

파랑중 막구조 방파제의 방파능력에 관한 연구

조 일 형*

1. 서 론

최근 PVC나 PU와 같은 화학섬유의 수명과 강도가 향상됨에 따라 이러한 섬유를 해안 및 해양공학에 활용하는 연구가 몇몇 선진국에서 활발히 진행되고 있다. 활용가능한 분야로는 해안이나 해안시설물을 파도로 부터 보호하는 방파제를 들 수 있으며 선박이 좌초나 충돌시 유출되는 기름확산을 방지하는데 이용될 수 있다. 이러한 막구조물의 장점은 기존의 철이나 콘크리트 구조물과 같은 강체에 비하여 가격면에서 월등히 저렴하다. 또한 가볍기 때문에 다루기가 손쉬워 설치 및 이동이 용이하며 막구조물은 강체에 비하여 유연성이 좋기 때문에 폭풍시 파손될 위험이 상대적으로 적다. 이와같은 장점들에도 불구하고 막구조물을 방파제로 이용할 때 강체에 비하여 방파효과가 떨어진다면 활용하기가 어려울 것이다.

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 고유함수 전개법을 사용하였다. 이때 막구조물의 변형이 유체장에 미치는 영향은 경계조건을 사용하여 고려하였으며, 이때 경계조건식에서 막구조의 x방향의 변위는 선형 막 방정식(Membrane Equation)을 풀어 구한다. 막의 변위는 파장에 비하여 작다고 가정하였다. 따라서 막에 걸리는 장력은 일정하다. 막 방정식내에서 막구조의 변위는 파의 속도포텐셜과 결합되어 파랑에 의한 막구조의 변형은 다시 파동장에 영향을 준다. 수심이 h인 유한수심에 깊이 d 만큼 잠겨있는 막구조물에 수직으로 파가 들어오는 문제를 계산모델로 삼았다(Fig.1 참조). 이때 방파제의 두께는 무시하였다. 계산예로 파랑중 강체가 놓여 있는 경우와 막구조물이 놓여 있는 경우에 파의 투과율을 비교하였다. 또한 막구조물에 작용하는 장력이 변할 때의 방파능력과 막구조물의 변형을 살펴보았다.

2. 문제의 정식화

선형포텐셜이론에 입각하여 속도포텐셜을 도입하고 유동은 주파수 ω 를 갖고 조화운동을 한다면 속도포텐셜은 $\phi(x,z,t) = \text{Re}[\phi(x,z)e^{-i\omega t}]$ 로 쓸 수 있다. 이때 유체영역은 막구조물에 의하여 두개로 분리되며 각 영역에서의 복소포텐셜 ϕ^1, ϕ^2 는 다음과 같이 표현된다.

$$\phi^1 = \frac{ig}{\omega} \sum_n [e^{kx} \delta_{no} + a_n e^{-kx}] f_n(z), \quad (1)$$

$$\phi^2 = \frac{ig}{\omega} \sum_n b_n e^{kx} f_n(z), \quad (2)$$

* 韓國機械硏究員 船舶・海洋工學硏究센터 (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering)

여기서 고유함수 $f_n = \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h}$ 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, $-h < z < 0$, $x=0$ 에서 법선 방향의 속도는 같다. 이때 법선방향의 속도를 $u(z)$ 라 놓고 $u(z)$ 를 앞에서 구한 고유함수를 이용하여 전개시킨다.

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

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

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

위식을 식(1)과 (2)에 대입하면 복소포텐셜 ϕ^1 과 ϕ^2 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

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

$-h < z < -d$, $x=0$ 에서 각 영역의 속도포텐셜은 같아야 한다 ($\phi^1 = \phi^2$).

$$-\frac{i\omega}{g} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{u_n}{k_n} f_n(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \delta_{n0} f_n(z). \quad (6)$$

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

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{e_{nm}(d)}{k_n} = \frac{ig}{\omega} e_{0m}(d), \quad (7)$$

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

$$\frac{\partial \phi^1}{\partial x} = \frac{\partial \phi^2}{\partial x} = \sum_{n=0}^{\infty} u_n f_n(z) = -i\omega \xi, \quad (8)$$

여기서 $\xi(z)$ 은 막구조물의 x 방향의 변위를 나타낸다. $\xi(z)$ 가 충분히 작다면 막구조에 걸리는 장력 T 는 일정하다. 이때 $\xi(z)$ 은 아래와 같은 막 방정식(Membrane Equation)을 만족한다.

$$-\frac{d^2 \xi}{dz^2} + \lambda^2 \xi = -\frac{i\omega}{T} \rho (\phi^2 - \phi^1), \quad (9)$$

여기서 $\lambda = \omega \sqrt{\frac{m}{T}}$ 이며, m 은 막구조의 단위길이당 질량이며 T 는 막에 걸리는 장력을 나타

낸다. 막구조의 양끝단이 고정되어 있는 경우 경계조건은 $\xi=0$ at $x=0, -d$ 이다. 경계조건과 지배방정식(9)를 풀면 $\xi(z)$ 는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\xi(z) = \sum_{j=1} \frac{B_j}{\lambda^2 - \lambda_j^2} \sin \lambda_j(z+d), \quad (10)$$

여기서 $\lambda_j = \frac{j\pi}{d}$ 이며 $B_j = \frac{2}{d} \frac{i\omega\rho}{T} \int_{-d}^0 (\phi^2 - \phi^1) \sin \lambda_j(z+d) dz$ 이다. 윗식을 식(8)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\sum_{n=0} u_n f_n(z) = -i\omega \sum_{j=1} \frac{1}{\lambda^2 - \lambda_j^2} \sin \lambda_j(z+d) \frac{i\omega\rho}{dT} \int_{-d}^0 \sum_{n=0} [\frac{u_n}{k_n} - \frac{ig}{\omega} \delta_{m0}] f_n(z). \quad (11)$$

윗식의 양변에 $f_m(z)$ 을 곱한뒤 $-d$ 부터 0 까지 적분하면 윗식은 다음과 같이 바뀐다.

$$\sum_{n=0} [\delta_{nm} - e_{nm}(d)] u_n = \frac{4\rho\omega^2}{dT} \sum_{j=1} \frac{1}{\lambda^2 - \lambda_j^2} S_{mj}(d) \sum_{n=0} [\frac{u_n}{k_n} - \frac{ig}{\omega} \delta_{m0}] S_{nj}(d), \quad (12)$$

여기서 $S_{nj} = \int_{-d}^0 f_n(z) \sin \lambda_j(z+d) dz$ 이다. 앞에서 유도한 식(7)과 윗식을 더하면 최종적으로 풀어야 할 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{n=0} [\frac{e_{nm}(d)}{k_n} + \delta_{nm} - \frac{\chi_{nm}(d)}{k_n} - e_{nm}(d)] u_n = \frac{ig}{\omega} [e_{0m}(d) - \chi_{0m}(d)], \quad (13)$$

여기서 $\chi_{nm}(d) = \frac{4\rho\omega^2}{dT} \sum_{j=1} \frac{1}{\lambda^2 - \lambda_j^2} S_{mj}(d) S_{nj}(d)$ 이다. 위에 주어진 대수방정식을 풀어 u_n 을 구하고 식(4)에 대입하여 미지수 a_n 과 b_n 을 구한다.

3. 계산결과 및 고찰

수치계산의 예로 양끝단이 고정된 막구조 방파체가 깊이 d 만큼 잠겨있다고 생각하였다. 이때 막에 걸리는 장력은 T 이며 단위길이당 막의 질량은 0.921 kg/m^2 이다. Fig.2 는 세가지 잠긴깊이에 대하여 투과율을 보여주고 있다. 여기서 x 축은 입사파의 파장과 수심의 비인 kh 로 잡았고 y 축의 값은 강체에서 멀리 떨어진 위치에서의 물체를 통과한 파의 진폭을 입사파의 진폭으로 나눈값의 절대값을 뜻한다. 그림에서 보듯이 잠긴 깊이가 작을수록 투과율이 더욱 커지는 것을 볼 수 있으며 입사파의 파장이 클수록 투과율은 더욱 커진다.

Fig.3은 강체와 막구조물의 투과율 차이를 보여주고 있다. 또한 막에 작용하는 장력을 변화시키면서 투과율의 차이를 살펴보았다. 이때 d/h 는 0.5이다. 막에 걸리는 장력이 커질수록 투과율이 감소하며 점점 강체의 계산결과에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이는 장력의 커질수록 막의 변형율이 작아져 막의 변형에 의한 파의 생성이 줄어들기 때문이다.

Fig.4는 막구조물의 양끝단이 수면과 바닥에 있는 경우이다. 즉, $d/h=1.0$ 일 때 투과율을 장력변화에 따라 그렸다. 입사파의 주파수가 작을 때 파는 막구조물을 가진시키지 못하므로 막구조물 뒤쪽으로 파는 전달되지 못하며 주파수가 증가하면서 장력이 100 N인 경우 막구조물의 운동에 의하여 막구조의 뒤쪽의 파형이 커진다. 그러나 이러한 경우 막구조의 변형을 살펴보면 상당히 크므로 본문에서 가정한 선형이론에 위배된다. 또한 막 구조물의 재질에 의한 감쇠와 점성에 의한 감쇠효과를 고려하면 투과율은 Fig.4의 수치결과보다는 작으리라 예상된다. 장력이 커질수록 투과율은 상대적으로 줄어드는 것을 볼 수 있다.

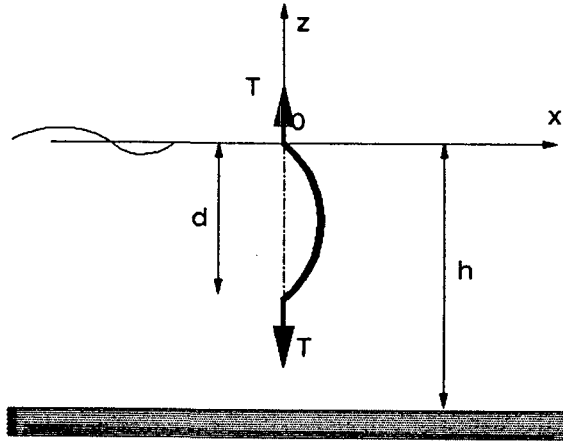


Fig.1 Definition Scketch of Flexible Membrane

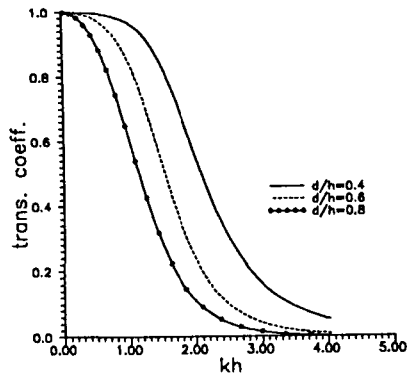


Fig.2 transmission coefficient for rigid body versus incident wave frequency

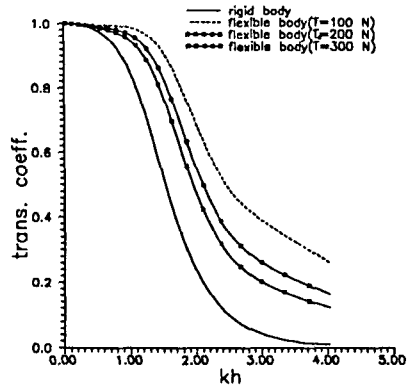


Fig.3 Transmission Coefficient for Flexible Body according to Change of Tension (density=0.921 kg/m², d/h=0.5)

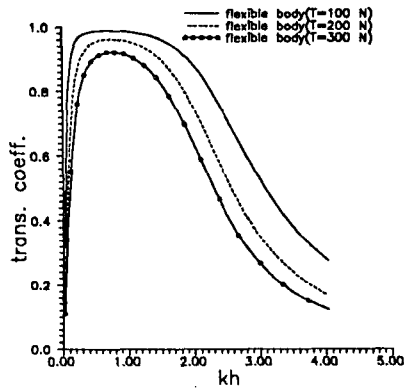


Fig.4 Transmission Coefficient for Flexible Body according to Change of Tension (density=0.921 kg/m², d/h=1.0)