

폭 변화에 따른 잠제의 파랑 차단 성능 Wave Screening Performance of the Submerged Breakwater With Various Crown Widths

조 원 철*
Won Chul Cho*

요 지 : 본 연구에서는 폭이 좁은 1열 및 다열 잠제 대한 파랑 차단 성능을 폭이 넓은 1열 및 2열 잠제의 파랑 차단 성능과 비교·연구하였다. 파동장은 선형포텐셜 이론으로 모형화 하였으며 유한요소법을 적용하여 수치 해석 하였다. 수치해석 결과, 1열 잠제에서는 폭이 좁은 잠제가 폭이 넓은 잠제보다 파랑 차단 성능이 다소 떨어지나 어느 정도 효과적인 파랑 차단 성능을 보여주고 있으며, 폭이 좁은 잠제를 2열 또는 3열로 배치하였을 때에는 폭이 넓은 1열 또는 2열 잠제보다 훨씬 뛰어난 파랑 차단 성능을 보이고 있다.

핵심용어 : 다열 잠제, 유한요소법, 파랑반사, 파랑투과

Abstract : The numerical analysis on the wave screening performance of the submerged breakwater with various crown widths is presented. The fluid motion is considered as linearized two dimensional potential flow and the finite element method is used to analyze the wave screening performance of the submerged breakwater. It is found that single-submerged breakwater with large crown width shows the most effective wave screening performance and single-submerged breakwater with small crown width also shows fairly good wave screening performance but its effectiveness is less than that of single-submerged breakwater with large crown width. However, double- or triple-submerged breakwater with small crown width shows more effective wave screening performance than that of single- or double-submerged breakwater with large crown width. It is expected that the submerged breakwater with small crown width is economical because it reduces the size of structure.

Keywords : multiple submerged breakwaters, finite element method, wave reflection, wave transmission

1. 서 론

최근 지속적인 무역량의 증가, 선박의 대형화, 육지 공간의 부족, 해양 레저 수요의 증대 등으로 인하여 연안역의 개발과 사용이 더욱 요구되고 있는 실정이다. 연안역의 효율적인 개발과 사용의 극대화를 위해서는 다양한 형태의 방파제에 관한 연구는 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 또한 원활한 해

수 순환을 저해하여 항내 수질 악화를 야기시키는 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 반사율 및 투과율을 적분방정식을 이용하여 해석하였고, 양운모(1987) 등은 일열 및 복열 불투과 잠제에 대한 반사율 및 투과율을 수치해석하고 실험결과와 비교하여 복열 잠제가 단일 잠제에 비해 파랑 제어 효과가 우수함을 밝혔다. Kobayashi and Wurjanto(1989)는 불투과성 잠제로 입사하는 규칙파에 대한 반사파와 투

*중앙대학교 공과대학 건설환경공학과(Department of Civil & Environmental Engineering, Chung-Ang University, 221 Huksuk-dong, Dongjak-gu, Seoul, 156-756, Korea. chowc@cau.ac.kr)

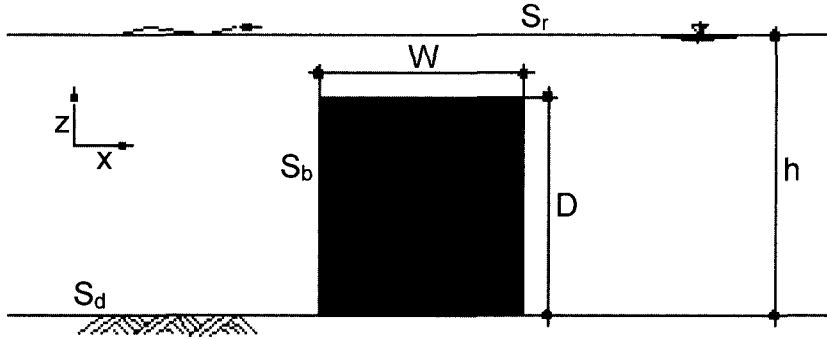


Fig. 1. Schematic definition for numerical model.

파파의 거동특성을 수치해석하고 에너지 소산의 공간변화율, 평균수면차, 단위 폭 당 질량전달을 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 제시하였다. 김도삼(2000)은 다열 잠제에 대한 파랑의 전달율과 반사율을 경계적분방정식을 이용하여 해석하고 다열 잠제의 파랑특성을 제시하였다.

해안방제시설로서 잠제는 착저 중력식 방파제와 같은 정도의 파랑 차단 효과는 기대할 수 없지만 천단이 수중에 위치하기 때문에 항내·외 해수 교환이 가능하여 항내 수질오염 저감에 유리하며 수평선을 확보할 수 있어 경관상 타 구조물에 비하여 유리하다는 장점이 있다. 잠제는 높이가 낮거나 폭이 좁은 경우에는 파랑 제어 기능이 떨어지기 때문에 잠제의 높이를 수면 가까이까지 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 일반적인 잠제의 파랑 차단 성능은 주기에 따라 변화하여 어느 특정한 주기대에서 높은 파랑 차단 효과를 나타내게 되고 그 외 주기대에서는 파랑 차단 효과가 크게 감소하는 문제점을 보인다. 본 연구에서는 이와 같은 문제를 토대로 잠제의 크기를 최소화하면서 파랑 차단 효과를 최대화하고, 또한 여러 주기대에 대한 잠제의 파랑 차단 성능을 개선할 수 있도록 잠제의 폭을 다양하게 변화시키면서 1열, 2열, 3열 잠제에 대한 파랑 차단 성능을 알아보았다. 먼저, 폭이 수심에 비해 상대적으로 좁은 1열 잠제의 파랑 차단 성능을 알아보고 이를 폭이 넓은 1열 잠제의 성능과 비교해 보았다. 그리고 폭이 좁은 잠제를 다열(2열, 3열)로 배치

하여 파랑 차단 성능을 향상시키고 이를 폭이 넓은 1열, 2열 잠제의 성능과 비교해 보면서 잠제의 크기를 최소화할 수 있는 방안을 모색해 보았다.

2. 이론적 배경

2.1 지배방정식 및 경계조건

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.

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

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

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

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

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.

$$\Phi = \text{Re}[(\phi_0 + \phi_4)e^{-i\omega t}] \tag{3}$$

여기서, ϕ_0 는 입사파에 의한 성분, ϕ_4 는 회절파에 의한 성분을 나타낸다. 입사파의 포텐셜 ϕ_0 는 다음과 같이 나타내진다.

$$\phi_0 = i \frac{g \zeta_a \cosh[k_0(z+h)]}{\omega \cosh(k_0 h)} e^{ik_0 x} \quad (4)$$

회절파에 의한 포텐셜은 무한경계면(S_j)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 파수(wave number)이고 $r=|x|$, $i=\sqrt{-1}$ 이다.

2.2 동압력 및 파력

물체표면 및 운동장 임의의 위치에서의 동압력 $p(x, z, t)$ 는 선형화된 Bernoulli 방정식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(x, z, t) = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = Re[i\omega \rho (\phi_0 + \phi_4) e^{-i\omega t}] \quad (6)$$

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.

$$F_j = -\int_{S_b} p(x, z, t) n_j S_b = Re[(F_j^e) e^{-i\omega t}] \quad \text{for } j=1, 2, 3 \quad (7)$$

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 잠제

를 포함하는 유체영역은 8절점 등매개변수 요소로 이산화한 유한요소로 모형화 하였으며, 입사파 및 투과파 영역의 개경계 조건은 무한요소로 모형화 하였다.

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

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. Losada and Patterson은 그들의 실험에서 수심, $h=0.475$ m, 잠제의 높이, $D=0.385$ m, 그리고 잠제의 폭, $W=0.8$ m를 사용하였으며 파랑의 조건은 Table 1과 같다.

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. 2와 Fig. 3은 수치해석 결과와 실험의 결과를 비교한 그림으로 실선은 수치해석 결과를 나타내고 동그라미는 실험 결과를 나타내는 것이다. Fig. 2는 잠제에 의한 파랑의 반사율을 나타내고, Fig. 3은 파랑의 투과율을 나타내는 그림으로 수치해석 결과가 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

3.2 폭 변화에 따른 잠제의 파랑 차단 성능

폭 변화에 따른 잠제의 반사 및 투과 특성을 알아보기 위하여 잠제의 높이(D)를 수심(h)에 대해 0.9 h 로 두고 잠제의 폭(W)를 0.1 h , 0.3 h , 0.5 h 로 변화시키면서 수치해석하여 잠제의 폭이 1.0 h 인 경우와 비교하여 보았다.

Fig. 4와 Fig. 5는 잠제의 높이, $D=0.9$ h 일 때, 잠제 폭, $W=0.1$ h , 0.3 h , 0.5 h , 1.0 h 일 때 파랑의 반사율과 투과율을 나타내며, Table 2는 각 경우의 최대 반사율과

Table 1. Wave conditions using in the experiment 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 | 2.79 | 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 | |

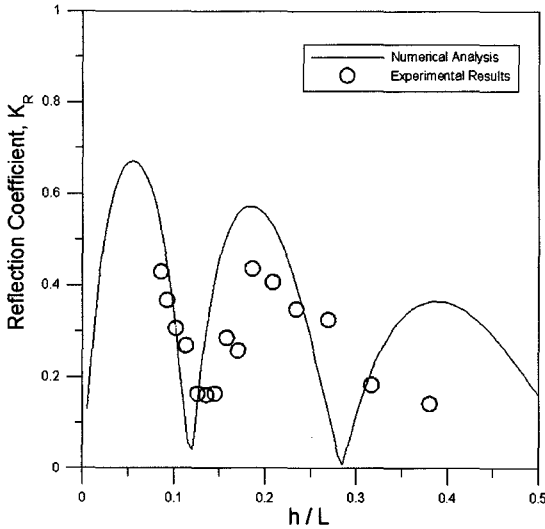


Fig. 2. Comparison of the wave reflection coefficient of the numerical result of the submerged breakwater with that of the experimental result.

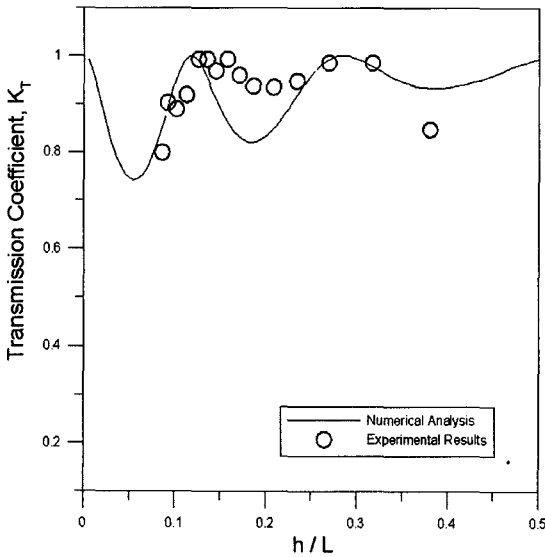


Fig. 3. Comparison of the wave transmission coefficient of the numerical result of the submerged breakwater with that of the experimental result.

최소 투과율 및 그 때의 h/L 를 나타내고 있다.

Fig. 4와 Fig. 5에서 나타나 있는 것과 같이 잠제의 폭이 증가할수록 파랑의 반사율은 증가하고 투과율은 감소하며, 최대 반사율과 최소 투과율이 발생하는 주기대가 점차 장주기 영역으로 이동하는 것을 알 수 있다. Table 2에서 잠제의 폭이 수심과 동일한 $W=1.0h$ 인 경우에 대해

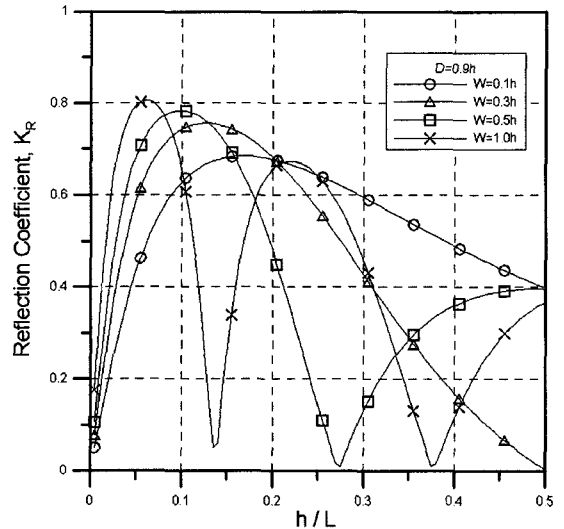


Fig. 4. Wave reflection coefficient of single submerged breakwater with various crown widths.

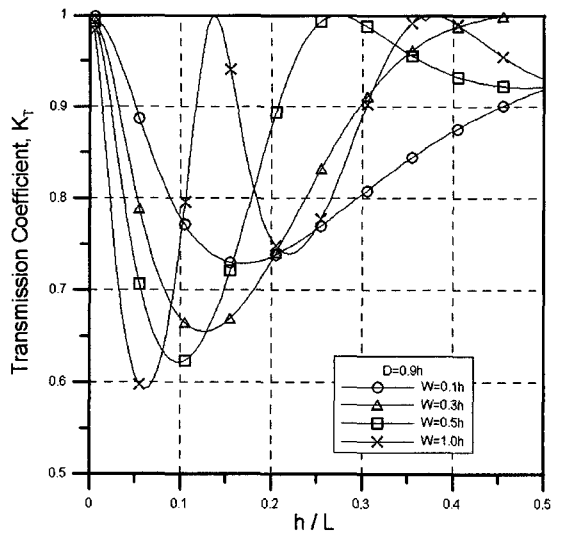


Fig. 5. Wave transmission coefficient of single submerged breakwater with various crown widths.

상대적으로 폭이 크게 작은 $W=0.1h$ 인 경우를 비교해 보면 최대 반사율은 $W=0.1h$ 인 경우가 $W=1.0h$ 인 경우의 약 85% 정도의 효과를 보이는 것을 알 수 있고, 최소 투과율은 $W=0.1h$ 인 경우가 $W=1.0h$ 인 경우의 약 67% 정도의 효과를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 두 경우를 비교해 볼 때 잠제의 폭이 감소함에 따라 파랑 제어 효과가 다소 감소하였으나 70%~85%의 파랑 차단 효과는 유지되고 있는 것을 알 수 있다. 그러므로 폭이 좁은 잠

Table 2. Maximum wave reflection coefficient and minimum wave transmission coefficient of single submerged breakwater with various crown widths

| 잠제의 폭 | 0.1 h | 0.3 h | 0.5 h | 1.0 h |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| Max. K_R | 0.685 | 0.756 | 0.783 | 0.805 |
| Min. K_T | 0.729 | 0.655 | 0.622 | 0.593 |
| h/L | 0.170 | 0.125 | 0.100 | 0.060 |

제를 2열 또는 3열로 배치하면 폭이 넓은 잠제의 파랑 제어 효과에 상응하거나 보다 우수한 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

3.3 폭이 좁은 다열 잠제의 파랑 차단 성능

폭이 좁은 잠제의 파랑 차단 효과를 향상시키기 위해 천단고가 $D=0.9h$ 이며, 폭이 좁은 $W=0.1h$ 인 잠제를 수심과 동일한 잠제의 간격($L_s=1.0h$)으로 2열, 3열 배치하고 수치해석하여 보았다(Fig. 6). Fig. 7과 Fig. 8은 각 경우에 대한 수치 해석 결과를 통해 얻어진 파랑의 반사율과 투과율을 나타내며, Table 3은 각 경우의 최대 반사

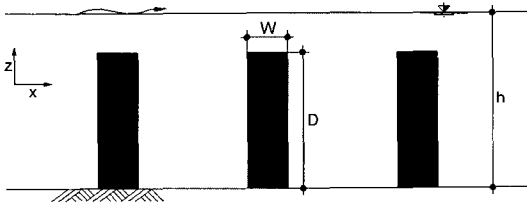


Fig. 6. Triple-submerged breakwater with small crown width.

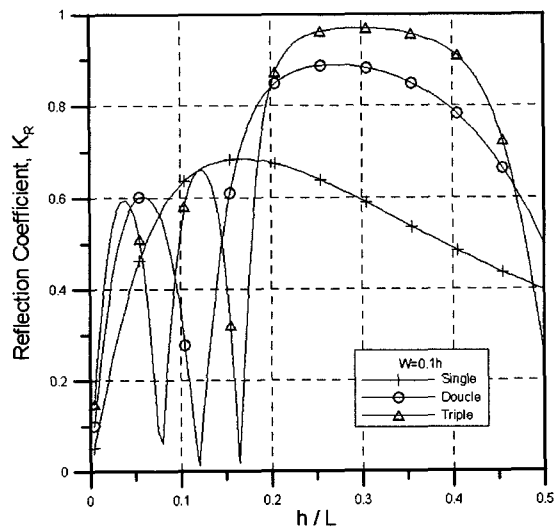


Fig. 7. Comparison of the wave reflection coefficient of single-, double- and triple- submerged breakwaters with small crown width.

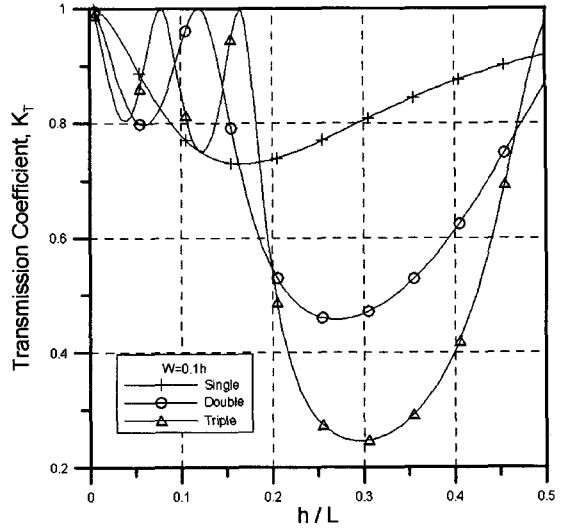


Fig. 8. Comparison of the wave transmission coefficient of single-, double- and triple-submerged breakwaters with small crown width.

Table 3. Maximum wave reflection coefficient and minimum wave transmission coefficient of single, double and triple submerged breakwaters with small crown width

| 잠제의 수 | Single | Double | Triple |
|------------|--------|--------|--------|
| Max. K_R | 0.685 | 0.889 | 0.969 |
| Min. K_T | 0.729 | 0.458 | 0.246 |
| h/L | 0.170 | 0.270 | 0.295 |

율과 최소 투과율 및 그 때의 h/L 를 나타내고 있다.

Fig. 7과 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 1열 잠제에 비하여 2열 및 3열 잠제는 중·단주기대에서 파랑의 반사율은 크게 증가하고 투과율은 크게 감소하는 높은 파랑 차단 효과를 보이고 있어 중·단주기대 파랑 제어에 효과적일 것으로 사료된다. 그리고 2열 잠제에 비하여 3열 잠제가 더욱 높은 파랑 제어 기능을 보이고 있어 잠제의 수가 증가할수록 파랑 차단 효과가 증대됨을 다시 한번 확인할 수 있다.

3.4 폭이 좁은 다열 잠제와 폭이 넓은 다열 잠제의 파랑 차단 성능

폭이 좁은 다열 잠제의 파랑 차단 효과를 폭이 넓은 다열 잠제의 효과와 비교하기 위해 잠제의 높이, $D=0.9h$ 일 때, 잠제의 폭, $W=0.1h$ 를 2열 또는 3열, $W=1.0h$ 를 2열 잠제로 하고 잠제의 간격(L_s)은 수심과 동일한 $1.0h$ 로 두고 수치해석하여 비교하여 보았다.

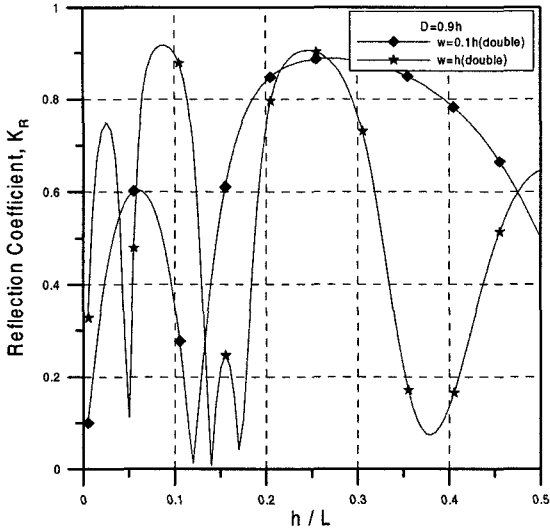


Fig. 9. Comparison of the wave reflection coefficient of double-submerged breakwater with small crown width and double-submerged breakwater with large crown width.

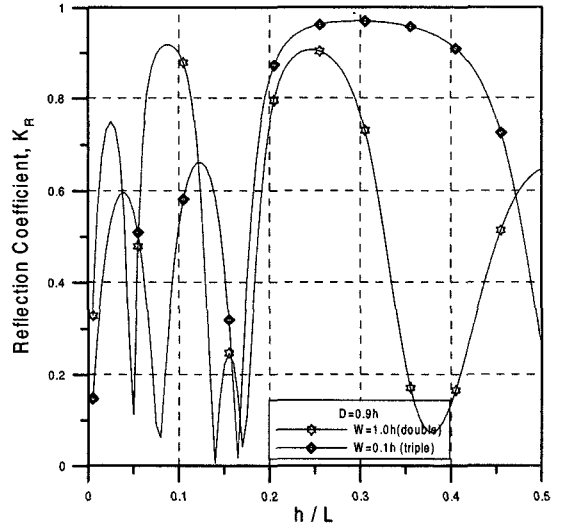


Fig. 11. Comparison of the wave reflection coefficient of triple-submerged breakwater with small crown width and double-submerged breakwater with large crown width.

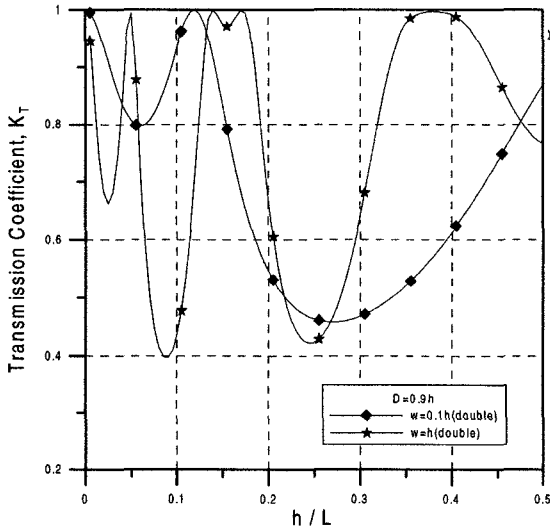


Fig. 10. Comparison of the wave transmission coefficient of double-submerged breakwater with small crown width and double-submerged breakwater with large crown width.

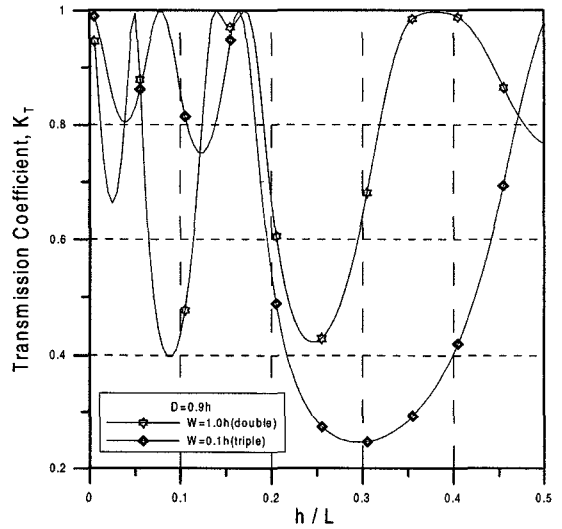


Fig. 12. Comparison of the wave transmission coefficient of triple-submerged breakwater with small crown width and double-submerged breakwater with large crown width.

잠제의 폭, $W=0.1h$ 를 2열로 하고 $W=1.0h$ 를 2열로 배치한 경우, Fig. 9와 Fig. 10에서 나타난 것과 같이 폭이 넓은 2열 잠제는 중·장주기대에서 파랑의 반사율이 크게 증가하고 투과율은 크게 감소하는 경향을 보이고 있어 중·장주기대 파랑을 차단하는데 효과가 있을 것으로 사료된다. 그러나 폭이 좁은 2열 잠제는 장주기대에서 어느 정도의 파랑 차단 효과는 보이고 있으나 폭이 넓은 2

열 잠제보다는 그 효과가 미비하며, 비록 중주기에 있어 폭이 넓은 2열 잠제보다 파랑의 반사율과 투과율이 아주 조금 떨어지기는 하나 중·단주기대에서 높은 파랑의 반사율과 낮은 파랑의 투과율을 보이고 있어 중·단주기대에서 우수한 파랑 제어 성능을 보이고 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 잠제의 폭, $W=1.0h$ 를 2열로 하고 $W=0.1h$ 를 3열로 배치한 경우이다. 파랑의 반사율과

투과율은 Fig. 9와 Fig. 10과 같이 폭이 넓은 2열 잠제는 중·장주기대에서 파랑의 반사율이 크게 증가하고 투과율은 크게 감소하는 경향을 보이고, 폭이 좁은 3열 잠제는 폭이 좁은 2열 잠제보다는 파랑 차단 효과가 증가하나 폭이 좁은 2열 잠제와 같이 중·단주기대에서 파랑의 반사율이 크게 증가하고 파랑의 투과율이 크게 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과로 볼 때, 폭이 넓은 잠제는 중·장주기대에서 파랑 차단 효과가 우수함을 알 수 있고, 폭이 좁은 잠제는 중·단주기대에서 파랑 차단 효과가 우수함을 알 수 있다. 그러므로 파동장이 중·장주기대가 지배적인 해역에서는 폭이 넓은 잠제를 사용하는 것이 바람직하고, 파동장이 중·단주기대가 지배적인 해역에서는 폭이 좁은 잠제를 사용하는 것이 바람직하다 하겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 다양한 폭을 가진 잠제의 파랑 차단 성능을 검토해 보고 폭이 좁은 잠제를 다열로 배치하여 파랑 차단 성능을 개선할 수 있는 방안을 모색해 보았다. 먼저 잠제의 폭을 변화시키면서 폭 변화에 따른 파랑의 반사율과 투과율을 분석해 보았고, 폭이 좁은 잠제를 다열로 배치하였을 경우에 대한 파랑 차단 성능을 검토해 보았다. 또한 폭이 좁은 2열 및 3열 잠제와 폭이 넓은 1열 및 2열 잠제의 파랑의 반사율과 투과율을 분석해 보고 폭이 좁은 다열 잠제의 파랑 차단 성능 검토해 보았다.

잠제의 파랑 차단 성능은 폭이 넓어질수록 그 효과가 우수하고 최대 반사율과 최소 투과율이 발생하는 주기대는 장주기대로 이동하는 것을 알 수 있었다. 그러나 잠제의 폭이 좁아지더라도 폭이 넓은 잠제보다는 파랑 차단 효과는 떨어지나 어느 정도 그 효과를 유지하고 있고, 다열로 배치하였을 경우 폭이 넓은 잠제보다 더욱 향상된 파랑 차단 효과가 나타난다는 것을 알 수 있었다. 그리고 1열 잠제에 비해 2열, 3열 잠제가 파랑을 차단하는데 더욱 효과가 있음을 확인 할 수 있었다. 또한 폭이 넓은 2열 잠제는 중·장주기대에서 파랑의 반사율이 크게 증가하고 투과율은 크게 감소하여 중·장주기대 파랑을 차단하는데 효과가 있고, 폭이 넓은 2열, 3열 잠제는 파랑 차단 효과는 다소 차이가 있으나 중·단주기대에서 파랑의 반사율이 최대가 되고 투과율이 최소가 되어 중·단주기대에서 우수한 파랑 제어 성능을 보이고 있음을 알 수 있었다. 그러므로 파동장의 주기대에 따라 가장 우수한 파

랑 차단 효과를 보이는 잠제의 폭을 결정하여 잠제를 배치하는 것이 바람직 할 것으로 사료되며, 폭이 좁은 잠제를 다열로 배치 할 경우에는 폭이 넓은 잠제에 비해 파랑 차단 성능도 향상시킬 수 있고 또한 잠제에 소요되는 재료를 줄일 수 있어 경제적으로도 유리한 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 그리고 본 연구는 유한요소 수치모델을 이용하여 잠제의 폭 및 수를 변화시키면서 잠제의 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.

참고문헌

- 김도삼 (2000). 다열 잠제에 의한 파랑의 전달율과 반사율. 대한토목학회논문집, 20(1-B), 85-94.
- 김도삼, 이광호, 김정수 (2002). 수중투과성 구조물에 의한 쇄파를 수반한 파랑변형 및 유속장 해석. 한국해양·해양공학회지, 14(2), 171-181.
- 박우선, 윤정방, 편종근 (1989). 파랑하중 산정을 위한 무한요소. 한국해양·해양공학회지, 1(1), 71-80.
- 박우선, 이달수, 오영민, 정원무 (1991). 연직 2차원 회절 및 방사문제 해석을 위한 무한요소. 한국해양·해양공학회지, 3(4), 235-243.
- 양윤모, 이문찬, 김종석 (1987). 잠제의 반사와 투과율에 관한 연구. 부산대학교 도시연구보, 1, 1-11.
- 조원철, 이진원 (2003). 부유식 방파제와 잠제를 이용한 파랑 차단 성능 연구. 한국해양·해양공학회지, 15(4), 224-231.
- Kobayashi, N. and Wurjanto, A. (1989). Wave transmission over submerged breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 115(5), 662-680.
- Korea Ocean Research and Development Institute (1992). Development of improving quality in harbor(1).
- Losada, I.J. and Patterson M.D. (1997). Harmonic generation past a submerged porous step. *Coastal Engineering*, 31, 281-304.
- Newman, J.N. (1965). Propagation of water waves over an infinite step. *Journal of Fluid Mechanics*, 23, 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, 120(1), 1-19.