

파랑 차단 성능 향상을 위한 다열 잠제 사이의 최적 간격에 대한 연구

조원철*

*중앙대학교 공과대학 건설환경공학과

Optimum Distance between Multiple Submerged Breakwaters for Wave Screening Performance Enhancement

WON-CHUL CHO*

*Department of Civil & Environmental Engineering, Chung-Ang University, Seoul, Korea

KEY WORDS: Submerged breakwater 잠제, Finite element method 유한요소법, Wave transmission 파랑 투과, Distance between submerged breakwaters 잠제 사이의 간격

ABSTRACT: Numerical analysis is performed on the wave transmission coefficient of various crown widths of the double-submerged breakwater and the triple-submerged breakwater, varying the distance between submerged breakwaters. The finite element method is used, and the fluid motion is considered as linearized two-dimensional potential flow. In case of the double- and triple-submerged breakwaters, as the width of submerged breakwater increases, the minimum wave transmission coefficient decreases and the wave period at which the minimum wave transmission coefficient occurs moves to a longer wave period the distance between submerged breakwaters at which the minimum wave transmission coefficient occurs becomes larger.

1. 서 론

연안역의 효율적인 개발과 사용의 극대화를 위해서는 다양한 형태의 방파제에 관한 연구가 필수적이라고 할 수 있겠다. 기존에 주로 건설되고 있는 직립제, 경사제, 혼성제와 같은 착저 중력식 방파제는 외해로부터의 파랑 차단에는 매우 탁월한 성능을 발휘하지만, 수심이 깊은 해역에서는 구조물 대형화로 인하여 공사비가 증대되고 원활한 해수 순환을 저해하여 항내 수질 악화를 야기 시키는 문제점을 드러내고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다양한 형태의 방파제에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있는데 그 중 잠제가 한 예라고 할 수 있다.

잠제에 관한 연구는 Newman(1965)이 불투과성 계단형 바닥에 의한 파랑의 반사율과 투과율을 적분방정식을 이용하여 해석하였고, 양윤모등(1987)은 일열 및 복열 불투과 잠제에 대한 반사율과 투과율을 수치해석하고 실험결과와 비교하여 복열 잠제가 단열 잠제에 비해 파랑제어 효과가 우수함을 밝혔다. Kobayashi and Wurjanto(1989)는 불투과성 잠제로 입사하는 규칙파에 대한 반사파와 투과파의 거동특성을 수치해석하고 에너지 소산의 공간변화를, 평균수면차, 단위 폭 당 질량전달률 등을 산정하였다. Van der meer and Deamen(1994)은 저천단 사석 방파제의 안정성과 파랑의 투과에 대하여 실험적으로 연구하여 파랑의 반사율과 투과율을 예측할 수 있는 경험식을 제

시하였다. 김도삼(2000)은 다열 잠제에 대한 파랑의 전달율과 반사율을 경계적분방정식을 이용하여 해석하고 다열 잠제의 파랑 특성을 제시하였다. 조원철(2004) 등은 다열 잠제의 폭을 변화시키면서 폭이 좁은 다열 잠제와 폭이 넓은 다열 잠제의 파랑 차단 특성을 해석하여 비교하였다.

해안방제시설로서 잠제는 착저 중력식 방파제와 같은 정도의 파랑 차단 효과는 기대할 수 없지만, 잠제의 최상부가 수중에 위치하기 때문에 항내·외 해수 교환이 가능하여 항내 수질오염을 감소시킬 수 있으며, 수평선을 확보할 수 있어 경관상 타 구조물에 비하여 유리하다. 잠제는 높이가 낮거나 폭이 좁은 경우에는 파랑 제어 기능이 떨어지기 때문에 잠제의 높이를 수면 가까이 까지 높이거나 폭을 크게 하여야 만이 비교적 유효한 파랑 차단 성능을 갖게 된다. 그러나 유효한 파랑차단 효과를 얻기 위해 잠제의 높이와 폭을 증가시킬 경우에는 구조물의 크기가 증대되는 단점이 있다. 또한 다열 잠제는 잠제 사이의 간격에 따라 파랑 차단 효과가 달라지므로 본 연구에서는 2열과 3열 잠제의 폭과 잠제 사이의 간격을 조정하면서 파랑 차단 효과를 더욱 향상시킬 수 있는 2열과 3열 잠제 사이의 최적 간격을 알아보고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 지배방정식 및 경계조건

$$\nabla^2 \Phi(x, z; t) = 0 \quad (1)$$

교신저자 조원철 : 서울특별시 동작구 흑석동 221번지
02-820-5323 chowc@cau.ac.kr

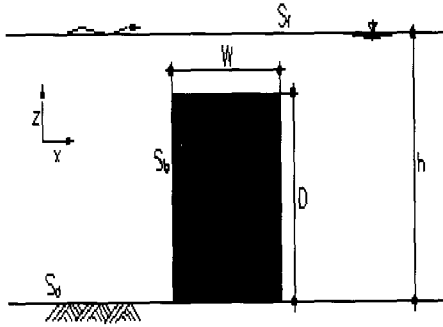


Fig. 1 Schematic definition of the submerged breakwater for numerical model

파고가 ζ_a 이고 주파수가 ω 인 규칙파가 수심 h 에 위치한 잠제에 입사할 경우, 유체를 비압축성, 비점성, 비회전성으로 가정하면, 유동장은 다음과 같이 Laplace 방정식을 만족하는 속도포텐셜 Φ 로 나타낼 수 있다.

여기서, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 이다. 유동장 내의 각 경계면, 즉, 정수면(S_r) 및 유동장의 바닥면(S_b), 물체의 표면(S_b)에서의 경계조건은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (\text{on } S_b \text{ and } S_d) \quad (2b)$$

여기서, $\frac{\partial}{\partial n}$ 은 경계면에서 유체영역으로 향하는 법선방향의 성분을 의미하며, g 는 중력가속도를 나타낸다. 속도포텐셜 Φ 를 각 성분별 파랑의 포텐셜의 합으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Phi = \text{Re}[(\Phi_0 + \Phi_4)e^{-i\omega t}] \quad (3)$$

여기서, Φ_0 는 입사파에 의한 성분, Φ_4 는 회절파에 의한 성분을 나타낸다. 입사파의 포텐셜 Φ_0 는 다음과 같이 나타내진다.

$$\Phi_0 = i \frac{g \zeta_a}{\omega} \frac{\cosh[k_0(z+h)]}{\cosh(k_0 h)} e^{ik_0 x} \quad (4)$$

회절파에 의한 포텐셜은 무한경계면(S_r)에서 다음의 방사경계조건을 만족하여야 한다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \Phi_4}{\partial r} - ik_0 \Phi_4 \right) = 0 \quad (5)$$

여기서, k_0 는 입사파의 파수이고, $r=|x|$, $i=\sqrt{-1}$ 이다.

2.1 동압력 및 파력

물체표면 및 유동장 임의의 위치에서의 동압력 $p(x, z, t)$ 는 선형화된 Bernoulli 방정식으로부터 다음과 같다.

$$p(x, z, t) = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \text{Re}[i\omega\rho(\Phi_0 + \Phi_4)e^{-i\omega t}] \quad (6)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도를 나타낸다. 구조물에 작용하는 파력은 물체표면에서의 압력을 적분함으로써 구할 수 있으므로 수평, 수직 및 운동중심에 대한 회전방향의 파력은 다음과 같이 표시된다.

$$F_j = - \int_{S_b} p(x, z, t) n_j S_b = \text{Re}[(F_j^e) e^{-i\omega t}] \quad (7)$$

for $j = 1, 2, 3$

여기서, n_j 는 물체표면에서 유체영역으로 향하는 법선벡터의 각 방향 성분과 관련된 값으로 1은 x 방향, 2는 z 방향, 3은 운동중심에 대한 회전방향을 나타낸다. F_j^e 는 파랑강제력으로 다음과 같다.

$$F_j^e = i\omega\rho \int_{S_b} (\Phi_0 + \Phi_4) n_j dS_b \quad (8)$$

3. 수치해석 및 결과분석

경계치문제를 해석하기 위해 본 연구에서 사용된 수치해석은 유한요소모델을 사용하였다. 이 모델에서는 잠제를 포함하는 유체영역은 8절점 등매개변수 요소로 이산화한 유한요소로 모형화 하였으며, 입사파 및 투과파 영역의 개경계 조건은 무한요소로 모형화 하였다.

수치해석을 위한 유체영역의 수심(h)은 50cm로 하였으며, 파랑조건은 수심을 기준으로 수심 대 입사파장의 비(h/L)를 0.005에서 0.5까지 0.005간격으로 변화시킨 100개의 파랑조건을 사용하였고, 잠제는 모두 불투과성 직사각형 잠제로 하였다.

잠제의 높이(D)는 $0.9h$, 폭(W)은 수심의 $1/10$ 인 $0.1h$, 수심의 $1/4$ 인 $0.25h$, 수심의 $1/2$ 인 $0.5h$, 수심의 $3/4$ 인 $0.75h$ 와 수심과 같은 $1.0h$ 인 직사각형 불투과 잠제를 각각 1열, 2열과 3열로 배치하고 2열과 3열 잠제에 대해서는 잠제 사이의 간격(L_s)을 $0.1h$ 에서부터 $4.0h$ 까지 $0.1h$ 씩 변화시키면서 잠제 사이 간격 변화에 따른 잠제의 파랑 차단 성능을 해석하여 최대로 파랑을 감쇠시킬 수 있는 잠제사이의 최적 간격을 모색해 보았다.

3.1 수치모델의 검증

본 연구에서 사용된 수치모델을 검증하기 위해 직사각형 잠제에 대한 수치해석 결과를 Losada and Patterson(1997)이 직사각형 잠제를 대상으로 수행한 실험 결과와 비교하여 보았다.

Table 1 Wave conditions using in the experiments of the submerged breakwater performed by Losada and Patterson (1997)

$T(\text{sec})$	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
$H(\text{cm})$	3.32	3.27	3.12	3.10	3.19	2.94	2.97	2.64
h/L	0.478	0.380	0.317	0.269	0.234	0.209	0.186	0.170
$T(\text{sec})$	1.6	1.7	1.8	1.9	2.1	2.3	2.5	
$H(\text{cm})$	3.08	2.91	2.66	2.26	2.55	2.77	1.96	
h/L	0.158	0.145	0.135	0.126	0.113	0.102	0.092	

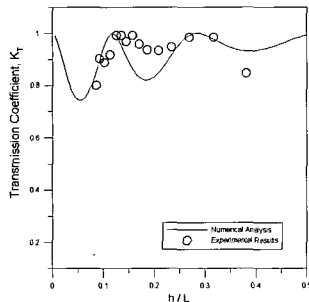


Fig. 2 Comparison of the wave transmission coefficient K_T of the numerical result of the submerged breakwater with that of the experimental result

Losada and Patterson은 그들의 실험에서 수심 0.475m, 잠제의 높이 0.385m, 그리고 잠제의 폭 0.8m를 사용하였으며 파랑의 조건은 Table 1과 같다. 여기서 T 와 H 는 각각 파랑의 주기와 파고를 나타낸다.

본 연구의 수치모델에서도 Losada and Patterson이 그들의 실험에서 사용한 동일한 수심, 잠제의 높이 및 폭을 사용하였으며, 파랑의 조건은 $h/L=0.005\sim 0.5$ 로 0.005씩 증가시키면서 수치해석을 수행하였다.

Fig. 2는 잠제의 파랑투과율에 대한 수치해석 결과와 실험 결과를 비교한 그림이다. 실선은 수치해석 결과를 나타내고 동그라미는 실험 결과를 나타내고 있으며, 수치해석 결과가 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

3.2 1열 잠제의 파랑 차단 특성

Table 2는 1열 잠제의 여러 가지 잠제의 폭에 대한 최소 파랑투과율 Min. K_T 와 그에 대한 파랑의 주기를 나타내고 있다. 잠제에 대한 기존의 연구에서와 같이 잠제의 폭이 넓어질수록 최소 파랑투과율은 점점 감소하면서 파랑 차단 성능이 향상되나, 잠제의 폭 0.5h 이상에서부터는 최소 파랑투과율에 있어 그다지 큰 차이를 보이지 않고 잠제의 폭 1.0h에서의 최소 파랑투과율과 비교해 볼 때 10% 미만의 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이는 잠제의 폭이 수심의 50% 이상일 때에는 잠제의 폭이 충분히 넓지 않더라도 상당히 효과적으로 파랑에 너지를 차단시켜줄 수 있다는 것을 보여주는 것이다. 그리고 파랑을 가장 효과적으로 차단시키는 주기의 범위는 주로 장주기대에서 나타나며 잠제의 폭이 넓어질수록 더욱 장주기쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 1열 잠제의 경우 여러 가지 잠제의 폭에 대한 파랑

Table 2 Minimum wave transmission coefficient of the single-submerged breakwater with various crown widths

Width	h/L at Min. K_T	Min. K_T
0.10h	0.16	0.7347
0.25h	0.13	0.6715
0.50h	0.10	0.6235
0.75h	0.08	0.6044
1.00h	0.06	0.5938

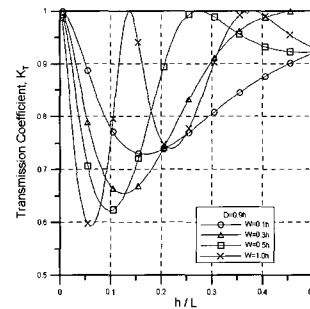


Fig. 3 Wave transmission coefficient K_T of the single-submerged breakwater with various crown widths

3.3 2열 잠제의 간격 변화에 따른 파랑 차단 특성

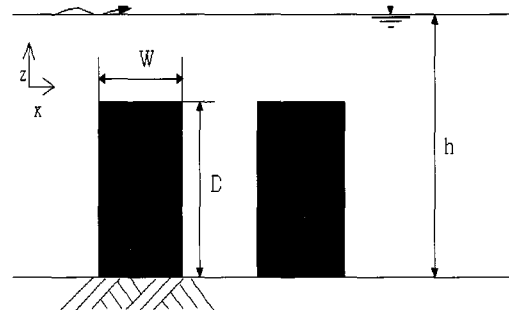


Fig. 4 Double-submerged breakwater

Table 3 Minimum wave transmission coefficient of the double-submerged breakwater with various crown widths

Width	h/L at Min. K_T	Min. K_T	L_s/h at Min. K_T
0.10h	0.18	0.3015	1.9
0.25h	0.14	0.2886	2.3
0.50h	0.10	0.2410	2.9
0.75h	0.08	0.2237	3.4
1.00h	0.07	0.2205	3.7

투과율과 그에 대한 파랑의 주기를 나타내는 그림이다. 앞에서 언급했던 것과 같이 잠제의 폭이 넓어질수록 파랑투과율은 점점 감소하면서 파랑 차단 성능이 향상되고 최소 파랑투과율이 나타나는 주기대는 장주기쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

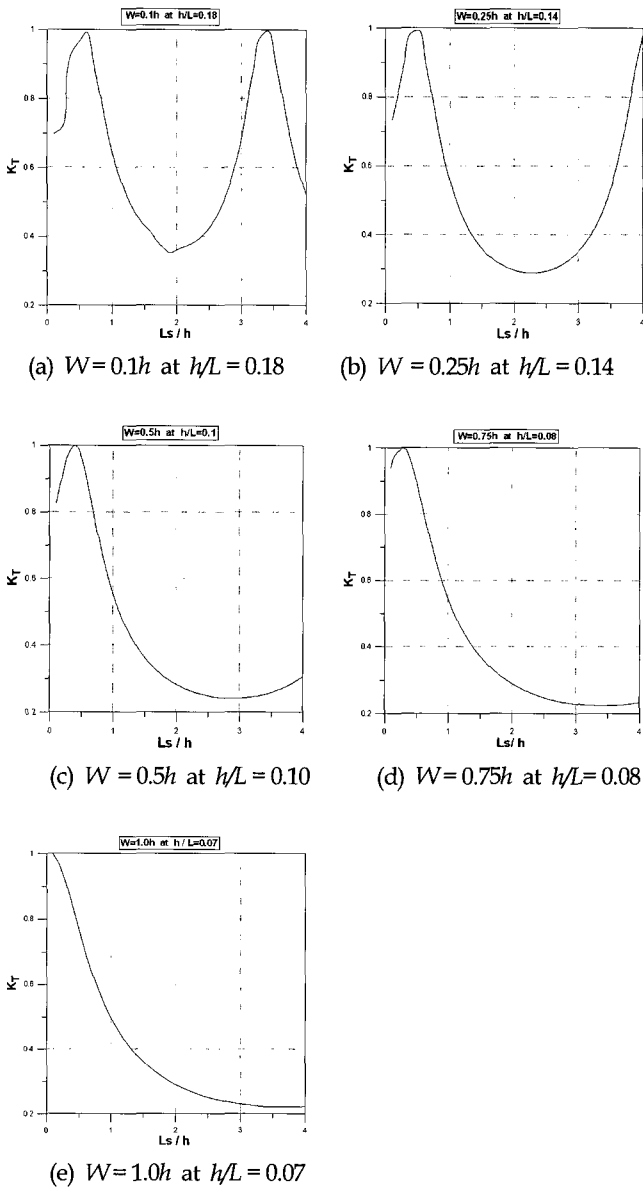


Fig. 5 Wave transmission coefficient K_T of the double-submerged breakwater on various distances between submerged breakwaters

Table 3은 2열 잠제에 대해 잠제 사이의 간격(L_s)을 $0.1h$ 에서부터 $4.0h$ 까지 $0.1h$ 씩 변화시키면서 파랑투과율을 계산하였을 때 최소 파랑투과율이 발생하는 파랑의 주기와 잠제 사이의 간격을 나타내는 표이다. 표에서와 같이 2열 잠제의 경우에 있어서도 1열 잠제와 같이 최소 파랑투과율은 주로 장주기대에서 나타나며 잠제의 폭이 넓어질수록 최소 파랑투과율은 감소하고 주기는 더욱 장주기쪽으로 이동한다. 그리고 최소 파랑투과율이 나타나는 잠제 사이의 간격은 잠제의 폭이 넓어질수록 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 1열 잠제에서와 같이 잠제의 폭 $0.5h$ 이상에서부터는 최소 파랑투과율에 있어 그다지 큰 차이를 보이지 않고 잠제의 폭 $1.0h$

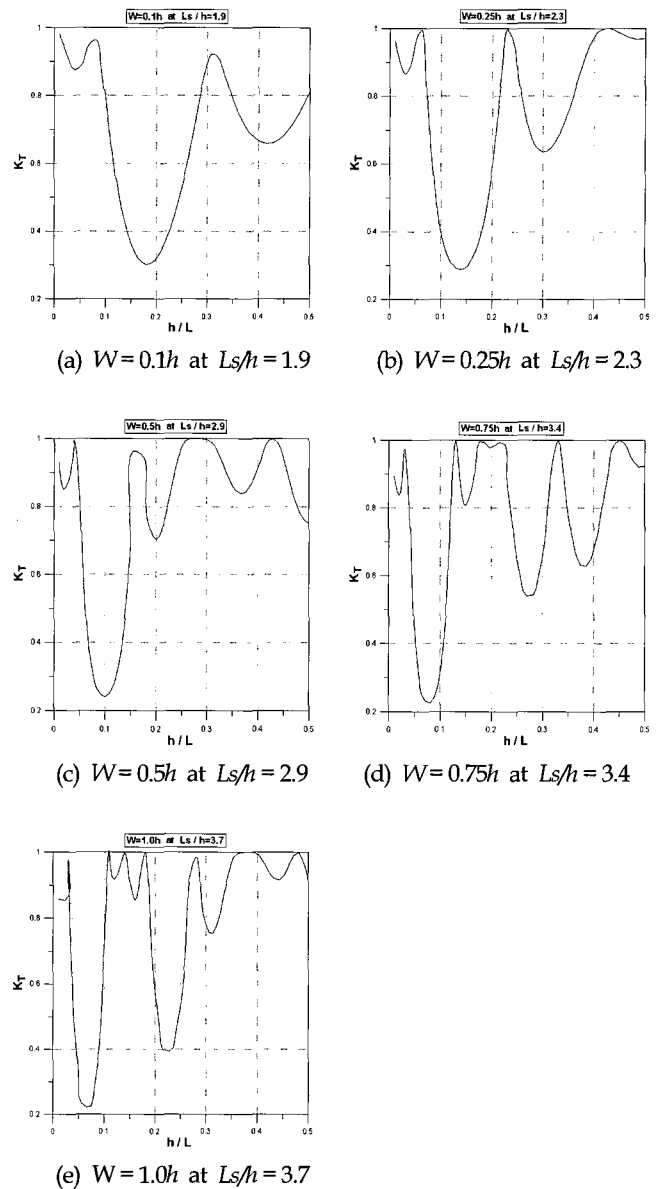


Fig. 6 Wave transmission coefficient K_T of the double-submerged breakwater

에서의 최소 파랑투과율과 비교해 볼 때 10% 미만의 차이를 보이고 있다.

Fig. 5는 여러 가지 잠제 폭에 대해 최소 파랑투과율이 나타나는 주기에 있어 잠제 사이의 간격에 대한 파랑투과율을 나타내는 그림이다. 그림에서와 같이 잠제 사이의 간격이 $1.0h$ 이하에서는 파랑투과율이 50% 이상으로 나타나는데, 이는 잠제 사이의 간격이 $1.0h$ 이하로 좁을 경우에는 파랑에너지가 잠제 사이에서 충분히 감쇄되지 못하고 파랑 차단 효과가 떨어지는 것을 보여주는 것으로 사료된다. 그리고 앞에서 언급했던 것과 같이 잠제의 폭이 넓어질수록 최소 파랑투과율은 감소하고 최소 파랑투과율이 나타나는 잠제 사이의 간격은 증가함을

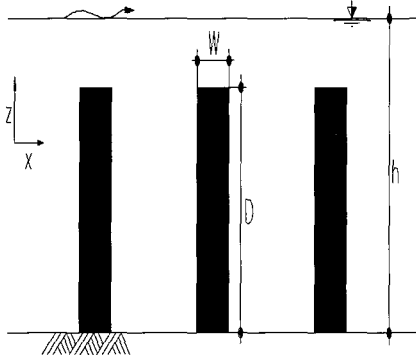


Fig. 7 Triple-submerged breakwater

알 수 있으나, 어느 특정한 잠제 사이의 간격을 지나면 최소파랑투과율은 다시 증가한다.

Fig. 6은 여러 가지 잠제 폭에 대해 최소 파랑투과율이 나타나는 잠제 사이의 간격에 있어 주기에 대한 파랑투과율을 나타내는 그림이다. 이 그림에서도 앞에서 언급했던 것과 같이 잠제의 폭이 넓어질수록 최소 파랑투과율은 감소하고 주기는 장주기쪽으로 이동한다.

3.4 3열 잠제의 간격 변화에 따른 파랑 차단 특성

Table 4는 3열 잠제에 대해 잠제 사이의 간격(L_s)을 $0.1h$ 에서부터 $4.0h$ 까지 $0.1h$ 씩 변화시키면서 파랑투과율을 계산하였을 때 최소 파랑투과율이 발생하는 파랑의 주기와 잠제 사이의 간격을 나타내는 표이다. 3열 잠제에 있어서는 최소 파랑투과율이 2열 잠제보다 작게 나타나 파랑 차단 효과가 보다 우수함을 나타내고 있다. 3열 잠제에 있어서도 2열 잠제와 같이 잠제의 폭이 넓어질수록 최소 파랑투과율은 감소하고 주기는 장주기쪽으로 이동하며 최소 파랑투과율이 나타나는 잠제 사이의 간격은 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 2열 잠제에서 나타난 것과 같이 잠제의 폭에 대해 최소 파랑투과율이 나타나는 잠제 사이의 간격은 잠제의 폭 $0.1h$ 를 제외하고는 같게 나타나고 있다. 이는 2열 잠제와 3열 잠제는 잠제의 수에 있어서는 차이가 있지만 잠제 사이에서 파랑이 감쇄되는 메카니즘은 유사하다는 것을 보여주는 것으로 사료된다. 또한 2열 잠제와 같이 잠제의 폭 $0.5h$ 이상에서부터는 최소 파랑투과율에 있어 그다지 큰 차이를 보이지 않고 잠제의 폭 $1.0h$ 에서의 최소 파랑투과율과 비교해 볼 때 약 10% 정도의 차이를 보이고 있어 잠제의 폭 $0.5h$ 이상에서부터는 파랑 차단 효과가 크게 다르지 않을 것으로 사료된다.

Fig. 8은 여러 가지 잠제 폭에 대해 최소 파랑투과율이 나타나는 주기에 있어 잠제 사이의 간격에 대한 파랑투과율을 나타내는 그림이다. 그림에서 나타나는 것과 같이 잠제 사이의 간격이 $1.0h$ 이상에서부터 파랑투과율이 감소하며 파랑 차단 효과가 있는 것으로 나타나고 있다. 이는 2열 잠제에서와 같이 잠제 사이의 간격이 $1.0h$ 이하로 좁을 경우에는 파랑에너지가 잠제 사이에서 충분히 감쇄되지 못하고 파랑 차단 효과가 떨어지는 것을 나타낸다.

Table 4 Minimum wave transmission coefficient of the triple-submerged breakwater with various crown widths

Width	h/L at Min. K_T	Min. K_T	L_s/h at Min. K_T
$0.10h$	0.17	0.1573	2.1
$0.25h$	0.14	0.1167	2.3
$0.50h$	0.10	0.0875	2.9
$0.75h$	0.08	0.0773	3.4
$1.00h$	0.07	0.0748	3.7

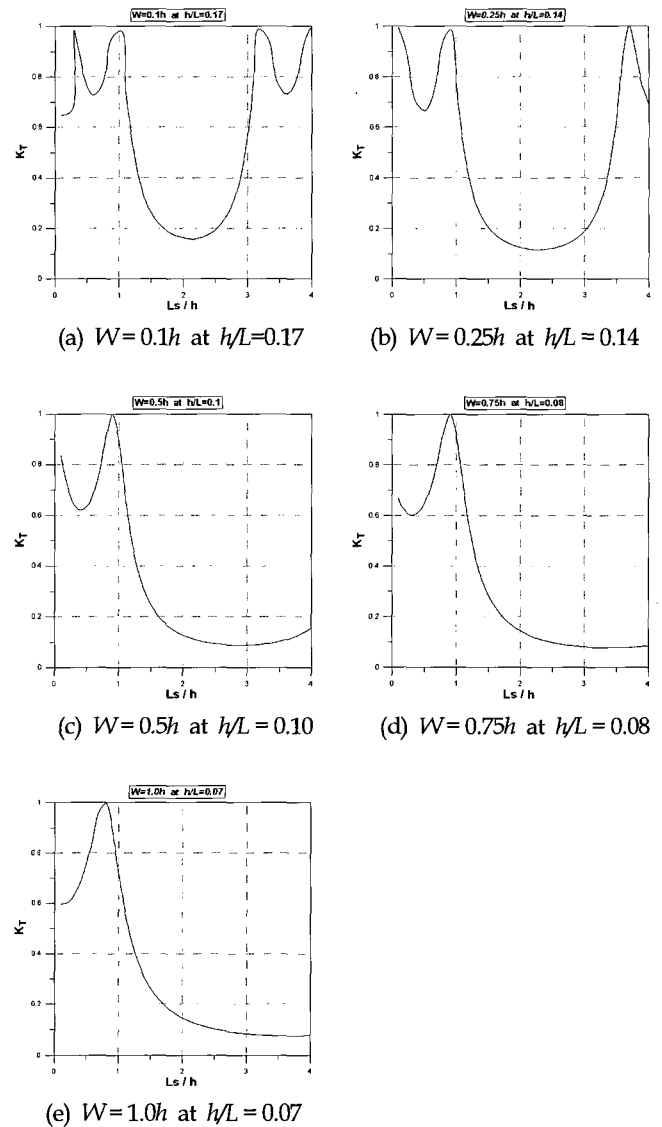


Fig. 8 Wave transmission coefficient K_T of the triple-submerged breakwater on various distances between submerged breakwaters

Fig. 9는 여러 가지 잠제 폭에 대해 최소 파랑투과율이 나타나는 잠제 사이의 간격에 있어 주기에 대한 파랑투과율을 나타내는 그림이다. 3열 잠제에 있어서도 2열 잠제와 같이 잠제

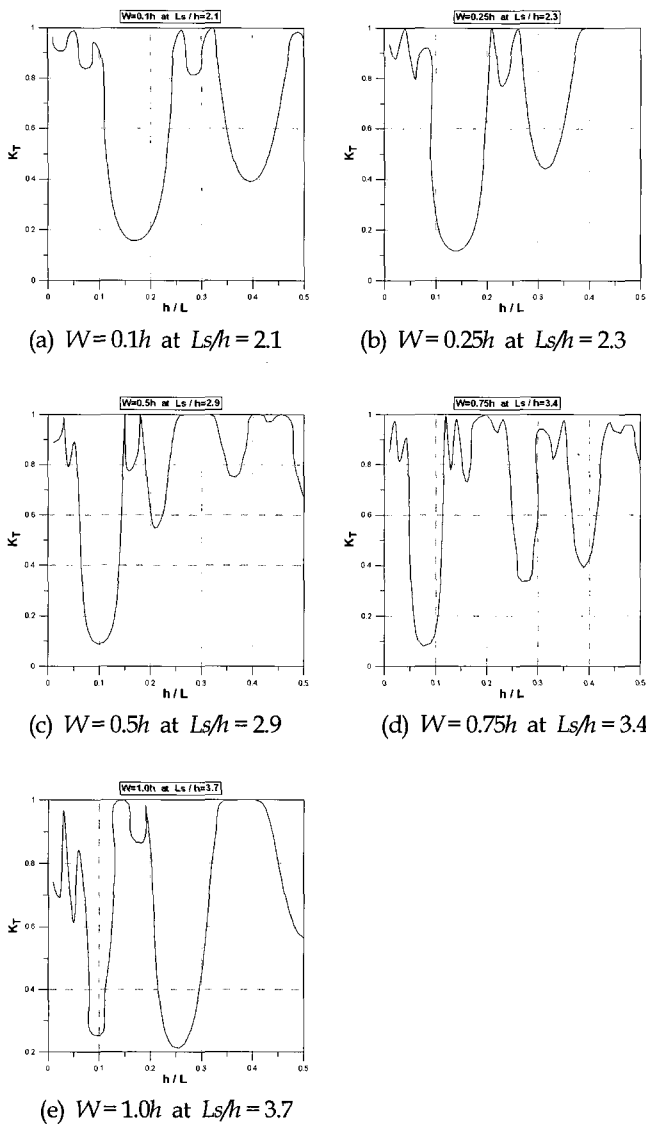


Fig. 9 Wave transmission coefficient K_T of the triple-submerged breakwater

의 폭이 넓어질수록 최소 파랑투과율은 감소하고 주기는 장주기쪽으로 이동한다.

4. 결 론

본 연구에서는 직사각형 불투과 잠제를 1열, 2열과 3열로 배치하고, 그리고 2열과 3열 잠제에 대해서는 잠제와 잠제 사이의 간격을 변화시키면서 잠제 사이 간격 변화에 따른 잠제의 파랑 차단 성능을 검토하여 파랑 차단 성능을 보다 향상시킬 수 있는 최적의 잠제 사이의 간격을 알아보았다.

2열 잠제와 3열 잠제에 있어서 파랑 차단 효과는 3열 잠제가 우수하게 나타났으나, 두 경우 모두 최소 파랑투과율은 주

로 장주기대에서 나타나며 잠제의 폭이 넓어질수록 최소 파랑투과율은 감소하고 주기는 더욱 장주기쪽으로 이동함을 알 수 있었다. 최소 파랑투과율이 나타나는 잠제 사이의 간격은 잠제의 폭이 넓어질수록 증가하는 것을 알 수 있었다. 잠제의 폭 0.5h 이상에서부터는 최소 파랑투과율이 그다지 큰 차이를 보이지 않고 잠제의 폭 1.0h에서의 최소 파랑투과율과 비교해 볼 때 약 10% 정도의 차이를 보이고 있어 잠제의 폭 0.5h 이상에서부터는 파랑 차단 효과가 크게 다르지 않을 것으로 사료된다. 잠제 사이의 간격이 1.0h 이하에서는 파랑투과율이 50% 이상으로 나타나고 있어 잠제 사이의 간격이 1.0h 이하로 좁을 경우에는 파랑에너지가 잠제 사이에서 충분히 감소되지 못하고 파랑 차단 효과가 떨어지는 것으로 사료된다.

본 연구는 선형이론에 의한 유한요소 수치모델을 이용하여 다열 잠제 사이의 간격 변화에 따른 파랑 차단 성능을 검토한 것으로 향후 수리실험을 통한 결과의 검증이 필요할 것으로 사료되며, 잠제의 파랑 차단 성능을 보다 향상시키기 위하여 더욱 다양한 형태의 잠제에 대한 연구도 요구되는 바이다.

후 기

본 연구는 2006년 중앙대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었음을 밝히는 바입니다.

참 고 문 헌

김도삼 (2000). "다열 잠제에 의한 파랑의 전달율과 반사율", 대한토목학회논문집, 제20권, 제1-B호, pp 85-94.
 양윤모, 이문찬, 김종석 (1987). "잠제의 반사와 투과율에 관한 연구", 부산대학교 도시연구보, 제1집, pp 1-11.
 조원철 (2004). "폭 변화에 따른 잠제의 파랑 차단 성능", 한국해안·해양공학회지, 제16권 제4호, pp 206-212.
 Kobayashi, N. and Wurjanto, A. (1989). "Wave transmission over submerged breakwaters", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol 115, No 5, pp 662-680.
 Losada, I.J. and Patterson, M.D. (1997). "Harmonic generation past a submerged porous step", Coastal Engineering, Vol 31, pp 281-304.
 Newman, J.N. (1965). "Propagation of water waves over an infinite step", Journal of Fluid Mechanics, Vol 23, pp 399-415.
 Van der meer, J.W. and Deamen, F.R. (1994). "Stability and wave transmission at low-crested rubble mound structures", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol 120, No 1, pp 1-19.

2006년 8월 24일 원고 접수

2006년 24월 20일 최종 수정본 채택