_{1n} C_{nm}}{k_{2m} N_m^{(2)}}, \quad (13)$$

$r = a$ 인 측면 그물망($-d \leq z \leq 0$)과 양식시설물 하부($-h \leq z \leq 0$)에 적용하는 정합조건식은 다음과 같다.

$$\phi^{(1)}(a, \theta, z) - \phi^{(2)}(a, \theta, z) = \begin{cases} \frac{i}{\sigma_1} \frac{\partial \phi^{(2)}(a, \theta, z)}{\partial r}, & -d \leq z \leq 0, \\ 0, & -h \leq z \leq -d. \end{cases} \quad (14)$$

식 (4)와 (6)을 윗식에 대입한 후 식 (14)의 양변에 $f_{1m}(z)$ 을 곱하고 $-h$ 부터 0 까지 적분하면 아래와 같다. 이때 영역 1의 고유함수($f_{1m}(z)$)의 직교성을 이용한다.

for $m = 0$ (15)

$$\left[\beta_p J_p(k_1 a) + a_{p0} \frac{H_p(k_1 a)}{H'_p(k_1 a)} \right] N_0^{(1)} = \sum_{n=1}^{\infty} b_{pn} \left(\frac{J_p(k_{2n} a)}{J'_p(k_{2n} a)} C_{0n} + \frac{i}{\sigma_1} k_{2n} D_{0n} \right),$$

for $m \geq 1$,

$$a_{pm} \frac{K_p(k_{1m} a)}{K'_p(k_{1m} a)} N_m^{(1)} = \sum_{n=1}^{\infty} b_{pn} \left(\frac{J_p(k_{2n} a)}{J'_p(k_{2n} a)} C_{mn} + \frac{i}{\sigma_1} k_{2n} D_{mn} \right),$$

여기서

$$D_{mn} = \int_{-d}^0 f_{1m}(z) f_{2n}(z) dz,$$

$$\int_{-h}^0 f_{1m}(z) f_{1n}(z) dz = \begin{cases} N_m^{(1)}, & \text{if } m = n, \\ 0, & \text{if } m \neq n. \end{cases}$$

식 (13)을 윗식에 대입하여 정리하면 아래와 같은 대수방정식을 얻을 수 있다.

for $m = 0$ (16)

$$a_{p0} + \sum_{l=0}^N \left(\frac{H'_p(k_1 a)}{H_p(k_1 a) N_0^{(1)}} F_{0l}^p \right) a_{pl} = \left(\frac{H'_p(k_1 a)}{H_p(k_1 a) N_0^{(1)}} X_0^p \right),$$

for $m \geq 1$,

$$a_{pm} + \sum_{l=0}^N \left(\frac{K'_p(k_{1m} a)}{K_p(k_{1m} a) N_m^{(1)}} F_{ml}^p \right) a_{pl} = \left(\frac{K'_p(k_{1m} a)}{K_p(k_{1m} a) N_m^{(1)}} X_m^p \right),$$

여기서

$$F_{m0}^p = - \sum_{n=1}^N \frac{k_1 C_{0n}}{k_{2n} N_n^{(2)}} \left(\frac{J_p(k_1 a)}{J'_p(k_1 a)} C_{mn} + \frac{i}{\sigma_1} k_{2n} D_{mn} \right),$$

$$F_{ml}^p = -\sum_{n=1}^N \frac{k_{1l} C_{ln}}{k_{2n} N_n^{(2)}} \left(\frac{J_p(k_{2n}a)}{J_p'(k_{2n}a)} C_{mn} + \frac{i}{\sigma_1} k_{2n} D_{mn} \right),$$

$$X_0^p = -\beta_p J_p(k_1 a) N_0^{(1)} + \sum_{n=1}^N \frac{k_1 \beta_p J_p'(k_1 a) C_{0n}}{k_{2n} N_n^{(2)}} \left(\frac{J_p(k_{2n}a)}{J_p'(k_{2n}a)} C_{mn} + \frac{i}{\sigma_1} k_{2n} D_{mn} \right),$$

$$X_m^p = \sum_{n=1}^N \frac{k_1 \beta_1 J_p'(k_1 a) C_{0n}}{k_{2n} N_n^{(2)}} \left(\frac{J_p(k_{2n}a)}{J_p'(k_{2n}a)} C_{mn} + \frac{i}{\sigma_1} k_{2n} D_{mn} \right).$$

식 (16)에 주어진 대수방정식을 수치적으로 풀기 위하여 고유함수의 개수(N)와 θ 방향의 모드 개수(M)를 유한개로 잡았다. 주어진 p 에 대하여 $(N+1) \times (N+1)$ 대수방정식을 풀어 미지수 a_{pm} ($p=0,1,2,\dots, M, m=0,1,2,\dots, N$)을 수치적으로 구한다. a_{pm} 이 구해지면 나머지 미지수 b_{pm} 을 식 (13)으로부터 쉽게 구할 수 있다.

양식시설물에 작용하는 파랑하중은 압력차를 투과성 그물망에 대하여 적분하여 구할 수 있다. 먼저 x 방향의 파랑하중은 다음과 같다.

$$F_x = -\rho g A \int_0^\pi \int_{-d}^0 a [\phi^{(1)}(a_+, \theta, z) - \phi^{(2)}(a_-, \theta, z)] \cos \theta dz d\theta, \quad (17)$$

$$= -\rho g A \int_0^\pi \int_{-d}^0 a \left(\frac{1}{i\sigma_1} \right) \frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial r}(a, \theta, z) \cos \theta dz d\theta.$$

z 방향의 파랑하중은 바다 그물망($r \leq a, z = -d$)의 압력차를 적분하여 아래와 같이 얻어진다.

$$F_z = -\rho g A \int_0^\pi \int_0^a r [\phi^{(2)}(r, \theta, -d) - \phi^{(2)}(r, \theta, -d_+)] dr d\theta, \quad (18)$$

$$= -\rho g A \int_0^\pi \int_0^a r \left(\frac{1}{i\sigma_2} \right) \frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial z}(r, \theta, -d) dr d\theta.$$

3. 계산결과 및 고찰

고유함수 전개법을 사용하여 얻은 해석해의 수렴도를 살펴보기 위하여 고유함수의 개수(N)를 증가시키면서 무차원화된 x 방향의 파랑하중을 무차원화된 반지름($a/h = 1.0$)과 잠긴깊이($d/h = 0.5$)에 대하여 Fig. 2에서 살펴보았다. 측면과 바닥면 그물망은 동일하며 공극율 계수는 $b_1 = b_2 = 5.0$ 이다. θ 방향의 모드개수는 $M = 10$ 으로 고정시켰다. 고유함수 개수가 증가함에 따라 일정한 값에 수렴하나 고유함수의 개수 증가에 따른 수렴도는 느리다. 본 연구에서는 소수점 이하 3자리까지 같은 결과를 주도록 고유함수 개수를 50개로 잡았고, 이후 모든 계산에 같은 값을 적용하였다.

본 해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 일정깊이 잠긴 불투과성 원기둥 모델에 대하여 경계요소법에 기초한 ANSYS AQWA 상용코드를 이용한 수치계산결과와 비교하였다(Fig. 3). 현재의 계산모델에서 $b_1 = b_2 = 0.0$ 이면 불투과성 원기둥에 의한 회절문제로 바뀐다. 수심으로 무차원화시킨 반지름과 잠긴깊이는 $a/h = 0.2, d/h = 0.1$ 이다. x 축은 무차원화된 파장($k_1 h$)으로 잡았다. 실선과 점선은 현재의 해석결과로 각각 무차원화된 수평방향과 수직방향의 파랑하중을 나타내며, 동그라미는 AQWA 상용코드를 사용한 수치계산결과이다. 수치계산에서

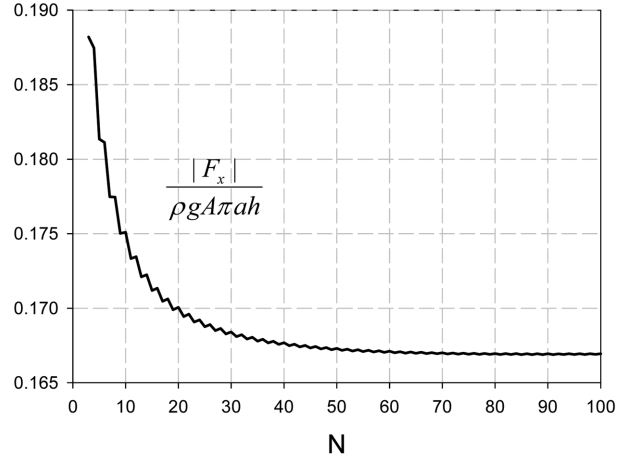


Fig. 2. Convergence of non-dimensional horizontal wave forces on an aquaculture fish cage with the number of eigenfunctions for the case $d/h = 0.5, a/h = 1.0, b_1 = b_2 = 5.0, M = 10$.

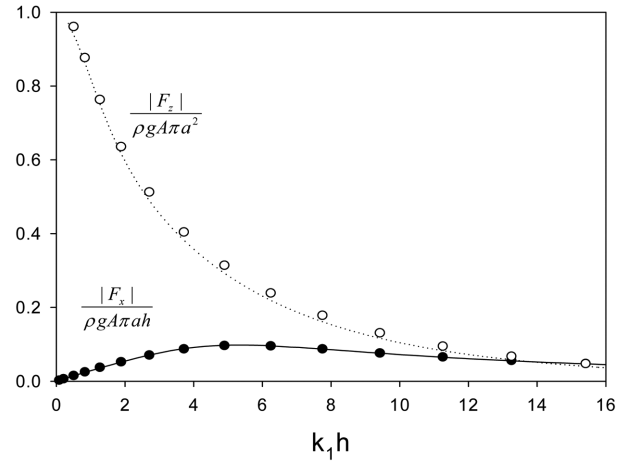


Fig. 3. Comparison of non-dimensional wave forces on an impermeable cylinder from present solutions (line) with BEM numerical results (circle) for $d/h = 0.1, a/h = 0.2$.

사용한 총 격자수는 5,761개다. 해석결과와 수치계산결과와는 서로 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 4와 5는 $a/h = 1.0, d/h = 0.5$ 인 투과성 양식시설물에 대한 계산으로 측면과 바닥면에 동일한 그물망을 설치하고 그물망의 공극율 계수를 바꿔가면서 무차원화된 파랑하중을 보여주고 있다. 실선은 공극율 계수가 0인 불투과성 원기둥에 대한 계산결과를 나타내며 나머지 선들은 그물망의 공극율에 비례하는 공극율 계수를 주었을 때의 결과이다. 공극율 계수가 크다는 것은 공극율이 큰 성긴 그물망을 뜻하며 공극율 계수가 작음은 촘촘한 그물망을 뜻한다. 공극율 계수가 증가함에 따라 수평 하중과 수직 하중 모두 줄어드는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 측면 그물망의 공극율 계수는 일정한 값($b_1 = 5.0$)으로 주고 바닥면의 공극율 계수를 변화시켰을 때의 파랑하중을 그린 그림이다. 실선은 바닥면을 불투과성 판으로 하였을 때의 결과이며, 2개의 점선은 투과성 그물망을 설치하였을 때의 결과이다. 예상대로 바닥면의 공극율 계수가 줄어들면 바닥면 전후의 압력차가 커져 수직방향의 파랑하중은 일정한 비율로

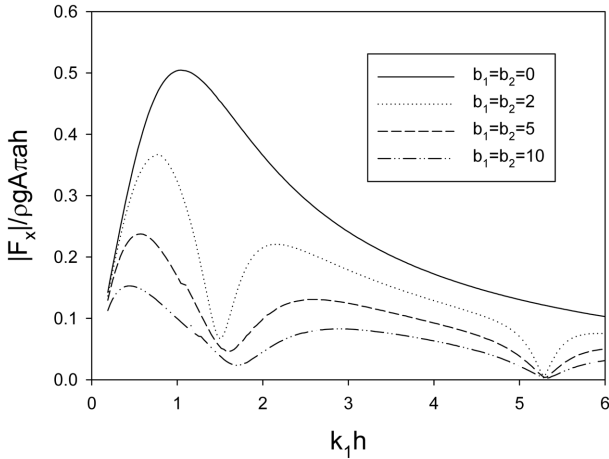


Fig. 4. Non-dimensional horizontal wave forces on an aquaculture fish cage as function of porous parameter (b_1, b_2) and k_1h for $ah = 1.0, dh = 0.5$.

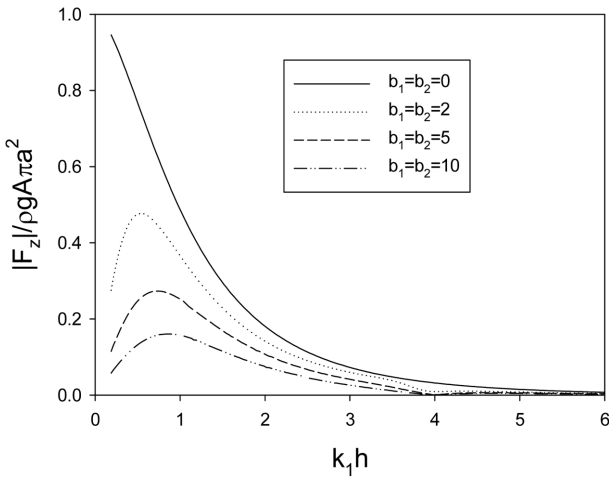
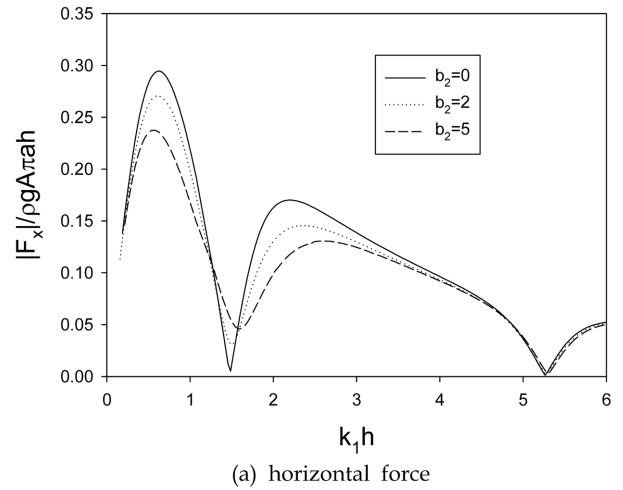


Fig. 5. Non-dimensional vertical wave forces on an aquaculture fish cage as function of porous parameter (b_1, b_2) and k_1h for $ah = 1.0, dh = 0.5$.

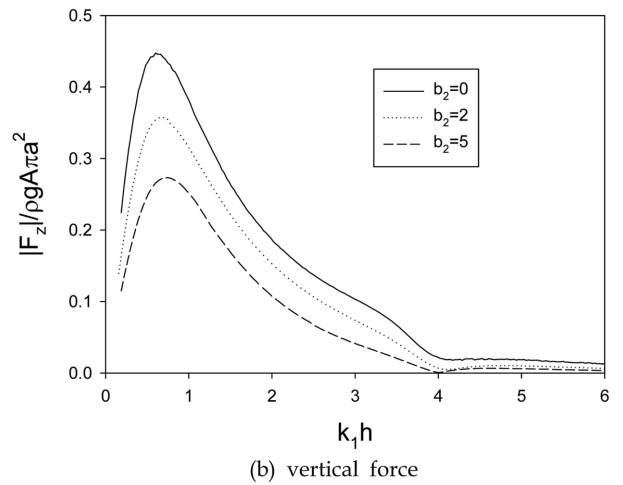
커진다. 바닥면 그물망과 직접적인 영향이 없을 것 같은 수평방향의 파랑하중도 바닥면의 공극을 계수에 따라 변하는 것을 볼 수 있으며 바닥면의 공극을 계수가 줄어들수록 증가한다.

Fig. 7은 $y/h = 0$ 인 x 축을 따라 그린 무차원화된 파의 진폭 ($|\eta/A|$)을 보여주고 있다. 무차원화된 입사파의 파장(k_1h)은 2.0이다. 그림에서 굵은 2개의 수직 점선은 양식시설물의 측면 그물망의 위치를 나타낸다. 그물망의 공극을 계수가 증가할수록 양식시설물에 의한 반사파의 감소로 그물망의 전면에서의 파의 진폭이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그러나 입사파가 쉽게 내부로 들어올 수 있어 시설물 내부에서의 파의 진폭은 증가한다. 투과성 양식시설물 후면에서의 진폭은 그물망의 공극을 계수에 따라 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 파의 진폭은 투과성 그물망을 통과하면서 갑자기 떨어져 그물망의 전후에서의 압력차(진폭의 차이)가 나타나며 이 압력차로 수평방향의 파랑하중이 발생함을 Fig. 7을 통하여 알 수 있다.

Fig. 8은 k_1h 가 2.0일 때 불투과성($b_1 = b_2 = 0$)과 투과성



(a) horizontal force



(b) vertical force

Fig. 6. Non-dimensional wave forces on an aquaculture fish cage as function of porous parameter (b_2) and k_1h for $ah = 1.0, dh = 0.5, b_1 = 5.0$.

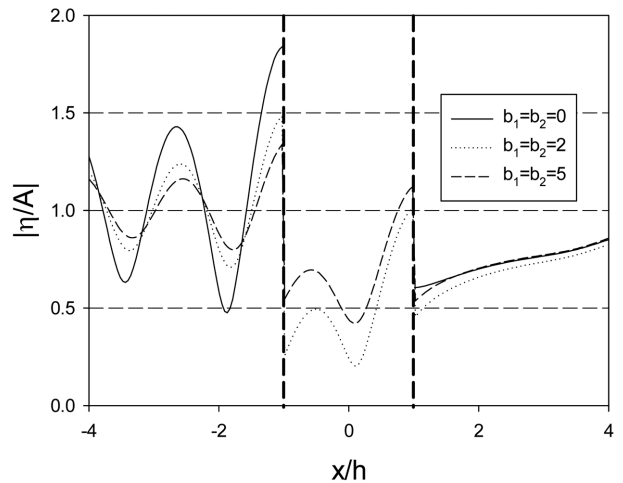
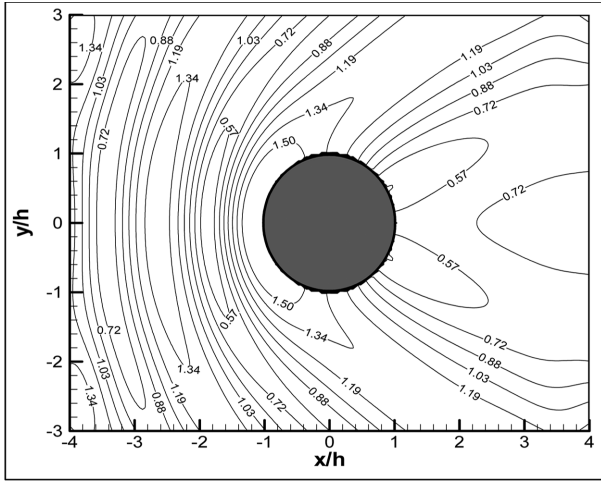
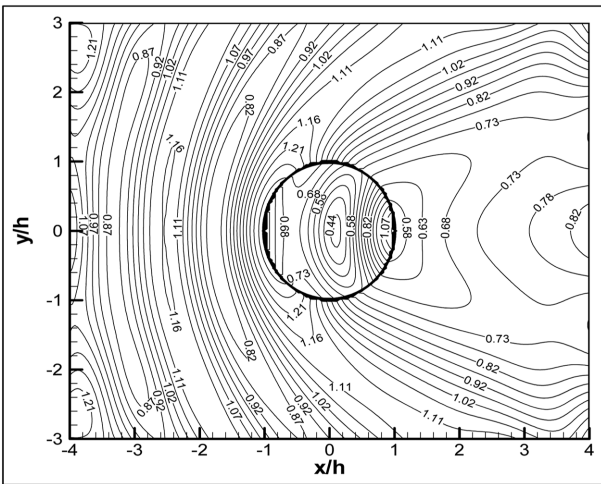


Fig. 7. Non-dimensional free-surface amplitude ($|\eta/A|$) along the x -axis for $k_1h = 2.0, ah = 1.0, dh = 0.5$.

($b_1 = b_2 = 5.0$) 원통 양식시설물 주위의 파도응답($|\eta/A|$)을 등고선으로 나타내었다. 투과성 양식시설물은 반사파를 줄이기 때문에 양식시설물 전면의 파도응답은 불투과성 구조물과 비



(a) impermeable fish cage
($b_1 = b_2 = 0.0$)

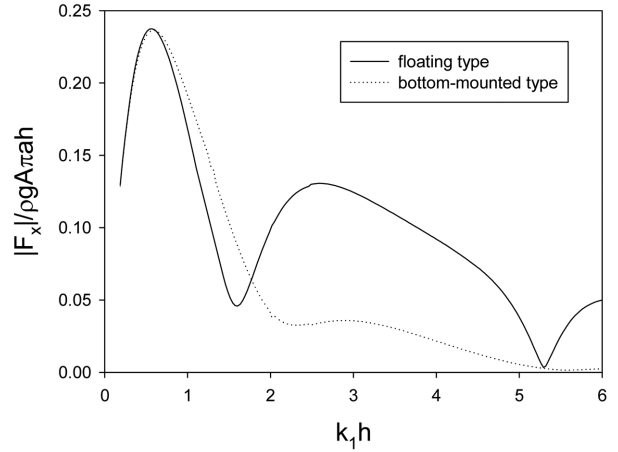


(b) porous fish cage
($b_1 = b_2 = 5.0$)

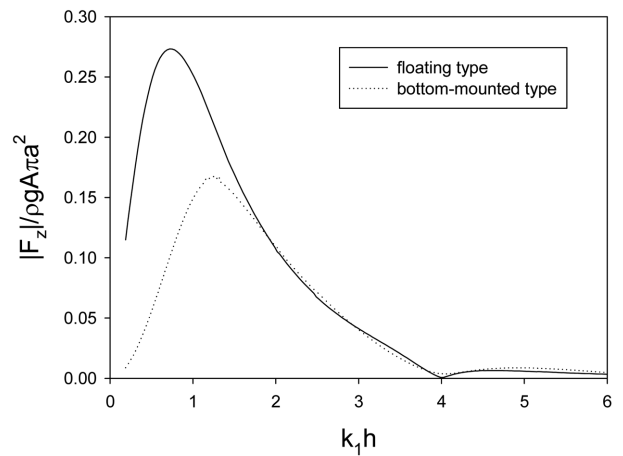
Fig. 8. Contour plot of free-surface elevation ($|\eta|/A$) around an aquaculture fish cage for $k_1h = 2.0$, $a/h = 1.0$, $d/h = 0.5$.

교하여 크게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 투과성 구조물 내부의 파도응답은 중심부에서 최저값을 갖다가 후면의 그물망에 접근할수록 큰 값을 갖는다.

Fig. 9는 수면위에 떠 있는 부상식 양식시설물과 해저면 바닥에 고정된 착저식 양식시설물에 작용하는 파랑하중을 비교한 그림이다. 두 경우 모두 $d/h = 0.5$ 로 주었다. 따라서 부상식의 바닥면과 착저식의 윗면의 위치는 같으며 측면 그물망의 높이($d/h = (h-d)/h = 0.5$)도 서로 같다. 착저식을 구현하기 위해서는 본문의 식 (14)에서 Darcy의 법칙을 영역 $-h \leq z \leq -d$ 에 적용한다. 따라서 식 (15)에 정의된 D_{mn} 이 $\int_{-h}^{-d} f_{1m}(z) f_{2n}(z) dz$ 로 바뀐다. 먼저 수평하중을 살펴보면 저주파영역에서는 큰 차이가 없다가 k_1h 가 1.5보다 큰 주파수 영역에서는 착저식에 비하여 파랑하중이 크게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그러나 수직방향의 파랑하중은 그 반대로 k_1h 가 1.5보다 작은 저주파수영역에서 큰 차이를 보이다가 고주파수 영역에서는 차이가 거의 나타나지 않음을 보여준다.



(a) horizontal force



(b) vertical force

Fig. 9. Comparison of non-dimensional wave forces between a floating and a bottom-mounted types with the same size ($d/h = 0.5$, $a/h = 1.0$, $b_1 = b_2 = 5.0$).

4. 결 론

본 연구에서는 투과성 그물망으로 구성된 원통형 양식시설물과 입사파와의 상호작용문제에 대한 해석해를 구하고, 그물망의 공극율 계수와 양식시설물의 잠긴 위치 변화에 따른 파랑하중과 파도응답을 계산하였다. 계산결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고유함수 개수가 증가함에 따라 해석해는 일정한 값에 수렴하나 수렴속도는 상당히 느리다. 따라서 수렴도를 크게 향상시키는 해석방법(Evans and Porter; 1996)의 도입이 필요하다. 해석결과의 타당성을 검증하기 위한 목적으로 채택한 계산모델인 불투과성 원기둥에 대한 수치해석결과(ANSYS AQWA)와 본 해석결과는 잘 일치함을 보였다.

2) 공극율 계수의 증가는 양식시설물에 의한 반사파의 감소로 시설물의 전면에서의 파도응답을 줄이며 파랑하중을 감소시킨다. 또한 측면 그물망의 공극율 계수를 고정시키고 바닥면의 공극율 계수를 줄이면 수평방향, 수직방향 모두 파랑하중은 증가한다. 특히 저주파수영역에서의 증가폭이 크다.

3) 파의 진폭은 투과성 그물망을 통과하면서 갑자기 줄어들어 그물망 전후에서의 압력차를 유발하며 이로 인하여 파랑하중이 발생한다.

4) 착저식과 부상식의 수평방향 파랑하중은 저주파영역에서는 큰 차이가 없다가 kh 가 1.5보다 큰 주파수영역에서는 착저식이 부상식에 비하여 파랑하중이 크게 줄어드는 것을 볼 수 있었다. 반대로 수직방향의 파랑하중은 kh 가 1.5보다 작은 저주파수영역에서 착저식이 부상식에 비하여 파랑하중이 크게 줄어든 반면에 고주파수 영역에서는 큰 변화가 없었다. 파도의 영향으로부터 멀리 떨어진 착저식이 부상식에 비하여 파랑하중으로부터 안전함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2010년에 교육과학기술부가 지원하여 수행한 “제주해역에 적합한 외해 양식시설물 설계기술 개발” 사업의 결과 중 일부를 발췌하여 수록한 것임을 밝히며 연구비의 지원에 감사를 표합니다.

참고문헌

조일형 (2002). 수평형 타공판의 소파특성. 한국해양·해양공학 회지, 14(4), 265-273.

- 조일형 (2010). 투과성 이중 반원통 구조물에 의한 파 차단 성능. 한국해양·해양공학회지, 22(1), 10-17.
- Cho, I.H. and Kim, M.H. (2008). Wave absorbing system using inclined perforated plates. *J. Fluid Mech.*, 608, 1-20.
- Chwang, A.T. (1983). A porous wavemaker theory. *J. Fluid Mech.*, 132, 395-406.
- Chwang, A.T. and Wu, J. (1994). Wave scattering by submerged porous disk. *J. Engrg. Mech.*, 120, 2575-2587.
- Evans, D. V. and Porter, R. (1996). Hydrodynamic characteristics of a thin rolling plate in finite depth of water. *Applied Ocean Research*, 18, 215-228.
- Lader, PF., Jensen, A., Sveen, J.K., Fredheim, A., Enerhaug, B. (2007). Experimental investigation of wave forces on net structure. *Applied Ocean Research*, 29, 112-127.
- Lee, C.W., Kim, Y.B., Lee, G.H., Choe, M.Y., Lee, M.K., Koo, K.Y. (2008). Dynamic simulation of a fish cage system subjected to currents and waves. *Ocean Engineering*, 35, 1521-1532.
- Wang, K.H. and Ren, X. (1994). Wave interaction with a concentric porous cylinder system. *Ocean Engineering*, 21, 343-360.
- Zhao, F., Bao, W., Kinoshita, T., Itakura, H. (2010). Interaction of waves and porous cylinder with an inner horizontal porous plate. *Applied Ocean Research*, 32, 252-259.

원고접수일: 2010년 10월 20일

수정본채택: 2011년 1월 3일

게재확정일: 2011년 1월 3일