

신형식부방파제의 파랑제어에 관한 연구 A Study of Wave Control by New Type Floating Breakwater

김도삼¹ · 허동수² · 윤희면³ · 이광호³ · 최낙훈³

Do Sam Kim¹, Dong Soo Hur², Hee Myun Yoon³, Kwang Ho Lee³, and Nack Hoon Choi¹

1. 서 론

부방파제는 파랑에너지가 집중되어 있는 자유수면에서 수면하 20%정도에 부체를 띄워 부체에 의한 반사파와 투과파 및 부체동요에 의한 발산파에 의해 파랑을 제어한다. 부방파제의 장점은 무엇보다 대수심해역에 적합하고, 해수흐름을 방해하지 않아 항내오염을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 지진의 피해를 최소한으로 줄일 수 있고, 연약지반상에서도 쉽게 건설될 수 있다는 점이다. 따라서, 국내에서도 마산시 원전어항에 부방파제를 처음으로 도입·시공하게 되었으며(마산지방해양수산청, 2002), 남해안에도 어장의 조성 및 확장을 위해 부방파제를 계획하고 있다.

부방파제의 형식으로는 제작이 용이하고, 내파안정성이 뛰어난 폰툰형이 널리 이용되어 왔다. 그러나, 폰툰형부방파제는 내습파를 바다측으로 반사시킴으로써 투과파를 저감하기 때문에 충분한 크기의 자중이 요구되고 제체폭의 3배 정도 이하의 비교적 단파장의 파에 대해서만 유효한 것으로 알려져 있다. 따라서, 원전어항의 경우에는 폰툰형부방파제의 단점인 고반사성 및 장주기파에 대한 고투과성을 효과적으로 제어할 수 있는 二重式커튼부방파제(中村 등, 1999)를 적용하고 있다.

본 연구에서는 원전어항에서 채용하고 있는 부방파제에 대해 소요재료량의 변화가 크지 않은 범

위에서 二重式커튼판의 위치와 형식의 변화, 몰수평판의 부착 유무에 따른 여러 형식의 부방파제에 대해 투과율과 반사율을 특이점분포법으로부터 계산한 결과에 기초하여 단주기 및 장주기파를 제어할 수 있는 새로운 형식의 부방파제를 검토한다. 수치해석에 있어서는 파랑제어기능을 보다 정확히 평가하기 위하여 구조물에 의한 마찰과 와의 형성에 의한 파랑에너지의 감쇠영향을 효과적으로 평가할 수 있는 감쇠파이론(中村·井出, 1977)을 적용한다.

2. 이론해석법

2.1 감쇠파이론의 해석모델

Fig. 2.1에 나타난 부방파제의 주변파동장을 영역 I에서 영역 III까지 3영역으로 분할한다. 여기서, 수심은 각 영역에서 상이하더라도 관계없다. 영역 I은 입사파와 반사파가 공존하며, 영역 III은 투과파만이 존재하는 영역으로 각각 비감쇠영역으로 한다. 영역 II는 구조물에 의한 마찰, 흐름의 박리 및 와류 등으로부터 발생하는 에너지소산이 존재하므로 에너지소산을 근사적으로 고려하기 위해 감쇠파영역으로 설정된다.

감쇠파영역에는 유속에 비례하는 저항이 작용하는 가상적인 유체가 설정되어 있는 것으로 하면 그의 선형운동방정식은 다음의 식으로 표현된다(Sollitt et al., 1972; 김 등, 1997; 中村 등, 1999).

¹ 한국해양대학교 토목환경시스템공학부(Corresponding Author : Do Sam Kim, Division of Civil and Environmental System Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea. kimds@hanara.kmaritime.ac.kr)

² 나고야대학 토목공학과(Department of Civil Engineering, Nagoya University)

³ 한국해양대학교 대학원(A graduate school, Korea Maritime University)

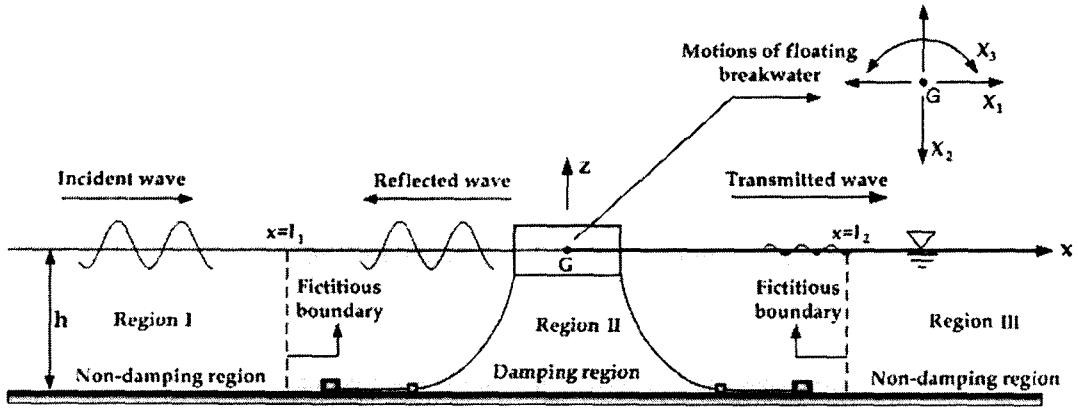


Fig. 2.1. Fluid regions and model for analysis.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla (p + \rho g z) - f_c w \vec{v} \quad (2.1)$$

여기서, \vec{v} 는 유속벡터, p 는 유체압력, ρ 는 밀도, w 는 중력가속도, f_c 는 선형저항계수, w 는 각진동수 ($= 2\pi/T$, T 는 주기), $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial z})$ 이다.

영역 I에서 입사파의 속도포텐셜 Φ_0 는 입사파가 x 축의 정방향으로 진행한다고 가정하면 식 (2.2)와 같이 주어진다.

$$\Phi_0(x, z; t) = -\frac{igH}{2w} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} e^{i(kx - wt)} \quad (2.2)$$

여기서, H 는 입사파고, k 는 비감쇠파의 진행파 모드의 파수($2\pi/L$, L :파장), i 는 $\sqrt{-1}$, h 는 수심이 다.

2.2 파랑경계치문제

2.2.1 기초방정식

유체를 비압축성의 비회전운동으로 가정하면 각 영역에서 속도포텐셜 Φ_j ($j = I, II, III$)을 정의할 수 있고, 기초방정식은 다음의 Laplace 방정식으로 주어진다.

$$\frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial z^2} = 0 \quad (j = I, II, III) \quad (2.3)$$

입사파가 직접적으로 존재하는 영역 I에서의 속도포텐셜은 입사파, 반사파 및 발산파의 포텐셜 Φ_0 , Φ_{D1} 와 Φ_{R1} 의 선형합인 $\Phi_I = \Phi_0 + \Phi_{D1} + \Phi_{R1}$ 로 표현되고, 영역 II, III에서의 속도포텐셜은 반사파와 발산파를 고려하여 $\Phi_{II, III} = \Phi_{DII, III} + \Phi_{RII, III}$ 로 표현된다.

2.2.2 부체표면상에서의 운동학적 경계조건

부체가 유체영역 II에만 있다고 하면 반사파의 속도포텐셜 Φ_{DII} 는 수중부체표면 S_B 에서 다음의 불투과조건을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial \Phi_{DII}}{\partial n} \Big|_{on S_B} = 0 \quad (2.4)$$

여기서, $\partial/\partial n$ 는 수중부체표면에서의 외향법선미분이다.

다음으로, 부체가 파의 작용에 의해 무게중심 $G(x_G, z_G)$ 를 중심으로 하여 Fig. 2.1에 나타내는 각 운동모드방향으로 식 (2.5)와 같이 단조진동하는 경우를 고려한다.

$$X_m(t) = \hat{X}_m e^{-i\omega t} \quad (m = 1, 2, 3) \quad (2.5)$$

여기서, X_m , \hat{X}_m 는 각각 변위 및 그 복소진폭, 아랫첨자 m 은 각각 Sway($m=1$), Heave($m=2$), Roll($m=3$)의 각 운동모드에 대응한다.

이 때, (ξ_1, ξ_2, ξ_3) 는 다음의 식으로 정의되며, $n_x = dx/dn$, $n_z = dz/dn$ 을 나타낸다.

(ξ_1, ξ_2, ξ_3)

$$= [n_x, n_z, n_x(Z - Z_G) - n_z(X - X_G)/R_B] \quad (2.7)$$

또한, 발산포텐셜 Φ_{RII} 는 선형경계치문제를 만족하고 있으므로 식 (2.8)과 같이 각각의 동요모드로 분리하여 취급할 수 있다.

$$\Phi_{RII} = \sum_{m=1}^3 (\Phi_{Rm})_{II} X_m \quad (2.8)$$

여기서, $(\Phi_{Rm})_{II}$ ($m = 1, 2, 3$)은 각 운동모드에 의한 영역 II에서 발산과 속도포텐셜이다.

2.2.3 자유수면 및 해저경계조건

자유수면에 있어서 경계조건은 감쇠파영역 II에서 선형저항력의 효과를 고려하여 식 (2.9)로 표현된다.

$$\frac{\partial \Phi_{II}}{\partial z} = -(1 + if_c) \left(\frac{1}{g} \right) \frac{\partial^2 \Phi_{II}}{\partial t^2} \Big|_{on z=0} \quad (2.9)$$

비감쇠영역에서 자유수면 경계조건은 위의 식에서 $f_c = 0$ 으로 하면 주어진다. 해저경계조건은 각 영역에서 공통으로 식 (2.10)의 불투과조건으로 표현된다.

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = 0 \Big|_{on z=-h} \quad (j = I, II, III) \quad (2.10)$$

2.2.4 접속조건

본 해석모델은 각 영역에서 포텐셜을 산정하고 있으므로 각 영역의 가상경계면에서 압력과 유속의 접속조건이 필요하게 된다. 영역 I과 영역 II의 접속경계점 $x=l_1$ 및 영역 II와 영역 III의 접속경계점 $x=l_2$ 에 있어서 접속조건을 나타내면 각각 다음과 같이 된다.

$$\begin{cases} \Phi_0 + \Phi_I = (1 + if_c) \Phi_{II} \\ \frac{\partial(\Phi_0 + \Phi_I)}{\partial n_I} = - \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial n_{II}} \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} \Phi_{III} = (1 + if_c) \Phi_{II} \\ \frac{\partial \Phi_{III}}{\partial n_{III}} = - \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial n_{II}} \end{cases} \quad (2.12)$$

여기서, $\partial/\partial n_j$ 는 각 영역 $j = I, II, III$ 의 경계면

에서 내향법선미분을 나타낸다.

2.2.5 작용파력과 동적유체력

부체의 동요변위를 구하기 위해서는 부체에 작용하는 동적인 힘의 평형방정식이 필요하게 된다. 수중부체표면에 작용하는 변동압력 p 는 식 (2.1)의 공간적인 적분을 고려하여 얻어지는 식 (2.13)으로부터 산정될 수 있다.

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial t} - \rho f_c \omega \Phi_{II} \quad (2.13)$$

동요부체에 작용하는 파랑외력은 압력 p 의 작용방향을 고려하여 표면적분함으로써 식 (2.14)와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} F_\alpha &= i\rho\omega \int_{S_\alpha} (1 + if_c) \Phi_{DII} \xi_\alpha ds \\ &+ \sum_{m=1}^3 \rho\omega^2 X_m (1 + if_c) \int_{S_\alpha} (\Phi)_{II} \xi_\alpha ds \quad (\alpha = 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (2.14)$$

여기서, 아랫첨자 α 는 운동방향모드의 방향을 나타낸다. 그리고, 식 (2.14)의 우변 제1항은 정적평형시의 부체에 작용하는 파력을, 제2항은 동적유체력을 나타낸다. 제2항의 실수부는 부가질량력, 허수부분은 조파감쇠력으로 알려져 있다.

식 (2.14)로부터 알 수 있는 바와 같이 파랑외력에는 선형저항이 관계하고 있고, 이 영향이 항력을 근사적으로 나타내는 것으로 된다. 그리고, 최종적으로 부체의 동요방정식은 이들의 파랑외력을 진동외력항에 대입함으로써 유도될 수 있다.

2.2.6 특이점분포법에 의한 해석

(Source distribution method)

미지포텐셜인 Φ_D, Φ_{Rm} 의 산정에는 식 (2.15)와 같은 Green함수를 핵함수로 하는 특이점분포법을 사용하였다.

$$\Phi(X, Z) = \int_{S_\alpha} f(X, Z) G(x, z; X, Z) dS(X, Z) \quad (2.15)$$

여기서, $f(X, Z)$ 는 물체표면 및 접속경계면 (X, Z) 에 분포되는 특이점강도의 분포함수, G 는 Green함수, (x, z) 는 파랑포텐셜을 구하는 유체중의 일반점, S 는 각 영역에 포함되는 물체표면 및

접속경계면에서 구성되는 경계선영역이다. 여기서, G 는 식 (2.16)과 같이 주어진다(中村 등, 1996).

$$G(x, z; X, Z) = - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{i(u_n^2 - \lambda^2)}{u_n \{(u_n^2 - \lambda^2)h + \lambda\}} \cdot \cosh u_n(h + z) \cdot \cosh u_n(h + Z) e^{iu_n|x - X|} \quad (2.16)$$

여기서, $n=0$ 의 경우에 $u_0 = k$, $n \geq 1$ 의 경우에 $u_n = ik_n$ 으로 주어지고, k_n 은 소멸파의 파수, λ 는 식 (2.17)로 주어진다.

$$\lambda = \frac{w^2}{g} (1 + if_c) = u_n \tanh(u_n h) \quad (2.17)$$

따라서, 비감쇠영역인 영역 I 과 III에서는 식 (2.17)에서 $f_c=0$ 으로 한 경우에 상당하는 Green함수를 적용할 수 있고, 이는 John(1950)에 의해 유도된 Green함수와 동일한 결과를 나타낸다. 구체적인 산정에서는 특이점강도의 분포함수 $f(X, Z)$ 가 미지수로 되며, 이는 식 (2.4), 식 (2.6)의 운동학적인 경계조건 및 식 (2.11)의 접속조건을 사용하여 결정될 수 있다. 또한, 이와같은 해석법에 있어서 감쇠파영역의 크기 및 선형저항계수의 설정에 대하여서는 中村井出(1997)에 의해 제시된 값에 준하여 감쇠파영역의 크기는 체체의 양측면으로부터 바다측과 해안측으로 입사파장의 1/8까지의 수역으로 설정하였으며, 선형저항계수는 $f_c = 0.15$ 를 원칙으로 하여 채용하였다.

2.3 계류체인의 해석법

2.3.1 해석모델 및 좌표계

해석모델 및 좌표계를 Fig. 2.2에 나타낸다. 즉, 일정수심 h 의 유체장에 단면 2차원부체가 부체의 임의점으로부터 해저의 앵커점에 펼쳐있는 완전 가요성을 갖는 라인에 의해 계류되어 있는 경우를 고려한다. 여기서 좌표계는 해저의 앵커점을 원점으로 하는 (\bar{x}, \bar{z}) 좌표계이다.

2.3.2 Catenary이론에 의한 산정법

Catenary이론(일본해사협회, 1983)에 의하면 계류 라인에 있어서 힘의 정적 평형방정식은 식 (2.18)로 주어진다.

$$T_H = \frac{d^2 \bar{x}}{d\bar{z}^2} + w [1 + (\frac{d\bar{x}}{d\bar{z}})^2]^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (2.18)$$

여기서, T_H 는 라인장력의 수평성분으로 라인을 통하여 일정하며, w 는 라인의 수중단위중량이다.

식 (2.18)을 풀면 Catenary계류라인의 형상을 나타내는 연직거리 \bar{z} 와 계류점으로부터의 길이 S 가 식 (2.19)와 (2.20)과 같이 구해진다.

$$\bar{z} = a [\cosh(\frac{\bar{x}}{a}) - 1] \quad (2.19)$$

$$S = a \sinh(\frac{\bar{x}}{a}) \quad (2.20)$$

여기서, a 는 식 (2.21)과 같이 표현된다.

$$a = \frac{T_H}{w} \quad (2.21)$$

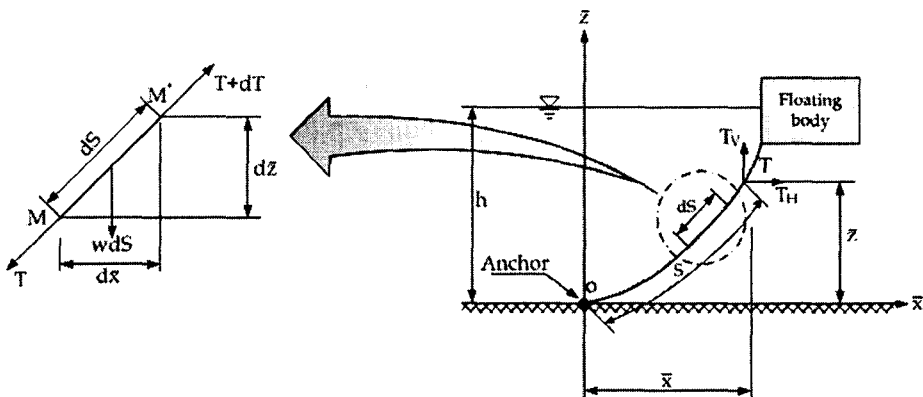


Fig. 2.2. Model for analysis and coordinate system of mooring line.

또한, 라인장력의 연직성분 T_V 는 라인의 연직 하향의 길이를 고려하면 구해진다. 체인라인에 의한 계류점에서의 수평반력은 라인길이와 그 수평 및 연직투영길이 등을 입력하여 식 (2.18)을 Newton법 등에 의해 근사적으로 해석함으로써 추정될 수 있다.

2.3.3 선형스프링상수의 산정

부체측의 계류점이 크게 이동하여 Catenary라인의 형상이 직선에 가까운 형태로 되면 강한 비선형성의 반력특성을 나타낸다. 그러나, 부체계류점의 이동이 비교적 적은 경우에는 라인을 등가선형스프링으로 근사하여 취급할 수 있다. 또한, 계류라인은 부체의 이동방향에 따라 Fig. 2.3(a)와 같이 부체측의 계류점이 A점에서 B점으로 이동한 경우는 라인과 해저가 접하는 부분이 없어지고, Fig. 2.3(b)와 같이 이동하면 라인과 해저가 접하는 부분이 형성된다. 여기서는 계류라인 1본의 선형스프링상수를 라인과 해저가 접하는 부분의 유무로 나누어 고려한다.

2.3.4 라인과 해저가 접하는 부분이 없는 경우

라인과 해저가 접하는 부분이 없는 경우는 수평 및 연직방향에 관한 1본의 라인에 대한 선형스프링상수는 식 (2.22)와 같이 얻어진다.

$$\begin{cases} K_{HH} = w \frac{\sinh D}{D \sinh D - 2(\cosh D - 1)} \\ K_{HV} = K_{VH} = \frac{w(\cosh D - 1) \cosh U + \sinh D \sinh U}{D \sinh D - 2(\cosh D - 1)} \\ K_{VV} = w \frac{D \sinh U \cosh(U + D) - \sinh D}{D \sinh D - 2(\cosh D - 1)} \end{cases} \quad (2.22)$$

여기서, K_{HH} 는 수평방향의 이동에 의한 수평방향으로의 복원력계수, K_{VV} 는 연직방향의 이동에 의한 연직방향으로의 스프링복원력계수, K_{HV} , K_{VH} 는 연직(수평)방향으로의 스프링복원력계수이다. 또한, D , U 는 다음의 식으로 정의된다.

$$D = w \frac{\bar{x}_c}{T_H} \quad (2.23)$$

$$U = w \frac{\bar{x}_{cs}}{T_H} \quad (2.24)$$

2.3.5 라인과 해저가 접하는 부분이 있는 경우

라인과 해저가 접하는 부분이 있는 경우에서 수평 및 연직방향에 관한 스프링상수는 식 (2.25)와 같이 얻어진다.

$$\begin{cases} K_{HH} = w \frac{\sinh D}{D \sinh D - 2(\cosh D - 1)} \\ K_{HV} = K_{VH} = \frac{w \sinh D - 1}{D \sinh D - 2(\cosh D - 1)} \\ K_{VV} = w \frac{D \sinh D - \sinh D}{D \sinh D - 2(\cosh D - 1)} \end{cases} \quad (2.25)$$

여기서, D 는 식 (2.26)으로 정의된다.

$$D = w \frac{\bar{x}_c}{T_H} \quad (2.26)$$

2.3.6 계류계 전체의 스프링상수

일반적으로 부체는 복수의 계류라인에 의해 계류되므로 각 계류라인의 방향을 고려하여 스프링상수를 중첩하면 계류계 전체의 스프링상수를 산정할 수 있다. 부방파체가 정적평형상태에 있는 것으로 가정하면 계류계 전체의 스프링상수 K_{ij} 는 식 (2.27)로부터 산정될 수 있다.

$$\begin{aligned} K_{11} &= \sum_{k=1}^n (K_{HH})_k \\ K_{12} = K_{21} &= \sum_{k=1}^n (K_{HV})_k \\ K_{13} = K_{31} &= \sum_{k=1}^n \{K_{HV}(\bar{z}_E - z_G)\}_k \\ &\quad - \sum_{k=1}^n \{K_{HV}(\bar{x}_E - x_G)\}_k \\ K_{22} &= \sum_{k=1}^n (K_{VV})_k \end{aligned}$$

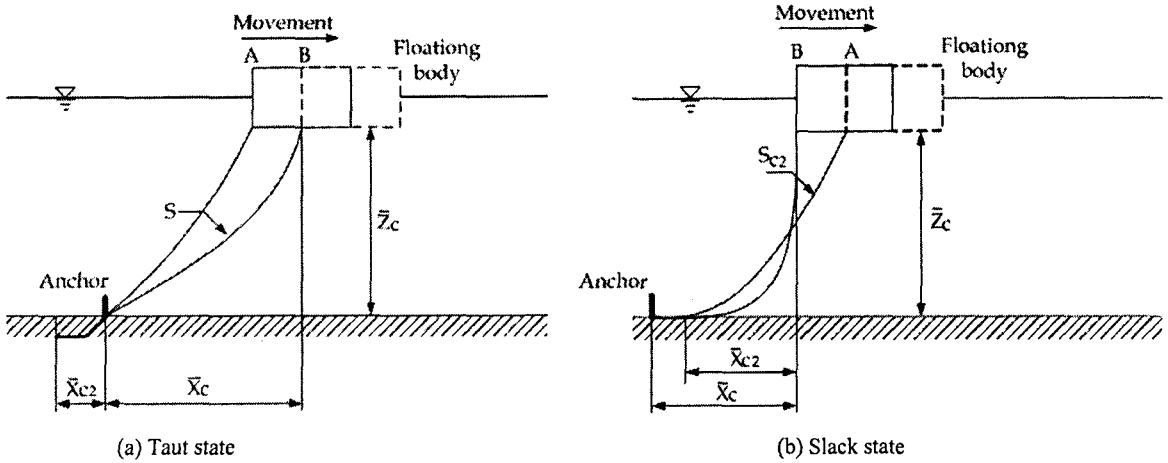


Fig. 2.3. Two conditions of mooring line caused by the movement of floating body.

$$K_{23} = K_{32} = \sum_{k=1}^n \{K_{HV}(\bar{z}_E - z_G)\}_k - \sum_{k=1}^n \{K_{VV}(\bar{x}_E - x_G)\}_k$$

$$K_{33} = \sum_{k=1}^n \{K_{HH}(\bar{z}_E - z_G)^2\}_k - \sum_{k=1}^n \{K_{HV}(\bar{z}_E - z_G)(\bar{x}_E - x_G)\}_k + \sum_{k=1}^n \{K_{VV}(\bar{x}_E - x_G)^2\}_k \quad (2.27)$$

여기서, n 은 계류체인의 수, (\bar{x}_E, \bar{z}_E) 는 부체계류점의 좌표이다.

3. 수치해석

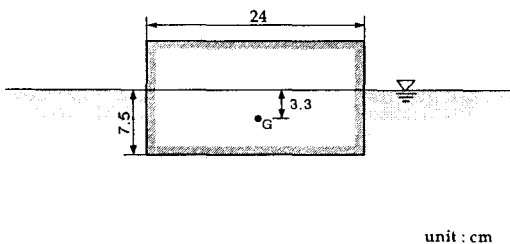


Fig. 3.1. Standard floating breakwater model.

Table 3.1. The characteristics of standard floating breakwater model

Width	24cm
Draft	7.5cm
Center of gravity	3.3cm
Gyration	10.3cm
Weight	19900gf
Inertia Moment	2083kgf · cm ²

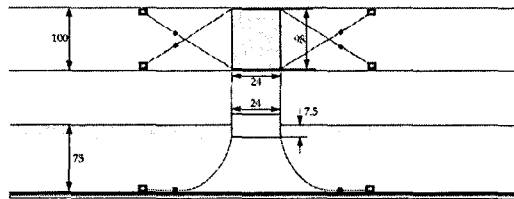


Fig. 3.2. Mooring system.

3.1 부방파제의 모형

Fig. 3.1에 나타내는 기본형 부방파제를 기초로 연직판 혹은 수평판을 부가하여 여러 모형에 대해 수치해석을 실시하였다. 기본형 부방파제의 제원을 Table 3.1에 나타내며, 후술하는 제안모형들의 무게중심과 중량 및 관성모멘트는 기본형 부방파제와 큰 차이는 없고, 계류형태는 Fig. 3.2에 나타내고 있는 기본형 부방파제와 동일한 것으로 가정한다.

3.2 원전어항부방파제에 대한 수치해석의 결과

Fig. 3.3은 원전어항에 채용된 부방파제의 모형

과 투과율 C_t 및 반사율 C_r 에 대한 결과이다. Fig. 3.3에서 B 와 L 은 각각 제체의 폭과 입사파장을 나타낸다. 수치해석결과를 보면 $L/B=4.5$ 부근에서 투과율의 극소치가 나타나고, 부방파제의 효과여부를 판단하는 $C_t < 0.5$ 의 영역은 $L/B < 6.3$ 이라는 것을 알 수 있다. 반사율은 $L/B=3$ 부근에서 일단 저하하는 경향을 나타내지만, $L/B > 4$ 의 영역에서는 L/B 의 증가에 따라 C_r 이 감소된다는 것을 알 수 있다. 여기서, $L/B=3$ 에서 극소치를 나타내는 것은 부체와 전후연직벽 사이의 유수실 내에서 피스톤모드의 파랑공진에 따른 강한 와류의 발생에 의해 반사파가 소산되기 때문으로 판단된다(中村 등, 2002). 전체적으로 $L/B < 5$ 의 단주기파 영역에서는 $C_t < 0.2$ 로 되어 매우 뛰어난 파랑제어 능력을 갖는 것으로 판단된다.

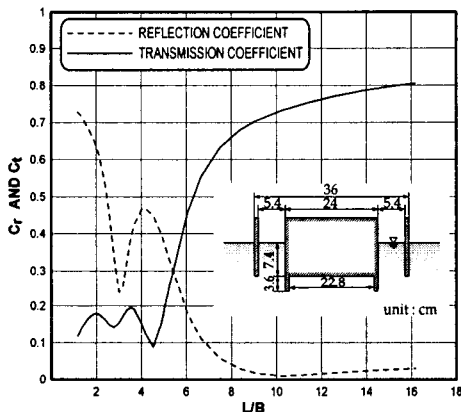


Fig. 3.3. Floating breakwater in Won-Jun fishing port.

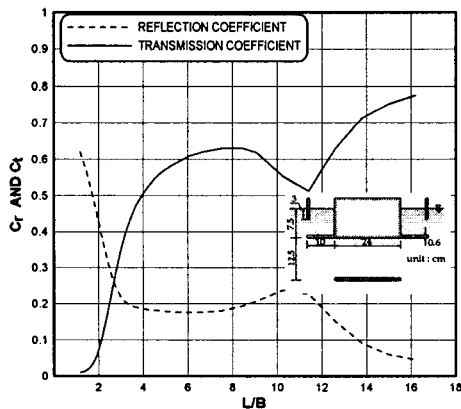


Fig. 3.4. Proposal model and numerical result ; CASE 1.

3.3 제안모형 및 수치해석의 결과

Fig. 3.4의 CASE1 모형은 원전어항부방파제와 비교하여 폰툰 본체하측의 연직판 대신에 수평판을 부착하였고, 제체의 하부에도 수평판을 추가하고 있다. 이에 대한 수치해석결과를 살펴보면 L/B 의 증가에 따라 투과율은 $C_t=6.3$ 까지 점점 상승하다가 $L/B=11.3$ 부근에서 약간 감소하며, 장주기측에서는 원전어항부방파제에 비해 다소 적은 값을 나타내지만, 단주기측에서 원전어항부방파제에 비해 투과율의 제어효과가 현저히 떨어짐을 알 수 있다. 또한, 반사율의 경우는 $L/B > 3.0$ 의 영역에서 안정된 값을 보이지만, 장주기쪽으로 갈수록 원전어항부방파제의 경우가 보다 저반사로 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.5의 CASE2 모형은 전술한 CASE1 모형에서 전후연직판의 홀수심을 깊게 한 경우이다. CASE1과 비교하면 $L/B < 6$ 인 영역에서는 CASE2의 모형이 투과율의 제어효과가 약간 크지만, $L/B > 6$ 인 장주기측에서는 CASE1의 모형이 더 좋은 결과를 나타낸다. 또한, 반사율에서는 CASE1의 모형에 비해 CASE2의 경우가 $L/B > 3.5$ 의 영역에서 다소 적은 값을 나타내며, $L/B=4$ 부근에서 거의 0에 가까운 값으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 원전어항부방파제와 마찬가지로 전후연직벽 사이의 유수실 내에서 피스톤모드의 파랑공진에 따른 강한 와류의 발생에 의해 반사파가 소산되기 때문으로 판단된다. CASE2의 모형과 원전어항부방파제의 수치해석결과를 비교하면, $L/B < 8$ 인 영역에서는 원전어항부방파제가 투과율의 제어에 효과적이라는 사실을 알 수 있고, $L/B > 8$ 인 장주기측으로 갈수록 CASE2의 모형의 투과율이 더 낮다는 것을 확인할 수 있다. 반사율에서는 $L/B > 7$ 인 영역에서 원전어항부방파제가 저반사로 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.6의 CASE3의 모형은 CASE1, CASE2의 모형에서 전후연직판을 제거한 경우로, Fig. 3.4의 CASE1의 모형과 비교하면 전체적으로 유사한 변화양상을 나타내지만, 투과율은 $L/B < 6$ 의 영역에서는 약간 증가하고, CASE2의 홀수심을 깊게 한 모형과 비교하면 $L/B < 8$ 의 영역에서는 투과율이 높게 나타난다. 반사율에서는 $L/B > 2$ 의 영역에서 CASE1의 경우와 비슷한 결과를 보이지만, $L/B < 2$ 의 단주기측에서 CASE1의 반사율이 훨씬 크게 나타난다.

이상의 Fig. 3.4, 3.5 및 3.6으로부터 전후연직판

의 흡수심의 깊이와 유무에 따른 변화를 확인할 수 있다. 즉, 전후연직판을 투과율에는 큰 영향을 미치지 못하지만, 장주기측으로 갈수록 반사율의 저감에는 효과적이다. 따라서, 저반사와 동시에 투과파랑의 제어라는 관점에서는 전후연직판의 설치 가 효과적인 것으로 판단된다.

Fig. 3.7의 CASE4의 모형은 CASE3의 모형에서 본체의 하부에 연직판을 설치한 경우로, 투과율은 $L/B < 9$ 인 영역에서 $C_t = 0.68$ 까지 계속 증가하다가 $L/B = 11.3$ 부근에서 약간 감소하며, $L/B < 6$ 의 영역에서 CASE3의 모형에 비해 약간 좋은 결과가 얻어지지만, 전체적으로 비슷한 양상을 보인다. 반사율에서는 연직판의 영향으로 $L/B > 6$ 인 장주기측에서 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다. CASE4와 CASE1, CASE2의 결과를 비교하면 전후연직판의 흡수심을 높게 하는 것 보다는 깊게 하는 것이 제체의 하부에 연직판을 부착하는 것 보다는 전후에 부착하는 것이 반사파의 저감에 더욱 효과적이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.8의 CASE5의 모형은 CASE3의 모형에서 저면의 수평판을 보다 깊게 설치한 경우에 대한 것으로, 투과율과 반사율에서 두 경우가 거의 동일한 결과치를 나타낸다. 따라서, 수평판의 효과를 기대하기 위해서는 적절한 위치에 설치되어야 한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.9의 CASE6의 모형은 폰튼형 부방파제에 전후연직판을 설치하고, 저면에는 수평판을 부가한 모형이다. 그림을 살펴보면, 투과율은 $L/B = 3$ 인 부근에서 $C_t = 0.06$ 정도의 극소치를 나타내고, $C_t = 0.35$ 까지 증가하다가 $L/B = 6$ 부근에서 $C_t = 0.18$ 정도까지 감소한 후, 다시 증가하는 결과를 보인다. 반사율은 유수실 내에서 피스톤모드의 파랑공간에 따른 강한 와류의 발생으로 $L/B = 3.2$ 에서 극소치를 나타내고, $L/B > 6$ 의 장주기파영역에서 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한, 원전어항부방파제의 $C_t < 0.5$ 의 범위가 $L/B < 6.5$ 의 영역인 것에 비해 CASE6의 모형은 $L/B < 8$ 의 영역으로 더욱 넓어져 있고, 이로써 CASE6의 모형이 원전어항부방파제보다 장주기파랑의 제어에 효과적이라는 사실을 알 수 있다.

Fig. 3.10의 CASE7 모형은 CASE6 모형의 전후연직판 하부에 수평판을 부착한 모형으로, 투과율은 $L/B = 3$ 부근에서 $C_t = 0.22$ 정도의 극소치를 나타내고, $C_t = 0.51$ 까지 증가하다가 $L/B = 10$ 부근에서 $C_t = 0.37$ 까지 감소한 후, 다시 증가하는 결과를 나타낸다. 반사율은 $L/B = 3$ 에서 극소치

를 나타내고 $4 < L/B < 10$ 의 구간에서 $C_r = 0.33$ 정도로 일정한 값을 나타낸 후, $L/B > 10$ 의 영역에서 감소하는 결과를 나타내고 있다. 원전어항부방파제에서 $C_t = 0.5$ 의 범위가 $L/B < 6$ 의 영역인 것에 비해 CASE7의 모형은 $L/B < 12$ 의 영역으로, 보다 장주기파의 영역에서 투과파의 제어효과가 있다는 사실을 알 수 있다.

이상에서 검토된 각 형식의 부방파제는 원전어항부방파제에 비교하여 장주기측에서는 다소 좋은 파랑제어 능력을 나타내는 경우도 있지만, 원전어항의 설계파랑조건 $4 < L/B < 5$ 의 단주기파 영역에서는 원전어항의 부방파제가 투과율에서 가장 탁월한 파랑제어기능을 수행한다는 것을 알 수 있다.

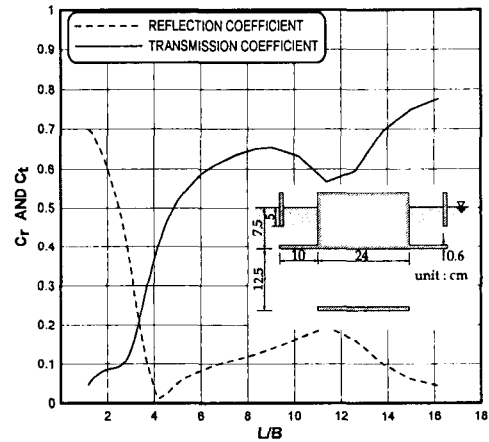


Fig. 3.5. Proposal model and numerical result ; CASE 2.

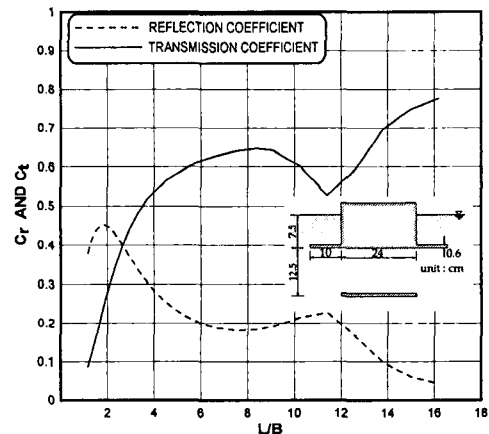


Fig. 3.6. Proposal model and numerical result ; CASE 3.

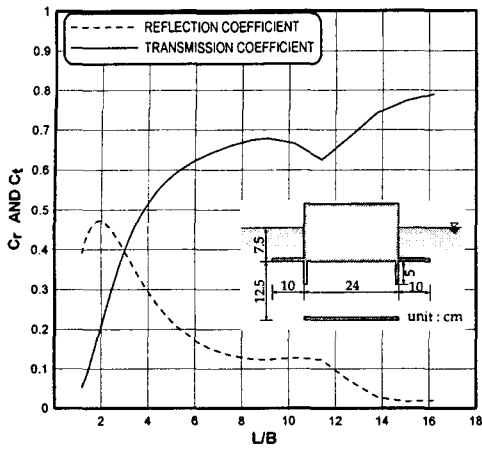


Fig. 3.7. Proposal model and numerical result ; CASE 4.

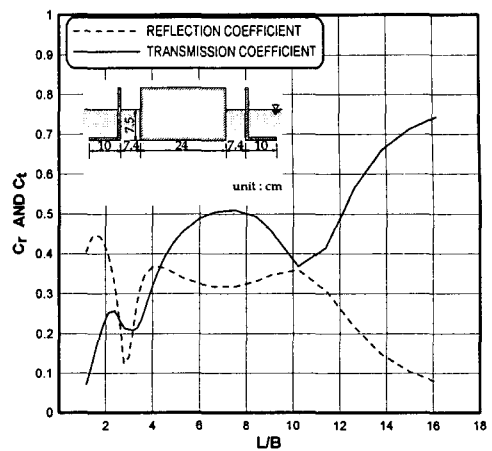


Fig. 3.10. Proposal model and numerical result ; CASE 7.

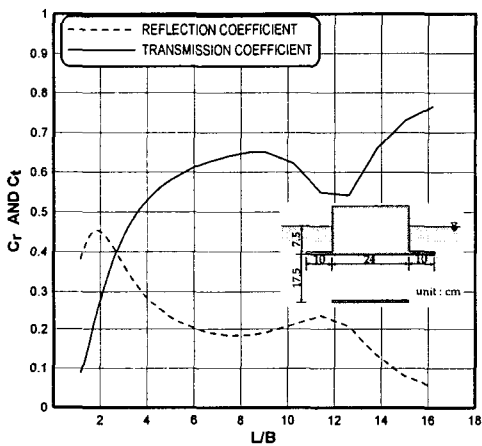


Fig. 3.8. Proposal model and numerical result ; CASE 5.

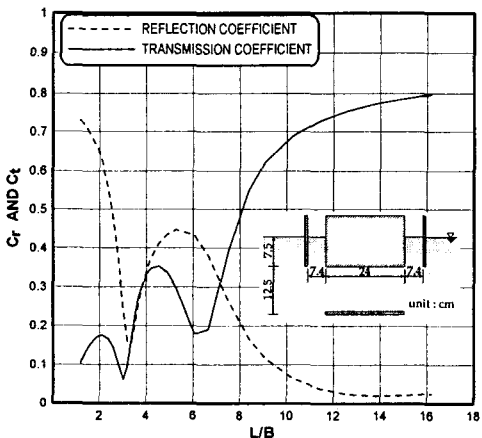


Fig. 3.9. Proposal model and numerical result ; CASE 6.

이하에서는, 원전어항부방과제에 비교하여 Fig. 3.10의 CASE7 모형이 장주기측에서 투과율의 저감에 효과가 있는 것으로 판단되어 동일한 형태에 대해 전후연직판의 간격과 수평판의 길이에 따른 파랑변형과 제어특성을 Fig. 3.11, 3.12, 3.13에서 검토하였다.

Fig. 3.11의 CASE8 모형은 Fig. 3.10의 CASE7의 모형에 비하여 본체와 전후연직판의 간격을 좁게 한 경우로, 결과를 살펴보면 CASE8의 모형이 CASE7의 모형과 비교하여 변화양상은 비슷하지만 전체적으로 투과율이 증가하는 사실을 알 수 있다. 반사율에서는 $L/B = 2.5$ 에서 CASE8의 모형이 $C_r = 0.22$ 의 극소치를 나타내고, CASE7의 모형은 $C_r = 0.13$ 의 값을 나타낸다. 그리고, CASE8의 모형이 CASE7의 모형에 비해 투과율과 반사율이 전체적으로 단주기측으로 이동되었음을 알 수 있다. 여기서, 전후연직판의 간격이 좁을수록 단주기파랑의 제어에 효과가 있음을 확인할 수 있다. 그러므로 장주기파랑의 제어를 위해서는 전후연직판과 본체의 간격을 넓게 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 3.12의 CASE9의 모형은 Fig. 3.11의 CASE8의 모형에서 본체와 전후연직판의 간격을 넓히고, 수평판의 길이를 짧게 한 경우로, 결과를 살펴보면 $L/B = 6$ 에서 투과율의 극소치가 나타나고, $C_t < 0.5$ 의 값을 갖는 영역은 $L/B < 9$ 라는 것을 알 수 있다. 반사율은 $L/B = 3$ 에서 극소치를 나타내지만, $L/B > 6$ 의 영역에서는 L/B 의 증가에 따라 C_r 이 감소된다는 것을 알 수 있다. 원전어항부방과제와 비교하면, 반사율에서는 원전어항부방

파제가 더 좋은 결과치를 보이지만 투과율에서는 $C_t < 0.5$ 의 주기범위가 원전어항부방파제는 $L/B < 6.3$ 의 영역인 것에 비해, CASE9 모형은 $L/B < 9$ 의 영역까지 넓어진 것을 알 수 있다. 또한, 단주기측에서도 원전어항의 경우와 거의 동등한 파랑제어 성능을 가지며 지금까지 검토된 형식 중에서 단주기대 및 장주기대에 걸쳐 가장 우수한 부방파제로 판단된다. 여기서, 보다 장주기파를 제어하기 위해서는 본체와 전후연직판의 간격을 더 넓게 할 필요가 있다.

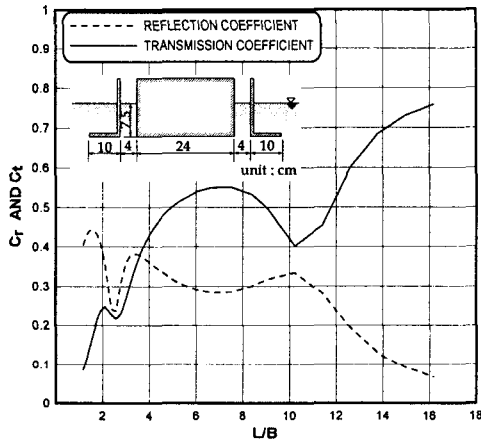


Fig. 3.11. Proposal model and numerical result ; CASE 8.

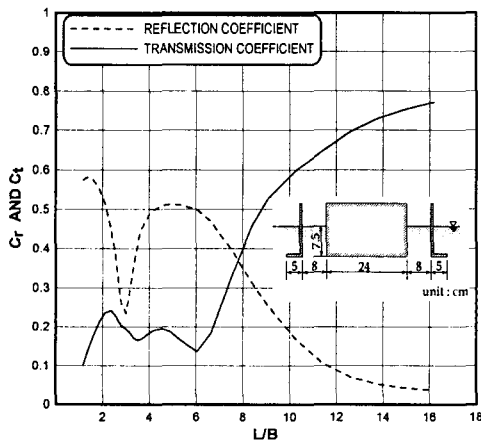


Fig. 3.12. Proposal model and numerical result ; CASE 9.

Fig. 3.13의 CASE10의 모형은 CASE9의 모형에서 본체와 연직판의 간격을 좁힌 경우로써, CASE9의 결과와 비교해 보면, 전체적으로 비슷한 경향을 나타내지만 $2 < L/B < 6$ 의 구간에서 약간 상이하

며, CASE10의 모형은 $L/B = 4$ 에서 $C_t = 0.31$ 의 값을 갖지만, CASE9의 모형은 $C_t = 0.19$ 정도 되는 것을 알 수 있다. 전체적으로 CASE9의 모형에 비해 파랑제어효과가 떨어진다는 것을 알 수 있다.

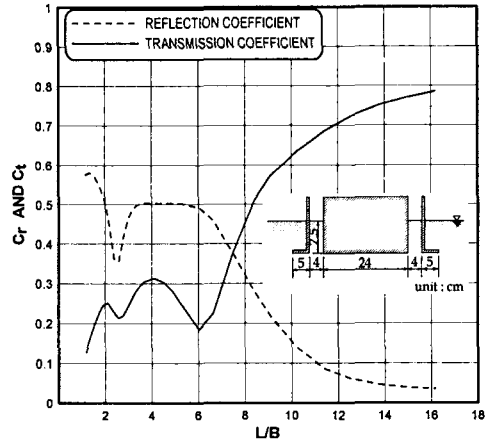


Fig. 3.13. Proposal model and numerical result ; CASE 10.

4. 결론

본 연구에서는 원전어항에 설치되는 강제부방파제의 소요재료량에 비해 증감이 크지 않은 범위내에서 신형식부방파제를 제안하였으며, 연직판과 체체간의 간격, 수평판의 간격과 크기, 그리고 연직판의 형태에 변화를 주면서 원전어항에서 고려하고 있는 강제부방파제와 비교하여 파랑제어 효과를 수치실험으로부터 검토하였다. 이상에서 검토된 각 형식의 부방파제는 원전어항부방파제에 비교하여 장주기측에서는 다소 좋은 파랑제어 능력을 나타내는 경우도 있지만, 원전어항의 설계파랑조건 $4 < L/B < 5$ 의 영역에서는 원전어항의 부방파제 및 Fig. 3.12의 CASE9의 모형이 가장 탁월한 파랑제어기능을 수행한다는 것을 알 수 있다. 그러나, 원전어항부방파제는 $L/B > 5$ 의 장주기파랑에 대해서는 효과를 기대하기 어려운 실정으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서 제안한 Fig. 3.12의 연직판의 하단부에 수평판을 부착한 CASE9의 모형이 단주기파랑에 대해서는 원전어항부방파제와 동등한 정도의 파랑제어 기능을 갖고, 보다 장주기파랑에 대해서는 훨씬 탁월한 파랑제어 능력을 갖는다는 것을 알 수 있었다. 금후에 이와 같은 수치해석결과를 수리모형실험으로부터 검증할 계획에 있다.

참고문헌

- 김도삼, 윤덕영, 허동수, 함계윤, 1997. 약비선형모델에 의한 투과성잠제와 Stokes 2차파와의 비선형간섭에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제17권, 제II-5호, pp. 477-492.
- 마산지방해양수산청, 2002. 원전항건설공사 부방과제 실험보고서.
- John, F., 1950. *On the motions of floating bodies II*, *Comm. Pure Appl. Math.*, Vol. 3, pp. 45-101.
- Sollitt, C.K. and Cross, R.H., 1972. *Wave transmission through permeable breakwater*, *Proc. 13th Coastal Eng. Conf., ASCE*, Vol. III, pp. 1827-1846.
- 日本海事協會, 1983. 係留システム設計指針, pp. 201-217.
- 中村孝幸, 井出善彦, 1977. 減衰坡中における浮体の動搖理論とその適用性に関する研究, *海岸工學論文集*, 第44卷, pp. 856-860.
- 中村孝幸, 高橋和男, 中山和典, 1982. わき出し分布法を用いた2次元物まわりの波形と流力の解析法, *海岸工學論文集*, 第29回, pp. 462-466.
- 中村孝幸, 大森禎敏, 井手善彦, 1996. 浮防波堤の動搖特性に及ぼす波漂流力と減衰力の果について, *海洋開發論文集土木學會*, Vol.12, pp.189-194.
- 中村孝幸, 神野充輝, 西川嘉明, 小野塚 孝, 1999. 渦流れの増大現象を利用した垂下板式の反射波低減工について, *海岸工學論文集*, 第46卷, pp. 796-800.
- 中村孝幸, 高山伸雄, 中山哲殿, 河野 徹, 2002. ピストモード波浪共振を利用する低反射・低透過構造物の海水交換形防波堤の開発, *日本海岸工學論文集*, 第49卷, pp. 661-665.
- 上田, 白石, 1981. カテナリ一理論による最適繫留鎖の選定法および計算圖表, *港灣技術研究所技術資料*, NO.379, pp. 55-65.