

잠제에 경사로 입사하는 파랑의 경계요소 해석

The Boundary Element Analysis of Waves coming with Oblique Angle to a Submerged Breakwater

김남형* · 우수민**

Kim, Nam Hyeong · Woo, Su Min

Abstract

Reflection coefficients of wave due to the types of a submerged breakwater on the inclined incident wave are numerically computed by using boundary element method. The analysis method is based on the wave pressure function with the continuity in the analytical region including fluid and structures. When compared with the existing results on the inclined incident wave, the results of this study show good agreement. It is found that both maximum and minimum values of the reflection coefficient are appeared frequently, as the width of a submerged breakwater becomes wider, and the reflection coefficient increase, as the wave period is longer. In addition, the effect on the reflection coefficient due to the change of submerged breakwater height is larger than that due to the change of submerged breakwater width. The results indicate that dissipating characteristics of wave due to the types of a submerged breakwater own high dependability regarding the change of inclined incident waves. Therefore, the results of this study is estimated to be applied as an accurate numerical analysis referring to inclined incident waves in real sea.

Keywords : boundary element method, submerged breakwater, wave pressure function, oblique incident waves

요 지

본 연구에서는 경계요소법을 이용하여 경사입사파에 따른 잠제형상변화에 의한 잠제 주변 반사율에 대해서 수치해석을 하였다. 해석기법으로는 유체와 투과성 구조물 영역을 동시에 해석할 수 있는 파압함수를 사용하였으며, 파랑의 운동은 선형소산계수와 부가질량계수를 도입하여 정식화 하였다. 기존의 경사입사파에 대한 수치해석 결과와 비교하였을 때 본 수치해석에서 얻어진 결과들은 좋은 일치를 보여 주었다. 반사율은 잠제의 폭이 넓을수록 극대값 및 극소값의 출현 간격이 좁아지고, 장주기 쪽으로 갈수록 커지는 것을 알 수 있었다. 또한, 잠제의 폭에 비해 잠제높이의 변화가 반사율에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 각 형상잠제의 소파특성은 경사입사각의 변화에 대한 의존도가 높은 것을 알 수 있었다. 그럼으로, 본 연구의 결과는 실제 해역에서 경사를 가지고 입사하는 파랑에 대한 보다 정확한 수치해석기법으로 이용될 것으로 판단된다.

핵심용어: 경계요소법, 잠제, 파압함수, 경사입사파

1. 서 론

경제적 발전과 다양한 국민생활의 증가로 해양의 개발과 이용이 증대되어지고 있으며, 이에 부흥하는 워터프론트(waterfront)의 개발이 요구되어지고 있다.

기존의 방파제 등과 같은 소파구조물은 수면위로 건설되어 해수유동을 차단함으로써 해양환경과 경관 측면에서 부정적이라 할 수 있다. 반면, 잠제는 수질 보전과 경관상 뛰어난 장점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 해안 침식을 방지하는 역할을 수행하고 있으며, 그 효과가 부산 송도해수욕장에서 입증되었다(김용현 등, 2008).

잠제에 대한 기존의 연구로는 직각입사파에 대하여 영역

분할법으로 계산한 井島와 佐佐木(1971), 파압함수에 의해 정식화를 한 Takikawa and Kim(1992), 김남형(1995), Kim *et al.*(2006)의 연구 등이 있다. 경사입사파에 대한 연구로는 Green함수를 사용하여 적분방정식으로 소홀수 부체의 문제를 해석한 Garrison(1969), 부유식 부체에 대한 문제를 유한요소법으로 해석한 Bai(1975), 잠제에 대해서 영역분할법에 의해 경계요소법을 적용한 井島 등(1982), 고 유함수 전개법을 이용하여 트렌치 문제를 해석한 Kirby and Dalrymple(1983)의 연구 등이 있다. 하지만, 종래의 해석기법은 속도포텐셜이 각 경계 영역에서 유체운동의 연속조건을 만족시켜야 할 필요가 있으며, 그 처리방법이 다소 복잡하다.

*정회원 · 교신저자 · 제주대학교 토목공학과 교수 (E-mail : nhkim@ejunu.ac.kr)

**제주대학교 토목공학과 (E-mail : sumany85@ejunu.ac.kr)

본 논문에서는 Kim *et al.*(2006)에 의한 파압함수를 미지량으로 하는 경계요소 해석기법을 적용하여, 경사입사파에 대한 불투과성 잠재 주변의 파랑특성을 수치적으로 해석하였다. 이 방법은 각 경계 영역에서 유체의 연속조건을 특별히 고려할 필요가 없으며, 에너지 소산을 포함하는 폭넓은 파동 문제를 쉽게 해석할 수 있다.

2. 기본 방정식

2.1 지배 방정식

Fig. 1과 같이, 수심 h 의 해역에서 임의의 단면형상의 불투과 잠재가 있고, 잠재의 길이는 y 축으로 일정한 긴 단면으로 한다. 정수면상 잠재에 대해 수직방향을 x 축, 연직 방향을 z 축으로 취하고, 입사파는 x 축과 θ 의 각도로 η_0 진폭의 파랑이 왼쪽에서 오른쪽 방향으로 진행하고 있는 것으로 한다. 그리고 유체는 비압축성, 비점성, 비회전운동으로 가정하면, 유체의 운동은 속도포텐셜 함수 $\Phi(x, y, z; t)$ 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi(x, y, z; t) = \frac{g\eta_0}{\sigma} \phi(x, y, z) e^{i\sigma t} \quad (1)$$

이 속도포텐셜 함수는 다음의 Laplace방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

구조물 주변의 흐름은 정상파, 산란파 등이 발생하지만, 가상경계 S_{3_inp} 와 S_{3_out} 을 구조물로부터 충분히 떨어진 위치에 설정함으로써 이러한 소멸파의 영향을 무시할 수 있으며, 각 위치에서의 속도포텐셜은 다음과 같이 취급할 수 있다.

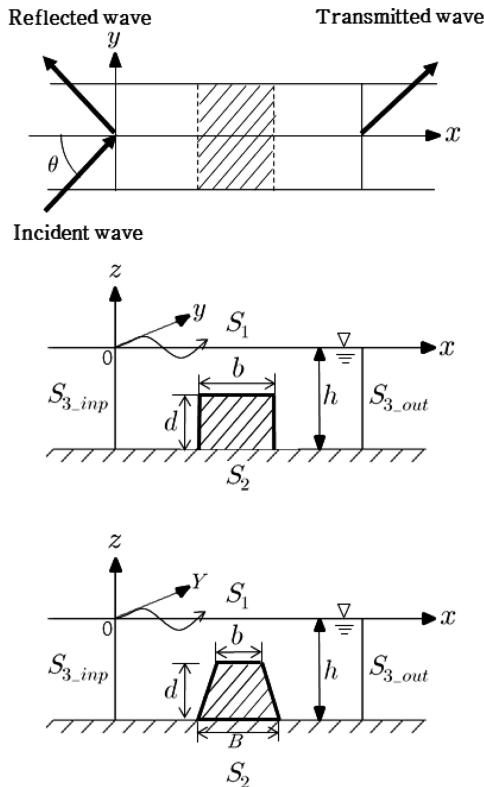


Fig. 1 Analytical region and coordinate

$$\left. \begin{aligned} \phi_{3_inp} &= e^{iky\sin\theta} (e^{-ikx\cos\theta} + A_r e^{ikx\cos\theta}) \cdot C \\ \phi_{3_out} &= e^{iky\sin\theta} A_t e^{-ikx\cos\theta} \cdot C \\ \left(C = \frac{g\alpha}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

여기서, ϕ_{3_inp} 와 ϕ_{3_out} 는 각각 입사 및 투과위치에서의 속도포텐셜, a 는 진폭, g 는 중력가속도를 나타낸다. $k(k=2\pi/L, L$: 파장)는 파수이며 $\sigma(\sigma=3\pi/T, T$: 주기) 각주파수로 분산관계식을 만족한다.

유체영역 내에서 y 축방향의 속도포텐셜의 변동은 $e^{iky\sin\theta}$ 으로 표현되기 때문에, x - z 평면에 있어서 포텐셜의 변동을 나타내는 미지함수를 $\phi(x, z)$ 로 나타내면 유체영역에서의 유체운동에 관한 속도포텐셜은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\phi(x, y, z) = e^{iky\sin\theta} \phi_l(x, z) \quad (4)$$

식 (4)는 식 (2)를 만족하여야 하며, 식 (4)를 식 (2)에 대입하면 미지의 포텐셜함수 $\phi(x, z)$ 에 관한 다음과 같은 Helmholtz 방정식을 얻게 된다.

$$\frac{\partial^2 \phi_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_l}{\partial z^2} + (iks\sin^2\theta)\phi_l = 0 \quad (5)$$

유체영역 내에서, 입력을 P , 유체의 밀도를 ρ 로 하면, 에너지 소산을 가져오는 운동방정식은 각 유체영역에 대해서, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\varepsilon} \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho} \right) - F_x \\ \frac{1}{\varepsilon} \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{P}{\rho} + g \cdot z \right) - F_z \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

여기서, ε 는 공극율, u, v 는 각각 x, z 방향의 평균유속, F_x 와 F_z 는 유체운동에 대한 에너지소산(유체저항)의 x, z 방향의 성분을 의미한다. 에너지 소산항은 레이놀드수가 매우 작은 경우를 제외하면, 일반적으로 비선형이며, 유체가 가속도운동을 하는 경우에는 부가질량력으로서 유체저항이 작용한다. 여기서는 비선형적인 에너지 소산항을 등가(等價)인 선형소산계수 μ 와 부가질량계수 C_m 를 이용하였으며, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \mu \cdot u + (1-\varepsilon) \cdot C_m \cdot \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial t} \\ F_z &= \mu \cdot v + (1-\varepsilon) \cdot C_m \cdot \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial v}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하고, 가속도의 이송항을 무시하면 선형화된 다음의 운동방정식이 얻어진다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{V} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho} \right) - \mu \cdot u \\ \frac{1}{V} \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{P}{\rho} + g \cdot z \right) - \mu \cdot v \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

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

유체의 운동방정식 (8)를 적분하면, 유체운동의 기초식 (6)은 미지의 포텐셜함수를 이용하여, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{V} \frac{\partial \phi_l}{\partial t} + \mu \cdot \phi_l + \frac{P}{\rho} + g \cdot z = 0 \quad (9)$$

2.2 경계조건

경계 S_1 은 자유수면, 경계 S_2 는 해저저면에 의한 경계를 나타내며, 경계 S_{3_inp} 와 S_{3_out} 는 각각 해석상 설정한 가상경계를 의미한다. 각 경계 영역은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

자유수면 경계 S_1 ;

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} &= \frac{\partial \phi_l}{\partial z} \Big|_{z=0}, \\ \eta &= -\frac{1}{gV} \left(\frac{\partial \phi_l}{\partial t} + \mu \phi_l V \right) \Big|_{z=0} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

해저저면 경계 S_2 ;

$$\frac{\partial \phi_l}{\partial n} = 0 \quad (n: \text{외향법선방향}) \quad (11)$$

가상 경계 S_{3_inp}, S_{3_out} ;

$$\frac{\partial \phi_l}{\partial n} = \frac{\partial \phi_o}{\partial n} \quad (\phi_o: \text{영역외부의 속도포텐셜}) \quad (12)$$

또한, 각 영역의 경계면에서는 식 (13), (14)와 같이 유체운동의 연속조건(질량유속과 에너지유속)을 만족시킬 필요가 있다.

$$\left. \begin{aligned} \text{질량유속;} \\ \frac{\partial \phi_l}{\partial n} &= \frac{\partial \phi_o}{\partial n} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

에너지유속;

$$\left(\frac{P}{\rho g} + z \right) = -\frac{1}{gV} \left(\frac{\partial \phi_l}{\partial t} + \mu \phi_l V \right) = H \quad (14)$$

기존의 속도포텐셜 ϕ 를 미지량으로 해석하는 영역분할법의 경우, 각 영역에서 ϕ 가 식 (13)를 만족시킬 필요가 있으므로, 유체영역과 투과성 구조물 영역이 혼재하는 문제에 대해서는 처리 방법이 다소 복잡하다. 따라서 여기서는 식 (14)에 나타난 파압함수 H 가 전 해석 영역에서 연속적인 것에 착안하여, 이것을 미지량으로 하는 해석기법을 이용하면, 각 경계영역마다 ε, μ 를 대입하여 영역을 구분하지 않고 해석이 가능하다. 입사파의 각주파수에 의해 유체 운동의 주기를 고려하여,

$$H(x, y, z, t) = \text{Re}\{h(x, y, z)e^{i\sigma t}\} \quad (15)$$

로 한다. 여기서, $i = \sqrt{-1}$ 이다. 식 (14)로부터,

$$\phi_l = -\beta \cdot H, \quad \beta = \frac{g \cdot V}{(i \cdot \sigma + \mu \cdot V)} \quad (16)$$

가 얻어진다. 식 (16)을 이용하여, 식 (12)~(14)로 나타내는 각 조건식을 대입하면, 다음식과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\beta \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0 \quad (17)$$

자유수면 경계 S_1 ;

$$i \sigma H \Big|_{z=0} = -\beta \frac{\partial H}{\partial z} \Big|_{z=0}$$

해저저면 경계 S_2 ;

$$\beta \frac{\partial H}{\partial n} = 0$$

가상 경계 S_{3_inp}, S_{3_out} ;

$$\beta \frac{\partial H}{\partial n} = \beta \frac{\partial H_o}{\partial n}, \quad \left(H_o = -\frac{1}{\beta} \phi_o \right)$$

또한, 가상경계면에 있어서의 파압함수 및 외향법선유속 $\frac{\partial \phi_o}{\partial n} = -\frac{\beta H_o}{\partial n}$ 는 다음 식으로 나타내어진다.

$$\left. \begin{aligned} \text{입사위치 } S_{3_inp}; \\ -\beta H_0 &= (e^{ik \cos \theta x} + A_r e^{-ik \cos \theta x}) \cdot C \\ -\beta \frac{\partial H_0}{\partial n} &= -ik \cos \theta (e^{-ik \cos \theta x} - A_r e^{ik \cos \theta x}) \cdot C \\ \text{통과위치 } S_{3_out}; \\ -\beta H_0 &= A_t e^{-ik \cos \theta x} \cdot C \\ -\beta \frac{\partial H_0}{\partial n} &= -ik \cos \theta \cdot A_t e^{-ik \cos \theta x} \cdot C \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

2.3 경계요소법에 의한 정식화

경계상의 2점을 각각 $p(x, z)$ 와 $q(\varepsilon, \zeta)$ 로 하고, 2점 사이의 거리를 r 이라고 하고, Green의 공식에서 미지의 포텐셜 ϕ_p 는 조화함수이기 때문에, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \alpha_p \phi_p &= \int_s \left(\phi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi}{\partial n} \right) ds \\ G &= K_0(kr \sin \theta) \\ r &= \sqrt{(x-\varepsilon)^2 + (y-\zeta)^2} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

여기서, $\alpha_p (p=1, 2, \dots, N)$ 는 경계선 위의 절점 p 에서 두 절점 사이의 내각을 의미하고, G 는 Helmholtz 방정식을 만족하는 기본해로 제2종 Bessel함수로 정의된다. 입사파가 수직일 경우 $G = \ln(1/r)$ 로 계산되어진다.

2.4 영역에 대한 정식화

Fig. 2에 나타난 것과 같이, 영역의 경계선을 N 개의 절점으로 N 개의 미소요소로 분할하고, 각 요소의 절점을 (x_p, y_p) 로 표시하고, 그 길이를 e_j 로 한다. 가상경계 S_{3_inp}, S_{3_out} 는 일정 수심 영역에서 구조물 주변으로부터 충분히 떨어진 가상의 거리에 가상경계를 설정하고, 법선은 외향을 향하며, 적분 방향은 반시계방향으로 잡는다. 식 (18)을 식 (17)에 대입하고, 식 (19)을 적용하면, 다음식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \alpha_p \beta \cdot H_p + \int_S \beta \cdot H_p \frac{\partial G}{\partial n} ds + \int_{S_1} i \sigma \cdot H_p G ds \\ + \int_{S_{3_inp}} \beta \frac{\partial H_o}{\partial n} G ds + \int_{S_{3_out}} \beta \frac{\partial H_o}{\partial n} G ds = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

여기서, $S = S_1 + S_2 + S_{3_inp} + S_{3_out}$ 을 나타내고 있으며, S_{3_inp}, S_{3_out} 은 각각 입사 및 통과위치에서의 가상경계위의 임의의 점을 의미한다.

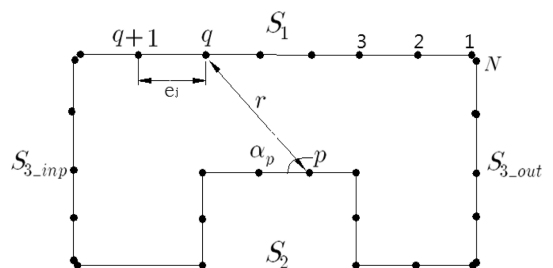


Fig. 2 Definition of notation

3. 수치해석 검증 및 적용

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 볼투과 사각형잠제와 사다리꼴잠제에 입사각(θ)이 0° , 30° 인 경사입사파가 입사했을 때, 수심에 대한 무차원 파장의 변화에 따른 반사율의 변화를 나타내고 있으며, 실선은 영역분할법으로 계산한 井島 등(1982)의 결과, \circ , \square 은 이 연구로부터 얻은 해석결과이다. Fig. 5는 $B/h=20$, $h_2/h_1=3.5$, $\theta=45^\circ$ 인 경우, 트렌치 구조물에 대해서 고유함수 전개법으로 수치해석을 한 Kirby and Dalrymple(1983)의 결과와 비교한 것이다.

이러한 수치해석 결과를 통해 알 수 있듯이 경사입사파를 고려한 기존의 해석 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 해석기법의 타당성과 유효성이 검증되었음을 알 수 있다. Fig. 6에서 Fig. 9는 경사입사파에 대한 와 사각형잠제와 사다리꼴잠제에 의한 파의 반사율(K_r)을 나타낸 것이다.

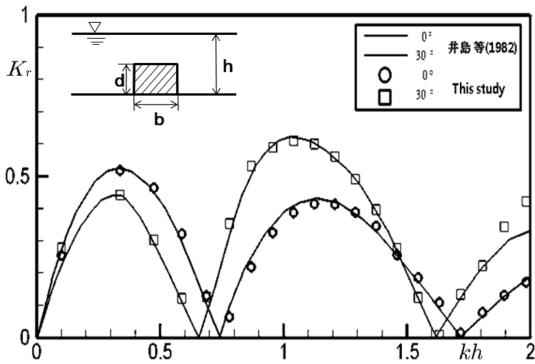


Fig. 3 Reflection coefficients for the change of angle ($b/h=2.0$, $d/h=0.7$).

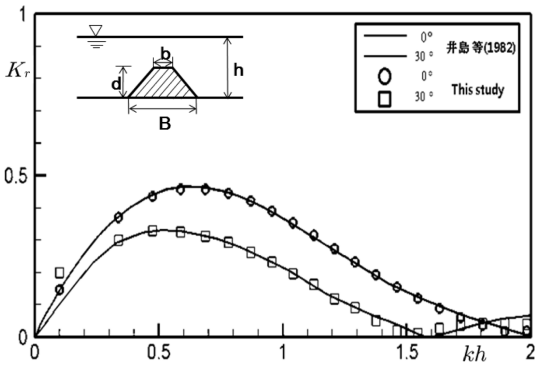


Fig. 4 Reflection coefficients for the change of angle ($b/h=0.5$, $d/h=0.7$, $B/h=1.9$).

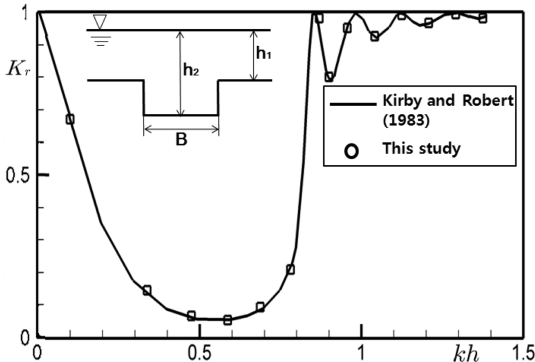


Fig. 5 Reflection coefficients for the change of angle ($B/h=20$, $h_2/h_1=3.0$, $\theta=45^\circ$).

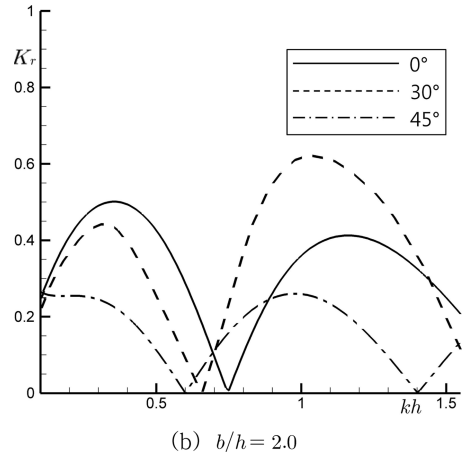
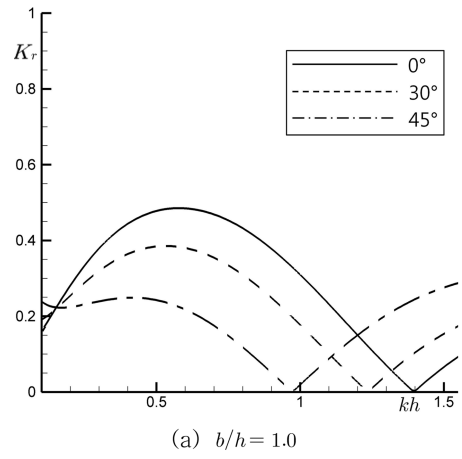


Fig. 6 Comparison of reflection coefficients for the rectangular submerged breakwater with various width ($d/h=0.7$).

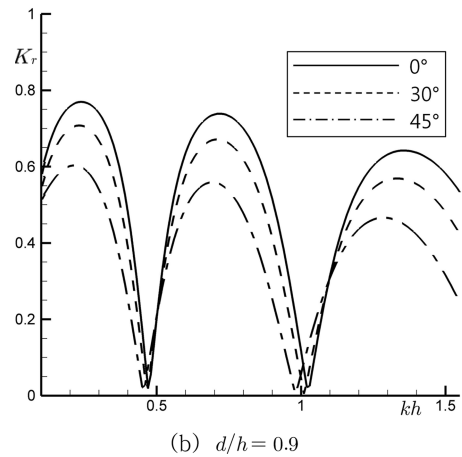
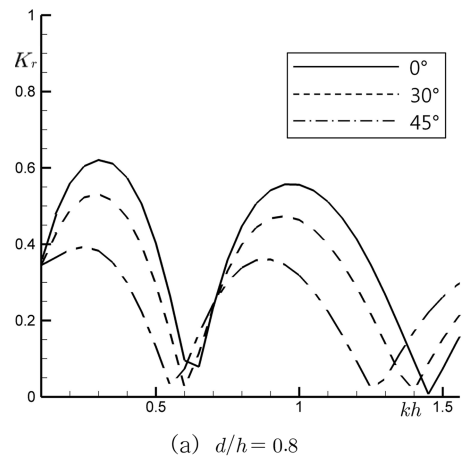
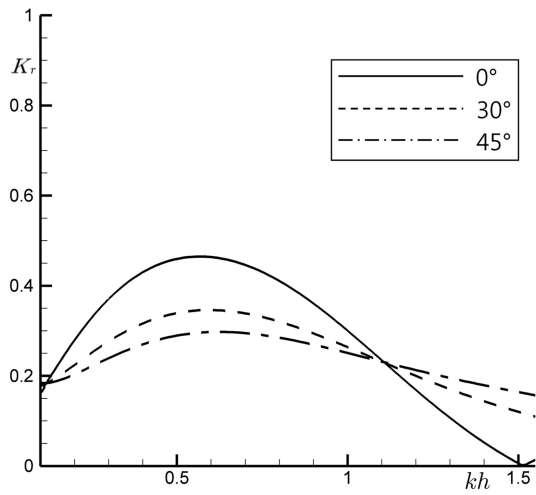
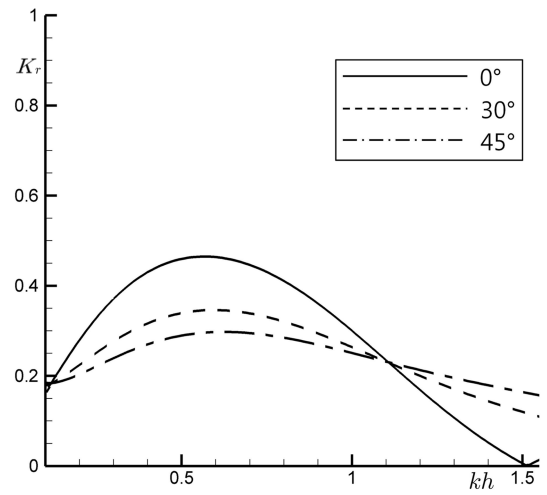


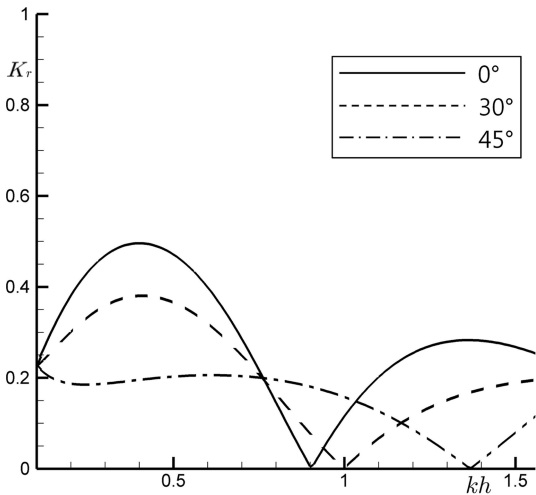
Fig. 7 Comparison of reflection coefficients for the rectangular submerged breakwater with various height ($b/h=2.0$).



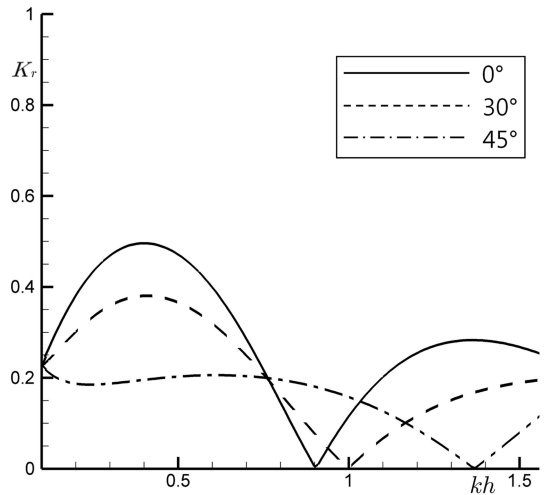
(a) $b/h = 1.0$



(a) $b/h = 1.0$



(b) $b/h = 2.0$



(b) $b/h = 2.0$

Fig. 8 Comparison of reflection coefficients for the trapezoidal submerged break water with various width ($d/h=0.7$).

Fig. 9 Comparison of reflection coefficients for the trapezoidal submerged break water with various height ($b/h=2.0$).

Fig. 6은, $b/h = 0.7$ 일 때, 사각형잠제의 잠제 폭의 변화 ($b/h = 1.0, 3.0$)에 따른 반사율에 관하여, 경사입사각($\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)에 대한 결과이다. 잠제의 폭이 넓어질수록, 반사율의 최대값 및 최소값은 반복적으로 나타나고 있으며, 장주기 쪽에서 반사율의 최대값을 나타내며, 단주기 쪽으로 갈수록 최대값 및 최소값의 출현 간격이 넓어진다. 또한, 경사입사각이 크면 클수록 반사율이 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 $b/h=2.0$ 일 때, 사각형잠제의 잠제 높이 변화 ($d/h=0.8, 0.9$)에 따른 반사율에 관하여, 경사입사각($\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)에 대한 결과이다. Fig. 6의 결과와 같이, 잠제의 높이가 높아질수록, 반사율의 최대값 및 최소값은 반복적으로 나타나고 있으며, 장주기 쪽에서 반사율의 최대값을 나타내며, 단주기 쪽으로 갈수록 최대값 및 최소값의 출현 간격이 넓어진다. 또한, 경사입사각이 크면 클수록 반사율이 감소하는 것을 알 수 있다.

그리고 Fig. 6, 7을 통하여, 반사율은 잠제 폭의 변화에 비하여, 잠제 높이의 변화에 의존도가 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 8, 9는 사다리꼴잠제에 대한 Fig. 6, 7과 동일한 조건에서의 반사율 값을 나타낸다. Fig. 8, 9로부터 경사입사각으로 인한 반사율의 경향은 전반적으로 사각형 잠제와 유사

하지만, 사각형잠제에 대한 결과에 비하여, 최대값 및 최소값의 출현 간격이 넓어지는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는, 파압함수를 미지량으로 사용하는 경계요소법을 이용하여, 경사입사각에 대한 잠제 형상의 효과를 알아보기 위하여 사각형 잠제와 사다리꼴잠제에 대하여 수치해석을 하였다.

경사입사각에 있어서 소파를 가장 효과적으로 제어하는 잠제형상의 최적조건은, 사각형잠제 보다 사다리꼴잠제가 더 탁월하였으며, 잠제의 높이가 높을수록, 그리고 잠제의 폭이 넓을수록 탁월하였다. 그리고 경사입사각의 입사각이 크면 클수록 반사율이 감소하는 것을 알 수 있다.

본 연구결과로부터 다양한 경사입사각에 대한 사각형잠제와 사다리꼴잠제의 효과를 알 수 있었다. 더 나아가, 해역의 특징을 반영한 이러한 검증과 해석을 통하여, 잠제의 위치선정, 형상 및 제체폭·높이를 결정함으로써, 보다 경제적이며, 우월한 성능의 잠제효과를 기대할 수 있을 것이라 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2012년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(친환경 잠제를 이용한 침식 제어기술 개발).

참고문헌

김남형(1995) 경계요소법에 의한 복수투과 잠제의 파랑특성해석, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회 제15권 제2호, pp. 425-431.
김용현, 윤종성, 김명규, 황용태(2008) 부산 송도 해수욕장 잠제 설치에 따른 해안특성 변화에 관한 연구. **한국해안·해양공학회 학술발표논문집**, 제17권, pp. 140-143.
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.
井島武志, 吉田明德, 北山 齊(1982) 斜め入射波に對する潛堤の反

射效果に關する數値解析. **第29回海岸工學講演會論文集**, pp. 418-422.

Garrison, C.J. (1969) On the interaction of an infinite shallow draft cylinder oscillating at the free surface with a train of oblique waves. *J. of Fluid Mech.*, Vol. 39, Part 2, pp. 227-255.
Bai, K.,J. (1975) Diffraction of oblique waves by an infinite cylinder. *J. of Fluid Mech.*, Vol. 68, Part 3, pp. 513-535.
Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. (1983) propagation of obliquely incident water waves over a trench. *J. of Fluid Mech.*, Vol. 133, pp. 47-63.
Takikawa, K. and Kim, N.H. (1992) An analytical technique for permeable breakwaters using boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 10, No. 4, pp. 299-305.
Kim, N.H., Young, Y.L., Yang, S.B., and Park, K.I. (2006) Wave damping analysis in a porous sea-bed. *Journal of Civil Engineering, KSCE*, Vol. 10, No. 5, pp.305-310.

(접수일: 2012.1.17/심사일: 2012.2.13/심사완료일: 2012.6.29)