

論 文

## 과랑중 막 구조 방파제의 거동 특성

조 일 형\*

### On the Behavior of Membrane Breakwaters in Waves

I. H. Cho\*

Key Words : 막(Membrane), 방파제(Breakwater), 고유함수전개법(Eigen-function Expansion Method), 투과율(Transmission Coefficient), 그린함수(Green Function)

#### Abstract

The wave interaction with flexible membrane such as PVC and fabrics is studied to prove its applicability to portable breakwaters. To obtain the wave exciting force acting on flexible membrane, eigen-function expansion method is employed. The effect of flexible membrane is involved in body boundary condition, in which x-directional displacement of membrane is obtained by solving the linear membrane equation. Displacement of membrane is assumed to be small compared to wavelength, therefore the tensile force of membrane remains constant. As the numerical examples, transmission and reflection coefficients according to the change of tensile forces are investigated. The hydrodynamic force on membrane, the dynamic tension in the mooring lines and the vertical displacement profile of membrane are also calculated. It is suggested that the flexible membrane can be used to engineering material for the future coastal/ocean applications.

#### 1. 서 론

최근 PVC나 PU와 같은 화학섬유의 수명과 강도가 향상됨에 따라 이러한 섬유를 해안 및 해양공학 분야에 활용하는 연구가 몇몇 선진국에서 활발히 진행되고 있다. 적용가능한 분야로는 해안이나 해안시설물을 파도로 부터 보호하는 방파제를 들 수 있으며 선박이 좌초나 충돌시 유출되는 기름확산을 방지하는데 이용될 수 있다. 또한 준설공사나 간척사업시 세립토가 인접한 연안에

확산되는 것을 방지하는 오타방지막이 있다. 이러한 막구조물을 방파제로 이용할 때 장점들은 다음과 같다. 기존의 철이나 콘크리트 구조물과 같은 강체에 비하여 가격면에서 월등히 저렴하다. 또한 가볍기 때문에 다루기가 손쉬워 설치 및 이동이 용이하며 막은 강체에 비하여 유연성이 좋기 때문에 폭풍시 파손될 위험이 상대적으로 적다. 이와같은 장점들에도 불구하고 강체에 비하여 방파효과가 떨어진다면 활용하기가 어려울 것이다.

\* 한국기계연구원 선박해양공학연구센터

이와같은 문제는 유체와 구조물의 상호작용을 고려해야 하는 어려운 문제이므로 관련 연구의 대부분은 2차원 문제에 국한되어 있으며 주로 수치해법에 의존하고 있다. Williams(1991)는 강성을 갖는 플레이트 구조물이 파랑중 놓여 있을 때 플레이트에 작용하는 힘과 모우멘트를 살펴보고 플레이트의 거동을 계산하여 실험결과와 비교하였다. 경계적분법을 사용하여 유체영역을 다루었고 플레이트의 변형해석은 Green 함수법을 사용하였다. Meylan(1994)는 얇은 탄성판이 파랑중에 놓여있을 때 판의 잠긴 깊이 변화에 따라 투과율을 계산하였다. 이때 탄성판의 거동은 Bernoulli-Euler 방정식을 풀어 구하였다. 수면에 고정된 판은 파랑에너지를 반사시키며 판의 강성이 특별한 값을 갖을 때 공진이 발생하여 반사율이 급격히 줄어드는 것을 밝혔다. Kim(1994)는 파랑중 막구조 방파제의 거동특성을 다루었다. 해석방법은 경계요소법을 사용하였다. 그의 결과에 의하면 막구조물에 작용하는 장력이 어느 정도 이상이 되면 막구조물은 방파제로 활용이 가능하다고 결론을 내렸다.

본 연구에서는 막구조물을 방파제로 활용할 때 강체에 비하여 얼마나 방파능력이 있는가를 간단한 수학적모델을 사용하여 살펴보았다. 해석상의 어려움을 피하기 위하여 2차원 문제로 가정하였고 선형포텐셜이론을 사용하였다. 해석방법으로는 파랑에 의한 유체영역 경계치문제는 고유함수 전개법을 사용하였다. 이때 부족한 경계조건으로부터 생기는 미지수는 인접한 유체영역의 해과 정합하여 구하였다. 한편 막의 거동은 선형 막방정식을 풀어 구하였다. 수심이 h인 유한수심에 높이 d인 막구조물에 수직으로 파가 들어오는 문제를 계산모델로 삼았다(Fig. 1 참조). 이때 막의 두께는 무시하였고 막의 한끝단은 바닥에 고정되어 있으며 다른 한 끝단에 계류삭이 연결되어 있다. 계산으로 막구조물에 작용하는 장력이 변할 때의 투과율과 막에 작용하는 파랑하중과 막구조물의 변형을 살펴보았다.

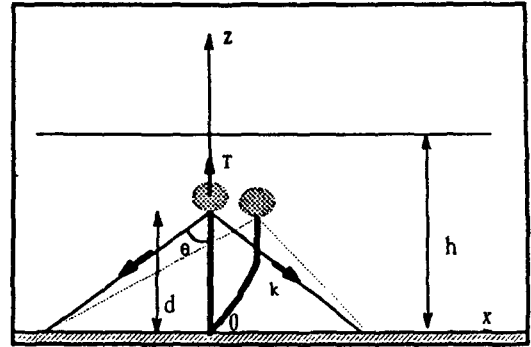


Fig. 1 Definition Sketch of Membrane Breakwater

## 2. 본 론

### 2.1 문제의 정식화

선형포텐셜이론에 입각하여 속도포텐셜을 도입하고 유동은 주파수  $\omega$ 를 갖고 조화운동을 한다면 속도포텐셜은  $\Phi = R[\phi(x, z)e^{-i\omega t}]$ 로 쓸 수 있다. 이때 유체영역은 막구조물에 의하여 두개로 분리되며 각 영역에서의 속도포텐셜은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi^1 = \frac{ig}{\omega} \sum_n [e^{k_n x} \delta_{n0} + a_n e^{-k_n x}] f_n(z) \dots\dots\dots (1)$$

$$\phi^2 = \frac{ig}{\omega} \sum_n b_n e^{k_n x} f_n(z) \dots\dots\dots (2)$$

여기서 고유함수  $f_n = \frac{\cos k_n z}{\cos k_n h}$ 이며, 고유치  $k_n$

은  $k_n \tan k_n h = \frac{\omega^2}{g}$ 을 만족한다. 미지수  $a_n, b_n$ 를 구하기 위하여 두 영역의 해를 정합시키자. 즉,  $0 < z < h, x=0$ 에서 법선방향의 속도는 같다. 이때 법선방향의 속도를  $u(z)$ 라 놓고  $u(z)$ 를 앞에서 구한 고유함수를 이용하여 전개시키자.

$$\frac{\partial \phi^1}{\partial x} = \frac{\partial \phi^2}{\partial x} = u(z) = \sum_{n=0} u_n f_n(z) \dots\dots\dots (3)$$

식(1)과 (2)를 윗식에 대입하여  $a_n$ 과  $b_n$ 를  $u_n$ 으로 표현하면 다음과 같다.

$$a_n = \delta_{n0} + \frac{i\omega}{g} \frac{u_n}{k_n}, \quad b_n = -\frac{i\omega}{g} \frac{u_n}{k_n} \quad \dots\dots (4)$$

윗식을 식(1)과 (2)에 대입하면 복소포텐셜  $\phi^1$ 과  $\phi^2$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi^1 = -\frac{ig}{\omega} \sum_n [(e^{k_n x} + e^{-k_n x})\delta_{n0} + \frac{i\omega}{g} \frac{u_n}{k_n} e^{-k_n x}] f_n(z) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\phi^2(x, z) = \sum_n \frac{u_n}{k_n} e^{k_n x} f_n(z) \quad \dots\dots\dots (6)$$

또한 막이 없는  $d < z < h$ 에서 각 영역의 속도포텐셜은 같아야 한다( $\phi^1 = \phi^2$ ).

$$-\frac{i\omega}{g} \sum_{n \neq 0} \frac{u_n}{k_n} f_n(z) = \sum_{n \neq 0} \delta_{n0} f_n(z) \quad \dots\dots\dots (7)$$

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

$$\sum_{n \neq 0} \frac{e_{nm}(d)}{k_n} = \frac{ig}{\omega} e_{0m}(d) \quad \dots\dots\dots (8)$$

여기서  $e_{nm}(d) = \int_d^h f_n(z) f_m(z) dz$ 이다. 다음은 막 구조물에서의 경계조건을 살펴보자. 막구조물이 놓여진  $0 < z < d$ ,  $x=0$ 에서 다음과 같은 경계조건을 만족한다.

$$\frac{\partial \phi^1}{\partial x} = \frac{\partial \phi^2}{\partial x} = \sum_{n \neq 0} u_n f_n(z) = -i\omega \xi \quad \dots\dots\dots (9)$$

여기서  $\xi(z)$ 는 막구조물의  $x$ 방향의 변위를 나타낸다.  $\xi(z)$ 가 충분히 작다면 부유체의 부력과 계류사의 수직방향 힘의 차이로 표현되는 장력  $T$ 는 일정하다. 이때  $\xi(z)$ 는 아래와 같은 막 방정식(Membrane Equation)을 만족한다.

$$\frac{d^2 \xi}{dz^2} + \lambda^2 \xi = \frac{i\omega}{T} \rho(\phi^2 - \phi^1) \quad \dots\dots\dots (10)$$

여기서  $\lambda = \omega \sqrt{\frac{m}{T}}$ 이며,  $m$ 은 막의 단위길이당 질량이다. 막구조물의 한끝단이 바닥에 고정되어 있는 경우 경계조건은  $\xi = 0$  at  $x=0$ 이다. 다른 한끝에 강성계수  $K$ 를 갖는 계류사가 연결되어 있을 때 경계조건은  $T \frac{d\xi}{dz} = -2K_s \sin^2 \theta \xi$ 이다.

여기서  $\theta$ 는 계류사와 막이 이루는 경사각도이다. 위에 주어진 경계치문제를 풀기 위하여 Green 함수법을 사용하였다. Green 함수는 아래와 같은 경계치 문제를 풀어 구한다.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 G}{dz^2} + \lambda^2 G &= \delta(z - z_0) \\ G &= 0 \text{ at } z=0 \\ T \frac{dG}{dz} &= -2K_s \sin^2 \theta G \text{ at } z=d \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

위에 주어진 경계치 문제의 해는 다음과 같다 (Morse & Feshbach).

$$\begin{aligned} G(z; Z_0) &= 2d \sum_{l=0}^{\infty} \frac{2\pi\beta_l}{2\pi\beta_l - \sin(2\pi\beta_l)} \\ &\times \frac{\sin(\pi\beta_l z_0/d) \sin(\pi\beta_l z/d)}{[(\lambda d)^2 - (\pi\beta_l)^2]} \quad \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

여기서  $\tan(\pi\beta_l) = -\lambda T/K_s$ 이다. 위의 Green 함수를 이용하여 막의 수평방향의 변위를 구하면 다음과 같다.

$$\xi(z) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{B_l}{\lambda^2 - \lambda_l^2} \sin \lambda_l z \quad \dots\dots\dots (13)$$

여기서

$$\begin{aligned} B_l &= \frac{2}{d} \frac{i\omega\rho}{T} \frac{2\pi\beta_l}{[2\pi\beta_l - \sin(2\pi\beta_l)]} \\ &\times \int_0^d (\phi^2 - \phi^1) \sin \lambda_l z \, dz \end{aligned}$$

여기서  $\lambda_l = \frac{\beta_l \pi}{d}$ 이다. 윗식을 식(9)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} u_n f_n(z) = -i\omega \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \sin \lambda_i$$

$$\times \frac{2i\omega\rho}{dT} \frac{2\pi\beta_i}{[2\pi\beta_i - \sin(2\pi\beta_i)]}$$

$$\times \int_0^d 2 \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \frac{u_n}{k_n} - \frac{ig}{\omega} \delta_{no} \right] f_n(z) \sin \lambda_i z \, dz$$

..... (14)

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

$$\sum_{n=0}^{\infty} [d_n \delta_{nm} - e_{nm}(d)] u_n =$$

$$\frac{4\rho\omega^2}{dT} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \frac{2\pi\beta_i}{[2\pi\beta_i - \sin(2\pi\beta_i)]}$$

$$\times S_{mi}(d) \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \frac{u_n}{k_n} - \frac{ig}{\omega} \delta_{no} \right] S_{ni}(d) \dots \dots (15)$$

여기서  $S_{ni} = \int_0^d f_n(z) \sin \lambda_i z \, dz$ 이다. 앞에서 유도 또한 식(8)과 윗식을 더하면 최종적으로 풀어야 할 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left[ \frac{e_{nm}(d)}{k_{nm}} + d_n \delta_{nm} - \frac{\chi_{nm}}{k_n} - e_{nm}(d) \right] u_n$$

$$= \frac{ig}{\omega} [e_{om}(d) - \chi_{om}(d)] \dots \dots \dots (16)$$

여기서

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

$$\times \frac{2\pi\beta_i}{2\pi\beta_i - \sin(2\pi\beta_i)} S_{mj}(d) S_{nj}(d)$$

이다. 위에 주어진 대수방정식을 풀어  $u_n$ 을 구하고 식(4)에 대입하여 미지수  $a_n$ 과  $b_n$ 을 구한다. 막에 작용하는 파랑하중은 Bernoulli방정식을 사용하여 구한다.

$$F = -i\omega\rho \int_0^d [\phi^2(0, z) - \phi(0, z)] dz \dots \dots (17)$$

막의 변형에 따른 계류삭에 작용하는 동적 하중은  $T=K\xi(d) \sin\theta$ 이다.

### 3. 계산결과 및 고찰

수치계산의 예로 높이가 d인 막의 한끝단이 중심 1m인 바닥에 고정되어 있고 다른 한끝단은 계류삭에 연결된 모델을 생각하였다. 이때 막에 걸리는 장력은 T이며 단위길이당 막의 질량은 0.921kg/m<sup>2</sup>이다. 계류삭의 강성계수  $K_s$ 는 800N/m로 잡았으며 계류삭의 경사각도는 45°로 고정시켰다. Fig. 2는 막에 걸리는 세가지 장력에 대하여 투과율을 보여주고 있다. 여기서 x축은 입사파의 파장과 수심의 비인 kh로 잡았고 y축의 값은 강체에서 멀리 떨어진 위치에서의 물체를 통과한 파의 진폭을 입사파의 진폭으로 나눈값의 절대값을 뜻한다. 그림에서 보듯이 장력이 작을수록 잠긴 깊이가 작을수록 투과율이 더욱 커지는 것을 볼 수 있으며 세가지 경우 모두 kh=1.5 부근에서 투과율이 가장 큰 것을 볼 수 있다. Fig. 3에 그린 반사율은 투과율과 반대의 경향을 보여주고 있다. 막의 고유진동수의 값은 상당히 크므로 계산영역은 이를 포함하고 있지 않다.

Fig. 4은 위와 같은 경우에 막에 작용하는 파랑하중을 보여주고 있다. 파랑하중은  $\rho gh A$ 로 무차원시켰다. 입사파가 장파일 때 Fig. 3에 보듯이 완전반사가 일어나 파랑하중은 2에 접근하는 것을 볼 수 있다. 입사파의 주파수가 증가할수록 막에 작용하는 파랑하중은 줄어든다. 또한 막에

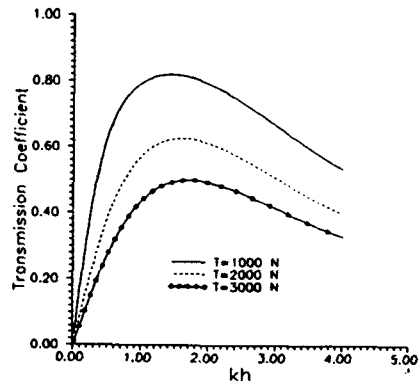


Fig. 2 Transmission Coefficient(d=h)

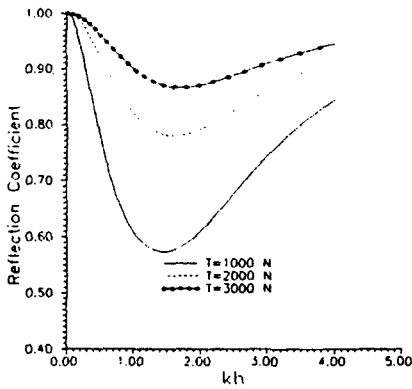


Fig. 3 Reflection Coefficient( $d=h$ )

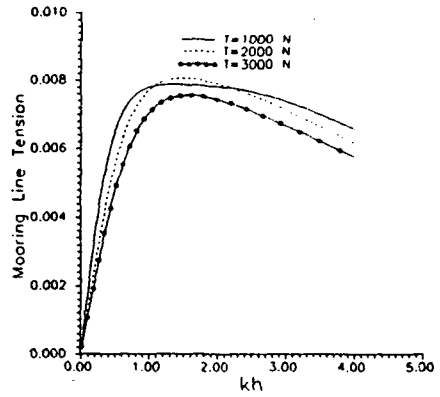


Fig. 5 Mooring Line Tension( $d=h$ )

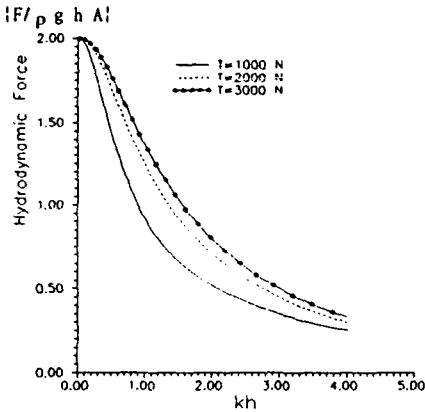


Fig. 4 Hydrodynamic Force on Membrane( $d=h$ )

작용하는 장력이 커질수록 파 강제력은 커진다. 이러한 사실로부터 유연한 물체일수록 같은 파에 대하여 파강제력이 줄어드는 사실을 알 수 있다. 이는 유연성이 있는 막 구조물이 강체에 비하여 유리하다는 사실을 증명하고 있다.

Fig. 5는 막이 운동을 할 때 계류삭에 걸리는 동적하중을 그렸다. 하중은  $\rho g h A$ 로 무차원 시켰다.  $kh=1.5$ 까지 동적하중은 증가하다가 그후로 완만히 줄어드는 것을 볼 수 있다. 다시 말하면  $kh$ 가 1.5까지 수면상에 있는 막의 한끝단의 거동은 급격히 증가하다가 입사파의 주파수가 더욱 커지면서 완만히 줄어든다.

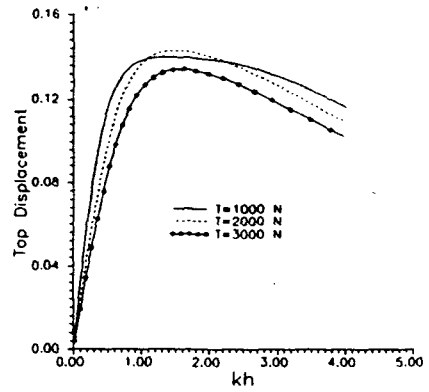


Fig. 6 Top Displacement( $d=h$ )

Fig. 7은 5개의 입사파의 주파수에 대하여 막의 거동특성을 그렸다. 여기서  $y$ 축은 막의 거동을 입사파의 진폭으로 나눈값의 절대값을 뜻한다. 막에 작용하는  $3000N/m$ 이다. 주파수가 클수록 막의 변위는 상대적으로 작으며 수면부에서의 거동이 큰 것을 알 수 있다. 진동수  $f$ 가  $0.2Hz$ 인 저주파수일 때 막의 형상은 중심부에서 최대값을 갖는 2차 포물선 형태를 유지하고 있다.

결론적으로 막구조물을 적절히 이용한다면 특수한 용도의 방파제로 활용이 가능하다. 또한 이 분야에 많은 연구가 이루어져야 하며 이를 위하여 수치해법과 모형시험이 뒷받침되어야 한다.

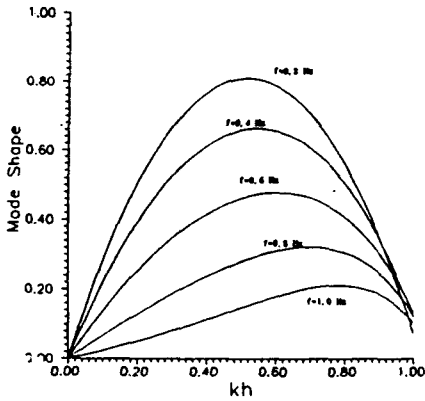


Fig. 7 Vertical Displacement( $d=h$ )

### 후 기

본 연구는 타이사 상사와 공동으로 수행하고 있는 중간핵심연구사업(선박장착용 누유확산방지 장비 개발)의 일부임을 밝혀둔다.

### 참고문헌

- 1) Broderick, L.L. & Jenkins, C.H.(1993) "Experimental Investigation of Fluid-filled Membrane Breakwaters" ASCE Journal WPCO, Vol. 119 No. 6.
- 2) Kim, M.H. & Kee, S.T.(1994) "Flexible Membrane Wave Barrier" 9th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies.
- 3) Meylan, M. (1994) "A Flexible Vertical Sheet in Waves" Proc. of the Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 2.
- 4) Morse, P.M. & Feshbach, H. (1953) "Methods of Theoretical Physics" McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC.
- 5) Newman, J.N.(1994) "Wave Effects on Deformable Bodies" 9th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies.
- 6) Williams, A.N., Geiger, P.T., Mcdougal, W.G.(1991) "Flexible Floating Breakwater" ASCE Journal WPCO, Vol. 117, No. 5.