

부유식 방파제의 반사-투과 경계조건을 적용한 항만 정온도의 해석 Harbor Tranquility Analysis with the Reflection - Transmission Boundary Condition of Floating Breakwaters

전인식* · 최민호* · 심재설** · 오병철**

Insik Chun, Minho Choi, Jaesul Sim, and Beongcheol Oh

要 旨 : 부유식 방파제는 고정식 방파제에 비하여 항 내·외 해수교환성은 우수한 반면, 항내 정온도가 다소 저하되는 특징이 있다. 따라서, 설계초기단계에서 부유식 방파제의 여러 평면배치 대안에 대하여 항내 정온도를 적절히 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 기존의 시간의존완경사 방정식을 부유식 방파제 설치안에 대해서도 적용할 수 있도록 하기 위하여 부유식 방파제의 반사와 투과를 동시에 반영할 수 있는 일종의 반사-투과 경계조건을 정식화하였다. 본 경계조건의 성능을 검토하기 위하여 이차원 및 삼차원 해석을 수행한 결과, 수치해석에 입력된 반사 및 투과율이 수치적으로 잘 구현됨을 확인하였다. 마지막으로 본 반사-투과 경계조건을 부유식 방파제가 설치되어 있는 가상적 항만에 적용하였으며, 본 수치해석이 부유식 방파제의 실해역 설치를 위한 실무에서도 충분히 효과적으로 이용될 수 있음을 예시하였다.

핵심용어 : 항만 정온도, 부유식 방파제, 완경사 방정식, 반사-투과 경계조건, 반무한 방파제

Abstract □ The floating breakwater generally has an excellent water exchanging capability, but with some lowering harbor tranquility due to the wave transmission underneath floating body. In the initial stage of design, it is thus required to investigate several alternatives of breakwater layout for their performance of harbor tranquility. The present study aims to formulate a sort of reflection - transmission boundary condition of floating breakwater so that the existing numerical method using time dependent mild slope equation can still be applied to the case of floating breakwaters. The two and three dimensional tests were each performed to demonstrate the performance of the boundary condition. It was found that the reflection and transmission characteristics around the breakwater were well reproduced by the boundary condition. Finally, the reflection-transmission boundary condition were applied to a floating breakwater installed in an imaginary harbor with an irregular shape and bottom topography. The results surely showed that the present numerical method can effectively used in practical works related to the real sea construction of floating breakwaters.

Keywords : harbor tranquility, floating breakwater, mild slope equation, reflection - transmission boundary condition, semi-infinite breakwater

1. 서 론

항만건설의 입지조건이 다양해짐에 따라 방파제의 형식도 재래의 경사식 또는 케이슨식 방파제 형식으로부터

탈피하여 여러 형태의 신형방파제들이 개발 또는 설치되고 있다. 이중에서도 부유식 방파제는 연약지반 설치가 경제적이고 항 내·외 해수교환이 가능하며 그리고 이동설치가 용이하다는 점 때문에 입사파의 주기 및 파고가 비

*건국대학교 공과대학 토목공학과(Corresponding author: Insik Chun, Department of Civil Engineering, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Kwangjin-ku, Seoul 143-701, Korea. ischun@konkuk.ac.kr)

**한국해양연구원 연안·항만공학연구본부(Coastal and Harbor Engineering Research Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute)

교적 작은 어항에 자주 설치되어 왔다(한국해양연구소, 1989). 그러나, 본 방파제는 부유체 하부에서의 해수교환이 가능한 동시에 입사파 에너지의 일부가 방파제 너머로 전달되는 특성이 있기 때문에 항내 정온도를 다소 저하시키는 문제점이 있다. 따라서, 방파제설계의 초기단계에서 해수교환성과 항내 정온도를 적정하게 만족시킬 수 있는 방파제의 평면배치 및 단면설정이 필요하다. 이를 위해서는 방파제의 여러 대안에 대하여 방파제의 삼차원적 성능을 예측할 수 있는 수치해석 및 수리모형실험이 요구된다.

실제로 부유식 방파제 주변의 파동장은 굴절-회절-방사 문제를 해석하여 결정할 수 있다(Garrison, 1978). 그러나, 이와 같은 방법은 사방 개방되어 있는 해역에 설치되어 있는 방파제 주변의 파랑변형을 파악하고자 할 때 적용 가능한 것이며 부유식 방파제와 복잡한 형상을 가진 항만을 연계하여 항 내·외의 정온도를 전체적으로 파악하는데 적용하기는 불가능하다. 부유식 방파제는 임의의 입사파 조건에 대하여 방파제 단면형상에 따른 소정의 반사율과 투과율을 가지고 있으며 이들 값들은 이차원 수치해석 및 단면 수리모형실험에 의하여 결정할 수 있다. 부유식 방파제에 이와 같은 반사율과 투과율을 적용하면 방파제의 방사문제를 우회할 수 있으며 항 내·외 파동장을 일종의 굴절-회절 문제로 단순화하여 결정할 수 있다.

파의 굴절-회절 문제를 해석하기 위하여 여러 종류의 수치해석기법이 발전되어 왔다(Liu, 1986). 이 중 쌍곡형 미분방정식 형태인 일종의 시간의존형 완경사 방정식이 Ito and Tanimoto(1971), Copeland(1985)와 Watanabe and Maruyama(1986) 등에 의하여 제시된 바 있다. 이 기법은 경계조건 및 쇄파 에너지 감쇠를 고려하는데 매우 효과적인 것으로 알려져 있다. 경계조건은 입사조건, 반사조건, 투과조건 등이 포함되며 방파제에 대해서는 고정식 방파제에 대한 반사경계조건이 주로 취급되어 왔다. 그러나, 부유식 방파제에서는 반사와 투과를 동시에 고려하는 경계조건(이하 반사-투과 경계조건으로 칭함)의 설정이 필요하다. Sakai, et al.(1978)은 반사-투과 경계조건의 설정을 위한 기법을 제시하였으며 Penny and Price(1952)의 반무한 방파제에 적용한 바 있다. 그러나, 이 방법은 약간의 문제점(군속도 대신에 파속을 사용)을 갖고 있는 Ito and Tanimoto(1971)의 수식을 적용하였다는 점 외에도 수치계산이 쉽게 발산되는 문제점을 갖고 있다. 본 연구에서는 반사-투과경계조건에 대한 새로운 기법을 제시하며 이의 성능을 검토하기 위하여 이차원, 삼차원 수치해석을

수행한다. 그리고, 최종적으로 실험역에 적용하여 본 수치해석 기법의 실용성을 예시하기로 한다.

2. 지배방정식 및 경계조건

전 등(2001)은 기존의 완경사 방정식에 수심변화의 교차항을 부가한 확장형 완경사방정식(Massel, 1993; Suh, et al., 1997)을 이용하여 다음과 같은 확장형 시간의존 완경사 방정식계를 유도하였다.

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + c \frac{\partial \zeta}{\partial x} + (\epsilon_f + \epsilon_b) Q_x = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + c \frac{\partial \zeta}{\partial y} + (\epsilon_f + \epsilon_b) Q_y = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{n} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (n Q_x) + \frac{\partial}{\partial y} (n Q_y) \right\} + \frac{c}{c_g} \left\{ \frac{c}{c_g} - R_1 (\nabla h)^2 - R_2 \nabla^2 h \right\} \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

여기서, $(Q_x, Q_y) = x, y$ 방향의 선유량, $\zeta =$ 수면변위, $c =$ 파속, $c_g =$ 군속도, $\epsilon_f =$ 해저면 마찰감쇠계수, $\epsilon_b =$ 쇄파감쇠계수이다. 기존의 완경사방정식은 식 (10)에서 $R_1 = R_2 = 0$ 인 경우에 해당한다. R_1 과 R_2 의 계산식은 Suh, et al.(1997)에 자세히 기술되어 있다.

쇄파감쇠계수 ϵ_b 를 정하는 방법은 여러 가지가 있으나(Southgate, 1983), 여기에서는 불규칙한 해저경사에도 적용할 수 있는 Le Mehaute(1963)의 보어(bore) 유사이론을 이용하였다.

$$\epsilon_b = \frac{\lambda \rho g^{3/2} k H^3}{8 \pi h^{1/2} n E} \quad (4)$$

여기서, $\lambda = O(1)$ 의 실험계수, $k =$ 파수, $H =$ 파고, $h =$ 평균수심, $E =$ 단위면적당 파에너지이다. 또한, 마찰감쇠계수 ϵ_f 는 파랑에 의한 난류경계층 이론(Dean, 1984)에 의하여 다음과 같이 정할 수 있다.

$$\epsilon_f = \frac{\rho f}{6 \pi} \left(\frac{a \sigma}{\cosh kh} \right)^3 \frac{1}{n E} \quad (5)$$

여기서, $a =$ 파의 진폭, $f =$ 마찰계수이다.

미지수 (Q_x, Q_y, ζ) 는 식 (1)~(3)을 공간은 교호격자체계를, 시간은 Leaf frog 기법을 이용한 유한차분방식을 채택하여 매 시간증분마다 구한다. 경계조건으로서는 입사조건, 투과조건, 그리고 방파제 또는 호안에서의 반사조

건으로 구분되며 이들에 대한 정식화는(Watanabe and Maruyama, 1986)에 제시되어 있다.

계산영역내 임의점에서의 파향각 θ 는 파봉에서의 수립자 속도성분(u_c, v_c)을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다(Watanabe and Maruyama, 1986).

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v_c}{u_c}\right) \quad (6)$$

여기서, u_c 와 v_c 는

$$u_c = k \coth kh \cdot \bar{Q}_x \cos(\varepsilon_x - \varepsilon_\zeta) \quad (7)$$

$$v_c = k \coth kh \cdot \bar{Q}_y \cos(\varepsilon_y - \varepsilon_\zeta) \quad (8)$$

와 같이 나타낼 수 있다. $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_\zeta$ 는 각각 Q_x, Q_y, ζ 의 위상이며 이들의 시간이력을 이용하여 구할 수 있다.

3. 반사-투과 경계조건의 정식화

Fig. 1(b)에서와 같이 부유식 방파제가 x - y 평면에서 경사지게 위치하며 파향각 θ ($0 \leq \theta \leq \pi/2$)로 파가 접근할 때 방파제는 폭이 B_x 또는 B_y 를 갖는 구간들의 연속체로 볼 수 있으며 반사-투과 경계조건을 각각에 대하여 다르게 설정한다. 먼저, Fig. 1(c)를 고려할 때, 절점 2에 원점을 갖는 국지좌표계에서 임의의 시간 t 에서의 입사파, 반사파, 그리고 투과파에 대한 각각의 선유량 Q_I, Q_R 그리고 Q_T 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_I = ac_g \sin(kx \cos \theta - \sigma) \quad (9)$$

$$Q_R = ac_g K_R \sin(kx \cos \theta + \sigma) \quad (10)$$

$$Q_T = ac_g K_T \sin(kx \cos \theta - \sigma) \quad (11)$$

여기서, K_R, K_T 는 각각 폭이 B_x 인 방파제 구간의 반사율과 투과율이다.

본 구간의 전면에서의 선유량은

$$Q_I + Q_R = ac_g(1+K_R)\sin(kx \cos \theta)\cos \sigma - ac_g(1-K_R)\cos(kx \cos \theta)\cos \sigma \quad (12)$$

와 같이 결정할 수 있으며 점 2와 점 1에서의 선유량은 각각 다음과 같다.

$$Q_{2,IR} = (Q_I + Q_R)_{x=0} = -ac_g(1-K_R)\sin \sigma \quad (13)$$

$$Q_{1,IR} = (Q_I + Q_R)_{x=-\Delta x} = -D \sin[\sigma(t+\tau)] \quad (14)$$

여기서, D 와 τ 는 다음과 같다.

$$D = [(ac_g)^2 \{(1+K_R)^2 \sin^2(k\Delta x \cos \theta) + (1-K_R)^2 \cos^2(k\Delta x \cos \theta)\}]^{1/2} \quad (15)$$

$$\tan \sigma \tau = \frac{1+K_R}{1-K_R} \tan(k\Delta x \cos \theta) \quad (16)$$

식 (13)과 식 (14)를 비교하면,

$$Q_{2,IR} = \frac{ac_g(1-K_R)}{D} Q_{1,IR}^{t-\tau} \quad (17)$$

임을 알 수 있다.

한편, 점 3에서의 선유량은 식 (11)에서

$$Q_{3,T} = (Q_T)_{x=B} = -ac_g K_T \sin\left[\sigma\left(t - \frac{B \cos \theta}{c}\right)\right] \quad (18)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (13)과 (18)을 비교하면

$$Q_{3,T} = \frac{K_T}{1-K_R} Q_{2,IR}^{t-\tau_x} \quad (19)$$

이다. 여기서,

$$\tau_x = \frac{B_x \cos \theta}{c} \quad (20)$$

이다.

Fig. 1(a)의 구간에 대하여 상기와 동일한 방법을 적용하면

$$Q_{2,IR} = \frac{ac_g(1-K_R)}{D} Q_{1,IR}^{t-\tau} \quad (21)$$

$$Q_{3,T} = \frac{K_T}{1-K_R} Q_{2,IR}^{t-\tau_y} \quad (22)$$

$$D = [(ac_g)^2 \{(1+K_R)^2 \sin^2(k\Delta y \sin \theta) + (1-K_R)^2 \cos^2(k\Delta y \sin \theta)\}]^{1/2} \quad (23)$$

$$\tan \sigma \tau = \frac{1+K_R}{1-K_R} \tan(k\Delta y \cos \theta) \quad (24)$$

$$\tau_y = \frac{B_y \sin \theta}{c} \quad (25)$$

와 같다.

상기 수식전개는 입사파가 점 1에서 점 2로 진행되는 경우에 대한 것이다. 반대로 점 4에서 점 3으로 진행되는 경우에서도 상기와 같은 방법으로 $Q_{4,IR}, Q_{3,IR}$, 그리고 $Q_{T,2}$ 등을 정식화할 수 있다. 한편, 상기 선유량들에 대

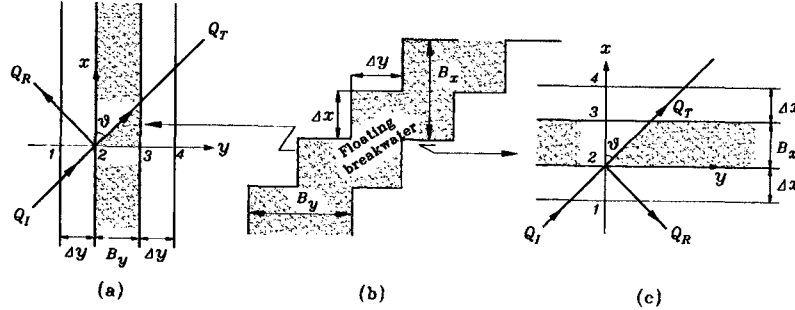


Fig. 1. Reflection - transmission boundary; (a) segment normal to y -axis, (b) finite difference scheme, (c) segment normal to x -axis.

한 x 또는 y 방향의 선유량 성분(Q_x, Q_y)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_x = Q \cos \theta \quad (26)$$

$$Q_y = Q \sin \theta \quad (27)$$

Sakai, et al.(1978)은 Fig. 1(c)의 경우에 대한 투과 경계조건을 설정하기 위하여 매 시간증분마다 계산되는 점 3에서의 선유량 $Q_{3,IR}$ 에 식 (19) 또는 (22)의 투과 선유량 $Q_{3,T}$ 를 부가하였다. 즉,

$$Q_3 = Q_{3,IR} + Q_{3,T} \quad (28)$$

그러나, 이 방법은 대부분의 입사파 조건에서 해가 발산하는 문제점이 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 부유식 방파제 하부 양단(점 2와 3)에서의 선유량들이 연속방정식을 만족해야 함을 상기하여 반사-투과 경계조건을 다음과 같이 새로이 설정하였다.

방파제에서의 반사 또는 투과는 파향이 방파제로 향하는 입사파에서만 발생한다. 따라서, 매 시간증분마다 식 (6)에 의하여 파향각을 구하여 방파제로의 입사방향을 확인한 후, 다음 절차에 의하여 반사-투과경계조건을 설정한다.

- (1) Fig. 1(c)의 경우,
 - ① $0 \leq \theta_2 \leq \pi/2$ 또는 $3\pi/2 \leq \theta_2 \leq 2\pi$ 일 때

$$(Q_2)_x = (Q_{3,IR})_x, (Q_3)_x = (Q_{3,T})_x$$
 - ② $\pi/2 \leq \theta \leq 3\pi/2$ 일 때

$$(Q_3)_x = (Q_{3,IR})_x, (Q_2)_x = (Q_{2,T})_x$$
- (2) Fig. 1(a)의 경우,
 - ① $0 \leq \theta \leq \pi$ 일 때

$$(Q_2)_y = (Q_{2,IR})_y, (Q_3)_y = (Q_{3,T})_y$$

② $\pi \leq \theta \leq 3\pi$ 일 때

$$(Q_3)_y = (Q_{3,IR})_y, (Q_2)_y = (Q_{2,T})_y$$

일반적으로 방파제의 반사를 및 전달율은 방파제에 직각으로 파가 입사할 경우에 대한 것이나 본 반사-투과 경계조건의 설정에서 사용되는 반사율 및 전달율은 이와는 다소 다르다. Fig. 1(b)에서 알 수 있듯이 수치해석에서 고려되는 방파제 구간의 폭은 수치해석의 유한차분방식으로 변조된 B_x 와 B_y 이며 이들은 방파제의 배치 각도에 따라서 달라진다. 수치해석에 입력되는 반사율 및 전달율은 B_x 와 B_y 에 대한 것이다. 일반적으로 부유식 방파제의 반사율 및 전달율은 방파제의 폭에 따라서 달라지는 특성이 있기 때문에 B_x 또는 B_y 값에 따라서 반사율 및 전달율을 달리 지정하여야 한다. 방파제의 폭에 따른 반사율 및 전달율의 변화는 이차원 단면실험 및 수치해석에 의해 도출할 수 있다.

3. 반사-투과 경계조건의 성능검토

3.1 이차원적 검토

반사-투과 경계조건의 성능을 검토하기 위하여 이차원 수치수조 실험을 수행하였다. 수치수조는 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 수조 양단의 스폰지 층과 내부조파기(Larsen and Dancy, 1983)로 구성되어 있으며 부유식 방파제는 수조중앙에 위치한다. 그림에서 L 은 입사파 파장으로서 스폰지 층의 두께와 내부 조파기 위치를 파 주기에 따라서 달리 정하였다. 수심은 일반적인 방파제 설치 상황을 고려하여 12 m로 하였으며 방파제 폭은 6 m로 하였다. Fig. 3은 방파제 전후에서의 선유량을 보여준다.

Fig. 4는 주기 8초, 파고 4 m인 입사파에 대한 부유식 방파제 전후의 수면변위를 보여준다. 그림에서 X 는 수조

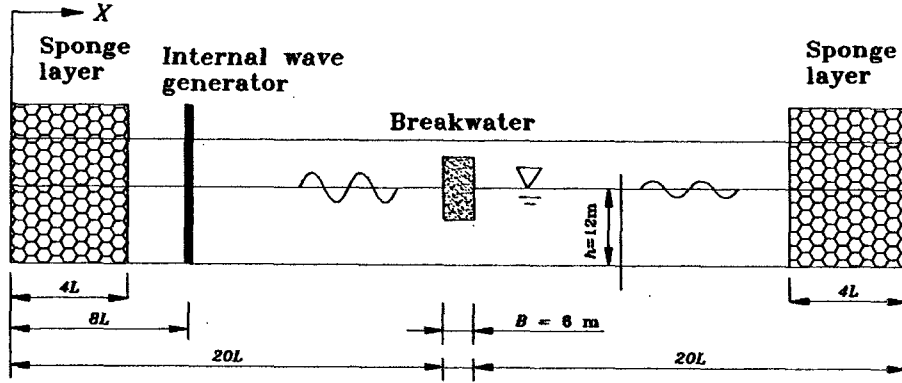


Fig. 2. Numerical flume of 2D analysis.

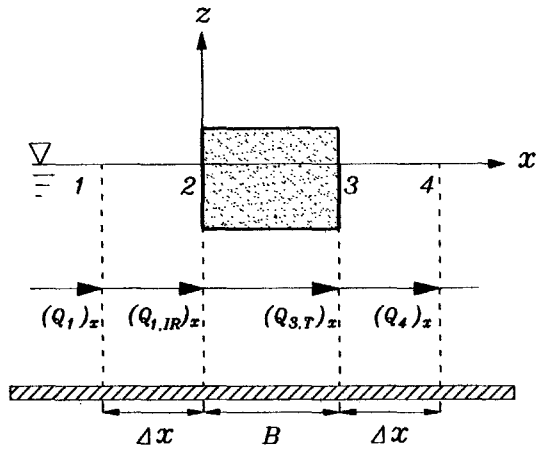


Fig. 3. Flow scheme of 2D numerical analysis.

좌단으로부터의 거리를 의미한다. 여기서, 반사율과 전달율은 공히 0.5로 하였다. 방파제 투과파의 파형을 볼 때, 투과파고는 약 2 m 정도로서 전달율 0.5가 잘 구현됨을 알 수 있다.

반사-투과 경계조건의 성능을 연속적으로 검토하기 위하여 입사파 주기를 2초에서 17초 까지 변화시켜 입력된 반사율 및 전달율과 실제 수치해석에 의하여 구현된 반사율 및 전달율을 비교하였다. 부유식 방파제는 주기가 길수록 반사율은 감소하며 전달율이 증가함을 고려하여 입력 반사율 주기범위내에서 1에서 영까지, 반대로 전달율은 영에서 1까지 연속적으로 변화시켰다. Fig. 4에서 보듯이 방파제 전면에서의 파형은 입사파와 반사파가 복합되어 있는 상황이기 때문에 여기에서는 반사율을 구하기 위하여 박 등(1992)의 삼점법을 이용하였다. 측정점은 방파제와 내부조파기 중간에 설치하였으며 측정간 간격은 입사파 파장 L 을 고려하여 0.1 L 과 0.2 L 로 하였다. Fig. 5

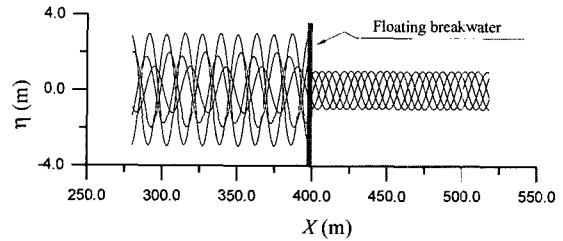


Fig. 4. Time variation of wave profile with reflection-transmission boundary condition.

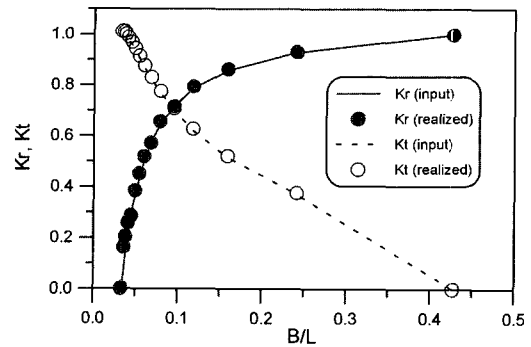


Fig. 5. Comparison of the inputs and realized values for reflection and transmission rate.

는 입력 또는 계산된 반사율 및 전달율의 B/L 에 대한 변화를 보여준다. 입력값들과 계산값들의 일치정도가 매우 양호하며 본 반사-투과 경계조건이 잘 작동함을 보여주고 있다.

3.2 삼차원적 검토

이차원의 경우와 동일하게 주기 8초, 파고 4 m, 그리고 수심 12 m의 입사파 제원에 대하여 반무한 방파제 주변의 파동장에 대하여 방파제의 반사-투과 경계조건을 시

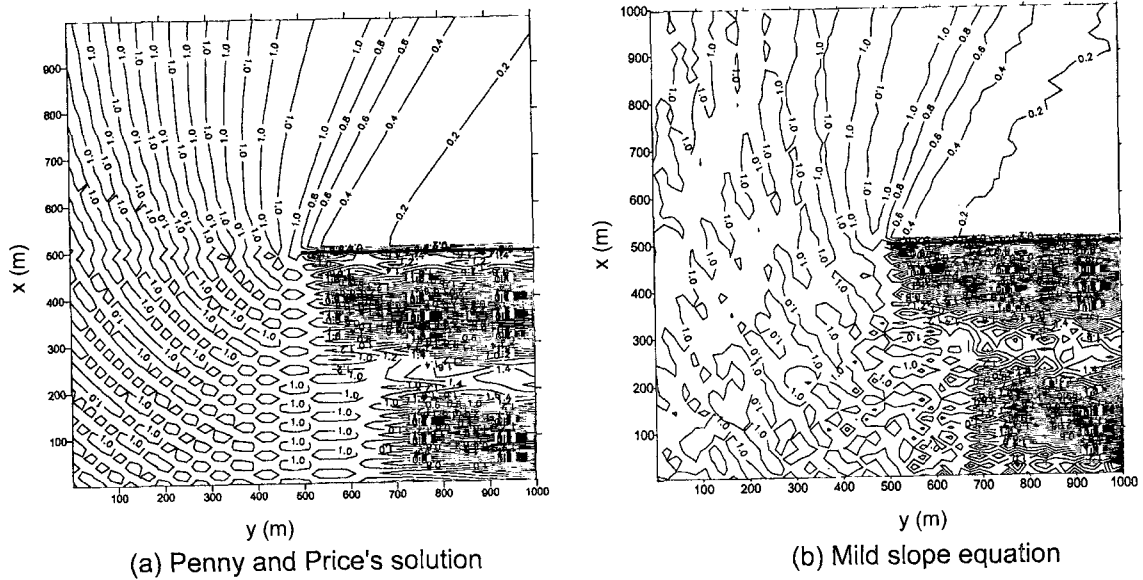


Fig. 6. Wave height contours for the case of fixed breakwater.

험하였다. 입사파의 파향은 $\theta = 30^\circ$ 로 하였다. 먼저, 본 수치해석 결과의 정확성을 검증할 목적으로 방파제가 고정식일 경우에 대하여 Penny and Price(1952)의 해석적 해와 본 수치해석에 의한 방파제 주변의 회절계수의 분포를 비교하였다. 수치해석에서는 하단과 좌단은 입사경계로, 상단과 우단은 투과경계로, 그리고 방파제는 양면 반사경계($K_R = 1$)로 처리하였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이

이들 결과들이 전체적으로 유사한 성향을 보이고 있으며, 특히, 방파제 배후에서 이들의 일치정도가 매우 양호하게 나타나 있다.

반무한 방파제가 고정식일 경우와 부유식일 경우(반사-투과경계조건 적용)에 대하여 각각 수치해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 여기에서 반사율과 투과율은 방파제 구간의 폭에 관계없이 공히 0.5로 취하였다. Fig. 7은

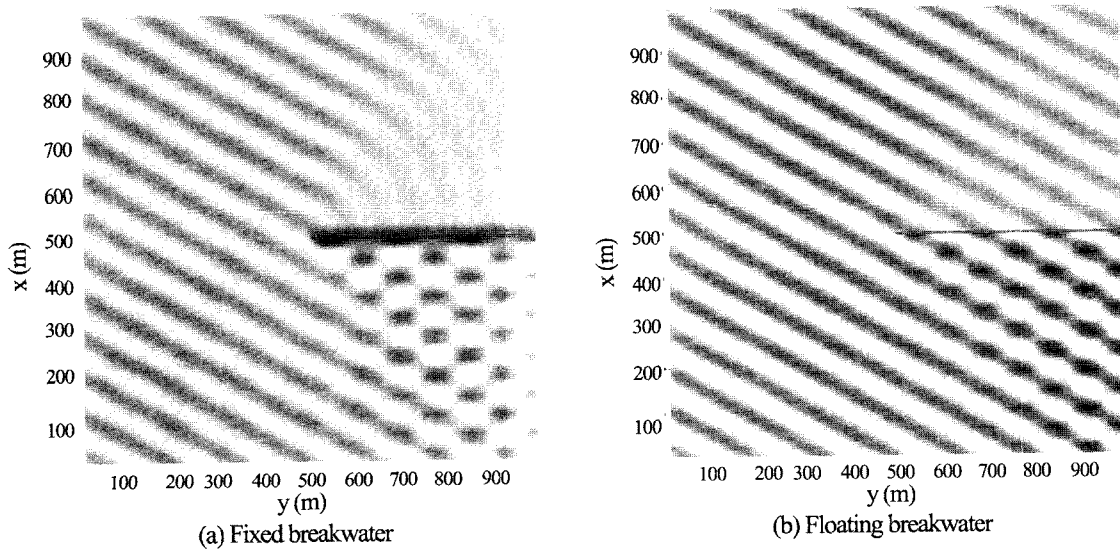


Fig. 7. Surface images.

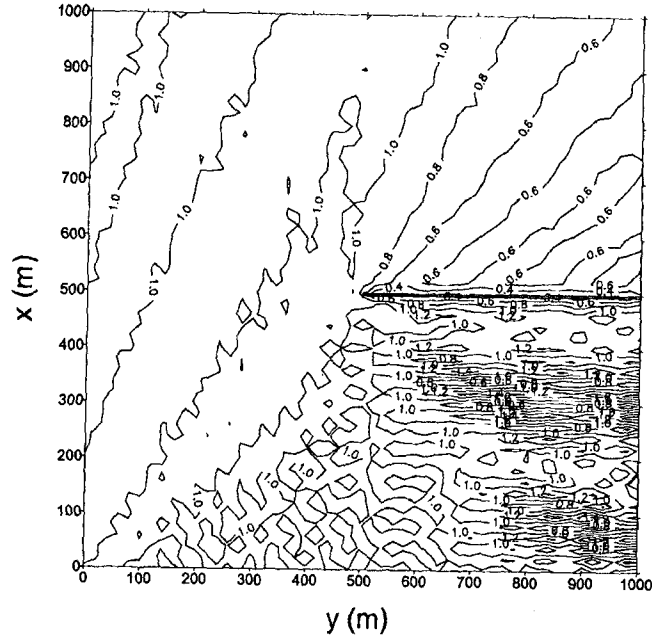


Fig. 8. Wave height contour for the case of floating breakwater.

방파제 주변에 발생하는 수면변위를 보여준다. Fig. 7(a)에서는 방파제의 불투과성으로 인하여 방파제 전면에는 단파봉파(short crest wave)가, 후면에는 동심원 형태의 회절파가 잘 발생함을 알 수 있다. 이에 반하여 Fig. 7(b)의 부유식 방파제에서는 전면에는 다소 약한 단파봉파가 형성되나 후면에서는 방파제 투과로 인하여 진행파성 파랑이 발생함을 알 수 있다. Fig. 8의 회절계수 분포도에서도 고정식의 경우에 비하여 방파제 전면에서는 다소 약한 파고가, 방파제 후면에서는 상당정도 증가된 파고가 형성됨을 알 수 있다.

3.3 실효역 적용

수치해석의 실효역 적용은 현재 국내에서 건설되고 있는 항만을 임의로 선택하여 수행하였다. 대상항만은 Fig. 9에서 보이는 비와 같이 동방파제(연장: m)와 서방파제(연장: m), 그리고 안벽구조물로 이루어져 있으며 현재 서방파제가 건설 중에 있다. 현재 동방파제는 고정식으로 계획되어 있으나 본 수치해석에서는 방파제를 고정식 또는 부유식으로 할 경우의 각각에 대하여 항내·외 파고분포를 계산하여 보았다.

입력조건으로서 입사파 조건은 대상해역에서 평상파 조건에 해당하는 심해파 제원, 즉, 파고 1.3 m, 주기가 5.0

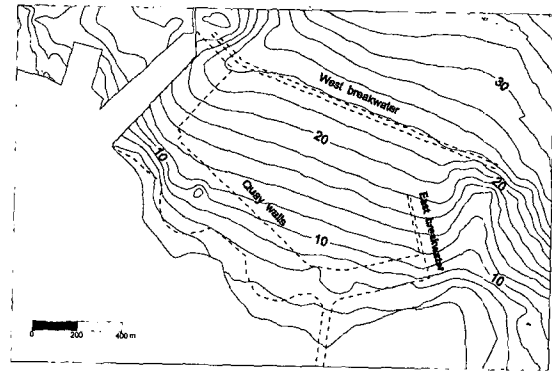


Fig. 9. Configuration of harbor and depth contour.

초인 ENE파로 하였다. 먼저, 심해파 제원에 대하여 별도의 수치모델을 이용하여 격자간격이 100 m인 영역수치계산을 수행하였으며 이 결과를 이용하여 본 상세역 계산을 수행하였다. 수치계산의 시간증분은 0.1초로 하였으며 격자간격은 x, y 방향 공히 5 m로 하였다. 서방파제의 반사율은 양면 공히 0.3으로 하였으며, 동방파제는 고정식인 경우는 반사율을 양면 0.3으로, 부유식인 경우는 방파제 구간의 폭에 관계없이 반사율과 전달율을 공히 0.5로 하였다. Fig. 9는 항 내·외의 등수심도(DL 기준)를 보여준다.

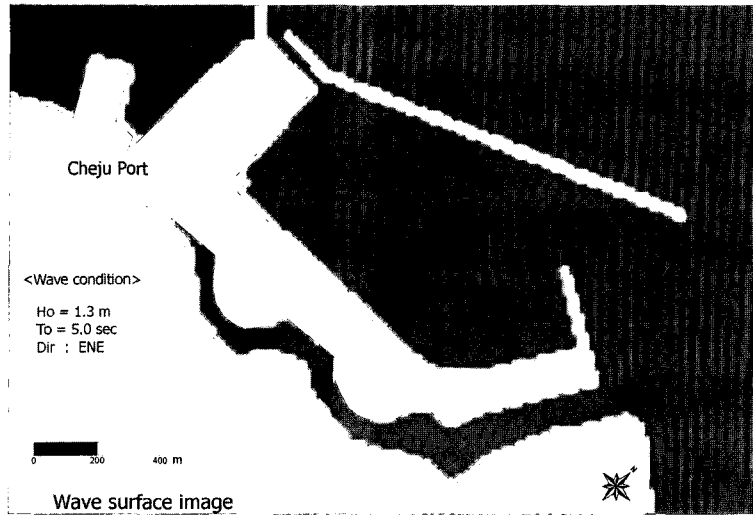


Fig. 10. Surface image of wave(East breakwater: fixed type).

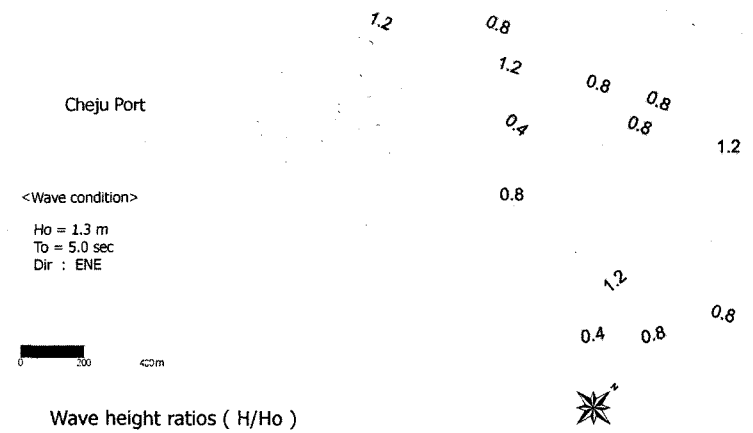


Fig. 11. Wave height contours(East breakwater: fixed type).

동방파제가 고정식일 경우의 수면위상도와 등파고비도를 Fig. 10과 Fig. 11에, 그리고 부유식일 경우에는 Fig. 12와 Fig. 13에 제시하였다. 여기에서 파고비는 각 지점에서 의 파고를 심해파고로 나눈 것이다. 수면위상도를 보면, 고정식일 경우에는 동방파제 이면에서 회절파의 이중 반사에 의한 파형을 볼 수 있으나 부유식일 경우에는 입사파형이 대체적으로 유지됨을 알 수 있다. 결국은 부유식일 경우가 고정식에 비하여 동방파제 이면뿐만 아니라 항 전체에 걸쳐서 파고가 증가하게 되며, 이는 등파고비에서도 잘 나타

나 있다. 동방파제 이면에서의 파고비가 개략적으로 전면에서의 파고비의 반에 해당하며 이것은 입력된 전달율 0.5가 수치해석에 의하여 잘 구현되고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

파의 반사와 투과가 동시에 발생하는 부유식 방파제의 경계조건의 설정을 위하여 기존의 쌍곡형 시간의존 환경사 방정식과 연계하여 선유량의 연속개념에 바탕을 둔 새

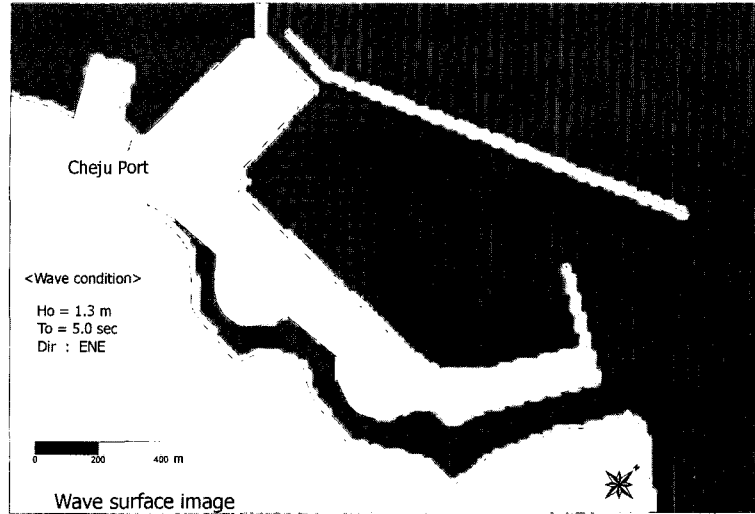


Fig. 12. Surface image of wave(East breakwater: floating type).

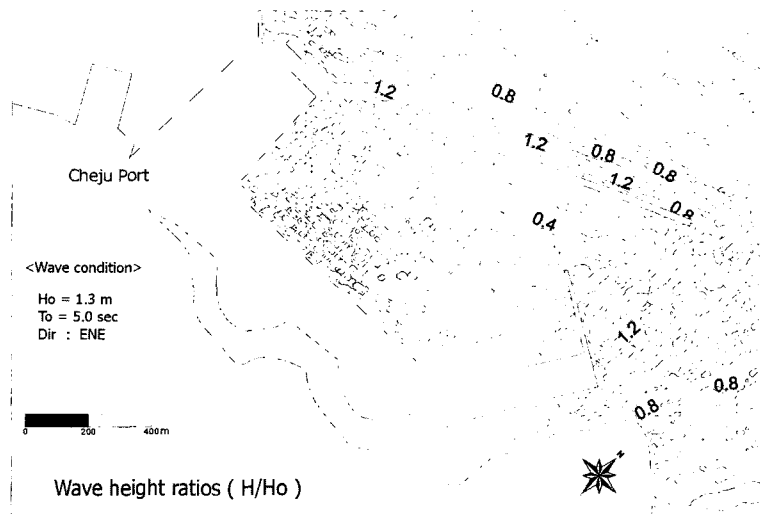


Fig. 13. Wave height contours(East breakwater: floating type).

로운 기법을 제시하였다. 본 경계조건의 성능을 검토하기 위하여 이차원 및 삼차원 해석을 수행한 결과, 수치해석에 입력된 반사 및 투과율이 수치적으로 잘 구현됨을 확인하였다. 또한, 본 반사-투과 경계조건을 부유식 방파제를 포함하는 가상적 항만에 적용하였으며, 해의 안정성과 수렴 측면에서 전혀 문제가 없음을 확인하였다. 따라서, 항만 정온도와 관련하여 부유식 방파제의 여러 실험역 평면배치안을 검토하기 위하여 본 수치해석이 매우 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 전인식, 황연호, 오병철, 심재설, 2001. 독도 해역의 파랑전파 특성, 대한토목학회, 21(1-B): pp. 63-73.
- 박우선, 오영민, 전인식, 1992. 최소자승법에 의한 입·반사파의 분리기법, 한국해양·해양공학회지, 4(3): 139-145.
- 한국해양연구소, 1989. 해안구조물의 파력흡수를 위한 신소재 개발 연구(I), BSPG 00077-224-2, 과학기술처.
- Copeland, G. J. M., 1985. *A numerical model for the propagation of short gravity waves and the resulting circulation*

- around nearshore structures*, Doctoral thesis. University of Liverpool.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., 1984. *Water wave mechanics for engineers and scientists*, Prentice-Hall, Inc., pp. 268-271.
- Garrison, C.J., 1978. Hydrodynamic loading of large offshore structures, three-dimensional source distribution methods, Zienkiewicz, O.C., Lewis, R.W. and Stagg, K.G., eds., *Numerical methods in offshore engineering*, John Wiley & Sons, pp. 87-140.
- Ito., Y. and Tanimoto, K., 1971. A numerical wave analysis method and its application, *Proc. 18th Japanese Conf. on Coastal Eng.*, JSCE, pp. 67-70 (in Japanese).
- Larsen, J. and Dancy, H., 1983. Open boundaries in short wave simulations - A new approach, *Coastal Engineering*, 7, pp. 285-297.
- Le Mehaute, B., 1963. On non-saturated breakers and the wave run-up, *Proc. 8th Int. Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, pp.77-92.
- Liu, P.L.-F., Boissevain, P.L., Ebersole, B.A. and Kraus, N.C., 1986. *Annotated bibliography on combined wave refraction and diffraction*, miscellaneous CERC Rep. No. 86.
- Massel, S.R., 1993. Extended refraction-diffraction equation for surface waves, *Coastal Eng.*, 19, 97-126.
- Penny, W. and Price, A.T., 1952. The diffraction theory of sea waves and shelter afforded by breakwater, *Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A*, 224, 236-253.
- Sakai, T., Sato, T. and Iwagaki, Y., 1978. Numerical simulation of wave scattering due to a breakwater with an arbitrary reflection and transmission coefficients, *Proc. 25th Japanese Conf. on Coastal Eng.*, JSCE, pp. 98-102 (in Japanese).
- Southgate, H.N., 1995. Prediction of wave breaking processes at the coastline, Potential flow of fluids, *Potential flow of fluids*, ed. Rahman, M., CMP, pp. 109-148.
- Suh, K., Lee, C. and Park, W., 1997. Time-dependent equations for wave propagation on rapidly varying topography, *Coastal Eng.*, 32, pp. 91-117.
- Watanabe, A. and Maruyama, K., 1986. Numerical modeling of nearshore wave field under combined refraction, diffraction and breaking, *Coastal Eng. in Japan*, 29, pp. 19-39.

Received February 8, 2002

Accepted March 8, 2002