

완경사 방정식에서의 간편화된 파의 부분 반사 및 투과 처리기법 Development of a Simplified Treatment Technique of Partial Wave Reflection and Transmission for Mild-Slope Wave Model

천제호* · 안경모**
Je Ho Chun* and Kyungmo Ahn**

요 지 : 본 논문에서는 완경사 방정식에 새로운 항을 추가하여 파의 부분 반사 및 투과 현상을 수치모의하는 방법을 제시하였다. 반투과성 방파제와 같은 해안구조물 주변의 파랑장을 계산하고자 할 때, 반사율과 투과율 정보가 수치모형실험에 의해 주어지면 간편하게 적용할 수 있는 효율적인 수치모의 방법이다. 제시된 방법의 정확성을 검증하기 위해 2차원 투과성 방파제에서의 부분 투과 및 부분 반사 조건을 만족시키는지 여부를 수치모형 실험을 통해 확인하였다. 또한 본 기법을 3차원 반무한 방파제 와 투과성 이안제에 적용시켜, 방파제에 직각 또는 경사를 갖고 진입하는 파랑에 대해 수치모의하였다. 3차원 수조의 반무한 방파제에 직각 또는 경사지게 진입하는 파랑에 의한 방파제 주위의 부분반사, 부분투과 및 회절된 파랑장의 수치모의 결과를 각각 Yu(1995)와 McIver(1999)의 해석해와 비교하여 정확성을 검증하였다. 본 기법은 사용하기 쉬우면서도 정확하고 효과적으로 투과성 방파제 주위의 파랑장을 계산할 수 있다.

핵심용어 : 완경사 방정식, 반사, 투과, 회절, 투과제

Abstract : This paper presents a simplified numerical method that can be used to incorporate the partial reflection and transmission of water waves in the hyperbolic mild-slope equation. For given reflection and transmission coefficients, wave fields around a porous breakwater including reflection, transmission, and diffraction can be simulated accurately. For the verification of the proposed method, numerical experiments have been carried out and compared with analytic solutions given by Yu(1995) and McIver(1999). The proposed method is easy to implement and is computationally efficient. It is demonstrated that the method performs well with a sloping bottom bathymetry and varying incident wave angles

Keywords : mild-slope equation, reflection, transmission, diffraction, porous breakwater

1. 서 론

근래 항만내의 수질을 향상시키기 위한 친환경적인 방파제의 필요성이 대두됨에 따라 투과성 방파제나 부유식 방파제 등이 제안되고 있다. 이러한 투과성 방파제의 평면 계획을 위해서는 파랑의 회절, 반사, 투과 등의 현상을 효과적으로 구현할 수 있는 수치모델이 필요하다. 이에 효과적으로 파랑의 투과, 반사 및 회절현상을 구현할 수 있는 기법이 많은 연구자들에 의해 제시되고 있다.

Madsen(1983)은 등수심 해역에 Lorentz 등가 일의 원리(Lorentz principle of equivalent work)를 적용해 반사 및 투과에 관한 해석해를 구하였는데, 이 때의 반사율과 투과율은 공극률, 마찰계수, 방파제의 폭, 주기 등의 함수로 표현되어진다. Madsen의 기법은 구조물 전면에 반사율 또는 투과율에 해당하는 마찰계수를 적용해 파 에너지를 감소시킴으로써, 파의 반사 및 투과 현상을 재현한다. Madsen (1983)의 기법은 단순하게 파랑 에너지를 감소시킴으로써, 파의 반사 및 투과를 재현하기 때문에 매우 효과적이다. 하지만, 식의 유

*한동대학교 건설환경연구소 연구원 (Institute of Construction and Environmental Research, Handong Global University)

**한동대학교 공간시스템공학부 교수 (Corresponding author: Kyungmo Ahn, School of Spatial Environment System Engineering, Handong Global University, 3 Namsong-ri, Hunghae-eub, Pohang, Kyungbuk-do, 791-708, Korea. kmahn@handong.edu)

도 가정상, 단파에서는 적용하기 곤란하고, 하나의 반사율에 대해서는 하나의 투과율만 적용된다는 단점이 있다.

전 등(2002)은 부유식 방파의 반사-투과경계 조건에 대한 새로운 기법을 제시하여 파의 반사 및 투과를 처리하였다. 전 등은 확장형 시간의존 환경사 방정식에 선유량을 이용한 반사-투과 경계조건을 정식화하여, 주어진 반사율과 투과율을 수치모의하여 재현됨을 보였다.

Yu(1995)는 투과성 반무한 방파제에 부합 점근 해법(matching asymptotic solution) 기법을 적용해 파의 반사, 투과 및 회절 등에 관한 일반해를 제시하였다. Yu의 일반해는 반무한 방파제에 대해 수직으로 입사하는 파만을 고려하여 이끌어 낸 것으로 그 형태가 매우 간단하다는 장점을 가진다. 하지만, 경계층 이론의 가정 조건에 의해 방파제에 근접한 곳에서의 파랑장 계산 결과는 정확성이 떨어지는 단점도 가진다.

McIver(1999)는 Wiener-Hopf 기법을 적용해 파의 반사, 투과 및 회절에 관한 해석해를 구하였다. McIver의 식은 Yu의 식에 비해 복잡하긴 하나, 반무한 방파제에 임의의 입사각을 가지고 입사하는 경우에 대해서 고려하기 때문에 보다 일반적으로 사용가능하다.

본 연구에서는 Maruyama와 Kajima(1985)의 쌍곡선형 환경사 방정식에 간단한 항을 새로이 추가하여 파의 부분 반사와 투과를 효과적으로 수치모의하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 식은 단순하게 파의 에너지를 감쇠시켜 파의 반사를 재현하거나, 구조물 통과 유량을 계산하기 때문에 그 계산이 간단하면서도 효과적인 장점을 가진다. 이 기법은 파랑의 특성, 입사각의 크기, 수심 등에 관계없이 적용된다. 본 논문에서는 이를 몇 가지 수치 실험에 적용한 뒤, Yu와 McIver 등의 해석해와 비교하여 그 정확성을 검증하였다.

2. 지배방정식과 경계조건

2.1 지배 방정식

본 모델의 지배 방정식은 수심이 완만히 변하는 해역에 위치한 해안구조물 주위의 천수, 굴절, 회절, 반사 등을 나타낼 수 있는 Maruyama와 Kajima의 환경사 방정식에 새로운 항을 추가한 것으로 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \nabla \cdot (n \vec{p}) + f_r \eta = 0 \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial \vec{p}}{\partial t} + C^2 \right) + f_r \eta = 0 \quad (2)$$

여기서, η 는 수면변위, C 는 파속, t 는 시간을 나타낸다. 군속도와 파속의 비 n 과 선유량 벡터 \vec{p} 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right), \quad \vec{p} = \int_{-h}^0 \vec{u} dz$$

여기서 k 는 파수, h 는 수심, \vec{u} 는 수평방향 속도벡터를 나타낸다. 식 (1)의 f_r 은 파의 반사를 재현하기 위해 본 연구에서 도입한 에너지 감쇠율이며 다음과 같이 표현된다. 파속, 반사율 K_r , 공간계산 격자 간격 Δx 의 크기 등을 이용해 다음과 같이 정의한다.

$$f_r = \frac{C \cos \theta}{\Delta x} \left(\frac{1 - K_r e^{i\theta}}{1 + K_r e^{i\theta}} \right) \quad (3)$$

여기서, K_r 은 반사율, Δx 는 공간계산 격자 간격, θ 는 입사각도, β 는 입사파와 반사파의 위상차, $i = \sqrt{-1}$ 이다.

식 (2)의 f_d 는 쇄파에 의한 에너지 감쇠율을 나타낸다. 본 연구에서는 Watanabe와 Maruyama(1986)가 제안한 식을 사용하며 아래에 나타내었다.

$$f_d = \alpha_D \tan \xi \sqrt{\left(\frac{g}{h'} \right) \left(\frac{p}{p_r} - 1 \right)} \quad (4)$$

여기서, α_D , ξ , \hat{p} 는 각각 에너지 감쇠계수, 바닥의 경사도, 유량 벡터 진폭을 나타내며, p_r 은 다음과 같이 정의된다.

$$p_r = \gamma \sqrt{gh^3} \quad (\gamma: 0.25 \sim 2.5) \quad (5)$$

2.2 반사 경계 조건의 유도

본란에서는 투과성 방파제에서의 파랑의 부분 반사를 모의하기 위해 제안된 식 (3)의 유도과정을 설명하였다. Fig. 1은 수심이 일정한 2차원 수로에 위치한 투과성 방파제에 입사와 반사된 파랑을 나타낸다.

Fig. 1에 표시된 공간 계산 격자 간격 Δx 가 비교적 작을 때, 다음과 같은 식이 성립한다고 가정할 수 있다.

$$(\eta_x)_{x_b} \cong (\eta_x)_{x_a}, \quad \eta_b \cong \eta_a \quad (6)$$

방파제 전면 수심이 일정하다고 가정하면, 식 (1)은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + f_r \eta = 0 \quad (7)$$

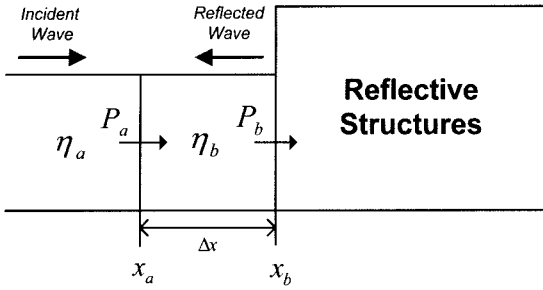


Fig. 1. Schematic diagram of computational grids in front of breakwaters.

위의 식을 x 축에 대해 공간 적분한 후, 시간에 대해 미분하여 정리하면 다음과 같다.

$$(p_t)_{x_a} \cong C \cos \theta \left(\frac{1 - K_r e^{ik\beta}}{1 + K_r e^{ik\beta}} \right) (\eta_t)_{x_a} - C^2 \int_{x_a}^{x_b} \eta_{xx} dx \quad (8)$$

이 때, 위 식 우변의 두번째 항은 식 (6)에 의해 소거되어 식 (8)은 다음과 같이 최종 정리된다.

$$(p_t)_{x_a} \cong C \cos \theta \left(\frac{1 - K_r e^{ik\beta}}{1 + K_r e^{ik\beta}} \right) (\eta_t)_{x_a} \quad (9)$$

방파제 전면의 수심에서 쇄파가 일어나지 않는 경우에는 $x=x_a$ 에서 식 (2)는 다음과 같이 표시된다.

$$(\eta_t)_{x_a} = -\frac{1}{C^2} (p_t)_{x_a} \quad (10)$$

식 (10)을 식 (9)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다.

$$(\eta_t)_{x_a} = ik \cos \theta \left(\frac{1 - K_r e^{ik\beta}}{1 + K_r e^{ik\beta}} \right) \eta_{x_a} \quad (11)$$

Steward와 Panchang(2001)은 투과성 방파제에서의 부분 반사 경계조건을 다음과 같은 식으로 제시한 바 있다.

$$\lim_{x \rightarrow x_b} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} - ik \cos \theta \left(\frac{1 - K_r e^{ik\beta}}{1 + K_r e^{ik\beta}} \right) \eta \right) = 0 \quad (12)$$

$$P_b = 0 \quad (13)$$

식 (11)은 식 (6)에서 볼 수 있듯이 $x=x_b$ 에 대해서도 성립되는데, 이는 본 연구에서 제시한 파랑의 부분반사를 위한 수치기법이 Steward와 Panchang이 제시한 식 (12)와 동일하게 표현될 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 과제

에서 새롭게 제시된 부분반사 기법의 유도가 적절함을 알 수 있다.

2.3 투과 경계 조건의 유도

본란에서는 부분 투과를 위한 경계조건을 유도한 과정을 설명하였다. Fig. 1에 표시된 공간계산 격자의 간격 Δx 가 크지 않다고 가정하면, 다음의 식이 성립한다고 볼 수 있다.

$$\vec{p}_{x_b} \cong \vec{p}_{x_b - \Delta x/2} \quad (14)$$

여기서, $\vec{p}_{x_b - \Delta x/2}$ 은 \vec{p} 의 정의에 의해 다음과 같이 유도된다.

$$\vec{p} = \int_{-h}^0 \vec{u} dz = \frac{gk}{\omega} \vec{\eta} \int_{-h}^0 \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} dz \quad (15)$$

이 때, 투과성 방파제에서의 반사율이 K_r 이라고 하면 $x_b - \Delta x/2$ 에서의 입사파에 의한 유량 벡터는 $\vec{p} = \vec{C} \eta / (1 + K_r)$ 와 같다. 또한, 이때의 방파제의 투과율이 K_t 라고 하면, 투과파의 유량은 다음의 식과 같이 입사파와 투과율의 곱으로 정의된다.

$$(\vec{p})_{x_b - \Delta x/2} = \frac{K_t}{1 + K_r} \vec{C} \eta_b \quad (16)$$

여기서, 식 (14)에 의해 방파제 전면에서의 투과파의 유량을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\vec{p}_b = \frac{K_t}{1 + K_r} \vec{C} \eta_b \quad (17)$$

3. 부분 반사 및 투과 경계 조건의 검증

3.1 2차원 투과성 방파제에서의 파랑 변형

파랑 특성에 따른 파의 부분반사 및 투과 재현여부를 검토하기 위해 다음의 Fig. 2에 나타난 것과 같은 2차원의 수조에 대해서 수치 모의실험을 실시하였다. 그림에서 볼

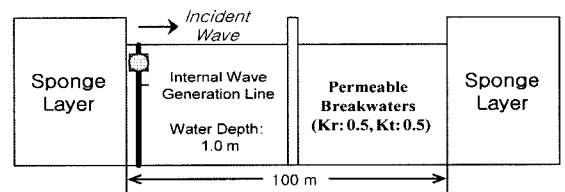


Fig. 2. Computational domains for 2-dimensional wave flume.

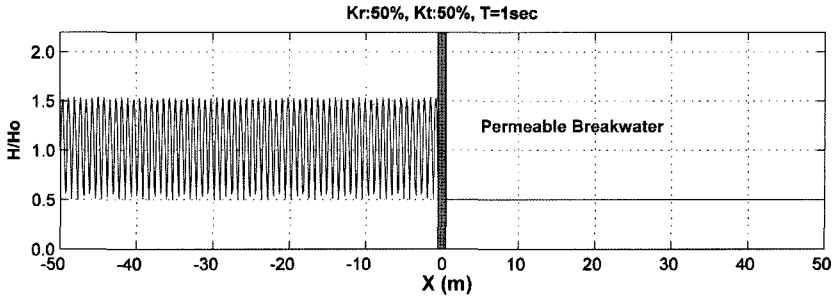


Fig. 3. Computational results (Period : 1sec).

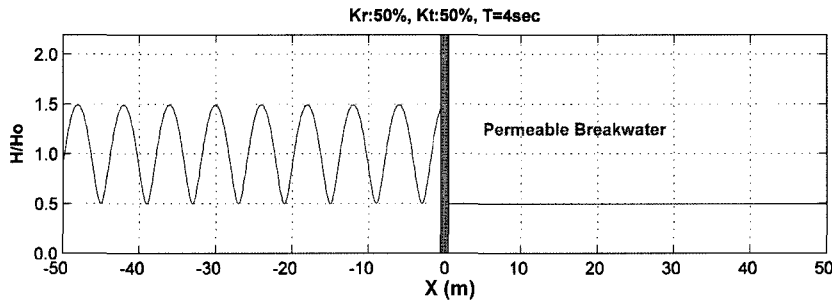


Fig. 4. Computational results (Period : 4sec).

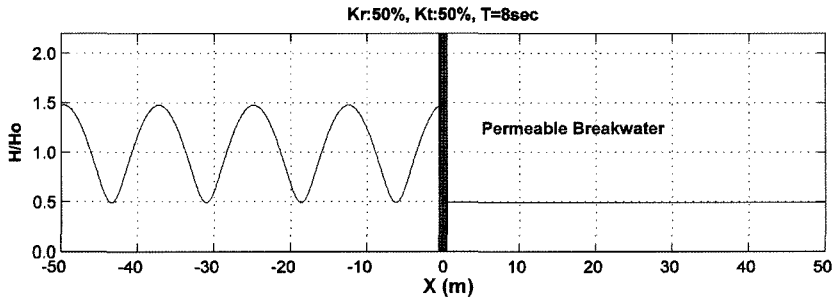


Fig. 5. Computational results (Period : 8sec).

수 있듯이 내부 조파선에서 생성된 파랑은 수조 중앙에 위치한 투과성 방파제에서 부분 반사 및 투과된 후 양단에 설치된 흡수층에 흡수되도록 하였다. 수치실험은 수심 1 m의 수조에서 파고 0.01 m와 주기 1, 4, 8초로 내부조파되어 투과율 및 반사율이 각각 0.5인 경우에 대해 시험하였다. Fig. 3부터 Fig. 5는 주기를 1, 4, 8초인 경우의 투과 및 반사된 결과를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 투과성 방파제의 좌측에서는 중복파가 나타나며 우측에는 방파제를 투과한 진행파가 진행되어 감을 알 수 있다. 투과된 파고는 투과율에 따라 정확히 통과되고 반사율에 따라 반사되어 중복파가 형성되어 입사파에 대한 파고비가 각각 0.5~1.5와 0.5으로 분포하고 있음을 알 수 있다. 이로

부터 본 연구에서 제시한 수치모의 방법이 파랑특성에 관계없이 파의 투과 및 반사를 잘 재현함을 알 수 있다.

3.2 수심이 변화하는 지형에서의 파의 반사 및 투과

방파제 전면의 수심이 변화하는 곳에서의 파의 반사 및 투과를 검토하기 위해 다음의 Fig. 6에서 보이는 것과 같은 지형에 대해 방파제가 없는 경우와 투과성 방파제(반사율 $K_r=0.6$, 투과율 $K_t=0.8$)가 있는 경우에 대해 수치 모의실험을 실시하였다.

각각의 경우에 대한 방파제의 전후면에서의 입사파에 대한 파고비를 Table 1에 나타내었다. 반사율이 0.6인 경우, 방파제 전면에서 방파제가 없는 경우의 파고비가 방파제가

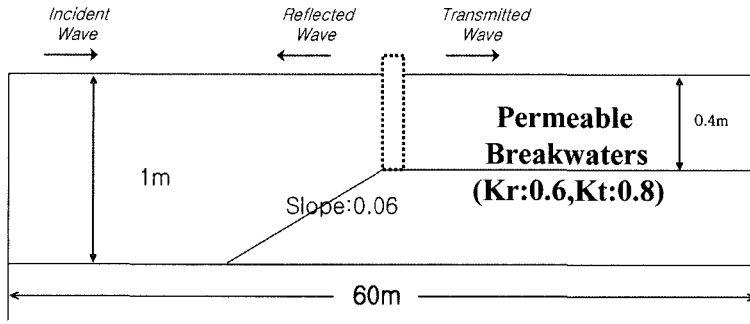


Fig. 6. Computational domain of bathymetry with varying water depth topography.

Table 1. Normalized wave heights at the front and lee side of breakwater

	방파제가 있는 경우	방파제가 없는 경우
방파제 전면	1.9	1.2
방파제 후면	0.9	1.2

있는 경우에 비해 1.6배로 나타나고 있다. 방파제 우측에서는 방파제가 없는 경우의 파괴비는 방파제가 있는 경우에 비해 0.8배 낮게 나타나고 있다. 이는 수심이 변화하는 곳에서도 파의 반사 및 투과가 성공적으로 이루어지는 것을 나타낸다.

두 가지 경우에 대한 파괴 분포도를 다음의 Fig. 7에 나타내었으며, 투과성 방파제를 중심으로 파의 반사 및 투과 현상이 나타나는 것을 뚜렷하게 관찰할 수 있다.

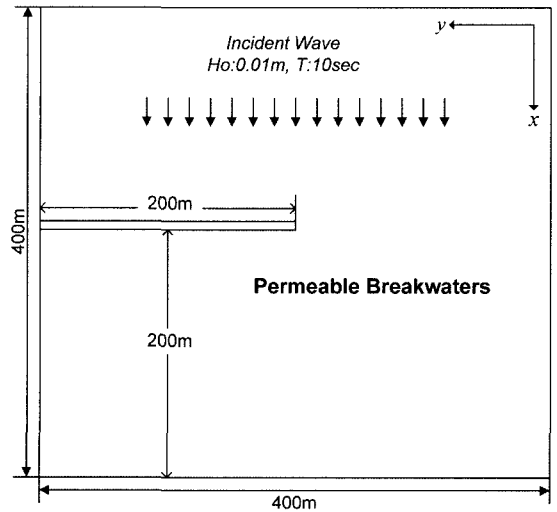


Fig. 8. Schematic diagram for porous semi-infinite breakwaters

3.3 반무한 방파제에서의 수치모의 실험

3.3.1 투과성 방파제에 직각으로 입사하는 파랑의 경우

투과성 방파제에 직각으로 입사하는 파의 수치모의 결과를 Yu의 일반해와 비교하였다. 수치모의 실험조건은 윤곽과 파랑조건은 Fig. 8에 나타나 있다. $G=0, 0.25, 0.5, 1.5$ 에 해당되는 다양한 반사율과 투과율에 대한 각기 다른 4가지 경우의 수치모의 실험을 실시하여 Yu(1995)의 해석해와

비교하였다.

Yu의 일반해는 다음과 같다.

$$K = \begin{cases} e^{ikx} + \frac{S_{10}(x,y)}{1+2G} & x > 0 \\ e^{ikx} - \frac{S_{20}(x,y)}{1+2G} & x < 0 \end{cases}$$

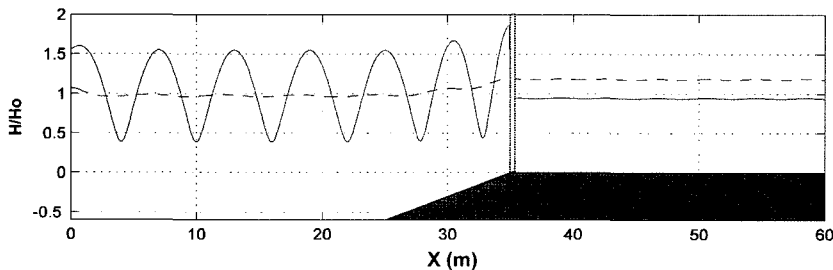


Fig. 7. Computed wave height, solid line: case of permeable breakwater, dashed line: case of no breakwater case.

여기서, K = 파고비 분포도, x = 방파제 끝단으로부터 파의 진행 방향으로의 거리, y = 방파제 끝단으로부터의 파랑 진행의 수직방향으로의 거리

$$S_{10}(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left(-i\frac{\pi}{4}\right) \left(\left(\frac{1}{2} + C(\gamma)\right) + i\left(\frac{1}{2} + S(\gamma)\right) \right),$$

$$S_{20}(x,y) = S_{10}(-x,y)$$

여기서, $\gamma = ky/(\sqrt{\pi k|x|})$, $C(\gamma) + iS(\gamma) = \int_0^\gamma \exp(i\frac{\pi}{4}u^2) du$ 이 때의 반사율과 투과율은 G 값을 이용하여 다음과 같이 정의된다(Yu, 1995).

$$K_r = \left| \frac{1}{1+2G} \right|, K_t = \left| \frac{2G}{1+2G} \right|$$

Yu는 투과성 반무한 방파제에 대해 파가 수직입사하는 경우 만을 고려하였다. 경계층 이론을 적용하여 근사 해석해를 구하였기 때문에 kr 값이 작으면 부정확해 지는데 여기서 k 는 파수를 r 은 방파제 끝단에서의 거리를 나타낸다.

본 수치모의 실험 중 $G=0.5$ 인 경우에 대한 수치모의 결과와 Yu의 해석해를 다음의 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 이 그림들에서 보면 방파제 주위를 제외하고는 수치모의 실험결과와 Yu의 해석해가 대체로 잘 일치하고 있다. Yu의 해석해는 경계층 이론을 사용하므로 방파제 주위에서는 부정확하다는 것을 감안하면, 해석해와 수치해석해가 잘 일치한다고 볼 수 있다. 그리고 위의 수치모의 실험 결과 중에서 방파제로부터 전면과 배면으로 각각 4L 만큼 떨어진 곳의 파고분포도를 Yu의 해석해와 비교하여 Fig. 11~Fig. 16에 나타내었다. 이 그림들에서 보면 다양한 조합

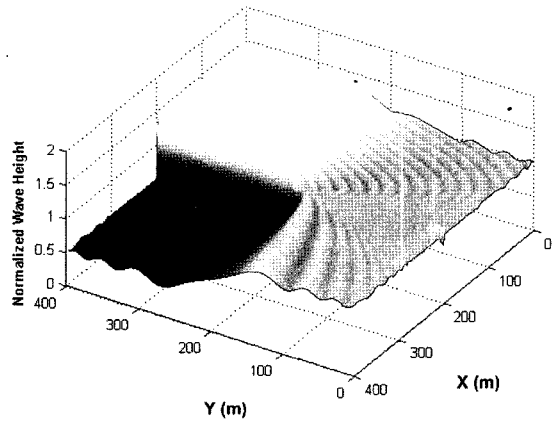


Fig. 10. Wave height distribution around porous semi-infinite breakwaters, analytical solution case.

의 반사율과 투과율의 값에 대해 수치모의 실험 결과와 해석해가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

3.3.2 임의의 입사각을 가지고 입사하는 경우

Fig. 8의 투과성 반무한 방파제에 대해 임의의 입사각을 가진 파가 입사할 경우에 대해 수치모의 실험을 실시한 후 이 때의 계산 결과를 McIver의 일반해와 함께 비교하여 그 정확성을 검토하였다.

McIver의 일반해는 다음과 같다.

$$\phi \sim \frac{e^{i(kr - \pi/4)} k \sin \theta \sin \theta}{(2\pi kr)^{1/2} (1 + \cos \theta)^{1/2} (\cos \theta + \cos \theta_0) K_+(k \cos \theta)}$$

$$\times \left\{ \begin{array}{l} \frac{(1 + \cos \theta)^{1/2} K_+(k \cos(\pi - |\theta|))}{2\beta - i k \sin |\theta|} \\ \frac{(1 - \cos \theta_0)^{1/2} K_+(k \cos \theta_0)}{2\beta - i k \sin \theta_0} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\operatorname{sgn}(y) e^{i\pi/4 k} \sin \theta_0}{\sqrt{\pi} (2\beta - i k \sin |\theta|)} \\ \left[\begin{array}{l} e^{-ikr \cos(\theta + \theta_0)} F\left[(2kr)^{1/2} \cos\left(\frac{|\theta - \theta_0|}{2}\right)\right] \\ e^{-ikr \cos(\theta - \theta_0)} F\left[(2kr)^{1/2} \cos\left(\frac{|\theta - \theta_0|}{2}\right)\right] \end{array} \right] \end{array} \right.$$

여기서, $F[v] = \int_0^\infty \exp(i\frac{\pi}{4}u^2) du$

$$K_+(\alpha) = \left(1 + \frac{\alpha}{q}\right)^{1/2} \exp\left\{ \frac{2\pi\beta}{\pi k} \int_{\pi/2}^{\cos^{-1}(\alpha/k)} \frac{\theta' \cos \theta' d\theta'}{\cos^2 \theta' - (q/k)^2} \right\}$$

$$\left(\frac{q + 2\beta}{k}\right)^{(i/2\pi) \ln[(q - \alpha)/(q + \alpha)]}$$

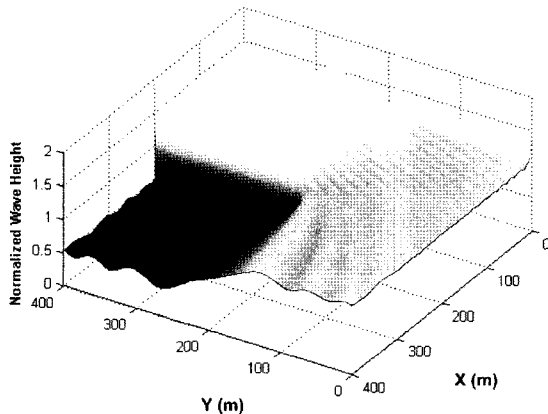


Fig. 9. Wave height distribution around porous semi-infinite breakwaters, numerical solution case.

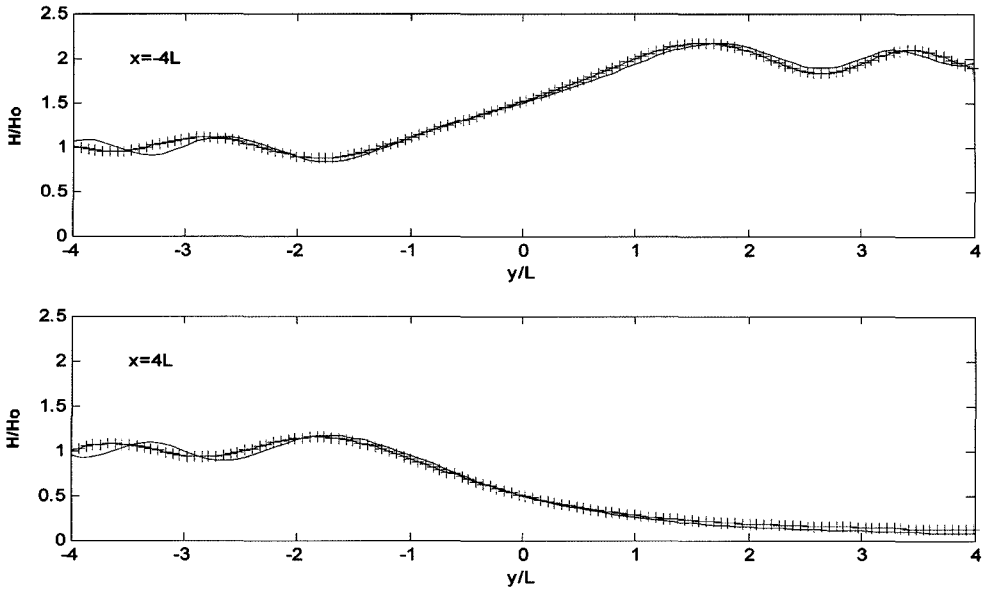


Fig. 11. Wave height distributions around porous semi-infinite breakwaters at $x = \pm 4L$, case (K_r : 100%, K_t : 0%), solid lines: numerical solutions, cross marks: Yu(1995)'s solution.

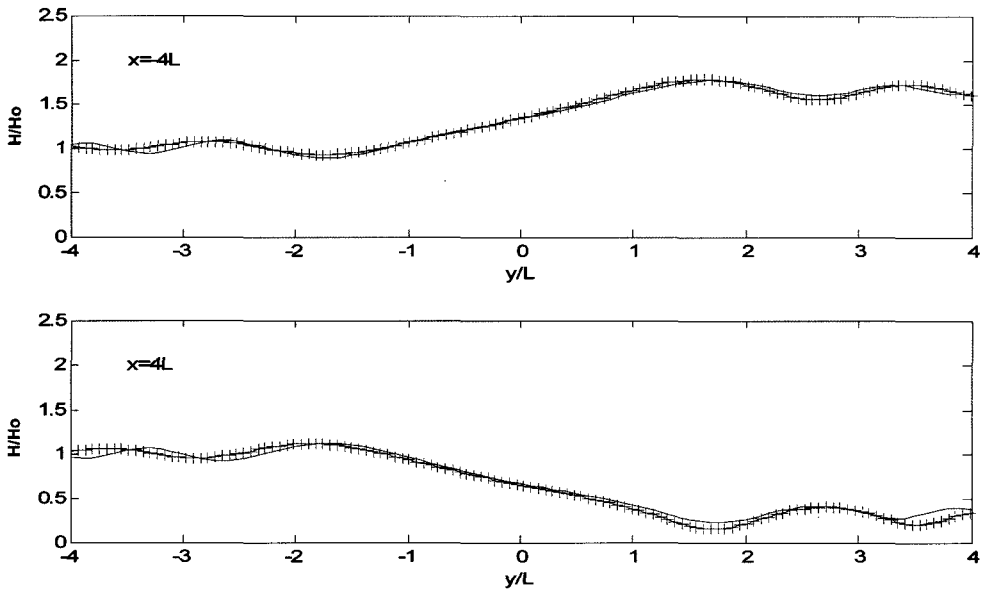


Fig. 12. Wave height distributions around porous semi-infinite breakwaters at $x = \pm 4L$, solid lines: numerical solutions, cross marks: Yu(1995)'s solution, K_r : 67%, K_t : 33%.

McIver의 일반해는 Wiener-Hopf 기법을 이용해 구한 것으로 Yu의 것과 달리 방파제에 경사입사하는 경우에 대해서도 고려한다. 본 연구에서는 McIver가 제시한 일반해 중에서 kr 이 큰 경우에 대한 것을 취해 수치해석 결과와 비교하였다.

본 수치 모의실험에서는 방파제의 투과율과 반사율이 일정하다고 보고 입사각이 각각 30° 와 45° 인 경우에 대해 수치모의 실험을 실시하였다(반사율: 50%, 투과율: 50%). 이때, 수치모의실험 결과 중에서 반무한 방파제로부터 전면과 배면으로 각각 $4L$ 만큼 떨어진 곳의 파고분포도를 구

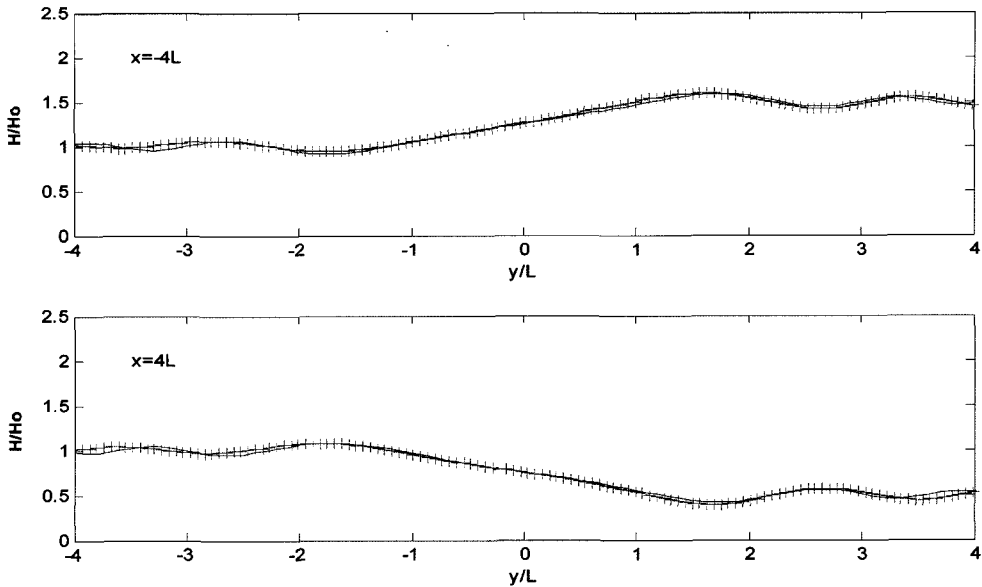


Fig. 13. Wave height distributions around porous semi-infinite breakwaters at $x = \pm 4 L$, solid lines: numerical solutions, cross marks: Yu(1995)'s solution, K_p : 50%, K_t : 50%.

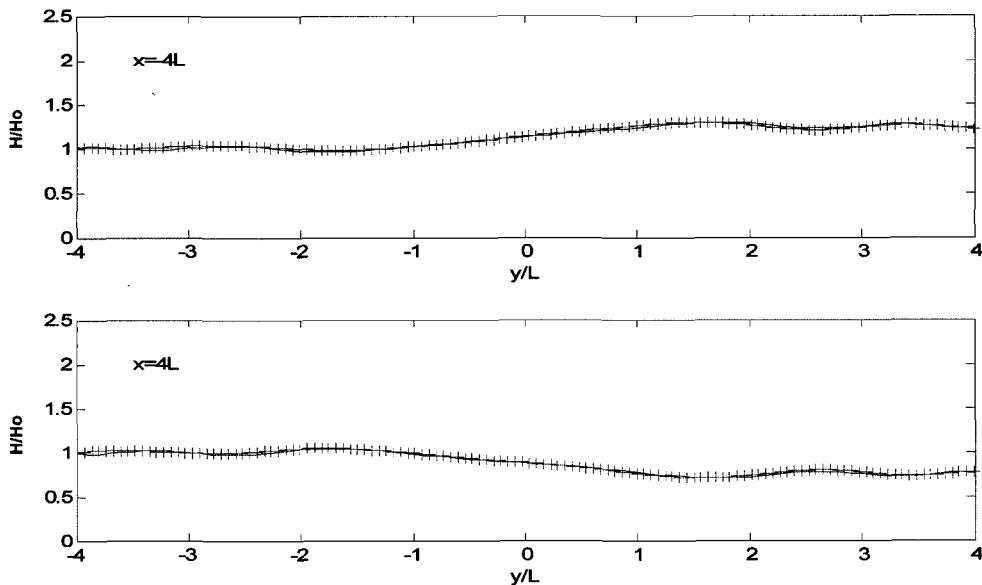


Fig. 14. Wave height distributions around porous semi-infinite breakwaters at $x = \pm 4 L$, solid lines: numerical solutions, cross marks: Yu(1995)'s solution, K_p : 25%, K_t : 75%.

해 McIver의 일반해와 비교하여 다음의 Fig. 15와 Fig. 16에 나타내었다.

Fig. 15과 Fig. 16에서 수치모의 실험결과와 해석해의 결과가 대체로 잘 일치하고 있어 임의의 입사각을 가지고 투과성반무한 방파제에 대해 입사할 경우에도 본 연구의 계

산 방법이 잘 적용됨을 알 수 있다.

3.4 이안제에서의 파랑 변형

불투과성 이안제(반사율: 50%) 및 투과성 이안제(반사율: 50%, 투과율: 50%)에 대해 수직입사하는 파의 파랑

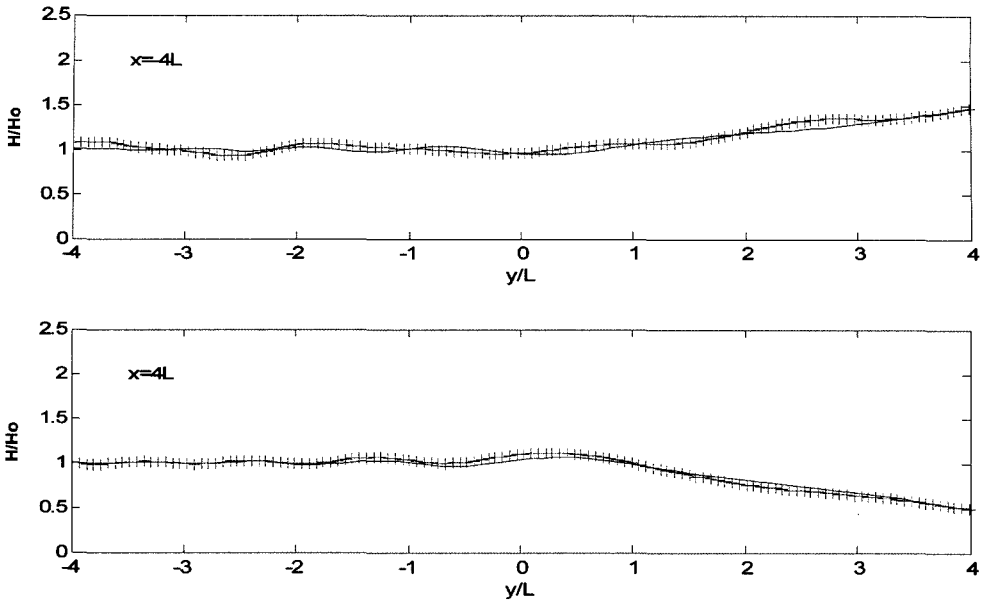


Fig. 15. Wave height distributions around porous semi-infinite breakwaters at $x = \pm 4L$, solid lines: numerical solutions, cross marks: McIver(1999)'s solution, K_r : 50%, K_t : 50%, oblique incident wave case ($\theta_0 = 30^\circ$).

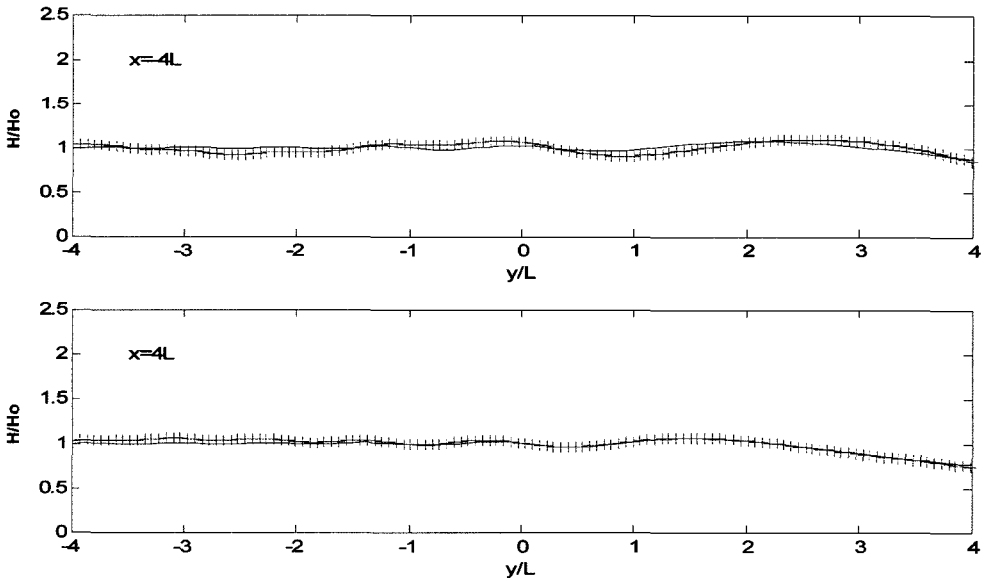


Fig. 16. Wave height distributions around porous semi-infinite breakwaters at $x = \pm 4L$, solid lines: numerical solutions, cross marks: McIver(1999)'s solution, K_r : 50%, K_t : 50%, oblique incident wave case ($\theta_0 = 45^\circ$).

변형을 계산하였다. 본 수치 모의 실험의 계산 조건은 $\Delta t = 0.01$ sec, $\Delta x = 2.5$ m, $\Delta y = 2.5$ m이며 계산 결과들을 다음의 Fig. 17과 Fig. 18~Fig. 23 등에 나타내었다.

Fig. 18은 이안제 전면에서의 불투과성 이안제 및 투과성 이안제의 파고비 분포도를 나타낸 것인데, 파의 반사로

인해 구간($x=200\sim 400$ m)에서 파고비가 1.5 등으로 나타나고 있다. 이 때, 투과성 이안제의 경우에는 투과파의 영향으로 파고비가 1.5를 중심으로 약간 크게 분포하고 있다.

Fig. 19은 이안제 배면에서의 불투과성 이안제 및 투과성 이안제의 파고비 분포도를 나타낸 것인데, 파고비가 각

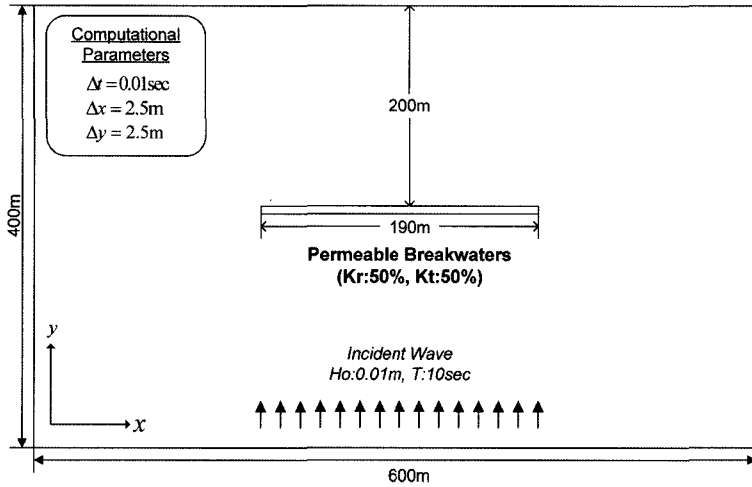


Fig. 17. Computational domain for detached-breakwaters.

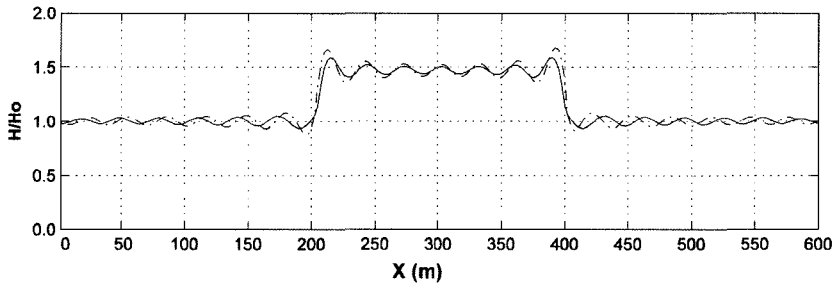


Fig. 18. Distributions of the normalized wave height along the front of the breakwater (solid line: impermeable breakwater, dotted line: permeable breakwater).

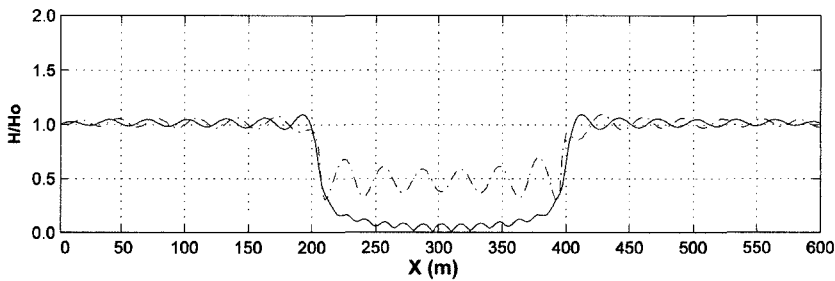


Fig. 19. Distributions of the normalized wave height along the lee-sides of the breakwater (solid line: impermeable breakwater, dotted line: permeable breakwater).

각 0.0~0.2, 0.4~0.6 등으로 분포하고 있다. 여기서 불투과성 이안제의 경우에는 이안제의 양단에서 각각 회절된 파가 상호작용을 일으켜 정상파처럼 파고비가 분포하고 있다. 그리고, 투과성 이안제는 이안제의 양단에서 회절된 파와 투과파가 상호작용을 일으켜 0.4~0.6의 파고비 분포를 보이고 있다.

Fig. 20와 Fig. 21에는 불투과성 이안제의 파고비 분포

도 및 수면변위 분포도를 나타내었다. Fig. 21에서 보면 이안제 전면에서 반사가 일어나 0.5~1.5의 파고비가 분포하고 있으며 이안제의 배면에서는 회절이 일어나 0.0~0.2의 파고비가 분포하고 있는데 반무한 방파제의 경우와 달리 선형으로 파고가 분포하고 있다. 이는 이안제의 양단에서 회절된 진행방향이 서로 다른 파가 상호작용을 일으킨 결과이다.

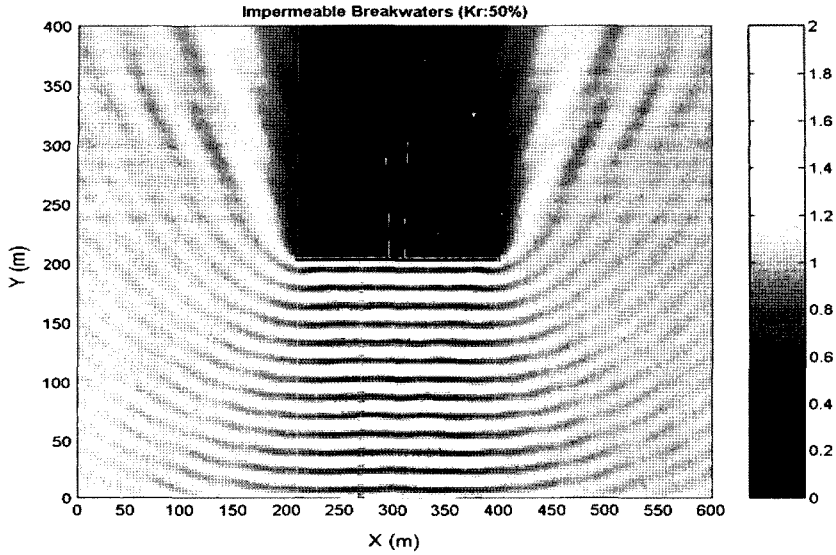


Fig. 20. Distribution of the normalized wave height around impermeable breakwaters.

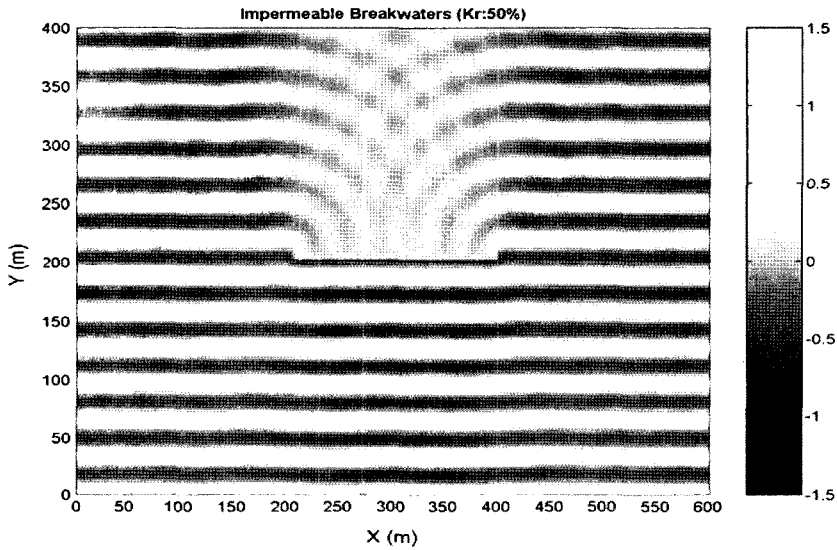


Fig. 21. Distribution of normalized surface elevation around impermeable breakwaters at 20T.

Fig. 22와 Fig. 23에는 반사율과 투과율이 각각 0.5인 투과성 이안체의 파고비 분포도 및 수면변위 분포도를 나타내었다. Fig. 24에서 보면 이안체의 전면과 배면에서 0.5~1.5, 0.4~0.6의 파고비가 분포하고 있다. 이안체의 배면에서 0.4~0.6의 파고비가 분포하는 것은 50%의 투과 파에 의한 것으로 투과파와 이안체의 양단에서 회절된 파가 상호작용을 일으켜 췌기형의 파고 분포를 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 파의 투과율과 반사율이 주어졌을 때, 파 에너지 감쇠율과 투과유량을 계산하는 간단한 식을 제안하여 파의 부분 투과 및 반사를 효과적으로 수치모의하는 방법을 제시하였다. 투과 및 반사를 표현하는 식을 시간의 존 쌍곡선형 환경사 방정식의 항에 첨가하여 반투과성 또는 투과성 해안구조물에 의한 파의 회절, 반사, 그리고 투

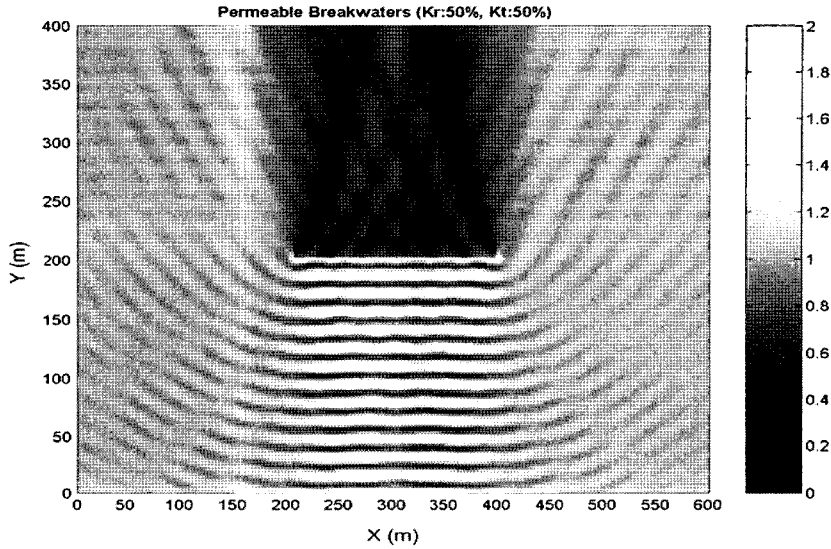


Fig. 22. Distribution of the normalized wave height around impermeable breakwaters.

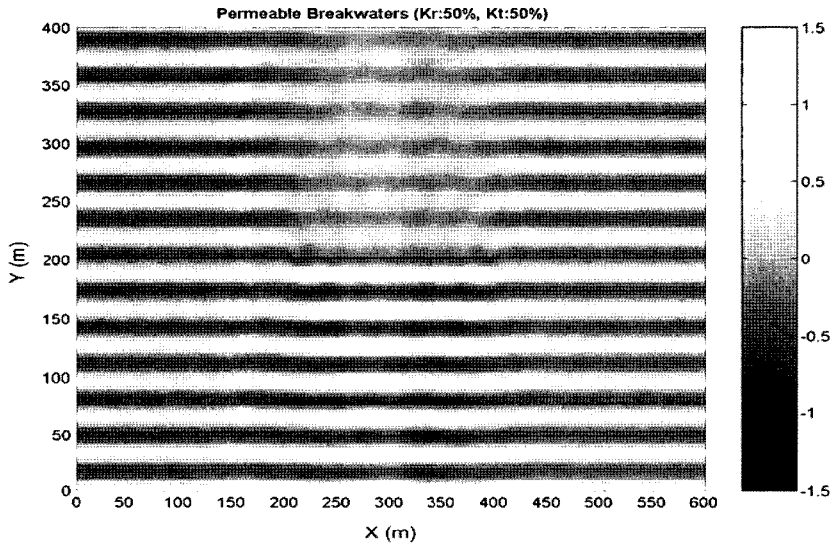


Fig. 23. Distribution of the normalized surface elevation around permeable breakwaters at 20T.

파를 효과적이고 재현할 수 있음을 보였다.

검증을 위해 2차원 수조에서 1, 4, 8초의 파의 주기에 대해 투과율과 반사율을 변화시키면서 수치모의한 결과 투과와 반사를 효과적으로 정확하게 모의할 수 있음을 확인하였다. 또한 3차원 수조의 반무한 방파제와 이안제에 직각 방향 또는 임의의 각도로 입사하는 파에 의한 반사 및 투과성을 수치모의한 결과 회절, 반사, 그리고 투과를 잘 재현함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제시된 방법은 수리모형실험에 의해 구조

물의 반사율과 투과율이 주어지면, 간편하고 정확하게 주어진 파의 회절, 반사 및 투과를 재현할 수 있으므로 투과성 구조물의 평면배치 계획 수립등과 같은 해안 및 항만구조물 설계에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10164-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- 전인식, 최민호, 심재철, 오병철 (2002). 부유식 방파제의 반사-투과 경계조건을 적용한 항만 정온도의 해석. 한국해양안·해양공학회지, 14(1), 76-85.
- Madsen, P.A. (1983). Wave reflection from a vertical permeable wave absorber. Coastal Eng., 7, 381-396.
- Maruyama, K. and Kajima, R. (1985). Two dimensional wave calculation method based on unsteady mild-slope equation. Report Electric Central Res. Inst. No.384041 (in Japanese).
- McIver, P. (1999) Water-wave diffraction by thin porous breakwater. Journal of Wtry. Port, Coastal and Ocean Eng., 125(2), 66-71.
- Steward, D.R. and Panchang, V.G. (2001). Improved coastal boundary condition for surface water waves. Ocean Eng., 28, 139-157.
- Watanabe, A. and Maruyama, K. (1986). Numerical modeling of nearshore wave field under combined refraction, diffraction and breaking. Coastal Eng., Japan, 29, 19-39.
- Yu, X. (1995). Diffraction of water waves by porous breakwaters. Journal of Wtry. Port, Coastal and Ocean Eng., 121(6), 275-282.

Received October 13, 2005

Accepted March 8, 2006