

## 파랑중 유연한 그물망의 응답특성 해석 Analysis on Response Characteristics of a Flexible Net Sheet in Waves

조일형\*  
Il-Hyoung Cho\*

**요 지** : 유탄성이론과 고유함수전개법에 기초하여 규칙파중 유연한 그물망의 동적거동과 파랑하중을 살펴보았다. 그물망은 일정한 잠긴깊이를 가지고 수직으로 설치되어 있으며, 상단 끝은 수면에 고정되어 있고 하단 끝은 추에 연결되어 있다. 초기장력이 충분히 크다고 가정하여 장력의 동적 성분을 무시하였다. 유연한 그물망에서의 경계조건식은 투과효과를 나타내는 Darcy의 법칙과 유연성을 나타내는 물체 경계조건식이 결합된 형태이다. 개발된 해석모델은 불투과성/투과성 수직판과 유연막 모델로 확장이 가능하다. 해석모델을 이용하여 여러 설계변수(파랑특성, 공극율, 잠긴깊이, 초기장력)들의 변화가 그물망의 파랑하중과 거동특성에 미치는 영향을 살펴보았다.

**핵심용어** : 고유함수전개법, 유탄성 이론, 그물망, 반사율, 투과율, 응답특성, 파랑하중

**Abstract** : Based on the hydroelastic theory and the matched eigenfunction expansion method(MEEM), the dynamic behavior of the porous flexible net sheet and wave forces have been investigated in monochromatic waves. The net sheet is installed vertically with the submergence depth. Top end of a net sheet is fixed and its lower end is attached by a clump weight. It is assumed that the initial tension is sufficiently large so that the effects of dynamic-tension variation can be neglected. The boundary condition on the porous flexible net sheet is derived based on Darcy's fine-pore model and body boundary condition. The developed analytic model can be extended to the impermeable/permeable vertical plate and the impermeable flexible membrane. The analytical model was used to study the influence of design parameters(wave characteristics, porosity, submergence depth, initial tension) on the response characteristics and wave load of the net sheet.

**Keywords** : matched eigenfunction expansion method, hydroelastic theory, net sheet, reflection coefficient, transmission coefficient, response characteristics, wave load

### 1. 서 론

현재 포화상태에 도달한 내만 수역내의 공간확보의 어려움과 연안 환경오염 문제를 고려하여 볼 때 가까운 미래에는 많은 양식시설물들이 불가피하게 외해에 설치될 것이고 파도와 흐름에 노출된 외해에서 안정적으로 양식어류를 생산하기 위해서는 새로운 기술적인 도전이 요구된다. 특히 유연성을 지닌 그물망과 파랑/흐름과의 상호작용문제는 유탄성(hydroelastic) 특성을 지닌 대표적인 문제로 그물망의 동적응답 특성과 파랑하중을 정확히 이해하는 것이 양식시설물과 어업장비의 안정성을 평가하는데 필수적이다. 오늘날 파랑중 그물망의 동적응답을 이해하기 위하여 많은 노력을 경주하고 있지만 대부분 주어진 환경조건에 대하여 기 개발된 수치모델을 이용하여 그물망의 거동을 해석하고 있어 유연한 그물망의 복잡한 동적응답 특성을 파악하는데 어려움이 있다.

Aarsens et al.(1990)와 Løland(1991)는 그물망에 작용하는

전체 하중을 항력과 양력으로 구분하고 흐름방향과 그물격자의 법선방향 사잇각을 가지고 그물망의 외력을 이론적으로 구하고 체계적인 모형실험을 수행하여 정확도를 높였다. 그물망의 응답특성과 외력을 구하기 위한 수치해석방법을 크게 2가지로 크게 나눌 수 있다. 첫 번째 방법은 그물망을 슈퍼요소(super-element)로 분할하고 각 요소는 그물의 매듭과 끈의 특성을 지니고 있다고 가정한다. 각 요소의 작용하는 동유체력을 항력과 양력 성분으로 나누고 전체 그물의 면적에 대한 그물의 면적의 비인 충실율(solidity)과 밀접한 관련이 있는 항력계수와 양력계수를 사용하여 각 슈퍼요소에 대한 항력과 양력을 구하고 이 값들을 합하여 그물망 전체 하중을 구한다(Aarsen et al., 1990; Løland, 1991; Lader et al., 2003). 이 방법은 그물망의 거동과 주변 유동의 상세한 결과를 주지 못하지만 비교적 하중에 관한 한 만족스러운 결과를 주는 방법으로 알려져 있다. 두 번째 수치모델은 무수히 많은 그물망을 여러개의 그물요소(consistent net element)로 근

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

사한 뒤 각 요소를 빔(*beam*)이나 트러스(*truss*) 구조로 가정하여 유한요소법(*finite element method*)을 적용하여 그물망의 거동특성을 해석하는 방법이다(Fredheim and Faltinsen, 2001; Tsukrov, 2003, 2005). 이 수치해석 방법은 그물망 주변과 내부의 유동을 자세히 다룰 수 있다는 장점이 있으나 그물망을 많은 요소들로 나누어 해석해야 하므로 계산시간이 오래 걸리는 단점을 지니고 있다. 이밖에 Huang et al.(2007, 2008)은 파랑과 흐름중 중력식 양식시설물의 부력재와 그물망의 동적거동을 질점 질량법(*lumped-mass method*)을 사용하여 해석하였다. 해석적인 방법으로 조(2011)는 투과성 그물망으로 둘러싸인 원통형 양식시설물에 작용하는 파랑하중과 파랑응답을 고유함수전개법을 사용하여 해석하였다. 그물망의 투과효과는 Darcy의 법칙을 이용하여 고려하였으나 파랑에 의한 그물망의 변형을 무시하였다.

본 연구에서는 유연한 그물망의 응답특성과 파랑하중을 구하기 위하여 그물망이 수직으로 일정한 깊이에 잠겨있는 해석모델에 대하여 고유함수전개법(*matched eigenfunction expansion method*)을 적용하였다. 유연한 그물망에서의 경계조건식은 선형이론에 입각하여 투과성과 유연성을 나타내는 각각의 경계조건식을 선형 결합한 형태이다. 먼저 그물망의 투과성 효과를 나타내기 위하여 투과성 그물망 전후의 압력차는 그물망에서의 유속과 선형적으로 비례한다는 Darcy의 법칙을 적용하였다. 이때 비례상수인 공극율 계수(*porosity coefficient*)는 그물망의 공극율과 밀접한 관련이 있다. 그물망의 유연성을 고려하기 위하여 그물망 표면에서의 유체입자의 속도는 그물망 자체의 속도와 같다는 물체경계조건식을 적용하였다. 그물망에서의 경계조건식내에 포함된 그물망의 운동변위는 막체 방정식(*membrane equation*)과 함께 그물망 양 끝단의 경계조건식들로 구성된 경계치문제를 풀어 얻어진다. 양 끝단의 경계조건식으로 그물망의 상단 끝은 수면에서 고정되어 있으며, 하단 끝에 추가 매달려 있다고 가정하였다. 경계치문제를 풀기 위하여 그물망을 따라 특이점을 분포시켜 해를 구하는 Green 함수법을 적용하였다. 한편 해석모델에 고유함수전개법을 적용하여 위하여 그물망을 경계로 유체영역을 영역 1과 영역 2로 나누고 각 영역에서 경계치문제를 독립적으로 풀고 각 영역에서의 미지수는 두 영역이 만나는 경

계면에서 정합조건식을 적용하여 완전한 해를 구한다. 개발된 해석 프로그램을 이용하여 그물망의 잠긴깊이, 공극율, 초기장력 그리고 입사파의 주파수를 바꿔가면서 그물망에 의한 반사율과 투과율, 그물망에 작용하는 파랑하중, 그리고 유연한 그물망의 운동변위를 구하였다.

## 2. 문제의 정식화

Fig. 1과 같이 수심(*h*)이 일정한 유체영역 내에 수면 아래로 *d* 만큼 잠긴 그물망이 수직으로 놓여 있고, 입사파는 진폭 *A*를 가지고 *x*축의 양의 방향으로 진행한다. 그물망의 단위 길이당 질량은 *m<sub>s</sub>*이며 그물망 하단 끝에 질량 *m*인 추가 매달려 있다. 유체는 비점성, 비압축성이며 비회전성 유동을 가정하여 속도포텐셜( $\Phi$ )을 도입한다. 또한 입사파의 진폭과 그물망의 운동변위가 파장에 비하여 작다고 가정한 선형이론을 사용한다. 유동은 주파수  $\omega$ 를 갖고 조화운동을 한다면 속도포텐셜과 그물망의 운동변위는 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi(x,z,t) &= Re\{A\phi(x,z)e^{-i\omega t}\} \\ \Xi(z,t) &= Re\{A\xi(z)e^{-i\omega t}\} \end{aligned} \tag{1}$$

여기서  $\xi(z)$ 는 단위 진폭당 그물망의 운동변위로 복소수 값을 갖는다.

그물망에 의하여 나누어진 유체영역을 각각 영역 1, 영역 2라 할 때 각 영역에서의 속도포텐셜은 아래 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \phi_1(x,z) &= \frac{ig}{\omega} \left\{ (e^{-k_0x} + R e^{k_0x})f_0(z) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{k_nx} f_n(z) \right\} \\ \phi_2(x,z) &= \frac{ig}{\omega} \left\{ T e^{-k_0x} f_0(z) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-k_nx} f_n(z) \right\} \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 *R*, *T*는 각각 반사율과 투과율을 나타낸다.  $k_0 (= -ik)$ 는 진행파(*propagating wave*)의 고유값이며 *k*는 입사파의 파수(*wavenumber*)이다.  $k_n$ 는 비진행파(*non-propagating wave*)의 고유값들이다. 고유함수  $f_n(z)$ 은 식 (3)과 같으며 고유값  $k_n$ 은 선형분산식( $k_n \tanh k_n h = -\omega^2/g$ )을 만족한다.

$$\begin{aligned} f_n(z) &= N_n^{-1} \cos k_n(z+h), \\ N_n^2 &= \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\sin 2k_n h}{2k_n h} \right), \text{ for } n = 0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \tag{3}$$

고유함수  $f_n(z)$ 은 아래와 같은 직교성(*orthogonality*)을 만족한다.

$$\frac{1}{h} \int_{-h}^0 f_m(x) f_n(z) dz = \delta_{mn}, \tag{4}$$

여기서  $\delta_{mn}$ 은  $m = n$ 일 때 1이고,  $m \neq n$ 일 때 0의 값을 갖는 Kronecker-Delta 함수이다.

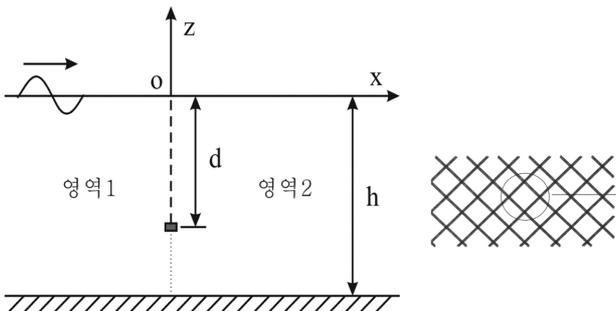


Fig. 1. Definition sketch of the net sheet with a clump weight to its lower end.

식 (2)에 나타난 미지수인  $R, T, A_n, B_n$ 을 구하기 위하여 두 영역이 만나는 경계면( $x=0$ )에서 정합조건식(matching condition)을 적용하여야 한다. 먼저  $x=0$ 에서 영역 1,2의 수평방향 속도가 서로 같다는 정합조건식을 적용하면 다음과 같다. 이때 그물망에서의 수평방향 물입자의 속도를 앞에서 같이 고유함수의 전개식으로 표현한다.

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} = u(z) = -\frac{ig}{\omega} \sum_{n=0}^{\infty} u_n f_n(z), \text{ at } x=0, -h < y < 0 \quad (5)$$

식 (2)을 식 (5)에 대입한 후 정리하면 미지수  $A_n, B_n$ 은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$A_n = \frac{u_n}{k_n}, \quad B_n = -\frac{u_n}{k_n}, \quad n=0,1,2,\dots \quad (6)$$

여기서  $A_0=R-1, B_0=T$ 이다. 식 (6)을 식 (2)에 대입하여 영역 1,2에서의 속도포텐셜을 다시 쓰면 다음식과 같다.

$$\phi_1(x,z) = -\frac{ig}{\omega} \left\{ (e^{-k_0 x} + e^{k_0 x}) f_0(x) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_n}{k_n} e^{k_n x} f_n(z) \right\}, \quad (7)$$

$$\phi_2(x,z) = \frac{ig}{\omega} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{u_n}{k_n} e^{-k_n x} f_n(x).$$

식 (7)에서 미지수인  $u_n(n=0,1,2,\dots)$ 을 구하기 위해서는 추가적인 정합조건식이 필요하다. 그물망 아래의 경계면에서 만족해야 할 정합조건식은 아래와 같다.

$$\phi_1(0,z) = \phi_2(0,z), \quad -h < z < -d. \quad (8)$$

앞에서 구한 식 (7)을 식 (8)에 대입한 후 양변에  $f_m(z)$ 을 곱한 뒤  $-h$ 부터  $-d$ 까지 적분하면 아래와 같은 대수방정식을 유도할 수 있다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{C_{mn}}{k_n} \right) u_n = -C_{m0}, \quad m=0,1,2,\dots \quad (9)$$

여기서  $C_{mn} = \frac{1}{h} \int_{-h}^{-d} f_n(z) f_m(z) dz$  이다.

그물망이 놓인 경계면에서의 정합조건식은 그물망 전후의 압력차는 그물망에서의 유속과 선형적으로 비례한다는 Darcy 법칙과 그물망 표면에서의 유체입자의 속도는 그물망 자체의 속도와 같다는 물체경계조건식을 결합한 식이다.

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} = -\frac{ig}{\omega} \sum_{n=0}^{\infty} u_n f_n(z) = i\sigma(\phi_1 - \phi_2) - i\omega \xi, \quad (10)$$

$$-d < z < 0, \quad x=0$$

여기서  $\sigma$ 는 그물망의 투과성 효과를 나타내는 공극율 계수로서 전체면적과 뚫린 면적의 비인 공극율과 밀접한 관련이 있다(Chwang, 1983, Chwang and Wu, 1994, Cho and

Kim, 2008). 실제계산에서는 무차원화시킨 공극율 계수  $b(=2\pi\sigma/k)$ 를 사용하였다.  $b \rightarrow 0$ 는 불투과성 막을 의미하며,  $b \rightarrow \infty$ 는 입사파에 전혀 영향을 주지 않는 가상의 그물망이 놓여 있는 경우이다.  $\xi(z)=0$ 이면 투과성 수직판이 놓인 경우를 뜻한다(조, 2002).

식 (10)에서 그물망의 운동변위  $\xi(z)$ 는 막체 방정식(membrane equation)과 함께 양 끝단에서의 경계조건식을 만족한다. 그물망의 상단 끝은 수면에 고정되어 있고 그물망 하단 끝에 질량  $m$ 인 추가 매달려 있는 경우를 가정하여 경계조건식을 부과하면 그물망의 운동변위는  $\xi(z)$ 는 아래와 같은 경계치문제를 만족한다.

$$\begin{cases} \frac{d^2 \xi}{dz^2} + \lambda^2 \xi = -\frac{i\rho\omega}{T_0}(\phi_1 - \phi_2), & -d < z < 0, \\ \xi = 0, & \text{at } z=0 \\ T_0 \frac{d\xi}{dz} + m\omega^2 \xi = 0, & \text{at } z=-d \end{cases} \quad (11)$$

여기서  $\lambda = \omega\sqrt{m_s/T_0}$ 이며,  $T_0(=m+m_s d)g$ 는 그물망에 작용하는 초기장력이다.  $T_0 \rightarrow \infty$ 는 변형하지 않는 수직판이 놓인 경우를 의미한다. 위에 주어진 경계치문제를 풀기 위하여 본 연구에서는 그물망에 특이점을 분포시켜 해를 구하는 Green 함수법을 사용하였다. 먼저 아래와 같은 경계치문제를 만족하는 Green 함수를 구한다.

$$\begin{cases} \frac{d^2 G}{dz^2} + \lambda^2 G = \delta(z-z_0), & -d < z < 0 \\ G = 0, & \text{at } z=0 \\ T_0 \frac{dG}{dz} + m\omega^2 G = 0, & \text{at } z=-d \end{cases} \quad (12)$$

여기서  $z_0$ 는 특이점의 위치이며,  $\delta(z-z_0)$ 는 Dirac-delta 함수로  $z=z_0$ 일 때 무한대로 폭발하는 특이거동을 나타낸다. 식 (12)에 주어진 경계치문제의 해는 다음과 같다(Morse and Feshbach, 1953).

$$G(z, z_0) = 2d \sum_{l=0}^{\infty} \frac{2\pi\beta_l}{[2\pi\beta_l - \sin(2\pi\beta_l)]} \sin\left(\frac{\pi\beta_l z_0}{d}\right) \sin\left(\frac{\pi\beta_l z}{d}\right) \times \frac{1}{[(\lambda d)^2 - (\pi\beta_l)^2]} \quad (13)$$

여기서  $\frac{\pi\beta_l}{\tan(\pi\beta_l)} = m\omega^2 d/T_0, \quad l=0,1,\dots$

식 (13)에 주어진 Green 함수를 이용하여 유연한 그물망의 운동변위를 구하면 다음과 같다.

$$\xi(z) = -\frac{i\omega\rho}{T_0} \int_{-d}^0 G(z, z_0) (\phi_1 - \phi_2) dz_0 \quad (14)$$

식 (7)을 위식에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\xi(z) = -\frac{4\rho g d \sum_{i=0}^{\infty} \frac{2\pi\beta_i}{[2\pi\beta_i - \sin(2\pi\beta_i)][(\lambda d)^2 - (\pi\beta_i)^2]} \left( S_{0i} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{S_{ni}}{k_n} \right) \sin\left(\frac{\pi\beta_i z}{d}\right) \quad (15)$$

여기서  $S_{ni} = \int_{-d}^0 f_n(z_0) \sin(\pi\beta_i z_0/d) dz_0$  이다. 실제 계산에서  $l$  을 0부터  $M$ 개를 취하고  $M$ 을 30개로 잡았다. 식 (7)과 식 (15)를 정합조건식 (10)에 대입한 후 양변에  $f_m(z)$ 를 곱한 뒤  $-d$ 부터 0까지 적분하면 아래와 같은 대수방정식을 구할 수 있다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ D_{mn} - 2i\sigma \frac{D_{mn}}{k_n} + \frac{\Gamma_{mn}}{k_n} \right\} u_n = 2i\sigma D_{m0} - \Gamma_{m0} \quad (16)$$

여기서

$$D_{mn} = \frac{1}{h} \int_{-d}^0 f_n(z) f_m(z) dz = \delta_{mn} - C_{mn}$$

$$\Gamma_{mn} = \frac{4\rho\omega^2 \left(\frac{d}{h}\right)}{T_0}$$

$$\times \sum_{i=0}^{\infty} \frac{2\pi\beta_i}{[2\pi\beta_i - \sin(2\pi\beta_i)][(\lambda d)^2 - (\pi\beta_i)^2]} S_{ni} S_{mi}$$

앞에서 유도한 식 (9)와 식 (16)을 더하면 최종적으로 풀어야 할  $u_n (n=0, 1, \dots)$ 에 대한 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ D_{mn} - 2i\sigma \frac{D_{mn}}{k_n} + \frac{C_{mn} + \Gamma_{mn}}{k_n} \right\} u_n = 2i\sigma D_{m0} - C_{m0} - \Gamma_{m0}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (17)$$

식 (17)에서 완전히 막힌 그물망인 경우 ( $\sigma=0$ ), 식 (17)은 아래식과 같이 바뀐다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ D_{mn} + \frac{C_{mn} + \Gamma_{mn}}{k_n} \right\} u_n = -C_{m0} - \Gamma_{m0}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (18)$$

한편 그물망의 유연성을 무시한 경우 ( $T_0 \rightarrow \infty$ ), 식 (17)은 다음식과 같다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ D_{mn} - 2i\sigma \frac{D_{mn}}{k_n} + \frac{C_{mn}}{k_n} \right\} u_n = 2i\sigma D_{m0} - C_{m0}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (19)$$

식 (18)과 식 (19)를 동시에 만족하는 불투과성 수직판인 경우 ( $\sigma=0, T_0 \rightarrow \infty$ )에 대한 대수방정식은 아래와 같다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ D_{mn} + \frac{C_{mn}}{k_n} \right\} u_n = -C_{m0}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (20)$$

식 (17)에 주어진 대수방정식을 수치적으로 풀기 위하여 고

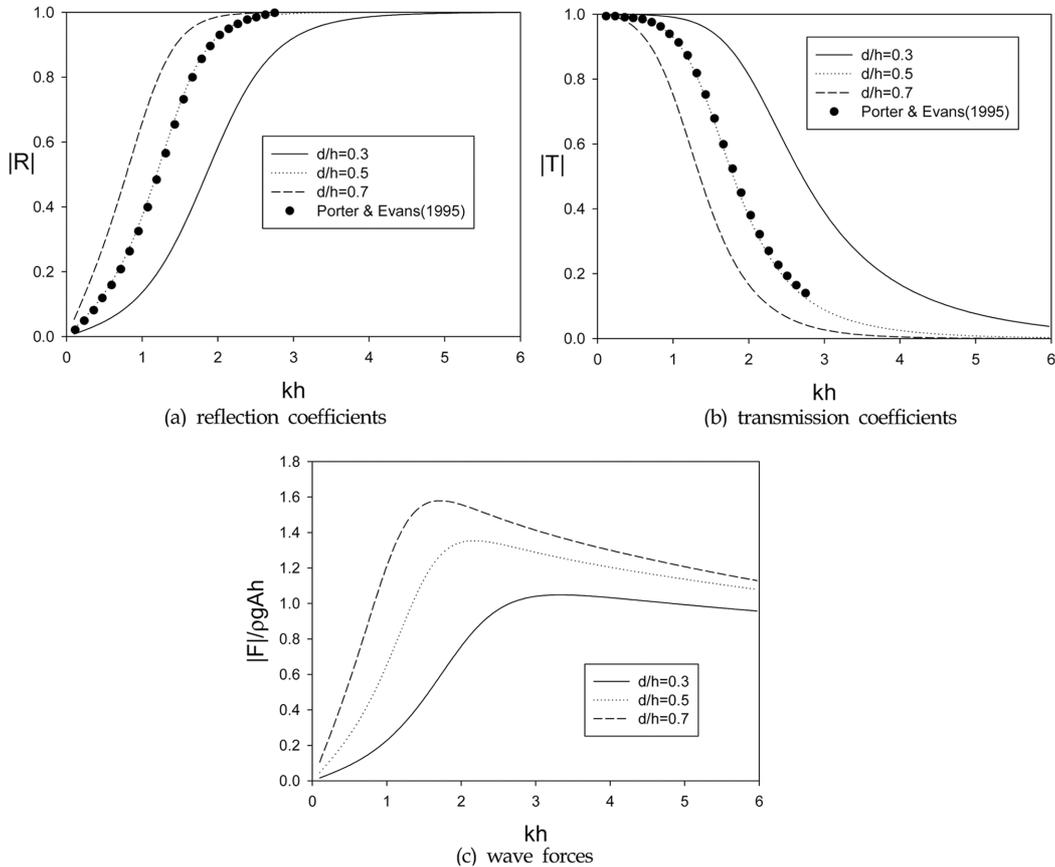


Fig. 2. (a) Reflection coefficients, (b) transmission coefficients, and (c) wave forces of vertical impermeable plate ( $T_0 \rightarrow \infty, b=0$ ) as function of non-dimensional wavelength  $kh$  and submergence depth  $d/h$ .

유함수의 개수를 유한개( $N$ ) 취한다. 대수방정식을 풀어 미지수  $u_n$ 을 구하면 과랑하중은 다음과 같다.

$$F = \rho g A \int_{-d}^0 [\phi_1(0, z) - \phi_2(0, z)] dz, \quad (21)$$

$$= 2\rho g A \sum_{n=0}^{\infty} \left( \delta_{n0} + \frac{u_n}{k_n} \right) \frac{\sin(k_n h) - \sin(k_n(h-d))}{k_n N_n}$$

### 3. 계산결과 및 고찰

먼저 유연한 그물망에 대한 해석해의 타당성을 검증하기 위하여 불투과성 수직판에 대한 계산을 식 (20)을 사용하여 수행하였다. Fig. 2(a), (b)는 불투과성 수직판에 의한 반사율과 투과율을 무차원화된 파장( $kh$ )에 대하여 그린 그림이다. 수직판의 잠긴깊이와 수심과의 비( $d/h$ )는 0.3, 0.5, 0.7이다. 여기서 선은 고유함수전개법(MEEM)을 사용한 해석해의 결과이며, 동그라미는 Porter and Evans(1995)의 Galerkin 근사해법에 기초한 결과이다. Galerkin 근사해법은 수직판 끝단의 특이거동으로 생기는 고유함수 개수에 증가에 따른 느린 수렴성을 개선하고 결과의 정확도를 높이기 위하여 개발된 방법이다. 비교적 적은 고유함수 개수( $N=50$ )를 사용했음에도 불구하고 본 계산결과는 Porter and Evans(1995)의 결과와 잘 일치하고 있다. 이후의 모든 계산에서 고유함수 개수를 50개로 잡았다.  $kh$ 가 작은 저주파수 영역에서는 입사파는 대부분 투과되지만 고주파수 영역으로 이동함에 따라 반사율을 커지고 투과율이 줄어드는 전형적인 일정깊이 잠긴 수직판의 반사율/투과율 특성을 보여주고 있다. 수직판의 잠긴깊이가 클수록 파를 차단하는 효과가 증가하여 상대적으로 투과율은 줄어들고 반사율은 증가한다. 또한 불투과성 수직판은 에너지 손실기구를 갖지 않기 때문에 에너지 보존식( $|R|^2 + |T|^2 = 1$ )을 만족한다. Fig. 2(c)는 같은 계산조건에 대하여 수직판에 작용하는 과랑하중을 보여주고 있는데 예상대로 잠긴깊이가 클수록 전 주파수에 영역에 걸쳐 과랑하중은 크게 나타났다. 과랑하중의 최대값은 잠긴깊이가 커질수록 뚜렷이 나타나며 최대값이 일어나는 주파수는 저주파수영역으로 이동함을 볼 수 있다.

Yu(1995)는 투과성 수직판이 해지면 바닥까지 놓여있는 경우( $d=h$ ), 반사율과 투과율에 대한 해석해가  $|R|=|1/(1+2G)|$ ,  $|T|=|2G/(1+2G)|$ 임을 유도하였다. 여기서  $G=b/2\pi$ 이다. Yu(1995)가 유도한 식에서 반사율과 투과율은 입사파의 주파수와 무관하며 공극율과 밀접한 관련이 있는  $b$ 의 함수임을 보인다.  $b$ 가 커진다는 것은 공극율의 커짐을 의미한다.  $b$ 가 커질수록 반사율은 크게 줄어들며, 뚫린 수직판을 통하여 입사파의 에너지가 투과되므로 투과율은 커짐을 알 수 있다. Fig. 3은 식 (19)을 사용하여 구한 투과성 수직판의 계산결과와 Yu(1995)가 제시한 해석해와 비교하였다. 수평축을 무차원화된 공극율 계수  $b$ 로 잡았다. 두 결과는 서로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 2의 불투과성 수직판의 결과와 달리 파가 투

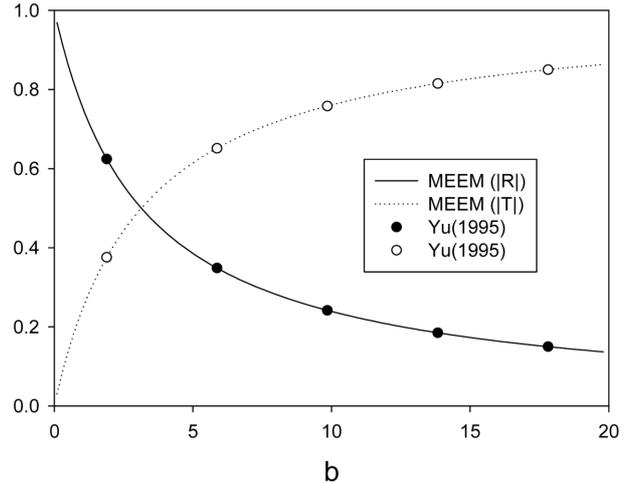


Fig. 3. Comparison of the present MEEM solutions with Yu's vertical porous plate results ( $d=h$ ).

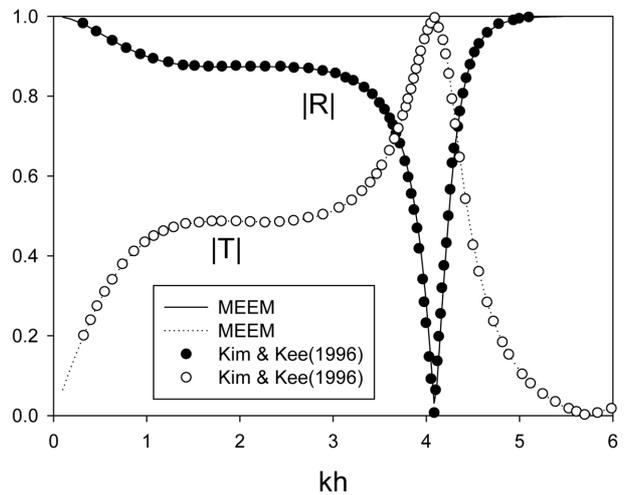


Fig. 4. Comparison of the present MEEM solutions with Kim and Kee's flexible membrane results with hinged both ends for  $T_0/\rho gh^2 = 0.255$ ,  $m_s = 5 \text{ kg/m}^2$ .

과성 수직판을 통과하면서 막리에 의한 와류의 발생으로 일부의 에너지가 소멸되므로  $|R|^2 + |T|^2$ 는 1보다 작은 값을 갖는다.

다음은 식 (18)을 사용하여 완전히 막힌 그물망의 반사율과 투과율을 살펴보았다. 불투과성 유연한 막체에 의한 반사율과 투과율을 계산한 Kim and Kee(1996)의 계산결과와 비교하기 위하여 유연막이 수면과 해지면 바닥에 고정된 경우에 대하여 살펴보았다. 따라서  $d=h$ 이며, 식 (13)에서  $\beta_l = 1, 2, 3, \dots$ 이다. 계산에 사용한 무차원화된 초기장력  $T_0/\rho gh^2 = 0.255$ 이며, 유연막의 단위 길이당 질량은  $5 \text{ kg/m}^2$ 이다. Fig. 4에서 선은 식 (18)을 사용하여 얻은 반사율과 투과율이며, 동그라미는 Kim and Kee(1996)의 계산결과이다. 두 결과는 서로 잘 일치하고 있다.  $kh$ 가 3보다 작은 장파영역에서도 투과율이 0.5보다 작게 나타나 유연막을 파를 막는 방파제로 활용이 가능함을 엿볼 수 있다. 이전의 그림들과 달리 특정한 주

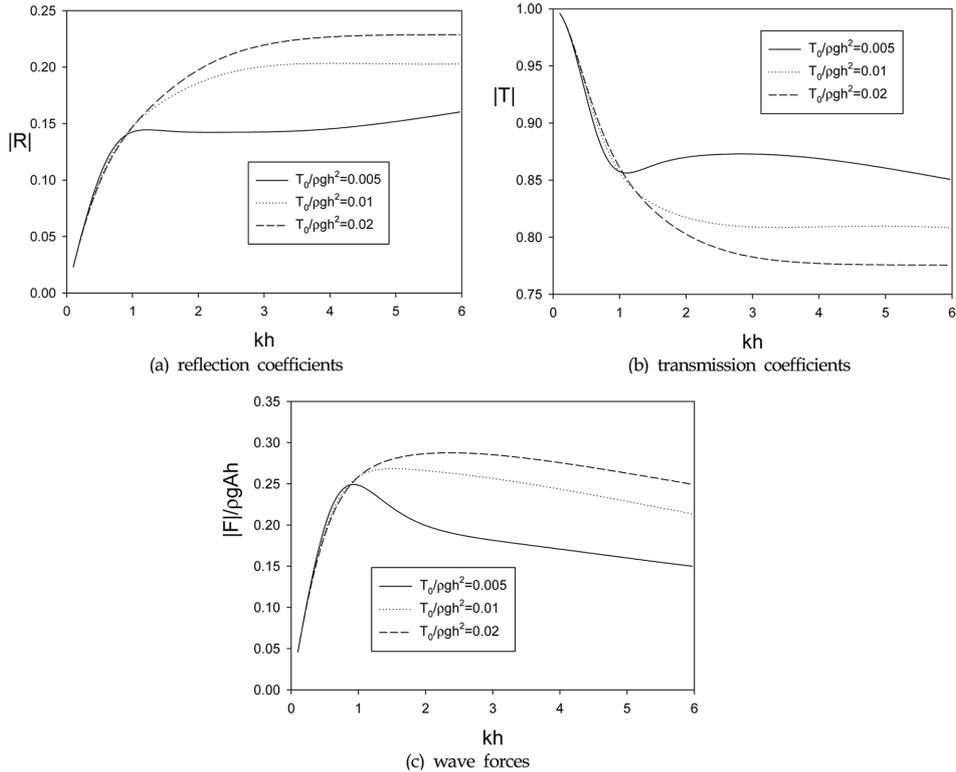
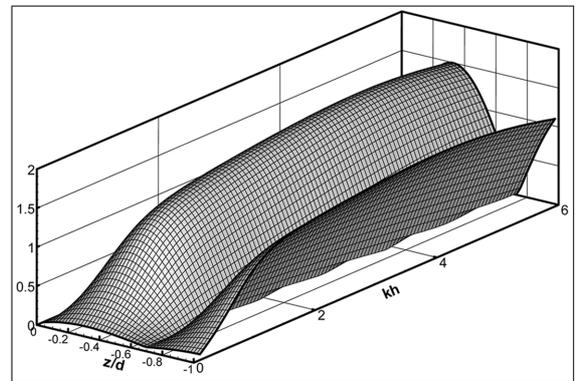


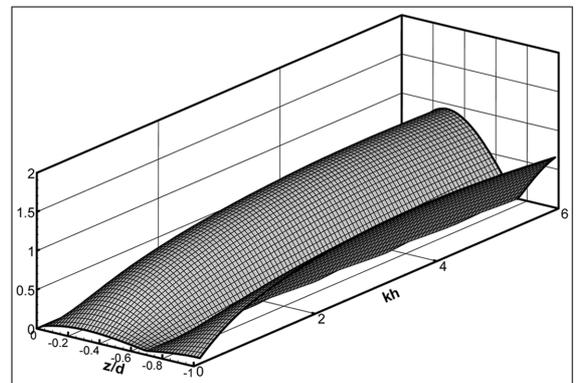
Fig. 5. (a) Reflection coefficients, (b) transmission coefficients, and (c) wave forces of a vertical flexible permeable net sheet as function of non-dimensional wavelength  $kh$  and tension  $T_0/\rho gh^2$  for  $d/h = 0.5$ ,  $b = 10$ ,  $m_s = 0.5 \text{ kg/m}^2$ .

과수에서 폭이 좁은 피크 곡선이 존재하는데, 이는 입사파의 주파수와 유연막내에 존재하는 고유주파수와 일치될 때 발생하는 공진현상으로 생기는 현상이다. 본 계산에서  $kh = 4$ 가 공진현상이 발생하는 공진주파수이며 이때 반사율은 0이며, 투과율은 1이다.

이상의 계산결과들로부터 본 계산모델은 불투과성/투과성 수직판 뿐만 아니라 유연막으로 확장이 가능하다. 다음은 그물망의 상단 끝은 수면에 고정되어 있으며 하단 끝에 추가 매달린 그물망 모델에 대한 계산을 수행하였다. 계산으로 단위 길이당 그물망의 수중질량( $m_s$ )은  $0.5 \text{ kg/m}^2$ 이다. Fig. 5는 잠긴깊이와 수심의 비( $d/h$ )가 0.5이고, 무차원화된 공극율 계수 ( $b$ )가 10일 때 그물망에 의한 반사율과 투과율 그리고 파랑하중을 그물망의 무차원화된 초기장력( $T_0/\rho gh^2 = 0.005, 0.01, 0.02$ )에 대하여 살펴보았다. 초기장력이 줄어들수록 반사율은 줄어들고 투과율은 커지는 특징을 보이고 있다. 그물망의 초기장력이 작다는 것은 그물망의 움직임을 자유롭게 허용함을 의미하므로 파를 제어하는 기능이 떨어지게 되어 투과율은 커지게 된다. 또한 초기장력이 줄어들수록 파랑하중이 크게 줄어드는 경향을 볼 수 있다. 따라서 그물망으로 이루어진 양식시설물을 설계할 때 이러한 특성을 고려하여 양식시설물의 내부 용적의 변화가 양식어류에게 영향을 주지 않는 범위내에서 그물망의 유연성을 다소 허용하도록 적절한 무게의 추를 선정하는 것이 양식시설물의 안정성 측면에서 필요하다.



(a)  $b=5$



(b)  $b=10$

Fig. 6. Dynamic responses( $|\xi(z)|$ ) of net sheet as function of non-dimensional wavenumber  $kh$  and vertical coordinate  $z/d$  for  $d/h = 0.5$ ,  $m_s = 0.5 \text{ kg/m}^2$ ,  $T_0/\rho gh^2 = 0.01$ .

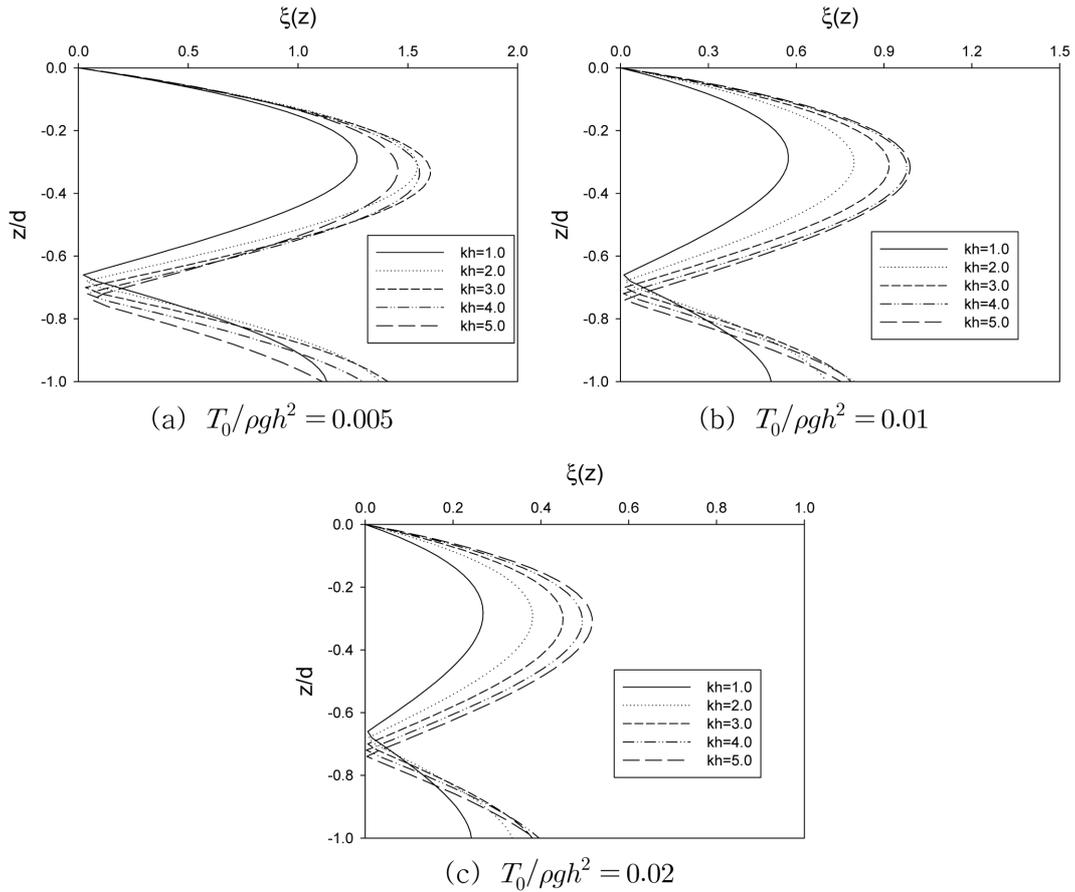


Fig. 7. Dynamic responses( $\xi(z)$ ) of net sheet as function of non-dimensional wavelength for  $d/h=0.5$ ,  $b=10$ ,  $m_s=0.5 \text{ kg/m}^2$ .

Fig. 6은 그물망의 운동변위( $\xi(z)$ )를 그물망의 수직깊이 ( $z/d$ )와 무차원화된 파장( $kh$ )에 따라 그린 3차원 그림이다. 여기서 무차원화된 초기장력은  $T_0/\rho gh^2=0.01$ 이다. 상단 끝은 고정되어 있어 운동변위가 0이나 추가 매달린 하단 끝은 일정한 운동변위를 갖는다. 예상대로 공극율이 작은 경우가 상대적으로 큰 운동변위를 보이고 있다. 또한 공극율에 관계없이  $kh$ 가 큰 고주파수영역에서 운동변위가 저주파수영역보다 크게 나타난다. 그물망의 운동변위는  $z/d=-0.3$ 에 가장 크게 나타나다가 이후 줄어들어  $z/d=-0.7$ 에서 최소값을 갖고 다시 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 7은 그물망의 깊이 변화에 따른 그물망의 운동변위 ( $\xi(z)$ )를 3개의 초기장력과 5개의 무차원화된 파장에 대하여 보여주고 있다. 무차원화된 공극율( $b$ )은 10으로 고정하였다. 그림에서 초기장력이 클수록 다시 말하여 추의 무게가 무거울수록 운동변위는 크게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 무차원화된 파장( $kh$ )이 커질수록 운동변위는 대체적으로 증가하며 깊이에 따른 운동변위의 분포곡선의 형태는 Fig. 6과 유사하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 그물망 상단 끝은 수면에 고정되어 있고, 하단 끝에 추가 매달린 유연한 그물망에 의한 반사율, 투과율,

파랑하중 그리고 운동변위를 고유함수 전개법과 유탄성이론을 적용하여 구하였다. 계산결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1)  $T_0/\rho gh^2 \rightarrow \infty$ ,  $b=0$ , 일 때 해석모델은 불투과성 수직판 모델로 바뀌게 되며 해석결과와 Porter and Evans(1995)의 결과와 잘 일치하였다. 또한  $T_0/\rho gh^2 \rightarrow \infty$ ,  $b \neq 0$ 일 때 해석모델은 투과성 수직판 모델로 바뀌게 되며 잠긴깊이와 중심이 같을 때의 해석결과는 Yu(1995)의 해석해와 같은 결과를 주었다.

(2) 무차원화된 초기장력( $T_0/\rho gh^2$ )이 일정한 값을 가지며,  $b=0$ 일 때 해석모델은 파랑중 수직으로 설치한 유연막 모델이 된다.  $d=h$ 일 때의 해석결과와 Kim and Kee(1996)의 해석결과는 서로 잘 일치하였다. 따라서 본 해석모델은 불투과성/투과성 수직판 뿐만 아니라 유연막으로 확장이 가능하다.

(3) 그물망의 상단 끝은 수면에 고정되어 있으며 하단 끝에 추가 매달린 그물망 모델에 대하여 초기장력이 감소함에 따라 공극율이 증가함에 따라 반사율과 파랑하중은 줄어들고 투과율은 커지는 현상이 나타났다.

(4) 그물망의 운동변위는 초기장력과 공극율이 커질수록 운동변위는 크게 줄어드는 경향이 나타났다. 또한 고주파수영역에서의 운동변위는 저주파수영역에서보다 증가하며 파랑에너지가 밀집된 수면 아래  $z/d=-0.3$ 에서의 운동변위가 가장

크다가 점점 깊어질수록 줄어들어  $z/d = -0.7$ 근방에서 최소값을 갖다가 추가 놓인 하단 끝까지 다시 증가하는 동적응답 특성을 보여준다.

## 감사의 글

이 논문은 2011년에 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0006137).

## 참고문헌

- 조일형 (2002). 수평형 타공판의 소파특성. 한국해양·해양공학 회지, 14(4), 265-273.
- 조일형 (2011). 원통형 양식시설물에 작용하는 파랑하중. 한국해양·해양공학회지, 23(1), 63-69.
- Aarsens, J.V., Rudi, H. and Loland, G. (1990). Current forces on cage, net deflection. in *Engineering for Offshore Fish Farming*, Thomas Telford, London, 137-152.
- Cho, I.H. and Kim, M.H. (2008). Wave absorbing system using inclined perforated plates. *J. of Fluid Mechanics*, 608, 1-20.
- Chwang, A.T. (1983). A porous wavemaker theory. *J. of Fluid Mechanics*, 132, 395-406
- Chwang, A.T. and Wu, J. (1994). Wave scattering by submerged porous disk. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 120, 2575-2587.
- Fredheim, A. and Faltinsen, O.M. (2001). A numerical model for the fluid structure interaction of a three-dimensional net structure. *Proc. 5th International Workshop DEMaT'01*, Rostock, Germany.
- Huang, C.C., Tang, H.J. and Liu, J.Y. (2007). Modeling volume deformation in gravity-type cages with distributed bottom weights or a rigid tube-sinker. *Aquacultural Engineering* 37(2), 144-157.
- Huang, C.C., Tang, H.J. and Liu, J.Y. (2008). Effects of waves and currents on gravity-type cages in the open sea. *Aquacultural Engineering*, 38(2), 105-116.
- Kim, M.H. and Kee, S.T. (1996). Flexible membrane wave barrier. Part 1. Analytic and numerical solutions. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 122(1), 46-53.
- Lader, P., Enerhaug, B., Fredheim, A. and Krokstad, J. (2003). Modeling of 3D Net Structures Exposed to Waves and Current. SINTEF Fisheries and Aquaculture. Trondheim, Norway.
- Løland, G. (1991). Current forces on and flow through fish farms. In: *Division of Marine Hydrodynamics*, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.
- McIver, P. (1985). Scattering of water waves by two surface-piercing vertical barrier. *IMA J. of Appl. Math.*, 35, 339-355.
- Morse, P.M. and Feshbach, H. (1953). *Methods of theoretical physics*. McGraw-Hill Co.
- Porter, R. and Evans, D.V. (1995). Complementary approximation to wave scattering by vertical barriers. *J. of Fluid Mechanics*, 294, 155-180.
- Tsukrov, I., Eroshkin, O., Fredriksson, D., Robinson, S.M. and Celikkol, B. (2003). Finite element modelling of net panels using a consistent net element. *Ocean Engineering*, 30, 251-270.
- Tsukrov, I., Eroshkin, O., Paul, W. and Celikkol, B. (2005). Numerical modeling of nonlinear elastic components of mooring systems. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(1), 37-46.
- Yu, X. (1995). Diffraction of water waves by porous breakwaters. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 121(6), 275-282.

원고접수일: 2012년 1월 2일

수정본채택: 2012년 3월 5일(1차)

2012년 3월 22일(2차)

게재확정일: 2012년 3월 28일