

연직 막체방파제의 변동 막체장력을 고려한 준 비선형 수치해석 A Quasi-nonlinear Numerical Analysis Considering the Variable Membrane Tension of Vertical Membrane Breakwaters

전인식* · 김선신* · 박현주**

In Sik Chun*, Sun Sin Kim* and Hyun Joo Park**

요 지 : 연직 막체방파제에 대한 기존의 수치해석에서는 막체의 운동 중 발생하는 변동장력성분이 초기장력에 비하여 미미하다는 가정 하에 운동 중의 막체 장력을 초기장력으로 대체하는 선형해석을 수행하였다. 본 수치해석에서는 막체장력의 비선형 변화를 한 주기 동안의 평균장력으로 대체하며 이 평균장력을 반복계산을 통하여 구해나가는 준 비선형 해석을 수행하였다. 상기 선형해석 결과와 비교하여 입사파 주기가 증가할수록 반사율은 증가하며 전달율은 감소하는 것으로 나타났다. 아울러, 본 준 비선형해석을 계류형태를 달리하는 두 구조물에 적용한 결과, 막체의 수평변위의 제어가 방파성능에 밀접한 효과가 있는 것으로 나타났다. 막체의 수평변위를 억제하기 위해서는 막체의 초기장력을 증가시키거나 막체의 중간부에 계류라인을 추가 결속시키는 방법들이 있으나 이를 위해서는 연직 하향 계류력을 지지하기 위한 대형 수면 부표의 설치가 요구된다.

핵심용어 : 경계요소법, 막체방파제, 막체장력, 계류라인, 반사율, 전달율, 수면부표

Abstract : The existing numerical methods on the vertical membrane breakwater have employed a linear analysis where the variable membrane tension occurring during membrane motions is assumed to be very negligible compared to the initial tension. In the present study, a quasi-nonlinear analysis is attempted such that the temporary tension of the membrane is substituted by the average tension for a wave period that is sought by an iterative calculation. The results showed that with the increase of the wave period the reflection coefficients appeared larger and the transmission coefficients smaller compared to the results of the linear analysis. The application of the quasi-nonlinear analysis also showed that the performance of the structure is closely dependent on the horizontal deformation of the membrane. In order to suppress the horizontal deformation, it may be required to take the larger initial tension of the membrane or to put additional mooring lines in the middle of the vertical faces of the membrane. But for these methods to be effective, a largely sized surface float should be installed to secure enough buoyancy to support such downward forces.

Keywords: Boundary element method, membrane breakwater, membrane tension, mooring line, reflection coefficient, transmission coefficient, surface float

1. 서 론

막체를 이용한 항만구조물은 콘크리트를 사용하여 주로 중력에 의하여 외력에 저항하는 전통적 항만구조물의 범례에서 벗어나 성능이 우수한 최첨단 고강도 섬유와 완충장치 등의 기계장치를 결합하여 외력에 저항하는 새로

운 발상의 전환을 모색하는 것이다(Fig. 1). 약 3.5 GPa의 인장강도를 가지며 강철선보다 강한 고강력 폴리에틸렌 계열의 슈퍼섬유(한국섬유산업연합회, 2007)로 만든 막체 및 계류라인은 기존의 오타방지막이나 오일펜스에 사용되던 소재들과는 달리 외력에 대한 충분한 저항력을 발휘할 수 있다. 실제로 일본의 Mitsubishi(2004)에서는 화성

*건국대학교 토목공학과(Correspond author: In Sik Chun, Department of Civil Engineering, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Kwangjin-ku, Seoul, Korea 143-701. ischun@konkuk.ac.kr)

**신구대학 건설정보과(Department of Construction Information, Shingu University)

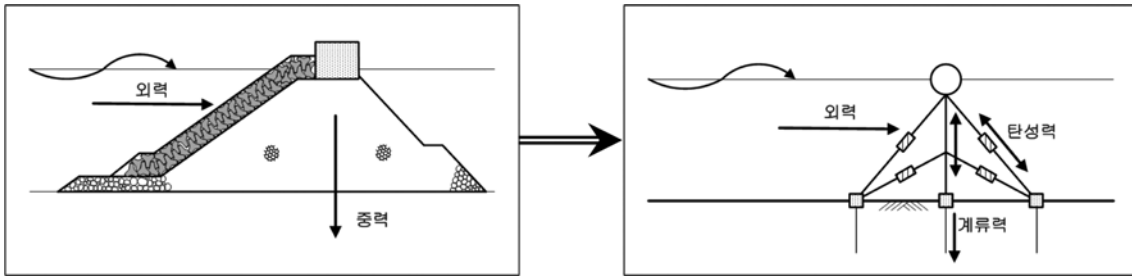


Fig. 1. Transfer from concrete structures of gravity type to membrane tension structures with high strength.

탐사선 Spirit호의 착륙선 완충장치에 사용되었던 소재를 사용하여 해일을 방지할 수 있는 막체방파제를 개발한 바 있다.

연직 막체방파제는 수면에 위치한 부이에 막체가 연직으로 연결되어 있으며 부이 또는 막체의 변위를 소정의 계류라인으로 억제하는 방파제 형태이다. 파랑의 작용에 의하여 막체는 그 재료특성에 따라서 자체 변위를 발생 시킴으로써 접근 파랑의 에너지를 흡수하며 부분적인 파 반사 및 투과를 허용한다. 이 방파제 형태는 형태 상 오탁방지막 및 오일펜스와 유사하나 본격적인 방파제 형태로서 시공된 예는 없다. 관련연구로서는 Thompson et al. (1991), Williams et al.(1992), Wang and Len(1993), Kee and Kim(1997), Lo(1998), Williams and Wang(2003) 등의 연구가 있으며 대부분이 비교적 경미한 입사파랑 및 막체변위에 대한 반사율과 전달율의 수치해석적 예측에 초점이 맞추어져 있다. 국내 연구로서는 조일형 등(1997)이 선형유탄성 이론을 이용하여 수평 유연막의 파랑제어효과를 고찰하였으며, 기성태(2002)와 Kee(2005)는 수평-수직 유연막으로 구성된 수중 유연막 방파제에 대한 연구를 수행한 바 있다.

막체방파제의 파랑제어 특성은 접근파랑에 대한 막체의 변위에 크게 의존한다. 이와 같은 속성은 수치해석에서 막체 위치에서의 경계조건에 해당하는 동역학적 방정식을 어떻게 설정하는가에 따라서 달라진다. 기존의 연구들에서는 파랑에 의한 막체의 변동장력이 초기장력보다 매우 작다고 가정하고 동역학적 방정식을 선형화해서 사용하였다. 그러나, 일반적으로 막체의 초기장력은 수면 부이의 부력 및 계류장력의 연직성분 등에 의하여 제한적으로 결정되기 때문에 접근파랑이 매우 경미한 경우를 제외하고는 변동장력을 크게 상회한다고 보기가 어렵다.

본 연구에서는 막체방파제의 실패역 설치를 염두에 두고 막체의 변위 및 변동장력이 비교적 크게 발생하는 일

반적인 경우에 대하여 막체방파제의 파랑제어 특성 및 거동을 주파수 영역에서의 경계요소법을 적용하여 해석하였다. 본 방법의 특성 상 막체의 비선형 변위 및 변동장력을 시간영역에서 추적하는 것이 불가하기 때문에 여기에서는 변동장력의 진폭을 한 주기 평균값을 사용하는 준 비선형 해석기법을 수립하였다. 아울러, 임의 실패역 조건을 설정한 후 본 해석기법을 적용하여 막체방파제의 실패역 적용성을 검토하였다.

2. 경계요소법의 적용

Fig. 2에서와 같이 유체영역을 설정한다. 원형 부이에 연직 막체 DE 또는 FG가 설치되어 있으며 부이 양쪽으로 계류라인이 설치되어 있다. 부이의 양쪽으로 영역 II와 III을 각각 설정한다. 영역 I은 입사파와 반사파가 중첩되어 있으며 파동장이 이론적 식으로 표현되는 영역이며 영역 IV는 투과파의 이론적 식이 지배하는 영역이다.

경계요소법은 영역 II, III에 적용되는 것이며 경계면 AB와 JI는 경계요소의 각 절점에서의 변수들을 이론적 파동장에 연결하는 일종의 정합경계이다. 좌표계(x,z)의 원점은 원형 부이에서 중심을 통과하는 연직축과 정수면이 만나는 교점으로 취한다.

입사파 진폭 ζ_0 와 각 주파수 σ 를 갖는 파동장에서의 속

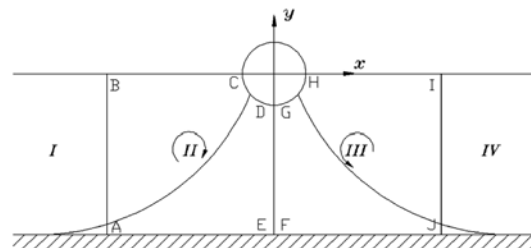


Fig. 2. Fluid domains in the boundary element method.

도포텐셜을

$$\Phi(x, z; i) = -\frac{\hat{i}g\zeta_0}{\sigma}\phi(x, z)e^{-i\sigma} \quad (1)$$

라고 정의할 때(g : 중력가속도, $\hat{i} = \sqrt{-1}$), 영역 II, III에서의 미지수 ϕ 또는 이의 법선미분치 $\bar{\phi}$ 를 구하기 위한 경계요소 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{2\pi}\alpha(i)\phi(i) = \sum_{j=1}^{N_T} G_{ij}\bar{\phi}(j) - \sum_{j=1}^{N_T} H_{ij}\phi(j) \quad (2)$$

여기서, i =field point, j =source point, $\alpha(i)=i$ 절점에서의 내각, G_{ij} =Green 함수, H_{ij} =Green 함수의 법선미분치, N_T =영역 내 총 절점수이다.

경계 AB와 JJ에서의 경계조건으로서 유속과 압력의 연속성을 고려하였으며, 수면 부이에서는 다음과 같은 운동학적 경계조건을 사용하였다.

$$\bar{\phi} = \frac{\sigma^2}{g\zeta_0}[n_x X + n_z Z - \{(\bar{x} - \bar{x}_o)n_x - (\bar{z} - \bar{z}_o)n_z\}\psi] \quad (3)$$

여기서, (\bar{x}, \bar{z}) =부이 표면 경계요소의 절점, (\bar{x}_o, \bar{z}_o) =부이 무게중심, (X, Z, ψ) =부이의 3자유도 변위인 좌우요(sway), 상하요(heave), 종요(roll)의 진폭, (n_x, n_z) =부이 표면에서의 외향법선벡터, ζ_0 =입사파랑의 진폭이다.

부이변위는 다음과 같은 부유체 운동에 대한 동력학적 방정식을 풀어 결정할 수 있다.

$$M_k \frac{d^2 x_k}{dt^2} = E_k + R_k + \left(\sum_{i=1}^n F_k^{(i)} \right) + Q_k \quad (4)$$

여기서, k =부체변위 모드(sway, heave, roll), $M_k=k$ 모드의 질량 매트릭스, $x_k=k$ 모드의 변위이다.

E_k 는 k 모드에서 파의 작용에 의한 파랑력 및 모멘트로서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_x = \int_S p n_x = \rho g \zeta_0 e^{-i\sigma} \int_S \phi(x, z) n_x dS \quad (5)$$

$$E_z = \int_S p n_z = \rho g \zeta_0 e^{-i\sigma} \int_S \phi(x, z) n_z dS \quad (6)$$

$$E_\phi = \int_S [p n_x (\bar{z} - \bar{z}_o) - p n_z (\bar{x} - \bar{x}_o)] dS \\ = \rho g \zeta_0 e^{-i\sigma} \int_S \phi(x, z) \{n_x (\bar{z} - \bar{z}_o) - n_z (\bar{x} - \bar{x}_o)\} dS \quad (7)$$

R_k 는 부유체가 운동하는 중 발생하는 정수압에 의한 복원력이다. 침수단면의 수면 폭을 $2l_w$ 라고 하면

$$R_x = 0 \quad (8)$$

$$R_z = -2\rho g l_w Z e^{-i\sigma} \quad (9)$$

$$R_\phi = -\rho g V_s \left\{ \frac{2l_w^3}{3V_s} - (\bar{z}_o - z_b) \right\} \psi e^{-i\sigma} \quad (10)$$

와 같다. 여기서, V_s 는 침수부피(단위길이 당)이다. 식 (10)의 괄호안의 값은 무게중심과 경심사이의 거리(경심고)를 의미하며 무게중심이 부심보다 위에 위치하는 경우에 해당된다. z_b 는 부심의 연직좌표이다.

$F_x^{(i)}$, $F_z^{(i)}$ 그리고 $M_\psi^{(i)}$ 는 부체의 계류력 및 모멘트(부체의 단위폭 당)이며 상첨자는 i 번째 계류라인의 구속력을 의미한다. 여기서, 계류방식은 탄성계류를 채택하는 것으로 하였으며 부체 전체에 작용하는 계류력은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^n F_x^{(i)} = (K_{xx}X + K_{xz}Z + K_{x\psi}\psi)e^{-i\sigma} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n F_z^{(i)} = (K_{zx}X + K_{zz}Z + K_{z\psi}\psi)e^{-i\sigma} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n M_\psi^{(i)} = (K_{\psi x}X + K_{\psi z}Z + K_{\psi\psi}\psi)e^{-i\sigma} \quad (13)$$

여기서, K 는 부체에 연결된 계류라인과 연직 막체로 구성된 계류계의 강성매트릭스이며 각 계류요소의 시점과 종점의 좌표, 부체 무게중심의 좌표, 그리고 계류요소의 탄성계수(막체의 경우 Young 계수)등을 이용하여 구성할 수 있다(부록 A 참조). 계류라인의 계류력에 대해서는 부체의 단위길이 당 작용하는 힘으로 환산하여 사용하였다.

3. 막체경계조건

막체경계조건은 운동학적 경계조건과 동력학적 경계조건으로 구성된다. 먼저 운동학적 경계조건은 막체에서의 수평속도와 막체의 수평속도가 동일함을 규정하는 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서는 막체의 모든 요소 및 절점이 수평방향(x 방향)으로만 운동하는 것으로 가정하기로 한다.

$$\bar{\phi}_{II} = \frac{\sigma^2}{g\zeta_0} \xi_j \quad (14)$$

ξ_j 는 다음과 같은 j 번째 요소의 막체변위 X_j 의 진폭을 의미한다.

$$X_j = \xi_j e^{-i\sigma} \quad (15)$$

Fig. 3에서와 같이 막체를 단위폭 당 단위길이 당 질량

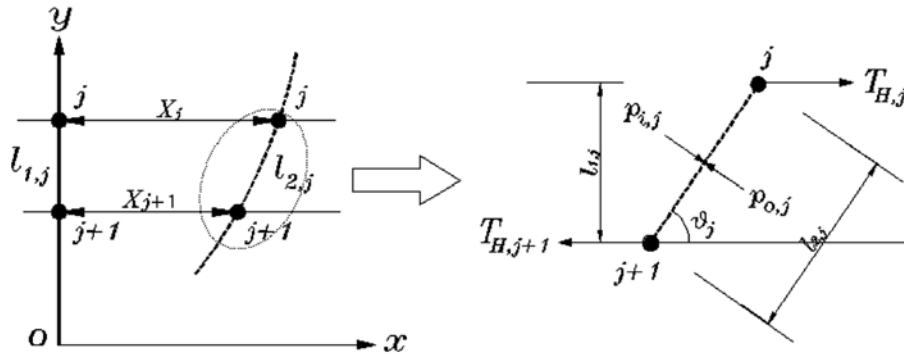


Fig. 3. Dynamic equilibrium of membrane displacement.

이 m_s (막체의 밀도 \times 두께)인 일종의 string으로 간주하면 j 요소에서의 동역학적 경계조건을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_s \frac{\partial X_j}{\partial t} = \frac{1}{l_{1,j}} \left(\frac{T_j}{l_{2,j}} \right) (X_{j+1} - 2X_j + X_{j-1}) + (p_{L,j} - p_{R,j}) + K_{s,m} X_j \quad (16)$$

여기서, X_j =막체의 j 요소의 수평변위, T_j = j 요소의 장력, $l_{1,j}$ = j 요소의 초기길이, $l_{2,j}$ =운동 중 j 요소의 길이, $p_{L,j}$, $p_{R,j}$ =막체의 좌, 우측에 작용하는 동수압이다. $K_{s,m}$ 은 j 노드에 결속된 중간 계류라인의 강성 매트릭스를 의미하며 여기에서는 막체가 수평방향(x방향)으로만 운동한다고 가정하고 이 방향의 성분만을 고려하였다(계류라인에서의 K_{xx} 와 동일 성격임).

식 (16)에서 T_j 는 초기장력 $T_{o,j}$ 와 운동 중 발생하는 변동장력 성분 T'_j 으로 구성된다. 즉,

$$T_j = T_{o,j} + T'_j \quad (17)$$

식 (17)에서 $T_{o,j} \gg T'_j$ 으로 가정하고 식 (16)에서 파압항을 제외하면

$$m_s \frac{\partial X_j}{\partial t} = T_{o,j} \frac{\partial^2 X_j}{\partial^2 y} \quad (18)$$

가 되어 string의 자유진동에 대한 선형 파동방정식과 일치한다. 이와 같이, 파랑의 작용에 의한 막체의 변위가 작으며 따라서 변동장력이 초기장력 $T_{o,j}$ 보다 매우 작다고 가정하면 식 (16)은

$$-\lambda^2 \xi_j = \frac{T_{o,j}}{l_{1,j}} (\xi_{j+1} - 2\xi_j + \xi_{j-1}) + \rho_w g \zeta_o (\phi_{R,j} - \phi_{L,j}) + K_{s,m} \xi_j \quad (19)$$

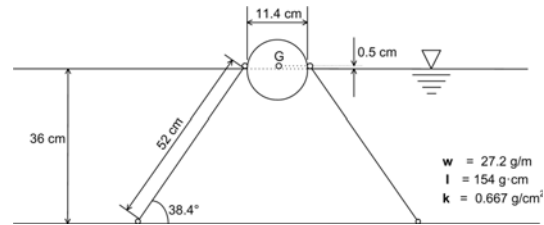


Fig. 4. Experimental scheme (Yamamoto and Yoshida, 1978).

과 같이 된다. 여기서, $\lambda = \sigma \sqrt{m_s}$ 이다.

본 수치해석의 정확성을 파악하기 위하여 계산결과를 기존의 실험결과와 비교, 검토하였다. 먼저, Fig. 4에서와 같이 부이와 계류라인으로만 구성되어 있는 실험모형에 대하여 투과율, 그리고 부이의 좌우요(sway)와 상하요(heave) 운동진폭을 계산한 후 실험결과(Yamamoto and Yoshida, 1978)와 비교하였다. 그림에서 w 와 l 는 부체의 단위길이 당 질량과 질량관성모멘트, 그리고 k 는 계류라인의 탄성계수(단위길이 당 환산)를 의미한다.

Fig. 5~Fig. 7에서 보이는 바와 같이 전반적으로 계산결과와 실험결과들의 일치정도가 매우 양호한 것으로 나타났다. 그림에서 D 와 L 은 각각 부이의 직경과 입사파 파장을 의미한다. 본 비교에서 반사율과 횡요(roll)에 대해서는 실험결과가 가용치 않아 비교대상에서 제외하였다.

부이에 막체가 부착되어 있는 경우에 대해서는 Kee and Kim(1997)의 실험결과를 이용하였다. 대상 모형 구조물은 Fig. 8과 같으며 이차원 수조에서 구조물의 전후에 공히 길이 86 cm인 부이 양단에 1개씩 계류라인을 설치한 형태이다.

계류라인의 탄성계수와 초기장력은 모형구조물의 단위 길이 당 값들로 환산하여 적용하였으며 초기장력에 대해

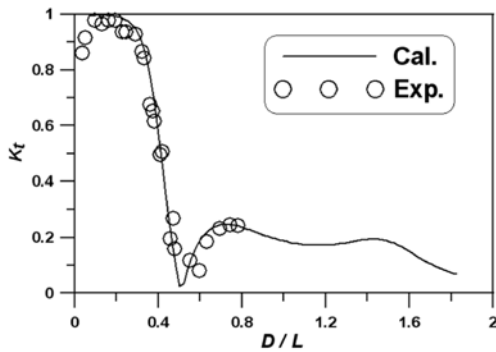


Fig. 5. Comparison of transmission coefficient.

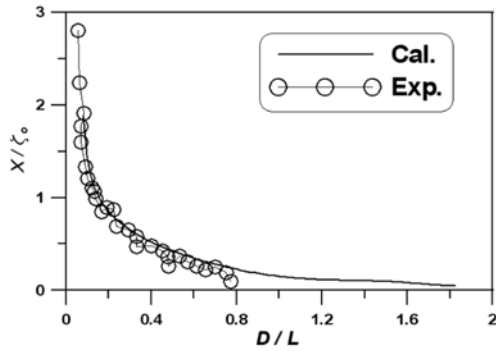


Fig. 6. Comparison of sway.

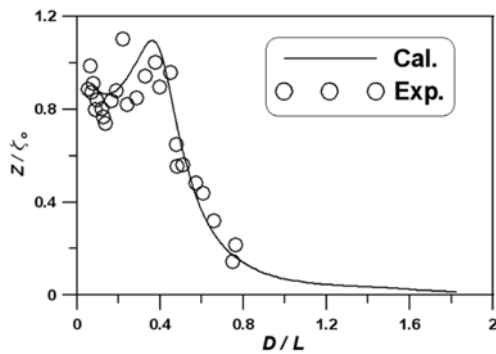


Fig. 7. Comparison of heave.

서는 동 문헌에서 기술한 입력조건 2배에 해당하는 6.63 kg(계류라인 당 3.315 kg)을 적용하여 계산을 수행하였다. 상대수심 kh (k =파수, h =수심)의 변화에 따른 반사율과 투과율의 변화를 Fig. 9에 도시하였다. 문헌의 저자들도 지적하였듯이 공진에 따른 침두치 근방에서의 차이는 부이 및 막체의 운동에 따른 마찰저항에 기인된 것이다. 현재로서는 초기 계류장력에 다소의 불확실성이 존재하나 전반적으로 계산결과와 실험결과가 상호 잘 일치하는 것으로 판단할 수 있다.

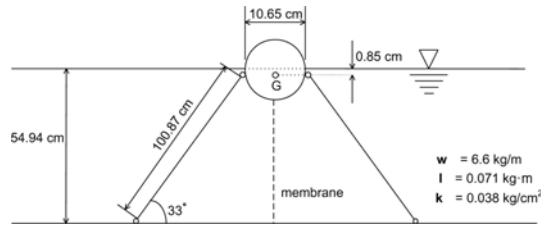


Fig. 8. Experimental scheme (Kee and Kim, 1997).

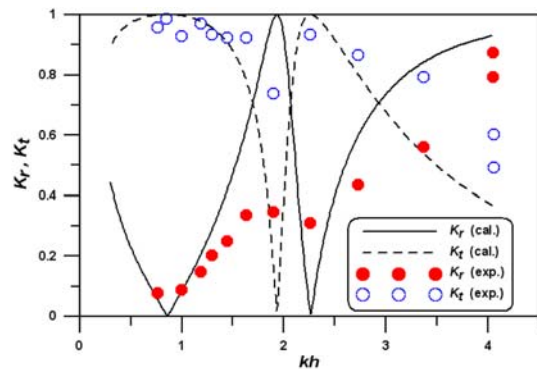


Fig. 9. Comparison of the present numerical results with the experimental results of Kee and Kim (1997).

4. 준 비선형해석의 전개 및 적용

상기 선형해석은 계산이 용이하다는 장점이 있으나 계산의 정확도에서 문제가 발생할 수 있다. 막체방파제에서 초기장력은 수면 부표의 부력에 의하여 결정되며 일반적으로 사용되는 직경 1~2 m 내외의 부표로서는 적은 부력에 의하여 초기장력이 변동장력보다 상대적으로 크게 형성되기가 어렵기 때문이다. 따라서, 식 (16)의 장력을 그대로 사용하는 것이 타당하다. 그러나, 본 주파수영역 해석에서 매 시간 변하는 비선형 장력을 그대로 반영하는 것은 불가하다. 대신, 본 연구에서는 파랑의 위상 θ 에 따라 변하는 j 요소의 길이를

$$l_{2,j}(\theta) \approx \sqrt{(\Delta\xi_j \cos\theta_j)^2 + l_{0,j}^2} \quad (20)$$

와 같이 정의하고 식 (16)에서 $(T_j/l_{2,j})$ 의 한 주기 동안의 평균을

$$\left(\frac{\bar{T}_j}{l_{2,j}}\right) = A_s E_s \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{l_{2,j}(\theta)} \left[\frac{l_{2,j}(\theta) - l_{0,j}}{l_{0,j}} \right] d\theta \quad (21)$$

와 같이 계산하여 사용하였다. 여기서, $\Delta\xi_j = \xi_{j+1} - \xi_j$, $l_{0,j}$ = 막체 설치 전 j 요소의 길이, $\theta_j = \sigma t$ 이다(σ 는 각 주파수).

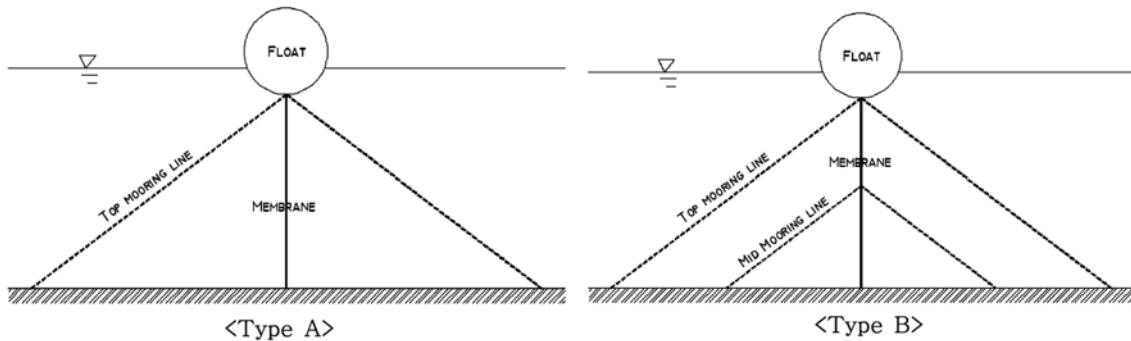


Fig. 10. Membrane breakwaters used in the sample analysis.

계산초기에는 식 (16)에서 $T_j/l_{2,j}$ 대신에 $T_{o,j}/l_{1,j}$ 을 사용하며 일단 $l_{2,j}$ 가 구해지면 식 (20)과 (21)을 이용하여 방파제의 반사율과 전달율이 공히 수렴될 때 까지 $T_j/l_{2,j}$ 를 수정해나가는 반복계산을 수행하였다.

막체방파제를 Fig. 10에서 보이는 바와 같이 두가지로 정하여 수치해석을 수행하였다. 그림에서 Type B는 파압의 작용에 의하여 막체의 과도 수평변위를 억제하기 위하여 중간부에 계류라인을 추가 설치한 경우이다.

계산조건은 Table 1에서 보이는 바와 같이 실제 실험

역 설치 환경에서 단주기(4~20초)와 장주기파(20~200초)에 대한 방파제의 성능을 파악할 수 있도록 case 1~case 4의 4가지로 설정하였다. case 1과 case 2는 방파제 A에 대한 것이며 case 3와 case 4는 방파제 B에 대한 것이다.

상기 표에서 case 2는 case 1의 부체흘수 2.5 m에 대하여 상부계류장력을 감소시켜 막체의 초기장력을 증가시킨 경우이며 case 4는 case 3에서의 중간계류라인의 초기장력을 감소시킨 대신 계류라인의 탄성계수를 증가시킨 경우이다. case 1, 2에서 막체의 초기장력은 부체의 부력에

Table 1. Input conditions

구분	제원	실험 cases			
		case 1	case 2	case 3	case 4
	방파제 형태	A	A	B	B
파랑	수심 d	10	10	10	10
	주기 (s)	4-20, 20-200	4-20	4-20, 20-200	4-20
	파고 (m)	0.5	0.5	0.5	0.5
부이	직경 (m)	3	3	3	3
	질량 (kg)	20	20	20	20
	흘수 (m) : d_f	2.5	2.5	2.5	2.5
	질량 (kg/m)	-	-	-	-
상부 계류 라인	부체부착점 (m)	(0, $-d_f$)	(0, $-d_f$)	(0, $-d_f$)	(0, $-d_f$)
	앵커점 (m)	(20,-10), (-20,-10)	(20,-10), (-20,-10)	(20,-10), (-20,-10)	(20,-10), (-20,-10)
	탄성계수 (N/m)	7.0×10^5	7.0×10^5	7.0×10^5	7.0×10^5
	초기장력 (N)	3.5×10^5	1.5×10^5	3.5×10^5	3.5×10^5
	설치간격 (m)	10	10	10	10
	질량 (kg/m)	-	-	-	-
중간 계류 라인	부체부착점 (m)	-	-	(0, -5)	(0, -5)
	앵커점 (m)	-	-	(10,10), (-10, -10)	(10,10), (-10, -10)
	탄성계수 (N/m)	-	-	10^4	10^6
	초기장력 (N)	-	-	3.5×10^5	500
	설치간격 (m)	-	-	10	10
막체	두께 (m)	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
	단위폭, 단위길이당 질량 (kg)	7.0	7.0	7.0	7.0
	Young 계수 (N/m ²)	-	7.0×10^7	7.0×10^7	7.0×10^7
	초기장력 (N)	37,000	51,000	37,000	37,000

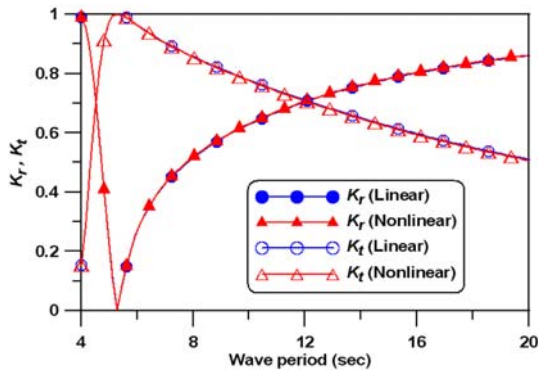


Fig. 11. Reflection and transmission coefficients by the linear and nonlinear analyses (case 1: short period waves).

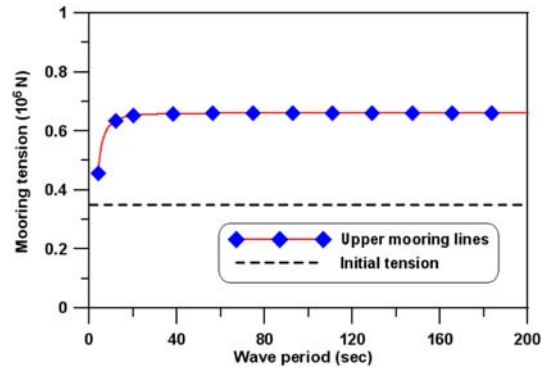


Fig. 13. Maximal mooring tensions within the elastic range of mooring lines (case 1).

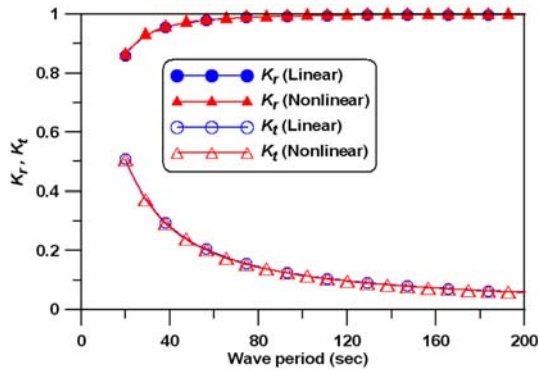


Fig. 12. Reflection and transmission coefficients by the linear and nonlinear analyses (case 1: long period waves).

서 상부계류라인 초기장력의 연직성분을 감한 값이며, case 3,4에서는 중간계류라인 윗 부분의 막체장력은 이와 동일하게 계산되나 아랫부분의 장력은 윗부분 장력에서 중간계류라인 장력의 연직성분을 감한 값이 된다.

case 1에 대하여 막체의 동역학적 경계조건에서 막체장력을 초기장력으로 선형화하여 계산한 결과와 한 주기 평균한 준 비선형 계류장력을 사용한 결과를 단주기와 장주기로 구분하여 Fig. 11과 Fig. 12에 도시하였다. 반사율과 전달율을 살펴보면 약 5.5초 근방에서 공진모드가 발생하여 반사율은 거의 영에, 전달율은 거의 1에 근접하며 주기 8초 이하의 평상과 조건에서는 전달율이 거의 0.8 이상으로 나타나 방파제로서의 기능이 매우 약하게 발휘됨을 볼 수 있다. 그러나, 그 이상으로 주기가 증가하면서 반사율은 계속 증가하고 전달율은 계속 감소한다. 따라서, 막체방파제가 부체의 제원과 계류라인 및 막체의 장력을 적절히 제어할 경우 장주기파의 차단에 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

상기 case 1에서 막체장력의 선형해석과 준 비선형해석의 결과들의 차이가 거의 발생하지 않음을 볼 수 있다. 이는 입력파고가 0.5 m로 작게 취해졌는데 원인이 있으며, 부록 A의 계류강성 매트릭스의 유효범위 내에서 계산을 수행하였기 때문이다. 계류강성 매트릭스는 계류장력이 입사파 주기에 따라 조화진동(harmonic oscillation)하는 것으로 가정하고 구성하였다. 즉, 초기장력을 중심으로 계류장력이 음양으로 진동을 하는 것이다. Fig. 13은 계류 초기장력과 그리고 부체운동 중 발생하는 계류라인 장력의 최대치를 함께 도시한 것이다. 장력변동의 진폭은 이들 장력의 차이가 되며 초기장력보다 작게 형성됨을 볼 수 있다. 만약, 진폭이 초기장력을 초과하게 되면 부체운동 중 계류라인이 느슨한(slack) 상태가 되어 상기 계류강성 매트릭스의 유효범위를 벗어나게 된다. 입사파고가 클수록 그리고 계류라인의 탄성계수가 클수록 이와 같은 느슨한 상태가 쉽게 형성될 수 있다. 이 경우 부록 A에 기술한 계류강성 매트릭스는 실제보다 작은 값을 갖게 될 것이며 결과적으로 부체 및 막체를 덜 구속시켜 파 반사를 작게, 파 전달을 크게 할 수 있다.

Case 1에서 발생하는 막체의 최대수평변위와 최대장력을 Fig. 14와 Fig. 15에 각각 도시하였다. 이들 둘이 공히 주기 40초 이내에서는 급격한 증가를 보이나 그 이상에서는 주기증가에 상관없이 거의 일정한 값들을 보이고 있다. 그리고 미미하나마 선형해석과 준 비선형해석의 결과 차이가 주기가 증가하면서 같이 증가하는 것으로 나타나 있다. 주기가 증가하면서 막체장력의 변동 폭이 증가하기 때문이다.

Case 2의 결과를 Fig. 16에 도시하였다. 막체의 초기장력이 상대적으로 작은 case 1의 결과(Fig. 11)와 비교하여 보면 전체적인 변화양상은 유사하나 동일주기에서 반

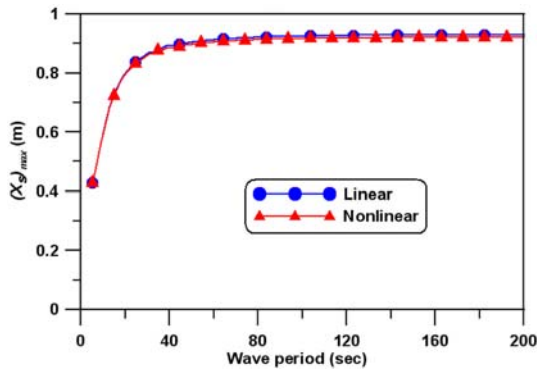


Fig. 14. Maximal horizontal displacement of the membrane (case 1).

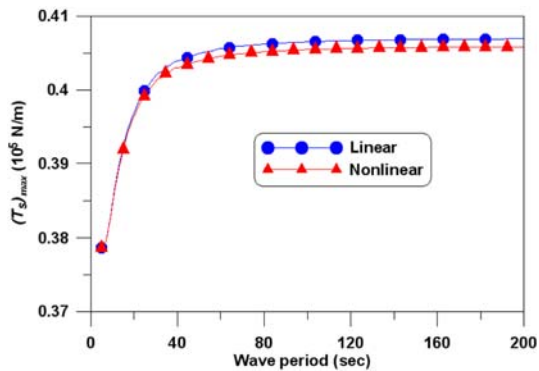


Fig. 15. Maximal tension of the membrane (case 1).

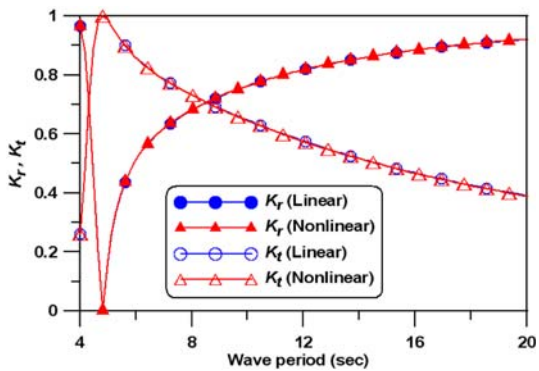


Fig. 16. Reflection and transmission coefficients by the linear and nonlinear analyses (case 2).

사율은 크게, 전달율은 작게 나타나 있다. 이 결과를 볼 때, 막체의 수평변위의 제어가 방파제의 성능에 밀접한 관계가 있으며 막체의 초기장력을 증가시킬수록 방파성능이 우수하게 구현됨을 알 수 있다.

막체의 수평운동을 제어할 목적으로 중간계류라인을 설

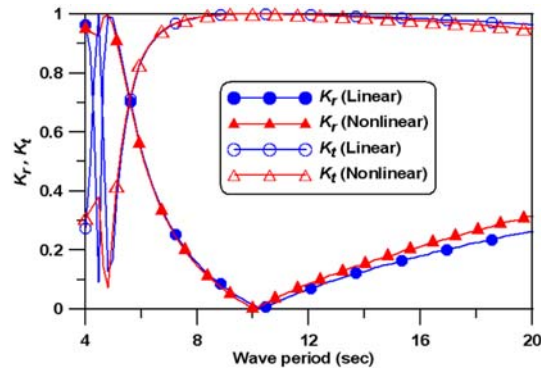


Fig. 17. Reflection and transmission coefficients by the linear and nonlinear analyses (case 3: short period waves).

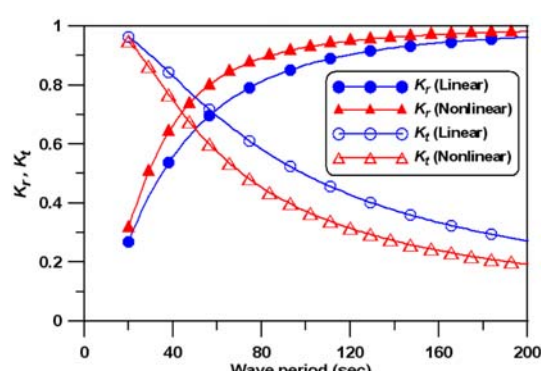


Fig. 18. Reflection and transmission coefficients by the linear and nonlinear analyses (case 3: long period waves).

치한 case 3에 대한 계산결과를 Fig. 17과 Fig. 18에 도시하였다. 상부계류라인만 설치되어 있는 Fig. 11, Fig. 12와 비교하여 보면 오히려 동일주기에서 반사율은 감소, 전달율은 증가되어 있음을 볼 수 있다. 이는 동일한 부체 흡수에서 중간계류라인의 초기장력으로 인하여 막체와의 연결점 이하의 막체가 느슨하여 수평변위가 증가했기 때문이다. 아울러, 선형해석과 준 비선형해석의 결과차이를 Fig. 17, 18에서 확인할 수 있다.

중간계류라인을 설치하되 초기장력을 작게 하고 탄성계수를 증가시키면 막체의 수평변위를 대폭 억제하여 방파제의 성능을 향상시킬 수 있다. 그러나, 이와 같은 방법은 운동 중 계류장력의 변동폭을 증가시켜 결국 계류강성 매트릭스가 그 유효범위를 벗어날 수 있기 때문에 주의를 요한다. 본 case 4에서는 중간 계류라인이 계류강성 매트릭스의 유효범위를 다소 벗어나나 준 비선형해석의 효과를 파악하기 위하여 그대로 계산을 수행하였으며

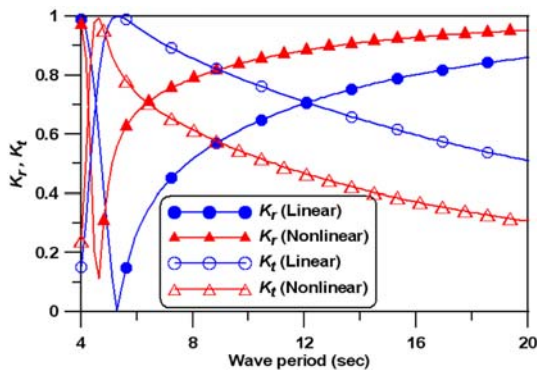


Fig. 19. Reflection and transmission coefficients by the linear and nonlinear analyses (case 4).

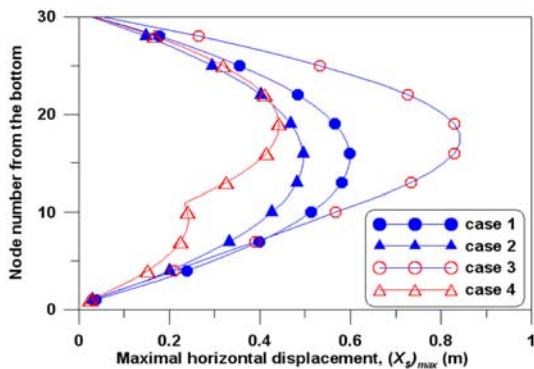


Fig. 20. Vertical variation of the maximal horizontal displacement of the membrane (wave period : 10 sec).

그 결과를 Fig. 19에 제시하였다. 준 비선형해석은 선형 해석과 상당한 차이를 보이며 동일주기에서 반사율은 크게, 전달율은 작게 나타나 있다. 따라서, 본 준 비선형해석은 계류라인의 slack 상태에서 선형 계류강성 매트릭스를 그대로 사용함으로써 발생하는 약화된 계류력을 부분적으로 상쇄시켜주는 기능을 가지고 있다고 볼 수 있다.

Fig. 20은 전 계산 case에 대하여 주기 10초에 대한 막체의 최대수평변위를 비교한 것이다. 막체방과제의 반사 및 전달특성은 이와 같이 파랑작용 시 막체의 수평변위의 크기에 의하여 좌우된다. case 4에 대한 결과에서 중간계류라인의 구속효과를 볼 수 있다. 방과제의 전달율을 저감시키기 위해서는 막체의 수평변위가 제어되어야 하며 이는 막체의 초기장력을 크게 부여하든지, 중간계류라인을 막체의 중간부에 설치하는 방안이 강구되어야 한다. 이를 위해서는 먼저 충분한 정도의 수면부이의 부력이 확보되어야 한다.

4. 결 론

연직 막체방과제는 수면부이, 연직 막체 그리고 계류라인으로 간단히 구성할 수 있으며 적정소재를 선택하여 사용할 경우 방과제로서의 기능을 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 전망된다. 그러나, 막체방과제의 개발사례는 보면, 막체방과제가 실험역에 실제 설치된 사례는 현재까지 전무하며 기존의 관련 연구에서도 비교적 경미한 파랑조건에서 운동 중의 막체장력을 초기장력으로 대체하는 선형해석이 주류를 이루었다. 본 연구에서는 막체방과제의 실험역 설치를 염두에 두고 막체방과제의 파랑 거동 및 발생응력을 계산하기 위한 준 비선형 수치해석 기법을 수립하였다. 세부적 연구결과는 다음과 같다.

- 막체의 운동 중 막체 장력을 초기장력으로 대체하는 기존의 선형해석은 막체의 변위가 매우 미소하게 발생하는 저파고, 단주기 파랑에서는 유효하나 파고와 주기가 증가할수록 전달율은 과도하게, 그리고 반사율은 과소하게 계산되는 문제점이 있다.

- 본 수치해석에서는 막체장력의 비선형 변화를 한 주기 동안의 평균장력으로 대체하며 이 평균장력을 반복계산을 통하여 구해나가는 준 비선형 해석을 수행하였다. 이는 막체가 운동 중 초기상태를 벗어날수록 막체장력이 증가하여 막체의 수평변위를 억제하는 효과를 부분적으로 반영하기 위한 것으로서 상기 선형해석 결과와 비교하여 입사파 주기가 증가할수록 전달율이 감소하는 것으로 나타났다.

- 계류라인을 수면부이의 하부 정점에 부착한 형태 (Type A)에 대하여 준 비선형해석을 수행한 결과, 주기가 증가할수록 반사율은 증가하며 전달율은 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 막체방과제는 장파차단에 보다 효율적으로 사용할 수 있다. 그러나, 주기 8초 이내의 평상파 조건에서는 전달율이 0.8이상으로 나타나 방과제로서의 효과가 거의 발생하지 않았다.

- Type A의 막체 중간에 계류라인을 추가적으로 결속한 Type B에서는 중간계류라인의 초기장력을 작게 하고 탄성계수를 적절히 크게 하면 Type A에 비하여 막체의 수평변위가 많이 억제되며 결과적으로 반사율은 크게, 전달율은 작게 나타났다.

- 본 경계요소법을 이용한 수치해석은 일종의 주파수영역 해법으로서 계류라인 및 막체의 계류력을 선형 강성 매트릭스를 사용하여 반영하였다. 따라서, 엄밀히는 운동 중 계류요소의 변동장력이 초기장력을 상회하지 않는 범

위 내에서 본 강성 매트릭스를 사용할 수 있다. 이는 본 수치해석 기법이 변동계류장력이 상대적으로 미미하게 나타나는 저파고 입사의 경우에만 적용됨을 의미한다. 고파고 입사 시나 또는 계류라인의 탄성계수가 매우 클 경우에는 변동장력이 초기장력보다 크게 되어 계류라인이 느슨한(slack) 상태가 될 수 있으며 이 경우에 상기 선형 강성매트릭스를 그대로 사용할 경우 계류력이 작게 반영되어 막체방파제의 전달율이 과대평가될 가능성이 있다. 그러나, 이와 같은 slack이 발생하는 경우에도 본 준 비선형 수치해석기법은 막체의 수평변위를 억제되는 방향으로 작용하여 약화된 계류력의 효과를 다소 상쇄시키는 작용을 한다.

- 막체방파제의 방파효과는 막체의 수평변위를 얼마나 억제할 수 있는가에 달려있다. 이를 위해서는 상기와 같이 중간계류라인을 설치하거나 막체 및 계류라인들의 초기장력을 크게 부여하는 방법들이 있으나 이들은 공히 수면부이를 침수시키는 역할을 하기 때문에 이를 극복하기 위해서는 충분한 부력이 확보되어야 하며 대형 수면부이를 설치할 필요가 있다. 직경 1~2 m의 소형부이 막체방파제는 바다에 비하여 파고가 현저히 작게 형성되는 갯이나 호수 등에서만 사용이 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 항만리모델링 공학기반 구축 연구와 관련하여 2007년도 건국대학교의 지원에 의하여 수행되었음을 밝힘.

참고문헌

기성태 (2002). 수중 유연막 방파제 I: 수평-수직 유연막으로 구성된 라멘형 시스템, 한국해양공학회지, 16(5), 7-14.
 조일형, 홍석원, 김무현 (1997). 입사파와 수평형 유연막의 상호작용, 한국해양공학회지, 9(4), 182-193.
 한국섬유산업연합회 (2007). 최신 섬유기술 동향, 정보자료. 75 p.
 Kee, S.T. (2005). Submerged Horizontal and Vertical Membrane Wave Barrier, 한국해양공학회지, 19(2), 1-11.
 Kee, S.T. and Kim, M.H. (1997). Flexible membrane wave barrier. II: Floating/submerged buoy-membrane system, J. of Wtrways., Port, Coast., and Oc. Div., ASCE, 123(2), 82-90.
 Lo, E.Y.M. (1998). Flexible dual membrane wave barrier, J. of

Wtrways., Port, Coast., and Oc. Div., ASCE, 124(5), 264-271.
 Mizubish (2004). <http://www.cbr.mlit.go.jp/chugi/fair/2004/gaiyou/f/f08.htm>.
 Thompson, G.O., Sollitt, C.K., McDougal, W.G. and Bender, W.R. (1992). Flexible membrane wave barrier, Proc. ASCE Conf. Oc. V., ASCE, 129-148.
 Wang, K.H. and Ren, X. (1993). Water waves on flexible and porous breakwaters, J. of Engineering Mechanics., A.S.C.E., 119, 1025-1047.
 Williams, A.N., Geiger, P.T. and McDougal, W.G. (1992). Flexible floating breakwater, J. of Wtrways., Port, Coast., and Oc. Div., ASCE, 117(5), 429-450.
 Williams, A.N. and Wang, K.H. (2003). A flexible porous wave barrier for enhanced wetlands habitat restoration, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 129, pp. 1-8.
 Yamamoto, T. and Yoshida, A. (1978). Response of moored objects to water waves, Part I : Theory and numerical analysis, School of Engineering, Oregon State University, 58 p.

원고접수일: 2009년 2월 26일
 수정본채택: 1차: 2009년 4월 16일
 2차: 2009년 7월 14일
 게재확정일: 2009년 7월 21일

부록 A: 계류 강성메트릭스의 구성

Fig. A.1은 일반적인 이차원 탄성계류 방식을 나타낸다.

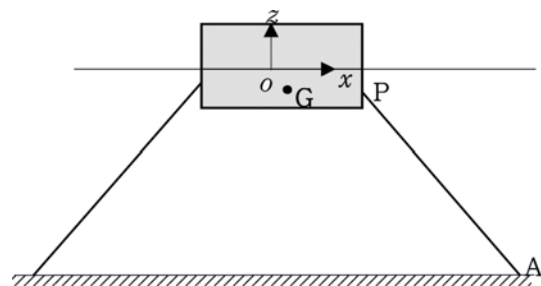


Fig. A.1 Two dimensional mooring.

Fig. A.1에서 임의 계류라인의 부체부착점의 위치벡터 \vec{P} , 앵커점의 위치벡터 \vec{A} 그리고 부체 무게중심의 위치벡터 \vec{G} 는 각각 다음과 같다.

$$\vec{P} = (x, z), \vec{G} = (x_o, z_o), \vec{A} = (x_e, z_e) \tag{A.1}$$

파의 작용에 의한 부체의 3 자유도 운동(swaying, heaving, rolling)의 변위를 각각(X, Z, Ψ)이라 하면 계류력(R_x, R_z, M_y)과 변위의 관계를 계류강성 매트릭스를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} R_x \\ R_z \\ M_y \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{zz} & K_{x\psi} \\ K_{zx} & K_{zz} & K_{z\psi} \\ K_{\psi x} & K_{\psi z} & K_{\psi\psi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Z \\ \Psi \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

상기 계류강성 매트릭스는 벡터해석을 통하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_{xx} = -e_1^2 C$$

$$K_{xz} = -e_1 e_3 C$$

$$K_{x\psi} = -(e_1^2 l_z - e_1 e_3 l_x) C$$

$$K_{zx} = -e_1 e_3 C$$

$$K_{zz} = -e_3^2 C$$

$$K_{z\psi} = -(e_1 e_3 l_z - e_3^2 l_x) C$$

$$K_{\psi x} = K_{x\psi}$$

$$K_{\psi z} = K_{z\psi}$$

$$K_{\psi\psi} = -[l_z(e_1^2 l_z - e_1 e_3 l_x) - l_x(e_1 e_3 l_z - e_3^2 l_x)] C \quad (\text{A.3})$$

여기서, C 는 계류라인의 탄성계수이며 여타 변수들의 정의는 다음과 같다.

$$\vec{e} = \frac{\vec{A} - \vec{P}}{|\vec{A} - \vec{P}|} = (e_1, 0, e_3) \quad (\text{A.4})$$

$$\vec{r} = \vec{P} - \vec{G} = (l_x, 0, l_z) \quad (\text{A.5})$$

계류라인 전체의 강성메트릭스는 각 계류라인의 강성메트릭스를 합산하면 된다. 즉,

$$[K] = \sum_{i=1}^n [K]_i \quad (\text{A.6})$$

한편, 임의 계류라인의 계류장력은

$$T = C[(X + \psi l_z) e_1 + (Z - \psi l_x) e_3] + T_o \quad (\text{A.7})$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서, T_o 은 초기장력이다.