

다양한 함몰지형 위를 통과하는 파랑의 반사율 해석

Analysis of Reflection Coefficients of Waves Propagating over Various Depression of Topography

강 규 영* / 정 태 화** / 조 용 식***
Kang, Gyu Young / Jung, Tae-Hwa / Cho, Yong-Sik

Abstract

In this study, wave reflection due to depression of seabed is calculated by using eigenfunction expansion method. The proper numbers of steps and evanescent modes needed for analysis are suggested by applying the eigenfunction expansion method to bottom topography of which slope or curvature varies. While satisfying shallow or intermediate water depth condition, the optimal figure of depression of seabed is obtained by calculating reflection coefficient for various depressions of seabed. The reflection coefficient with distance between the depression of seabeds is then calculated after arraying the optimal geometry in two and three rows.

keywords : eigenfunction expansion method, reflection coefficients, depression of seabed

요 지

본 연구에서는 고유함수 전개법을 이용하여 다양한 형태의 함몰지형 위를 통과하는 파랑의 반사율을 계산하였다. 기울기와 곡률이 변하는 지역에 고유함수 전개법을 적용하여 해석 시 필요한 적절한 구간의 수와 소멸과 성분의 개수를 제안하였다. 천해역 및 중간수심영역을 만족하는 조건에서 다양한 형태의 함몰지형에 대해 반사율을 계산하여 최적의 효율을 가지는 단면의 형상을 제시하였으며 최적 단면을 2열 및 3열로 배열하여 배열 간격에 따른 반사율을 계산하였다.

핵심용어 : 고유함수 전개법, 반사율, 함몰지형

1. 서 론

심해에서 생성되어 천해역으로 입사하는 파랑은 다양한 형상의 지형을 통과하면서 해안선의 변형 및 해

안구조물에 직접적인 영향을 주게 된다. 기존에는 해안 지역으로 입사하는 파랑의 영향을 최소화하기 위해 돌제나 이안제를 건설하였다. 그러나 이러한 구조물들은 해양환경에 좋지 않은 영향을 미칠 뿐만 아니라 장기간

* 한양대학교 토목공학과 석사과정
Graduate student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea.
(e-mail: ksdk@hanyang.ac.kr)
** 한양대학교 토목공학과 박사후과정
Postdoctoral researcher, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea.
(e-mail: togyel76@paran.com)
*** 교신저자 · 한양대학교 토목공학과 교수
Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea.
(e-mail: ysc59@hanyang.ac.kr)

사용에 따른 노후화 문제도 고려해야 하는 번거로움이 있어 이에 대한 대안으로 해저 지형을 이용한 입사파의 파랑 에너지 감소에 관한 연구가 최근에 활발히 진행되고 있다.

수중방파제 혹은 해저지형의 변화에 따른 파랑에너지 저감효과에 관한 연구는 해석적인 모형, 수리모형 실험 및 수치해석을 통하여 지속적으로 발전해 왔다. 고유함수전개법을 이용한 지형 형상에 따른 파랑 변화에 관한 연구는 Takano(1960)의 연구를 시작으로, Kirby and Dalrymple(1983)이 트렌치(trench)지형에 비스듬히 입사하는 파랑의 입사율과 반사율을 계산하였으며, O'Hare and Davies(1992)는 산란행렬법(scattering matrix method)을 이용하여 해저지형의 변화를 계단지형으로 구성하여 입사하는 파랑의 입사율과 반사율을 해석적으로 계산하였다. Davies and Heathershaw(1984)는 정현파형 지형을 통과하는 파랑의 반사율과 Bragg반사 현상을 수리모형 실험을 이용하여 연구하였다.

최근에 수행된 천해 파랑변형 해석에 관한 연구로는 Jung(2007)이 Berkhoff(1972)가 유도한 환경사 방정식을 사용하여 함몰지형 위를 통과하는 파랑의 반사율을 해석적으로 계산하였으며, 정재상 등(2007)은 다열 불투과성 수중방파제를 통과하는 다방향 불규칙파에 관한 연구를 수행하였다. 그러나 Jung(2007)의 해석 해는 적용이 가능한 지형의 형태가 제한되어 있으며 또한 환경사 영역에서만 적용이 가능하다는 문제점이 있으며, 정재상 등(2007)의 연구는 특정한 형태의 돌출 지형에 국한되어 있다. 따라서 본 연구에서는 기존에 활발히 연구되지 않았던 다양한 형태의 함몰지형에 대해 고유함수전개법을 사용하여 해석을 하여 기존의 결과들을 보완하였다. 수심이 급격하게 변화하는 경우, 정확한 파랑 변형을 예측하기 위해서 소멸파의 성분(evanescent

mode)이 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 수심이 변화하는 영역에서 정확한 파랑 변형을 모의하기 위해서 소멸파 성분을 고려하였으며, 반사율의 계산은 입사파의 진행과 성분과 반사파의 진행과 성분만을 고려하여 계산하였다. 고유함수전개법은 선형파 이론을 바탕으로 유도된 해석방법으로서 임의의 수심변화를 가지는 해저 지형에 적용할 수 있을 뿐만 아니라 천해역, 중간수심영역 및 심해역에서도 적용이 가능하기 때문에 Jung(2007)의 결과보다 광범위하게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서 적용된 영역은 천해역과 중간수심영역이며 파랑변형이 수심에 대해 거의 영향을 받지 않는 심해역은 제외하였다.

2. 고유함수 전개법

임의의 해저지형 위에 존재하는 파는 다음 Eq. (1), (2)와 같이 입사파 및 반사파 성분으로 구성할 수 있다. 여기서 Eqs. (1)과 (2)의 윗 첨자 +와 -은 각각 파랑의 진행 방향이 오른쪽 및 왼쪽방향임을 의미하고, 아래 첨자 m 은 서로 다른 수심을 갖는 영역을 나타내며, n 은 고려된 소멸파의 수, A_m^+ , A_m^- , $B_{m,n}^+$, $B_{m,n}^-$ 는 복소수로 표현되는 파고값을 의미한다. 진행파와 소멸파의 파수 k_m 과 $K_{m,n}$ 는 모두 실수이며, Eq. (3)의 산관계식으로부터 계산할 수 있다.

또한, Eqs. (1)과 (2)에 사용된 l_m 과 $\lambda_{m,n}$ 은 다음 Eq. (4)와 같이 계산된다.

트렌치 지형 위를 진행하는 파는 Fig. 1과 같이 크게 세 구간으로 나누어서 표현할 수 있으며 각각의 영역에서의 포텐셜은 Eqs. (5) ~ (7)과 같이 표현할 수 있다. Eq. (5)는 입사파와 반사파를 나타내며, Eq. (6)은 투과파와 반사파 그리고 Eq. (7)은 투과파를 의미한다.

$$\Phi_m^+ = \left\{ A_m^+ e^{i l_m x} \cosh k_m (h_m + z) + \sum_{n=1}^{\infty} B_{m,n}^+ e^{-\lambda_{m,n} x} \cos K_{m,n} (h_m + z) \right\} e^{i(k_y - \omega t)} \quad (1)$$

$$\Phi_m^- = \left\{ A_m^- e^{-i l_m x} \cosh k_m (h_m + z) + \sum_{n=1}^{\infty} B_{m,n}^- e^{+\lambda_{m,n} x} \cos K_{m,n} (h_m + z) \right\} e^{i(k_y - \omega t)} \quad (2)$$

$$\omega^2 = g k_m \tanh k_m h_m, \quad \omega^2 = -g K_{m,n} \tan K_{m,n} h_m \quad (3)$$

$$l_m = (k_m^2 - k_y^2)^{1/2}, \quad \lambda_{m,n} = (K_{m,n}^2 + k_y^2)^{1/2} \quad (4)$$

$$\Phi_1 = \left\{ A_1^+ e^{i l_1 x} \cosh k_1 (h_1 + z) \right\} e^{i(k_y - \omega t)} + \left\{ A_1^- e^{i l_1 x} \cosh k_1 (h_1 + z) + \sum_{n=1}^{\infty} B_{1,n}^- e^{+\lambda_{1,n} x} \cos K_{1,n} (h_1 + z) \right\} e^{i(k_y - \omega t)} \quad (5)$$

$$\Phi_2 = \left\{ A_2^+ e^{i b_2 x} \cosh k_2 (h_2 + z) + \sum_{n=1}^{\infty} B_{2,n}^+ e^{-\lambda_{2,n} x} \cos K_{2,n} (h_2 + z) \right\} e^{i(k_y y - \omega t)} \quad (6)$$

$$+ \left\{ A_2^- e^{i b_2 x} \cosh k_2 (h_2 + z) + \sum_{n=1}^{\infty} B_{2,n}^- e^{+\lambda_{2,n} x} \cos K_{2,n} (h_2 + z) \right\} e^{i(k_y y - \omega t)}$$

$$\Phi_3 = \left\{ A_3^+ e^{i b_3 x} \cosh k_3 (h_3 + z) + \sum_{n=1}^{\infty} B_{3,n}^+ e^{-\lambda_{3,n} x} \cos K_{3,n} (h_3 + z) \right\} e^{i(k_y y - \omega t)} \quad (7)$$

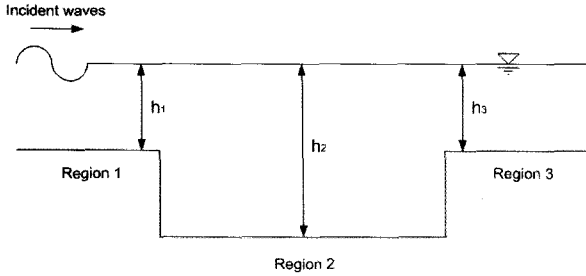


Fig. 1. Definition sketch of the trench

Eqs. (1) 과 (2)의 미지수를 계산하기 위해 다음의 적 합조건을 사용하였다. 첫 번째는 x 축 방향의 흐름율이 연속, 두 번째는 압력이 연속임을 의미한다.

$$\Phi_m = \Phi_{m+1} \quad (x = x_m, -h_m \leq z \leq 0) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Phi_m}{\partial x} = \frac{\partial \Phi_{m+1}}{\partial x} \quad (x = x_m, -h_m \leq z \leq 0) \quad (9)$$

Eqs. (8) 과 (9)를 이용하여 원하는 수의 방정식을 얻 기 위해 다음과 같이 수심적분을 수행하였다.

$x = x_m, -h_m > -h_{m+1}$ 인 경우,

$$\int_{-h_m}^0 \frac{\partial \Phi_m}{\partial x} \cosh [k_{m+1} (h_{m+1} + z)] dz \quad (10)$$

$$= \int_{-h_{m+1}}^0 \frac{\partial \Phi_{m+1}}{\partial x} \cosh [k_{m+1} (h_{m+1} + z)] dz$$

$$\int_{-h_m}^0 \Phi_m \cosh [k_m (h_m + z)] dz \quad (11)$$

$$= \int_{-h_m}^0 \Phi_{m+1} \cosh [k_m (h_m + z)] dz$$

$$\int_{-h_m}^0 \frac{\partial \Phi_m}{\partial x} \cos [K_{m+1,n} (h_{m+1} + z)] dz \quad (12)$$

$$= \int_{-h_{m+1}}^0 \frac{\partial \Phi_{m+1}}{\partial x} \cos [K_{m+1,n} (h_{m+1} + z)] dz$$

$$\int_{-h_m}^0 \Phi_m \cos [K_{m,n} (h_m + z)] dz \quad (13)$$

$$= \int_{-h_m}^0 \Phi_{m+1} \cos [K_{m,n} (h_m + z)] dz$$

$x = x_m, -h_m < -h_{m+1}$ 인 경우,

$$\int_{-h_m}^0 \frac{\partial \Phi_m}{\partial x} \cosh [k_m (h_m + z)] dz \quad (14)$$

$$= \int_{-h_{m+1}}^0 \frac{\partial \Phi_{m+1}}{\partial x} \cosh [k_m (h_m + z)] dz$$

$$\int_{-h_{m+1}}^0 \Phi_m \cosh [k_{m+1} (h_{m+1} + z)] dz \quad (15)$$

$$= \int_{-h_{m+1}}^0 \Phi_{m+1} \cosh [k_{m+1} (h_{m+1} + z)] dz$$

$$\int_{-h_m}^0 \frac{\partial \Phi_m}{\partial x} \cos [K_{m,n} (h_m + z)] dz \quad (16)$$

$$= \int_{-h_{m+1}}^0 \frac{\partial \Phi_{m+1}}{\partial x} \cos [K_{m,n} (h_m + z)] dz$$

$$\int_{-h_{m+1}}^0 \Phi_m \cos [K_{m+1,n} (h_{m+1} + z)] dz \quad (17)$$

$$= \int_{-h_{m+1}}^0 \Phi_{m+1} \cos [K_{m+1,n} (h_{m+1} + z)] dz$$

Eqs. (1) 과 (2)를 경계조건에 대입하면 미지수가 $2(m-1) \times (n+1)$ 인 선형행렬식이 유도되며, 선형행렬 식을 해석하여 미지수인 진폭의 값을 계산할 수 있다. 반사율은 다음과 같이 정의된다.

$$R = \frac{|A_1^-|}{|A_1^+|} \quad (18)$$

3. 모형의 검증

고유함수 전개법을 실제 구간에서 사용하기 위해서는 적절한 수의 구간(m)과 소멸파 성분(n)을 사용해야 한다. 지금까지의 연구들은 고유함수 전개법을 사용함에 있어 이에 관한 명확한 기준을 보여주지 않았기 때문에 본 연구에서는 파랑 변형에 큰 영향을 끼치는 요소인 바닥면의 기울기 및 곡률이 변화하는 지형을 Figs. 2 and 5와 같이 구성하여 m 및 n 의 변화에 따른 해의 수렴성을 살펴보았다. 기울기의 변화에 따른 지형 변화의 수심은 Eq. (19)와 같으며, 여기서 h_1 은 초기 입사파랑의 수심, h_2 는 해저지형 변화 후의 일정수심이며, b 는 경사를 갖는 지형의 바닥의 폭이다. 원호형 바닥을 갖는 지형에서의 수심은 Eq. (20)와 같다. 먼저, 기울기가 해의 수렴에 끼치는 영향을 살펴보았다. Fig. 2에서 h_1 및 b 의 값을 각각 0.6 m 및 0.2 m 로 고정된 후 h_2 의 값에 변화를 주어 완만한 경사부터 급격한 경사까지 고려하였으며 상대수심값은 0.167과 1.336을 사용하여 천해역과 중간수심영역에서 계산을 하였다.

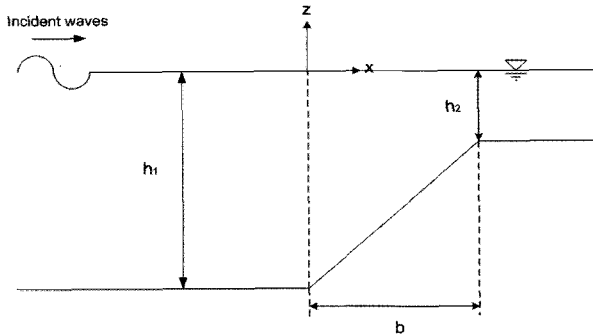
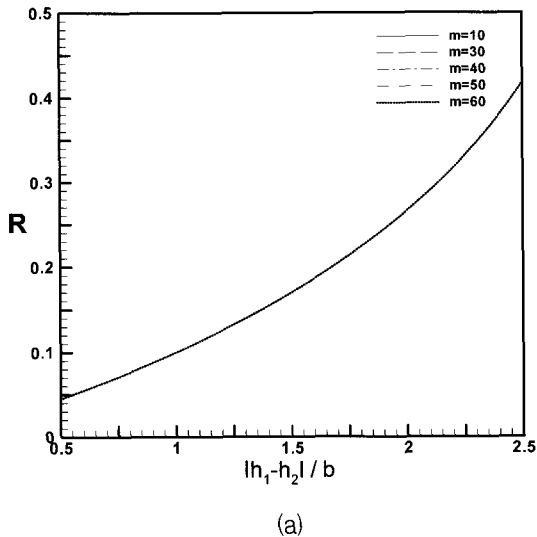


Fig. 2. Definition sketch of computational domain



$$h(x) = \begin{cases} h_1, & x \leq 0 \\ \frac{h_2 - h_1}{b}x + h_1, & 0 \leq x \leq b \\ h_2, & x \geq b \end{cases} \quad (19)$$

Fig. 3은 계단수에 변화를 주면서 기울기에 따른 반사율을 계산한 결과이다. 천해역에서는 기울기에 상관없이 $m=10$ 에서 수렴하였으나 중간수심영역에서는 기울기가 증가함에 따라 수렴하기 위한 구간의 수가 증가하여 기울기 2.5에서는 $m=40$ 정도에서 반사율이 수렴하는 것을 알 수 있다. 다음으로 소멸파의 영향을 계산해보았다. Fig. 4는 m 을 40으로 고정된 후 소멸파 수에 변화를 주면서 기울기에 따른 반사율을 계산한 그림이다. 중간수심 영역의 급경사에서만 소멸파의 영향이 약간 있을 뿐 전체적으로 소멸파의 영향을 받지 않는 것으로 확인되었다.

다음으로 바다 지형의 곡률이 해의 수렴에 끼치는 영향을 살펴보았다. 곡률이 변화하는 지형을 고려하기 위해 조용식 등(1998)이 사용한 Fig. 5와 같은 지형을 사용하였으며 이 경우 바다 지형은 Eq. (20)으로 나타낼 수 있다. θ 값에 변화를 주어 곡률값에 변화를 주었다.

$$h(x) = \begin{cases} h_1 + \frac{r}{\tan\theta} - \left[\left(\frac{r}{\sin\theta} \right)^2 - (x - x_0)^2 \right]^{1/2}, & |x - x_0| < r \\ h_1, & |x - x_0| \geq r \end{cases} \quad (20)$$

여기서, x_0 는 원호중심에서 x 좌표, r 은 원호의 직선거리이며 θ 는 원호와 일정한 수심이 만나는 지점에서의

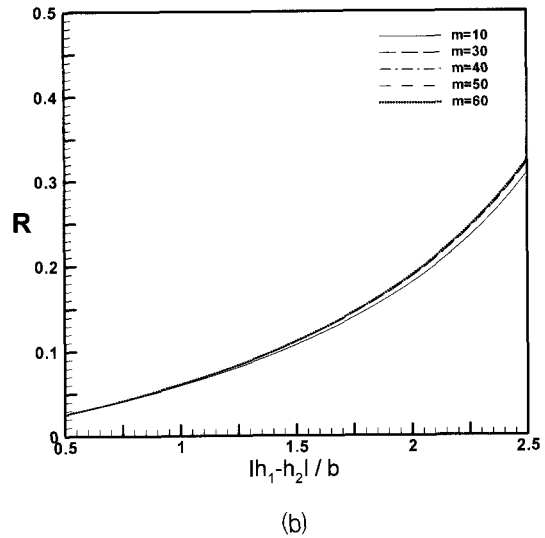


Fig. 3. Variation of reflection coefficients with slope for different numbers of steps:

(a) $k_1 h_1 = 0.167$; (b) $k_1 h_1 = 1.336$

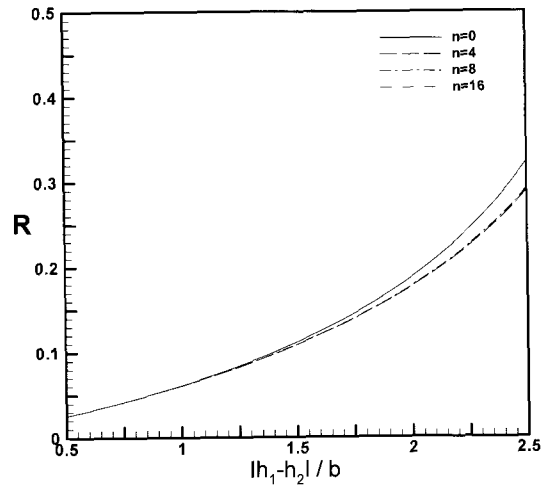
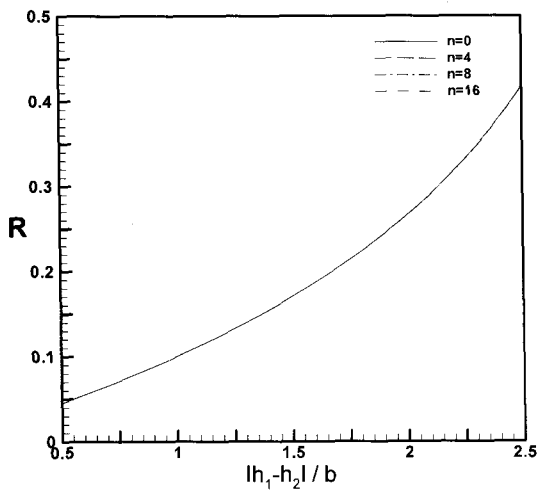


Fig. 4. Variation of reflection coefficients with slope for different numbers of evanescent modes:
(a) $k_1 h_1 = 0.167$; (b) $k_1 h_1 = 1.336$

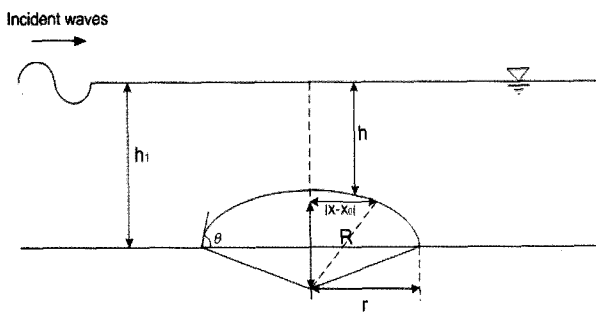


Fig. 5. Definition sketch of computational domain

바닥 경사각이다. Figs. 6 ~ 7은 천해역 및 중간수심 영역에서 $r=0.8$ m, $h_1=0.85$ m 로 고정하고 θ 에 따른

반사율을 계산한 그림이다. 앞의 결과와 비슷하게 천해역에서는 곡률의 변화에 대하여 거의 영향을 받지 않는 반면에 중간수심 영역에서는 곡률이 증가함에 따라 수렴하기 위한 m 의 값이 증가하였다. $m=40$ 으로 고정된 후 곡률의 변화에 따른 소멸과 수의 영향을 검토해 보았다.

기울기만 존재하는 경우의 결과와는 달리 바닥 곡률 항이 존재하는 경우에는 소멸과 성분이 반사율에 영향을 주었으며 $k_1 h_1 = 1.336$ 인 경우 소멸과 성분을 고려하지 않았을 경우에는 곡률항이 커지면 오차가 매우 커지는 것을 알 수 있다. 천해역과 중간수심영역 모두에서

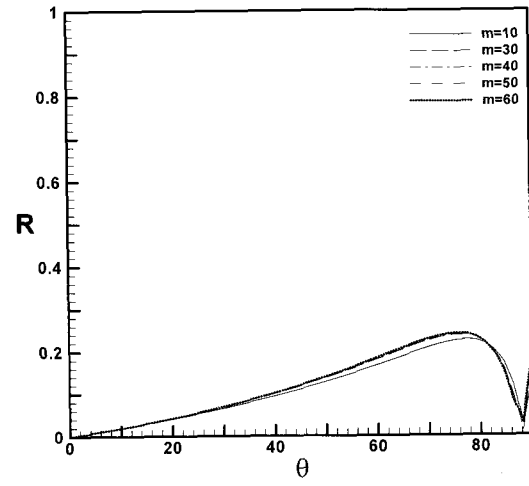
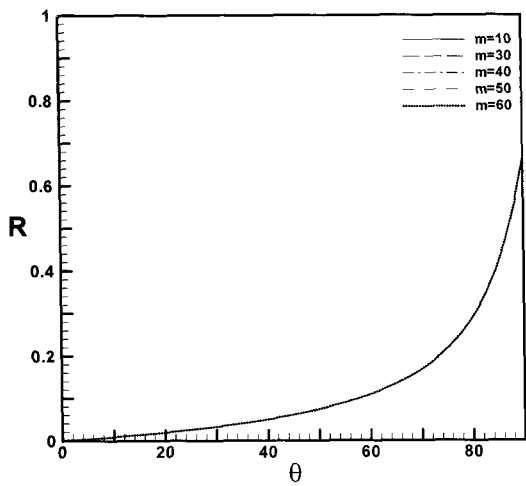


Fig. 6. Variation of reflection coefficients with angle for different numbers of step:
(a) $k_1 h_1 = 0.167$; (b) $k_1 h_1 = 1.336$

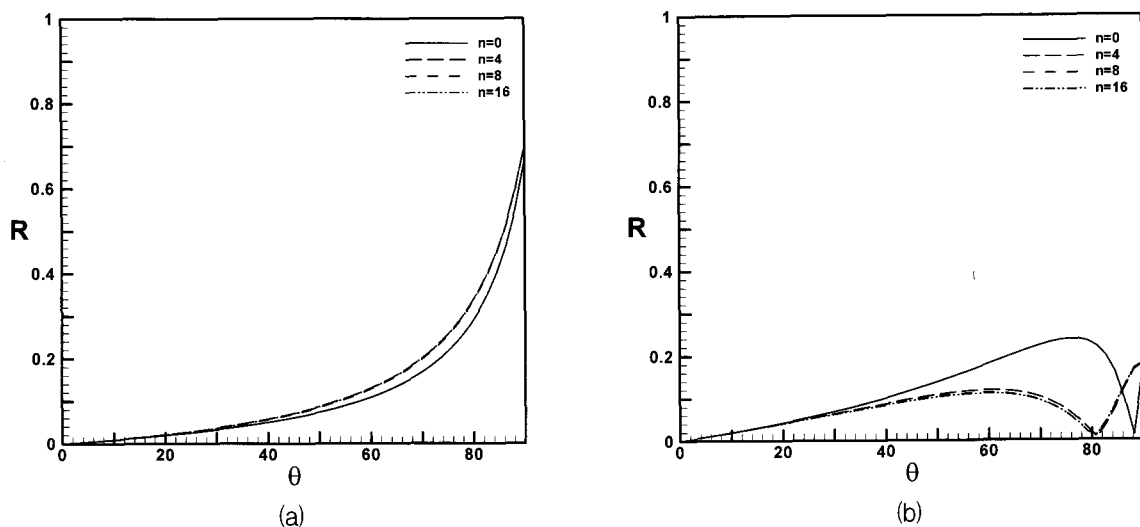


Fig. 7. Variation of reflection coefficients with angle for different numbers of evanescent modes:
 (a) $k_1h_1 = 0.167$; (b) $k_1h_1 = 1.336$

소멸파 성분의 개수가 8이상 되어야 반사율이 수렴하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 위의 결과를 참조하여 함몰지형에 대한 반사율을 계산할 때 $n = 16$, $m = 50$ 의 값을 사용하여 계산하였다.

4. 지형의 구성

다양한 형태의 함몰지형을 고려하기 위하여 Eqs. (21) 과 (22)를 사용하여 바닥 지형을 모의하였다. Eq. (21)에서는 바닥 경사의 폭에 변화를 주어 삼각형 형태에서 직사각형 형태가 되도록 하였으며 Eq. (22)에서는 차수에 변화를 주어 삼각형 형태에서 직사각형 형태가 되도록 하였다.

$$h(x) = \begin{cases} h_1, & b \leq x \\ \frac{(h_1 - h_0)x - \left(\frac{wh_1}{2} - h_0b\right)}{b - \frac{w}{2}}, & \frac{w}{2} \leq x \leq b \\ h_0, & \frac{w}{2} \geq x \end{cases} \quad (21)$$

여기서, h_0 는 함몰지형의 중심 수심, h_1 는 함몰지형을 제외한 지형에서의 일정수심, b 는 함몰지형의 중심수심에서부터 일정수심에 이르기까지의 거리를 나타내며, w 는 깊은 함몰지형의 바닥폭을 의미한다.

$$h(x) = h_0 \left(1 - \frac{|x|^\alpha}{a^\alpha}\right), \quad -b \leq x \leq +b \quad (22)$$

$$a = \frac{b}{\left(1 - \frac{h_1}{h_0}\right)^{1/\alpha}}$$

여기서, a 는 함몰지형을 자유수면까지 연장할 경우 함몰지형 중심 자유수면으로 연장된 가상의 지점까지의 거리에 해당하며, x 는 함몰지형의 중심에서 떨어진 거리를 나타낸다. Fig. 8(b)과 같이 $\alpha = 1$ 인 경우에는 삼각형 형태의 함몰지형이 되며, $\alpha = 2$ 인 경우 포물선 형태가 되고, α 값이 무한히 증가할수록 직사각형에 가까운 함몰지형이 된다.

Fig. 9는 함몰지형을 계산할 때 구성된 계단지형의 형상을 나타내며 계단지형의 구성은 수심이 변하는 지점에서부터 시작하여 일정한 수심이 되기 전까지 이루어진다. 그림에서 x_0 는 지형의 대칭축을 나타낸다.

5. 수치해석 결과

5.1 함몰지형의 w 값 변화와 α 값에 따른 반사율

$k_1h_1 = 0.167$, $k_1h_1 = 1.336$ 인 경우에 w 값과 α 값에 변화를 주면서 반사율을 계산하였다. 함몰지형의 폭(2b)은 $1.0L_1$, 수심(h_1)은 3.2 m, 그리고 트렌치 중심에서의 수심(h_0)은 6.4 m로 고정한 상태에서 w 값은 0부터 폭까지, α 값은 1부터 16까지 변화시키면서 반사율을 계산하였다. 여기서 L_1 은 h_1 에 해당하는 파장을 의미하며, w 는 함몰지형의 바닥의 폭을 의미한다. Fig. 10은 w 의 변화에 따른 반사율을 계산한 그림이다. $k_1h_1 = 0.167$ 인 경우 w 값이 증가함에 따라 반사율이 감소하다가 w 값이 30 m 근처에서 최소값이 된 후 다시 점진적으로 증가하는 경향을 보였으며, $k_1h_1 = 1.336$ 인 경우 w 값이 증가할수록 반사율도 꾸준히 증가하였다. 이러한

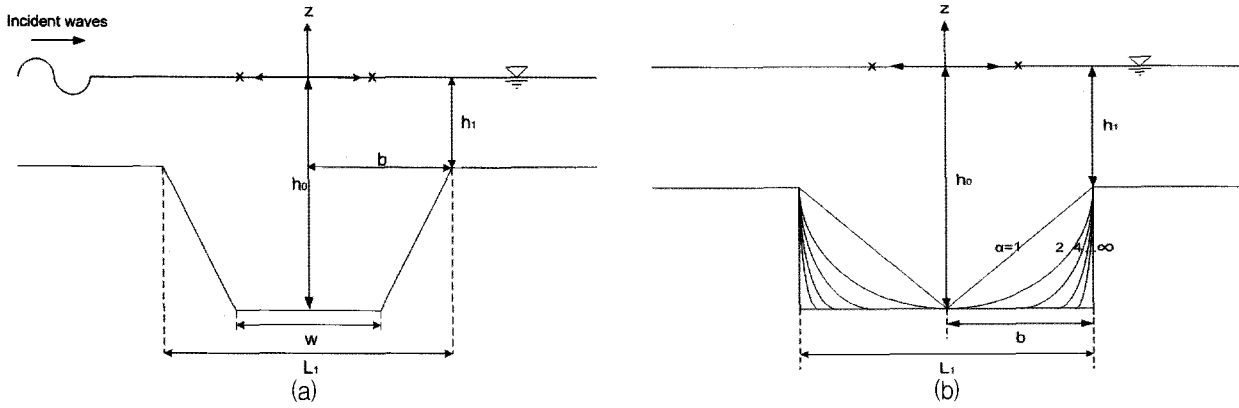


Fig. 8. Definition sketch of trench

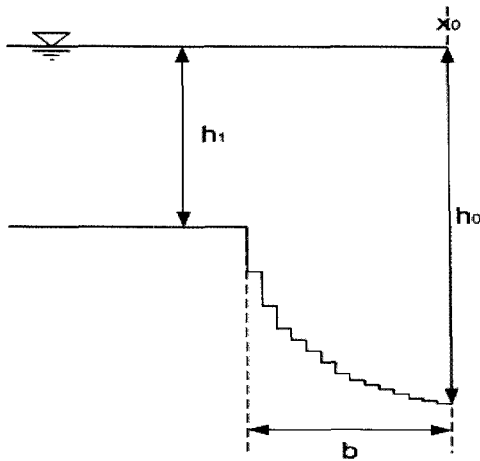


Fig. 9. Definition sketch for trench with stepped transitions

현상은 Bragg 현상으로 설명할 수 있으며, Bragg 현상이란 입사하는 파와 해저 지형에 의해 반사되는 파가 복합적으로 작용하여 특정한 조건에서 반사율이 매우

크게 또는 매우 작게 일어나는 현상을 의미한다(Davies and Heathershaw, 1984). 해저 지형의 모양이 입사파의 형태와 유사한 \sin 또는 \cos 함수의 형태를 취할 경우, 입사파의 파장이 해저 지형 파장의 2배가 되는 지점에서 반사율이 크게 일어나지만 해저 지형의 모양이 다를 경우 반사율이 최대 또는 최소로 발생할 때의 조건 또한 달라진다. 이러한 경우, 각각의 지형에 대하여 수치 모델을 적용하여 반사율과 지형과의 상관관계를 찾아야 하며 본 연구의 결과에서 나타난 바와 같이 w 값이 30 m 근처에서 반사율이 최소값이 되는 것을 발견할 수가 있었다. Fig. 11은 α 값에 따른 반사율의 변화를 계산한 결과이다. $k_1 h_1 = 0.167$ 및 1.336 두 경우 모두 α 값이 증가할수록 반사율이 증가하였다. 따라서 위의 결과를 바탕으로 천해영역과 중간수심 영역 모두에서 직사각형 형태의 함몰지형이 파랑을 최대로 반사시키며, 최대반사율이 발생하는 것을 알 수 있었다.

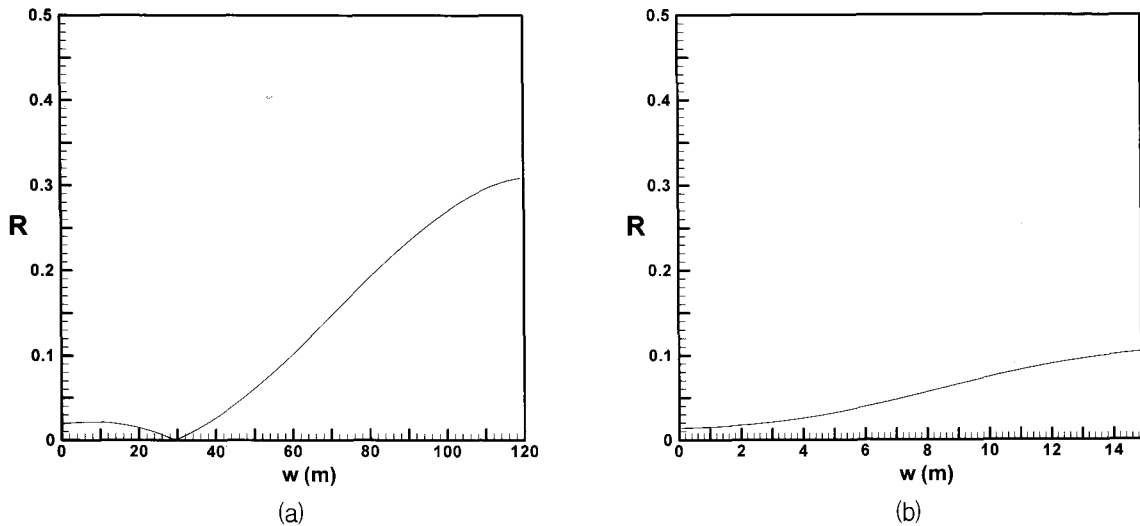


Fig. 10. Variation of reflection coefficients with width of trench bottom:

(a) $k_1 h_1 = 0.167$; (b) $k_1 h_1 = 1.336$

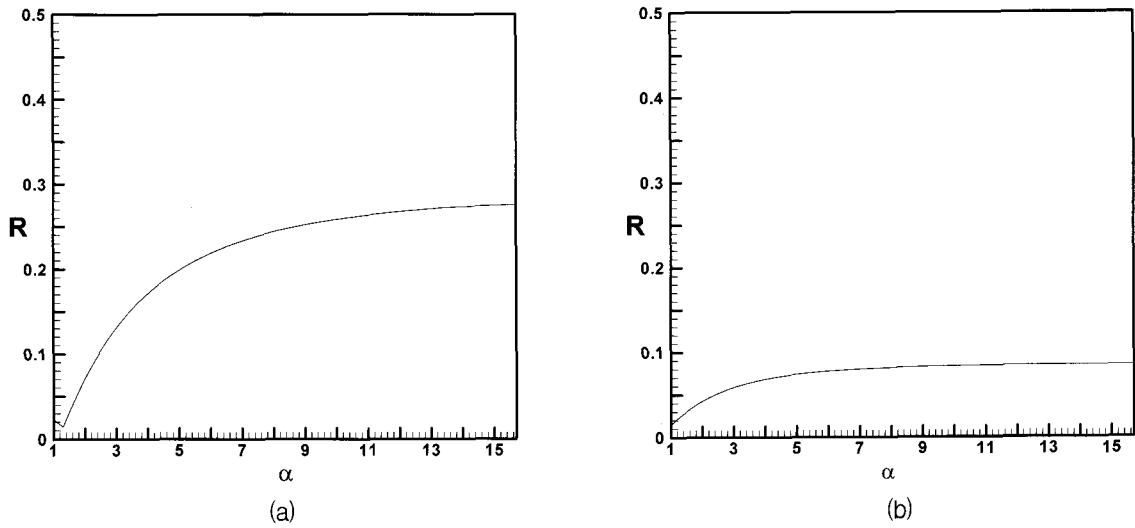


Fig. 11. Variation of reflection coefficients with power of distance:
 (a) $k_1h_1 = 0.167$; (b) $k_1h_1 = 1.336$

5.2 함몰지형의 수심변화에 따른 반사율

본 장에서는 5.1장의 결과에서 도출된 최대반사율을 가지는 단면($w=2b$)의 조건에서 수심 h_0 의 변화에 따른 반사율을 계산해보았다. Fig. 12는 수심 h_1 은 3.2 m, 폭 b 는 $0.5L_1$ 로 고정한 후 h_0 는 3.2 m 부터 16.0 m 까지 0.1 m 간격으로 증가시키면서 반사율을 계산한 결과이다. 천해역에서는 수심 h_0 가 증가함에 따라 반사율은 처음에는 증가하다가 $h_0 = 7.0$ m 부근에서 감소하고 12.0 m 근처에서 다시 점진적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 중간수영역에서는 h_0 가 증가함에 따라 반사율이 증가하다가 6.4 m 부근에서 최대값을 가진 후 점

진적으로 감소하다 15 m 부터 일정하게 유지되어 나타났다. 위의 결과로부터 함몰지형이 최적의 효율을 가지기 위해서는 천해역과 중간수심영역 모두에서 함몰지형의 수심까지 고려해야 함을 알 수 있다.

5.3 함몰지형의 최적단면에서 열수에 따른 반사율 해석

본 장에서는 5.1장과 5.2장을 통해 구한 최적단면을 Fig. 13과 같이 2열 또는 3열로 배열되었을 때의 반사율을 해석하였다. Fig. 14는 각각 2열 및 3열로 배치된 함몰지형에 대해 함몰지형 사이의 간격 d 를 변화시키면서 반사율을 계산한 결과이다. 간격 d 는 0.1 m 부터 입사파 주기의 길이만큼 변화시켰다.

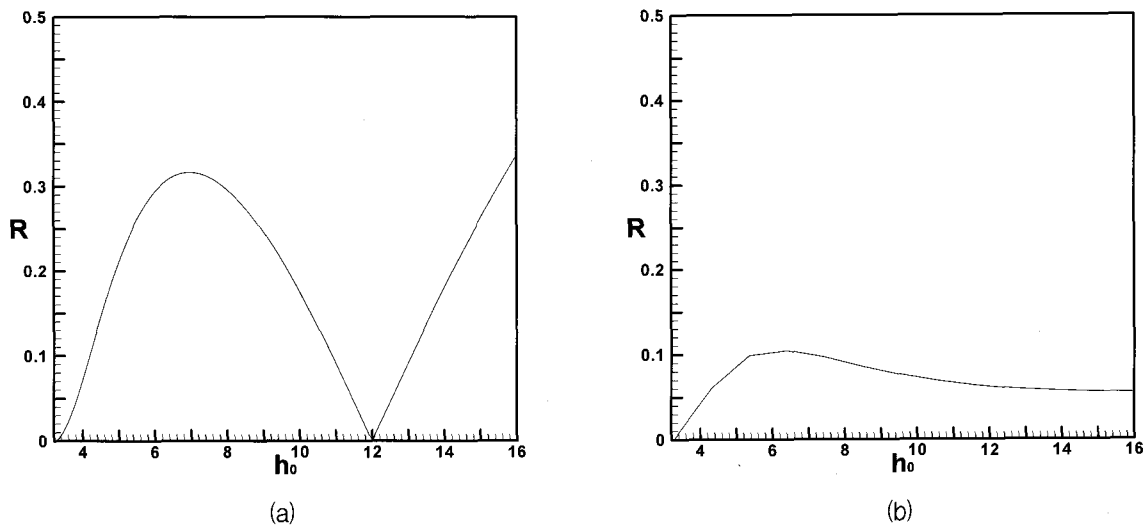


Fig. 12. Variation of reflection coefficients with central water depth:
 (a) $k_1h_1 = 0.167$; (b) $k_1h_1 = 1.336$

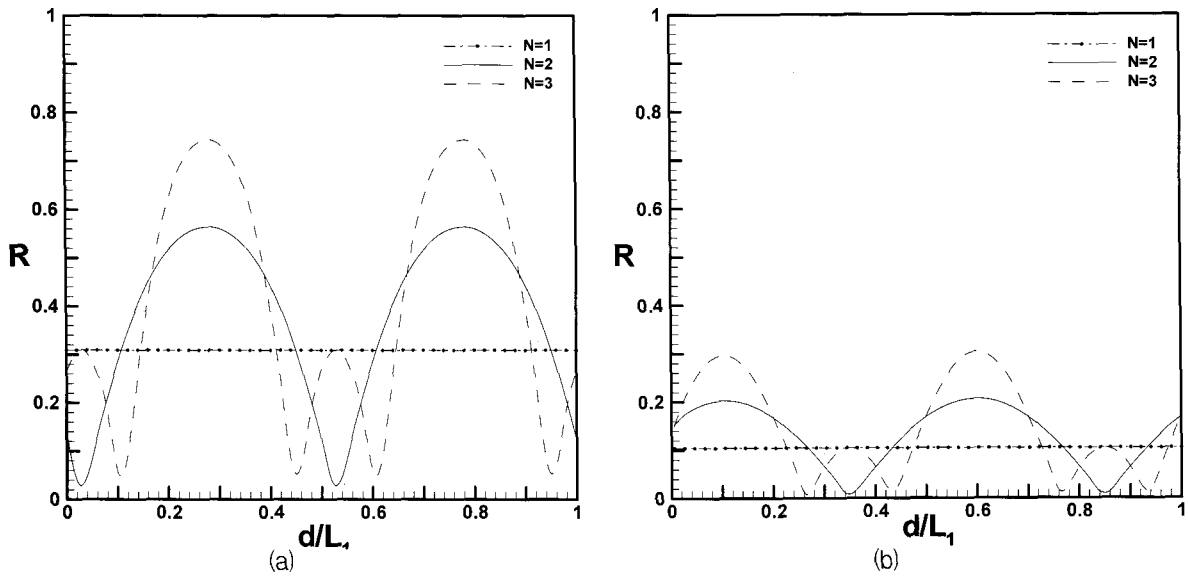


Fig. 14. Variation of reflection coefficients with relative distance between structures:
 (a) $k_1 h_1 = 0.167$; (b) $k_1 h_1 = 1.336$

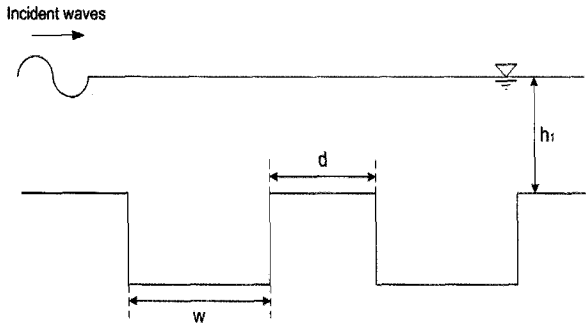


Fig. 13. Definition sketch of multi-arrayed trench

천해역에서의 최대 반사율 및 최저 반사율은 2열일 경우 각각 0.56, 0.036의 값을 가졌으며 3열의 경우에는 각각 0.74, 0.055의 값을 가졌다. 마찬가지로 중간수심영역에서도 함몰지형의 열수가 많아질수록 에너지 반사율은 증가하고 있으며, 2열일 때 최대반사율 및 최저 반사율은 0.2, 0.008이며 3열일 때 0.3, 0.008로 계산되었다. 이러한 결과는 함몰지형의 수가 다수일 경우 함몰지형간의 간격에 따라 반사율을 크게 증가하거나 오히려 함몰지형이 단독으로 존재하는 경우보다 반사율이 낮은 경우가 발생할 수도 있음을 의미한다. 특이할만한 사실은 d 값이 증가함에 따라 반사율이 동일한 형태로 반복되어 나타나며, $N=2$ 인 경우 최소반사율을 가지는 지점에서 $N=3$ 인 경우에는 함몰지형이 단독으로 존재하는 경우에 발생하는 반사율과 동일한 값을 가지는 국부최대값이 발생하였다.

6. 결론

본 연구에서는, 천해역과 중간수심영역에서 고유함수 전개법을 이용하여 다양한 형태의 함몰지형에 대해 반사율을 계산한 후 최대의 반사율을 가지는 함몰지형의 형태를 제시하였다. 두 가지 형태의 함몰지형에 대해 반사율을 계산한 결과 천해역과 중간수심영역 모두에서 함몰지형의 형태가 직사각형에 가까워질수록 반사율이 크게 나타나는 것으로 관측되었다. 수심의 변화에 따른 반사율은 $k_1 h_1 = 0.167$ 인 경우, 함몰지형의 중간 수심 h_0 가 증가함에 따라 반사율이 주기적으로 변화하지만, $k_1 h_1 = 1.336$ 에서는 h_0 의 값이 약 7.0 m 근처에서 최대값을 가지며 그 이후에는 꾸준히 감소를 하였다. 일정한 간격을 가지는 다열 함몰지형에서는, 함몰지형간의 간격 d 에 따른 반사율의 변동이 크게 일어났으며 이러한 경향은 열수가 늘어남에 따라 증가하였다. 위와 같은 결과를 통해 $k_1 h_1 = 0.167$ 에서는 함몰지형의 형상은 직사각형이며 2열 이상이고 $d/L_1 = 0.28$ 의 지형형상이 파랑의 저감효과에 대한 효율성이 가장 높으며, $k_1 h_1 = 1.336$ 에서는 함몰지형의 형상은 직사각형이며 $d/L_1 = 0.1$ 인 경우에 파랑 저감 효과가 가장 높았다.

천해역과 중간수심영역을 표현하기 위해 상대수심값을 대표적으로 0.167과 1.336을 사용하였다. 결과에서 나타났듯이 상대수심값에 의해 함몰지형의 반사특성이 다르게 나타날 수 있기 때문에 잠재나 함몰지형을 실제

지형에 적용할 경우 그 지역의 파랑 특성을 먼저 파악한 후 거기에 맞추어 적용할 필요성이 있다.

감사의 글

본 과제는 국립해양조사원의 연구비지원으로 수행되어 이에 사의를 표합니다.

참고 문헌

정재상, 강규영, 조용식 (2007). “다열 불투과성 수중방파제를 통과하는 다방향 불규칙파랑의 해석.” **한국해안해양공학회지**, 한국해안해양공학회, 제19권, 제1호, pp. 29-37.

조용식, 이창훈 (1998). “수심이 변하는 지형을 통과하는 파랑의 반사율과 통과율 산정.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제18권, 제II-4호, pp. 351-358.

Berkhoff, J.C.W. (1972). “Computation of combined refraction-diffraction.” *13th Int. Conf. Coastal Engineering*, No. 1, pp. 471-490.

Davies, A.G. and Heathershaw, A.D. (1984). “Surface-wave propagation over sinusoidally varying topography.” *J. of Fluid Mechanics*, No.

144, pp. 419-443.

Evans, D.V. (1975). “The transmission of deep-water waves across a vortex sheet.” *J. of Fluid Mechanics*, No. 68, pp. 389-401.

Jung, T.H. (2007). “Analytical solutions for waves propagating over depressions of seabed.” *Ph.D. Thesis, School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul, South Korea*.

Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. (1983). “Propagation of obliquely incident water waves a trench.” *J. of Fluid Mechanics*, No. 133, pp. 47-63.

O’Hare, T.J. and Davies, A.G. (1992). “A new model for surface-wave propagation over undulating topography.” *Coastal Engineering*, No. 18, pp. 251-266.

Takano, K. (1960). “Effects d’un obstacle parallèlepipédique sur la propagation de la houle.” *Houille Blanche*, No. 15, pp. 247-267.

(논문번호:07-52/접수:2007.06.04/심사완료:2007.10.29)