

부유식 방파제의 파랑 차단 성능 제어 Control of Wave Screening Performance of Floating Breakwaters

양우석* · 조원철* · 박우선**

Woo Seuk Yang*, Won Chul Cho* and Woo Sun Park**

요 旨 : 본 논문은 2차원 유한요소모델을 이용한 부유식 방파제의 파랑차단특성에 대한 수치적 연구이다. 유체 영역은 선형화된 2차원유동으로 가정하고, 부유식 방파제의 성능을 분석하기 위하여 유한요소법을 적용하였다. 상자형 부유식 방파제와 두 개의 상자가 일정한 간격으로 연결된 양측 방파제를 대상으로 파랑차단효과 대한 수치 해석을 실시하였다. 긴 주기 파랑의 차단효과를 증대시키기 위한 방안중의 하나로 연직판을 부체 하단에 양측에 부착한 경우에 대한 수치실험을 실시하였다.

핵심용어 : 부유식 방파제, 전달계수, 반사계수, 유한요소법

Abstract □ The numerical investigations on the wave-screening characteristics of floating breakwaters are presented. The fluid motion is idealized as linearized, two dimensional potential flow. A finite element model is adopted to analyze the performance of floating breakwaters. Numerical experiments are carried out for two type floating breakwater. One is a conventional pontoon type breakwater with rectangular cross-section, and the other is a side float breakwater which consists of two rectangular shaped floats connected to each other by a frame. To improve the performance of the floating breakwaters, especially for long-period wave conditions, numerical experiments are carried out for the cases attaching the thin plates at the bottom of floats in the vertical direction.

Keywords : floating breakwater, transmission coefficient, reflection coefficient, finite element method

1. 서 론

최근 육지 환경의 부족, 육상자원의 고갈 및 휴양 시설의 개발에 따라 해양 공간 이용문제가 대두되면서 항만의 연안역 이용이 다변화되고 있다. 해양의 효율적 개발과 사용을 극대화하기 위해 일반적으로 방파제의 설치를 고려할 수 있다. 하지만 기존에 사용하던 착저 중력식 방파제는 수심이 깊어짐에 따라 여러 한계점을 노출하고 있다. 이러한 착저 중력식 방파제는 방파 기능은 탁월한데 비하여 원활한 해수 순환을 저해하여 항내 수질 악화를 야기시킬 뿐만 아니라 해저 퇴적물 이동에도 영향을 미쳐서 항만 매몰 및 해빈 침식 등과 같은 현상의 원인이 되기도 한다. 이를 해결하기 위하여 수심, 해저지반조건

및 육지로부터 거리 등의 제약을 받지 않는 부유식 방파제가 그 대안으로 평가받고 있으며, 여러 가지 형상의 부유식 방파제에 관한 연구가 이루어져 왔다(Frederiksen, 1971; Hales, 1981; Vathamony, 1995). Sutko와 Haden(1974)은 사각형 단면의 방파제가 삼각형, 원형, 사다리꼴 단면보다 나은 파랑 차단효과를 보임을 제시했으며, Carver(1979)는 교차하지 않는 계류선은 소파 특성에 크게 효과를 보이지 않지만, 연직판(vertical barrier plate) 부착은 소파 기능을 향상시킨다고 보고하였다. Veldee(1983)는 전달계수(transmission coefficient)가 파랑 경사보다는 방파제의 길이와 상관성이 있음을 제시하였다. Johanssen(1989)은 포텐셜이론과 수리실험을 통하여 수평내민판(horizontal-protruding bottom-plate)이 장착된 직사각형의 부유식 방

*중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 (Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea)

**한국해양연구원 연안항만공학연구소 (Coastal and Harbor Engineering Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, P.O. Box 29, Ansan 425-600, Korea)

파제가 일반 직사각형 부유식 방파제보다 탁월한 파랑차단 효과가 있음을 보였다. Hales(1981)는 폰툰(pontoon), 경사를 지닌 부유체(sloping float), 페타이어(scrap tire), 원통, 밧줄로 구속된 부유체(tethered float) 등 다섯 가지의 지배적인 부유식 방파제의 성능을 검토하였다.

본 논문에서는 상자형 부유식 방파제와 두 개의 상자가 일정한 간격으로 연결된 양측 방파제를 대상으로 2차원 수치 모델을 사용하여 수치해석을 실시하였다. 방파제의 성능분석을 위하여 파랑차단효과를 가장 잘 나타낼 수 있는 전달계수에 대하여 중점적으로 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 부유식 방파제 운동 방정식

일반적으로 계류선의 복원력을 선형스프링으로 모형화하면 파동장에 놓인 부유식 방파제의 운동방정식은 다음과 같이 주파수 영역에서 나타낼 수 있다.

$$\sum_{k=1}^3 [-\omega^2(m_{jk} + \mu_{jk}) - i\omega(b_{jk} + \lambda_{jk}) + (c_{jk}^b + c_{jk}^m)]\xi_k = F_j^e \quad (1)$$

for $j=1,2,3$

여기서, m_{jk} 는 구조물의 질량, b_{jk} 는 구조물자체의 감쇠계수, c_{jk}^b 는 정수압에 의한 부체의 복원력계수, c_{jk}^m 는 선형화된 계류라인의 강성계수를 나타내며, F_j^e , μ_{jk} 와 λ_{jk} 는 파동에 관련된 계수로 각각 파랑강제력, 부가질량계수 및 파랑 감쇠 계수이다. 또한, 하첨자 j 는 방파제의 각 운동 방향을 나타내는 것으로 1은 좌우운동(sway), 2는 상하운동(heave) 그리고 3은 횡동요(roll)를 나타낸다.

F_j^e , μ_{jk} 와 λ_{jk} 는 파동장에 놓인 부유체에 대한 경계치 문제를 풀어서 결정할 수 있다. 본 연구에서는 선형포텐셜이론을 사용하여 결정하였다.

2.2 파동장해석

유체를 비압축성, 비점성, 비회전류라는 가정을 하게 되는 선형파이론을 사용하면, 부유식 구조물이 놓인 파동장은 다음과 같이 Laplace 방정식을 만족하는 속도포텐셜 Φ 로 나타낼 수 있으며,

$$\nabla^2 \Phi(x, z; t) = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

입사파고 및 구조물의 거동이 미소하다고 가정하면, 정수면(S_f) 및 유동장의바닥면(S_d), 물체의 표면(S_b)에서의 경

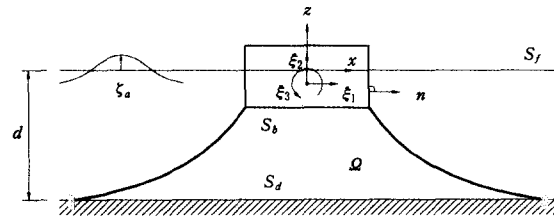


Fig. 1. Definition sketch for an analysis of a floating break-water.

계조건은 다음과 같이 선형으로 나타내진다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\omega^2}{g} \Phi \quad \text{on } S_f \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on } S_d \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = V_n = Re \left[\sum_{j=1}^3 -i\omega n_j \xi_j e^{-i\omega t} \right] \quad \text{on } S_b \quad (5)$$

여기서, V_n 과 n_j 는 각각 물체표면에서 유체영역으로 향하는 수입자의 법선속도성분과 법선벡터성분을 의미하며, g 는 중력가속도를, ξ_j 는 j -방향운동의 복소진폭을, 하첨자 1, 2, 3은 각각 좌우운동(sway), 상하운동(heave) 및 횡동요(roll)를 나타낸다(Fig. 1).

속도 포텐셜, Φ 는 아래와 같이 각 성분별 파랑의 포텐셜의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi = Re \left[\left(\phi_0 + \phi_4 + \sum_{j=1}^3 \phi_j \xi_j \right) e^{-i\omega t} \right] \quad (6)$$

여기서, ϕ_0 는 입사파에 의한 성분, ϕ_4 는 회절파에 의한 성분, ϕ_j 는 j -방향운동에 관련된 방사파에 의한 성분을 나타낸다. 이중, 회절파 및 방사파에 의한 포텐셜은 무한경계면(S_r)에서 다음의 방사경계조건을 만족하여야 한다(Sommerfeld, 1949).

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \phi_j}{\partial r} - ik_0 \phi_j \right) = 0 \quad \text{for } j=1,2,3,4 \quad (7)$$

여기서, k_0 는 입사파의 파수(wave number)를 의미하며, $r=|x|$, $i=\sqrt{-1}$ 이다.

선형회절이론에 의하여 식 (2)~식 (5) 및 식 (7)으로 주어진 경계치 문제를 ϕ_0 와 ϕ_4 가 관련된 회절문제(diffraction problem)와 $\phi_j(j=1, 2, 3)$ 가 관련된 방사문제(radiation problem)로 분리하면 물체표면에서의 경계조건은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = \begin{cases} -i\omega n_j & \text{for } j = 1, 2, 3 \\ -\frac{\partial \phi_0}{\partial x} n_x - \frac{\partial \phi_0}{\partial z} n_z & \text{for } j = 4 \end{cases} \quad (8)$$

여기서, ϕ_0 는 입사파의 포텐셜로 다음과 같이 나타내진다.

$$\phi_0 = i \frac{g \zeta_a}{\omega} \frac{\cosh[k_0(z+d)]}{\cosh(k_0 d)} e^{ik_0 x} \quad (9)$$

2.3 파랑강제력(F_j^e), 부가질량계수(μ_{jk}) 및 파랑 감쇠 계수(λ_{jk}) 결정

부유식 방파제에 작용하는 힘은 선형화된 Bernoulli 방정식으로부터 표현되는 다음의 동압력 $p(x, z, t)$ 을

$$p(x, z, t) = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \text{Re} \left[i\omega \rho \left(\phi_0 + \phi_4 + \sum_{j=1}^3 \phi_j \zeta_j \right) e^{-i\omega t} \right] \quad (10)$$

물체 표면에 대해서 적분함으로써 구할 수 있다.

$$F_j = -\int_{S_b} p(x, z, t) n_j dS_b = \text{Re} \left[\left(F_j^e + \sum_{k=1}^3 F_{jk}^r \right) e^{-i\omega t} \right] \quad \text{for } j = 1, 2, 3 \quad (11)$$

여기서, F_j^e 는 $\phi_0 + \phi_4$ 에 관련된 파랑강제력이며, F_{jk}^r 은 방사포텐셜 ϕ_k 에 관련된 항으로 부가질량계수 μ_{jk} 와 파랑감쇠계수 λ_{jk} 와 관계된다.

$$F_j^e = i\omega \rho \int_{S_b} (\phi_0 + \phi_4) n_j dS_b \quad (12a)$$

$$F_{jk}^r = -i\omega \rho \int_{S_b} \phi_k n_j dS_b = -\omega^2 \mu_{jk} - i\omega \lambda_{jk} \quad (12b)$$

여기서, μ_{jk} 와 λ_{jk} 는 다음과 같으며,

$$\mu_{jk} = -\frac{1}{\omega^2} \text{Re}[F_{jk}^r] \quad (13a)$$

$$\lambda_{jk} = -\frac{1}{\omega} \text{Im}[F_{jk}^r] \quad (13b)$$

Re와 Im은 각각 괄호안 값의 실수부와 허수부를 의미한다.

3. 수치해석 및 분석

3.1 수치해석 조건 및 대상 방파제

본 연구에서는 상기의 경계치 문제를 박우선 등(1991)이 개발한 Galerkin 유한요소모델을 사용하여 풀었다. 이

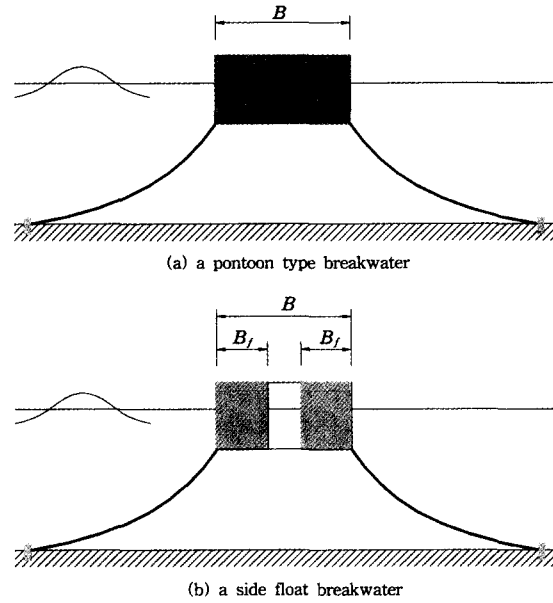


Fig. 2. Floating breakwaters for numerical experiments.

모델에서는 유체영역은 8절점 등대개변수요소로 이산화하고 있으며, 입사파 및 전달파 영역의 개경계 조건은 무한요소로 모형화하고 있다.

부유식 방파제의 형상에 따른 방파 성능을 분석하여 보다 나은 차단효과를 보이는 형상을 도출하기 위하여 다양한 형태에 대하여 수치해석을 실시하였다. Fig. 2에 보인 바와 같이 가장 단순한 형태인 한 개의 부유상자로 구성된 경우와 두 개의 부유상자가 적당한 간격으로 연결된 경우를 대상으로 하였다. 또한 두 경우의 저면에 연직판을 부착한 경우에 대해서도 해석을 수행하였다.

수치해석은 일반적인 실내 수리실험실 수로에서 재현이 가능한 수심 50 cm에 대하여 수행하였으며, 파랑조건은 부유식 방파제의 폭이 40 cm일 때를 기준으로 방파제 대 입사파장의 비를 0.01에서 0.5까지 0.005간격으로 변화시킨 100개의 파랑조건을 사용하였다.

3.2 결과 분석

3.2.1 상자형 방파제

부유식 방파제의 파랑차단 특성을 살펴보기 위하여 Fig. 2(a)에 보인 바와 같은 가장 단순한 형상인 상자형에 대해서 먼저 수치해석을 실시하였다. Fig. 3에 수치해석결과를 방파제 폭변화에 따른 전달계수의 변화를 상대수심 ($\omega^2 d/g$), 부체의 폭(B) 대 입사파장(L)의 비(B/L)로 나타

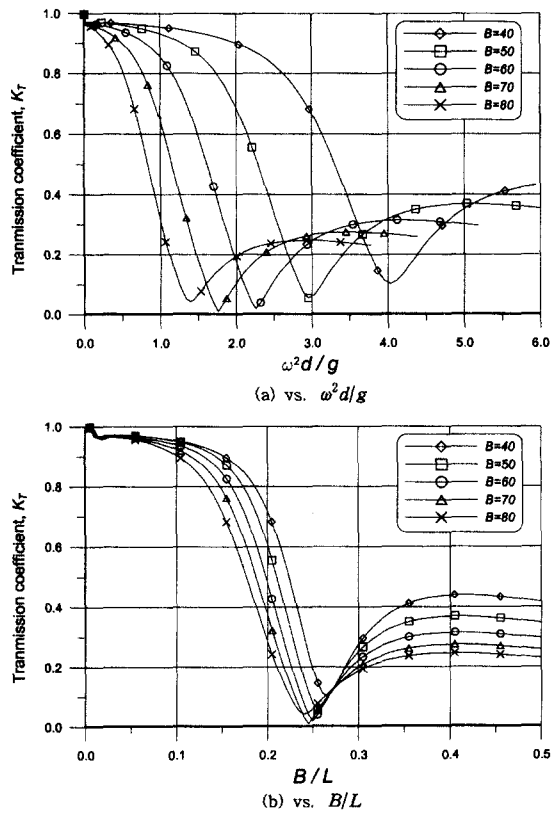


Fig. 3. Effects of the relative water depth and the width of the pontoon type breakwater on transmission coefficients.

내었다. 방파제의 폭이 변함에 따라 파랑차단효과가 가장 우수한 주기대가 단 주기 쪽에서 점차 긴 주기 쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있으며(Fig. 3(a)), 부체의 폭이 입사파장의 1/4되는 부근에서 최적의 성능을 보이고 있음을 알 수 있다(Fig. 3(b)).

Fig. 3에 보인 바와 같이 방파제의 폭을 크게 하면 보다 긴 주기 파랑에 유리하도록 설계할 수 있다. 그러나 경제적인 문제 때문에 폭을 무작정 크게만 할 수도 없는 것이 현실이다. 따라서, 방파제의 크기를 변경하지 않으면서(제작비용을 증가시키지 않으면서) 보다 긴 주기 파랑 차단에 효과적인 형상에 대해서 검토하였다. 검토 안중의 하나인 방파제 저면에 연직판을 부착한 경우에 대한 해석결과를 Fig. 4에 나타내었다. 방파제의 폭이 50 cm인 경우를 대상으로 길이 10 cm 및 20 cm 연직판을 양측하단에 부착한 경우에 대한 비교결과로, 연직판의 길이가 증가할수록 최소의 전달계수를 보이는 주기조건이 긴 주기

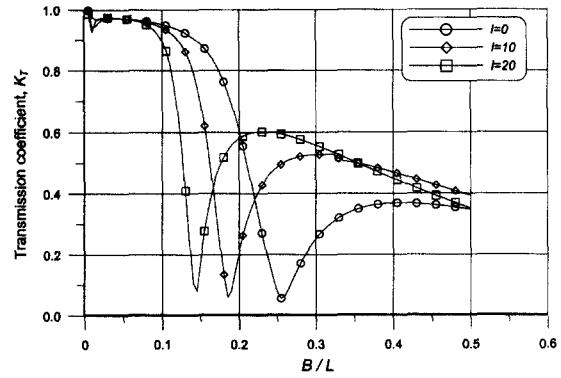


Fig. 4. Effects of the vertical plates attached at bottom of the pontoon type floating breakwater of $B=50$ cm on transmission coefficients.

로 이동함을 알 수 있다. 또한 긴 주기 파랑의 차단효과의 증가에는 어느 정도 성공하였으나, 불행히도 우수 파랑차단성능을 보이는 주기대의 폭이 좁아졌고 단주기 파랑의 차단성능이 떨어지는 문제점이 발생하였음을 알 수 있다.

연직판을 부착하지 않은 경우에는 B/L 이 0.25부근에서 최고의 파랑차단성능을 보였으나(Fig. 3(b)참조) 연직판을 부착한 경우에는 B/L 이 작은 쪽 즉, 긴 주기조건 쪽에서 성능이 우수해지는 다른 특성을 보였다(Fig. 4). 부체의 폭의 변화에 따라, 연직판 부착 유무에 따라 파랑 차단특성이 달라지는 것은 차단특성이 부유식 방파제의 동적 거동과 밀접한 관계에 있다는 것을 의미하는 것이다. 최소의 전달율을 보이는 조건에서의 부유식 방파제의 연직방향 응답이 큼을 확인하고(공진조건 부근) Fig. 3과 4에 보인 전달계수를 x -축을 달리하여 Fig. 5에 다시 나타내었다. 그림의 x -축을 입사파의 각진동수(ω)를 방파제 연직방향운동 고유진동수($\omega_{n2} = \sqrt{(c_{22}^b + c_{22}^m)/(m_{22} + \mu_{22})}$)로 무차원화하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 최고 성능을 보이는 모든 조건이 ω/ω_{n2} 가 1.0~1.5 부근임을 볼 수 있다. 이는 부유식 방파제의 연직방향 공진이 발생하는 조건, 즉 방파제가 심하게 연직방향으로 움직일 때 전달율이 작게 된다는 것을 나타내는 것으로 상자형 부유식 방파제의 전달계수 특성을 이해하는데 있어서는 물론이고 설계하는데 있어서 대단히 중요한 의미를 지닌다고 할 수 있다.

3.2.2 양측 방파제

상자형 부유식 방파제가 보이고 있는 장주기에 취약한

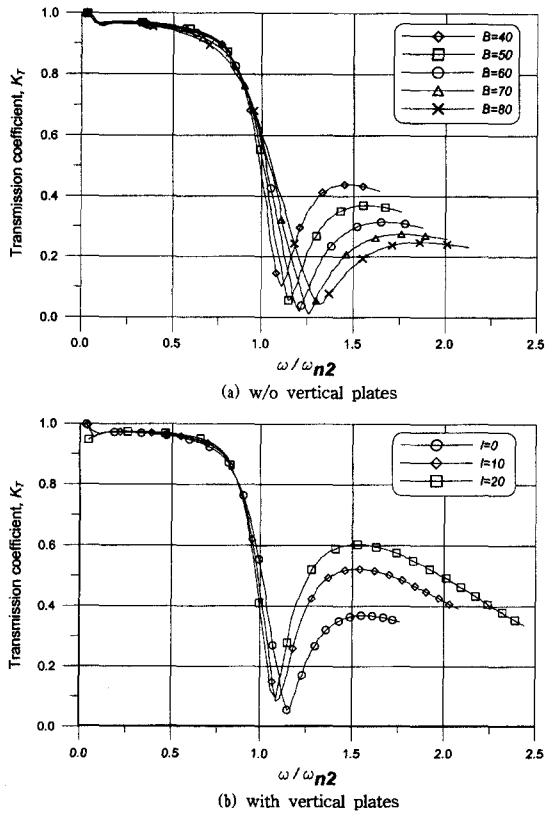


Fig. 5. Transmission coefficients of pontoon type breakwaters vs. dimensionless frequency normalized by resonance frequency of the heave motion, ξ_2 .

특성과 연직판 부착시 단주기폭 성능이 떨어지는 문제점을 개선해 보고자 Fig. 2(b)에 보인 바와 같은 두 개의 부유상자가 일정한 간격으로 연결되어 있는 양측 방파제를 고안하여 수치해석을 실시하였다. 연결된 폭 20 cm 홀수 15 cm 부유상자의 간격변화(10, 20, 30, 40 cm)와 각 부유상자 외측단에 연직 또는 수평판을 부착하였을 경우에 대한 해석을 실시하였다.

Fig. 6에 부유상자 간의 간격 변화에 따른 전달계수의 변화를 나타내었다. 우선 한 개의 상자로 구성된 경우(Fig. 3의 $B=40$ cm 경우: 부체의 전체폭이 같음)와 비교하여 보면 최소의 전달율을 보이는 부분이 약간 긴 주기 쪽으로 이동하였고 단 주기 쪽의 차단성능은 많이 개선되었음을 알 수 있다. 특히 간격이 넓어질수록 단주기폭 파랑의 차단효율이 더욱 좋아짐을 알 수 있다.

Fig. 7에는 양 부유상자 외측단에 연직방향으로 판을 부착한 경우에 대한 해석결과를 나타내었다. 이때 부체의 전

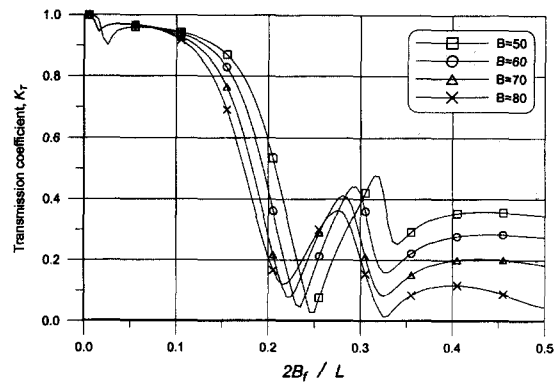


Fig. 6. Effects of the spacing between two floats of the side float breakwater on transmission coefficients.

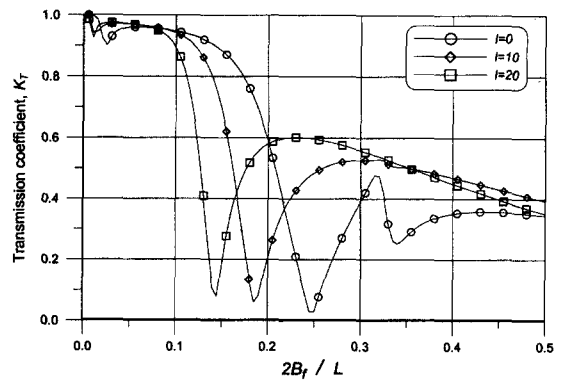


Fig. 7. Effects of the vertical plates attached at bottom of the side float breakwater of $B=50$ cm on transmission coefficients.

체폭은 50 cm를 대상으로 하였다. 그림을 살펴보면, 앞에서 보인 상자형 부유식 방파제의 경우와 마찬가지로 부착판의 길이가 길어질수록 파랑차단효과가 우수한 주기대가 긴 주기쪽으로 이동은 하고 있으나 차단효과가 우수한 주기대의 폭이 좁아지고 단주기폭의 파랑차단효과가 떨어지는 문제점을 보이고 있음을 알 수 있다.

3.3 효과적 파랑 차단 방안

앞에 보인 바와 같이 부유식 방파제는 파랑과 부유체 간의 동적 상호작용에 따라 파랑의 차단성능이 달라지기 때문에 모든 주파수 성분에 대하여 성능이 우수한 방파제는 기대할 수 없다. 보다 긴주기 파랑의 차단에 초점을 맞추면 단주기 파랑의 차단효과가 떨어지게 되며, 단주기 파랑에 초점을 맞추면 긴주기 파랑에 대해서는 거의 저항하지 못하게 된다. 따라서, 부유식 방파제를 설계할 때

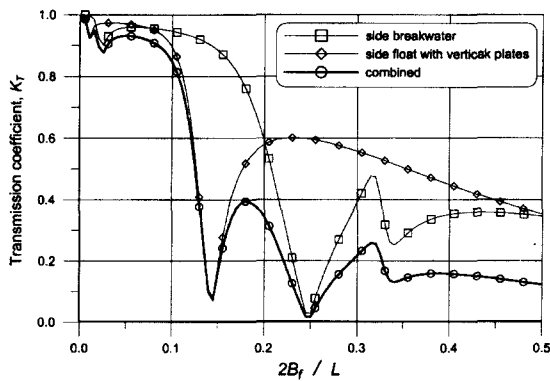


Fig. 8. Transmission coefficients of side float breakwaters of $B=50$ cm w/ and w/o vertical plates, and combined them.

는 방파 대상 파랑에 대한 목표를 확실히 하고 수치해석 등을 동원하여 검토하여야 한다.

차단할 파랑의 주기대가 넓게 분포되어 있는 경우에는 앞에 보인 상자형 또는 양측형 부유식 방파제에 연직 또는 수평판을 부착하여도 목표를 달성하기는 어렵다. 이러한 경우에는 단주기 파랑 차단효과가 우수한 형상과 보다 긴 주기 파랑차단에 강한 형상을 중첩하여 사용하면 어느 정도 원하는 목표치를 달성할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 8에 두 방파제간의 상호작용이 없다는 가정하에 구한 전달율을 예를 나타내었다. 두 개의 양측 방파제를 조합한 경우로 하나는 연직판을 부착하지 않았고 다른 하나에는 20 cm의 연직판을 부착하였다. 그림에서 알 수 있듯이 B/L 이 0.13보다 큰 영역에서 전달율이 0.4 보다 작음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 부유식 방파제의 파랑 차단 성능 개선에 연구하였다. 수치실험을 통하여 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 일반적인 상자형 부유식 방파제의 경우, 최고 방파성능을 보이는 조건은 부체폭(B)대 입사파장(L)의 비가 0.25가 되는 조건임을 확인하였으며, 방파제 저면 양단에 연직판을 부착한 경우에는 B/L 이 작은 쪽, 즉 긴 주기 쪽에서 최대의 성능을 보임을 알 수 있었다.

- 상자형 부유식 방파제의 최고 방파성능을 보이는 조건은 방파제의 연직방향 공진운동과 밀접한 관계를 갖고 있음을 발견하였다. 즉, 입사파랑의 각진동수(ω)가 연직방

향 운동의 고유진동수 ω_{n2} 에 근접한 조건($\omega=(1.0\sim 1.5)\omega_{n2}$)에서 최대의 성능을 보인다.

- 상자형 부유식 방파제보다는 두 개의 부체를 일정한 간격을 두고 연결한 양측 부유식 방파제가 단주기 파랑의 차단에 우수한 성능을 보이며, 양측 방파제에의 부체간의 간격을 넓게 할수록 그 효과가 증대된다.

- 방파제 저면에 연직판을 부착하여 파랑 차단특성을 제어할 수 있음을 확인하였다. 즉, 연직판을 부착함으로써 긴 주기쪽의 파랑 차단효과를 개선할 수 있다. 그러나, 단주기쪽의 파랑차단효과는 상대적으로 떨어지는 문제점이 있음을 확인하였다.

- 차단할 파랑의 주기대가 넓게 분포되어 있는 경우에는 짧은 주기 파랑 차단효과가 우수한 형상과 긴 주기 파랑차단에 강한 형상을 중첩하여 사용하면, 효과적으로 파랑을 차단할 수 있다.

본 연구에서는 선형이론에 기초한 수치모델을 이용하여 형상에 따른 부유식 방파제의 파랑차단성능을 어떻게 제어할 수 있을 것인가에 대해서만 검토하였다. 따라서, 2차원 및 3차원 수조에서 수리실험을 통한 검증이 필요할 것으로 판단되며, 특히, 실용화를 위해서는 현장적용 실험이 필수적이므로 이에 관한 추가적인 연구가 요망된다.

참고문헌

박우선, 이달수, 오영민, 정원무, 1991. 연직 2차원 회절 및 방사문제 해석을 위한 무한요소. 한국해양, 해양공학회지, 제3권, 제4호, pp. 235-243.

Carver, R.D., 1979. Floating breakwater wave-attenuation tests for East bay marina Olympia harbour, Washington. Technical report HL-79-13, US Army engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

Frederiksen, H.D., 1971. Wave attenuation by fluid filled bags. Journal of the Water-ways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE 97, pp.73-90

Hales, L. Z., 1981. Floating Breakwaters: State of the Art Literature Review. Technical Report No. 81-1, Coastal Engineering Research Center, US Army Corps of Engineers, Fort Belvoir, VA.

Johansson, M., 1989. Barrier-type breakwaters-Transmission, Reflection and Forces. Ph. D. dissertation, School of Civil Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden.

Sommerfeld, A., 1949. Partial differential equations in physics. Academic Press, New York.

Sukto, A.A. and Haden, E.L., 1974. The effect of surge, heave

- and pitch on the performance of a floating breakwater. In 1974 Floating Breakwaters Conference Papers, University of Rhode Island, Marine Technical Report Series No. 24, pp. 21-39.
- Vathamony, P., 1995. Wave attenuation characteristics of a tethered float system. *Ocean Engineering* 22, pp. 111-129.
- Veldee, M.A., 1983. Floating breakwater wave attenuation and mooring force performance. M.Sc. thesis, University of Washington.
-

Received June 13, 2001

Accepted July 4, 2001