

해저면의 에너지 감쇠를 고려한 불투과 잠제의 파랑특성해석

김남형^{1,†} · 양순보² · 박민수³ · 김상진⁴

제주대학교 해양과학부, 제주대학교 대학원 토목해양공학과,
제주대학교 대학원 토목해양공학과, 제주대학교 해양과학부

Analysis on the Wave Characteristics of Submerged Breakwater Considering Energy Dissipation of Seabed

Nam-Hyeong Kim^{1,†}, Soon-Bo Yang², Min-Su Park³ and Sang-Jin Kim⁴

School of Ocean Science, Cheju National University, Jehu 690-756, Korea

요 약

본 연구에서는 경계요소법을 이용하여 투과 저면위의 불투과성 잠제에 의한 투과율을 수치해석 하였다. 해석기법으로는 유체와 투과성 영역을 동시에 해석할 수 있는 파압함수를 사용하였으며, 이론적으로 간단히 하기 위해, 투과성 영역내의 파랑의 운동은 선형소산계수와 부가질량계수를 도입하여 정식화하였다. 투과 해저면 위를 진행하는 파랑은 진폭이 감쇠하면서 진행하는 것을 알 수 있었다. 그리고 투과율은 전체적으로 불투과 저면에 비해 투과 저면에서 작아지는 것을 알 수 있었으며, 잠제의 폭과 높이의 변화에 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

Abstract – The transmission coefficients of impermeable submerged breakwater on permeable bottom are computed numerically using a boundary element method. The analysis method is based on the wave pressure function with the continuity in the analytical region including fluid and structures. Wave motion over permeable bottom is simulated by introducing a linear dissipation coefficient and an added mass coefficient. The results indicate that the wave over permeable bottom travels being damped, and that transmission coefficients for permeable bottom are smaller than those for impermeable bottom, and result from the change of width and height of submerged breakwater.

Key words: Boundary Element Method(경계요소법), Submerged Breakwater(잠제), Wave Pressure Function(파압함수), Transmission Coefficient(투과계수)

1. 서 론

해안·항만에 설치되어 있는 소파 구조물의 하나로서 잠제는 수질 보전과 경관상 뛰어난 성질을 가지고 있다. 잠제의 수리학적 특성에 대하여 수많은 이론적 혹은 실험적인 연구가 이루어져 왔으며, 이러한 해안구조물에 의한 파랑저감효과를 예측하는 것이 중요시되고 있다. 또한 항만구조물이 장기적으로 안정성을 유지하기 위하여, 세굴이나 침하가 발생하기 어려운 단면설계를 행하는 것도 중요하다.

종래의 해석법은 투과영역을 포함하는 파동 문제에 대한 이론

적인 계산 방법으로서, 투과층내의 유체의 저항을 속도에 비례하는 등가선형저항을 취급함으로써 속도포텐셜 가 가정되고, 이 속도포텐셜 를 미지량으로 하는 해석기법(井島와 佐佐木[1971])을 이용하여 왔다. 그러나 이러한 종래의 해석기법은 속도포텐셜 가 각 경계 영역에서 유체운동의 연속조건을 만족시켜야 할 필요가 있으므로, 그 처리 방법이 복잡하며, 실용적이라고 할 수 없다.

여기서 제안한 파압함수를 미지량으로 하는 해석기법(Takikawa and Kim[1992])을 이용하면, 각 경계 영역에서 유체의 연속조건을 특별히 고려할 필요가 없고, 에너지 감쇠를 포함하는 폭넓은 파동 문제를 쉽게 해석할 수 있다. 이러한 해석기법을 이용하여 김과 양[2003]은 사다리꼴형상 불투과 잠제의 사면경사 변화에 대한 소파특성을 검토하였다.

[†]Corresponding author: nhkim@cheju.ac.kr

본 연구에서는, 여러 형태의 잠제형상 중 직사각형 잠제를 선택하였으며, 투과 해저면에 의한 잠제주변의 파형과 불투과 해저면에 의한 잠제 주변의 파형과 투과율을 파압함수를 미지량으로 사용하는 경계요소해석법(김과 서[1995]; 김[2002])을 사용하여 비교분석하였다.

2. 경계요소해석

좌표계는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 구조물을 포함하는 유체 영역에서의 파랑의 특성을 해석할 때에는 전체의 해석영역이 각각 다른 공극률과 유체저항을 가지는 영역으로 구성되어 있으므로 각 영역마다 세분화된 유체 운동을 고려해야 한다.

경계 S_1 은 자유수면, 경계 S_2 는 해저 저면에 의한 경계이고, 경계 S_3 는 해석상 설정한 가상 경계를 의미하며, 이 가상 경계에서의 유체의 운동은 연속성을 만족해야 한다. 경계 S_1, S_2, S_3 으로 둘러싸인 해석 영역에서는 유체의 운동을 미소진폭파운동으로 가정하여 선형해석을 한다.

해석영역을 이루고 있는 각 투과영역에 있어서, x방향 및 y방향의 유속을 각각 u, v 로 나타내며, 압력을 P , 유체의 밀도를 ρ 로 한다. 유체의 연속방정식 및 운동방정식은 각 투과영역에 대해서, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\varepsilon} \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho} \right) - F_x \\ \frac{1}{\varepsilon} \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P}{\rho} + g \cdot y \right) - F_y \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

여기서, ε 는 공극률, g 는 중력가속도이다. 또, F_x, F_y 는 유체운동에 대한 에너지 소산(유체저항)의 x, y방향의 성분을 의미한다. 에너지 소산항은 레이놀드수가 매우 작은 경우를 제외하면, 일반적으로 비선형이며, 유체가 가속도 운동을 하는 경우에는 부가질량력으로서 유체저항이 작용한다. 여기서는 비선형적인 에너지 소산항을 등가(等價)인 선형소산계수 γ 와 부가질량계수 C_m 을 이

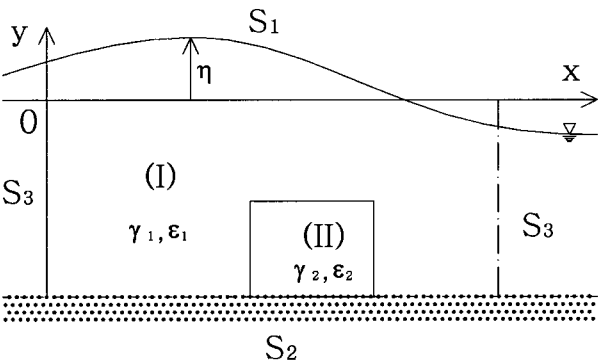


Fig. 1. Analytical region and coordinate.

용하여, 다음 식으로 나타낸다.

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \gamma \cdot u + (1-\varepsilon) \cdot C_m \cdot \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial t} \\ F_y &= \gamma \cdot v + (1-\varepsilon) \cdot C_m \cdot \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial v}{\partial t} \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하고, 가속도의 이송항을 무시하면 선형화된 다음의 운동방정식이 얻어진다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{V} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho} \right) - \gamma \cdot U \\ \frac{1}{V} \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P}{\rho} + g \cdot y \right) - \gamma \cdot v \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

여기서, $\frac{1}{V} = \frac{1}{\varepsilon} (1 + C_m \cdot (1-\varepsilon))$ 이다.

유체의 비회전성을 가정하면 속도포텐셜 $\Phi(x, y, t) = \text{Re}\{\phi(x, y) e^{i\omega t}\}$ 을 도입할 수 있으며, 유체의 운동방정식 (4)를 적분하면, 유체운동의 기초식 (1)과 (2)는 속도포텐셜을 이용하여, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \tag{5}$$

$$\frac{1}{V} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \gamma \cdot \Phi + \frac{P}{\rho} + g \cdot y = 0 \tag{6}$$

경계조건으로서는, 각 영역마다 대응하는 조건을 채용하는 것으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

경계 S_1 : $\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial n}_{y=0}$,

$$\eta = -\frac{1}{gV} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \gamma \Phi V \right)_{y=0} \tag{7}$$

경계 S_2 : $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \frac{K \partial p_s}{\mu \partial y}$ (n : 외향법선방향) $\tag{8}$

경계 S_3 : $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \frac{\partial \Phi_0}{\partial n}$ (Φ_0 : 해석영역 외부의 속도포텐셜) $\tag{9}$

여기서 p_s 는 간극수압, K 는 투수계수, μ 점성계수를 의미한다.

또, 각 영역의 경계면에서는 유체운동의 연속조건(질량보존과 에너지보존)을 만족할 필요가 있다.

질량 보존: $\frac{\partial \Phi_I}{\partial n} = \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial n}$ $\tag{10}$

에너지 보존: $\left(\frac{P}{\rho g} + y \right) = -\frac{1}{gV} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \gamma \Phi V \right) \equiv H$ $\tag{11}$

해석기법으로는 식 (7)~(10)의 속도포텐셜 를 미지량으로 나타내는 경계치의 문제로 취급할 수가 있다. 그러나 속도포텐셜 Φ 를 미지량으로 해석하는 영역분할법의 경우, 각 영역에서 Φ 가 식 (10)을 만족시킬 필요가 있으므로, 매질이 다른 영역이 혼재하는 문제에 대해서는 처리 방법이 복잡하며, 실용적이라고 할 수 없다. 따

라서 여기서는 식 (11)에 나타나는 파압함수 H 가 전 해석 영역을 통해서 연속적인 것에 착안하여, 이것을 미지량으로 하는 해석기법을 이용한다. 입사파의 각주파수 $\sigma(=2\pi/T, T=주기)$ 에 의해 유체운동의 주기성을 고려하여,

$$H(x, y, t) = Re\{h(x, y)e^{i\sigma t}\} \quad (12)$$

로 한다. 여기서, $i = \sqrt{-1}$ 이다. 식 (11)으로부터,

$$F = -b\Phi = -\beta \cdot H, \quad \beta = \frac{g \cdot V}{(i \cdot \sigma + \gamma \cdot V)} \quad (13)$$

가 얻어진다. 식 (13)를 이용하여, 식 (5)-(11)로 나타내는 각 조건식을 대입하면, 다음식과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \text{전체영역: } & \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0 \\ \text{경계 } S_1: & i\sigma H_{y=0} = -\beta \frac{\partial H}{\partial y}_{y=0} \\ \text{경계 } S_2: & \beta \frac{\partial H}{\partial n} = \frac{K \partial p_s}{\mu \partial n} \\ \text{경계 } S_3: & \beta \frac{\partial H}{\partial n} = \beta \frac{\partial H_0}{\partial n}, \left(H_0 = -\frac{1}{\beta} \Phi_0 \right) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

식 (14)의 각 조건식으로부터, 파압함수 H 에 관한 경계치 문제로 되며, 영역 (I), (II)에 ϵ, γ 를 대입함으로써, 영역을 구분하지 않고 해석할 수 있다.

해석영역의 가상경계 S_3 에서의 조건은 에너지 유속의 연속성을 고려하였으며, 가상경계의 처리방법과 경계요소법에 의한 정식화는 참고문헌(Takikawa and Kim[1992])에 상세히 소개되어 있으므로, 여기서는 생략한다.

경계조건 식 (7)-(9)로부터 다음과 같은 무한대의 투과 해저면에 대한 분산관계식을 얻을 수 있다.

$$\sigma^2 - gk \tanh kh = -i \frac{\sigma K}{v} (gk - \sigma^2 \tanh kh) \quad (15)$$

여기서 v 는 동점성계수이다. 이 분산관계식으로부터 복소수 k 를 산출하며, $k = k_r + ik_i$ 로 나타낼 수 있다. k 의 실수부는 실제의 파수를 나타내며, 파장과 관계가 있다. 그리고 허수부는 진폭의 감소를 결정한다. 식 (15)의 $R(=\sigma K/v)$ 는 일반적으로 작으며, 모래에 대하여 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ 이고, 일반적인 범위의 자갈인 경우 10^{-1} 이다(Dean and Dalrymple [1984]; Cruz et al.[1997]).

3. 수치해석 및 고찰

3.1 일정한 투과 해저면위의 파형분포

파랑은 Fig. 2에서 보듯이 x 축의 왼쪽에서 오른쪽 방향으로 진행하며, h 는 수심을 의미한다. 그리고 파동장(場)의 해석에 있어서, 구조물 주변의 흐름은 정상파와 산란파 등이 발생하기 때문에 가능한 경계면을 구조물에서 멀리 취하는 것이 바람직하다. 따라서

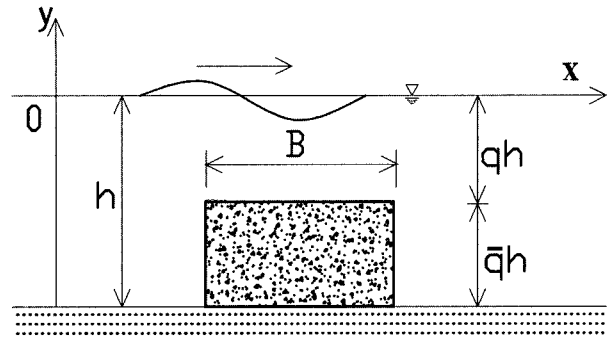


Fig. 2. Sketch of impermeable submerged breakwater.

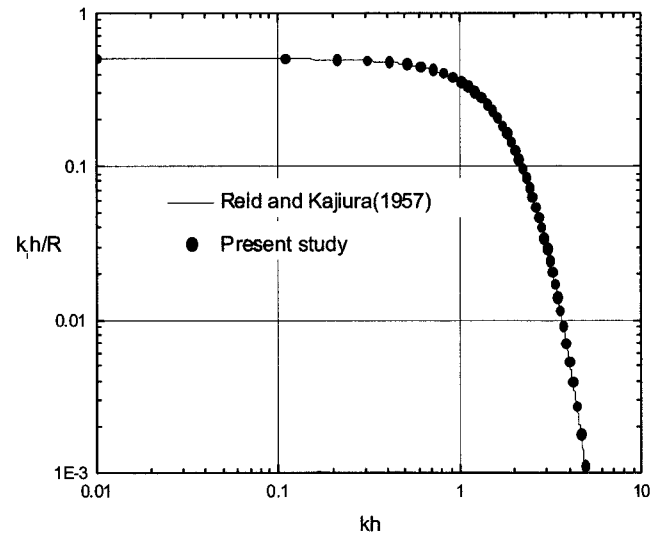


Fig. 3. Dimension damping coefficient versus depth.

여기서는 잠체의 선단에서 가상경계면까지 2파장분의 거리를 취하였으며, Fig. 1의 유체영역(I)을 $\gamma_1=0$, 공극률 $\epsilon_1=1$, 잠체의 영역(II)을 $\gamma_2=0$, 공극률 $\epsilon_2=0$ 으로 놓아 수치계산 하였다.

식 (15)의 분산관계식으로부터 수심에 대한 파랑 진폭의 감쇠율을 나타낼 수 있으며, 그 결과는 Fig. 3과 같다. 실선은 Reid and Kajjura [1957]에 의한 계산결과로서, 본 연구결과와 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 천해역에서의 불투과 수평 해저면 위를 진행하는 파랑을 나타낸 것이며, 진폭의 감쇠 없이 진행된다는 것을 알 수 있다. Fig. 5, 6은 투과 저면위를 진행하는 파랑을 나타낸 것으로서, Fig. 5는 상대수심(h/L)이 0.1, 즉 천해역을 나타내며, Fig. 6은 상대수심(h/L)이 0.5, 즉 심해역을 나타낸 것이다. Fig. 5를 통하여 천해역에서는 파 진폭의 감쇠가 일어나는 것을 알 수 있으며, Fig. 6을 통하여 심해역에서는 파 진폭의 감쇠가 일어나지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 자유표면 아래의 물입자 속도가 투과층에 의한 영향을 받지 않아, 투과층에 의한 에너지 감쇠가 무시할 정도로 작기 때문이다(Dean and Dalrymple[1984]; Cruz et al.[1997]).

Fig. 7, 8, 9는 각각의 조건에 대한 파형 및 속도벡터를 나타낸 것이다.

Fig. 10은 상대수심(h/L)과 $R(=\sigma K/v)$ 의 변화에 대한 에너지 손

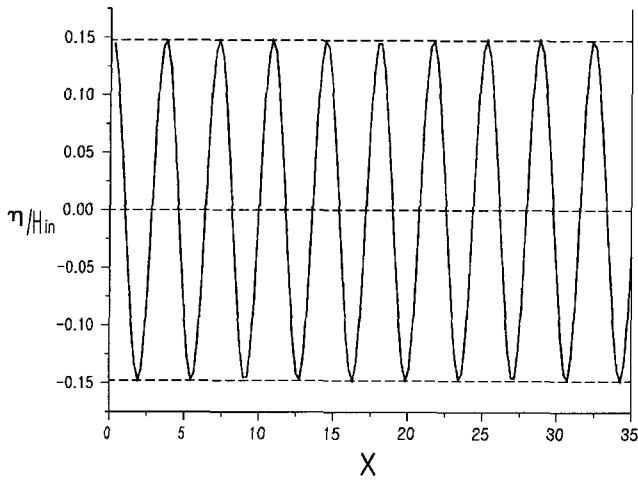


Fig. 4. Wave propagation on uniform impermeable bottom ($h/L = 0.1$).

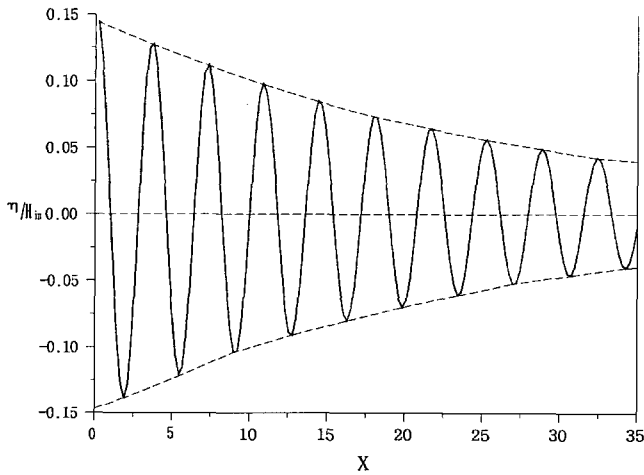


Fig. 5. Wave propagation on uniform permeable bottom in shallow water ($R = 0.1, h/L = 0.1$).

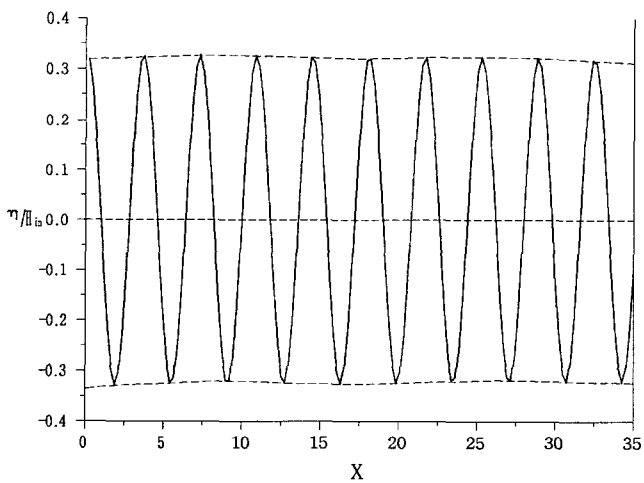


Fig. 6. Wave propagation on uniform permeable bottom in deep water. ($R = 0.1, h/L = 0.5$).

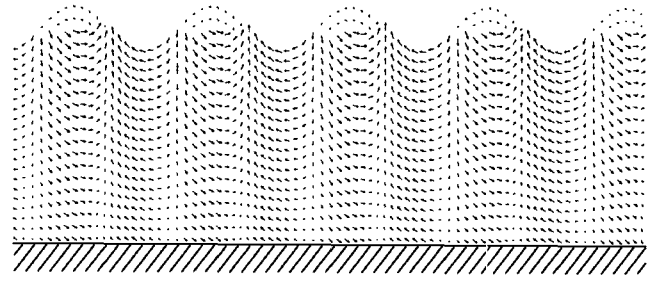


Fig. 7. Wave profile and velocity field on uniform impermeable bottom ($h/L = 0.1$).

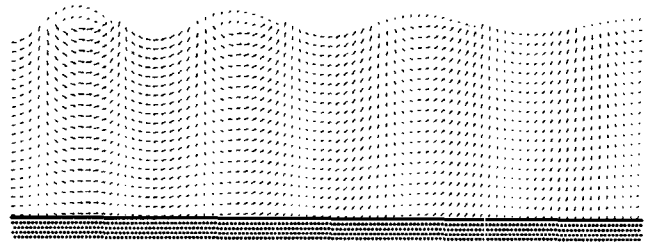


Fig. 8. Wave profile and velocity field on uniform permeable bottom in shallow water ($R = 0.1, h/L = 0.1$).

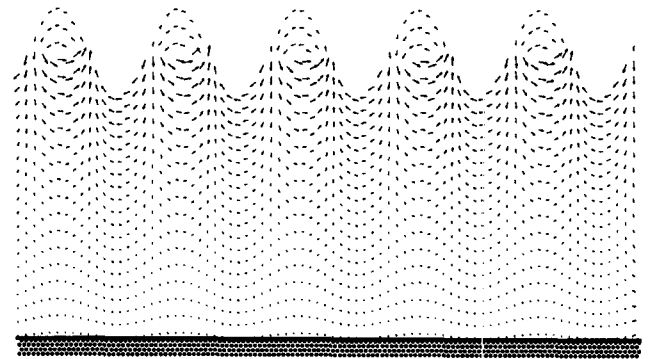


Fig. 9. Wave profile and velocity field on uniform permeable bottom in deep water ($R = 0.1, h/L = 0.5$).

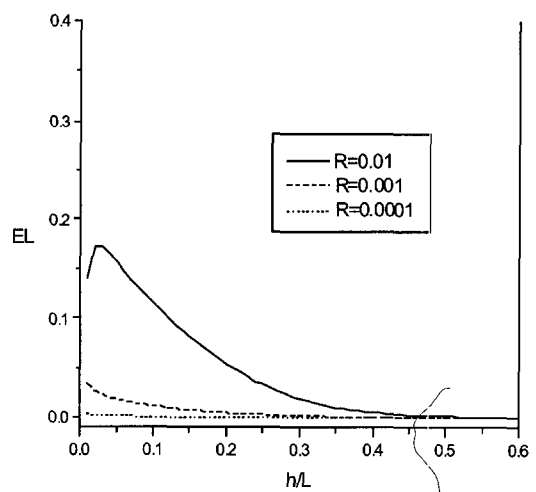


Fig. 10. Comparison of energy dissipation according to seabed conditions.

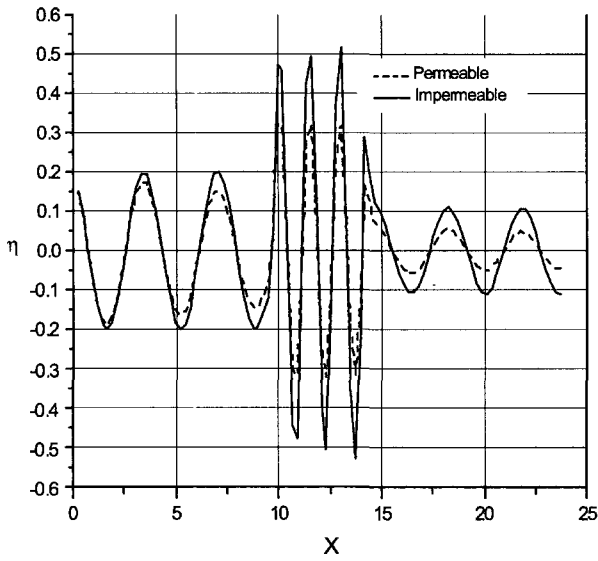


Fig. 11. Comparison of wave profile for an impermeable submerged breakwater according to seabed conditions ($R=0.1, B/h=1.0, h/L=0.1, q=0.1$).

실율을 나타낸 것으로서, 심해역으로 갈수록 에너지 손실율이 작아지는 것을 확인할 수 있다.

3.2 직사각형잠제에 대한 적용

Fig. 11은 천해역에서의 불투과 해저면과 투과 해저면에서의 직사각형잠제에 의한 파형분포를 비교한 것이다. 이를 통하여 일정한 불투과 해저면과 투과 해저면을 진행하는 파는 잠제를 지나면서 파고가 감쇠하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 불투과 저면에서의 잠제의 폭과 잠제의 높이($qh=(1-q)h$)의 변화에 따른 투과율의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 12의 (a)로부터 일정한 잠제의 높이($q=0.3$)에 대한 잠제 폭의 변화에 따른 투과율에 대한 효과는 폭이 커져도 진동주기만이 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 12의 (b)를 통하여 일정한 잠제 폭($B/h=1.0$)에 대한 잠제 높이의 변화에 따른 투과율에 대한 효과는 높이가 낮아질수록 투과율이 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 투과 저면에서의 잠제의 폭과 잠제의 높이의 변화에 따른 투과율의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 13의 (a)로부터 일정한 잠제 높이($q=0.3$)에 대한 잠제 폭의 변화에 따른 투과율에 대한 효과는 전체적으로 불투과 저면에 비해 투과율이 작아지는 것을 알 수 있다. Fig. 13의 (b)를 통하여 일정한 잠제 폭($B/h=1.0$)에 대한 잠제 높이의 변화에 따른 투과율에 대한 효과는 전체적으로 불투과 저면에 비해 투과율이 작아지는 것을 알 수 있으며, 높이가 낮아질수록 투과율이 커지는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 불투과 해저면과 투과 해저면 위를 진행하는 파의 파형과 속도벡터를 파압함수를 미지량으로 하는 경계요소법을 이용하여 이론적으로 비교해 보았으며, 이를 직사각형 잠제에 대하여 적용하여 잠제 전·후의 파고와 투과율을 나타내어 비교분석하였다.

각각의 수치해석 결과를 요약 정리하면, 다음과 같다.

(1) 불투과 해저면 위를 진행하는 파랑은 진폭의 변화 없이 진행하는 것을 알 수 있으며, 천해역의 투과 해저면 위를 진행하는 파랑은 진폭이 감쇠하면서 진행하는 것을 알 수 있다. 그리고 심

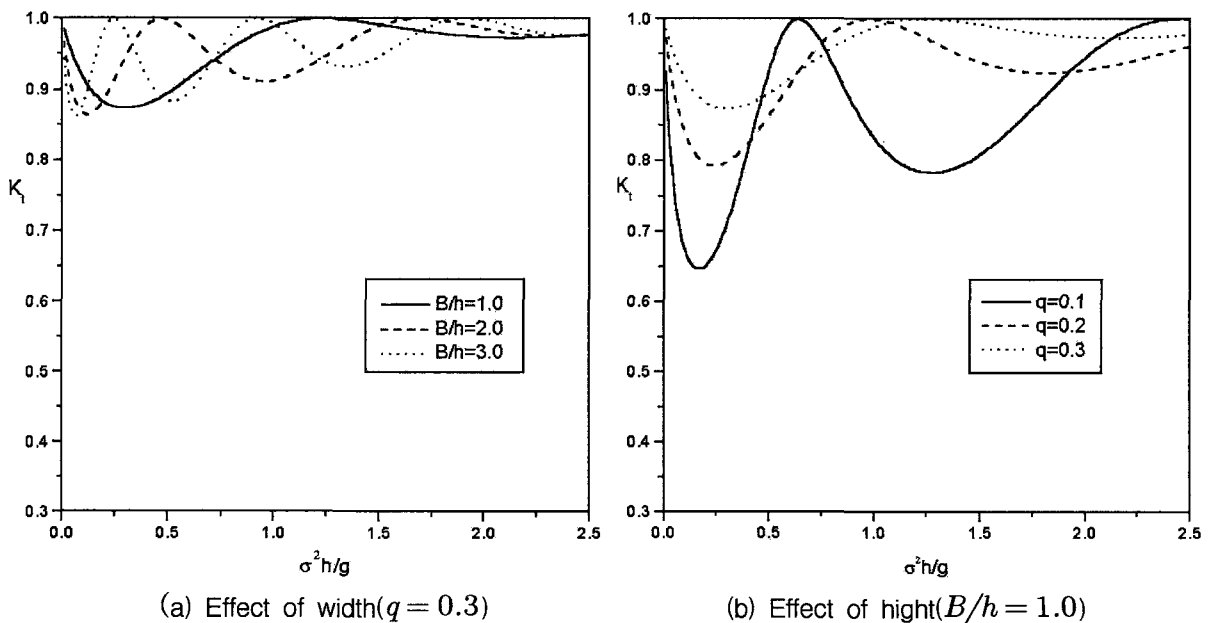


Fig. 12. Comparison of transmission coefficients for the impermeable bottom.

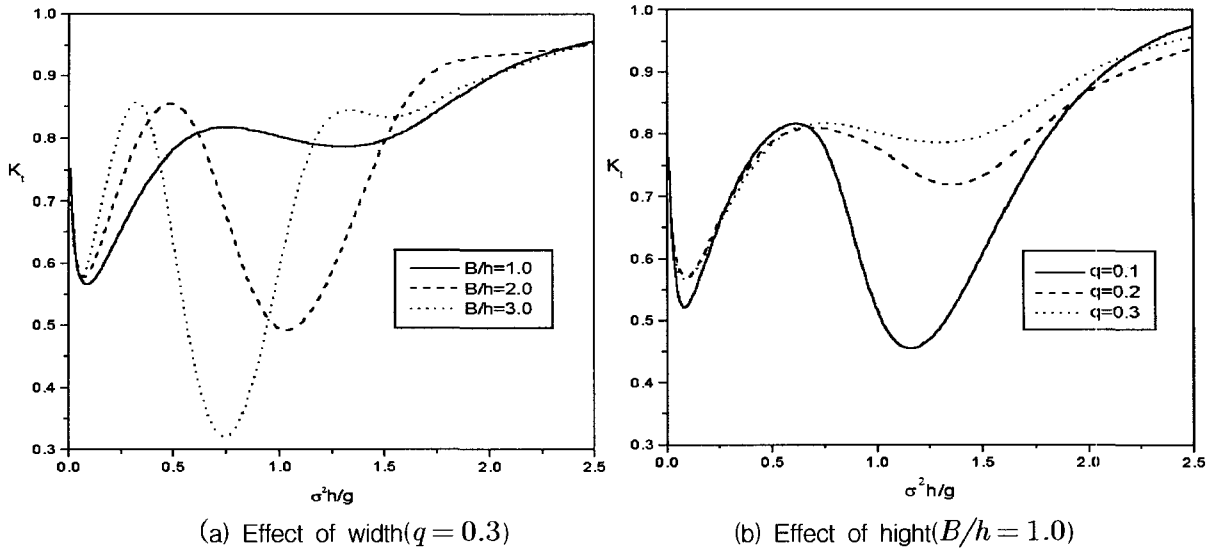


Fig. 13. Comparison of transmission coefficients for the permeable bottom.

해역에서 투과 해저면 위를 진행하는 파는 자유표면 아래의 물입자 속도가 투과 해저면의 영향을 거의 받지 않기 때문에, 파랑은 진폭의 변화 없이 진행하는 것을 알 수 있다.

(2) 투과 저면에 의한 에너지 손실율은 $R(=\sigma K/v)$ 값이 감소할수록, 즉 투수계수가 감소할수록 감소하는 것을 알 수 있다.

(3) 불투과 직사각형 잠제에 대한 적용으로부터, 불투과 해저면 위를 진행하는 파보다 투과 해저면 위를 진행하는 파가 잠제에 의한 영향과 파의 감쇠로 인하여 파고의 감쇠가 현저하다는 것을 알 수 있다.

(4) 투과율은 전체적으로 불투과 저면에 비해 투과 저면에서 작아지는 것을 알 수 있으며, 잠제 폭의 변화와 잠제 높이의 변화에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2004년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 김남형 역, 2002, 수치유체역학, 원기술, pp. 171-204.
 [2] 김남형, 1995, "경계요소법에 의한 복수투과잠제의 파랑특성

해석", 대한토목학회논문집, 제15권 제2호, pp. 425-431.
 [3] 김남형 · 서일교 공역, 1995, 경계요소법기초, 원창출판사, pp. 207.
 [4] 김남형 · 양순보, 2003, "사다리꼴형상 잠제의 수리특성에 관한 경계요소해석", 한국해양환경공학회지, Vol. 6, No. 4, pp. 34-60.
 [5] 井島武士 · 佐佐木富雄, 1971, "潛堤の效果に關する理論的研究", 第18回海岸工學講演會論文集, pp. 141-147.
 [6] Cruz, E.C., M. Isobe and A. Watanabe, 1997, "Boussinesq equations for wave transformation on porous beds", Coastal Engineering, Vol. 30, pp. 125-156.
 [7] Dean, G.R. and R.A. Dalrymple, 1984, Water Wave Mechanics for engineers and scientists, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
 [8] Reid, R.O. and Kajiura, K., 1957, "On the damping of gravity waves over a permeable sea bed", Trans. AGU, Vol. 38, No. 5, pp. 662-666.
 [9] Takikawa, K. and Kim, N.H., 1992, "An analytical technique for permeable breakwaters using boundary element method", Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 9, No. 4, pp. 299-305.

2003년 12월 5일 원고접수
 2004년 6월 7일 수정본 채택