

## 신형식 부방파제의 파랑제어에 관한 연구

### A Study of Wave Control by New Type Floating Breakwater

김도삼\* · 이광호\*\* · 최낙훈\*\*\* · 윤희면\*\*\*

Do Sam Kim\*, Kwang Ho Lee\*\*, Nack Hoon Choi\*\* and Hee Myun Yoon\*\*\*

**요 旨** : 본 연구에서는 원전어항에서 채용하고 있는 강제 부방파제에 비해 소요재료량의 변화가 크지 않은 범위에서 전후연직판의 위치와 형식의 변화 및 수평판의 부착 유무에 따른 여러 형식의 부방파제에 의한 투과율과 반사율을 Green 함수법으로부터 계산한 결과에 기초하여, 원전어항의 강제 부방파제보다 단주기파 및 장주기파를 보다 효과적으로 제어할 수 있는 새로운 형식의 부방파제를 검토하였다. 이로부터 연직커튼판 하부에 수평판을 부착한 형태의 부방파제가 파랑제어기능이 우수한 것으로 판명되었고, 이는 원전어항 부방파제보다 파랑제어기능이 탁월하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 본체에 부착된 전후연직판 및 수평판의 크기와 간격을 조절함으로써 적합한 투과파를 얻을 수 있다는 것도 알 수 있었다.

**핵심용어** : 부방파제, 연직판, 수평판, Green 함수법

**Abstract** □ In this study, several new types of floating breakwater are proposed according to the geometry of the vertical barrier and the existence of horizontal plate, and are compared to the steel floating breakwater adopted in Won-Jun fishing port and the performance of wave control is numerically investigated by using Green function method. From the numerical results, model attached the horizontal barrier under the vertical barrier is more efficient for reflection and transmission coefficient than the steel floating breakwater in Won-Jun fishing port. It is confirmed that the transmitted waves can be controlled efficiently by optimizing the length and distance of a vertical and horizontal barriers.

**Keywords** : floating breakwater, vertical barrier, horizontal barrier, Green function method

## 1. 서 론

최근, 해안환경 및 건설비 측면 등에서 많은 이점을 가지는 부방파제에 관한 연구가 국내·외적으로 널리 수행되고 있으며, 일본과 같은 외국에서는 실해역에 많이 시공되어 100여곳의 어항에 건설실적을 쌓고 있다. 국내에서도 현재 마산시 원전어항에 부방파제를 처음으로 도입·시공계획 중에 있다(마산지방해양수산청, 2002; 포스코건설, 2003).

부방파제는 파랑에너지가 집중되어 있는 자유수면에서 수면하 20%정도에 부체를 띄워 고정시의 부체에 의한 회

절산란파와 동요시의 부체에 의한 발산파와의 위상차로 파랑을 제어하는 것이 일반적인 제어형식(반사형식)이다. 부방파제의 장점은 무엇보다 대수심해역에 적합하고, 해수 흐름을 방해하지 않아 항내오염을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 지진의 피해를 최소한으로 줄일 수 있고, 연약지반 상에서도 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, 폰툰형부

\*한국해양대학교 토목환경시스템공학부(Division of Civil and Environmental System Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea. kimds@hanara.kmaritime.ac.kr)

\*\*名古屋大學 대학원(Graduate school, Nagoya University)

\*\*\*한국해양대학교 대학원(Graduate school, Korea Maritime University)

방파제는 내습파를 외해로 반사시킴으로써 투과파를 저감하기 때문에 충분한 크기의 자중이 요구되고 부방파제 폭의 3배 정도 이하의 비교적 단파장의 파에 대해서만 유효한 것으로 알려져 있다. 따라서, 원전어항의 경우에는 폰툰형부방파제의 단점인 고반사성 및 장주기파에 대한 고투과성을 효과적으로 제어할 수 있고, 와류 등에 의한 파랑에너지의 소산을 도모하는 커튼식 부방파제(中村 등, 1999)를 적용하고 있다.

본 연구에서는 원전어항에서 채용하고 있는 부방파제에 비해 소요재료량의 변화가 크지 않은 범위에서 커튼판의 위치와 형식의 변화 및 수평판의 부착 유무에 따른 여러 형식의 부방파제에 대해 투과율과 반사율을 Green 함수법으로부터 계산한다. 파랑제어방식으로서 단주기 파 및 장주기파를 어느 정도로 제어할 수 있는 폰툰형 부방파제의 반사방식에 파랑에너지의 소산방식을 부가한 것이다. 그리고, 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. 이론 해석법

### 2.1 감쇠파이론의 해석모델

Fig. 1에 나타난 부방파제의 주변 파동장을 영역 I에서 영역 III까지 세 영역으로 분할한다. 여기서, 수심은 각 영역에서 상이하더라도 관계없다. 영역 I은 입사파와 회절산란파(반사파)가 공존하며, 영역 III은 회절산란파(투과파)만이 존재하는 영역으로 각각 비감쇠영역으로 한다. 영역 II는 구조물에 의한 마찰, 흐름의 박리 및 와류 등으로부터 발생하는 에너지소산이 존재하므로 에너지소산을 근사

적으로 고려하기 위해 감쇠파영역으로 설정된다(中村 등, 1999).

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).

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

여기서,  $v$ 는 유속벡터,  $p$ 는 유체압력,  $\rho$ 는 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $f_c$ 는 선형저항계수,  $\omega$ 는 각진동수( $=2\pi T$ ,  $T$ 는 주기),  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial z)$ 이다.

영역 I에서 입사파의 속도포텐셜  $\Phi_0$ 는 입사파가  $x$ 축의 (+)방향으로 진행한다고 가정하면, 식 (2)와 같이 주어진다.

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

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

### 2.2 파랑 경계치문제

#### 2.2.1 회절산란파

부방파제가 감쇠파영역인 영역 II의 파동장 중에 고정된 경우에 회절산란파 문제를 고려한다. 유체를 비압축성의 비회전운동으로 가정하면, 각 영역에서 속도포텐셜  $\Phi_j$  ( $j = I, II, III$ )을 정의할 수 있고, 기초방정식은 다음의 Laplace 방정식으로 주어진다.

$$\frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial z^2} = 0 \quad (j = I, II, III) \quad (3)$$

입사파가 직접적으로 존재하는 영역 I에서의 속도포텐

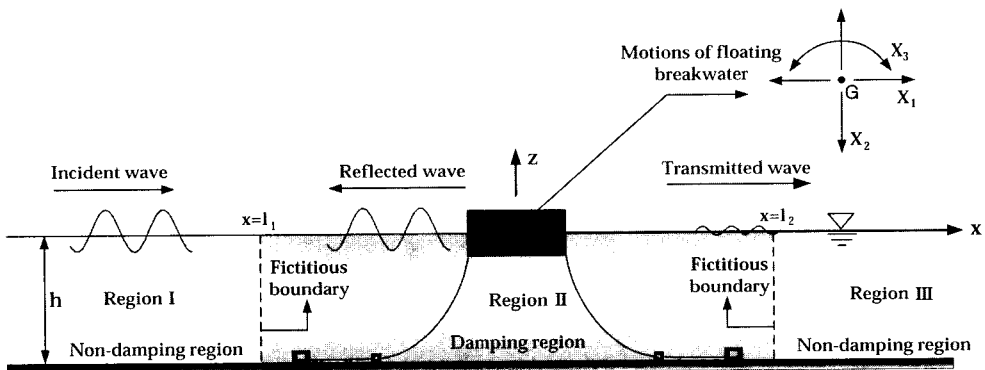


Fig. 1. Fluid regions and model for analysis.

설은 입사파와 회절산란파  $\Phi_0$ 와  $\Phi_{DI}$ 의 합인  $\Phi_I = \Phi_0 + \Phi_{DI}$ 로 표현되고, 영역 II, III에서의 속도포텐셜은 회절산란파만으로  $\Phi_{II, III} = \Phi_{DII, DIII}$ 로 표현된다.

부체가 유체영역 II에만 있다고 하면, 속도포텐셜  $\Phi_j$  ( $j=I, II, III$ )에 관한 경계조건은 다음의 식들로 구성된다.

- surface boundary condition on the fixed structure:

$$\left. \frac{\partial \Phi_j}{\partial n} \right|_{S_B} = 0 \quad (j=II) \quad (4)$$

- free water surface boundary condition:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = -(1+if_c) \left( \frac{1}{g} \right) \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial t^2} \right|_{z=0} & (j=II) \\ \left. \frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = - \left( \frac{1}{g} \right) \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial t^2} \right|_{z=0} & (j=I, III) \end{cases} \quad (5)$$

- sea bottom boundary condition:

$$\left. \frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = 0 \right|_{z=-h} \quad (j=I, II, III) \quad (6)$$

여기서,  $S_B$ 는 구조물의 표면,  $\partial/\partial n$ 는 수중부체표면에서의 외향법선미분을 각각 나타낸다.

### 2.2.2 발산파

다음으로, 입사파가 작용하지 않은 조건하의 영역 II에서 부체가 동요하는 경우의 발산파를 고려한다. 부체가 파의 작용에 의해 그 무게중심  $G(x_G, z_G)$ 를 중심으로 하여 Fig. 1에 나타내는 각 운동모드방향으로 식 (7)과 같이 미소단진동하는 경우를 고려한다.

$$X_m(t) = \hat{X}_m e^{-i\omega t} \quad (m=1, 2, 3) \quad (7)$$

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, 영역 II에서 발산파의 속도포텐셜  $\Phi_{RII}$ 가 만족하여야 하는 운동학적 경계조건은 식 (8)로 표현된다.

$$\left. \frac{\partial \Phi_{RII}}{\partial \xi} \right|_{S_B} = \frac{\partial X_1}{\partial t} \xi_1 + \frac{\partial X_2}{\partial t} \xi_2 + \frac{\partial X_3}{\partial t} \xi_3 \quad (8)$$

여기서,  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 는 다음의 식으로 정의되며,  $n_x = dx/dn$ ,  $n_z = dz/dn$ 을 나타낸다.

$$(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = [n_x, n_z, n_x(Z-Z_G) - n_z(X-X_G)/R_B] \quad (9)$$

여기서,  $R_B$ 는 부체의 대표길이를 나타낸다.

또한, 발산파포텐셜  $\Phi_{RII}$ 는 선형경계치문제를 만족하고 있으므로 각각의 동요모드로 나누어서 취급할 수 있고, 최종적으로 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$\Phi_{RII} = \sum_{m=1}^3 (\Phi_{Rm})_{II} X_m \quad (10)$$

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

### 2.2.3 접속조건

본 해석모델은 각 영역에서 속도포텐셜을 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.

$$\begin{cases} \Phi_0 + \Phi_I = (1+if_c) \Phi_{II} \Big|_{x=l_1} \\ \frac{\partial(\Phi_0 + \Phi_I)}{\partial n_I} = \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial n_{II}} \Big|_{x=l_1} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Phi_{III} = (1+if_c) \Phi_{II} \Big|_{x=l_2} \\ \frac{\partial \Phi_{III}}{\partial n_{III}} = \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial n_{II}} \Big|_{x=l_2} \end{cases} \quad (12)$$

여기서,  $\partial/\partial n_j$ 는 각 영역  $j=I, II, III$ 의 경계면에서 내향법선미분을 나타낸다.

### 2.2.4 부방파제의 운동방정식

부방파제의 동요변위를 구하기 위해서는 부체에 작용하는 동적인 힘에 의한 운동방정식이 필요하게 된다. 수중부체표면에 작용하는 변동압력  $p$ 는 식 (1)의 공간적인 적분을 고려하여 얻어지는 식 (13)으로부터 산정될 수 있다.

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial t} - \rho f_c \omega \Phi_{II} \quad (13)$$

동요부체에 작용하는 유체력은 압력  $p$ 의 작용방향을 고려하여 표면적분함으로써 식 (14)와 같이 구해진다.

$$F_\alpha = i\rho\omega \int_{S_B} (1+if_c) \Phi_{DII} \xi_\alpha ds + \sum_{m=1}^3 \rho\omega^2 X_m (1+if_c) \int_{S_B} (\Phi_{Rm})_{II} \xi_\alpha ds \quad (\alpha=1,2,3) \quad (14)$$

여기서, 아랫첨자  $\alpha$ 는 운동방향모드의 방향을 나타낸다.

그리고, 식 (14)의 우변 제1항은 정적평형시의 부체에 작용하는 파강제력을, 제2항은 동유체력을 나타내며, 이를 각각  $F_\alpha^E$ 와  $F_\alpha^R$ 로 표기한다. 제2항의 실수부는 부가질량력으로, 허수부분은 조파감쇠력으로 알려져 있으며, 이를 각각  $\mu_{\alpha m}$ 와  $D_{\alpha m}$ 으로 표기하는 것으로 한다. 식 (14)로부터 알 수 있는 바와 같이 파랑의력에는 선형저항이 관계하고 있고, 이 영향이 항력을 근사적으로 나타내는 것으로 된다. 따라서, 최종적으로 부체의 운동방정식은 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$(M + \mu) \frac{d^2 X}{dt^2} + D \frac{dX}{dt} + (C + K)X = F^E \quad (15)$$

여기서,  $X$ 는 부체의 동요벡터,  $M$ 은 관성모멘트를 포함하는 질량 매트릭스,  $D$ 는 조파감쇠 매트릭스,  $C$ 는 정수역학적 복원력 매트릭스,  $K$ 는 계류라인의 선형스프링상수 매트릭스,  $F^E$ 는 파강제력 매트릭스를 각각 나타낸다.

2.2.5 Green 함수법에 의한 해석

미지포텐셜인  $\Phi_D$ ,  $\Phi_{Rm}$ 의 산정에는 식 (16)과 같은 Green 함수를 핵함수로 하는 Green 함수법을 적용한다.

$$\Phi(\eta, \zeta) = \int_{S_b} f(\eta, \zeta) G(x, z; \eta, \zeta) dS(\eta, \zeta) \quad (16)$$

여기서,  $f(\eta, \zeta)$ 는 물체표면 및 접촉경계면 ( $\eta, \zeta$ )에 분포되는 특이점강도의 분포함수,  $G$ 는 Green 함수, ( $x, z$ )는 파랑포텐셜을 구하는 유체중의 일반점,  $S$ 는 각 영역에 포함되는 물체표면 및 접촉경계면에서 구성되는 경계선 영역이다. 여기서,  $G$ 는 식 (17)과 같이 주어진다(中村 등, 1982, 1996)

$$G(x, z; \eta, \zeta) = - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{i(u_n^2 - \lambda^2)}{u_n \{ (u_n^2 - \lambda^2)h + \lambda \}} \cosh u_n(h+z) \cosh u_n(h+\zeta) e^{iu_n(x-\eta)} \quad (17)$$

여기서,  $n=0$ 의 경우에  $u_0=k$ ,  $n \geq 1$ 의 경우에  $u_n = ik_n$ 으로 주어지고,  $k_n$ 은 소멸파의 파수,  $\lambda$ 는 다음의 식 (18)로 주어진다.

$$\lambda = \frac{\omega^2}{g} (1 + if_c) = u_n \tanh(u_n h) \quad (18)$$

따라서, 비감쇠영역인 영역 I과 III에서는 식 (18)에서  $f_c=0$ 으로 한 경우에 상당하는 Green 함수를 적용할 수 있고, 이는 John(1950)에 의해 유도된 Green 함수와 동일한 결과를 나타낸다. 구체적인 산정에서는 특이점강도의 분포함수  $f(\eta, \zeta)$ 가 미지수로 되며, 이는 식 (4), (8)의 운동학적인 경계조건 및 식 (11), (12)의 접촉조건을 사용하여 결정될 수 있다. 또한, 이와 같은 해석법에 있어서 감쇠파영역의 크기 및 선형저항계수의 설정에 대하여서는 中村와 井出(1997)에 의해 제시된 값에 준하여 감쇠파영역의 크기는 부체의 양측면으로부터 바다측과 해안측으로 입사파장의 1/8까지의 수역으로 설정하였으며, 선형저항계수는 中村와 井出(1997)에 의한 수리실험결과와 수치해석결과와의 비교로부터 얻어진 최적의 값  $f_c=0.15$ 를 채용하였다.

2.3 선형스프링상수의 산정

부체측의 계류점이 크게 이동하여 catenary 라인의 형상이 직선에 가까운 형태로 되면 강한 비선형성의 반력 특성을 나타내지만, 부체계류점의 이동이 비교적 적은 경우에는 계류라인을 등가선형스프링으로 근사하여 취급할 수 있다. 그리고, 계류라인은 부체의 이동방향에 따라 Fig. 2와 같은 2개의 상태로 된다. Fig. 2(a)와 같이 부체측의 계류점이 A점에서 B점으로 이동한 경우는 라인과 해저가 접하는 부분이 없어지고, Fig. 2(b)와 같이 이동하면 라인과 해저가 접하는 부분이 형성된다. 여기서는 계류라

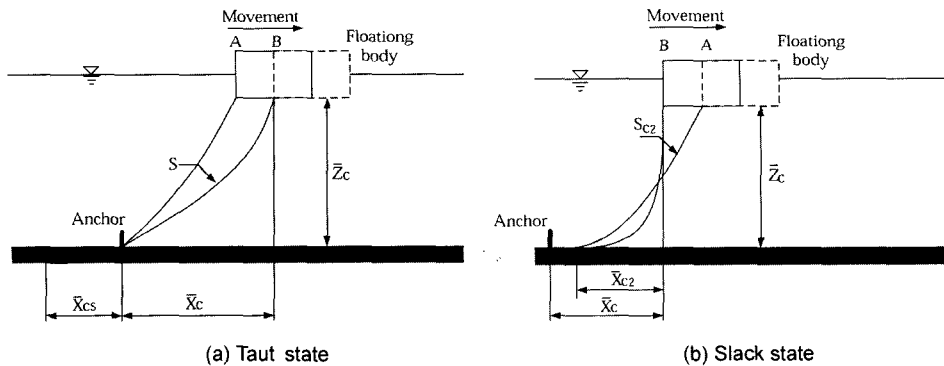


Fig. 2. Two conditions of mooring line caused by the movement of floating body.

인 1줄의 선형스프링상수를 라인과 해저가 접하는 부분의 유무로 나누어 고려하며, 각각에 대한 선형스프링상수의 값은 다음의 식으로 주어진다(日本海事協會, 1983).

· 라인과 해저가 접하는 부분이 없는 경우

$$\begin{cases} K_{HH} = w \frac{\sinh D}{D \sinh D - 2(\cosh D - 1)} \\ K_{HV} = K_{VH} = \frac{w(\cosh D - 1) \cosh U + \sinh D \sinh U}{D \sinh D - 2(\cosh D - 1)} \\ K_{VV} = w \frac{D \sinh U \cosh(U + D) - \sinh D}{D \sinh D - 2(\cosh D - 1)} \end{cases} \quad (19)$$

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

$$\begin{cases} D = w \frac{\bar{x}_c}{T_H} \\ U = w \frac{\bar{x}_{cs}}{T_H} \end{cases} \quad (20)$$

· 라인과 해저가 접하는 부분이 있는 경우

$$\begin{cases} K_{HH} = w \frac{\sinh D}{D \sinh D - 2(\cosh D - 1)} \\ K_{HV} = K_{VH} = w \frac{\cosh D - 1}{D \sinh D - 2(\cosh D - 1)} \\ K_{VV} = w \frac{D \cosh D - \sinh D}{D \sinh D - 2(\cosh D - 1)} \end{cases} \quad (21)$$

여기서,  $D$ 는 식 (22)로 정의된다.

$$D = w \frac{\bar{x}_{c2}}{T_H} \quad (22)$$

따라서, 부방파제가 정적평형상태에 있는 것으로 가정하면, 계류계 전체의 스프링상수  $K_{ij}$ 는 다음의 식으로부터 산정될 수 있다.

$$\begin{cases} K_{11} = \sum_{k=1}^n (K_{HH})_k \\ K_{12} = K_{21} = \sum_{k=1}^n (K_{HV})_k \\ K_{13} = K_{31} = \sum_{k=1}^n \{K_{HV}(\bar{z}_E - z_G) - K_{HV}(\bar{x}_E - x_G)\}_k \\ K_{22} = \sum_{k=1}^n (K_{VV})_k \\ K_{23} = K_{32} = \sum_{k=1}^n \{K_{HV}(\bar{z}_E - z_G) - K_{VV}(\bar{x}_E - x_G)\}_k \\ K_{33} = \sum_{k=1}^n \{K_{HH}(\bar{z}_E - z_G)^2 - K_{HV}(\bar{z}_E - z_G)(\bar{x}_E - x_G) \\ + K_{VV}(\bar{x}_E - x_G)^2\}_k \end{cases} \quad (23)$$

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

### 3. 계산결과 및 고찰

#### 3.1 해석결과의 타당성 검토

이상과 같이 catenary로 계류된 부방파제의 파랑변형 해석에 적용한 Green 함수법의 해석결과를 검증하기 위하여 폰툰형 부방파제에 의한 파랑변형의 실험치를 제시하고 있는 中村와 井出(1997)의 실험결과를 비교한 것이 다음의 Fig. 3에 주어져 있다. 그림의 수치해석결과는 전술한 선형저항계수  $f_c$ 를  $f_c = 0$ 로 한 경우와  $f_c = 0.1$ 로 한 경

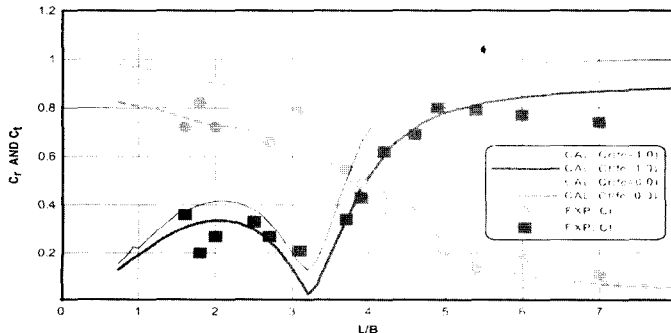


Fig. 3. Comparison of the present numerical results and experimental ones for the pontoon typed floating breakwater.

우를 동시에 나타내고 있다. 그림으로부터  $L/B$ ( $L$ : 입사파장,  $B$ : 부방파제의 폭)의 변화에 따른 투과율과 반사율의 변화과정은 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있고, 또한  $f_c = 0$ 의 경우는 단주기측의 반사율과 장주기측의 투과율에서 각각 수치해석결과가 다소 큰 값을 나타내지만,  $f_c = 0.1$ 의 경우는 실험치와의 대응성이 매우 향상되어 실험치를 정도 높게 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 수치해석결과의 타당성을 확인할 수 있는 것으로 판단된다.

**3.2 부방파제의 모형**

Fig. 4에 나타내는 기본형(폰툰형) 부방파제를 기초로 연직판 혹은 수평판을 부가한 여러 모형에 대해 수치해석을 실시하였다. 기본형 부방파제의 제원을 Table 1에 나

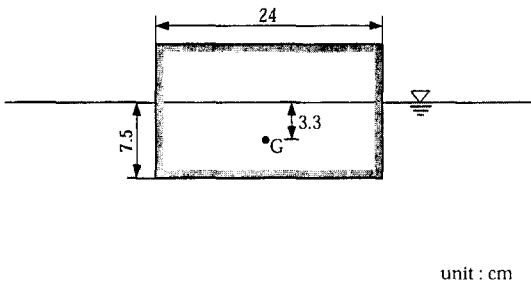


Fig. 4. Standard floating breakwater model.

Table 1. The characteristics of standard floating breakwater model

Width	24.0 cm
Draft	7.50 cm
Center of gravity	3.30 cm
Gyration	10.23 cm
Weight	19.90 kg
Inertia Moment	2083.0 kg · cm <sup>2</sup>

타내며, 후술하는 제안 모형들의 무게중심과 질량 및 관성모멘트는 기본형 부방파제와 큰 차이는 없고, 계류형태는 Fig. 5에 나타나고 있는 기본형 부방파제와 동일한 것으로 가정한다.

**3.3 원전어항 부방파제에 대한 수치해석의 결과**

Fig. 6은 원전어항에 채용된 부방파제의 모형과 투과율  $C_t$  및 반사율  $C_r$ 에 대한 결과로, 결과에서는 선형저항계수를 수리실험에서 가장 적합한 것으로 검토된  $f_c = 0.15$ 로 채택하고 있다. 이는 전통한 폰툰형의 부방파제에서  $f_c = 0.1$ 보다 큰 값이며, 폰툰형상보다 파랑에너지의 소산을 보다 크게 유도할 수 있는 연직판과 수평판을 설치하고 있기 때문이다. 따라서, 후술하는 여러 제안 모형에 대해서도 동일한  $f_c = 0.15$ 를 채용하는 것으로 하였다.

수치해석결과를 보면,  $L/B = 4.5$  부근에서 투과율의 극소치가 나타나고, 부방파제의 효과여부를 판단하는  $C_r < 0.5$ 의 영역은  $L/B < 6.4$ 이라는 것을 알 수 있다. 반사율은  $L$

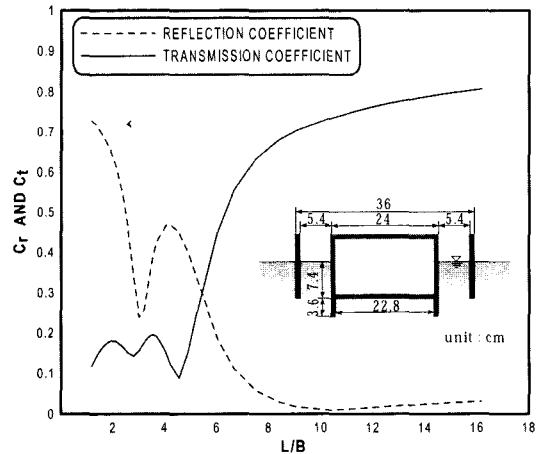


Fig. 6. Floating breakwater in Won-Jun fishing port.

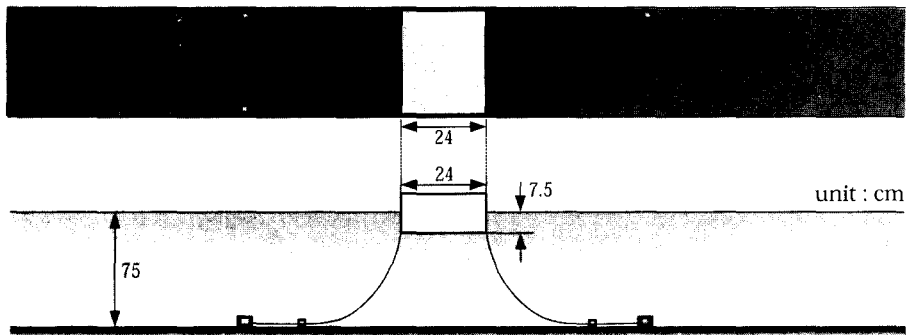


Fig. 5. Mooring system.

$B=3.0$  부근에서 일단 저하하는 경향을 나타내지만,  $L/B > 4.0$ 의 영역에서는  $L/B$ 의 증가에 따라  $C_r$ 이 감소한다는 것을 알 수 있다. 여기서,  $L/B=3.0$ 에서 극소치를 나타내는 것은 부체와 전후커튼판 사이의 유수실 내에서 피스톤모드의 파랑공진에 따른 강한 와류의 발생에 의해 회절산란파가 소산되기 때문으로 판단된다(中村 등, 2002). 전체적으로  $L/B < 5.0$ 의 단주기파 영역에서는  $C_r < 0.2$ 로 되어 매우 뛰어난 파랑제어 능력을 갖는 것으로 판단된다.

**3.4 제안모형 및 수치해석의 결과**

Fig. 7의 CASE-I 모형은 원전어항에서 적용하고 있는 모형에서 부체 전후의 커튼판 대신에 부체 하부에 수평판과 저부에 본체와 동일한 운동을 하지만 부체로부터 독립된 수평판을 각각 부착한 경우로, 수평판상의 많은 유체로 인한 큰 유체저항력을 얻기 위하여 고안된 형상이다. 이의 해석결과를 살펴보면, 투과율  $C_t$ 는  $L/B < 9.0$ 인 영역에서 0.65까지 계속 증가하다가  $L/B=11.3$  부근에서 약간 감소하며,  $L/B$ 의 증가에 따라 다시 상승하는 결과를 나타내고 있다. 원전어항의 부방파제와 비교하면,  $L/B=11.3$  부근의 장주기파에서 투과율이 많이 감소하지만,  $L/B < 8.0$ 의 단주기파에서는 보다 큰 투과율을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 따라서, 수평판은 부체폭을 길게 하는 효과를 주어 장주기파랑의 제어를 개선하고, 원전어항의 부방파제에서 채택하는 커튼판은 보다 단주기파랑의 제어에 역할을 수행하는 것으로 판단된다. 그러나, 이상의 계산결과로부터 장주기파랑에서 원전어항의 경우보다 투과율이 떨어지지만,  $L/B > 3.5$ 인 대부분의 장주기파 영역에

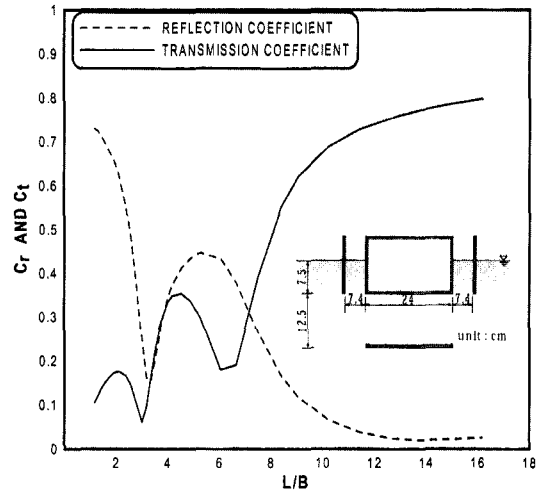


Fig. 8. Proposed model and numerical result; CASE-II.

서  $C_r > 0.5$ 를 나타내므로 만족스럽지 않다.

Fig. 8의 CASE-II 모형은 Fig. 7의 CASE-I 모형에서 전술한 단주기파랑의 파랑제어능력을 향상시키기 위하여 본체 전후의 수평판 대신에 커튼판을 부가한 것이다. 수치해석결과를 보면, 원전어항의 부방파제와 비슷한 변화양상을 나타내며, CASE-I의 경우보다 단주기파에서 많이 개선된 효과를 나타낸다. 따라서, 부방파제의 파랑제어효과 유무를 판단하는  $C_r < 0.5$ 의 영역이  $L/B < 8.0$ 까지 크게 확장된 결과로, 이는 원전어항의 경우와 비교하면, 단주기영역이 확장된 결과이다. 그러나, 장주기파의 파랑제어라는 관점에서 그의 능력이 CASE-I 모형보다 떨어지며, 전체적으로 다소 미흡한 것으로 판단된다.

이상의 CASES-I, II 모형의 검토로부터 연직커튼판은 단주기파랑의 제어에 영향을 미치고, 본체 하부의 전후로 부착된 수평판은 장주기파랑의 제어에 영향을 미치는 것으로 판단되는 반면에, 저부의 독립된 수평판의 역할은 상대적으로 적은 것으로 판명된다.

Fig. 9의 CASE-III 모형은 CASES-I, II에서 적용된 저부의 독립된 수평판 대신에 전후연직판 하부에 수평판을 부착한 것으로, 단주기 및 장주기파랑의 제어를 도모하려고 한 모형이다. 해석결과를 살펴보면, 투과율은  $L/B$ 의 증가에 따라  $L/B=3.0$  부근에서  $C_t=0.22$ 정도의 극소치를 나타내고,  $C_t=0.51$ 까지 증가하다가  $L/B=10.0$  부근에서  $C_t=0.37$ 까지 감소한 후, 다시 증가하는 결과를 나타낸다. 반사율은  $L/B=3.0$ 에서 극소치를 나타내고,  $4.0 < L/B < 10.0$ 의 구간에서  $C_r=0.33$ 정도로 거의 일정한 값을 나타낸 후,  $L/B > 10.0$ 의 영역에서 감소하는 결과를 나타내고 있다. 원전어항 부방파제

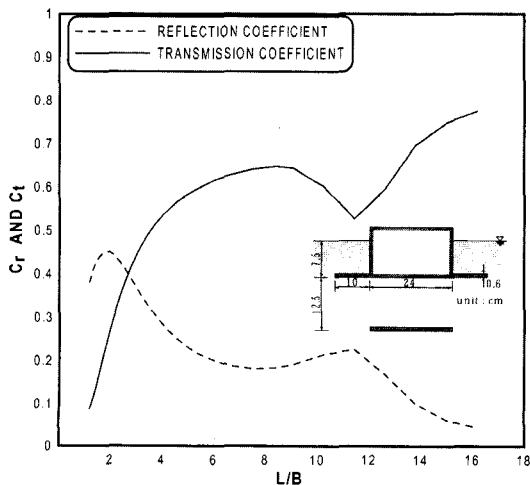


Fig. 7. Proposed model and numerical result; CASE-I.

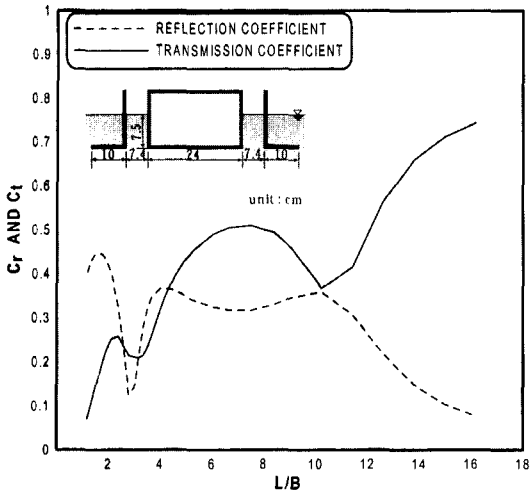


Fig. 9. Proposed model and numerical result; CASE-III.

에서  $C_r = 0.5$ 의 범위가  $L/B < 6.4$ 의 영역인 것에 비해 CASE-III의 모형은  $L/B < 12$ 의 영역으로, 보다 장주기파의 영역까지 투과파의 제어효과가 있으며, CASES-I, II 모형과 비교하여도 매우 개선된 결과를 나타내는 것으로 판단된다.

이하에서는, 원전어항 부방파제 및 다른 형태의 부방파제에 비교하여 Fig. 9의 CASE-III 모형이 넓은 주기영역에서 투과율의 저감에 효과가 있는 것으로 판단되어, 동일한 형태에 대해 전후커튼판 간격과 수평판 길이의 변화에 따른 파랑변형과 그의 제어특성을 검토한다.

Fig. 10의 CASE-III(a) 모형은 CASE-III 모형에 비하여 본체와 전후커튼판의 간격을 보다 좁게 한 경우이다. 결과를 살펴보면, CASE-III(a) 모형의 파랑변형은 CASE-

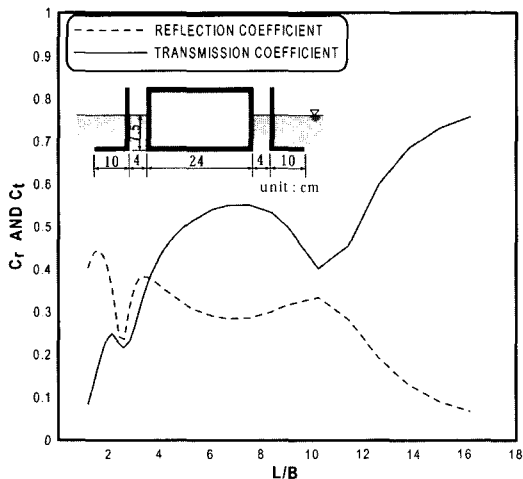


Fig. 10. Proposed model and numerical result; CASE-III(a).

III의 경우와 비교하여 그의 변화양상은 유사하지만 전체적으로 투과율이 증가하는 사실을 알 수 있다. 반사율에서는  $L/B = 2.5$ 에서 CASE-III(a)의 모형이  $C_r = 0.24$ 의 극소치를 나타내고, CASE-III의 모형은  $C_r = 0.13$ 의 값을 나타낸다. 그리고, 파랑변형의 극대치 및 극소치의 발생 위치로 보아 CASE-III(a)의 모형이 CASE-III의 모형에 비해 투과율과 반사율이 전체적으로 약간 단주기적으로 이동되었음을 알 수 있다. 이로부터 전술한 바와 같이 전후커튼판의 간격이 좁을수록 단주기파랑의 제어에 효과가 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 장주기파랑의 제어를 위해서는 전후커튼판과 본체의 간격을 넓게 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 11의 CASE-III(b)의 모형은 CASE-III(a)의 모형에서 커튼판의 하부에 부착된 수평판의 길이를 반으로 짧게 한 경우의 모형이다. 해석결과로부터 CASE-III(b)의 모형은 CASE-III(a)와는 매우 상이하고, 원전어항 부방파제의 Fig. 6과는 매우 유사한 변화양상을 나타내는 것을 알 수 있다. 이로부터 CASE-III(b) 모형에서 수평판의 역할은 연직커튼판의 경우보다 매우 적다고 볼 수 있고, 이는 그의 폭이 짧기 때문인 것으로 여겨진다. 여기서, 원전어항 부방파제의 경우와 비교하면, 단주기측에서 투과율이 원전어항의 경우가 작지만,  $C_r < 0.5$ 인 영역은 CASE-III(b) 모형에서  $L/B < 8.4$ 이므로 원전어항  $L/B < 6.4$ 보다는 넓은 것을 알 수 있다. 따라서, CASE-III(b)의 부방파제에도 원전어항 부방파제의 대체효과가 있는 것으로 판명된다.

Fig. 12의 CASE-III(c)의 모형은 Fig. 10의 CASE-III(b)의 모형에서 수평판의 길이는 동일하게 유지하면서 본체와 전

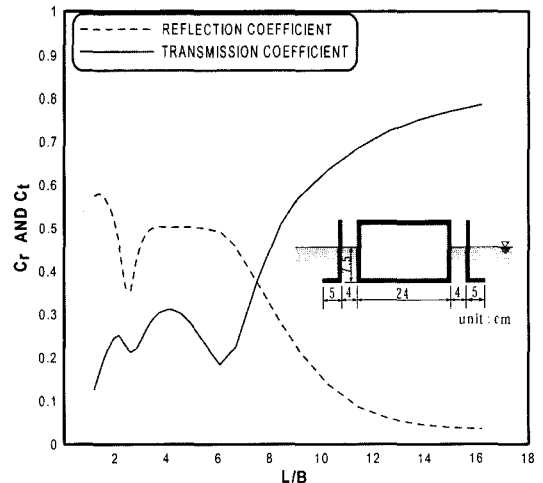


Fig. 11. Proposed model and numerical result; CASE-III(b).



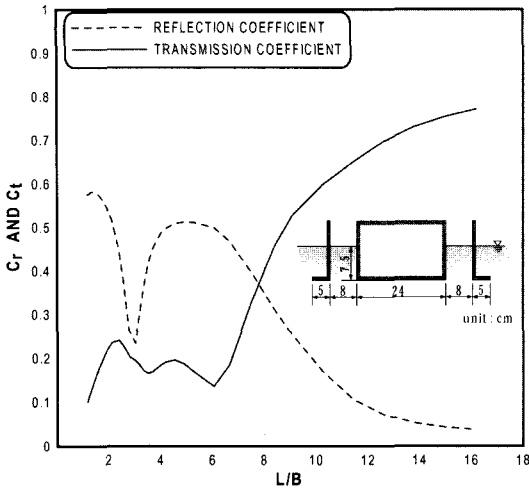


Fig. 12. Proposed model and numerical result; CASE-III(c).

후커튼판의 간격을 넓게 한 경우이다. 결과를 살펴보면,  $L/B=6.0$ 에서 투과율의 극소치를 나타내는 등의 전체적인 변화양상은 CASE-III(b)의 경우와 매우 흡사하다. 그러나, 단주기축 및 장주기축에서 투과율이 보다 작은 값을 나타내고, 단주기축에서는 원전어항의 경우와 거의 동등한 값인 것을 알 수 있다. 또한,  $C_r < 0.5$ 의 값을 갖는 영역이  $L/B < 8.9$ 로 되어, CASE-III(b)의 경우보다는 다소 개선된 결과를 나타내고 있다.

이상으로부터 검토된 CASES-III, CASE-III(a), (b), (c)의 부방파제 중에서 장주기파랑에 대해서는 CASE-III의 부방파제가, 단주기파랑에 대해서는 CASE-III(c)의 부방파제가 파랑제어기능이 탁월하다는 것을 알 수 있지만, CASE-III의 모형에서 보다 합당한 부방파제의 형상을 도출하기 위해서는 수평판과 커튼판의 크기 및 간격을 보다 많이 변화시켜 검토할 필요가 있을 것이다. 더불어, 이는 현장의 특성과 결부시켜 검토되어야 할 문제로 판단된다.

#### 4. 맺음말

본 연구에서는 원전어항에 설치되는 강제 부방파제의 소요재료량에 비해 증감이 크지 않은 범위 내에서 반사방식에 파랑에너지 소산방식을 부가한 신형식 부방파제를 제안하여, 폰툰형의 본체에 부착한 커튼판과 부체간의 간격, 수평판의 간격과 크기 등을 변화시키면서 파랑변형을 Green 힘수법으로부터 해석하였고, 원전어항에서 고려하고 있는 강제 부방파제의 파랑제어기능과 비교·검토하였다. 검토된 부방파제의 형식 중에서 CASE-III의 형식을 갖

는 부방파제가 전반적으로 파랑제어기능이 가장 우수하며, 이 중에서 CASE-III(c)의 부방파제는 원전어항의 설계파랑 조건  $4.0 < L/B < 5.0$ 의 영역에서 원전어항의 부방파제와 동등한 정도의 파랑제어능력을 가질 뿐만 아니라, 장주기축에서는 보다 우수한 파랑제어기능을 갖는다는 것을 알 수 있었다. 또한, CASE-III, CASE-III(a)의 부방파제는  $C_r < 0.5$ 의 영역이  $L/B < 12.0$ 로 되어 상당히 넓은 주기영역에 걸쳐 파랑제어기능을 발휘한다는 것도 확인 할 수 있었다.

금후에 CASE-III 부방파제에 대해 현장특성과 결부시켜 본체에 부착된 커튼판 및 수평판의 크기와 간격 등을 조절하고, 이에 따른 파랑변형특성을 명확히 합과 동시에 수리모형실험으로부터 검증할 계획에 있다.

#### 참고문헌

김도삼, 윤덕영, 허동수, 함계윤, 1997. 약비선형모델에 의한 투과성잡제와 Stokes 2차파와의 비선형간섭에 관한 연구, **대한토목학회논문집**, 17(II-5): 477-492.

미산지방해양수산청, 2002. 원전항간실험공사 부방파제실험보고서.

John, F., 1950. On the motions of floating bodies II, *Comm. Pure Appl. Math.*, 3, pp. 45-101.

Sollitt, C.K. and Cross, R.H., 1972. Wave transmission through permeable breakwater, *Proc. 13th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, III, pp. 1827-1846.

日本海事協會, 1983. 係留システム設計指針.

中村孝幸, 井出善彦, 1977. 減衰域中における浮体の動搖理論とその適用性に關する研究, **海岸工學論文集**, 44: 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次元物体まわりの波変形と流体力の解析法, **海岸工學論文集**, 29: 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効果について, **海洋開發論文集 土木學會**, 12: 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**, 46: 796-800.

中村孝幸, 高山伸雄, 中山哲賢, 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**, 49: 661-665.

上田, 白石, 1981. カテナリー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.

Received September 16, 2003

Accepted December 5, 2003