

柔軟膜 防波堤에 의한 傾斜波의 散亂 Scattering of Oblique Waves by an Infinite Flexible Membrane Breakwater

조일형* · 홍석원*

Il Hyoung Cho* and Sok Won Hong*

要 旨 : 본 연구에서는 PVC나 PU와 같은 유연성이 있는 유연막 방파제와 임의의 입사각을 갖는 파의 상호작용문제를 다루었다. 유연막 방파제에 작용하는 파랑하중을 구하기 위하여 고유함수전개법(eigen-function expansion method)을 사용하였다. 이때 유연막의 변형이 유체장에 미치는 영향은 경계조건 식으로부터 표현된다. 경계조건식에서 유연막의 변형은 막 방정식을 풀어 구한다. 계산 예로 유연막에 작용하는 장력과 계류선의 강성계수 그리고 유연막의 높이를 변화시키면서 투과율과 반사율의 차이를 비교하였고, 입사각도의 변화에 따른 방파 효과의 차이를 살펴보았다. 결론적으로 유연막 구조물을 적절히 설계한다면 미래의 훌륭한 방파제로 활용이 가능하다고 여겨진다.

Abstract □ The wave interaction with flexible membrane such as PVC and PU fabrics is studied to prove its applicability to portable breakwaters. To analyze the wave deformation due to the flexible membrane, eigen-function expansion method is employed. The fluid domain is separated into two regions. The velocity potential in each regions and the deformation of membrane are coupled by the body boundary conditions. Herein the deformation of membrane is obtained by solving the membrane equation. As a numerical example, transmission and reflection coefficients according to the change of several design parameters such as tensile force, mooring line stiffness and membrane height are investigated. It is found that the efficiency of flexible membrane breakwater is significantly affected by these design parameters. The angle of incident wave is an important role to the performance of breakwater. Finally we conclude that flexible membrane can be used to engineering material for the future breakwaters.

1. 서 론

최근 PVC나 PU와 같은 화학섬유의 수평과 강도가 향상됨에 따라 이러한 섬유를 해안 및 해양공학 분야에 활용하는 연구가 몇몇 선진국에서 활발히 진행되고 있다. 적용가능한 분야로는 해안이나 해안시설물을 파도로부터 보호하는 방파제와 선박이 좌초나 충돌시 유출되는 기름확산을 방지하는데 오일붐을 들 수 있다. 또한 준설공사나 간척사업시 세립토가 인접한 연안에 확산되는 것을 방지하는 오타방지막이 있다. 이러한 재질을 방파제로 활용할 때 장점들은 다음과 같다. 기존의 철이나 콘크리트 구조물과 같은 강체에 비하여 가격면에서 월등히 저렴하다. 또한

다루기가 손쉬워 설치, 이동, 회수가 용이하며 유연성이 좋기 때문에 폭풍시 파손될 위험이 상대적으로 적다.

유연막 구조물에 의한 파랑제어 문제는 유체와 구조의 상호작용을 고려해야 하는 어려운 문제이므로 관련 연구의 대부분은 2차원 문제에 국한되어 있으며 주로 수치해법에 의존하고 있다. Ohyama(1989)는 내부에 물을 채운 반원형태의 유연막 구조물(flexible mound)을 고안하여 파랑제어 효과와 유연막의 거동을 수치계산하여 실험결과와 비교하였다. 경계적분법을 사용하여 유동을 풀었고, 유연막의 거동해석은 질점해석방법(lumped-mass method)을 사용하였다. 해석결과 유연막 구조물을 방파제로 효과적으로 사

*韓國機械研究院 船舶海洋工學研究센터 海洋技術硏究部 (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, 171 Jang-dong, Yousung-ku, Taejeon 305-600, Korea)

용할 수 있다는 사실을 입증하였다. 실제로 일본에서는 1992년 Nagakaki 항구에 40m(L)×9m(B)×3m(H) 시제품을 설치하였다. Kim(1994)은 실린더 형태의 부력재와 스킵트로 구성된 새로운 형태의 유연막 방파제에 대하여 수치계산과 모형시험을 수행하여 유연막 방파제가 강체 구조물에 비하여 효과적이라는 사실을 밝혔다.

본 연구에서는 유연막 방파제의 실용화를 위한 기초 연구로서 유연막 방파제의 방파성능을 해석하기 위한 수학적 모델을 정립하였고, 방파제에 임의의 각도로 입사하는 파를 고려하였다. 이때 유연막 구조물은 무한이 길다고 가정하여 3차원 문제를 2차원 문제로 치환하였다. 수치계산 방법으로는 유연막을 경계로 유체영역을 2개로 나누어 각 영역에서의 해를 고유함수전개법(eigen-function expansion method)을 사용하여 표현하였고 부족한 경계조건으로부터 생기는 미지수는 두 영역의 해를 정합시켜 구하였다. 이때 각 유체영역에서의 속도포텐셜과 유연막의 운동변위는 유연막에서의 경계조건으로부터 연성된다. 계산예로 유연막에 작용하는 장력과 입사각도가 변할 때의 파랑제어 기능과 유연막에 작용하는 파랑하중 그리고 유연막의 변형을 살펴보았다. 또한 유연막의 높이와 계류사의 강성을 바꿔가면서 최적의 유연막 방파제의 형상을 도출하였다.

2. 문제의 정식화

일정한 수심 h 에 높이가 d 인 유연막 방파제가 y 축으로 무한이 놓여 있으며 입사파는 x 축과 θ 의 각도를 갖고 들어오는 경우를 생각하였다. 원점은 해저면 바닥에 잡았고 유연막의 두께는 무시하였다. 유연막의 한끝단은 바닥에 고정되어 있으며 다른 한끝단에 계류사가 연결되어 있다. 선형 포텐셜이론에 따라 속도포텐셜을 도입하고 유동은 주파수 ω 를 갖고 조화운동을 한다면 가정하면 속도포텐셜은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \text{Re}\{\psi(x, y, z) e^{-i\omega t}\} \quad (1)$$

속도포텐셜 ψ 는 아래와 같이 3차원 Laplace방정식과 경계조건을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{in } \Omega)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \psi = 0 \quad (\text{at } z = h)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \quad (\text{at } z = 0)$$

$$\lim_{|x| \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial \psi}{\partial |x|} - ik_0 \psi \right) = 0 \quad (2)$$

여기서 g 는 중력가속도이며, k_0 는 입사파의 파수(wave number)를 나타낸다. 구조물이 y 축 방향으로 무한이 길다고 가정하면 속도포텐셜 ψ 는 입사파와 마찬가지로 y 축을 따라 조화운동을 한다.

$$\psi(x, y, z) = \phi(x, z) e^{ik_0 \sin \theta y} \quad (3)$$

윗식을 식 (2)에 주어진 경계치 문제에 대입하여 정리하면 3차원 문제는 2차원 문제로 바뀐다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{in } \Omega)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi = 0 \quad (\text{at } z = h)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (\text{at } z = 0)$$

$$\lim_{|x| \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial \phi}{\partial |x|} - ik_0 \phi \right) = 0 \quad (4)$$

유체영역은 유연막에 의하여 2개로 분리되며 각 영역에서의 속도포텐셜을 하첨자 1, 2로 표현한다. 변수분리법(method of separation of variables)을 사용하여 위의 경계치 문제를 만족하는 각 영역에서의 속도포텐셜을 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Phi_1 = & -\frac{ig}{\omega} \{ (e^{i\alpha_0 x} + a_n e^{-i\alpha_0 x}) f_0(z) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} a_n e^{\alpha_n x} f_n(z) \} \quad (\text{in } \Omega_1) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Phi_2 = & -\frac{ig}{\omega} \{ (b^n e^{-i\alpha_0 x}) f_0(z) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} b_n e^{-\alpha_n x} f_n(z) \} \quad (\text{in } \Omega_2) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서

$$\alpha_n = \begin{cases} k_0 |\cos \theta| & (\text{for } n=0) \\ \sqrt{k_0^2 \sin^2 \theta + k_n^2} & (\text{for } n=1, 2, \dots) \end{cases}$$

이다.

식 (5)에서 첫번째 항과 두번째 항은 입사파(incident wave)와 반사파(reflected wave)로 Free 모드를 나타내며, 세번째 항은 x 가 커짐에 따라 사라지는 Local 모드이다. 식 (6)에서 첫번째 항은 투과파(transmitted wave)를 나타내며 두번째항은 Local 항이다. 여기서 고유함수 $f_n(z)$ 과 고유치 k_n 은 다음과 같다.

$$f_n(z) = \begin{cases} \frac{\cosh k_0 z}{\cosh h} & (\text{for } n=0) \\ \frac{\cosh k_n z}{\cosh k_n h} & (\text{for } n=1,2,\dots) \end{cases}$$

$$k_n = \begin{cases} k_0 \tanh k_0 h = \frac{\omega^2}{g} & (n=0) \\ k_n \tanh k_n h = -\frac{\omega^2}{g} & (n=1,2,\dots) \end{cases} \quad (7)$$

유연막이 놓여진 경계면에서 경계조건을 적용하지 않았기 때문에 미지수 a_n 과 b_n 이 남는다. 미지수 a_n, b_n 는 두 영역의 해를 $x=0$ 에서 정합시켜 얻을 수 있다. 즉, $0 < z < h, x=0$ 에서 법선방향의 속도는 같다. 이때 법선방향의 속도를 $u(z)$ 라 놓고 $u(z)$ 를 앞에서 구한 고유함수를 이용하여 전개시키면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} = u(z) = \sum_{n=0} u_n f_n(z) \quad (8)$$

식 (5)와 (6)을 윗식에 대입하여 a_n 과 b_n 를 u_n 으로 표현하면 다음과 같다.

$$a_n = \begin{cases} 1 - \frac{\omega}{g} \left(\frac{u_0}{\alpha_0} \right) & (\text{for } n=0) \\ \frac{i\omega}{g} \left(\frac{u_n}{\alpha_n} \right) & (\text{for } n=1,2,\dots) \end{cases} \quad (9)$$

$$b_n = \begin{cases} \frac{\omega}{g} \left(\frac{u_0}{\alpha_0} \right) & (\text{for } n=0) \\ -\frac{i\omega}{g} \left(\frac{u_n}{\alpha_n} \right) & (\text{for } n=1,2,\dots) \end{cases} \quad (10)$$

윗식을 식 (5)와 (6)에 대입하면 속도포텐셜 Φ_1 과 Φ_2 는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\Phi_1 = -\frac{ig}{\omega} \left\{ \left[e^{i\alpha_0 x} + \left(1 - \frac{\omega}{g} \frac{u_0}{\alpha_0} \right) e^{-i\alpha_0 x} \right] f_0(z) \right.$$

$$\left. + \sum_{n=1} \frac{i\omega}{g} \left(\frac{u_n}{\alpha_n} \right) e^{\alpha_n x} f_n(z) \right\} \quad (11)$$

$$\Phi_2 = -\frac{ig}{\omega} \left\{ \frac{\omega}{g} \frac{u_0}{\alpha_0} e^{i\alpha_0 x} f_0(z) \right.$$

$$\left. - \sum_{n=1} \frac{i\omega}{g} \left(\frac{u_n}{\alpha_n} \right) e^{-\alpha_n x} f_n(z) \right\} \quad (12)$$

또한 유연막이 없는 $d < z < h$ 에서 각 영역의 속도포텐셜은 같아야 한다($\Phi_1 = \Phi_2$).

$$\frac{\omega}{g} \left(\frac{u_0}{\alpha_0} \right) f_0(z) - \frac{i\omega}{g} \sum_{n=1} \left(\frac{u_n}{\alpha_n} \right) f_n(z) = f_0(z) \quad (13)$$

윗식의 양변에 $f_m(z)$ 을 곱하고 d 부터 h 까지 적분하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$i \left(\frac{u_0}{\alpha_0} \right) e_{0m}(d) + \sum_{n=1} \left(\frac{u_n}{\alpha_n} \right) e_{nm}(d) = \frac{ig}{\omega} e_{0m}(d) \quad (14)$$

여기서 $e_{nm}(d) = \int_d^h f_n(z) f_m(z) dz$ 이다. 다음은 유연막에서 경계조건을 살펴보자. 유연막이 놓여진 $0 < z < d, x=0$ 에서 운동학적 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} = \sum_{n=0} u_n f_n(z) = -i\omega \xi(z) \quad (15)$$

여기서 $\xi(z)$ 는 유연막의 x 방향 변위를 나타낸다. $\xi(z)$ 가 충분히 작다면 부유체의 부력과 계류삭의 수직방향 힘의 차이로 표현되는 장력 T 는 일정하다. 이때 $\xi(z)$ 는 아래와 같은 동역학적 경계조건인 막 방정식(membrane equation)을 만족한다.

$$\frac{d^2 \xi}{dz^2} + \lambda^2 \xi = \frac{i\omega \rho}{T} (\Phi_2 - \Phi_1) \quad (16)$$

여기서 $\lambda = \omega \sqrt{m/T}$ 이며, m 은 단위 길이당 유연막의 질량이다. 유연막의 한끝단 ($z=0$)이 고정되어 있는 경우 경계조건은 $\xi=0$ 이다. 다른 한끝 ($z=d$)에 강성 계수 K 를 갖는 계류삭이 연결되어 있을 때 경계조건은 $T(d\xi/dz) = -2K \sin^2 \theta_0 \xi$ 이다. 여기서 θ_0 는 계류삭과 유연막이 이루는 경사각도이다. (15)에 주어진 막 방정식과 양끝단에서 경계조건들을 만족하는 유연막의 변위를 구하기 위하여 Green함수를 도입하였다. Green 함수 $G(z, z_0)$ 는 다음과 같은 경계치 문제를 풀어 구한다.

$$\begin{aligned} \frac{d^2G}{dz^2} + \lambda^2 G &= \delta(z - z_0) \\ G &= 0 \text{ at } z = 0 \\ T \frac{dG}{dz} &= -2K \sin^2 \theta_0 G \text{ at } z = d \end{aligned} \quad (17)$$

위에 주어진 경계치 문제의 해는 다음과 같다(Morse와 Feshbach).

$$G(z, z_0) = 2d \sum_{i=0} \frac{2\pi\beta_i}{[2\pi\beta_i - \sin(2\pi\beta_i)]} \frac{\sin(\pi\beta_i z_0/d) \sin(\pi\beta_i z/d)}{[(\lambda d)^2 - (\pi\beta_i)^2]} \quad (18)$$

여기서 β_i 은 $\tan(\pi\beta_i) = -\lambda T/2K \sin^2 \theta_0$ 을 만족하며 z_0 는 특이점의 위치이다. 위의 Green 함수를 이용하여 유연막의 수평방향의 변위를 구하면 다음과 같다.

$$\xi(z) = \sum_{i=0} \frac{B_i}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \sin(\lambda_i z) \quad (19)$$

여기서

$$\begin{aligned} B_i &= \frac{2i\omega\rho}{dT} \frac{2\pi\beta_i}{[2\pi\beta_i - \sin(2\pi\beta_i)]} \\ &\quad \times \int_0^d (\phi_2 - \phi_1) \sin(\lambda_i z) dz \\ \lambda_i &= \frac{\beta_i \pi}{d} \text{ 이다.} \end{aligned}$$

윗식을 식 (15)에 대입하여 정리하면 아래식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{n=0} u_n f_n(z) &= \frac{4\rho\omega^2}{dT} \sum_{i=0} \frac{1}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \sin(\lambda_i z) \\ &\quad \frac{2\pi\beta_i}{[2\pi\beta_i - \sin(2\pi\beta_i)]} \int_0^d \left[\left(\frac{ig}{\omega} - i \frac{u_0}{\alpha_0} \right) f_0(z) \right. \\ &\quad \left. - \sum_{n=1} \left(\frac{u_n}{\alpha_n} \right) f_n(z) \right] \sin(\lambda_i z) dz \end{aligned} \quad (20)$$

앞에서와 같은 방법으로 윗식의 양변에 고유함수 $f_m(z)$ 을 곱한뒤 0부터 d 까지 적분하면 윗식은 다음과 같이 바뀐다.

$$\sum_{n=0} [d_n \delta_{nm} - e_{nm}(d)] u_n = \frac{4\rho\omega^2}{dT}$$

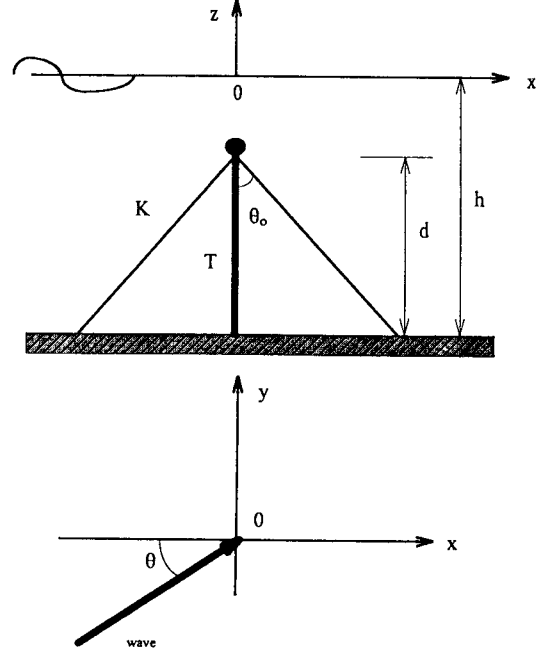


Fig. 1. Definition sketch of flexible membrane breakwater.

$$\begin{aligned} \sum_{i=0} \frac{1}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \frac{2\pi\beta_i}{[2\pi\beta_i - \sin(2\pi\beta_i)]} S_{mi}(d) \\ \times \left[\left(\frac{ig}{\omega} - i \frac{u_0}{\alpha_0} \right) S_{0i}(d) - \left(\frac{u_n}{\alpha_n} \right) S_{ni}(d) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 $S_{ni} = \int_0^d f_n(z) \sin(\lambda_i z) dz$ 이며, $d_n \delta_{nm} = \int_0^h f_n(z) f_m(z) dz$ 이다. δ_{nm} 은 n 과 m 이 같으면 1의 값을 갖고 다르면 0인 Kronecker-Delta 함수이다. 앞에서 유도한 식 (14)와 윗식을 더하면 최종적으로 풀어야 할 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \left[d_n \delta_{0m} - e_{0m}(d) + i \frac{e_{0m}(d)}{\alpha_0} + i \frac{\Gamma_{0m}(d)}{\alpha_0} \right] u_0 \\ + \sum_{n=1} \left[d_n \delta_{nm} - e_{nm}(d) + \frac{e_{nm}(d)}{\alpha_n} + \frac{\Gamma_{nm}(d)}{\alpha_n} \right] u_n \\ = \frac{ig}{\omega} [e_{0m}(d) + \Gamma_{0m}(d)] \end{aligned} \quad (22)$$

여기서

$$\Gamma_{nm}(d) = \frac{4\rho\omega^2}{dT} \sum_{i=0} \frac{1}{\lambda^2 - \lambda_i^2}$$

$$\frac{2\pi\beta_l}{[2\pi\beta_l - \sin(2\pi\beta_l)]} S_{ml}(d)S_{nl}(d)$$

이다. 위에 주어진 대수방정식을 풀어 u_n 을 구하고 식 (9)와 (10)에 대입하여 미지수 a_n 과 b_n 을 구한다. 유연막 방파제에 의한 투과율과 반사율은 다음과 같다.

$$T = \left| \frac{\omega}{g} \left(\frac{u_o}{\alpha_o} \right) \right|$$

$$R = \left| 1 - \frac{\omega}{g} \left(\frac{u_o}{\alpha_o} \right) \right| \quad (23)$$

유연막에 작용하는 파랑하중은 Bernoulli방정식을 사용하여 구한다.

$$F = -i\omega\rho \int_0^d [\phi_2(0, z) - \phi_1(0, z)] dz \quad (24)$$

3. 계산결과 및 고찰

수치계산의 예로 높이가 d 인 유연막의 한끝단이 해저면 바닥에 고정되어 있고 다른 한끝단은 계류삭에 연결된 모델을 생각하였다. 이때 유연막에 걸리는 장력은 T 이며, 단위 길이당 유연막의 질량은 5 kg/m^2 이다. 계류삭의 강성계수는 K 이며, 계류삭의 경사각도 θ_o 는 45° 로 고정시켰다. 입사파의 입사각도는 x 축과 θ 의 각을 이룬다. Fig. 2, 3은 $\theta=0^\circ$ 이며 $d/h=1.0$ 일

때 유연막에 걸리는 3가지 장력($T/\rho gh^2=0.1, 0.3, 0.5$)에 대하여 투과율과 반사율을 보여주고 있다. 여기서 x 축은 입사파의 파장과 수심의 비인 kh 로 잡았다. $T/Kh \sim 0$ 는 류삭의 강성계수가 아주 큰 값을 갖는 경우이다. 즉, 양끝단이 모두 고정된 경우이다. 장력이 커질수록 투과율 곡선의 최대값을 나타내는 kh 값이 고주파수쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. $T/\rho gh^2=0.1$ 인 경우 저주파수 영역에서는 반사율이 떨어지지만 kh 가 3.0보다 커지면 반사율은 1에 수렴하는 것을 볼

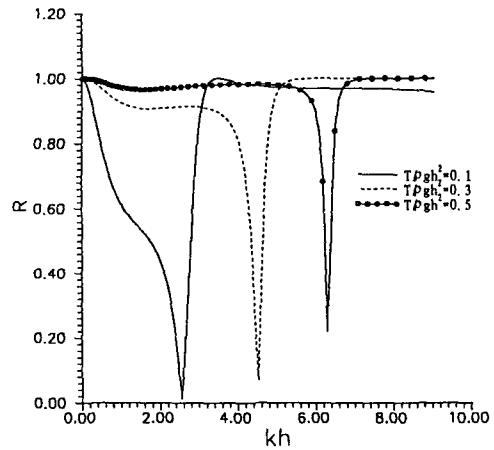


Fig. 3. Reflection coefficients of membrane breakwater for various tensions ($d/h=1.0, \theta=0, \theta_o=45^\circ, T/Kh \sim 0$).

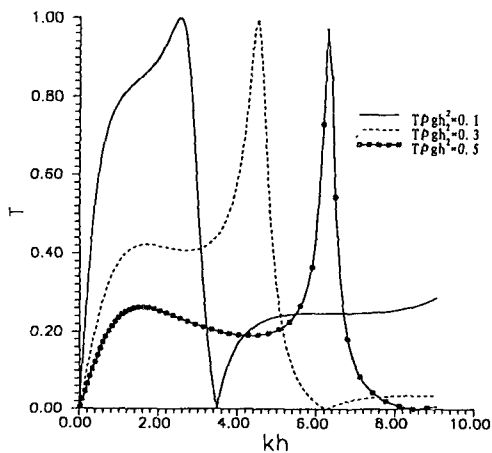


Fig. 2. Transmission coefficients of membrane breakwater for various tensions ($d/h=1.0, \theta=0, \theta_o=45^\circ, T/Kh \sim 0$).

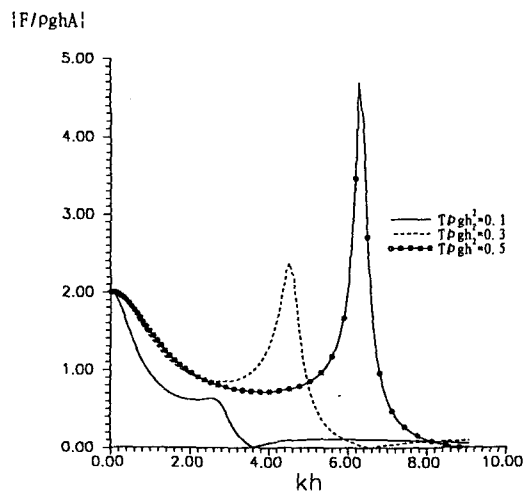


Fig. 4. Forces acting on membrane breakwater for various tensions ($d/h=1.0, \theta=0, \theta_o=45^\circ, T/Kh \sim 0$).

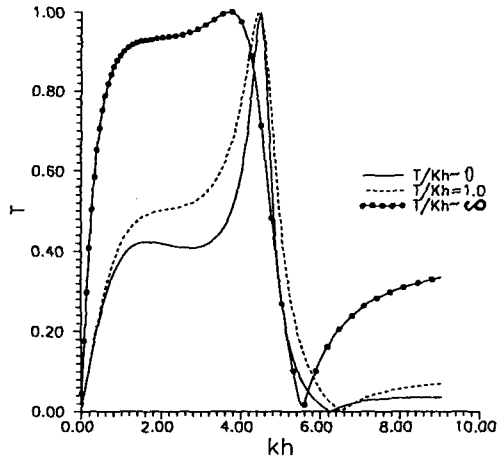


Fig. 5. Transmission coefficients of membrane breakwater for various stiffness ($d/h=1.0$, $\theta=0$, $\theta_0=45^\circ$, $T/\rho gh^2=0.3$).

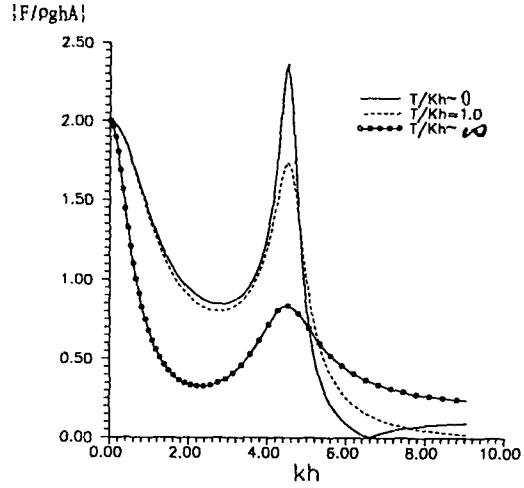


Fig. 7. Forces acting on membrane breakwater for various stiffness ($d/h=1.0$, $\theta=0$, $\theta_0=45^\circ$, $T/\rho gh^2=0.3$).

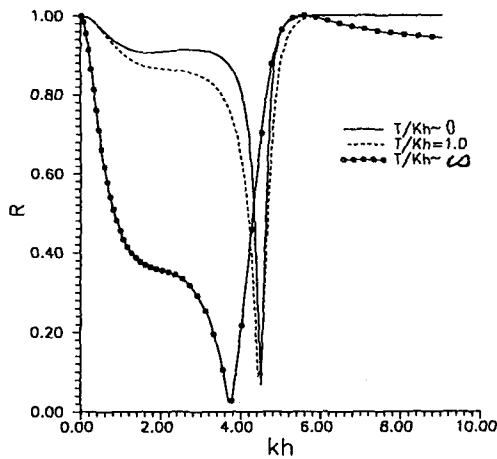


Fig. 6. Reflection coefficients of membrane breakwater for various stiffness ($d/h=1.0$, $\theta=0$, $\theta_0=45^\circ$, $T/\rho gh^2=0.3$).

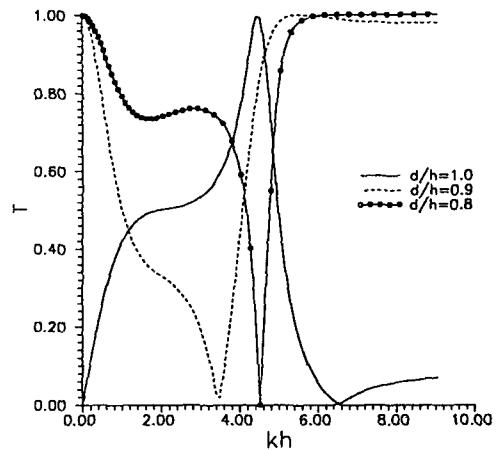


Fig. 8. Transmission coefficients of membrane breakwater for various heights ($T/Kh=1.0$, $\theta=0$, $\theta_0=45^\circ$, $T/\rho gh^2=0.3$).

수 있다. $T/\rho gh^2$ 가 0.3과 0.5인 경우 저주파수에서 반사율은 $T/\rho gh^2=0.1$ 인 경우와 비교하여 증가하지만 $kh=4.5$ 와 6.2 부근에서 반사율이 갑자기 떨어지는 것을 볼 수 있다. Fig. 4는 같은 조건에 대하여 유연막에 작용하는 동유체력을 계산하였다. 전반적으로 장력이 증가할수록 유연막에 작용하는 동유체력이 커지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5와 6은 장력 $T/\rho gh^2=0.3$ 일 때 계류사의 강성계수를 바꿔가면서 투과율과 반사율을 계산하였다. 여기서 $T/kh \sim \infty$ 는 강성계수가 아주 작은 경우로 이

때 부력재는 파도에 따라 자유롭게 움직인다. 비교적 저주파수 영역인 kh 가 4.0 이하에서 강성계수가 큰 경우가 작은 경우에 비하여 투과율은 작고 반사율은 큰 것을 볼 수 있다. 즉, 양끝단을 고정할 때 방파 성능은 상대적으로 우수하다는 사실을 알 수 있다. Fig. 7은 같은 조건하에서 유연막에 작용하는 동유체력을 그렸다. 고주파수 영역을 제외하곤 계류사의 강성계수가 증가할수록 유연막에 작용하는 동유체력이 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8, 9는 $T/\rho gh^2=0.3$, $T/kh=1.0$ 일 때 유연막의

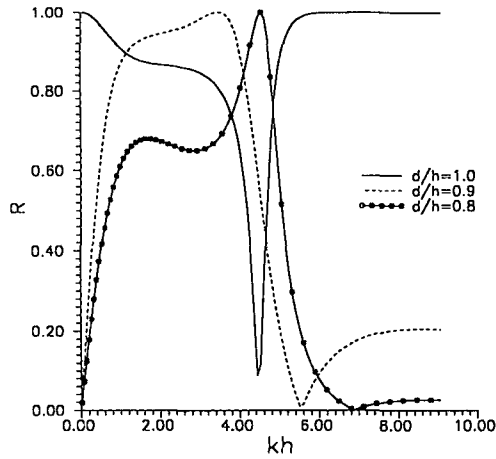


Fig. 9. Reflection coefficients of membrane breakwater for various heights ($T/Kh=1.0$, $\theta=0$, $\theta_0=45^\circ$, $T/\rho gh^2=0.3$).

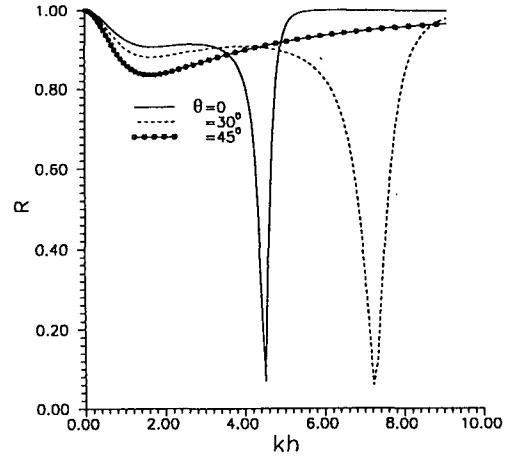


Fig. 11. Reflection coefficients of membrane breakwater for various incident angles ($T/Kh\sim 0$, $d/h=1.0$, $\theta_0=45^\circ$, $T/\rho gh^2=0.3$).

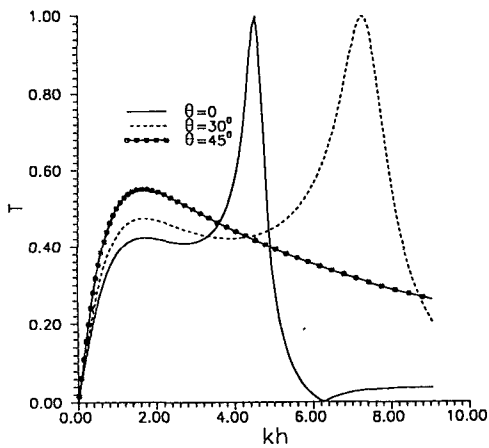


Fig. 10. Transmission coefficients of membrane breakwater for various incident angle ($T/Kh\sim 0$, $d/h=1.0$, $\theta_0=45^\circ$, $T/\rho gh^2=0.3$).

길이 변화에 따른 투과율과 반사율을 살펴보았다. 예상한 바와 같이 유연막의 길이가 길수록 투과율은 작고 반사율이 큰 것을 볼 수 있으며 이러한 경향은 고주파수 영역에서 뚜렷이 나타난다. 또한 kh 가 아주 작을 때 $d/h=1.0$ 인 경우 반사율 곡선은 1에 수렴하는 전반사가 일어나지만 $d/h=0.8, 0.9$ 일 때 반사율 곡선은 0에 접근한다. 즉, 입사파는 방파제를 통하여 모두 투과된다.

입사각 변화에 따른 투과율과 반사율은 Fig. 10과 11에 그렸다. 입사각도는 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 3가지 경우에

대하여 계산하였다. 이때 $T/\rho gh^2=0.3$ 이며 $d/h=1.0$ 이다. 강성계수는 무한대로 양끝단이 모두 고정된 경우를 살펴보았다. 입사각도가 45° 인 경우는 완만한 곡선을 보여주고 있고 전 주파수에 걸쳐서 입사파를 효과적으로 차단하고 있는 것을 볼 수 있다. 반면에 입사각도가 $0^\circ, 30^\circ$ 일 때 kh 가 4.5와 7.2 주위에서 투과율은 갑자기 커지고 반사율은 갑자기 떨어지는 경향을 볼 수 있다. 유연막 방파제에 의한 투과율과 반사율은 입사각도에 따라 큰 변화를 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 유연막이 설치될 해역의 주된 주파수 뿐만 아니라 입사각도를 파악하여 유연막을 배치하는 것이 필요하다.

이상의 수치계산 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

1) 유연막에 걸리는 장력이 커질수록 저주파수 영역에서는 효과적이지만 어느 특정한 주파수 주위에서는 방파성능이 갑자기 떨어지는 것을 알 수 있다. 또한 유연막에 작용하는 동유체력은 장력이 증가할수록 전반적으로 크다.

2) 계류사의 강성변화는 투과율과 반사율에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 특히 저주파수 영역에서 이러한 경향은 뚜렷하다. 저주파수 영역에서 강성계수가 큰 값을 갖는 양끝단이 고정된 경우가 강성계수가 작은 값을 갖는 부력재가 자유롭게 움직이는 경우에 비하여 방파성능이 우수하다. 이때 유연막에 작용하는 동유체력은 강성계수가 클수록 상

대적으로 큰 값을 갖는다.

3) 유연막 길이 변화에 따른 투과율과 반사율의 변화는 고주파수 영역에서 잘 나타나며, 유연막 길이가 길수록 투과율은 작고 반사율은 커지는 것을 볼 수 있다.

4) 투과율과 반사율은 입사각도 변화에 민감한 것을 알 수 있었다. 저주파수 영역에서는 미세한 차이만 입사각도가 증가할수록 반사율은 작아진다. 그러나 고주파수 영역에서는 곡선변화는 크지만 뚜렷한 경향이 나타나지 않고 유연막의 특성에 따라 변하는 것을 알 수 있었다.

5) 결론적으로 유연막 구조물을 적절히 이용한다면 특수한 용도의 방파제로 활용이 가능하다. 따라서 이 분야에 많은 연구가 이루어져야 하며 이를 위하여 수치해법과 모형시험이 뒷바침되어야 한다.

謝 辭

본 연구는 Texas A & M 대학과 공동으로 수행하고 있는 국제공동연구과제 (환경보전용 유연막 백구조 방파제 개발)의 일부임을 밝혀두고 연구비 지원기관에 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

- Bai, K.J., 1975. Diffraction of oblique waves by an infinite cylinder. *J. of Fluid Mech.*, **68**.
- Broderick, L.L. and Jenkins, C.H., 1993. Experimental investigation of fluid-filled membrane breakwaters, *J. WPCO, ASCE*, **119**.
- Kim, M.H. and Kee, S.T., 1994. Flexible membrane wave barrier, *9th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*.
- Kim, M.H. and Kee, S.T., 1994. Flexible membrane wave barrier, Part 1. Analytic and numerical solution, *J. WPCO, ASCE*, **120**.
- Meylan, M., 1994. A flexible vertical sheet in waves. *Proc. of the Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference*, **2**.
- Morse, P.M. and Feshbach, H., 1953. *Methods of theoretical physics*, McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Newman, J.N., 1994. Wave effects on deformable bodies, *9th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*.
- Ohyama, T., Tanaka, M., Kiyokawa, T., Uda, T. and Murai, Y., 1989. Transmission and reflection characteristics of waves over submerged flexible mound, *Coastal Engineering in Japan*, **32**.
- Williams, A.N., Geiger, P.T. and McDougal, W.G., 1991. Flexible floating breakwater, *J. WPCO, ASCE*, **117(5)**.