

장주기파에 효율적인 부유식방파제에 대한 연구 I: 사다리꼴과 요철 단면형상에 대하여

김도영 · 안용호
홍익대학교 조선해양공학과

A Study on the Long-Wave Effective Floating Breakwater I: On Trapezoid and Prominence Cross Section

DO YOUNG KIM AND YOUNG-HO AN

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Hong-ik University, Chochiwon, Chungnam, 339-701, Korea

KEY WORDS: Floating breakwater(FBW) 부유식 방파제, Wave transmission coefficient 투과계수, Floating breakwater cross section 부유식 방파제 단면, Trapezoid cross section 사다리꼴 단면, Prominence section 요철단면

ABSTRACT: In this paper, trapezoid sections and prominence sections were examined to improve the performance of floating breakwater in long waves. The linear potential theory is used and the boundary element method with a matching boundary is employed for numerical computation. The effects of the side slope of the trapezoid section and the geometry ratio of the prominence section on the floating breakwater were examined. It was found that trapezoid sections show lower transmission coefficients than the rectangular sections in the long wave range. In prominence sections the size of the sides are more important than the size of the top. Proper choices of the pontoon type geometry may move the local minimum point of the wave transmission coefficient toward the longer wave ranges and improve the performance of the floating breakwater in the long wave range for a given wave period.

1. 서 론

해안 및 해양에 설치되는 시설물들을 파도로부터 보호하기 위하여 방파제 또는 소파 구조물의 설치가 필요하다. 이러한 구조물은 지역적 특성, 작업의 종류 그리고 경제적 요인을 고려하여, 대상 해역에서 원하는 정온도(calmness)를 확보해야 한다.

방파제의 종류는 크게 착저식과 부유식으로 나눌 수 있다. 착저식 방파제는 방파성능이 우수하여 많이 사용되고 있다. 그러나 해수교환을 방해하여 환경에 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 이에 따라 해수가 일부 교환되는 형태의 방파제의 개발이 시도되고 있으나, 큰 효과는 기대하기 힘든 실정이다.

전 세계적으로 환경 오염 방지, 환경 및 생태계의 보호에 대한 관심이 고조되고 있으며, 앞으로도 중요성이 더하여 갈 것이다. 부유식 방파제는 그 구조상 해수순환을 방해하지 않으므로, 설치 해역에서 발생한 오염물질이 자연적으로 정화되는 작용을 방해하지 않으며, 어류들이 방파제 밑으로 통과할 수 있으므로 해양환경 서식처에 최소의 영향을 준다. 이러한 점은 인간이 해양을 개발함과 동시에 해양환경을 보존하여 자연과 더불어 조화를 이루고자 하는 노력과 일치한다(김과 이 1995). 해양개발이 본격화되면 수심이 깊은 곳도 개발의 대상으로 확대되어 갈 것이다. 기존의 방파제는 수심이 깊어짐에 따라 건설비용이 급격히 증가한다. 그러나 부유식 방파제는 종류가 가능한 수심까지 설치할 수 있으며, 수심의 증가에 따른 건설비용의 증가가 크지 않다(Grinyer, 1995). 그리고 해저지질

에 따른 영향을 적게 받는다. 부유식방파제의 종류와 특성에 대한 것은 McCartney(1985)에 잘 정리되어있다.

부유식방파제는 앞에서 언급한 바와 같이 해양환경 및 생태계에 미치는 영향을 극소화 할 수 있으며, 경제성, 수심의 제한, 제작기간 등으로 착저식 방파제의 시공이 어려운 경우에 이를 대신하여 사용할 수 있으나, 부유식방파제는 방파효율이 착저식에 비하여 떨어지기 때문에, 지금까지는 주로 파후(wave climate)가 온순한 지역에 설치되고 있다. 부유식방파제를 실용화하기 위해서는 부유식방파제의 효율을 극대화하는 것이 중요하다. 특히 파고가 높고 주기가 긴 장주기파에 대한 방파성능 향상이 가장 시급히 해결해야할 점이다.

부유식 방파제의 설계에서는 방파성능과 경제성이 가장 중요한 파라미터로 생각된다. 방파 효율과 경제성 두 가지 조건을 동시에 만족시키기 위해서는 적은 크기의 구조물로 높은 방파 효율을 가져야 가능하다. 이것은 바로 장주기 파도에 대한 방파 효율을 개선함으로써 그 목적을 달성할 수 있다.

부유식방파제의 방파성능은 투과계수(transmission coefficient)로 나타낸다. 투과파는 투과되는 파고와 입사파의 파고의 비로 나타내며, 투과계수가 1이면 입사파가 모두 투과되어 방파효율이 0이고, 투과계수가 0이면 완전 방파를 의미한다. 일반적으로 부유식방파제를 사용하는 경우 투과계수의 허용치를 0.5로 잡고 있다. 본 연구에서는 투과계수가 최저치가 파장(L)/부유체의 폭(B)이 되도록 큰 곳에서 발생하는 형태의 단면을 개발하고자 한다. L/B가 큰 지점까지 투과계수가 0.5

이하가 된다는 것은 동일한 방파효과를 가지면서 구조물의 크기를 줄일 수 있는 경제성을 의미한다.

2. 이론

본 연구에서 대상으로 하고 있는 상자형 부유식 방파제는 간섭식 방파제로써, 이론 해석을 수행하기 위해서는 부유체에 작용하는 힘과 산란파 그리고 부유체의 운동과 이에 의한 발산파에 대한 해석이 이루어져야 한다. 이 논문에서는 선형포텐셜이론을 사용하여 산란문제(diffraction problem)와 방사문제(radiation problem)를 계산하였다. 산란문제는 구조물이 고정되어 있을 때 파도에 의해서 발생하는 외력을 계산하는 문제가 되며 방사문제는 동유체력계수를 구하는 문제가 된다. 수치계산 방법으로 경계요소법 사용하였으며 계산영역을 줄이기 위하여 유체를 내부 영역과 외부영역으로 나누어 정합면에서 정합조건을 사용하였다(Liu and Abbaspour, 1982).

입사파는 주파수 ω 인 규칙파로 가정한다. 입사파의 파고가 충분히 작으면 선형이론을 사용할 수 있다. 유체는 비점성, 비압축성이라 가정하고, 유동이 비회전성이라 가정을 하면 속도포텐셜을 사용하여 경계치문제를 구성할 수 있다. 입사포텐셜과 산란포텐셜과 방사포텐셜을 중합하면, 2차원 문제의 전체포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 ϕ_I 입사포텐셜, ϕ_D 는 산란포텐셜, ϕ_j 는 각 운동 모드별 속도포텐셜이고, ξ_j 는 복소운동진폭이다.

전체포텐셜을 얻기 위해서는 부유체의 운동응답을 계산해야 하는데, 이는 부유식방파제의 운동방정식의 해로부터 얻을 수 있다. 부유식방파제의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다 (Kim 등, 1998).

$$\sum_{i=1}^3 [(m_{ij} + \mu_{ij}) \ddot{x}_j + \lambda_{ij} \dot{x}_j + B_{ij} x_j] = F_i^e \quad (2)$$

여기서 x_i 는 각방향의 변위, m_{ij} 는 질량계수(mass matrix), μ_{ij} 는 부가질량계수(added mass matrix), λ_{ij} 는 조파감쇠계수(wave damping coefficient matrix), B_{ij} 는 정복원력계수(hydrostatic stiffness matrix), F_i^e 는 파강제력(wave exciting force)을 나타낸다.

파강제력은 다음 식으로 계산 할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_i^e &= \text{Re} \left\{ i\omega \rho \int_{s_0} (\phi_I + \phi_D) e^{-i\omega t} n_i ds \right\} \\ &= \text{Re} \{ f_i e^{-i\omega t} \} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 n_i 는 확장된 법선벡터이다.

동유체력계수인 부가질량계수 μ_{ij} , 조파감쇠계수 λ_{ij} 는 다음 식으로 계산 할 수 있다.

$$\mu_{ij} = -\frac{\rho}{\omega} \int_{s_0} \text{Im} [\phi_j] n_i ds \quad (4)$$

$$\lambda_{ij} = \rho \int_{s_0} \text{Re} [\phi_j] n_i ds \quad (5)$$

입사파를 규칙파로 가정을 하면 주파수영역에서 부유체의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sum_{j=1}^3 [B_{ij} - \omega^2 (m_{ij} + \mu_{ij}) - i\omega \lambda_{ij}] \xi_j = f_i \quad (6)$$

여기서 ξ_i 와 f_i 는 각각 복소 변위와 복소 파강제력을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

경계요소의 크기를 변화시키면서 계산을 수행하여 요소의 수에 따른 수렴도를 확인 하였고 최종계산에는 200개의 요소를 사용하였다. 프로그램에 대한 효용성에 대한 검증은 직사각형 단면의 동유체력계수와 파강제력과 운동응답 그리고 투과계수의 결과(김 등, 2000)와 비교하여 확인하였다.

부유식방파제의 단면이 성능에 미치는 영향을 살펴보고 최적 효율을 가지는 단면을 구하기 위해서 먼저 부유체의 측면의 경사를 바꾸어 가면서 계산을 수행하였다. 이 경우 단면은 등변사다리꼴이 되는데 Fig. 1에 정수면 아래 부분을 보여주고 있다. 아래면의 길이 b_1 , b_2 를 변화시켜 a_1 과 a_2 가 0.1, 0.2, 0.3인 경우를 직사각형 형태인 경우와 비교를 하였다.

$$a_1 = \frac{2b_1}{B}, \quad a_2 = \frac{2b_2}{B} \quad (7)$$

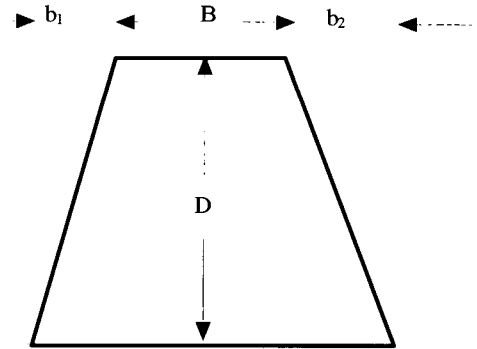


Fig. 1 Definition sketch of a trapezoid section

Fig. 2에서는 등변사다리꼴 단면이고, B/D 가 4.0인 경우의 투과계수를 보여주고 있다. 경사면이 없는 경우와 비교해 보면 a_1 과 a_2 가 0.1, 0.2, 0.3로 커짐에 따라 국부 최소 투과계수가 나타나는 L/B 가 점점 오른 쪽으로 이동하고 있음을 볼 수 있다. 즉 최소 투과계수가 나타나는 지점의 L/B 의 값이 아래 면의 길이가 커질수록 커지는 경향을 볼 수 있으며 이때 국부 최소 투과계수는 매우 작은 값을 나타내고 있다. 그러나 투과계수의 국부 최대값은 0.5를 크게 넘어가고 있다.

Fig. 3에서는 등변사다리꼴 단면에 B/D 가 2.66인 경우의 결

과를 보여주고 있다. 이 경우에도 a_1 과 a_2 가 0.1, 0.2, 0.3로 커짐에 따라 국부 최소 투과계수가 나타나는 L/B 가 점점 오른쪽으로 이동하고 있음을 볼 수 있다. $a_1 = a_2 = 0.3$ 일 때 $L/B = 5.5$ 에서 0.1보다 작은 투과계수를 보이고 있다.

이러한 경향은 경사면을 적절히 주면 장주기파에 대한 방파 성능을 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다. 그리고 동일한 경사면을 가진 경우에는 홀수가 큰 경우가 장주기파에 보다 유리하다.

Fig. 4에서는 부유체의 단면을 파도를 받는 쪽 한쪽 면만 경사시키고 반대쪽 면은 수직인 경우 즉 $a_2 = 0$ 인 경우에 대해서 살펴보았다. 이 경우에도 a_1 이 커짐에 따라 최소투과계수를 가지는 L/B 가 커지는 경향을 볼 수 있다. 그러나 $a_1 = 0.3$ 즉 왼쪽 바닥면이 30%가 커진 경우에는 최소투과계수의 값이 0.5에 가깝게 나타나고 있고 전반적으로 방파성능이 떨어지는 것을 볼 수 있다.

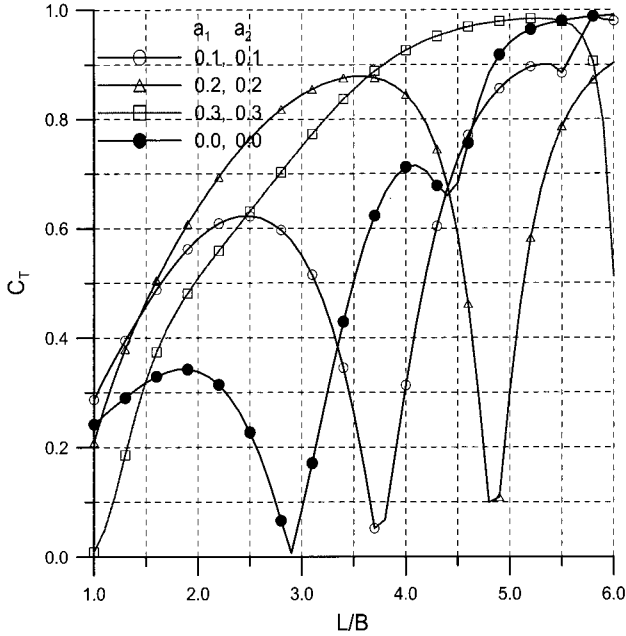


Fig. 2 Wave transmission coefficient for trapezoid shape ($B/D = 4.0$)

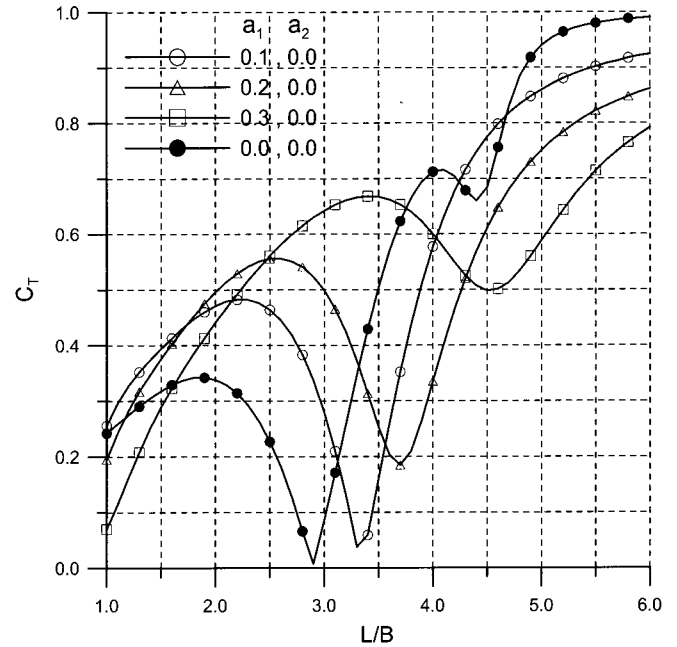


Fig. 4 Wave transmission coefficient for trapezoid shape ($B/D = 4.0$)

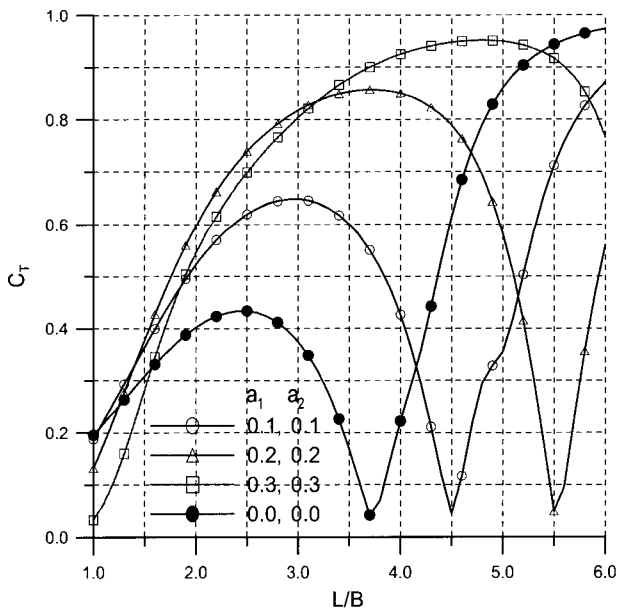


Fig. 3 Wave transmission coefficient for trapezoid shape ($B/D = 2.66$)

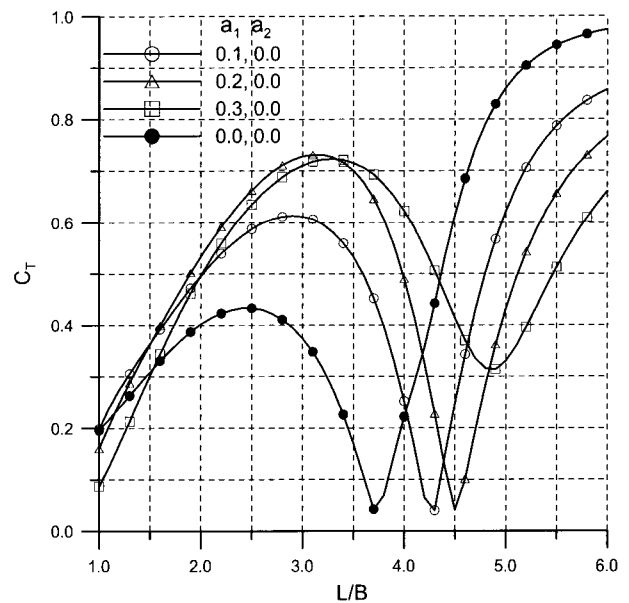


Fig. 5 Wave transmission coefficient for trapezoid shape ($B/D = 2.66$)

Fig. 5는 B/D 가 2.66인 경우를 보여주고 있다. Fig. 4에 비해서 방파 성능이 약간 좋아진 것을 볼 수 있으나 전반적으로는 B/D 가 4.0인 경우와 비슷한 경향을 보이고 있다. 따라서 한쪽 면만 경사를 시키는 경우에는 투과계수의 성능에 큰 향상을 보이지는 않는다. 그러나 방파제의 안쪽에 선박을 계류시킬 목적이 있는 경우에는 한쪽 면만 경사를 진 형태를 사용하는 것도 고려할 수 있다.

다음은 요철 모양의 단면에 대하여 살펴보기로 한다. 요철 모양(실제로는 요철이 아니라 요임)의 단면에 대한 정의는 Fig. 6에 되어있다.

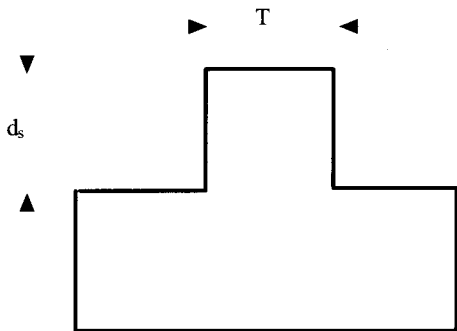


Fig. 6 Definition sketch of a prominence section

$$t_1 = \frac{T}{B}, \quad d_1 = \frac{d_s}{D} \quad (8)$$

먼저 요철 부분의 치수 변화에 따른 영향을 살펴보기로 한다. 요철 단면 모양은 Fig. 6에서 표시한 형태에서 볼 수 있는 것처럼, 단면의 윗부분의 길이인 T 와 옆부분의 길이 d_s 의 조합에 따라 달라지는 것을 알 수 있다. T 의 변화에 따른 영향을 파악하기 위하여 d_s 를 홀수의 반인 경우를 선택하였다. 즉 $d_1 = 0.5$ 로 고정하고 T 의 값을 변화시켜 가면서 투과계수가 어떻게 변하는 가를 살펴보았다.

Fig. 7에 $B/D=4.0$ 인 경우에 대한 결과를 보여주고 있다. 이 그림에서는 t_1 의 값을 0.5에서 0.15 간격으로 0.95까지 변화시켰다. t_1 이 0.95인 경우는 직사각형 형태와 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러나 t_1 이 감소함에 따라 투과계수가 변하는 것을 볼 수 있다. 그리고 최소 투과계수가 나타나는 L/B 값이 커지고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 t_1 이 0.65 보다 작아지는 경우에는 전체적인 방파 성능이 현저하게 떨어지는 것을 볼 수 있다. 따라서 적절한 투과계수 값을 얻기 위해서는 T 를 너무 줄이는 것은 바람직하지 않다고 볼 수 있다.

Fig. 8에서는 Fig. 7와 같은 형태이나 전체 홀수가 큰 $B/D=2.66$ 인 경우에 대한 투과계수를 나타내고 있다. 전체적인 경향은 Fig. 7과 비슷하나 투과계수의 값이 전반적으로 향상되고 장파에 대한 방파 성능이 개선되는 것을 볼 수 있다. L/B 가 5보다 큰 지점에서 최소 투과계수 값을 가지는 것을 볼 수 있다.

이제 측면 길이 d_s 의 변화에 따른 영향을 살펴보기로 한다.

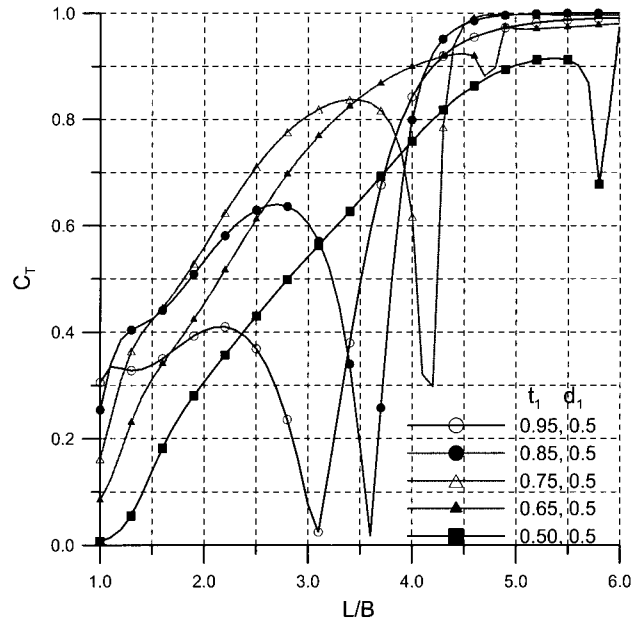


Fig. 7 Wave transmission coefficient of a prominence and depression shape ($B/D=4.0$)

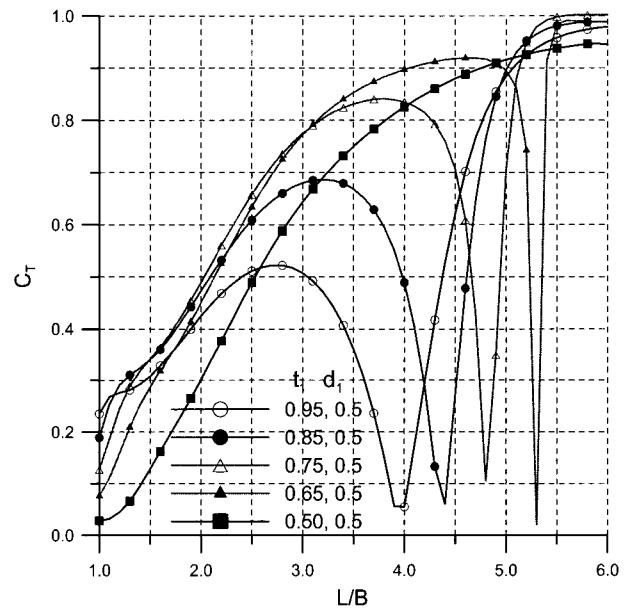


Fig. 8 Wave transmission coefficient of a prominence and depression shape ($B/D=2.66$)

이를 위하여 앞에서 살펴본 경우의 중간 홀수 값 정도를 기준으로 하기 위하여, t_1 을 0.85로 고정하고 d_1 의 값을 0.3에서 0.7까지 0.1 간격으로 변화시켰고 그 결과를 Fig. 9에 표시하였다. 이 경우에는 T 를 변화시킬 때와는 달리 급격한 성능변화를 보이지는 않았다. 따라서 요철 모양에서는 d_s 보다 T 가 투과계수에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

부유식방파제의 설계 시 부유체의 폭과 홀수는 방파성능을 결정하는 가장 중요한 파라미터이며, 설계지역과 조건이 주어 진 경우에 최적설계를 통하여 방파효율을 극대화 할 수 있다.

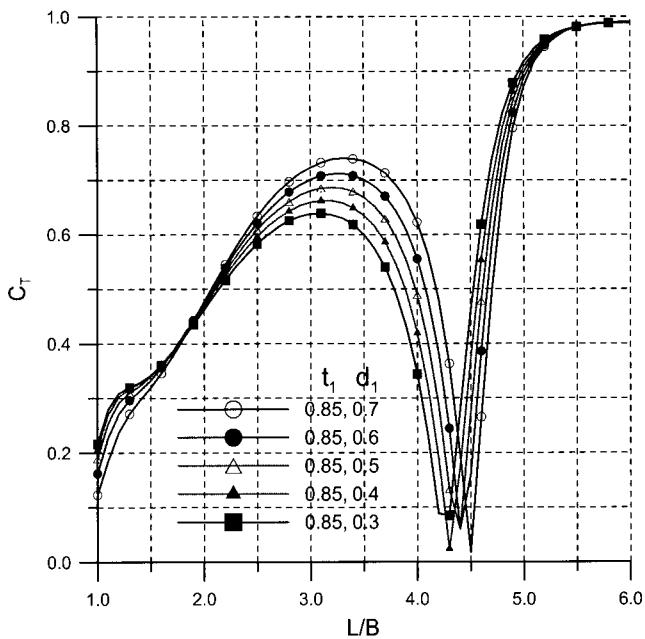


Fig. 9 Wave transmission coefficient of a prominence and depression shape ($B/D=4.0$)

이상의 결과에서 부유체의 단면 형상을 적절히 설계하면 장주기파에 효율이 높은 부유식방파제의 단면을 설계할 수 있을 것을 보여준다.

부유식방파제의 설계점은 주어진 입사파에 대해서 국부 최소투과계수를 가질 수 있는 단면을 설계하는 것이다. 따라서 설치되는 지역의 파랑특성에 따라 최강 최다 빈도를 가지는 파에 대한 설계가 일차적으로 수행되어야 할 것이다. 그러나 입사파의 주파수가 달라지면 부유식방파제의 방파성능이 달라지게 된다. 이러한 경우에도 최적 효율을 가지는 부유식방파제를 설계하기 위해서는 흘수를 변화하는 방법(Kawarada et. al, 1995)을 도입하는 것이 매우 유망하다고 할 수 있다. 흘수를 변화시켜서 주어진 입사파에 대해서 국부최소 투과계수를 가지게 한다면 국부최소값 이외의 지점에서는 방파성능이 저하되는 것을 방지할 수 있고 원하는 방파효율을 유지할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

부유식방파제는 입사파의 주기에 따라 방파성능이 달라지며, 방파제의 형상 중 투과계수에 큰 영향을 미치는 것은 부유식방파제의 폭과 흘수이다. 본 연구에서는 상자형 단면의 측면 경사를 변화시켜가면서 투과계수에 미치는 영향을 살펴보고, 요철형태의 단면에서 형상비의 변화에 따른 투과계수의 변화를 살펴보았다.

사다리꼴 모양의 단면에서는 측면의 경사도가 커짐에 따라 장주기파에 대한 방파성능이 향상되는 것을 볼 수 있었다. 그리고 한쪽 면이 수직인 경우에는 양쪽에 경사가 있는 경우에

비해 방파성능이 다소 떨어지는 것을 볼 수 있었다. 요철모양의 단면에서는 측면길이 변화가 상부 길이의 변화보다 투과계수에 큰 영향을 미친다.

장주기파의 방파에 효율이 개선될 경우 일반적으로 단주기파 영역에서는 방파성능이 저하되는 현상을 보이고 있다. 그러나 입사파의 주기에 따라 투과계수가 최소가 되는 점에 설계를 맞추고 부유체의 흘수를 변화시킨다면 효율적인 방파를 할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 KOSEF 981-1212-036-2 의 지원으로 수행되었으며, 동 재단의 지원에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 김도영, 송무석, 김용섭, 김현주 (2000). "규칙파중 상자형 부유식 방파제 특성에 대한 연구", 대한조선학회논문집 제37권 제3호, pp 45~56.
- 김도영, 이현엽 (1995). "부유식방파제에 대하여", 한국해양공학회, 95추계학술논문 발표회, pp 371~379.
- Grinyer, A.W. (1995). "Fixed and floating breakwaters for small craft harbours: experience at Town Quay Southampton, Haslar Marina, Portsmouth and Parkstone Yacht Haven", Poole. 3rd Int. Conf. Planning Design and Operation Marina III, pp 338~349.
- Jamieson, W.W., Mogridge, G.R. and Boudrias, P. (1995). "Improving the efficiency of rectangular caisson floating breakwaters", 3rd Int. Conf. Planning Design and Operation Marina III, pp 367~374.
- Kawarada M. et. al (1995) "Development of variable-draft floating breakwater," 13th Symp. Ocean Engineering, 1995 July, Soc. Naval. Arch. Japan, pp 401~408.
- Kim, D.Y., Song, M., Kim, Y.S (1998). "On the Performance of Floating Breakwaters", Proceedings of International Conference on Hydrodynamics, pp 953~958.
- Liu, P. and Abbaspour, M. (1982). "An integral equation method for the diffraction of oblique waves by an infinite cylinder", Int. J. for Numerical Methods in Engineering, Vol.18, pp 1497~1504.
- McCartney, B.L. (1985). "Floating Breakwater design", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol 111, No. 2, pp 304~318.

2000년 11월 3일 원고 접수

2001년 1월 10일 수정본 채택